

分类号: V262; TG306

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120143



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 非对称截面铝型材滚弯成形
回弹预测及调控策略

论 文 作 者 李 凡
校 内 导 师 王雷（教授）王安恒（讲师）
校 外 导 师 李红伟（工程师）
专业学位类别 机 械
研究方向（领域） 塑性成型

论文提交日期: 2024 年 5 月 30 日

分类号：V262；TG306

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120143

非对称截面铝型材滚弯成形回弹预测及调控策略

Springback prediction and control strategy for roll bending of aluminum
profiles with asymmetric cross section

学生姓名： 李凡

校内导师： 王雷（教授） 王安恒（讲师）

校外导师： 李红伟

专 业： 机械

研究方向： 塑性成型

论文答辩日期：2024 年 5 月 30 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：李凡

日期：2024 年 05 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在___年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

李凡

指导教师签名：



日期：2024年 05 月 20 日

日期：2024年 05 月 20 日

非对称截面铝型材滚弯成形回弹预测及调控策略

摘要

随着“中国制造 2025”的提出，制造业再一次活跃在人们的视野当中。拉弯、滚弯、冲压等传统的加工工艺也被升级改造。本文研究滚弯成形工艺，其高效的模具利用率和便捷的柔性加工特点，在众多领域得到了广泛应用。同时在大尺寸，非对称截面型材的成形方面，该工艺方式也拥有众多优势和较高的成形精度。鉴于上述优势，航空、武器装备等开始在此领域重视起来，但是其特殊的成形方式和成形波动等问题一直困扰着该行业的发展。

故本文将设计非对称截面型材的研究试验和数学建模模型。针对非对称 Z 截面 7075-O 和 7475-O 两种型材作为研究对象，充分考虑滚弯工艺参数的影响和精确预测模型的建议及调控策略的研究。基于 ABAQUS 建立数值模型，基于其内核可开发性，搭建二次开发环境模型以及滚弯道次等工艺参数的研究。本文主要由以下几点展开研究：

(1) 鉴于铝合金型材成形过程中波动性较强的问题，在非对称截面 Z 型材滚弯回弹试验中，需根据具体情况建立适合的本构模型，并调用 Wx.Python 库设计前处理 GUI 交互界面程序和参数设置衔接程序，将其打包编写脚本文件，为后续实验搭建平台。进而，通过搭建的脚本文件多次实验确定最佳滚弯道次。由于 ABAQUS 内核处理用户材料本构局限性比较强，故 ABAQUS 提供用户子程序接口，用户可以充分考虑材料性能波动对滚弯回弹半径的影响。本文基于中性层偏移研究各向同性弹塑性本构模型，采用 VUMAT 显式分析法对动态型材本构模型二次开发，通过 ABAQUS 二次开发并通过与试验数据、理论数据、内核处理数据和 VUMAT 子程序数据做比较，最终预测滚弯回弹半径。

(2) 以截面形状为 Z 字形的 7075-O 和 7475-O 铝合金型材为研究对象, 围绕非对称截面 Z 型材滚弯成形过程中的失稳起皱这一缺陷, 通过简支梁变形理论建立非对称截面型材滚弯受力分析模型, 根据试验对铝合金试样进行 3 个方向(与滚弯方向成 0° 、 45° 和 90°)的拉伸试验, 计算截面内力分布面引起的收缩力矩和各向异性屈服应变比, 基于 Hill48 屈服准则编写二次开发子程序, 揭示非对称截面滚弯失稳起皱在 Hill48 二次开发环境下的起皱量规律。

(3) 以截面形状为 Z 字形的 7075-O 和 7475-O 铝合金型材为研究对象, 以非对称截面 Z 型材滚弯回弹量最小为成形约束条件, 以预测模型结果误差最小为研究目标。基于 BP 神经网络建立非对称截面型材滚弯回弹预测模型, 利用四轴滚弯机和拉丁超立方实验获得神经网络样本信号, 并建立 Matlab BP 神经网络回弹预测模型, 解决滚弯回弹参数和成形半径回弹量之间非线性映射关系。最后调用已训练预测模型对非对称截面 Z 型材滚弯回弹参数进行合理调控。

(4) 在实验环节, 本文将根据滚弯实验分析出不同影响因素对回弹量大小的影响; 通过多次滚弯实验, 分析出不同成型半径的滚弯道次数目; 根据工艺方法及调控策略, 提高回弹预测精度。

关键词: 非对称 Z 截面型材; 四轴滚弯; 回弹和缺陷预测; 控制策略

Springback prediction and control strategy for roll bending of aluminum profiles with asymmetric cross section

ABSTRACT

It is "China system 2025", and the system is rebuilt. It is a modification of the work of the machining process such as the abduction, the scoop, and the fall. In this study, we used a high-performance tool to measure the quality of the machine. At the same time, there is a large shredded, nonexclusive cut face type material forming area, and the molding method is a large amount of the molding accuracy. This is the first time that we are able to take advantage of the fact that we will be able to take advantage of the fact that we are able to take advantage of the special wave shaping method and the molding wave.

The main text of this thesis is the non-geometric and diagonal plane model. This study is based on the model of the Z cut plane of 7075-O and 7475-O. The abacus building number model is based on the degree of core instability, and the second order behavior of the building. This thesis mainly conducts research on the following points:

(1) In view of the strong fluctuation problem in the forming process of aluminum alloy profiles, it is necessary to establish a suitable constitutive model based on the specific situation and call Wx in the roll bending rebound test of asymmetric cross-section Z-profiles Before designing the Python library, the GUI interaction interface program and parameter setting linkage program are processed, packaged and written

into script files to build a platform for subsequent experiments. Furthermore, the optimal number of rolling curves was determined through multiple experiments using the constructed script file. Due to the strong limitations of the ABAQUS kernel in handling user material constitutive relationships, ABAQUS provides user subroutine interfaces, and allows users to fully consider the impact of material performance fluctuations on the roll bending rebound radius. This thesis is based on the study of isotropic elastic-plastic constitutive models using neutral layer displacement. The VUMAT explicit analysis method is used for secondary development of dynamic profile constitutive models. ABAQUS is used for secondary development and compared with experimental data, theoretical data, kernel processing data, and VUMAT subroutine data to ultimately predict the roll bending rebound radius.

(2) Taking 7075-O and 7475-O aluminum alloy profiles with a Z-shaped cross-section as the research object, this thesis focuses on the defect of instability and wrinkling during the rolling and bending process of asymmetric cross-section Z-profiles. A force analysis model for asymmetric cross-section profiles is established through the theory of simply supported beam deformation. Based on the experiment, tensile tests are conducted on aluminum alloy samples in three directions (0° , 45° , and 90° to the rolling direction) to calculate the shrinkage moment and anisotropic yield strain ratio caused by the internal force distribution surface of the cross-section. Based on the Hill48 yield criterion, a secondary development subroutine is developed to reveal the wrinkling law of instability and wrinkling in asymmetric cross-section rolling and bending in the Hill48 secondary development environment.

(3) The 7075-O and 7475-O aluminum alloy profiles with a Z-shaped cross-

section are taken as the research object, and the minimum rolling rebound of asymmetric cross-section Z-profiles is taken as the forming constraint condition. The research goal is to minimize the prediction model result error. Based on BP neural network, a prediction model for springback in asymmetric section profile rolling is established. The neural network sample signals are obtained using a four axis rolling machine and Latin hypercube experiments, and a Matlab BP neural network springback prediction model is established to solve the nonlinear mapping relationship between rolling springback parameters and forming radius springback. Finally, the trained prediction model is used to adjust and control the springback parameters of asymmetric Z section roll bending reasonably.

(4) In the experimental section, this thesis will analyze the impact of different influencing factors on the size of rebound based on the rolling and bending experiment; Through multiple rolling and bending experiments, analyze the number of rolling and bending paths with different forming radii; Improve the accuracy of rebound prediction based on process methods and control strategies.

Keywords: Asymmetric Z-section profile; four roll-bending processes; springback and defect prediction; control strategy

目 录

摘 要.....	V
ABSTRACT.....	VII
目 录.....	I
插图清单.....	IV
表格清单.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 型材弯曲回弹半径问题的研究.....	3
1.2.2 型材弯曲失稳起皱的研究.....	5
1.3 主要研究内容及章节安排.....	7
1.3.1 研究内容.....	7
1.3.2 章节安排.....	8
第 2 章 二次开发滚弯回弹研究.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 Z 型材滚弯模型建立	12
2.2.1 中性层偏移机理.....	12
2.3 ABAQUS 二次开发.....	14
2.3.1 模型前处理脚本搭建.....	15
2.3.2 用户子程序.....	15
2.3.3 本构模型建立.....	17
2.3.4 VUMAT 四轴滚弯实验模拟.....	19
2.4 结果对比.....	21
2.4.1 ABAQUS 子程序模拟结果.....	21

2.4.2 回弹结果对比验证.....	22
2.5 本章小结.....	26
第 3 章 滚弯失稳起皱及控制策略.....	27
3.1 引言.....	27
3.2 Hill48 各向异性模型建立.....	27
3.2.1 Hill48 模型.....	27
3.2.2 Hill48 二次开发模型建立.....	29
3.3 失稳起皱过程研究.....	29
3.3.1 失稳起皱过程及影响因素.....	29
3.3.2 失稳起皱有限元分析.....	34
3.3.3 基于 Hill48 二次开发有限元分析.....	35
3.4 非对称截面型材失稳起皱预测.....	37
3.4.1 失稳起皱能量准则.....	37
3.4.2 失稳起皱模型建立.....	38
3.5 失稳起皱的控制策略.....	39
3.6 本章小结.....	41
第 4 章 BP 神经网络滚弯回弹预测及参数调控策略研究.....	42
4.1 引言.....	42
4.2 非对称截面型材成形技术研究.....	42
4.2.1 滚弯成形方法.....	42
4.2.2 非对称截面型材有限元模拟.....	43
4.2.3 滚弯成形数值模拟.....	44
4.3 拉丁超立方方法设计试验.....	45
4.3.1 设计变量的选取.....	45
4.3.2 拉丁超立方实验设计.....	46
4.4 建立滚弯回弹神经网络预测模型.....	47
4.4.1 确定输入层与输出层变量.....	47
4.4.2 BP 神经网络建立.....	47
4.4.3 预测结果与精度分析.....	49

4.5 滚弯回弹工艺参数控制策略.....	50
4.5.1 输入层变量调控.....	50
4.5.2 调控结果与精度分析.....	51
4.6 本章小结.....	53
第 5 章 实验结果与分析.....	54
5.1 滚弯设备.....	54
5.2 滚弯实验方案.....	54
5.3 成形半径测量.....	56
5.4 成形半径分析.....	57
5.4.1 最佳滚弯道次分析.....	57
5.4.2 补偿偏差及误差分析.....	60
5.5 本章小结.....	62
第 6 章 结论与展望.....	63
6.1 全文总结.....	63
6.2 后续研究工作展望.....	64
参考文献.....	66
附录.....	74
攻读学位期间取得的成果及参研项目.....	76
致谢.....	77

插图清单

图 1-1 滚弯型材的应用	1
图 1-2 本文研究方案	9
图 1-3 章节体系结构	10
图 2-1 型材四轴滚弯成形的三维有限元模型	13
图 2-2 Z 型材结构示意图	14
图 2-3 VUMAT 子程序运行图	22
图 2-4 VUMAT 程序流程图	22
图 2-5 目标半径模拟云图	23
图 2-6 Z 截面型材半径回弹量的实验结果	24
图 2-7 回弹示意图	25
图 2-8 回弹量随目标成形半径的变化	26
图 2-9 回弹变化率	26
图 2-10 回弹量随目标成形半径的预测预测	27
图 3-1 二次开发失稳起皱模型建立	32
图 3-2 型材滚弯成形中失稳起皱及其变形原理	32
图 3-3 滚弯夹持力 P 对失稳起皱的影响	33
图 3-4 滚弯速度 V 对失稳起皱的影响	34
图 3-5 型材与模具间隙 G 对失稳起皱的影响	35
图 3-6 型材弯曲件局部失稳起皱的有限元模拟结果	36
图 3-7 Z 截面型材内弧面失稳起皱的分布规律	37

图 3-8 7075-O Z 截面型材内弧面失稳起皱对比验证分析	38
图 3-9 失稳起皱判别方法.....	40
图 4-1 滚弯过程示意图	47
图 4-2 数控四轴滚弯过程不同阶段的成形云图	48
图 4-3 拉丁超立方样本分布图.....	50
图 4-4 最优拉丁超立方样本分布图	51
图 4-5 神经网络模型.....	51
图 4-6 预测误差对比图.....	53
图 4-7 神经网络预测误差百分比.....	53
图 4-8 线性回归分析图.....	54
图 4-9 调控流程图	55
图 4-10 最佳滚轮抬升高度.....	56
图 5-1 Z 截面型材滚弯成形机床及工装	58
图 5-2 Z 截面型材外形尺寸	59
图 5-3 三坐标测量臂及测量位置	60
图 5-4 滚弯型材外形精度测量	61
图 5-5 模拟滚弯半径测量	61
图 5-6 增加滚弯道次后的型材表面质量	62
图 5-7 应力——滚弯道次分布	63
图 5-8 不同道次下精度随滚弯半径的分布	64
图 5-9 半径回弹补偿策略	65
图 5-10 基于补偿策略的成形偏差	66

表格清单

表 2-1 子程序 VUMAT 变量17

表 2-2 7475-O 铝合金材料属性19

表 2-3 7475-O 铝合金模拟结果21

表 2-4 7475-O 实验计算结果24

表 2-5 7075-O 实验计算结果24

表 3-1 滚弯工艺参数及其设定范围.....33

表 3-2 失稳起皱的正交试验结果43

表 3-3 失稳起皱的极差分析结果44

表 4-1 型材材料性能参数.....46

表 4-2 设计变量取值范围49

表 4-3 最优滚弯工艺参数56

表 5-1 铝合金化学成分.....59

表 5-2 Z 截面型材滚弯成形件参数59

表 5-3 Z 截面型材滚弯成形工艺参数59

表 5-4 成形半径分析65

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

科学技术飞速发展的步伐及不断更新，伴随着“中国制造 2025”新型战略的随即提出，高端装备制造业正经历着日新月异的巨大变化和难逢机遇。新战略的提出必定标志着制造业向诸如智能化、数字化、高效化等模式发展的新阶段迈进。在该背景下，通过技术创新和智能化生产，制造业能够实现更高水平的发展，提高产品质量和生产效率，推动整个产业链的升级和转型。航空型材产品的制造正向着数字化、智能化和高精度、高可靠性的方向迈进，这已经成为当下时代发展的新趋势。针对铝合金型材的框架结构设计，通常考虑材料选择、结构优化、强度设计、复合材料等因素^[1]。因航空铝型材具备轻量化、高强度、抗腐蚀性、可加工性和可回收再利用等优点，使其成为航空制造中常用的材料之一。这些优点使航空铝型材在飞机结构设计和制造中发挥着重要作用，能够满足航空装备弯曲零件结构性能的要求，典型的有飞机舱体，航天器蒙皮，飞机机翼等。铝合金材料相对于其他金属材料来说具有更轻的重量，有助于减轻飞机的整体重量。铝合金具有良好的抗腐蚀性能，可以在多种恶劣环境条件下使用，延长零部件的使用寿命。同时，铝合金易于加工成各种形状，可以用于生产复杂形状的弯曲件，满足弯曲件装备日益多样化的需求。铝合金型材弯曲件可以提供足够高的强度和刚度，保证飞机在飞行过程中的结构稳定性和安全性，是飞机制造过程中常用的材料之一。图 1-1 所示为航空铝型材应用于大型民用客机弯曲类零件的装备制造。



(a) 型材在民用飞机中的应用



(b) 型材在机身结构中的应用

图 1-1 滚弯型材的应用

传统航空铝合金型材弯曲件通常利用模具浇筑或压铸成形，该种生产工艺成本相对较高，效率较低。加之，铝合金型材弯曲件的截面形状及成形样式日趋复杂^[2]，采用模具加工的方

式无法满足复杂外形弯曲件的制造。滚弯成形制造铝合金型材弯曲件不需要模具，且对不同形状，不同规格的弯曲件均可以满足加工需求。滚弯成形只需通过改变工艺参数，便可灵活地调整弯曲角度和曲线形状，适用于各种复杂的曲线和弯曲需求。滚弯成形是无需使用特定的模具的一种常见的金属加工工艺^[3]，通过在滚轮间传递动力，使型材在辊轮的作用下逐渐弯曲成所需要的形状，适用于生产不同形状和规格的弯曲件。滚弯成形技术适用于生产批量较小、形状复杂的弯曲件。在航空领域中，滚弯成形可满足飞机零部件的设计要求，同时提高生产效率和降低生产成本^[4,5]。就类似的型材滚弯成形，在弯曲结束释放外载荷的同时会导致型材产生一些残余应力和形状变化。这些残余应力可能会影响零件的稳定性和性能，同时也会发生明显的半径回弹现象影响成形精度，因此在滚弯成形后需要进行适当的残余应力释放处理，以减轻这些影响^[6-8]。

1.1.2 研究意义

型材滚弯成形工艺是一种常见且有效的金属加工方法，具有以下优点和特点：高效性：型材滚弯成形工艺可以快速地将平板金属加工成所需的曲线或角度，提高生产效率^[9]。高精度：通过控制滚弯机的参数，如压力、速度和滚轮位置，可以实现对型材的精确预测和控制，确保加工后的型材符合设计要求。适用性：型材滚弯成形工艺适用于各种形状和尺寸的金属型材，如角钢、圆钢等，具有较强的通用性^[10]。成本效益：相对于其他加工方法，型材滚弯成形工艺通常具有较低的成本，节约材料和人力资源。工艺控制：滚弯成形过程中可以通过调整机器参数和操作技术，实现对型材变形过程的精确控制，从而获得更好的加工效果^[11,12]。

在型材的实际滚弯过程中，为了减小成形件缺陷，可以采取一些方法来提高成形质量和减少缺陷的发生。以下是一些常见的方法：优化滚弯参数：合理选择滚弯机的参数，如滚轮压力、滚轮间距、滚轮转速等，以确保成形过程中受力均匀，减小应力集中，从而降低缺陷的产生。控制型材材质：选择合适的型材材质，确保其具有良好的可塑性和延展性，以减少成形过程中的开裂和变形。减小滚弯变形量：通过分段滚弯、逐步滚弯等方式，减小每次滚弯的变形量，降低应力集中，减少缺陷的产生。采用适当的支撑和夹紧装置：在滚弯过程中，使用适当的支撑和夹紧装置，确保型材处于正确的位置，避免振动和错位，减少缺陷的发生。残余应力处理：在滚弯成形后，进行残余应力处理，如热处理、冷却处理等，有助于减轻残余应力对零件稳定性和性能的影响，减少缺陷的产生。通过以上方法的综合应用，可以有效减小型材滚弯过程中的成形缺陷，提高成形质量，确保成形件的稳定性和性能^[13-17]。鉴于此，本文拟开展“非对称截面铝型材滚弯成形回弹预测及调控策略”的研究。

1.2 国内外研究现状

型材弯曲件的滚弯成形在国内外都得到了广泛的研究和应用。型材滚弯成形的国内外研究现状大致分为：工艺优化研究：国内研究者对型材滚弯成形工艺进行了深入研究，探索了机器参数优化、滚辊设计、成形过程控制等方面的技术，提高了成形质量和效率^[18-22]。数值模拟与实验验证：国内学者通过数值模拟和实验验证相结合的方法，对型材滚弯成形过程进行研究，探讨了应力分布、应变情况、缺陷形成等问题，为工艺优化提供了理论支持。材料性能研究：国内研究者还对型材材料的性能进行了深入研究，探讨了不同材料在滚弯成形过程中的变形行为，为选择合适材料提供了参考^[23-25]。先进工艺与技术：研究者在型材滚弯成形领域引入了先进的工艺和技术，如智能控制系统、机器人辅助成形等，提高了生产效率和成形质量。材料与成形性能研究：学者对不同材料的成形性能进行了广泛研究，探讨了材料微观结构对成形过程的影响，为选择合适材料和工艺提供了重要依据^[26,27]。成形缺陷控制：国外研究者注重成形缺陷的控制，通过优化工艺参数、改进成形机器设计等方式，减少缺陷的发生，提高产品质量。总的来说，国内外对于型材滚弯成形的研究都在不断深入，通过理论研究和实践探索，不断优化工艺，提高成形质量和效率，推动了型材滚弯成形技术的发展与应用。

1.2.1 型材弯曲回弹半径问题的研究

早在 1950 年，Hill^[28]基于数学模型，针对板材弯曲理论进行推导，提出了具有一定精确度的理论解析模型。随后，Paulsen, Welo^[29]和陈宜周^[30]基于考虑到线性和非线性本构模型对于材料的影响，提出采用刚线性强化材料试验模型，通过数值分析针对受压板材应力应变分布、径向厚度变化和弯曲变化进行解析。

目前，学者们通常从试验探究、数值模拟及理论计算等方面展开对滚弯成形工艺回弹半径问题的研究。Hansen^[31]基于回弹模型，将计算得到的曲率函数与实验得到的函数进行比较，得出了曲率函数与通常假设函数的计算结果偏差较大。Johnson 和 Yu^[32,33]通过应变恢复或残余应力的平衡可以通过原始弹性模量的各向同性硬化和硬化结合不同程度的弹性模量退化和屈服面的大小来确定。弦模型被修改为单屈服曲面。该模型与非线性各向同性-运动学硬化模型相结合，并在 Abaqus 用户定义的本构模型材料子程序（UMAT）中实现。Leu^[34]通过分析金属板部件弯曲成形过程，针对释放成形压后的回弹进行分析，获得了纯弯曲情况下梁的曲率与载荷之间的基本关系。Gau 和 Kinzel^[35]考虑各向同性硬化和运动硬化，基于 Mroz

多重表面模型、平面应变假设和实验观测，提出一种新的增量方法和硬化模型，并与经历多次弯曲过程的铝型材的实验结果进行比较，得出建立的硬化模型具有一定的通用性。

上述理论和文献的研究内容一些学者开始考虑工艺参数与外部材料属性影响，对回弹问题进行研究。Basset 和 Johnson 等^[36]针对两种分析机器中板材弯曲过程的方法：（1）基于板材弯曲形状为圆弧的假设进行几何分析；（2）使用材料的单轴应力-应变关系进行载荷分析。随后，Hua^[37-39]等采用数学模型，针对薄板在连续四辊弯曲模式下的力学行为进行分析。通过模拟弹性完全塑性薄板在工作过程中的加载和卸载变形，推导出控制大挠度弯曲的微分方程，得出弯曲板的回弹与轧辊接触角的偏移、轧辊上的作用力、弯曲力矩和功率以及操作侧辊的位置等物理量之间的关系式。Ahmed Ktari 等^[40]在 ABAQUS/Explicit 环境下，建立滚弯过程的有限元模型，在数值模拟中，成形曲率半径通常与应变、应力、材料性能等因素相关。成形曲率半径与应变场之间存在着一定的关系，通常在成形过程中，通过对应变场的分析可以推导出成形曲率半径和其他相关参数之间的映射关系。通过数值模拟分析，可以得到不同成形工艺参数对应的成形曲率半径，从而指导工程设计和制造过程中的优化。这种映射关系的建立，有助于预测薄板在成形过程中的行为和性能，为工程设计提供重要参考。

金属件滚弯成形工艺下的弯曲半径回弹研究相对来说起步较晚。弯曲半径回弹金属件成形过程中，由于材料的弹性变形，导致成形后的零件弯曲曲率半径比设计要求的曲率半径大或小的现象。在金属件滚弯成形中，弯曲半径回弹是一个重要的质量控制因素。过大的回弹会导致零件尺寸偏差，影响产品质量；而过小的回弹可能会导致零件形状不符合设计要求。因此，对于金属件滚弯成形工艺下的弯曲半径回弹进行研究和控制至关重要。近年来，随着对工程质量和效率要求的提高，对金属件滚弯成形工艺下的弯曲半径回弹进行研究的重要性逐渐被认识到。通过数值模拟分析和实验研究，可以优化成形工艺参数，减小回弹效应，提高产品质量和生产效率。这方面的研究将为金属件滚弯成形工艺的发展和应用提供有益的支持。在理论预测方面，胡卫龙等^[41,42]针对滚弯过程中有限元路径标点图，给出了一种成形半径的计算方法。陈毓勋^[43]针对实验过程中，型材的受力，分析其整个过程中的受力过程，并考虑不同厚度的影响，从而准确控制半径回弹量。陈鹏等^[44]对 Z 型材的滚压成形提出了圆弧近似算法，在给出变曲率零件轮廓的条件下，对各圆弧段曲率半径的回弹起到补偿和校正的作用，提高了变曲率复杂轧轴成形的精度。闫静等^[45]针对双轴柔性滚弯工件的回弹，修正了滚弯回弹理论公式，有效地提高了回弹精度。WANG 等^[46]针对中性层偏移滚弯成形回弹量，在相同成形半径下得出与周养萍^[47]预测回弹变形的最大相对误差减少了 5%。王晟成和常亮

明^[48]指出针对弯板的变形为常曲率，导致其预测结果精度较低。赖松柏^[49]通过考虑塑性预应变和卸载应力的弹性模量演化模型。数值仿真表明，该模型与非线性运动学硬化模型相结合，能够准确预测回弹量。

基于有限元模拟的易操作性等优势，Feng 等^[50,51]建立应变硬化板平面应变纯弯曲的有限变形弹塑性分析。对于假设材料不可压缩的任意各向同性硬化定律，提出了一般闭合形式的解。对于大多数流行的约定俗成的法律，都给出了明确的关系。Xiao H 等^[52]研究了这些材料模型对回弹预测的影响。使用 Y-U 模型时，两个塑性应变相关线弹性模型和非线弹性模型计算的回弹应力和残余应力量几乎相同。相比之下，当使用 AKHH 模型时，使用线弹性模型的计算结果与非线性模型计算的结果有很大不同。产量平台对回弹计算的影响很小。

尽管金属件滚弯成形回弹的研究在近年来有所进展，但仍然存在一些不足之处。缺乏系统性研究：对于金属件滚弯成形回弹的研究大多还停留在实验和经验总结层面，缺乏系统性的理论分析和数值模拟研究。模型精度有限：现有的回弹模型往往基于简化的假设和经验公式，对于复杂形状和不同材料的金属件回弹预测精度有限。缺乏统一标准：金属件滚弯成形回弹研究缺乏统一的评价标准和方法，不同研究结果之间难以比较和验证。缺乏深入机理研究：对于金属件滚弯成形回弹的本质机理和影响因素的深入研究还比较有限，需要进一步探索材料本身的力学性能和变形行为。应用范围有限：现有的回弹研究主要集中在某些特定材料和工艺条件下，缺乏对不同材料和复杂成形条件下回弹行为的全面研究。

综上所述，金属件滚弯成形回弹研究仍然存在诸多不足，需要进一步深入研究和探索，以提高回弹预测的准确性和可靠性，为铝合金型材件成形工艺的优化和控制提供更有力的支持。

1.2.2 型材弯曲失稳起皱的研究

针对型材滚弯成形过程中的起皱问题，最早在理论解析和实验方面开展了相关研究，早在 1928 年，Geckeler^[53]通过滚弯试验设计和工艺参数的选择对于防止起皱非常重要。现有研究采用滚弯控制策略，并依靠计算毛坯的最大应力和临界应力来确定起皱的开始，通常需要耗时的有限元模拟。为了克服这些局限性，开发一种分析褶皱预测模型，用于开发多道次常规旋压。同时开发了使用凹形轮廓的皱纹波函数来捕获皱纹坯料的几何特征，为薄壁零件起皱研究奠定了基础。此外 Geckeler^[53]关注的起皱现象，基于各向同性复合材料预制件深成型过程中的常见缺陷。由于缺乏表征方法，这些双曲面组件表面上的褶皱形态尚未得到彻底澄清。提出一种通过评估表面波纹度来表征皱纹的新方法。随后，Senior^[54]基于能量法，提出

了一种基于褶皱极限曲线的新准则来预测有限元分析中褶皱的可能性。应用该准则分析了可变截面轮廓的几何参数和板材材料特性对起皱发生的影响。通过对不同轮廓形状进行实验来评估预测精度。结果表明,新提出的准则能够成功预测柔性辊压成形过程中起皱的发生,并推荐用于预测钣金成形过程中的有限元分析中的起皱。Kyriakids 和 Ju^[55]利用桑德斯壳运动学和虚功原理,皱纹随外法兰宽度和内法兰宽度的增加而增加,而皱纹随带材厚度和辊架间距的增加而减小。结果表明,型材对皱纹没有明显影响。M.Yoshida^[56]针对开发了一个数学模型,可以分析预测导致纸张起皱的过程不稳定性。基于数值和实验研究,对FRB的力学特性进行了描述。根据这些发现得出的预测分析模型根据相关的几何特征确定了轮廓法兰中的最大纵向压应力,该应力是导致皱纹形成的原因。通过将计算出的纵向压应力与特定材料的临界应力进行比较,可以预测板材起皱,并可以有效地设计无故障的轮廓几何形状。

在失稳起皱的数值模拟和实验研究等方面,K.Yoshida^[57]建立非线性有限元模型,用于评估内部压力下钢管内褶皱缺陷引起的应力集中因子。然后,分析了经受循环压力疲劳载荷的褶皱管试样的全尺寸实验室测试数据,以评估可比较褶皱轮廓的应力集中因素。Corona 和 Ellison^[58]采用实验和有限元分析起皱系数取决于机械性能、几何参数以及电流应变和应力场。提出一种新的理论和实验方法,利用轴向压缩加载的矩形试样来确定主应变空间中的褶皱极限曲线。然后将褶皱极限曲线转换为有效应变与应力三轴性的空间,并根据有限元预测的有效应变随变形带材在柔性辊压成形过程中的应力三轴性演变进行检查。基于皱纹极限曲线提出了另一种皱纹系数。该因素在 ABAQUS 软件中通过子程序定义,并用于确定模拟过程中起皱的可能性。

在滚弯成形失稳起皱方面,刘鸿文^[59]等基于能量法与差分法预测回弹情况,可以通过考虑材料的弹性势能、塑性功和表面能等因素,来预测金属件在弯曲后的回弹情况;也可将金属件的弯曲过程建模为一个数学问题,并通过数值计算方法求解,从而模拟金属件在弯曲过程中的变形情况。Gangwar 等^[60]针对薄壁方形管揭示了三种不同的皱纹演变机制:(a)皱纹最初出现在方管的两端,然后向中心发展;(b)皱纹出现在中心,然后向两端发展;(c)皱纹出现在中心并位于其中。预拉伸的增加可以增强方管的刚度,从而提高临界扭曲阈值,从而防止褶皱的形成。Staupendahl 和 Tekkaya^[61]与不考虑中性轴位置的方法相比,使用中性轴位置计算的弯曲刚度与实验结果更吻合。因此,发现考虑到中性轴的位置,可以更精确地预测型材的弯曲刚度。Cai 等^[62]针对板材三维柔性滚弯成形工艺,推导柔性非对称轧制过程中曲面的参数方程。通常,已经进行了用于形成球面和鞍形表面的模拟和实验。测量成形件

的尺寸精度，并通过数值模拟研究三维轧制和柔性不对称轧制工艺的差异。尺寸精度好的成形结果表明，柔性不对称轧制工艺对于制造范围更广的三维表面零件是可行的。Hu 等^[63] CRF 工艺用于制造具有可变横向曲率而不是恒定横向曲率的 3D 曲面零件。提出了 CRF 的成形机理，提出了上下柔性辊构型设计方法，并通过仿真和实验验证了其有效性，并提出产生波形起皱的主要原因是滚轮和工件之间缝隙分布不合理。

1.3 主要研究内容及章节安排

本文以精确预测和有效控制非对称截面铝型材滚弯半径回弹和失稳起皱为目标，针对现有回弹解析模型预测精度较差和滚弯精确成形调控不易实现的难点，建立能够提高滚弯回弹预测精度的解析模型及考虑材料属性变化与四轴滚弯成形工艺相一致的有限元模型，探讨滚弯精确成形的理论补偿方案和工艺优化调控方案。

1.3.1 研究内容

本文以非对称截面滚弯为切入点，以回弹半径精确预测为目的，以有限元模拟，二次开发子程序为工具，以调控策略为落脚点。主要研究思路如下，见图 1-2：

（1）建立基于 ABAQUS 二次开发建立滚弯回弹预测模型

由于 ABAQUS 内核处理用户材料本构局限性比较强，故 ABAQUS 提供用户子程序接口，用户可以充分考虑材料性能波动对滚弯回弹半径的影响。本文基于中性层偏移研究各向同性弹塑性本构模型，采用 VUMAT 显式分析法对动态型材本构模型二次开发，通过 ABAQUS 二次开发并通过与试验数据、理论数据、内核处理数据和 VUMAT 子程序数据做比较，最终预测滚弯回弹半径。

（2）建立滚弯失稳起皱预测及工艺影响因素

以 7075-O 和 7574-O 非对称截面铝合金 Z 型材为为本文研究对象，紧密围绕非对称截面 Z 型材滚弯成形过程中的性能波动和加工精度等问题，分析失稳起皱这一缺陷，根据试验对铝合金试样进行 3 个方向(与滚弯方向成 0° 、 45° 和 90°)的拉伸试验，计算截面内力分布面引起的收缩力矩和各向异性屈服应变比，基于 Hill48 屈服准则编写二次开发子程序，建立非对称截面型材失稳起皱的预测模型和建立非特定目标半径非对称截面型材滚弯半径起皱量的预测模型。基于有限元模拟、Hill48 屈服准则、滚弯实验，分别针对 7075-O 和 7475-O 铝合金型材不同目标成形半径下的失稳起皱量进行分析，揭示非对称截面滚弯失稳起皱在 Hill48 二次开发环境下的起皱量大小。

(3) 基于 BP 神经网络建立滚弯回弹预测模型

以截面形状为 Z 字形的 7075-O 和 7475-O 铝合金型材为研究对象，以非对称截面 Z 型材滚弯回弹量最小为成形约束条件，以预测模型结果误差最小为目标。基于 BP 神经网络建立非对称截面型材滚弯回弹预测模型，利用四轴滚弯机和拉丁超立方实验获得神经网络样本信号，并建立 Matlab BP 神经网络回弹预测模型，解决滚弯回弹参数和成形半径回弹量之间非线性映射关系，对非对称截面 Z 型材滚弯回弹参数进行合理调控。

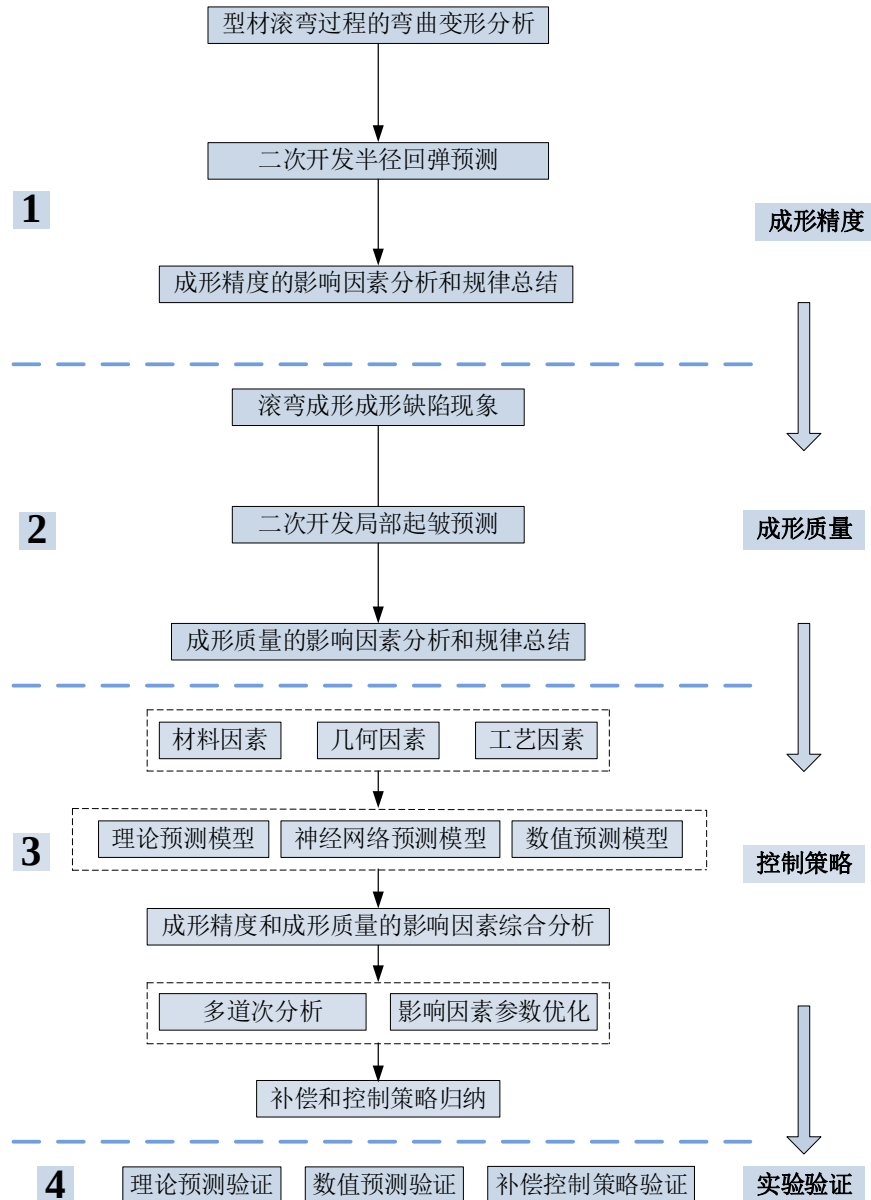


图 1-2 本文研究方案

1.3.2 章节安排

根据主要研究内容，章节体系安排如图 1-3 所示。

第 1 章：绪论。对国内外研究现状进行具体分析，重点阐述金属件滚弯工艺历史发展过

程及国内外新技术、新理念的分析，揭示本课题研究意义及当下该方面研究的不足，为本课题的研究指明方向，明确研究思路。

第 2 章：滚弯回弹预测。本章针对滚弯过程卸载外力后半径回弹展开研究，利用 ABAQUS 可开发性的优点，在 Python 中搭建有限元分析前处理脚本模型，建立本构模型，考虑材料性能波动对滚弯回弹半径的影响，通过经验方程计算回弹半径，再与有限元模拟、理论模型和滚弯试验对比，得出二次开发环境下材料性能波动对滚弯回弹预测规律。最后进行系统分析滚弯回弹半径多道次的最佳值及二次开发环境下的预测误差值。

第 3 章：失稳起皱预测及控制策略。本章针对弯曲失稳起皱问题，对非对称截面型材的滚弯成形失稳起皱的预测研究。将开展失稳起皱产生的各向异性力学行为研究，通过能量准则、板壳理论等方法建立解析预测模型，针对四轴机床与型材滚弯夹持力 P 、四轴机床滚弯的进给速度 V 和型材与四轴机床之间的间隙 G 等工艺参数，对起皱量进行精确调控。

第 4 章：BP 神经网络滚弯回弹预测及参数调控策略研究。本章主要为后续生产不同半径型材，需要什么参数，利用 BP 神经网络学习，预测对应的滚弯回弹半径，再利用训练模型进行参数调控。以 7075-O 和 7475-O 铝合金型材为研究对象。考虑多目标，多因素，利用拉丁超立方试验设计取样点数值，降低过拟合风险，以不发生截面畸变和失稳起皱为前提条件，达到提高回弹预测精度，参数调控的研究目的。

第 5 章：试验研究。本章基于 VPR-SPEC-CNC 四轴滚弯机床的参数设定（如滚弯夹持力 P 、进给速度 V 和型材与模具之间的间隙 G 等工艺参数）范围，设计滚弯工艺试验，确定试验工装，采用样板检测滚弯型材的外形精度。设计正交试验方案，对实验结果进行数据分析及极差分析，再对前文数值模拟结果与试验结果进行验证。

第 6 章：总结与展望。传统航空铝合金型材弯曲件具有轻量化、耐腐蚀、易加工、良好的强度和刚度以及可回收利用的优点，适用于航空装备的制造加工。通过滚弯成形技术，不需要模具即可实现对不同形状、不同规格的铝合金型材的制备，显著提高了生产效率和灵活性。同时也要明确其中存在的不足之处，弯曲加工通常需要大量的能量，在弯曲过程中，铝合金型材可能会发生局部塑性变形，导致材料性能的降低，特别是在弯曲角处容易产生裂纹。因此，针对该问题的研究需要进一步加强。

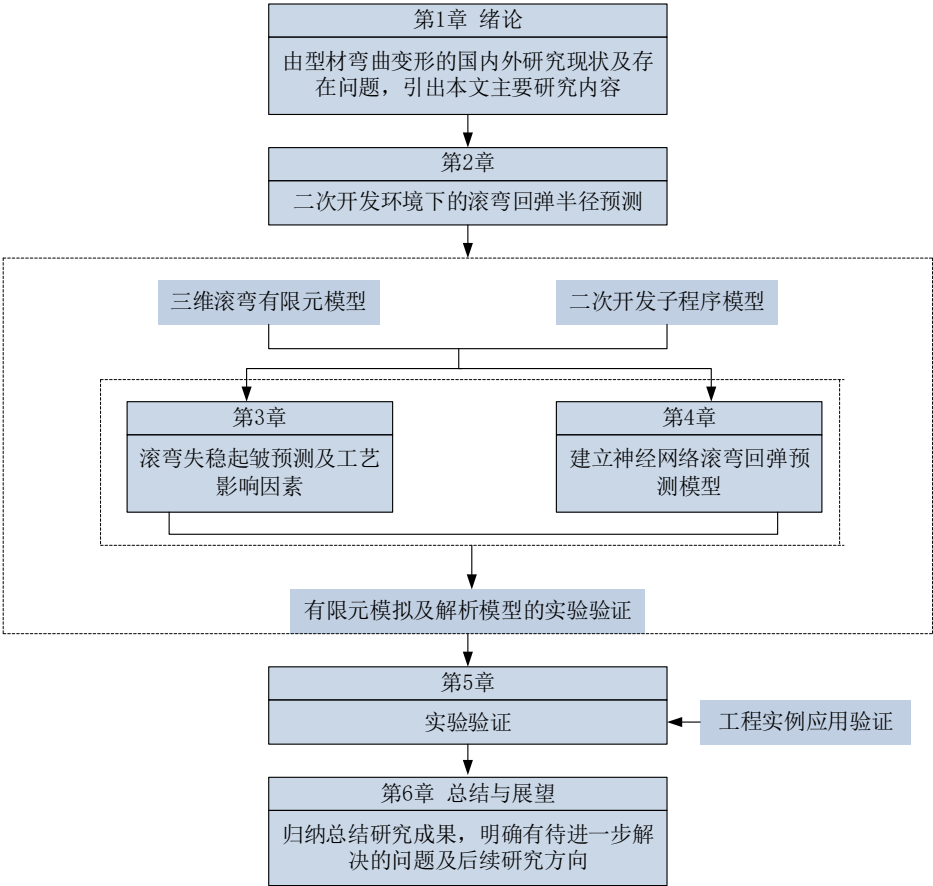


图 1-3 章节体系结构

第 2 章 二次开发滚弯回弹研究

2.1 引言

型材弯曲件在飞机框缘类零件中得到广泛应用。由于型材弯曲件对高性能、轻量化的要求，通常采用新型铝合金等轻质高性能材料制造。型材弯曲零件制造所采用的滚弯工艺因具有制造效率高、柔性加工的特点，在新能源汽车、传统汽车、航空飞行器、大型机械设备等众多领域得到广泛应用^[63-65]。滚弯工艺在生产过程中的主要问题是回弹现象。由于型材横截面的非对称性，型材缘板外侧无支撑，滚弯成形时处于腹板、缘板等处的材料塑性流动不均匀，导致型材的回弹半径增加影响试验结果^[66-68]。针对滚弯回弹问题，如何有效控制回弹并预测回弹从而提高型材滚弯成形的精度，已经成为航空装备制造领域亟待解决的问题。

近年来，传统的 ABAQUS 内核程序已经无法满足装备制造对高精度、高性能、高可靠性等方面的需求。ABAQUS 软件平台具有优越的可开发性，运用 ABAQUS 子程序进行二次开发在诸多领域已得到广泛应用^[69-74]。乔顺成等^[75]针对各向异性本构模型嵌入 ABAQUS 软件，采用二次开发的方式，提出一个通用的本构模型结构，验证了二次开发过程的正确性，为塑性成形有限元分析提供了工具。邓楚键等^[76]基于 M-C 准则，对地基进行有限元分析，模拟结果与经典理论对比，计算精度得到了显著的提高。上述研究表明，采用 ABAQUS 软件二次开发的方法在工程实践中可以极大提高数值模拟的准确性。

在航空装备制造领域，采用二次开发针对大截面 Z 型材的滚弯成形的研究不够完善。同时，针对大型 Z 形截面型材滚弯成形半径回弹问题的探究，目前的研究理想化的假定中性层未随着型材弯曲而发生改变。本文为进一步提高滚弯回弹半径预测的准确性和可靠性，将实际工况下型材塑性弯曲变形工况下中性层偏移的因素纳入分析模型。在具体研究方面，本文在不同本构模型^[77]的基础上，建立了基于中性层偏移的大截面 Z 型材滚弯回弹本构模型，研究屈服极限改变工况下的回弹现象。采用 ABAQUS VUMAT 子程序，搭建各向同性线性强化弹塑性本构方程。采用 ABAQUS 二次开发得出的回弹预测结果与试验数据、理论数据和内核处理数据进行比较。结果显示，基于中性层偏移的大截面 Z 型材滚弯回弹本构模型与假定中性层未发生偏移的模型预测相比，更加精确地反映了滚弯回弹的真实情况，进一步提高了滚弯回弹预测精度，也为超大尺寸航空型材弯曲零件滚弯回弹的预测提供了新的计算方法。

2.2 Z 型材滚弯模型建立

Z 型材的滚弯成形是复杂的弹塑性力学问题。在 ABAQUS 中弹塑性有限元的分析一般采用隐式和显式两种分析方式，本文由于分析动态大变形，故采用显式分析法。

在 ABAQUS 中建模，搭建四轴滚弯模型如图 2-1 所示。四轴式滚弯机滚弯型材时一般需要对中、预弯、滚弯等步骤。本文使用 7475-O 的材料来进行实验，其满足的应力-应变关系为：

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_s) \\ \sigma_s + D(\varepsilon - \varepsilon_s) & (\varepsilon > \varepsilon_s) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中： σ —真实应力/MPa； σ_s —屈服应力/MPa； ε —真实应变； E —弹性模量/MPa；

ε_s —屈服应变； D —塑性模量/MPa。

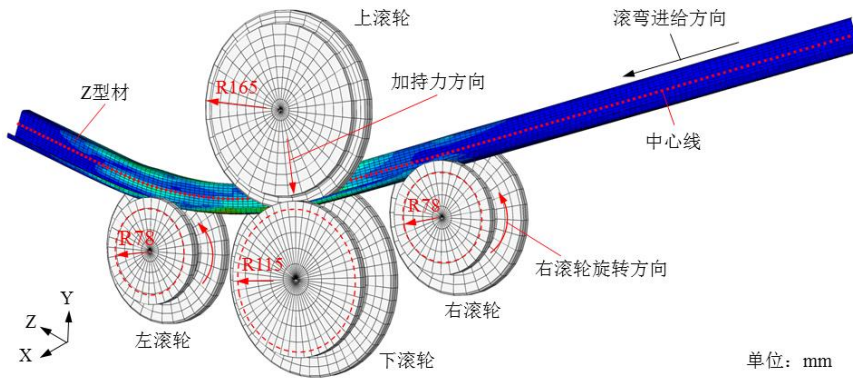


图 2-1 型材四轴滚弯成形的三维有限元模型

2.2.1 中性层偏移机理

在金属件滚弯成形中，中性轴的偏移是一个重要的现象，影响着金属件的变形和回弹行为。中性层是指金属件截面上对应应力为零的轴线，其偏移会导致金属件在滚弯成形过程中出现不均匀的应变分布。中性层偏移的机理可以通过金属在滚弯过程中的应力、应变和变形特性来解释。在滚弯成形中，金属件在接触辊和支撑辊之间受到弯曲应力，导致金属发生弯曲变形。由于金属具有弹性和塑性，变形会引起金属内部应力和应变的重新分布，从而导致中性层的位置发生偏移。具体来说，中性层偏移可以由金属的弹性回弹和塑性变形引起。弹性回弹是指金属在受到外力后，部分恢复原状的现象，导致中性层位置相对于最初位置发生偏移。而金属的塑性变形则会导致中性层位置在金属截面上产生变化。要控制中性层的偏移，需要综合考虑金属的材料特性、滚弯工艺参数和辊具设计等因素。通过优化这些因素，可以减小中性层偏移，提高金属件的成形质量和准确性。同时，结合数值模拟和实验研究，可以

更深入地理解中性层偏移的机理，并设计出更有效的控制方法。由于内外弧面材料处于相反的拉压应力状态，导致弯曲过程中，中性层发生偏移。针对 Z 截面型材滚弯成形半径回弹问题的探究，目前的研究假定中性层未发生偏移。本文为进一步提高滚弯回弹半径预测的准确性，将型材弯曲变形工况下中性层偏移纳入分析模型，见图 2-2 Z 型材结构性能示意图。

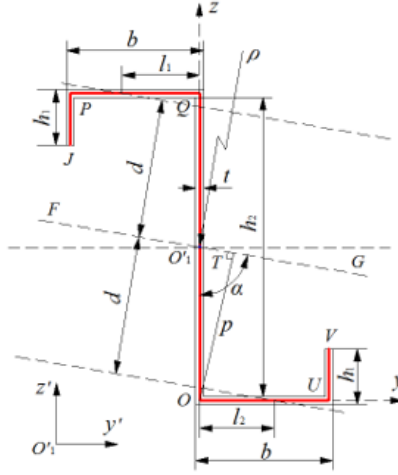


图 2-2 Z 型材结构性能示意图

弹塑性边界是指弹性变形和塑性变形之间的过渡区域，通常位于中性轴和金属表面之间。弹塑性边界的长度 d 可以用一个方程来表示，该方程通常与金属的材料特性和成形工艺参数相关：

$$y \cos \alpha + z \sin \alpha - p - d = 0 \quad (2-2)$$

考虑弹性和塑性条件，可以得出弹塑性边界处的应力连续条件为：在弹塑性边界处，弹性边界处的应力等于塑性边界处的应力。这意味着在弹塑性边界处，上下缘板的应力应该是连续的，即弹性边界处和塑性边界处的应力相等，其连续条件为：

$$E\varepsilon = E\rho d = \sigma_s \quad (2-3)$$

截面平衡条件可以描述在弯曲过程中受力情况的平衡状态，有助于分析材料的行为和性能。在弯曲过程中，截面平衡条件可以表示为弯曲截面上的受力平衡方程式。这个方程式通常包括受力平衡和力矩平衡两个方面，此时截面平衡条件为：

$$N = \iint_{A_0} dydz = 0 \quad (2-4)$$

$$M_z = \iint_{A_0} ydydz = 0 \quad (2-5)$$

$$M_y = \iint_{A_0} zdydz \quad (2-6)$$

A_σ ——应力点截面积/ mm^3 。

当型材为弯曲则截面处于纯弹性变形，将截面处分成五条近似宽度的线段，每条线段长设为微元段 dl ，则截面静力为：

$$N = \sum_1^i t \int_{y_{n-1}}^{y_n} E \rho (p - y \cos \alpha - z \sin \alpha) dy + \sum_1^{i'} t \int_{z_{n-1}}^{z_n} E \rho (p - y \cos \alpha - z \sin \alpha) dz \quad (2-7)$$

沿 Y 轴方向：

$$M_z = \sum_1^i t \int_{y_{n-1}}^{y_n} y E \rho (p - y \cos \alpha - z \sin \alpha) dy + \sum_1^{i'} t \int_{z_{n-1}}^{z_n} y E \rho (p - y \cos \alpha - z \sin \alpha) dz \quad (2-8)$$

上述中性层偏移公式的推导所建立的表征中性层平移和旋转的模型具有较高的精确度，该模型可应用于下文二次开发回弹预测模型中。

2.3 ABAQUS 二次开发

ABAQUS 的子程序二次开发源于不同行业对于现有的有限元分析无法满足特点的需求。用户可以使用 ABAQUS 的二次开发接口来实现自定义的材料模型，以更好地描述特定材料的力学行为。这对于研究新材料或特殊应用的工程项目非常有用。其次通过二次开发，用户可以改进 ABAQUS 中的计算算法，提高计算效率或准确性。这对于复杂问题的求解和大型模拟的快速计算非常有帮助。数据处理：用户可以开发自定义的后处理工具，用于对 ABAQUS 分析结果进行处理、可视化或报告。这有助于更好地理解分析结果和与他人分享研究成果。最后采用二次开发的方式可以编制分析环节所需的子程序，主要用于减少用户重复性的工作，提高分析精度，缩短研发时间和成本。

ABAQUS 的二次开发在编程过程中，由于其高斯点的屈服需要进行应力调整，调整的应力需要用积分的算法进行数值分析，目前 ABAQUS 主要有显式欧拉积分算法和完全隐式积分算法。本文由于处理大截面 Z 型材的滚弯回弹，显式动力学分析具有计算速度快、适用于短时间内的动态响应、易于并行计算等优点。但也需要注意选择合适的时间步长、稳定性控制和数值耗散等问题，以确保计算结果的准确性和可靠性。通过合理设置模型和参数，可以充分发挥 ABAQUS 中显式动力学分析的优势，实现对动态响应问题的准确模拟和分析，是一种常用求解非线性动力学问题的方法，故本文采用显式分析算法。鉴于此下文将采用 VUMAT 子程序并调用 VUHARD 子程序进行试验。

2.3.1 模型前处理脚本搭建

(1) 设定材料属性

```
01 mdb.part['Part-1'].materials['RO'].Density()
02 mdb.part['Part-1'].materials['ROI'].Elastic()
03 mdb.part['Part-1'].materials['RO'].Plastic()
```

(2) 创建分析步

```
01 mdb.part['Part-1'].ExplicitDynamicsStep
(
    name = 'press', previous = 'Initial', timePeriod = 0.1, massScaling
    = ((SEMI_AUTOMATIC, PART, AT_BEGINNING, 100.0, 0.0, None, 0, 0, 0.0, 0.0, 0, None), ),
    improvedDtMethod = ON
)
```

(3) 创建边界和载荷

```
01 region = a.Set(faces = faces1, name = 'Set-1')
```

(4) 网格划分

```
01 p = mdb.part['Part-1'].parts['up']
02 p.generateMesh()
03 p = mdb.part['Part-1'].parts['Z']
```

2.3.2 用户子程序

VUMAT 和 VUHARD 子程序适用于 ABAQUS/Explicit 模块，其显式算法可以有效地模拟材料的非线性行为、大变形、破坏和接触等复杂物理现象，也可用于模拟动态加载条件下的结构响应、碰撞和破坏等问题。通过显式求解算法，用户可以更好地理解材料在极端加载条件下的响应，并优化设计以提高材料的性能和安全性，故本文将采用显式算法来模拟 Z 型材的非线性行为、大变形。下文将分析基于 FORTRAN 固定格式编写的主要代码：

```
01 e = props(1)
02 xnu = props(2)
03 twomu = e / (one + xnu)
04 alambda = xnu * twomu / (one - two * xnu)
05 thremu = op5 * twomu
06 nvalue = nprops / 2 - 1
```

1~6 为本文定义的输入变量和包含弹性模量和泊松比的计算式，弹性模量和泊松比是材料力学中两个重要的参数，它们描述了材料在受力时的力学性质和变形特性。弹性模量：弹性模量是描述材料刚度和弹性性质的参数，表示材料在受力后的变形程度。具体来说，弹性模量越大，材料的刚度越高，即在相同受力下，材料的变形程度越小。弹性模量可以帮助工

工程师设计结构和材料选择，以确保结构在受力时不会发生过大的变形或破坏。泊松比：泊松比描述了材料在受力时的横向收缩与纵向伸长之间的关系。泊松比是一个无量纲的比值，通常介于 0 和 0.5 之间。当材料受力时，如果在一个方向上拉伸，另一个方向将会收缩，泊松比可以描述这种变形特性。泊松比可以用于预测材料在受力时的变形情况，有助于工程师设计结构时考虑变形效应。

总的来说，弹性模量和泊松比是描述材料力学性质和变形特性的重要参数，它们在工程设计、材料选择和结构分析中起着关键作用。

```

01 if ( stepTime .eq. zero ) then
02 do k = 1, nblock
03 trace = strainInc(k,1)+strainInc(k,2)
04 else
05 do k = 1, nblock
06 trace = strainInc(k,1)+strainInc(k,2)
07 smean = ( s11 + s22 + s33 ) / 3
08 s11 = s11-smean
09 s22 = s22-smean
10 s33 = s33-smean
11 peeqOld = stateOld(k,1)
12 peeqrate = stateOld(k,2)
13 yield = stateOld(k,3)

```

1~6 为用户子程序初始时刻和非初始时刻的判断代码。

7~10 为计算当前的平均应力。

11~13 为赋值等效塑性应变：它是塑性变形理论中的一个概念，用来描述材料在受力时发生的塑性变形程度。在金属材料等塑性变形中，通常使用等效塑性应变来表示材料在多轴应力状态下的综合变形量。等效塑性应变考虑了材料在各个方向上的应变状态，将其综合成一个等效的应变值，使得可以简化复杂的多轴应力状态下的变形分析。等效塑性应变的计算通常基于材料的本构关系和屈服准则，可以根据不同的塑性理论来定义。

赋值应变率是描述材料变形速率的物理量，通常表示为单位时间内的应变增量。在材料力学中，应变率可以用来描述材料在受力时的变形速度和变形程度。初始时刻屈服点是指材料在受力过程中最初开始发生塑性变形的点。当材料受到足够大的外力作用时，超过其弹性极限后，材料将开始发生可逆的塑性变形，这个点称为屈服点。初始时刻屈服点是指在材料受力开始后的最初发生塑性变形的点，标志着材料由弹性变形进入塑性变形阶段。

```
01 subroutine vuhardk (syield, hard, eqplas, table, nvalue)
02 include 'vaba_param.inc'
03 dimension table(2, nvalue)
04 parameter (zero = 0.d0)
```

1~4 为调用 VUHARD 子程序，主要为在材料的应力-应变曲线中出现的多段线性行为，这可能是由于材料在不同应变范围内表现出不同的力学性质所导致的。在恢复这样的曲线时，可以通过一些方法来逼近或模拟这种行为，使用材料模型来描述分段硬化行为，例如弹塑性模型或其他多阶段本构模型。这些模型可以更加精确地描述材料在不同应变范围内的力学性质变化，通过调整模型参数可以实现对分段硬化曲线的恢复。

由于建立的本构模型会根据实验的需要去构造，这会导致不同的本构计算时的效率也会有差别。因此在保证精确度前提下，本文所调用的主要变量及含义如表 2-1 所示。

表 2-1 子程序 VUMAT 变量

变量	含义	变量	含义
stressNew	更新的应力	nblock	积分点数
stateNew	更新状态变量	ndir	正应力数
props	材料常数	nshr	切应力数
Densit	密度	Nstatev	状态变量数
strainInc	应变	nprops	材料常数

2.3.3 本构模型建立

在上述概念的基础上，本文接下来讨论各向同性弹塑性本构关系^[72]。

根据 MISES 准则：

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}}{\sqrt{2}} = \sigma_{ij} \quad (2-9)$$

式中： $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 xyz 方向应力， τ_x, τ_y, τ_z 分别为 xyz 方向应变分别为 xyz 方向剪切应力，型材在滚轮抬升左右下受到法向力，由于是铝型材，故受力初期发生弹性应变，根据屈服准则理论，当应力超过其屈服强度后将会发生塑性应变。故第一步须判断是否进入塑性阶段^[73]。

当 $\bar{\sigma} \leq \sigma_{mn}$ 时发生弹性变形，其弹性变形表达式为：

$$\sigma_{mn} = \lambda \delta_{mn} \varepsilon_{hh}^e + 2\mu \varepsilon_{mn}^e \quad (2-10)$$

式中： σ_{mn} 为应力张量； λ 为拉梅常数； δ_{mn} 为随动变化增量； μ 为泊松比， ε_{hh}^e 弹性应变；

ε_{mn}^e 塑性应变。

当 $\bar{\sigma} > \sigma_{mn}$ 时此时超过屈服强度，一个材料受到应力超过其屈服强度时，通常会发生塑性变形或破坏。屈服强度是材料在受力过程中开始发生可逆塑性变形的应力水平。其屈服函数表达式为：

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{3}{2}} S_{mn} S_{mn} - \sigma_y(\bar{\varepsilon}^l) &= 0 \\ S_{mn} &= \sigma_{mn} - \frac{1}{3} \delta_{mn} \sigma_{hh} \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中： S_{mn} 为各方向应力偏量； $\sigma_y(\bar{\varepsilon}^l)$ 为 y 方向应力张量。

则等效塑性应变计算公式为：

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}^l &= \int_0^t \dot{\bar{\varepsilon}}^l dt \\ \dot{\bar{\varepsilon}}^l &= \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{mn}^l \dot{\varepsilon}_{mn}^l \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中： $\dot{\varepsilon}^l$ 为等效塑性应变。

根据塑性流动法则（增量本构）理论的推导，假设材料的应力和应变可以分解为弹性部分和塑性部分，其中塑性部分会随着加载而积累，导致材料产生不可逆的塑性变形。通过考虑材料的弹性和塑性，可以建立材料在不同加载条件下的本构关系，即应力应变关系。常用的塑性流动法则包括屈服准则和硬化规律。屈服准则描述材料在何种条件下开始发生塑性变形。硬化规律则描述材料塑性变形的进展过程。则此时塑性应变增量与瞬时应力偏量成正比：

$$\frac{d\varepsilon_x^p}{s_x} = \frac{d\varepsilon_y^p}{s_y} = \frac{d\varepsilon_z^p}{s_z} = \frac{d\varepsilon_{xy}^p}{2\tau_{xy}} = \frac{d\varepsilon_{yz}^p}{2\tau_{yz}} = \frac{d\varepsilon_{zx}^p}{2\tau_{zx}} = d\lambda \quad (2-13)$$

式中： $d\varepsilon_x^p$ ， $d\varepsilon_y^p$ ， $d\varepsilon_z^p$ ， $d\varepsilon_{xy}^p$ ， $d\varepsilon_{yz}^p$ ， $d\varepsilon_{zx}^p$ 为各方向上塑性应变增量； s_x ， s_y ， s_z ， τ_{xy} ， τ_{yz} ， τ_{zx} 为各方向上瞬时应力偏量。

最终可得等效塑性应变为：

$$\dot{\varepsilon}_{mn}^l = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{mn}}{\sigma_y} \dot{\bar{\varepsilon}}^l \quad (2-14)$$

由于 VUMAT 计算逻辑为计算每个分析步的增量，且每一步增量都很小，不需要用雅可

比矩阵计算，故采用积分算法^[78]。首先计算纯弹性情况的 MISES 应力：

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}^r &= \sqrt{\frac{3}{2} S_{mn}^r S_{mn}^r} \\ S_{mn}^r &= S_{mn}^o + 2\mu \Delta e_{mn}\end{aligned}\quad (2-15)$$

式中： $\bar{\sigma}^r$ 为纯弹性应力； S_{mn}^r 为纯弹性各方向上应力偏量。

上文说到，当大于屈服应力时，则发生塑性流动，采用显式算法计算增量^[79]：

$$\begin{aligned}\Delta \bar{\varepsilon}^l &= \frac{\bar{\sigma}^r - \sigma_y}{3\mu + h} \\ h &= \frac{d\sigma_y}{d\bar{\varepsilon}^l}\end{aligned}\quad (2-16)$$

式中： $\Delta \bar{\varepsilon}^l$ 为塑性应变增量， h 为塑性硬化系数。

根据显示算法得出的等效应变增量，将问题分解成每个单元进行求解：

$$\bar{\sigma}^r - 3\mu \Delta \bar{\varepsilon}^l = \sigma_y(\bar{\varepsilon}^l) \quad (2-17)$$

通过（2-17）公式计算更新每一步的应力和塑性应变^[74]：

$$\begin{aligned}\sigma_{mn} &= \eta_{mn} \sigma_y + \frac{1}{3} \delta_{mn} \sigma_{hh}^r \\ \Delta \varepsilon_{mn}^l &= \frac{3}{2} \eta_{mn} \Delta \bar{\varepsilon}^l\end{aligned}\quad (2-18)$$

式中： σ_{mn} 为更新后应力； $\Delta \varepsilon_{mn}^l$ 为更新后应变； η 为更新后雅可比矩阵。

2.3.4 VUMAT 四轴滚弯实验模拟

在四轴滚弯实验模拟中，先关联 VS 和 ABAQUS，在 VS 中用 Fortran 语言编写用户材料子程序，将编写好的 VUMAT 子程序在材料属性设定步骤导入^[80-82]。

本实验选用 7475-O 铝合金材料进行滚弯实验，其材料属性见表 2-2 所示。

本文综合考虑材料弹性模量的变化，通过子程序改变弹性模量的大小，分析滚弯试验应力卸载后，回弹和弯曲半径之间的关系。

表 2-2 7475-O 铝合金材料属性

材料	弹性模量	屈服强度	强度系数	硬化指数	塑性模量
	E / MPa	σ_s / MPa	K / MPa	n	D / MPa
7475-O	71171	114	339	0.175	2116

在 ABAQUS 中装配模型，设定材料属性，提交 Job 并调用子程序，实验模拟如图 2-3 所

示。

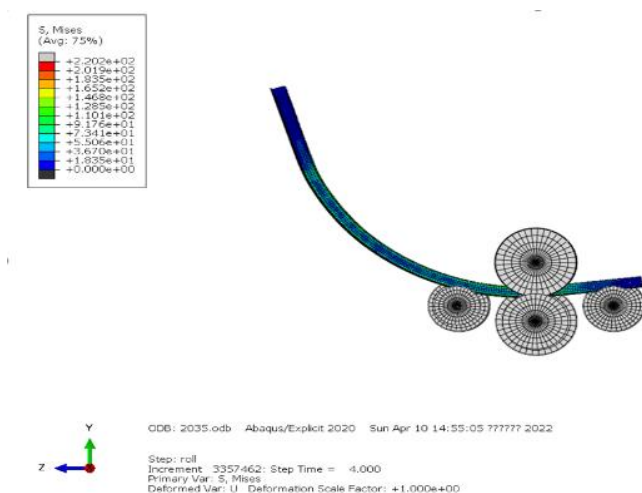


图 2-3 VUMAT 子程序运行图

按照 VUMAT 流程图 2-4。后文模拟中将主要讨论三个问题：

(1) 屈服函数的调用及判断条件，需要获取材料的力学性质参数，根据材料的力学性质参数，建立相应的屈服函数模型，计算材料的应力和应变，最后根据所采用的屈服函数模型，确定屈服判据；

(2) 弹塑性状态的计算，根据所采用的弹塑性模型，确定塑性区域。在应力-应变空间中，塑性区域通常是一个超过材料屈服点的区域，表示材料已经发生了塑性变形，根据塑性应变的计算结果，更新材料的应力状态。在弹塑性状态下，材料的应力不仅取决于外加载，还受到塑性变形的影响；

(3) 应力应变的更新，根据材料的性质和所受载荷，使用合适的应力应变关系来计算应力和应变的变化。在弹性阶段，通常使用胡克定律或者其他弹性本构模型来描述应力和应变之间的关系；在塑性阶段，需要根据所采用的塑性模型来确定应力和应变之间的关系。根据新的应力状态和材料的本构关系，计算更新后的应变，由于塑性变形的非线性特性，可能需要通过迭代方法来获得稳定的解。

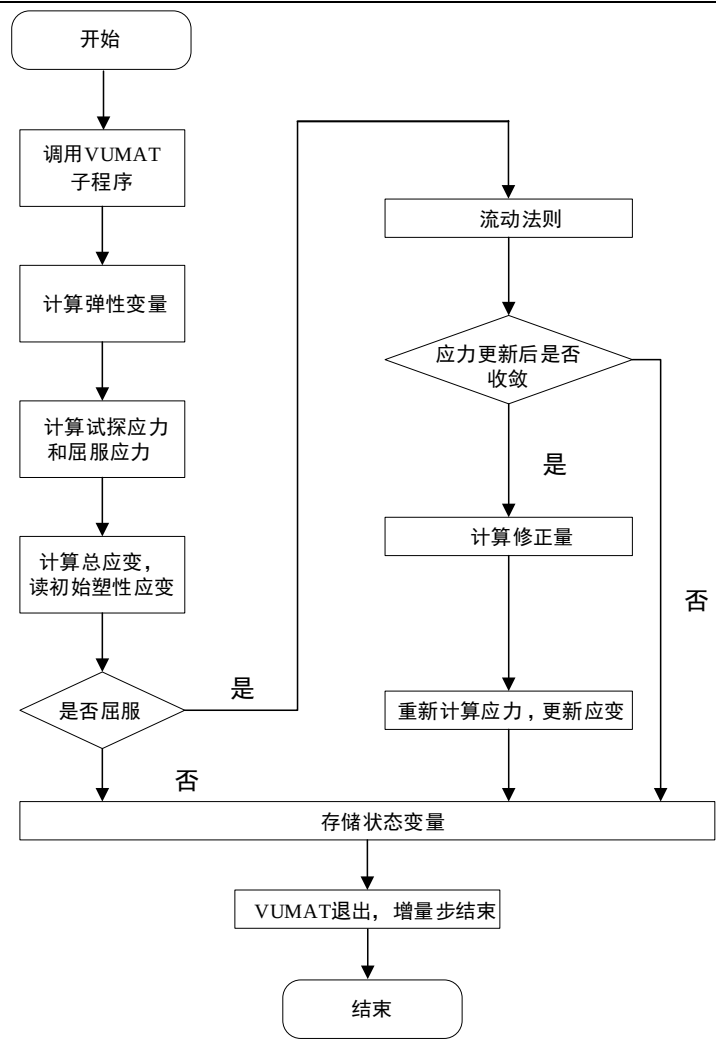


图 2-4 VUMAT 程序流程图

2.4 结果对比

2.4.1 ABAQUS 子程序模拟结果

本文选取 7475-O 的铝型材作为实验材料。具体参数结果见表 2-3 所示。

表 2-3 7475-O 铝合金模拟结果

材料	厚度mm	目标半径mm	模拟半径mm
7475-O	1.27	1900	1910.46
		1635	1637.65
		1260	1259.32
		990	994.12
		770	771.23

对应目标半径在 VUMAT 子程序应力云图如图 2-5 所示，分析可得，在使用 Vumat 子程序模拟下的模拟半径成形精度高。

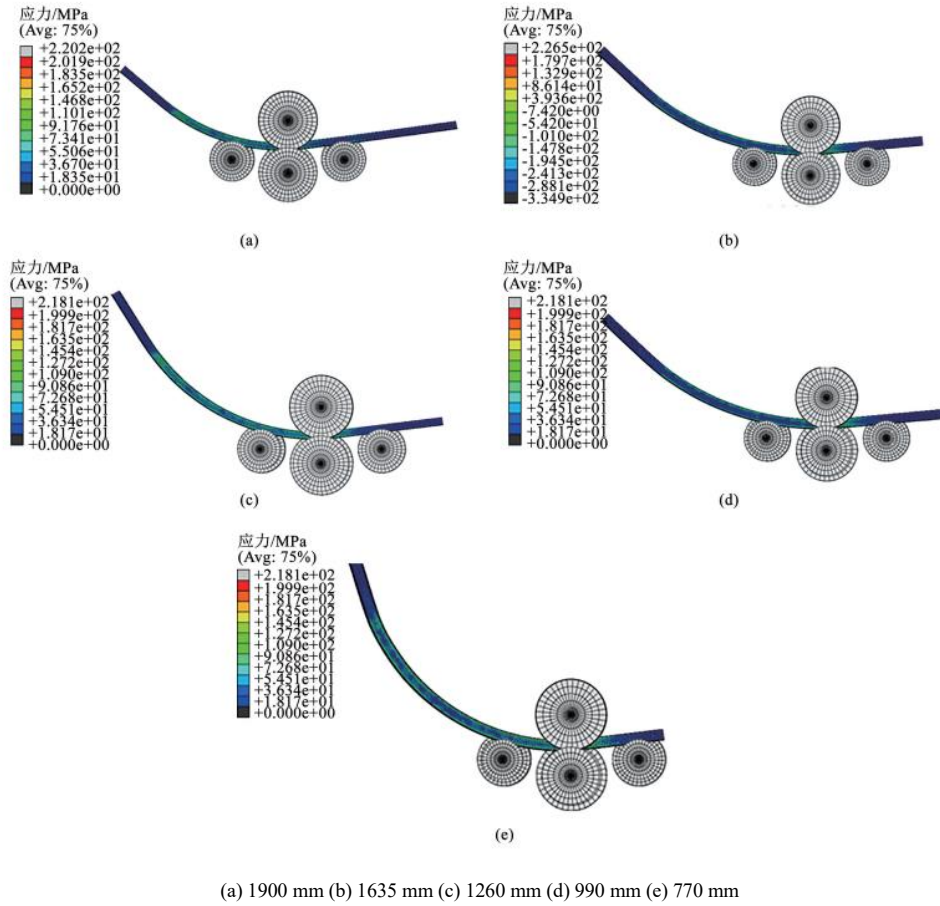


图 2-5 目标半径模拟云图

2.4.2 回弹结果对比验证

为验证本文模型与实验测量和经验模型的回弹量，图2-6显示回弹示意图。下文将对五种目标半径的Z型材进行滚弯回弹实验。充分考虑7075-O和7475-O两种型材的材料属性和不同型材的厚径比因素。在其滚弯开始时，观察上下滚轮的加持，以及侧滚轮的上抬对未卸载力之前的半径影响。在滚弯一次结束后，卸载外部力后，中性层附近存在相对较大的弹性变形，从而导致滚弯半径的回弹。图2-7(a), (b)，分析了7075-O和7475-O两种型材在厚度为1.27mm下，三种试验下的半径回弹量。如图可分析得，在厚度不变的前提下，两种型材均是实验测量的回弹半径小，这也符合材料属性轻微波动的结果。

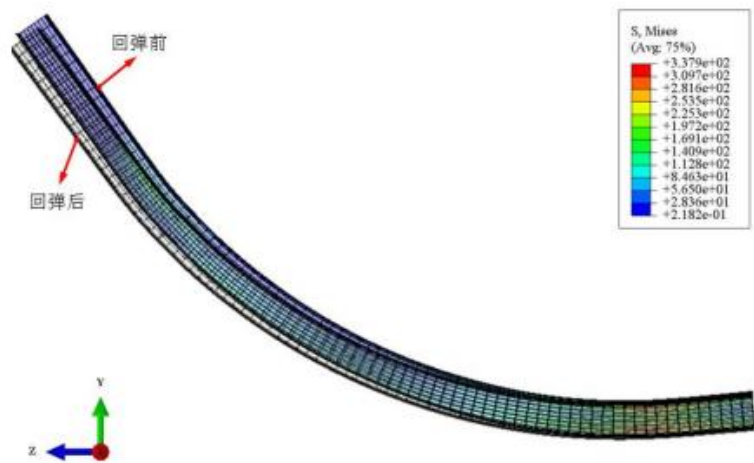
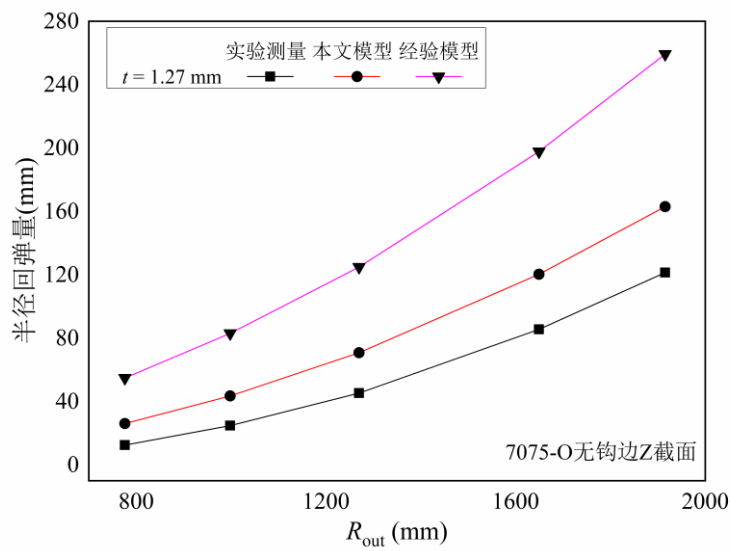
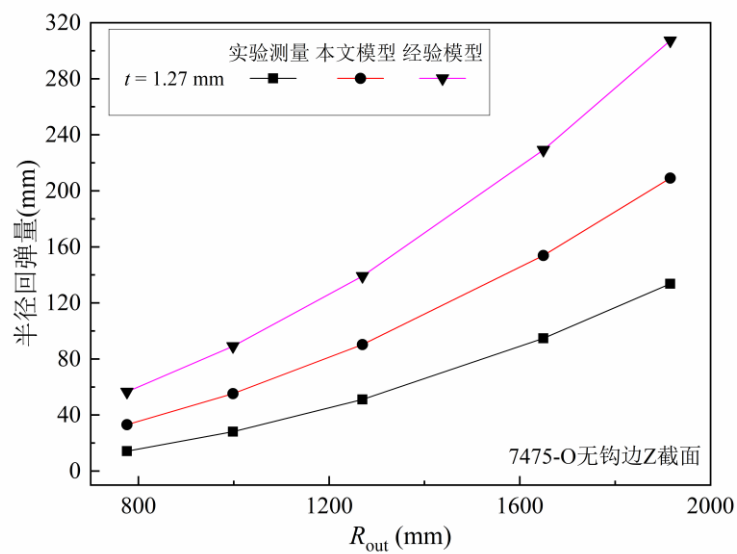


图 2-6 回弹示意图



(a)7075-O 1.27mm 厚度回弹量



(b)7475-O 1.27mm 厚度回弹量

图2-7 Z截面型材半径回弹量的实验结果

针对非对称Z截面型材滚弯回弹问题，基于中性层偏移的回弹预测模型和经验模型^[27]，本文选用7475-O， 7075-O铝合金型材，利用VUMAT子程序模拟实验与滚弯实验，经验推导，ABAQUS预测实验回弹结果对比。实验计算结果见表2-4，表2-5所示。

表 2-4 7475-O 实验计算结果

目标滚弯半径	滚弯实验半径	经验推导半径	ABAQUS预测半径	VUMAT子程序半径
/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
1900	1915.39	1889.78	1914.28	1910.46
1635	1649.48	1623.83	1645.37	1637.65
1260	1269.81	1244.08	1266.32	1259.32
990	997.97	972.16	996.54	994.12
770	776.08	750.07	775.34	771.23

表 2-5 7075-O 实验计算结果

目标滚弯半径	滚弯实验半径	经验推导半径	ABAQUS预测半径	VUMAT子程序半径
/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
1900	1916.42	1889.57	1915.23	1910.63
1635	1649.52	1624.54	1645.42	1637.23
1260	1269.79	1244.32	1267.62	1259.75
990	999.98	973.43	995.32	994.76
770	777.03	750.23	775.64	771.87

本文对比不同目标半径的回弹量中，如图2-8所示。基于中性层偏移的回弹预测模型和经

验模型^[27]与VUMAT子程序模拟做对比，结果得出的二次开发模型滚弯半径最接近目标半径，结果偏差最大仅为4.4%，最小为1.3%，且该模型下回弹半径的变化幅度较为缓慢，更符合实验目的。

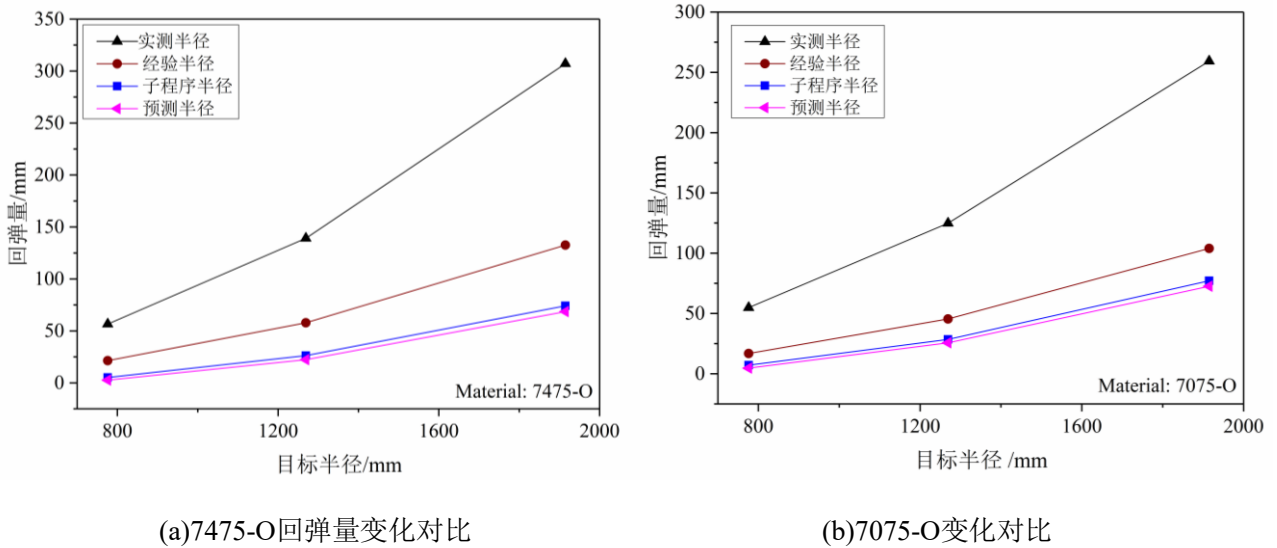


图 2-8 回弹量随目标成形半径的变化

图2-8对回弹量的测量充分说明二次开发子程序模型对于两种材料均合适，但未考虑回弹率的问题，其对回弹量的大小也会产生一定的影响。故图2-9针对回弹变化率展开研究，分析可知，型材回弹前后曲率的变化与型材的壁厚有关。

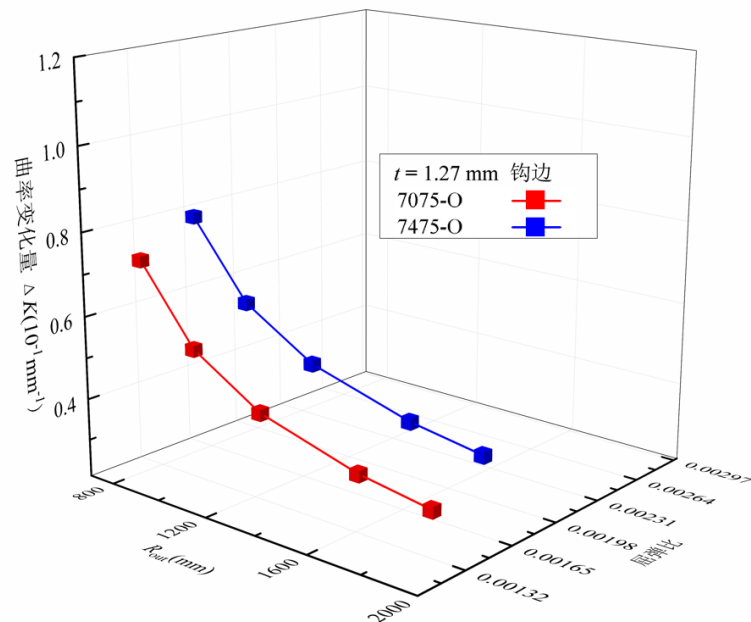


图 2-9 回弹变化率

对比了四种实验下的预测误差，对于7075-O和7475-O的铝合金型材，由于回弹量接近，取二者平均值作为此类型铝合金型材的通值，并分析其误差，见图2-10所示。在卸载载荷前，

ABAQUS预测实验误差最小为2.01%，最大为3.34%；VUMAT子程序预测实验误差仅为1.88%，最大误差2.83%。而经验模型的误差最小为6.41%，最大为11.78%，滚弯实验误差最小为5.21%，最大为8.26%。对比四组实验^[27]，本文基于ABAQUS二次开发的子程序的预测精度明显高于其他三组实验。此外，分析图像可知，在目标成形半径越小时，模型的预测精度越高，这与测量中性层的半径有关。

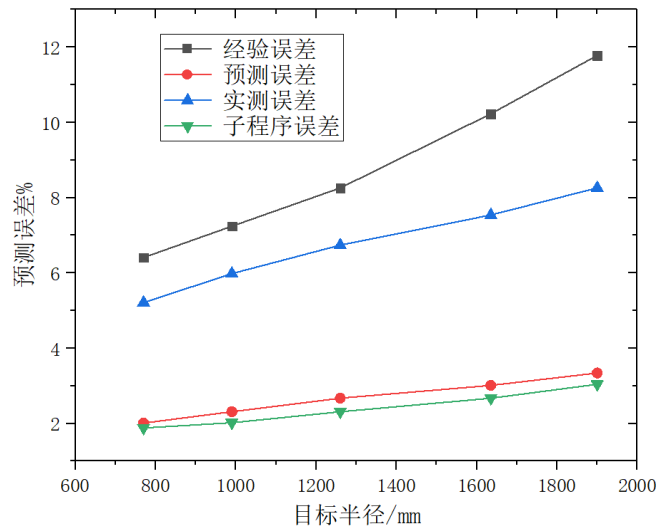


图 2-10 回弹量随目标成形半径的预测预测

2.5 本章小结

本文通过综合考虑材料属性变化回弹的影响。采用 Fortran 语言，利用各向同性弹塑性本构关系开展 VUMT 子程序二次开发；采用动态显式算法，开展滚弯成形过程的求解过程。最后得出以下结论：

(1) 在滚弯实验，经验推导实验和 ABAQUS 模拟预测试验的基础上，本文基于 ABAQUS 二次开发的子程序，在回弹量的最大预测误差上仅为 2.83%，优于其他三种试验。

(2) 本文基于各向同性弹塑性本构方程，自定义弹性模量、屈服应力和屈服极限。实验证明，在该方法下半径回弹量的最大误差相较于经验模型从 7.7%减小到 4.4%，这也为解决动态大变形的问题提供了理论依据。

(3) 实验表明，VUMAT子程序进一步完善了滚弯回弹预测精度不高的问题。这也为型材的滚弯回弹预测提供了新的计算方法。

4) 仅考虑回弹未考虑成形质量对回弹也会存在影响，故下文针对滚弯成形过程中，型材成型质量问题进行研究。

第 3 章 滚弯失稳起皱及控制策略

3.1 引言

在航空航天、汽车制造等众多工业领域，因铝合金构件具有轻量化，刚度高，成形好的特点被广泛应用^[83-86]，而滚弯成形工艺是众多工业领域主要的方法，但其约束较少，易发生截面畸变，失稳起皱等问题，比一般的型材拉弯，冲压成型工艺更为复杂，故研究较少^[87,88]。但滚弯工艺又具备节能、高效、低成本、省板料等特点，因此在市场竞争中优势更大，所以近年来研究者愈发重视型材滚弯失稳起皱的研究^[89]。

非对称截面型材之所以会发生滚弯过程中的失稳起皱变化，主要由材料自身属性的变化，截面的力学特性和力卸载前后弹塑性变化^[90,91]。材料属性的波动也会对型材滚弯成形过程中的精度产生影响；不同的截面几何特征也会导致应变分布的不均匀性，从而促使失稳起皱的发生。研究截面几何特征对失稳起皱的影响，可以基于其力学性能设计更稳定的型材。因此本章将建立考虑自身材料属性、考虑截面几何特征等因素的预测模型，对其进行精确预测并加以调控，提高滚弯精度。

综上所述，目前围绕型材弯曲过程中失稳起皱问题的研究，仍存在以下不足：1) 型材在弯曲过程中可能出现各种不同形式的失稳。2) 型材弯曲的成形工艺参数，包括弯曲速度、弯曲力、弯曲半径等，对失稳起皱有重要影响。不恰当的工艺参数选择可能会导致失稳问题的发生。3) 型材弯曲过程中的失稳机理还有待深入研究。了解失稳起皱的形成机理可以帮助制定更有效的控制措施。因此，基于上述不足之处，以提高滚弯精度为目标，通过建立滚弯起皱预测模型，将四轴滚弯机的夹持力 P 、试件加工时的进给速度 V 以及型材与四轴装配时的间隙 G 等工艺参数，作为对起皱量进行精确调控的变量。

3.2 Hill48 各向异性模型建立

3.2.1 Hill48 模型

1948 年 HILL 首次提出各向异性屈服准则方程，用于描述金属材料在复杂三维应力状态下的屈服行为。这个方程被广泛用于材料塑性行为的建模和工程应用中，尤其在金属成形加工领域具有重要意义。Hill48 准则方程对于理解金属材料的各向异性特性以及预测其在成形过程中的行为具有重要作用。在考虑各向同性硬化的前提下，其表达式为：

$$f_y(\sigma) - \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p) = 0 \quad (3-1)$$

式中： $f_y(\sigma)$ 为屈服函数， $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p)$ 为等效应力—应变关系。

在弹塑性变形中，通常使用 Hill48 屈服准则为判断依据来考虑和分析各向异性屈服准则。

其表达式为：

$$f_y(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2} \quad (3-2)$$

其中： σ 为正应力， τ 为剪应力， F、 G、 H、 N 为材料各向异性参数。

假设 1, 2, 3 分别为三个主轴方向，则沿 x 方向单向拉伸，屈服应力应为：

$$\begin{cases} \sigma_x = \bar{\sigma}_{11} \\ \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \\ G\bar{\sigma}_{11}^2 + H\bar{\sigma}_{11}^2 = \bar{\sigma}^2 \end{cases} \quad (3-3)$$

$$\text{即：} \quad G + H = \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{11}^2} \quad (3-4)$$

同理可得：

$$H + F = \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{22}^2}, \quad F + G = \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{33}^2} \quad (3-5)$$

故可得：

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) \\ G = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) \\ H = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) \end{cases} \quad (3-6)$$

当 $\bar{\sigma}_{12}$ ， $\bar{\sigma}_{13}$ ， $\bar{\sigma}_{23}$ 是相对于各向异性主轴的剪切屈服应力，则在纯剪切情况下，xy 面纯剪切：

$$\tau_{xy} = \bar{\sigma}_{12} \quad (3-7)$$

$$\text{则 } 2N\bar{\sigma}_{12}^2 = \bar{\sigma}^2, \quad 2M\bar{\sigma}_{13}^2 = \bar{\sigma}^2 \quad (3-8)$$

$$\text{故可得：} \begin{cases} N = \frac{\bar{\sigma}^2}{2\bar{\sigma}_{12}^2} \\ L = \frac{\bar{\sigma}^2}{2\bar{\sigma}_{23}^2} \\ M = \frac{\bar{\sigma}^2}{2\bar{\sigma}_{13}^2} \end{cases}, \quad \text{即} \begin{cases} N = \frac{3\bar{\tau}^2}{2\bar{\sigma}_{12}^2} \\ L = \frac{3\bar{\tau}^2}{2\bar{\sigma}_{23}^2} \\ M = \frac{3\bar{\tau}^2}{2\bar{\sigma}_{13}^2} \end{cases}, \quad \text{其中 } \bar{\tau} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (3-9)$$

式中： $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\sigma}_{12}$ 、 $\bar{\sigma}_{33}$ 等分别为沿轧制方向成 0° 、 45° 和 90° 夹角方向的单向拉伸应力。

通过上式可求出各向异性屈服应变比：

$$\begin{cases} R_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\bar{\sigma}}; & R_{22} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\bar{\sigma}}; & R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\bar{\sigma}} \\ R_{12} = \frac{\bar{\tau}_{12}}{\bar{\sigma}}; & R_{13} = \frac{\bar{\tau}_{13}}{\bar{\sigma}}; & R_{23} = \frac{\bar{\tau}_{23}}{\bar{\sigma}} \end{cases} \quad (3-10)$$

3.2.2 Hill48 二次开发模型建立

本文首先推导用于描述材料在受力时同时表现出弹性和塑性行为的弹塑性矩阵模型，为后续 Hill48 本构关系程序编写，UMAT 子程序进行设计与标定工作奠定基础。在子程序编写时，首先标定 UMAT 子程序材料参数，弹性模量、泊松比、初始屈服应力、 R_{11} 、 R_{22} 等参数。

```
01 EMOD = PROPS(1)
02 ENU = MIN(PROPS(2),ENUMAX)
03 EG = EMOD/(TWO*(ONE+ENU))
04 ELAM = (EMOD*ENU)/((ONE+ENU)*(ONE-TWO*ENU))
05 EG2 = TWO*EG
06 ELAMBAR = (EG2*ELAM)/(ELAM+EG2)
```

基于此，计算新的有效应力，检查屈服准则更新的本构值，更新应力、弹塑性应变和等效塑性应变，从而求出雅可比矩阵，实现迭代计算过程。此外，还需计算 Hill48 屈服准则下的有效应力：

```
01 BETA12=XR0/(1.D0+XR0)
02 BETA66=(XR0+XR90)*(1.D0+2.D0*XR45)/(XR90*(1.D0+XR0))
03 BETA23=XR0/(XR90*(1.D0+XR0))
04 BETA22=BETA12+BETA23
```

最终将编写的子程序调用至 ABAQUS 中，观察分析结果，如图 3-1 所示。

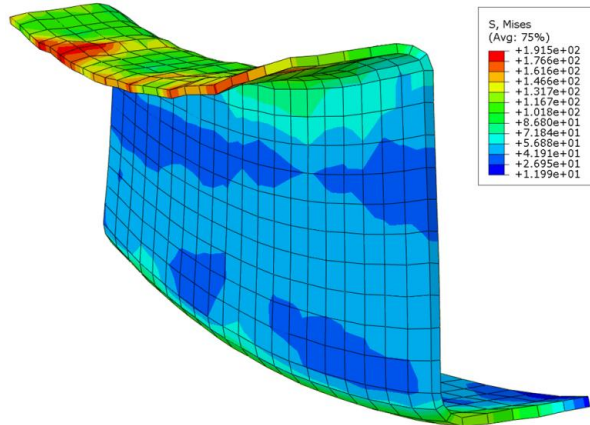


图 3-1 二次开发失稳起皱模型建立

3.3 失稳起皱过程研究

3.3.1 失稳起皱过程及影响因素

在进行滚弯过程时，型材由右侧进去四轴滚弯机，此时缘板处呈现出悬臂梁的特点，此

外，刚进入滚弯机时上轴滚弯机夹持力较小，容易发生失稳起皱现象^[92]，如图 3-2（a）所示。由于在滚弯实验时，腹板和缘板之间是圆弧，为简化分析，后续研究利用直角代替。为研究标准位置起皱量和滚弯成形半径的关系，基于此，本文将通过能量法模型选取多因素作为研究方法，建立型材起皱预测模型，如图 3-2（b）所示。

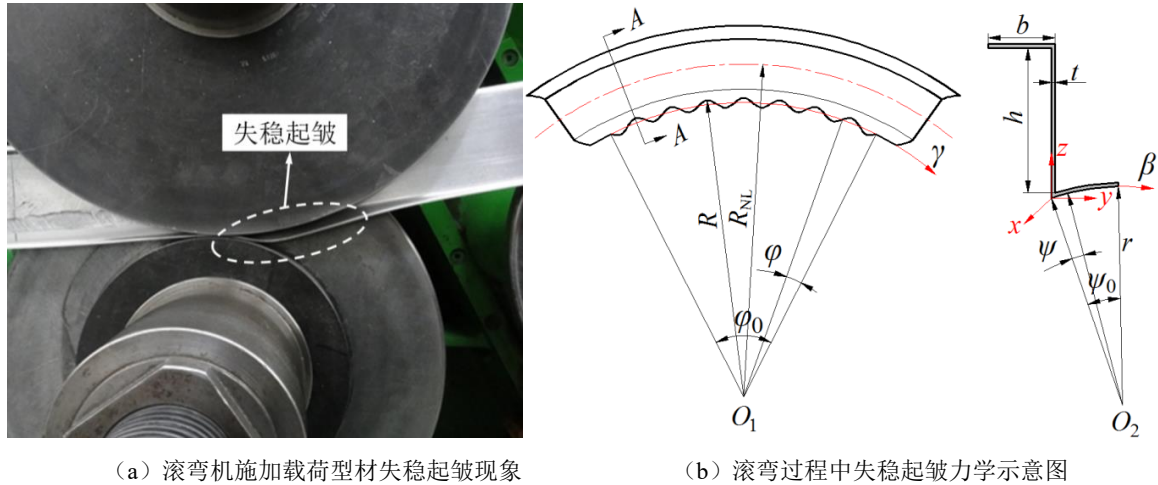


图 3-2 型材滚弯成形中失稳起皱及其变形原理

为探究工艺参数对失稳起皱过程的影响，本文将对四轴滚弯机的夹持力 P 、四轴滚弯机的进给速度 V 和型材与四轴滚弯机之间的间隙 G ，这三个方面对失稳起皱展开研究^[21]。实验用四轴滚弯机（VPR-SPEC-CNC）及其工装参数的设置范围（见表 3-1）。

表 3-1 滚弯工艺参数及其设定范围

序号	工艺参数	模具间隙 G (mm)	进给速度 V (rad·s ⁻¹)	夹持力 P (kN)
1		0.23	1.57	15
2		0.47	6.28	30
3		0.53	9.42	50

3.3.1.1 滚弯夹持力 P 对失稳起皱的影响

本节针对滚弯夹持力 P 的大小以及利用弹塑性本构模型二次开发对失稳起皱的影响展开分析。本文考察型材从稳定状态到力卸载状态的起皱量，把最大失稳起皱量设为 $w_{\max}$ 作为特殊指标进行分析，根据图 3-3 显示，二次开发模型与有限元模拟在标准成弧面下的起皱量接近。具体分析两种方法，有限元模拟法和二次开发模型均是滚弯夹持力为 P_2 和 P_3 时的数值，此时型材圆弧板内侧缘板的最大失稳起皱量 $w_{\max}$ ，其有限元模拟法 3.38mm 和 3.26 mm，同理计算二次开发环境下的最大起皱量分别为 3.20mm 和 3.12mm。相对 P_2 和 P_3 时的最大起皱量， P_1 时的最大起皱量分别为 3.58mm 和 3.42mm，有限元模型下降 5.5%和 6.1%，二次开发

模型 6.832%和 9.615%。基于上述分析可知，有限元模拟和二次开发模型可得出相同结论，但二次开发环境下的起皱量下降更大。此外，根据图片可知，图中起皱量在波动，观察可知随着加持力的增大，最大失稳起皱量反而在波动之中越来越小。因此。本节可得若要对起皱量进行抑制，可通过增加加持力的工艺方法进行调控。

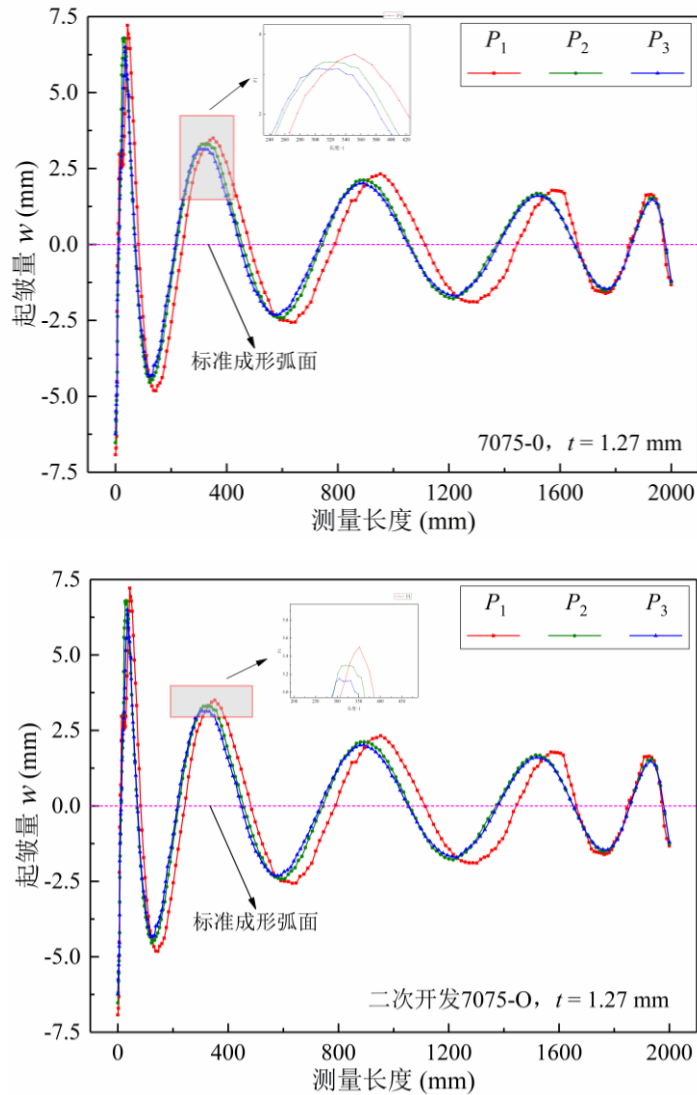


图 3-3 滚弯夹持力 P 对失稳起皱的影响

3.3.1.2 滚弯速度 V 对失稳起皱的影响

根据 3.3.1.1 节理论分析可知，鉴于滚弯速度对失稳起皱量也可存在影响，故本节针对滚弯速度为研究变量，通过有限元和二次开发两种方法相互验证，使得实验结果更加精确。根据图 3-4 可知，当型材从稳定状态到力卸载状态时，两图明显可观察到 V_2 和 V_3 的起皱量更大，有限元模型分别为 3.78mm 和 3.89mm，二次开发模型下最大起皱量分别为 3.62mm 和 3.73mm。二者相较于 V_1 时的最大起皱量分别为 3.56mm 和 3.48mm。有限元模拟下，二者分

别增加了 5.82%和 6.45%；二次开发环境下二者分别增加了 6.75%和 9.64%。由图形和数据分析可知，当滚弯速度增大时，在标准成弧面下，其最大起皱量也会增加。

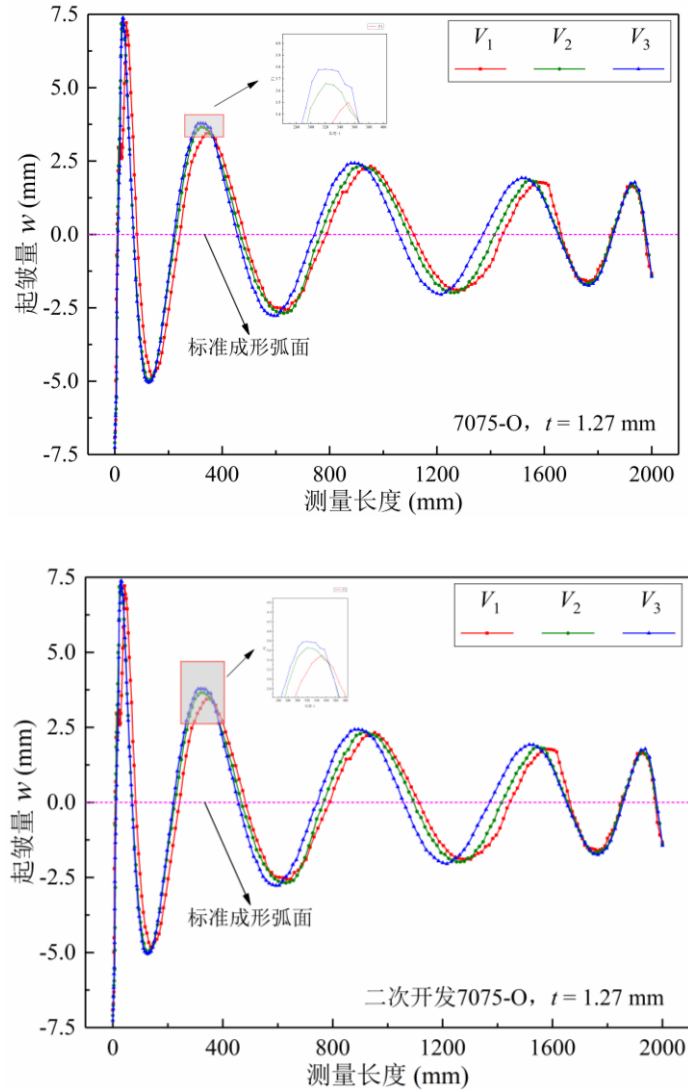


图 3-4 滚弯速度 V 对失稳起皱的影响

3.3.1.3 模具间隙 G 对失稳起皱的影响

根据上文的研究方法，本节考虑第三个影响因素，即型材加持时的间隙大小。本节同样通过有限元模拟和二次开发来相互验证其正确性。据图 3-5 可知，7075-O 型材在滚弯成型失稳起皱过程中，当间隙为 G_1 和 G_3 时，此时当型材从滚弯稳定状态到力卸载状态，在有限元模拟标准成弧面下，其最大起皱量分别为 3.39 mm 和 3.58 mm。同时，二次开发环境下的最大起皱量为 3.32mm 和 3.48mm。通过与 V_1 对比，在 V_1 时对应的起皱量 3.56mm，间隙为 G_1 时对应的起皱量 w_{max} 降低了 2.1%。根据上述数据分析可知，当型材与滚弯机接触较少时，会存在型材加持定位漂移从而接触面积变大，但此时的接触并非正接触，可能会存在翘边，

隆起等现象，这样就会导致型材起皱。通过上述结论可到，当进行滚弯加工时，间隙越小，对于起皱的抑制效果越好。

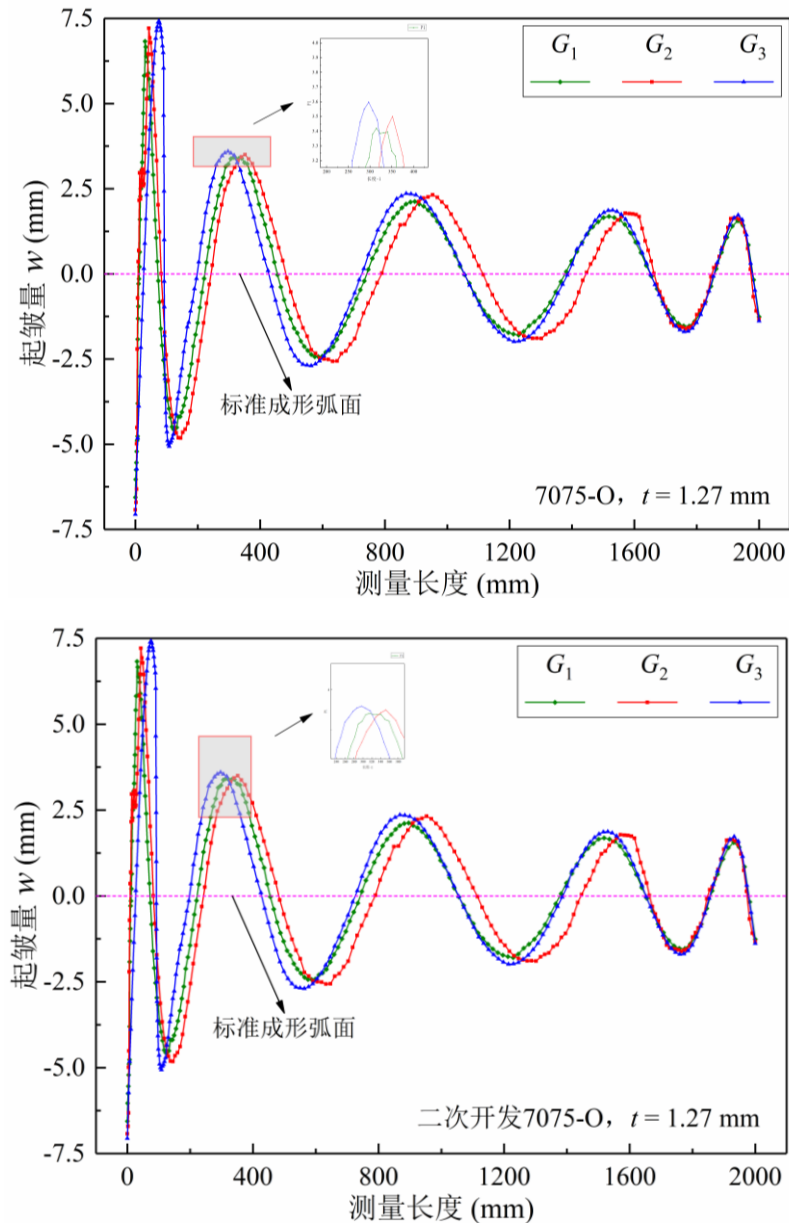


图 3-5 型材与模具间隙 G 对失稳起皱的影响

基于对上述三个影响因素的分析，在有限元模拟和二次开发环境下，结论相似。可以得到，在进行非对称截面型材滚弯时，要研究其失稳起皱量，首先要研究其三个影响因素，其中根据图 3-3 可知，在规定的测量长度内，基于标准成弧面进行研究得到滚弯压力 P 对失稳起皱的影响最大， P 增大的变化会带来起皱减小，其次通过有限元和二次开发进行验证发现，二者对于起皱量的影响较小。综上所述，当 P 增加， V 降低时，可有效地抑制型材失稳起皱现象。

3.3.2 失稳起皱有限元分析

失稳起皱是一种复杂的现象，其是要考虑多种要素共同决定的结果，在失稳起皱过程中，腹板和缘板的加持位置和其几何特征也会影响滚弯成形的整个过程。故本节通过有限元分析失稳起皱现象的发生即起皱量的提取。在进行滚弯实验时，一般会呈现如图 3-6（a）的样子，型材的表面光滑且无起皱，在数值模拟结果中，可以分析应力--应变的变化趋势和局部受力的数值大小。基于此，图 3-5（b）根据滚弯成形后的云图，在型材上标记路径，可根据实验的需求进行路径点的标取，再通过 Plot 工具，提取路径点上的坐标，通过 Matlab 将坐标导入，利用三点成圆法计算成型半径。

但对于存在几何特征变化，工艺参数变化的情况，在进行滚弯实验时会存在失稳起皱现象。图 3-6（c）是一种情况，在对工艺参数改变后，其缘板和腹板位置发生了明显的起皱现象，此时根据上述方法对节点坐标进行标记，提取出起皱点的坐标值（y，z），再利用数值分析计算起皱点的起皱量。

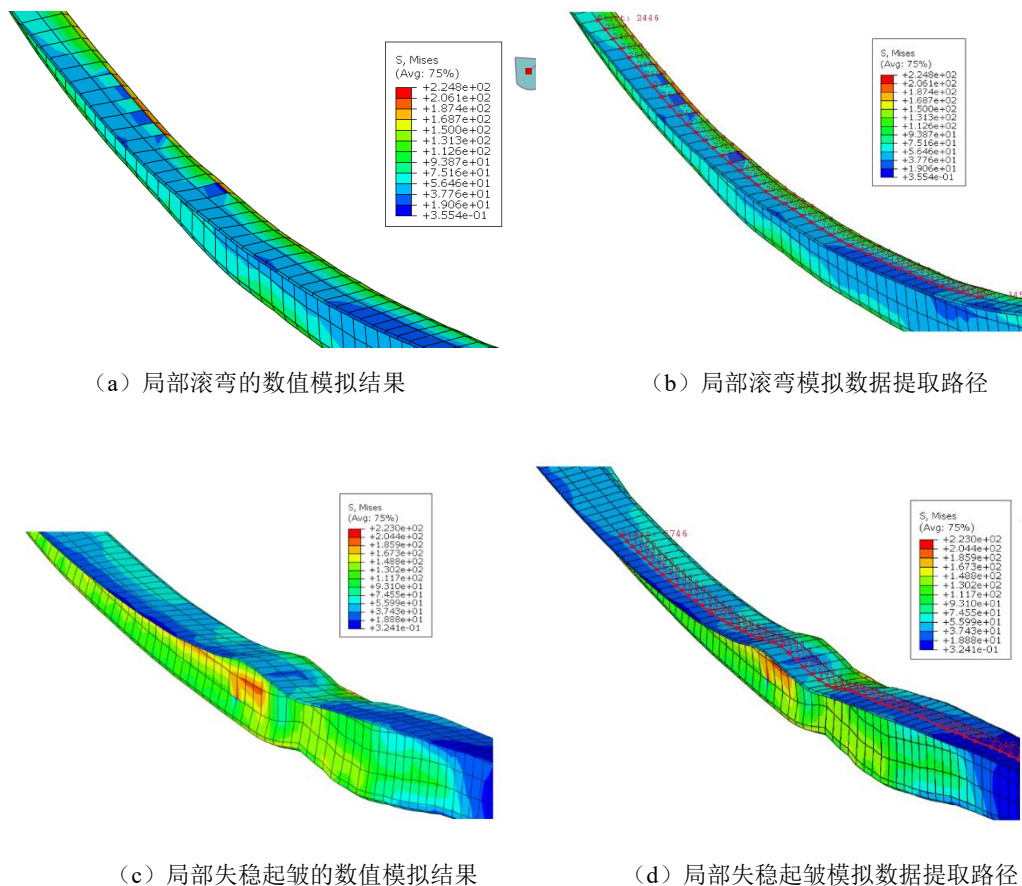


图 3-6 型材弯曲件局部失稳起皱的有限元模拟结果

图 3-7 表示了 1.27mm 和 2.0mm 两种厚度的 7075-O 和 7475-O 型材，在有限元模拟方式下的起皱量分布情况。如图可知，在控制型材厚度不变的情况下，改变型材类型，见图（a）和（c），在厚度为 1.27mm，目标半径为 776mm 时，在标准成弧面上起皱量最大，分别为

1.45mm 和 2.42mm，起皱量增加了 1.42 倍。同理见图 (b) 和 (d)，在厚度为 2.0mm，目标半径为 1649 时，在标准成弧面上的起皱量最大，分别为 0.46mm 和 0.59mm，最大起皱量增加了 0.23 倍。

同理当在控制型材类型不变的情况下，改变型材厚度时，根据图 (a) 和 (b)，目标半径为 776 时，起皱量最大为 1.45mm，而厚度为 2mm 的型材，目标半径为 1649mm 时，起皱量最大为 0.46，减少了 0.97 倍。根据图 (c) 和 (d) 可知，当目标半径为 776mm 时，标准成弧面上的起皱量为 2.42mm，而此时 $t=2\text{mm}$ 的型材，在标准成弧面上的起皱量为 0.59mm，下降了 3.11 倍。

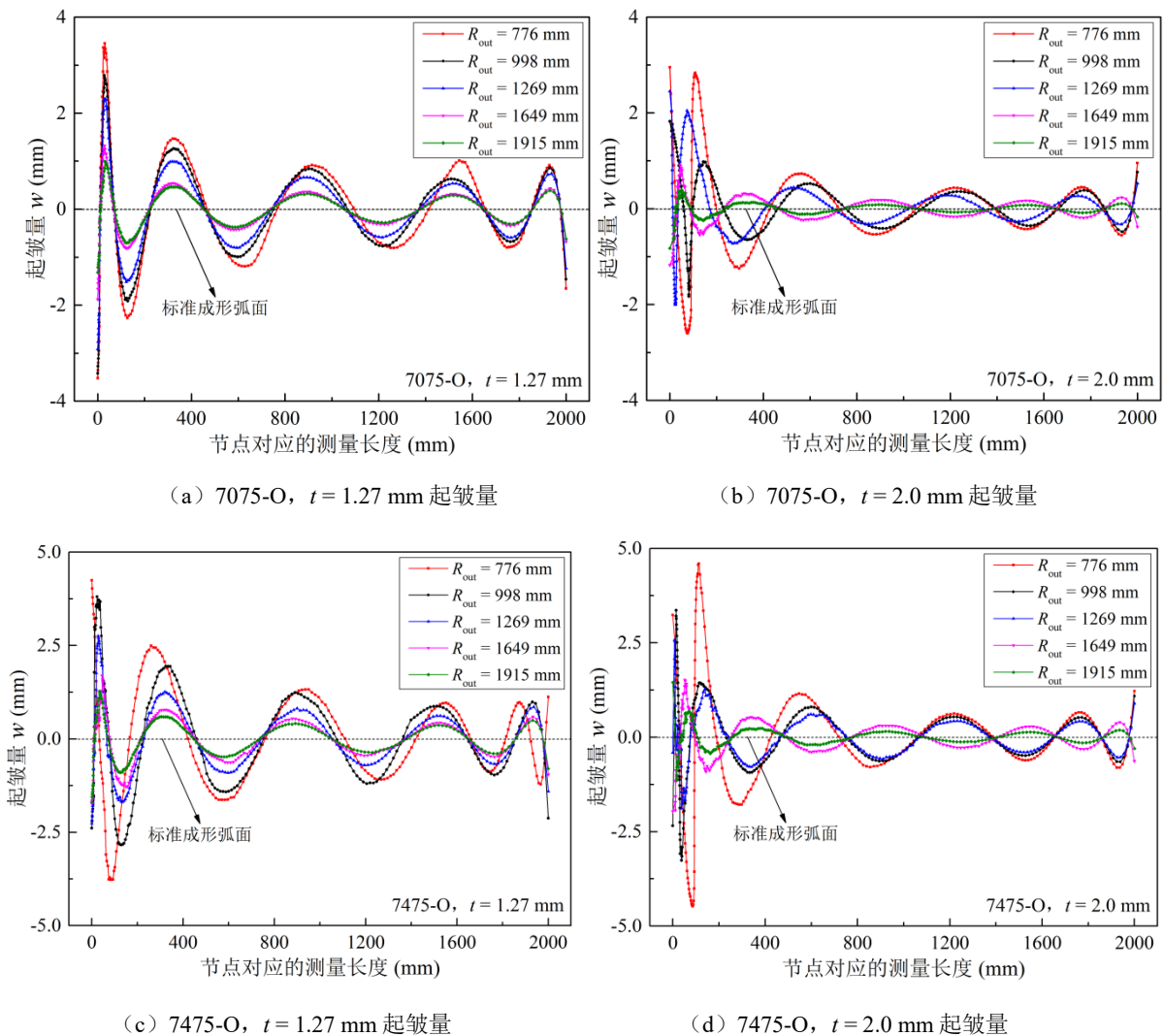


图 3-7 Z 截面型材内弧面失稳起皱的分布规律

3.3.3 基于 Hill48 二次开发有限元分析

基于 3.2 节推导，将 0° 、 45° 、 90° 三个方向测出的各向异性屈服应变比参数值带入子程序中，程序如下：

定义一个子程序，接受各向异性屈服应变比参数作为输入

`def calculate_stress(anisotropy_ratio, other_parameters):`

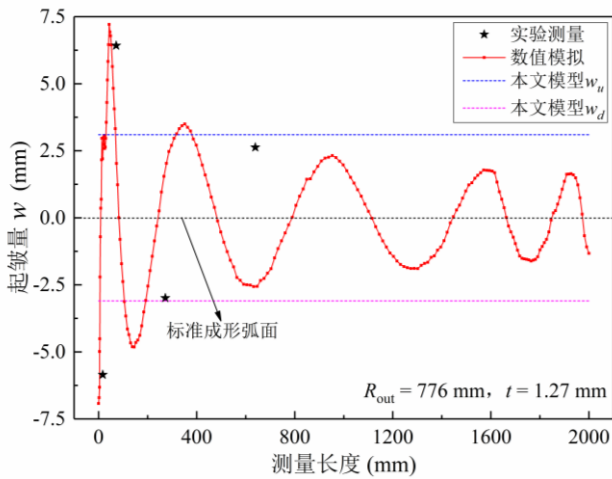
这里设置各向异性屈服应变比参数的值

`other_parameters = ...`

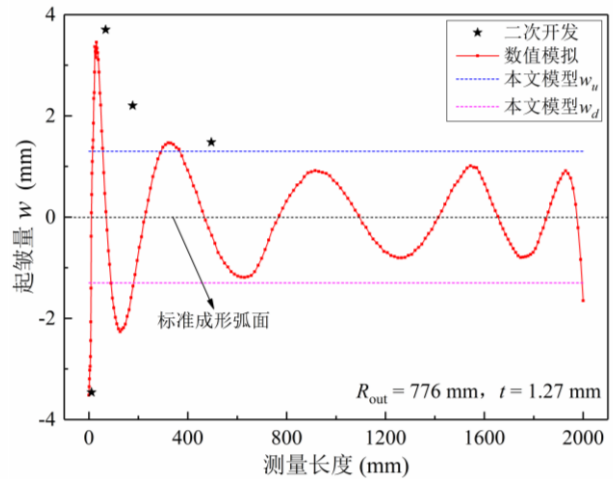
其他需要传递的参数

`resulting_stress = calculate_stress(anisotropy_ratio, other_parameters)`

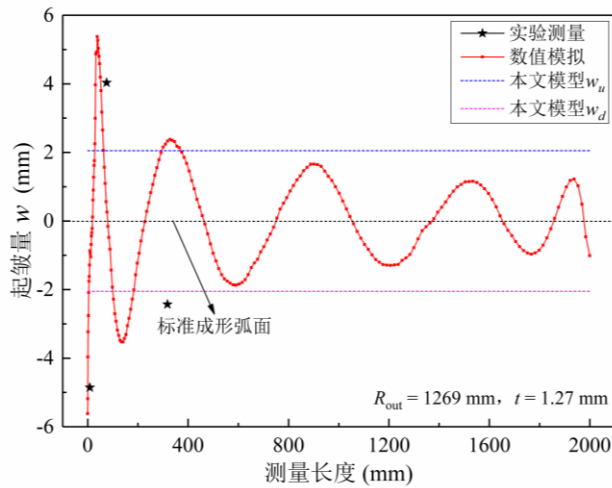
利用 ABAQUS 调用子程序。本文将对比 3 组实验结果，观察二次开发的起皱分布及起皱量。



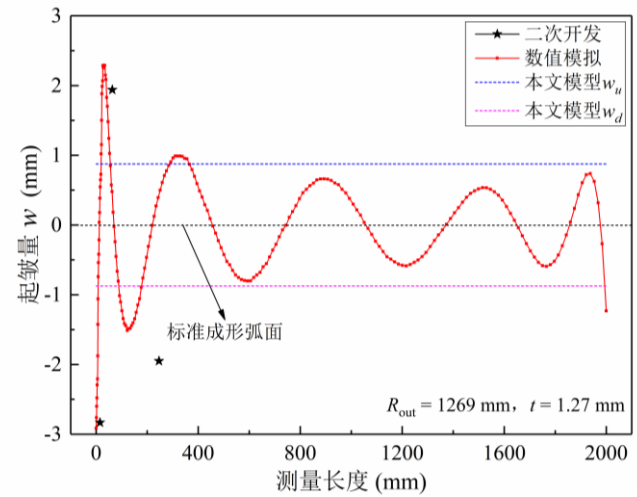
(a) 实验测量起皱量



(b) 二次开发起皱量



(c) 实验测量起皱量



(d) 二次开发起皱量

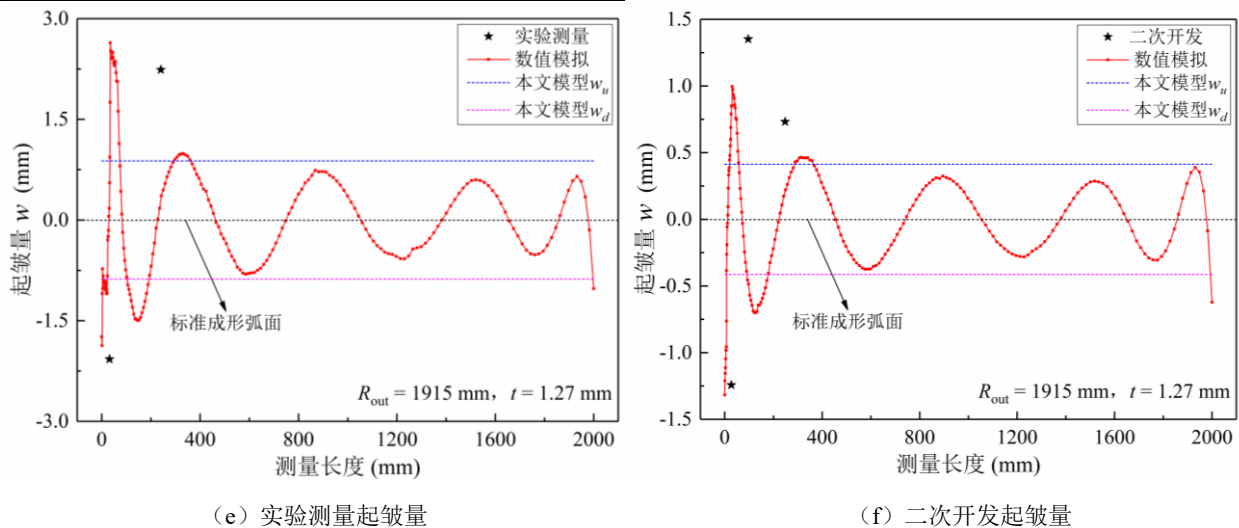


图 3-8 7075-O Z 截面型材内弧面失稳起皱对比验证分析

图 3-8 显示了模拟 HILL48 模型的有限元模拟和有限元模拟两种预测方法。材料为 7075-O，基于不同弯曲半径半径（776mm、1269mm、1915mm）测量的长度取决于 Z 型材料的失稳起皱变化规律，如图所示，壁厚 t 和目标半径相同，有限元模型和 HILL48 模型的预测稍有不同。在有限元模拟中，失稳起皱量 W_u 小于 3.14mm、2.05mm、0.88mm 的三个滚弯半径（776mm、1269mm、1915mm）（缘板边缘的起皱对称地分布在标准曲面的任意一侧，即 $W_u = W_d$ ，仅在分析期间可验证 W_u ）。在 HILL48 模型中，失稳起皱量分别为 1.32mm、0.88mm、0.41mm。因此，本文研究在 Hill48 模型下，非对称截面型材滚弯失稳起皱量会更小，相比前者最高降低 57.96%，最少降低 53.40%。但本节仅针对同厚度 7075-O 型材研究，未考虑在不同工艺下是否会发生变化。后文将通过正交实验，对不同影响因素的滚弯工艺加以调控。

3.4 非对称截面型材失稳起皱预测

3.4.1 失稳起皱能量准则

首先，由于型材截面的不对称性，会导致在弯曲过程中出现不均匀的应变分布，可能引起一侧的拉伸应变过大，另一侧的压缩应变过大，从而导致失稳现象的产生。此外，型材零件在弯曲成形过程中，缘板部分可能会出现局部压缩、局部拉伸或弯曲变形，需要精确控制成形过程中的应变和应力分布以避免产生裂纹或失稳现象。针对这些问题，需要综合考虑型材零件的材料性质、几何形状、成形工艺参数以及设备精度等因素。通过合理设计成形工艺、优化型材截面形状、选择适当的材料和加工工艺，可以降低型材零件在弯曲成形过程中的失稳风险，提高成形工艺的稳定性和可靠性。同时，对失稳机理和型材零件在弯曲过程中的变形行为进行深入研究，可以为解决这些问题提供更有效的方法和技术。

在纵向载荷作用下，当缘板由于外加干扰力即平面平衡处于稳定阶段^[93,94]。设定 U 为缘板产生失稳起皱的弯曲应变能， T 为外力所做的功，所涉及各状态数学描述如下：

$$\begin{cases} U > T & \text{稳定状态} \\ U = T & \text{临界状态} \\ U < T & \text{不稳定状态} \end{cases}$$

采用能量法预测失稳起皱的判定法则为，如图 3-9 所示：

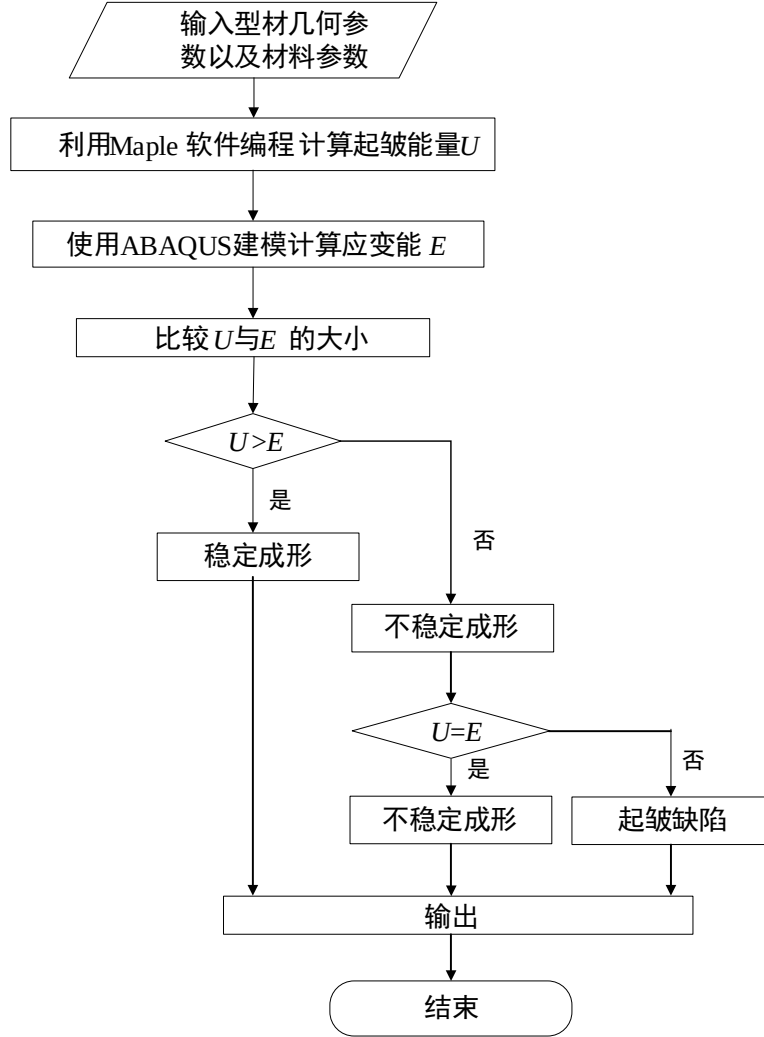


图 3-9 失稳起皱判别方法

3.4.2 失稳起皱模型建立

根据板壳理论^[59]，设定曲面间的距离即厚度与成形半径的比值远远小于 1 并可忽略时，则弯曲件被认为是薄壳构件。其中间层面的应变、曲率变化趋势和扭矩 χ 可表述为：

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \frac{v}{AB} \cdot \frac{\partial A}{\partial \beta} + \frac{w}{R_l} \quad (3-11)$$

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{u}{AB} \cdot \frac{\partial B}{\partial \beta} + \frac{w}{R_2} \quad (3-12)$$

$$\tau_{\gamma\beta} = \frac{B}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{v}{B} \right) + \frac{A}{B} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{v}{A} \right) \quad (3-13)$$

$$\kappa_1 = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{u}{R_1} \right) + \frac{1}{AB} \cdot \frac{\partial A}{\partial \beta} \cdot \frac{v}{R_2} - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial w}{\partial \gamma} \right) - \frac{1}{AB^2} \cdot \frac{\partial A}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial w}{\partial \beta} - \frac{\varepsilon_{\gamma}}{R_1} \quad (3-14)$$

$$\kappa_2 = \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{v}{R_2} \right) + \frac{1}{AB} \cdot \frac{\partial B}{\partial \gamma} \cdot \frac{u}{R_1} - \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{\partial w}{\partial \beta} \right) - \frac{1}{A^2 B} \cdot \frac{\partial B}{\partial \gamma} \cdot \frac{\partial w}{\partial \gamma} - \frac{\varepsilon_{\beta}}{R_2} \quad (3-15)$$

$$\chi = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{u}{A} \right) + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{v}{B} \right) - \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \gamma \partial \beta} - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial w}{\partial \gamma} - \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial B}{\partial \gamma} \cdot \frac{\partial w}{\partial \beta} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \kappa_{\gamma\beta} \quad (3-16)$$

式中：

A 、 B ——各向异性系数系数；

R_1 、 R_2 ——变形处半径/mm；

γ 、 β ——边缘线坐标；

ε_{γ} 、 ε_{β} 、 $\tau_{\gamma\beta}$ ——中间层应变；

κ_1 、 κ_2 、 $\kappa_{\gamma\beta}$ ——变形部位的曲率变化量/mm⁻¹；

u 、 v 、 w ——分别为图 3-2（b）中沿 x 、 y 、 z 方向的位移/mm。

3.5 失稳起皱的控制策略

失稳起皱是型材弯曲过程中常见的问题，需要采取一系列控制策略以减轻或避免这种现象的发生。以下是一些常见的失稳起皱控制策略：优化成形工艺参数：合理选择成形工艺参数，如下料长度、弯曲速度、模具设计等，以确保材料在成形过程中受到均匀的应变分布，避免局部应变过大导致失稳起皱。控制材料性质：选择合适的材料，例如具有较好的延展性和均匀性的材料，可以减少失稳起皱的风险。提高设备精度：确保成形设备的精度和稳定性，避免设备误差或振动对成形过程产生不利影响。采用辅助支撑装置：在型材弯曲过程中使用适当的辅助支撑装置，可以减小型材在成形过程中的变形和应力集中，有助于减轻失稳起皱的发生。优化模具设计：设计合理的模具结构和形状，避免尖锐角度和过渡部分过于陡峭，减少应力集中和形变不均匀，从而降低失稳起皱的风险。

实时监测和调整：在成形过程中实时监测型材的变形情况，及时调整成形参数以保持成形过程的稳定性。

上述控制策略的综合应用可有效减少型材弯曲过程中出现的不稳定性和起皱问题，提高成形质量和生产效率，通过建立失稳起皱正交实验，分析各影响因素对起皱量的影响，从而获得本文研究的非对称 Z 型材四轴滚弯精确成形模型，其正交实验的结果如表 3-2 所示。该表通过对 G、V、P 三个影响因素进行分析，设置初始间隙为 0.24mm，0.48mm 和 0.54mm，对加持力 P 也进行赋值，最终根据设计的正交实验，在有限元模拟中进行计算，计算得，在控制厚度为 1.27mm 的前提下，目标成形半径为 776mm，则此时正交实验的最大起皱量为 4.24mm，最小起皱量为 3.16mm，这表明不同影响因素下，起皱量会有明显变化，且关键评价指标就是衡量标准。

表 3-2 失稳起皱的正交试验结果

试验编号	因素			评价指标
	G (mm)	V (rad·s ⁻¹)	P (kN)	w (mm)
1	0.24	1.58	15	3.67
2	0.24	6.29	50	3.27
3	0.24	9.43	30	3.85
4	0.48	1.58	50	3.16
5	0.48	6.29	30	3.55
6	0.48	9.43	15	4.24
7	0.54	1.58	30	3.66
8	0.54	6.29	15	4.27
9	0.54	9.45	50	3.38

当分析多种因素对起皱量的影响时，由表 3-3 可知，通过极差分析，确定数据集中最大值和最小值，然后将最大值减去最小值得到极差，其次衡量数据集中变异程度的简单方法。较大的极差表示数据点之间存在较大的差异，而较小的极差则表示数据点之间变异较小，最后根据极差分析的结果，可以对数据集的变异程度进行解释，并探讨可能的原因。比较不同组别或条件下的极差可以帮助识别影响数据变异的因素。据此根据失稳起皱的极差分析结果

评价指标中可清楚得出，加持力对起皱影响最大，而 V 和 G 则影响不大，可以由表得出主次顺序为 $P > V > G$ 。因此据分析最佳组合为 $P_3V_1G_1$ ， $P=50\text{kN}$ ， $V=1.57\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $G=0.23\text{ mm}$ 。

表 3-3 失稳起皱的极差分析结果

评价指标	失稳起皱量 w (mm)		
	模具间隙 G (mm)	滚弯速度 V ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	夹持力 P (kN)
K_{1j}	10.77	10.46	12.18
K_{2j}	10.95	11.16	11.07
K_{3j}	11.28	11.45	9.77
k_{1j}	3.53	3.44	4.06
k_{2j}	3.67	3.75	3.65
k_{3j}	3.72	3.88	3.24
Δ_j	0.17	0.38	0.78
主次顺序	$P > V > G$		
最优水平	G_1	V_1	P_3
最优组合	$P_3 V_1 G_1$		

3.6 本章小结

(1) 非对称截面 Z 型材滚弯成形过程存在失稳起皱问题，本文系统研究了失稳起皱的发生，失稳起皱的影响因素，失稳起皱量的预测及失稳起皱控制策略。

(2) 本文通过建立 Hill48 模型，研究出在该模型下起皱量相比有限元模拟最高降低 57.96%，最少降低 53.40%。

(3) 本文充分考虑滚弯工艺不同对起皱带来的影响，故通过正交实验，对比有限元模拟和 Hill48 模型两种方法下的最优搭配组合，研究出 Hill48 模型在 $P=50\text{ kN}$ ， $V=1.57\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $G=0.23\text{ mm}$ 为最优参数组合，其精度相较有限元模拟提高了 15.34%。

(4) 仅考虑几种型材，有限的影响因素不足以运用于工程实践中，故下文利用神经网络，学习大量数据，训练模型，达到多因素影响下精确预测的效果。

第 4 章 BP 神经网络滚弯回弹预测及参数调控策略研究

4.1 引言

滚弯成形工艺是航空航天、汽车制造、电子工业等领域主要的方法，其因约束较少，易发生截面畸变，失稳起皱等问题，比一般的型材拉弯，冲压成型工艺更为复杂，故研究较少^[96]。但滚弯工艺又具备节能、高效、低成本、省板料等特点，因此在市场竞争中优势更大，所以近年来研究者愈发重视滚弯成形工艺的研究和发展^[97,98]。

滚弯成形过程主要受滚弯机成型精度、板料材料属性、工艺方法等多因素的交互影响，因此造成滚弯成形工艺的不确定性、波动性、复杂性等特点，使其难以理解和应用^[99]。尤其在对不同工艺参数型材滚弯过程中，多因素的影响会使型材的成型结果呈现非线性不规则问题，加之滚弯机滚轮间隙、进给速度、侧滚轮抬升高度等工艺参数均会产生误差；不同材料属性的板料，滚弯时产生不可控的材料属性波动同样会产生误差，导致成形精度低等问题^[100,101]。因此需对成型回弹与工艺参数间关系，建立可靠的回弹预测模型，以此对滚弯成形后的回弹量、回弹半径精确预测，并对相应的工艺参数修正，提高滚弯成形精度。

本文以非对称截面 Z 型材为研究对象，基于 BP 神经网络建立回弹预测模型，利用训练模型进行参数调控。以 7075-O 和 7475-O 铝合金型材为研究对象。考虑多目标，多因素，利用拉丁超立方试验设计取样点数值，降低过拟合风险，以不发生截面畸变和失稳起皱为前提条件，达到提高回弹预测精度，参数调控的研究目的。

4.2 非对称截面型材成形技术研究

4.2.1 滚弯成形方法

本文研究对象为非对称截面 Z 型材，滚弯时会产生截面形状的变化，且型材在弹塑性变形时，其材料性能，力学性能等因素会发生差异性变化^[102]。本文仅针对 7075-O 和 7475-O 两种铝型材进行滚弯实验，材料性能参数列于表 4-1 中。

表 4-1 型材材料性能参数

材料	弹性模量 E / MPa	屈服强度 σ_s / MPa	强度系数 K / MPa	硬化指数 n	塑性模量 D / MPa
7075-O	70289	88	196	0.209	2753
7475-O	71171	114	339	0.175	2116

本文采用数控四轴型材滚弯机（VPR-SPEC-CNC）对型材进行滚弯，型材滚弯过程如图

4-1 所示。

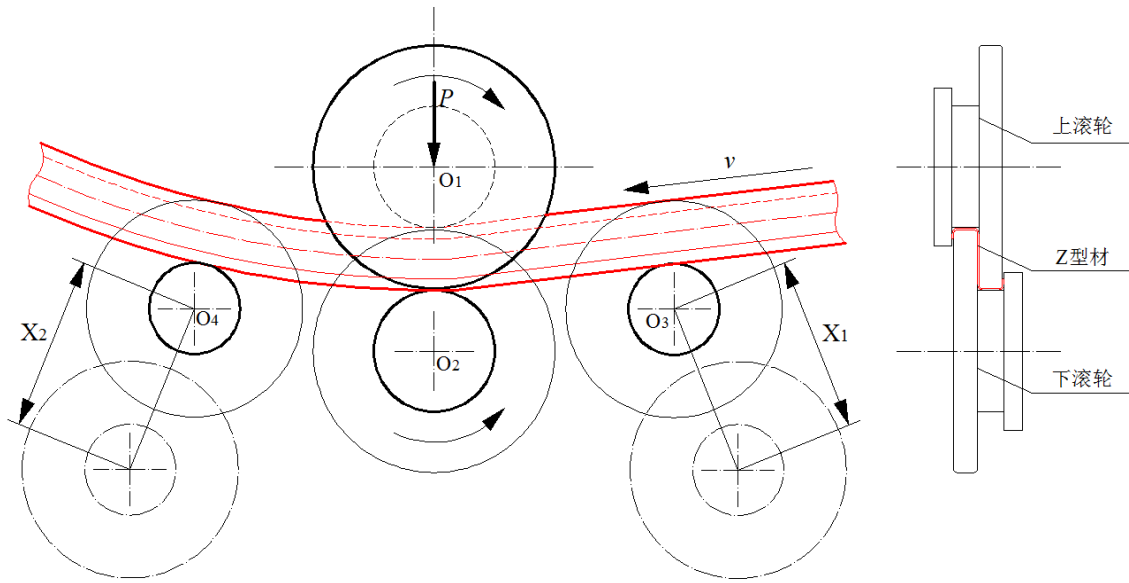


图 4-1 滚弯过程示意图

从图 4-1 中可以看出整根型材滚弯过程：型材进入夹持系统（上下滚轮）型材左端开始进入弯曲阶段、型材左端通过夹持系统搭上左侧滚轮即型材进入稳定滚弯阶段、型材右端离开右侧滚轮即型材滚弯结束阶段。

4.2.2 非对称截面型材有限元模拟

对完成滚弯成形后的型材采用无模法进行回弹分析^[16]。具体做法是：复制模拟滚弯完成后的模型，在模型属性中设置重启动参数，设置从模型计算已完成的数据库中读取结果，分析步名称设置为计算已完成模型的最后一个分析步末尾开始，并将新模型中除型材之外的所有其他部件及相关接触删除，建立回弹隐式分析步，材料属性与网格划分均保持不变，提交作业进行回弹分析，即可得到型材回弹后的最终结果。

滚弯模型的初始状态是上下滚轮闭合夹持型材，型材处于水平状态，两侧滚轮与需要滚弯的型材接触，如图 4-2（a）所示。滚弯过程可划分为两个阶段：第一阶段是保持型材和上下夹持滚轮固定，左、右两侧弯曲滚轮沿与 Y 轴成 25° 角的导轨向上对称移动到指定的位置后停止，如图 4-2（b），（c），所示，并保持位置不变，此时型材由于两侧弯曲滚轮向上的支力发生弯曲，第一阶段结束，称为弯曲滚轮调整过程。第二阶段是通过在上下夹持滚轮上施加绕 X 轴旋转的角速度位移载荷，夹送型材沿长度方向进给，使型材发生变形，直至滚弯过程结束，该阶段称为滚弯阶段，如图 4-2（d），（e），（f）。模拟中相应的将这两个阶段分为两个分析步，即滚轮调整步和滚弯步，每个分析步又分为 100 个增量步，两侧弯曲滚轮抬升 10mm，夹持力为 20KN，滚弯线速度 333mm/s 时，数控四轴对称滚弯数值模拟过程中不

同增量步的成形图。

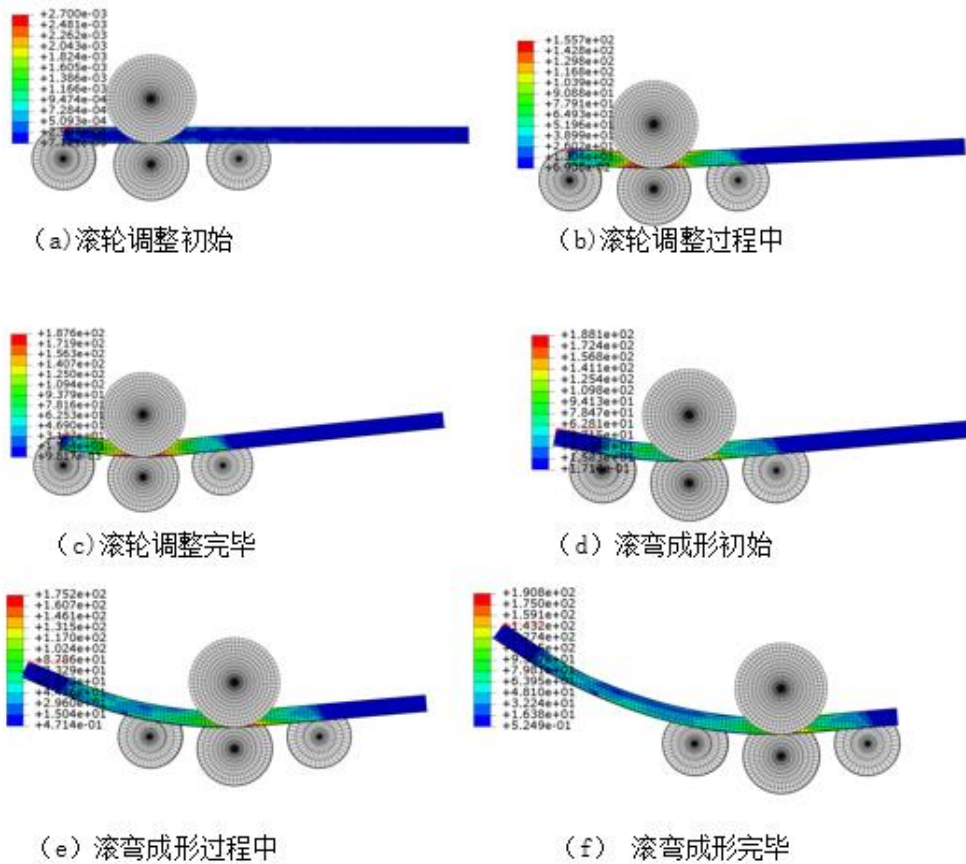


图 4-2 数控四轴滚弯过程不同阶段的成形云图

4.2.3 滚弯成形数值模拟

型材滚弯成形过程中涉及复杂的动力学和非线性问题。传统的隐式求解方法在处理非线性问题时存在一定困难，首先隐式求解方法通常需要解一个大规模的线性系统，这会增加计算的复杂性和成本，其次由于隐式方法涉及到求解非线性方程或者解线性系统，因此对于一些问题，难以进行稳定性分析和数值收敛性的证明，再者由于隐式方法中涉及到隐含的依赖关系，因此隐式方法的并行化可能会受到一定的限制，无法充分发挥多核处理器或分布式计算的优势，最后因为需要考虑收敛性和刚度矩阵的建立。因此，本文采用了动态显式算法，这种方法不需要解决隐式求解的困难，因此具有求解速度快、占用空间小等优点。动态显式算法在处理非线性问题时表现更加出色，有助于更有效地解决型材滚弯成形过程中的复杂问题。对于动力显式分析算法，首先建立弹塑性有限元本构模型，将具体的型材分割成 N 个有限元单元，对其中任一单元建立方程，由虚功率方程可得动力方程矩阵：

$$\begin{aligned}
& \int_{V_e} \left(\{\delta v\}^e \right)^T [B]^T \{\sigma\} dV = \\
& \int_{V_e} \left(\{\delta v\}^e \right)^T [N]^T \{b\} dV + \int_{S_p^e} \left(\{\delta v\}^e \right)^T [N]^T \{p\} dS + \\
& \int_{S_p^e} \left(\{\delta v\}^e \right)^T [N]^T \{q\} dS - \int_{V_e} \left(\{\delta v\}^e \right)^T [N]^T \rho [N] \{a\}^e dV - \\
& \int_{V_e} \left(\{\delta v\}^e \right)^T [N]^T \gamma [N] \{v\}^e dV
\end{aligned} \tag{4-1}$$

其中单元应变矩阵为 $[B]$ ，单元形变函数矩阵 $[N]$ ，可得：

$$\begin{aligned}
& \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dV \{a\}^e + \int_{V_e} \gamma [N]^T [N] dV \{v\}^e = \\
& \int_{V_e} [N]^T \{b\} dV + \int_{S_p^e} [N]^T \{p\} dS + \\
& \int_{S_p^e} [N]^T \{q\} dS - \int_{V_e} [B]^T \{\sigma\} dV
\end{aligned} \tag{4-2}$$

联立（4-1），（4-2）可得有限元方程：

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} = \{P\} - \{F\} \tag{4-3}$$

其中：

$$\begin{aligned}
[M] &= \sum \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dV \\
[C] &= \sum \int_{V_e} \gamma [N]^T [N] dV \\
\{P\} &= \sum \int_{V_e} [N]^T \{b\} dV + \sum \int_{S_p^e} [N]^T \{p\} dS + \\
& \sum \int_{S_p^e} [N]^T \{q\} dS \\
\{F\} &= \sum \int_{V_e} [B]^T \{\sigma\} dV
\end{aligned} \tag{4-4}$$

因无需迭代收敛，计算速度快，存储量小，因此针对非线性问题的求解，特定的非线性问题，选择合适的方法取决于问题的性质、复杂程度和所需的精度。在实际应用中，通常需要结合理论分析、数值模拟和实验验证来综合求解非线性问题，因此大多更倾向于建立显式积分法的数值模拟方程。

4.3 拉丁超立方方法设计试验

4.3.1 设计变量的选取

本文基于 7075-O 和 7475-O 两种铝型材，针对非对称截面 Z 型材设计多目标优化方案。为有更好的预测效果和调控结果，故本文将选取包括：型材厚度（T）、型材类型（S）、侧轮抬升高度（X）、滚轮转速（V）、目标成型半径（R）在内的五个变量作为参数，各个变量由于存在一定的波动性，因此上述参数的取值范围见表 4-2 所示。

表 4-2 设计变量取值范围

变量	T(mm)	S	V(rad/s)	X(mm)	R(mm)
取值范围	1.27-2.0	7075-O	1.47-1.62	128.1-130.6	1900
				131.2-135.8	1635
		7475-O		142.3-143.6	1260
				148.9-149.6	990
				153.1-153.9	770

4.3.2 拉丁超立方实验设计

神经网络的建立需要大量的样本数据作为支撑，而实验设计的目的在于最大程度的表示整个空间内的所有样本，保证神经网络训练出的数据真实可靠。传统的实验多为正交实验，其便捷性的优点，被常用于各种实验工作中，但是在研究型材滚弯成形的试验中，因其无法考虑到非线性的输出问题，故存在一定的误差^[18]。

本文采用拉丁超立方实验设计，用于同时考虑多个因素对实验结果的影响。这种设计方法可以有效地减少试验次数，提高试验效率，并且可以较好地控制实验误差，得到可靠的实验结果。在拉丁超立方实验设计中，试验区域被分割成若干个单元，每个单元包含一个试验点。每个试验点对应一个特定的级别组合，即对应各个因素水平的组合。通过拉丁超立方设计，可以确保每个因素的每个水平在不同的试验中出现且仅出现一次，从而可以有效地避免因素交互的影响。通过在不同试验点进行实验，收集数据并分析，可以得到各个因素不同水平对实验结果的影响情况，进而进行因素优化和参数调整。

滚弯实验存在多因素的影响，因此输出的非线性曲线相比正交实验，采用拉丁超立方设计可以更好的拟合非线性系统曲线，并具有更好的样本填充能力，见图 4-3 所示。

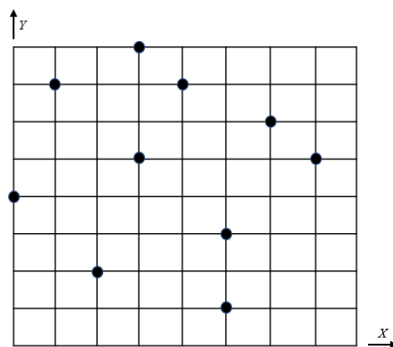


图 4-3 拉丁超立方样本分布图

但离散的样本数据存在缺陷，故本文改进取样方式，采用最优拉丁超立方取样，改善了样本填充的均衡性；相比于传统的拉丁超立方取样，最优拉丁超立方取样可以在相同样本量的情况下提供更好的覆盖性，从而提高了实验设计的效率；通过最小化样本之间的相关性，

最优拉丁超立方取样可以减少实验结果的偏差，使得实验结果更具代表性；最优拉丁超立方取样可以使实验结果更易于解释和分析，有助于确定各个因素对实验结果的影响程度。如图 4-4 所示。

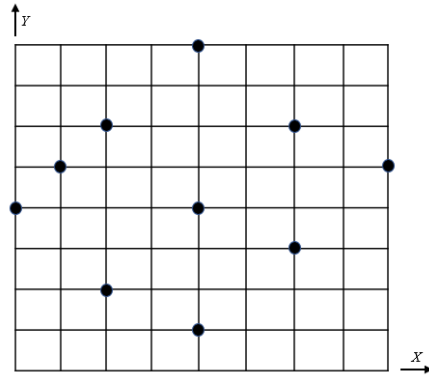


图 4-4 最优拉丁超立方样本分布图

在样本空间中，每组数据选取 48 个样本点用于后续神经网络预测模型的建立。

4.4 建立滚弯回弹神经网络预测模型

4.4.1 确定输入层与输出层变量

在型材的滚弯成形中，影响回弹半径精度的变量有：型材厚度、型材类型、侧轮抬升高度、滚轮转速、目标成型半径等，这些因素与回弹量之间的反映关系是非线性。本文利用神经网络处理非线性映射的能力，建立滚弯工艺参数与回弹半径之间的预测模型，如图 4-5 所示。该图有 5 个输入层和一个输出层，一个神经元需要四个参数和一个函数才能得到输出。

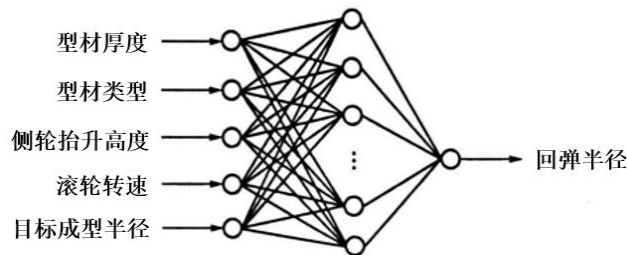


图 4-5 神经网络模型

4.4.2 BP 神经网络建立

目前神经网络模型常用的有三种：BP 神经网络、RBF 神经网络、CNN 神经网络^[19]。由于本文需对回弹半径进行预测且对工艺参数加以调控，故采用 BP 神经网络建立预测模型。

首先，建立权重 W 和均方误差损失函数（MSE）的函数方程，利用梯度下降法，使均方误差越来越小。

误差函数是用来衡量模型预测结果与实际观测值之间的差异的函数。在机器学习和统计

建模中，误差函数通常被用来评估模型的准确性和性能，即：

$$E_d(\bar{w}) \equiv \frac{1}{2} \sum (t_k - o_k)^2 \quad (4-5)$$

梯度下降函数，在机器学习和深度学习中，梯度下降被广泛应用于调整模型参数，以使损失函数最小化，即：

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E_d}{\partial w_{ji}} \quad (4-6)$$

链式法则：

$$\frac{\partial E_d}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_d}{\partial net_j} \frac{\partial net_j}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_d}{\partial net_j} x_{ji} \quad (4-7)$$

其中误差函数就是均方误差（ E ），梯度下降中 η 代表学习率， Δw_{ji} 为权重调整值。

在输入层确定后，通过公式计算反向传播数值，输出层求解步骤如下^[21]：

$$\frac{\partial E_d}{\partial net_j} = \frac{\partial E_d}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial net_j} \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial E_d}{\partial o_j} = \frac{\partial}{\partial o_j} \frac{1}{2} \sum (t_k - o_k)^2 = -(t_j - o_j) \quad (4-9)$$

$$\frac{\partial E_d}{\partial net_j} = \frac{\partial \sigma(net_j)}{\partial net_j} = o_j (1 - o_j) \quad (4-10)$$

将(4-10)结果代入(4-6)中可得：

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E_d}{\partial w_{ji}} = \eta (t_j - o_j) o_j (1 - o_j) x_{ji} \quad (4-11)$$

隐藏层求解步骤如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_d}{\partial net_j} &= \sum \frac{\partial E_d}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial net_j} \\ &= \sum -\delta_k w_{kj} o_j (1 - o_j) \end{aligned} \quad (4-12)$$

将(4-12)代入(4-6)中可得：

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j x_{ji}, \quad (\delta_j = (1 - o_j) \sum \delta_k w_{kj}) \quad (4-13)$$

根据求得结果，调整权重，完成一次反向传播，开始下一次迭代，循环此过程，直至收敛。

4.4.3 预测结果与精度分析

在 BP 神经网络训练完成后，通常会对训练好的 BP 神经网络进行评估和测试，再输入验证样本数据，测试训练效果和测试结果的误差，见图 4-6 所示。结果显示，考虑多因素滚弯成形回弹对训练误差，预测误差，验证误差的影响，在迭代 60 次后，取得了与最佳预测结果一致的回弹预测能力。

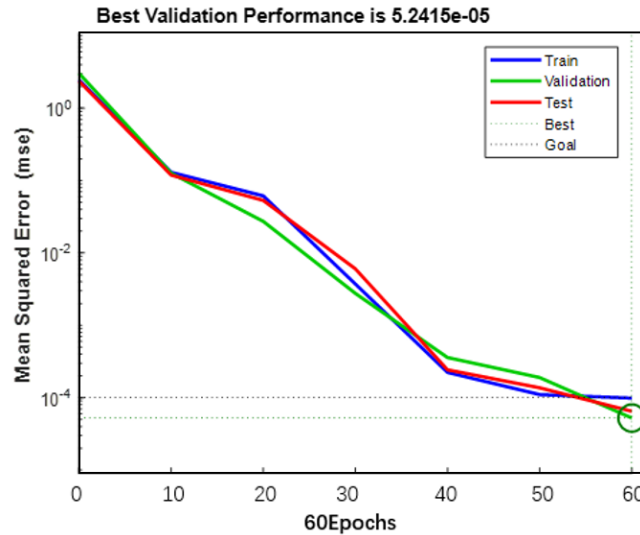


图 4-6 预测误差对比图

针对回弹半径与预测半径，如图 4-7 所示，选取某一组 48 个样本数据分析，结果显示在第 18 个取样点使，神经网络预测误差百分比最小，仅为 0.27%，第 48 个取样点的神经网络预测误差最大仅为 1.332%。

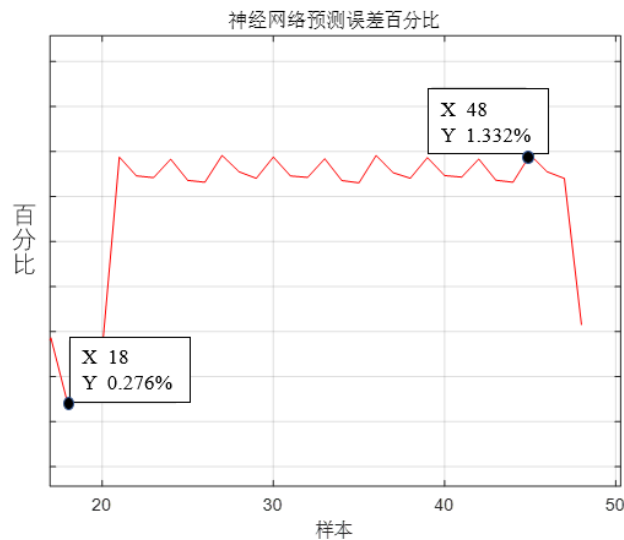


图 4-7 神经网络预测误差百分比

将样本数据进行反复试验，训练参数有：目标精度 1×10^{-5} ，学习率 0.001，整个训练组训练次数 1000，动量因子 0.8。利用 Matlab 语言自带神经网络工具箱进行编程，并按设定的

精度要求进行训练, 选取最优拟合曲线, 保存神经网络模型^[22]。利用保存的模型, 输入参数变量得到输出参数, 由图 4-8 可见, 图形的线性回归性能指标 R 接近于 1。说明本文建立的有关非对称截面型材预测模型真实有效, 可靠性高。

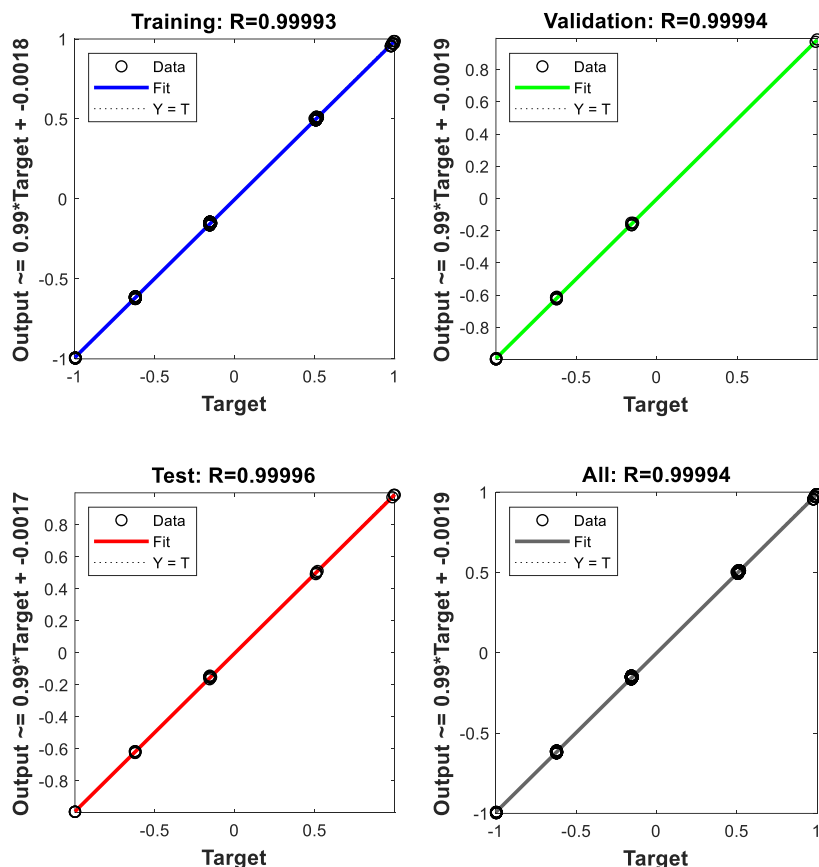


图 4-8 线性回归分析图

4.5 滚弯回弹工艺参数控制策略

4.5.1 输入层变量调控

基于非对称截面型材 BP 神经网络预测模型的成功建立, 为得到误差更小的滚弯回弹半径, 故对输入层的工艺参数变量加以调控。首先将滚弯工艺参数及目标成形半径输入神经网络预测模型, 得到回弹半径预测值。若存在误差, 则改变相应的参数变量, 再进行预测, 直至达到试验设定的误差范围, 如图 4-9 所示。

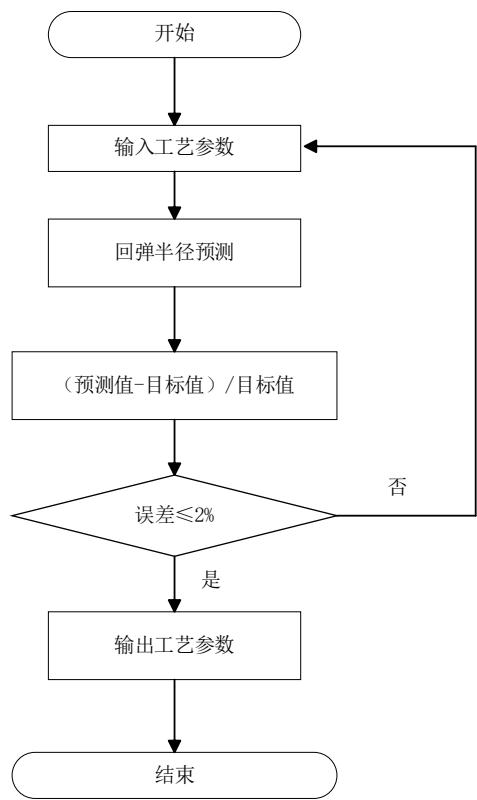


图 4-9 调控流程图

4.5.2 调控结果与精度分析

在对多个影响因素调控过程中得出，通过改变滚轮抬升高度对型材的回弹预测最为直接，精确，如图 4-10 所示。

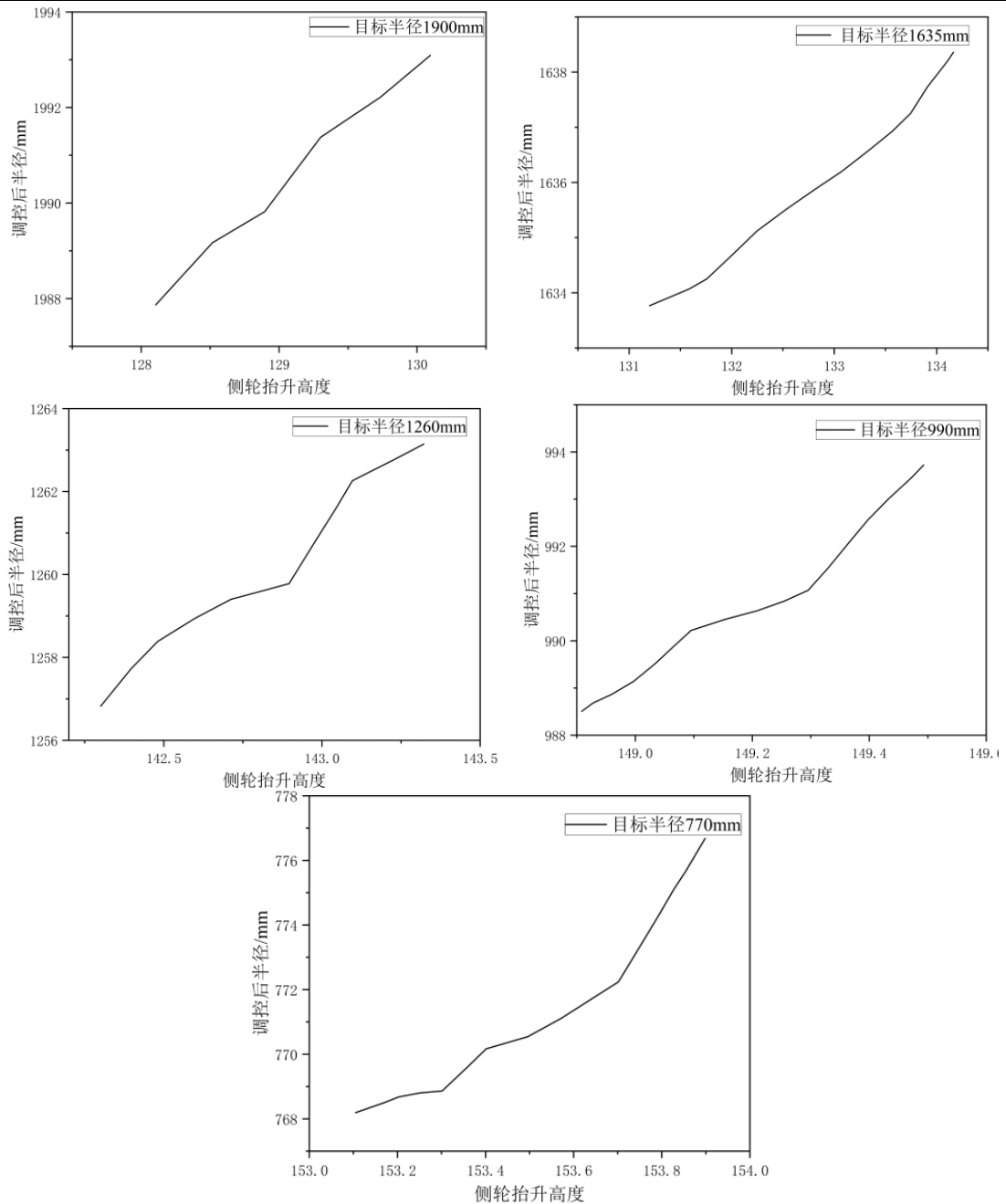


图 4-10 最佳滚轮抬升高度

考虑不同成形半径所对应的调控参数不同，精度误差也能存在差别，在金属件的滚弯成形中，不同的成形半径将对应着不同的应变分布和应力状态。因此，为了确保成形的精度和质量，需要根据不同的成形要求和几何参数来调整成形过程中的各项参数。在研究金属件滚弯成形过程中，需要考虑材料的各向异性、屈服准则、失稳机理等因素。这些因素会影响到回弹的预测准确性和成形工艺的优化。精确控制成形过程中的参数可以帮助降低回弹效应、减少起皱的风险，并最终改善成形品质。因此，针对不同成形半径所对应的要求，需要合理地调节成形过程中的参数，以确保金属件的成形过程达到最佳效果。这也体现了研究金属件滚弯成形中调控参数的重要性，以提高成形精度、减少误差，从而获得更好的成形结果。故

在允许范围误差内（10%），进行多次调控预测，最终得出最优滚弯工艺参数。

表 4-3 最优滚弯工艺参数

序号	T(mm)	S	V(rad/s)	X(mm)	R(mm)	R' (mm)	误差%
1	2.0	7075-O	1.47	128.9	1900	1900.1	0.005
2	2.0	7075-O	1.49	132.2	1635	1635.2	0.012
3	1.8	7075-O	1.52	142.9	1260	1259.8	0.015
4	1.8	7475-O	1.55	149.1	990	990.3	0.03
5	1.27	7475-O	1.61	153.4	770	770.2	0.025

由此可得，目标成形半径 1900mm，1635mm，1260mm，990mm，770mm 的五种型材，其最优成形参数见表 4-3 所示。同时也证明基于 BP 神经网络滚弯回弹预测模型对于工艺参数调控是有效的。

4.6 本章小结

(1) 非对称截面型材滚弯成形过程存在复杂的非线性问题，根据动力显式分析算法，从而建立数值模型方程。

(2) 本文通过改进取样方式，采用最优拉丁超立方取样，改善了样本填充的均衡性。

(3) 本文建立 BP 神经网络预测模型得出，对多因素影响条件下的滚弯回弹半径预测结果误差最小 0.27%，最大 1.3%，且线性回归性能指标 R 接近于 1。说明该预测模型真实有效，可靠性高。

(4) 本文通过 BP 神经网络预测模型，对滚弯回弹工艺参数进行调控，得出多目标下的最优滚弯工艺参数。

第 5 章 实验结果与分析

5.1 滚弯设备

在本研究中，采用一台四轴滚弯成形机床（型号为 VPR-SPEC-CNC），该滚弯机常被用于金属件的滚弯成形工艺。这种机器具有计算机数控系统，可以精确控制滚辊的位置和压力，从而实现对金属工件的弯曲成形。通过调整滚辊的位置和压力，可以实现不同半径和角度的弯曲，满足各种工件的要求。在金属件滚弯成形过程中，回弹是一个重要的问题。回弹是指金属在受力后恢复部分形状的现象，这会导致实际弯曲半径比设计要大。因此，对于 VPR-SPEC-CNC 滚弯机，需要进行充分的研究和实验，以准确预测和控制金属件的回弹现象，确保成形工件符合设计要求如图 5-1（a），（b）所示。

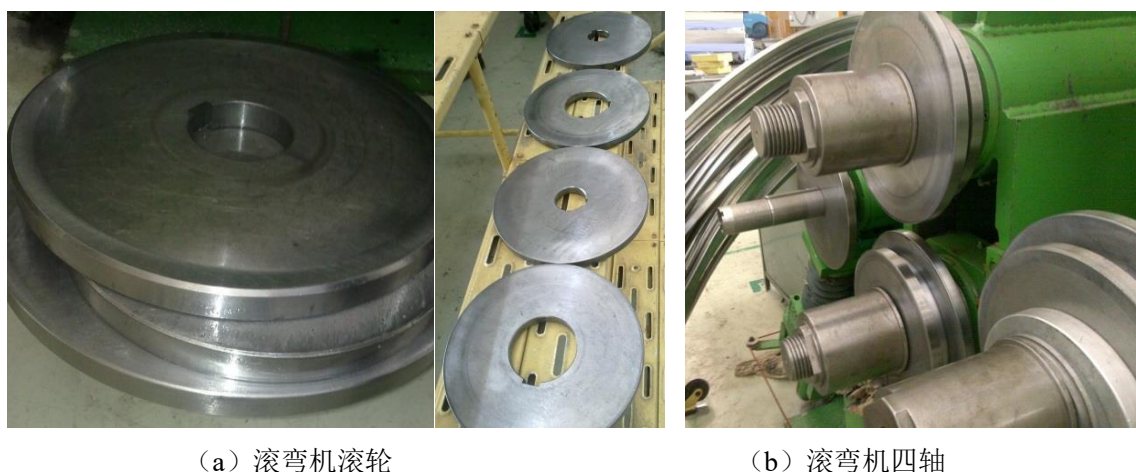


图 5-1 Z 截面型材滚弯成形机床及工装

5.2 滚弯实验方案

为验证半径回弹和失稳起皱等变形所建立的解析预测模型的精度，研究 Z 形型材弯曲过程中不同变形的规律，本文进行了实验，旨在验证采用不同材料（7075-O、7475-O）滚弯 Z 形型材的成形过程，不同厚度 Z 型材的回弹半径以及不同目标半径的成型半径。鉴于此，本节将设计滚弯实验方案，为充分考虑外弧面和内弧面，在实验设计阶段就要对缘板和腹板做好标记。当型材进入滚弯机时，要设计好滚弯次数和设计好工艺参数。当型材处于稳定和刚卸载外力时，要及时进行成型半径的测量。

材料的力学性能是会随着材料的化学成分，外力作用等原因发生改变的，为精确达到某乙成型半径，充分考虑材料性能的波动是尤为重要的。一般情况下，材料的力学性能需要通

过实验来完成，如扭转和拉伸等实验，通过考虑各向同性和各向异性也是标定材料性能的方式。本文以7075-O和7475-O的Z型型材为研究对象，其化学成分如表5-1所示。基于各向同性的弹塑性本构模型为基础对滚弯成形整个过程进行了实验。

基于上述研究目标，Z形非对称滚弯型材的外部尺寸示于图 5-2 所示，最重要的几何参数示于表 5-2，滚弯型材的实验工艺参数示于表 5-3 所示。

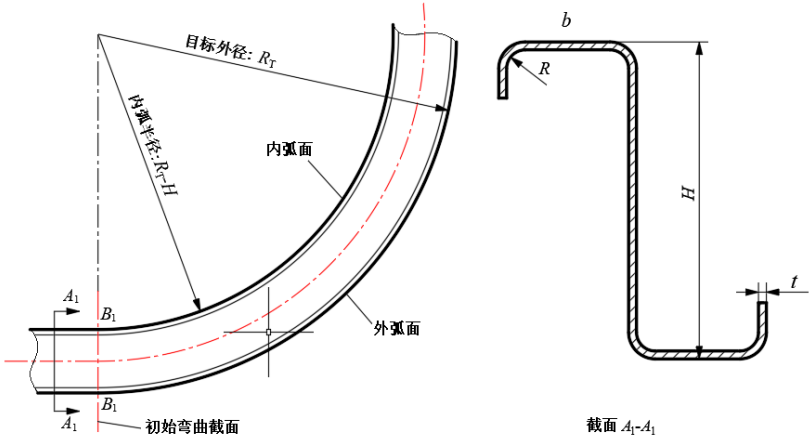


图 5-2 Z 截面型材外形尺寸

表 5-1 铝合金化学成分 (wt.%)

材料	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Mn	Ti	Al
7075-O	5.8	2.7	1.8	0.18	0.17	0.06	0.02	0.03	其余
7475-O	5.65	2.14	1.63	0.3	0.09	0.03	0.02	0.04	其余

表 5-2 Z 截面型材滚弯成形件参数

项目	第一组	第二组	第三组
型材厚度 t (mm)	1.27	1.8	2.0
型材材料	7075-O、7475-O		
钩边高度 h_1 (mm)	10		
缘板宽度 b (mm)	22.2		
型材长度 L (mm)	2010		
过渡半径 R (mm)	3		
腹板高度 h_2 (mm)	48.28	47.3	46.9
目标半径 R_T (mm)	1900、1635、1260、990、770		

表 5-3 Z 截面型材滚弯成形工艺参数

目标半径 R_T (mm)	夹持力 P (kN)	进给速度 V (rad·s ⁻¹)	模具间隙 G (mm)	侧轮行程 X (mm)
1900	15	1.57	0.47	$X_1=X_2=129.9$
1635				$X_1=X_2=135.4$
1260				$X_1=X_2=143.3$
990				$X_1=X_2=149.1$
770				$X_1=X_2=153.8$

5.3 成形半径测量

在对Z截面型材进行滚弯成形过程中，从型材进入滚弯机开始，利用Quantum FaroArm 三维激光测量设备，将其固定在型材内缘板上，测量滚弯全过程的弯曲变化，如图5-3所示的位置。

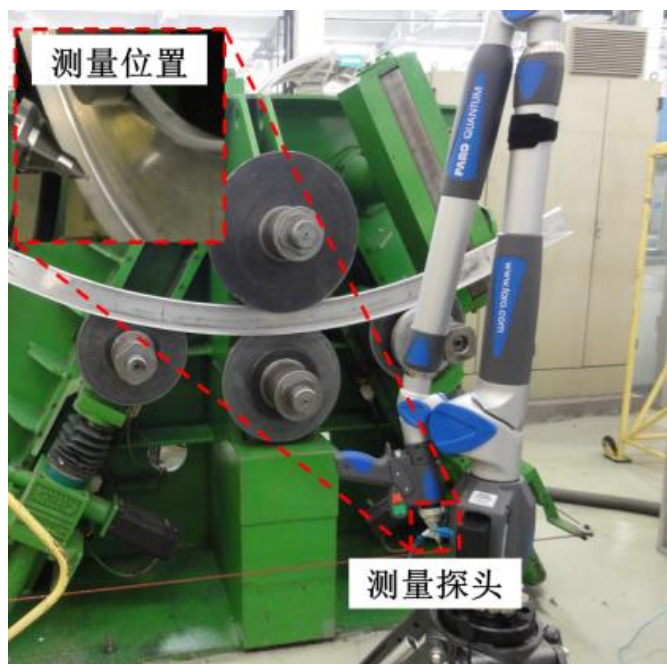


图 5-3 三坐标测量臂及测量位置

基于失稳起皱章节的理论，在进行滚弯会弹半径测量时，同样规划型材路径，取轮廓点上的数据，测量其坐标，提取点按编号分成三组，节点选取测量回弹后的型材回弹半径，采用样板检测滚弯型材的外形精度，把型材放在检测台上用标准检验样板检测，如图5-4所示。



图 5-4 滚弯型材外形精度测量

在ABAQUS有限元仿真中，采用三点成圆的方法计算出型材的滚弯半径，如图5-5根据

轴轮与型材接触面的几何关系，测量出上轴轮，下轴轮，侧轴轮与型材接触的坐标点，最终得到滚弯半径，与滚弯机加工型材手工测量的半径对比，计算误差。

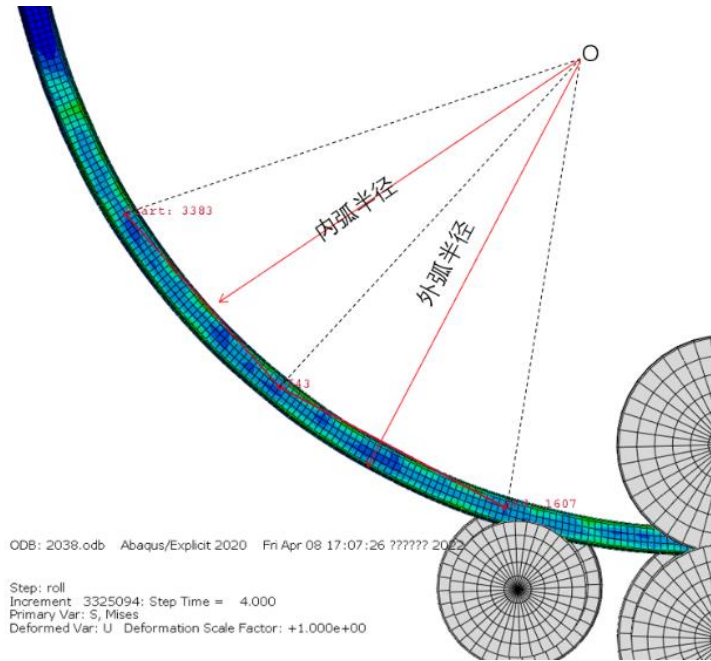


图 5-5 模拟滚弯半径测量

5.4 成形半径分析

5.4.1 最佳滚弯道次分析

本实验在四轴滚弯机滚弯过程中发现，对于不同的成形半径，所需要的滚弯道次数量不同，不同道次的滚弯对型材表面质量以及控制补偿会带来不同的问题。故本实验将进一步研究，最佳滚弯道次对成形半径的影响^[103]。

由于型材上下缘板在中性层偏移的影响下会发生起皱或变形的情况，故本实验将逐步分析道次变化带来的影响。当初始直型材输入，目标半径大于 3000mm 时，由于半径大，弧度小，一次成型后的半径以及表面质量完好；当目标半径小于或等于 3000mm 时，先进行一次滚弯，若发现成形半径小，则表面质量有缺陷，如图 5-6 所示，这时应增大滚弯半径设定值，消除其缺陷，当目标半径大于设定值，则滚弯结束，记录道次数；反之，进行下一道次滚弯。同理，下一道次滚弯，若发现成形半径小，则表面质量有缺陷，应增大滚弯半径设定值，以此类推。

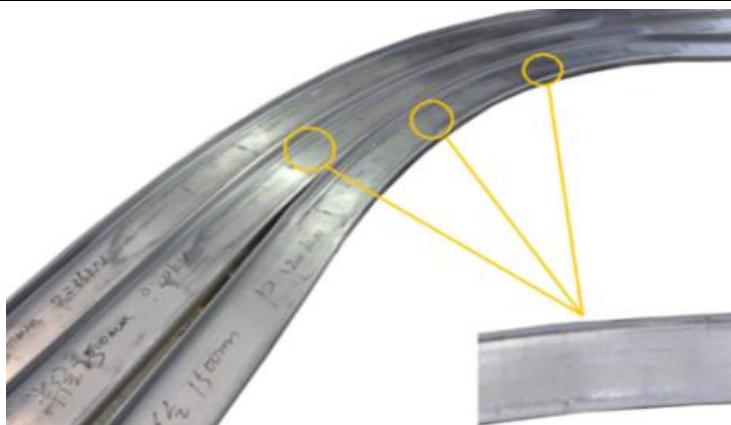


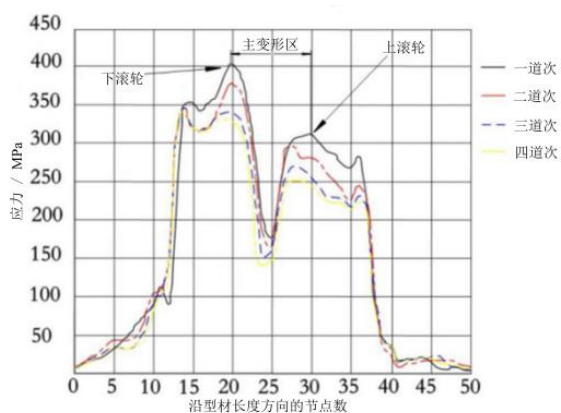
图 5-6 增加滚弯道次后的型材表面质量

仅通过试错实验还不足以研究出滚弯道次对型材表面质量的影响，故使用理论推演的方式计算不同滚弯道次下，沿 Z 型材轴向应力分布。

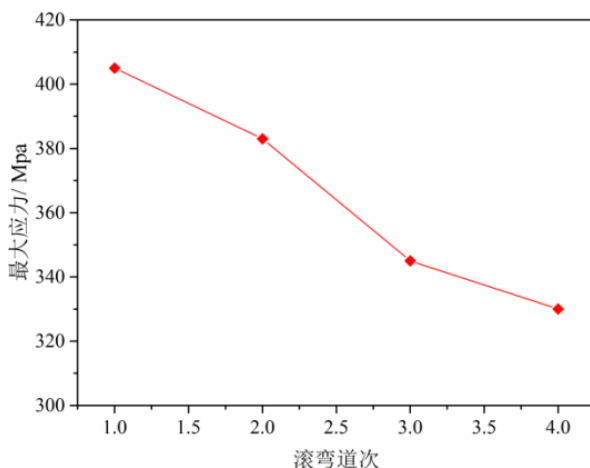
沿型材下缘部的长度方向的应力分布如图 5-7 (b) 所示。研究表明，型材与上辊和下辊的接触区应力最高，临界变形区如图 5-7 (a) 所示，在型材的轧制和弯曲成形精度中起着重要的作用。临界变形区内材料变形程度较高，可引起铸件表面质量缺陷，临界变形区外材料变形较为温和，有利于提高表面质量。临界变形区域的最大应力受上述下辊的夹紧力及左右辊的弯矩等各种因素的影响。当成形半径小时，临界变形区域的弯矩和夹紧力变大，长度方向应力变高。因此，通过观察临界变形区域中的最大应力，可以评价型材的变形程度，从而指导后续的轧制弯曲工艺的优化。图 5-7 (c) 表示临界变形区域的最大应力随着层叠次数的增加而逐渐减少，成形品质逐渐改善。最大应力值的降低意味着临界变形区域的变形更加平滑，这有助于减少表面缺陷的产生，例如褶皱和截面变形。因此，最大应力变化的监测可作为压延型材生产、成型工艺优化和表面质量改善的重要参考。



(a)关键变形区



(b)应力分布



(c)变化曲线

图 5-7 应力——滚弯道次分布

图 5-8 示出了 Z 滚弯精度随不同滚弯过程的滚弯半径的变化。 δ 表示型材尺寸的精度， R 表示滚弯半径， n 表示滚弯次数。研究结果表明，在其它工艺条件相同的情况下，随着滚弯量的增加，铸造过程中型材的尺寸精度逐渐提高。如果不变更层叠次数，则层叠半径增加，层叠引起的轮廓的精度提高。

但是，当 Z 形表面的滚弯半径达到某个值时，为了提高模具的滚弯精度，滚弯量的增加变得不太重要。换言之，通过添加滚弯通路能够提高 Z 型材的成形精度，但添加滚弯通路对成形精度提高的影响随着滚弯半径的增加而逐渐减少，最终有稳定的倾向。这意味着，在 Z 形型材滚弯弯曲的情况下，不同的曲率半径可能需要不同的最佳曲率特性以确保最佳的形状精度。

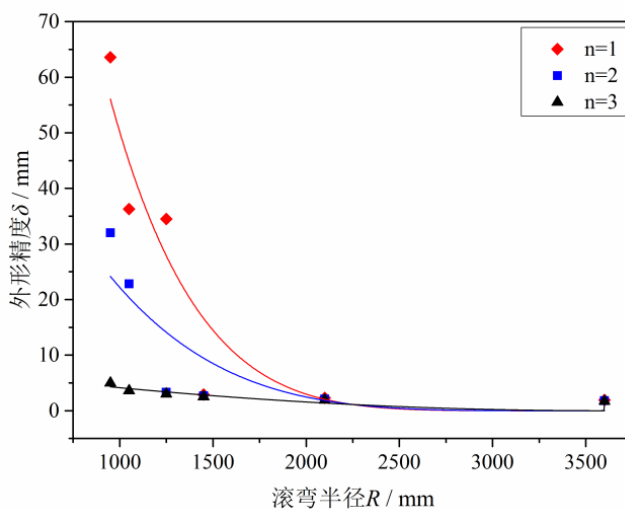


图 5-8 不同道次下精度随滚弯半径的分布

根据实验数据和应力分析结果,通过图 5-9 所示的方法,对给定厚度的 Z 形轮廓,可得出以下结论:滚弯半径小于 2000mm 时,进行三次滚弯弯曲,可达到生产所需的美学精度和表面质量。由于层叠层数增加对结果影响不大,所以选择 3 个层叠层数,如果曲率半径为 2000mm 以上,则 2 和 3 个曲率之后的 Z 形轮廓的尺寸精度大致相同,因此选择 2 个曲率,如果滚弯半径为 3000mm 以上,则在 1 次和 2 次滚弯弯曲后, Z 形电路的形状精度大致相同选择滚弯弯曲的形成。该工艺标准不仅提高了 Z 型材的铸造精度和性能,而且充分利用了滚弯和弯曲设备的性能优势。

5.4.2 补偿偏差及误差分析

在非对称 Z 型材的四轴滚弯过程中,首先输入目标半径,其次根据数值计算误差,若误差过大,则计算此时的弯矩,通过弯矩的大小调控左右轮上下高度。具体的补偿计划过程如图 5-9 所示。

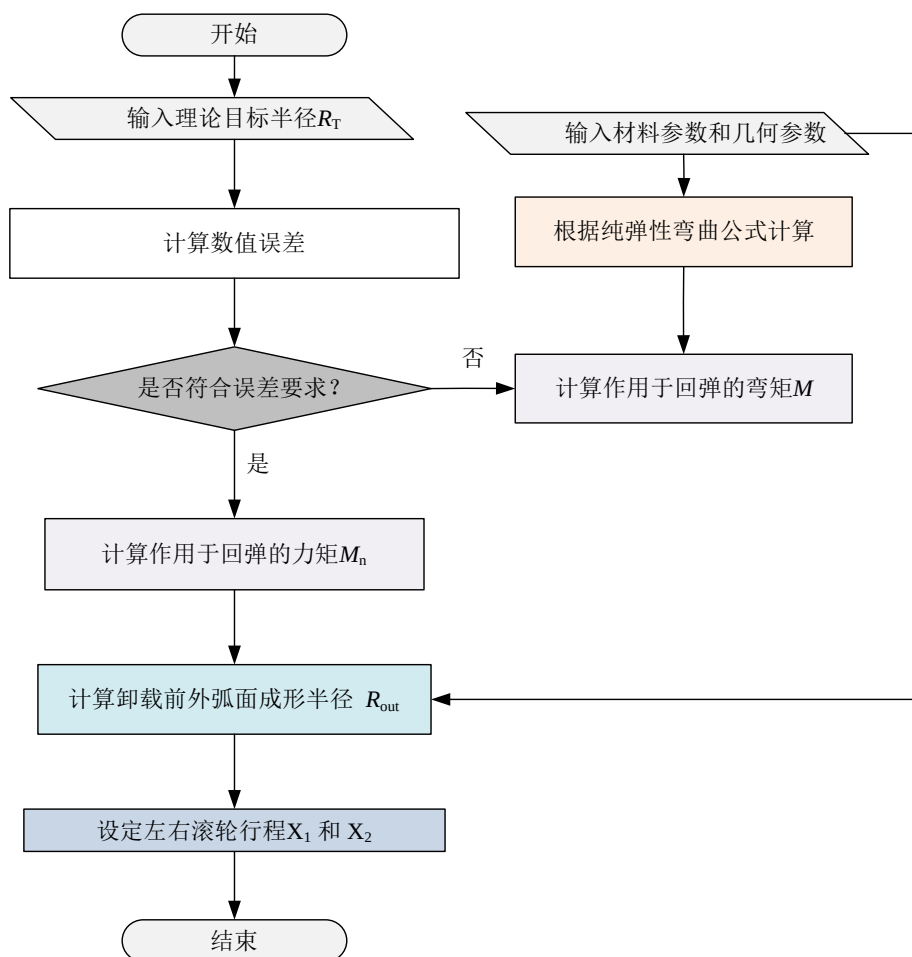
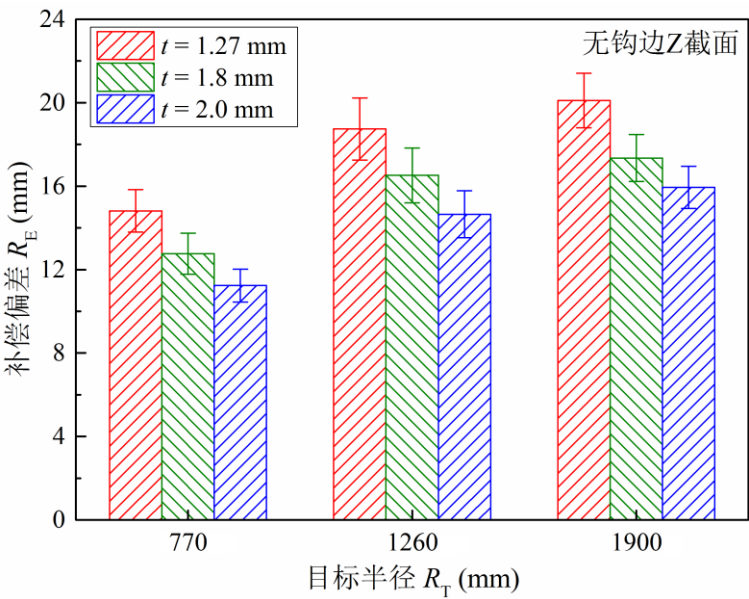


图 5-9 半径回弹补偿策略

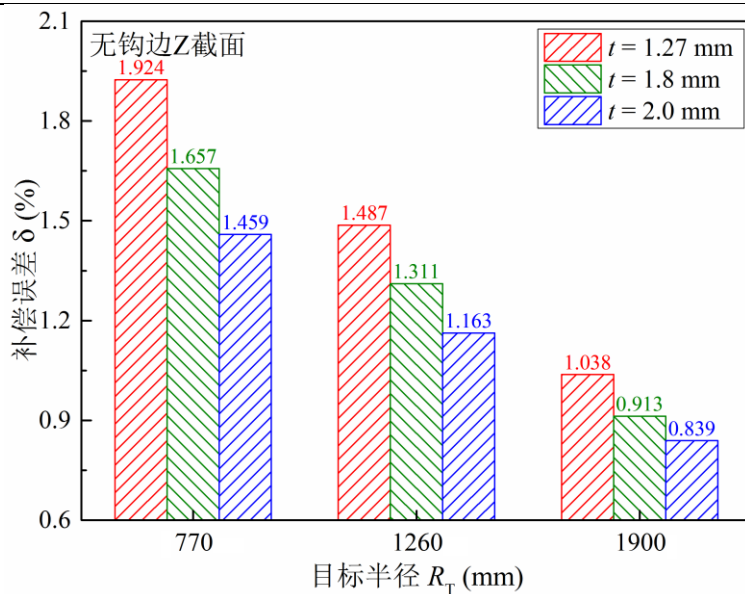
本试验给出了三种目标成形半径下，基于回弹补偿策略的补偿偏差及与目标半径之间的误差，其中分别给出三种型材厚度和 5 种不同目标半径的 Z 截面型材补偿后成形半径与目标半径之间的偏差^[104]，见表 5-4 成形半径分析。补偿后的滚弯实验结果显示，实际成形半径与目标成形半径之间的偏差随着 R_T 的减小而减小，见图 5-10Z 截面型材实际成形半径和钩边 Z 截面型材实际成形误差。

表 5-4 成形半径分析

t (mm)	R_T (mm)	钩边 Z 截面		
		R_{NLS} (mm)	R_{out} (mm)	$X_1=X_2$ (mm)
1.27	1900	1723.14	1748.13	133.35
	1635	1495.39	1520.42	138.09
	1260	1164.95	1190.05	145.01
	990	920.75	945.94	150.05
	770	717.58	742.89	154.50
1.8	1900	1714.63	1739.36	133.54
	1635	1488.89	1513.65	138.21
	1260	1160.91	1185.74	145.09
	990	918.13	943.13	150.10
	770	715.99	741.03	154.54
2.0	1900	1711.26	1735.88	133.60
	1635	1486.28	1510.94	138.27
	1260	1159.29	1184.02	145.13
	990	917.15	941.96	150.12
	770	715.36	740.29	154.56



(a) Z 截面型材实际成形半径



(b) Z 截面型材实际成形误差

图 5-10 基于补偿策略的成形偏差及误差

5.5 本章小结

本章主要概述了 Z 型材的滚弯成形实验方案及相应的补偿策略，具体结论如下：

- (1) 根据滚弯实验分析出不同影响因素对回弹量大小不同；
- (2) 通过滚弯道次，分析出不同成型半径的滚弯道次不同；
- (3) 根据工艺方法及调控策略，有效提高了回弹预测精度。

第 6 章 结论与展望

6.1 全文总结

随着新型飞机型材弯曲件成形精度和质量要求的不断提高,存在难以预测和消除型材弯曲时变形的问题,为准确预测和消除影响形状精度的径向弹簧变形,本文提出两种非对称截面 Z 型材,重点研究 7075-O 和 7475-O。建立了机械分析模型,结合有限元模拟技术和轧制过程实验,考虑材料特性、截面几何特性和弯曲特性,对非对称 Z 型材滚弯下径向回弹和起皱现象等变形进行了预测研究。基于对上述变形的准确预测,提出了一种有效而有针对性的补偿控制策略。本文主要研究工作总结如下:

(1) 最佳滚弯道次研究

快速生成不同数值参数下的模型,从而显著减少了试验时间,同时避免了手工操作可能带来的错误。这种方法为非对称 Z 截面型材的精确成形研究提供了便捷的工具。随着滚弯次数的增加,型材零件中的最大应力和回弹效应减小,表明增加滚弯次数有助于改善型材滚弯成形的表面质量,当滚弯半径小于等于 3000 mm 时,选择 3 次滚弯;当滚弯半径大于等于 2000 mm 时,选择 3 次滚弯;当滚弯半径大于等于 3000 mm 时,选择 1 次滚弯成形。

(2) 非对称截面型材滚弯回弹研究

本文采用 ABAQUS 二次开发预测非对称截面型材滚弯回弹量预测,相较于经验推导实验、ABAQUS 自带模块模拟预测精度明显提高,最大误差仅为 2.83%。本文基于各向同性弹塑性本构方程,自定义弹性模量、屈服应力和屈服极限。实验证明,在该方法下半径回弹量的最大误差相较于经验模型从 7.7%减小到 4.4%,为解决动态大变形的问题提供了参考依据。与实验结果对比表明,VUMAT 子程序进一步完善了滚弯回弹预测精度不高的问题,为型材的滚弯回弹预测提供了新的计算方法。

(3) 非对称截面型材滚弯失稳起皱研究

本文基于非对称截面 Z 型材滚弯成形过程存在失稳起皱问题,本文系统研究了失稳起皱的发生,失稳起皱的影响因素,失稳起皱量的预测及失稳起皱控制策略。本文通过建立 Hill48 模型,研究出在该模型下起皱量相比有限元模拟最高降低 57.96%,最少降低 53.40%。本文充分考虑滚弯工艺不同对起皱带来的影响,故通过正交实验,对比有限元模拟和 Hill48 模型两种方法下的最优搭配组合,研究出 Hill48 模型在 $P = 50 \text{ kN}$, $V = 1.57 \text{ rad/s}$, $G = 0.23$

mm 为最优参数组合，其精度相较有限元模拟提高了 15.34%。

（4）基于 BP 神经网络预测及调控

本文基于非对称截面型材滚弯成形过程存在复杂的非线性问题，根据动力显式分析算法，从而建立数值模型方程。本文通过改进取样方式，采用最优拉丁超立方取样，改善了样本填充的均衡性。本文建立 BP 神经网络预测模型得出，对多因素影响条件下的滚弯回弹半径预测结果误差最小 0.27%，最大 1.3%，且线性回归性能指标 R 接近于 1。说明该预测模型真实有效，可靠性高。本文通过 BP 神经网络预测模型，对滚弯回弹工艺参数进行调控，得出多目标下的最优滚弯工艺参数。

6.2 后续研究工作展望

这项研究工作在非对称截面型材滚弯变形的预测和控制方面取得了一定进展，并为今后相关研究和型材弯曲件的工程应用提供了一些参考价值。然而，针对这个研究方向和工程应用，还有一些深层次的拓展和深化值得关注，主要可以分为以下几个方面：

（1）自动化和智能化

本文基于研究者的思路来谋划论文进展。未来的滚弯回弹研究结果可能更广泛地应用于生产实践，如何高效使用自动化设备和机器人来执行操作，从而减少人工干预是我们下一步努力的方向。机器人的使用将能够精确控制力度和位置，提高生产效率并减少人为错误。同时，智能化技术如人工智能和机器学习也能够通过数据分析和预测来优化工艺参数，提升生产效率和质量。

（2）材料和工艺优化

目前本文主要研究 7 系铝合金型材，是否具有普适性，还需要更多的实验验证。未来的滚弯回弹工作将更多地关注材料和工艺的优化。工艺方面，通过先进的数值模拟和优化算法，能够更精确地确定滚弯回弹的参数设置，以减少回弹效应并提高成品的准确性。

（3）数字化：

借助数字化仿真和虚拟现实技术，滚弯回弹工作可以在计算机模拟环境中进行验证和优化。通过建立模型并预测变形和回弹的行为，可以优化工艺参数、避免设计缺陷，减少试错和成本，从而提高工作效率和产品质量。

（4）绿色和可持续发展

在滚弯回弹工作中，绿色和可持续发展的考虑也越来越重要。通过采用节能设备、优化

生产流程、回收材料和废料等措施，可以减少能源消耗。

这些具体发展趋势可以预见到，但实际实现可能需要更多的研究和技术进步。因此，滚弯回弹工作在自动化、材料工艺优化、数字化仿真和可持续发展方面的具体发展，可能会随着技术和行业需求的进展而逐步实现。

参考文献

- [1] Marciniak Z, Duncan J L, Hu S J. Mechanics of sheet metal forming[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [2] Liu T, Wang Y, Wang J, et al. Springback analysis of Z & T-section 2196-T8511 and 2099-T83 Al-Li alloys extrusions in displacement controlled cold stretch bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015,225:295-309.
- [3] Lou S, Zhao G, Wang R, et al. Modeling of aluminum alloy profile extrusion process using finite volume method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008,206:481-490.
- [4] Wagoner R H, Lim H, Lee M. Advanced Issues in springback[J]. International Journal of Plasticity, 2013,45:3-20.
- [5] Hua M. The mechanics of continuous roller bending of plates[D]. Aston University, 1986.
- [6] Leacock A G, McCracken D, Brown D, et al. Numerical Simulation of the Four Roll Bending Process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012,27:370-376.
- [7] Song Y, Yu Z. Springback prediction in T-section beam bending process using neural networks and finite element method[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013,13(2):229-241.
- [8] Vollertsen F, Sprenger A, Kraus J, et al. Extrusion, channel, and profile bending: a review[J]. Journal of Materials Processing Tech, 1999,87(1):1-27.
- [9] 胡智华, 陈明和, 谢兰生. 2099铝锂合金型材的变曲率滚弯工艺[J]. 塑性工程学报, 2016,23(3):82-87.
- [10] 王艳,胡捷飞,许光辉,等. 四辊预弯与连续滚弯成形的机理与试验分析[J]. 塑性工程学报, 2016,23(4): 69-75.
- [11] 王艳, 朱新庆, 胡捷飞, 等. 四辊卷板机连续滚弯成形工艺的数值模拟研究[J]. 系统仿真学报, 2018,30(5):1772-1780.
- [12] 黄世军,陈凌霄,田洪才,等. 型材滚弯回弹影响因素研究[J]. 塑性工程学报, 2017,24(4):117-123.
- [13] Gu X, Franzke M, Bambach M, et al. Experimental and numerical investigation of grid sheet

- p>bending behavior in four-roll bending [J]. CRIP Annals, 2010,59(1):303-306.
- [14] Dai H L, Jiang H J, Dai T, et al. Investigation on the influence of damage to springback of U-shape HSLA steel plates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 575-586.
- [15] Groth S, Engel B, Langhammer K. Algorithm for the quantitative description of freeform bend tubes produced by the three-roll-push-bending process [J]. Journal of Production Engineering, 2018, 12(1): 517-524.
- [16] Li Y, Rong Q, Shi Z, et al. An accelerated springback compensation method for creep age forming[J]. Int. J. AdvManuf. Technol. , 2019, 102(1-4):121-34.
- [17] 孙卫东. 数控四轴型材滚弯机应用研究[D]. 西安: 西北工业大学,2001.
- [18] 周养萍. 型材滚弯成形研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [19] 周养萍, 亓江文. 飞机Z形框滚弯加工数值模拟与分析[J]. 塑性工程学报,2010,17(5):27-31.
- [20] 陈高翔. Z形型材滚弯成形有限元模拟及数值分析[D]. 西安: 西安理工大学,2010.
- [21] 王杰, 薛红前, 陈鹏, 等. 大截面Z型材数控滚弯成形精度的数值模拟研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(9): 1467-1471.
- [22] 曹宏强.铝合金型材变曲率滚弯回弹预测及智能分析系统[D].燕山大学,2023.
- [23] Shim D, Kim K, Lee K. Double-stage forming using critical pre-bending radius in roll bending of pipe with rectangular cross-section[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 236:189-203.
- [24] 王安恒, 薛红前, 高鹏飞, 等. 大截面Z型材滚弯成形缺陷的数值模拟及试验研究[J]. 航空制造技术, 2018, (7):62-69.
- [25] Sharma P K, Gautam V, Agrawal A K. Analytical and numerical prediction of springback of SS/Al-Alloy clad sheet in V-bending[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 143(3):1-35.
- [26] Sharma P K, Gautam V. Investigations on effect of bending radius on springback behaviour of three-ply clad sheet[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 63(3): 1651-1657.
- [27] 刘文祎,王耀奇,韩玉杰,陈福龙,李志强.二级时效对热冲压固溶7B04铝合金组织与性能的影响[J].稀有金属,2022,46(9):1146-1152.
- [28] Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity[M]. New York: Oxford University Press, 1950.
- [29] Paulsen F, Welo T. Application of numerical simulation in the bending of aluminium-alloy

- hr/>
- profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996,58(2):274-285.
- [30] 陈宜周.关于“幂函数型曲线裂纹平面问题的一般解”一文的意见[J].应用数学和力学,2012,33(08):1023-1024.
- [31] Hansen N E, Jannerup O. Modeling of elastlc-plastlc bending of beams using a roller bending machine[J]. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, 1979,101(3):304-310.
- [32] Johnson W, Yu T X. On the range of applicability of results for the springback of an elastic/work-hardening rectangular plate after subjecting it to biaxial pure bending- IV[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1981,23(11):697-701.
- [33] Yu T X, Johnson W. Influence of axial force on the elastic-plastic bending and springback of a beam[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1982,6(1):5-21.
- [34] Leu D K. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997,66(1-3):9-17.
- [35] Gau J T, Kinzel G L. A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001,43(8):1813-1832.
- [36] Bassett M B, Johnson W. The bending of plate using a three-roll pyramid type plate bending machine[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1966,1(5):398-414.
- [37] Hua M, Sansome D H, Baines K. Mathematical modeling of the internal bending moment at the top roll contact in multi-pass four-roll thin-plate bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995,52(2):425-459.
- [38] Hua M, Cole I M, Baines K, et al. A formulation for determining the single-pass mechanics of the continuous four-roll thin plate bending process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997,67(1):189-194.
- [39] Hua M, Lin Y H. Large deflection analysis of elastoplastic plate in steady continuous four-roll bending process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999,41:1461-1483.
- [40] Ktari A, Antar Z, Haddar N, et al. Modeling and computation of the three-roller bending process of steel sheets[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012,26(1):123-128.
- [41] 胡卫龙. 三辊卷板工作辊的受力计算[J]. 锻压技术, 1987(03):37-39.
- [42] 胡卫龙. 水平下调式卷板机最佳弯边位置的确定[J]. 机械工艺师, 1988(09):24-25.

-
- [43] 陈毓勋.塑性拉弯过程回弹现象的研究[J].南京航空航天大学学报,1960(02):73-85.
 - [44] 陈鹏, 薛红前, 王杰, 等. Z型材变曲率数控滚弯等圆弧逼近算法与实现[J]. 材料科学与工艺, 2014,22(1): 68-73.
 - [45] 闫静, 左敦稳, 王珉. 双轴柔性滚弯过程中工件回弹的理论分析[J]. 兵工学报, 2003,24(3): 381-384.
 - [46] WANG A H, XUE H, SAUD S, et al. Improvement of springback prediction accuracy for Z-section profiles in four-roll bending process considering neutral layer shift[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019,48: 218-227.
 - [47] 周养萍. 飞机Z形型材滚弯回弹实验与研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2012(1): 76-79.
 - [48] 王昺成, 常亮明. 各向同性硬化材料弹塑性本构关系的渐近积分及其计算精度[J]. 固体力学学报, 1986, (1): 69-77.
 - [49] 赖松柏, 于登云, 陈同祥. 整体壁板结构弯曲成形分析的等效塑性模型[J]. 宇航学报, 2012,33(06):809-815.
 - [50] Feng Z, Champlaud H. Modeling and simulation of asymmetrical three-roll bending process[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011,19(9):1913-1917.
 - [51] Feng Z, Champlaud H. Investigation of non-kinematic conical roll bending process with conical rolls[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012,27:65-75.
 - [52] Xiao H, Zhang S, Liu J, et al. Experimental and Numerical Investigation on Filling Roll Bending of Aluminum Alloy Integral Panel[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012,134(0610116).
 - [53] Geckeler J W. Plastisches Knicken der Wandung von Hohlzylindern und einige andere Faltungserscheinungen an Schalen und Blechen[J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics & Mechanics, 1928,8(5):341-352.
 - [54] Senior B W. Flange wrinkling in deep-drawing operations[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1956,4(4):235-246.
 - [55] Ju G T, Kyriakides S. Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending-II. Predictions[J]. International Journal of Solids & Structures, 1992,29(9):1143-1171.
 - [56] Yoshida M, Fujiwara A. Wrinkle depth prediction of rectangular aluminum tubes in draw bending[J]. Journal of JSTP, 1998,48:76-79.

-
- [57] Yoshida K. Purposes and features of the Yoshida wrinkling test[J]. Journal of the JSTP, 1983,24(272):901-908.
- [58] Ellison M S, Corona E. Buckling of T-beams under cyclic bending[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998,40(9):835-855.
- [59] 刘鸿文. 板壳理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [60] Gangwar M, Choubey V K, Dwivedi J P, et al. Springback analysis of thin tubes with arbitrary stress-strain curves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011(8):57-76.
- [61] Staupendahl D, Tekkaya A E. The reciprocal effects of bending and torsion on springback during 3D bending of profiles[J]. Procedia Engineering, 2017,207:2322-2327.
- [62] Cai Z, Li M, Lan Y. Three-dimensional sheet metal continuous forming process based on flexible roll bending: Principle and experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012,212(1):120-127.
- [63] 杨勇, 柯映林, 董辉跃. 金属切削加工中航空铝合金板材的本构模型[J]. 中国有色金属学报, 2005(6): 854-859.
- [64] KUMAR S P, VIJAY G, KUMAR A A. Analytical and numerical prediction of springback of SS/Al-alloy clad sheet in V-bending[J]. J. Manuf. Sci. Eng, 2021,143(3):1-35.
- [65] 范豈宇, 洪勇, 李瑞鑫, 等. 脉冲电流对1.5 GPa级低碳钢V形弯曲回弹的影响[J]. 塑性工程学报, 2022,29 (1) : 79-86.
- [66] CHEN G, REN C, YANG X, et al. Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy(Ti-6Al-4V) based on ductile failure model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011,56(9-12):1027-1038.
- [67] 庞秋, 詹博异. 7075铝合金高速搅拌摩擦焊材料流动行为及性能研究[J]. 精密成形工程, 2023,15(03):72-80.
- [68] CHEN G, LI J, HE Y, et al. A new approach to the determination of plastic flow stress and failure initiation strain for aluminum alloys cutting process[J]. Computational Materials Science, 2014, 95:568-578.
- [69] EL-DOMIATY A. Stretch forming of beams of non-uniform section[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1990,22(1):21-28.
- [70] 朱昊, 曹忠亮, 邱睿, 等. Abaqus二次开发在复合材料夹芯力学性能中的应用[J]. 齐齐哈尔大

学学报(自然科学版),2023,39(03):1-5.

- [71] 吴晋,季策,李子轩,等.基于ABAQUS二次开发的无缝金属复合管三辊斜轧复合工艺参数化建模与数值模拟[J].塑性工程学报,2023,30(12):9-15.
- [72] 张慎,陈州,李霆,等.基于ABAQUS的木材本构模型及试验验证[J/OL].工程力学,1-15.
- [73] 吴霞,丁发兴,向平,等.平面应力状态下正交异性金属损伤比屈服理论[J].中国科学:技术科学,2023,53(12):2101-2114.
- [74] 梁铖,黎向锋,吴同一,等.基于ABAQUS二次开发的钛合金自锁螺母收口过程研究[J].机械制造与自动化,2024,53(01):10-14.
- [75] 乔顺成, 吴建军, 展学鹏.各向异性屈服准则的UMAT子程序二次开发研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2018,53(4):89-97.
- [76] 邓楚键,何国杰, 郑颖人. 基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2006, (6): 735-739.
- [77] 赵月伟,帅美荣,楚志兵,等.不锈钢弯曲应力中性层偏移模型构建与实验研究[J].塑性工程学报,2023,30(08):210-217.
- [78] Li H, Yang H, Song F F, et al. Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5V tube in cold rotary draw bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012,212(9):1973-1987.
- [79] 周炜,蔡一丁,肖罡,等.考虑材料塑性流动的粗糙表面弹塑性接触建模[J].塑性工程学报,2024,31(04):178-183.
- [80] Kwon H C , Lee H W , Kim H Y , et al. Surface wrinkle defect of carbon steel in the hot bar rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9):4476-4483.
- [81] Zhao G Y, Liu Y L, Dong C S, et al. Analysis of wrinkling limit of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010,210(9):1224-1231.
- [82] Sato M , Ishigami K , Kato H , et al. Scaling law for the onset of the surface wrinkling of multilayer tubes[J]. 2020,40(8):109-118.
- [83] 艾青波,张洁,程辉,等.基于PointCPP-LSF方法的航天筒段薄壁件滚弯成形质量分析[J].中国机械工程,2022,33(08):977-985.
- [84] 杨昆瑛,方刚,曾攀,等.双辊柔性滚弯成形过程三维有限元分析[J].塑性工程学

报,2020,27(08):31-38.

- [85] Shuai Li, Lulu Zhang, Ou Zhao. Testing, modelling and design of hot-rolled stainless steel channel sections under combined compression and minor-axis bending moment[J]Thin-Walled Structures,2022,172(1): 1-12.
- [86] 郑子君,陶裕梅.坯料随机局部弯曲对滚弯成形结果影响的蒙特卡洛分析[J].工程力学,2021,38(08):237-245.
- [87] 李嘉乐. 基于ABAQUS二次开发的土钉支护基坑变形分析[D]. 郑州: 河南大学, 2020.
- [88] 姜春英, 殷思羽, 鲁墨武, 等. 基于ABAQUS二次开发的锤铆变形分析[J]. 机械设计与制造, 2022,371(1): 84-87.
- [89] 刘维亚, 李明, 马宏伟. ABAQUS二次开发在粘结滑移节点分析中的应用[J]. 建筑结构, 2019, (2): 605-609.
- [90] 马国龙,张志毅,毛镇东,等.高速列车用铝合金型材激光-MIG复合焊工艺特性和接头性能[J].材料导报,2023,37(12):195-200.
- [91] 王秀明.铝合金型材三维拉弯成形仿真及模具形面设计方法研究[D].大连交通大学,2022.
- [92] Hu W, Chen Q, Yan X. Analysis on the wrinkling in continuous roll forming of three-dimensional surface parts: AER-Advances in Engineering Research[C]. 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering, 2015:194-197.
- [93] 李殿起, 张少华, 等. 基于弹性-幂强化材料模型的金属管材弯曲回弹分析[J]. 锻压技术, 2018,43 (05):51-55.
- [94] 李海,徐海峰,王芝秀.预处理对冷轧时效6156铝合金组织与性能的影响[J].稀有金属,2022,46(1):17-26.
- [95] 金霞,鲁世红. U型材单轴柔性滚弯成形回弹有限元分析[J].南京航空航天大学学报, 2010, 1(42):118-119.
- [96] 郑晖,栾景旺,孙凌崴,等.固溶温度对2195铝锂合金板料成形性能的影响[J].塑性工程学报, 2022,2(1): 46-53.
- [97] 邹宏, 伍剑, 徐志纯, 等. 基于ABAQUS二次开发的可靠度计算程序的设计与应用[J]. 人民珠江, 2021,42(9): 105-111.
- [98] 周建君, 许俊海, 范青山, 等.ABAQUS二次开发在自冲铆接模拟中的研究[J]. 机械制造与自动化, 2021,50(5): 146-148.

- [99] 杨一帆, 邵炜华, 张敏强,等.基于ABAQUS二次开发对某机载吊舱的损伤容限分析[J].火控雷达技术, 2021,50(4):31-38.
- [100] 赵刚要,金郴柏,等.GH5188密排孔薄板滚弯成形孔变形特征分析[J].稀有金属材料与工程,2021,50(07):2521-2527.
- [101] 吴欣桐,湛利华,等.纤维金属层板构件成形工艺研究进展[J].中国有色金属学报,2018,28(01):12-20.
- [102] 李烨琪,刘劲松,刘婷,等.整体壁板离散填料滚弯成形有限元模拟[J].锻压技术,2020,45(02):106-112
- [103] 李凡,王安恒,王雷,等.基于ABAQUS二次开发的非对称Z截面型材多道次滚弯成形工艺[J].锻压技术,2023,48(04):152-161.
- [104] 李凡,王安恒,王雷,等.基于ABAQUS二次开发的Z型材滚弯回弹预测研究[J].塑性工程学报,2023,30(11):28-35.

附录

附表-1 7075-O Z 截面型材滚弯实验、二次开发和预测模型等结果

厚度	实验测量			二次开发	成形半径		
					本文模型	数值模型	经验模型
t/mm	R_T/mm	R_{out}/mm	R_E/mm	R_{NLS}/mm	$R'_{\text{out}}/\text{mm}$	$R'_{\text{out}}/\text{mm}$	$R'_{\text{out}}/\text{mm}$
1.27	1900	1915.42	1987.88	1889.81	2019.41	2043.40	2174.67
	1635	1649.52	1700.03	1623.871	1726.50	1746.89	1847.28
	1260	1269.79	1295.76	1244.07	1315.26	1330.94	1394.64
	990	997.98	1011.64	972.17	1025.96	1038.57	1080.93
	770	776.03	782.58	750.09	792.87	802.61	830.86
1.8	1900	1915.40	1983.69	1889.79	2026.23	2056.42	2174.65
	1635	1649.54	1696.99	1623.89	1731.56	1757.83	1847.31
	1260	1269.81	1293.47	1244.10	1318.22	1338.50	1394.67
	990	998.14	1009.16	972.34	1027.93	1043.71	1081.11
	770	776.01	780.94	750.08	793.91	805.97	830.84
2.0	1900	1915.41	1979.16	1889.79	2029.09	2064.18	2174.66
	1635	1649.55	1693.92	1623.91	1733.51	1763.59	1847.32
	1260	1269.80	1292.61	1244.09	1319.55	1341.28	1394.65
	990	998.23	1008.95	972.43	1028.76	1045.67	1081.21
	770	776.01	779.87	750.08	794.52	807.15	830.84

附表-2 7475-O Z 截面型材滚弯实验、二次开发和预测模型等结果

厚度	实验测量			二次开发	成形半径		
					本文模型	数值模型	经验模型
t/mm	R_T/mm	R_{out}/mm	R_E/mm	R_{NLS}/mm	$R'_{\text{out}}/\text{mm}$	$R'_{\text{out}}/\text{mm}$	$R'_{\text{out}}/\text{mm}$
1.27	1900	1915.39	1996.07	1889.79	2047.94	2088.65	2222.56
	1635	1649.45	1706.73	1623.809	1747.43	1781.66	1878.63
	1260	1269.80	1299.73	1244.08	1327.54	1352.16	1408.89
	990	998.02	1012.67	972.21	1033.48	1051.92	1087.04
	770	775.99	782.78	750.07	797.27	810.83	832.53
1.8	1900	1915.40	1990.13	1889.79	2056.75	2104.43	2222.57
	1635	1649.48	1701.94	1623.84	1753.94	1793.76	1878.68
	1260	1269.81	1297.08	1244.09	1331.32	1359.58	1408.90
	990	997.97	1011.96	972.17	1035.72	1056.77	1086.98
	770	775.99	782.13	750.08	798.64	814.09	832.53
2.0	1900	1915.42	1985.43	1889.81	2060.39	2113.67	2222.59
	1635	1649.51	1698.23	1623.87	1756.59	1801.28	1878.71
	1260	1269.80	1294.36	1244.09	1332.99	1364.51	1408.89
	990	998.16	1010.44	972.36	1036.85	1060.25	1087.20
	770	776.02	781.01	750.10	799.39	816.16	832.56

攻读学位期间取得的成果及参研项目

一、论文

- [1] 李凡,王安恒,王雷,等.基于 ABAQUS 二次开发的 Z 型材滚弯回弹预测研究[J].塑性工程学报,2023,30(11):28-35.
- [2] 李凡,王安恒,王雷,等.基于 ABAQUS 二次开发的非对称 Z 截面型材多道次滚弯成形工艺[J].锻压技术,2023,48(04):152-161.

二、专利

- [1] 李凡,王安恒.一种机械加工用夹持机构.发明（实审中）
- [1] 李凡,王安恒.小型五轴加工中心快速换刀装置.发明（实审中）

三、参研项目

- [1] 非对称截面航空铝型材零件滚弯回弹预测及精确成形调控，安徽省自然科学基金.
- [2] 木塑板材结构优化关键技术开发，安徽福美达新材料科技有限公司.
- [3] 发动机减震系统橡胶零部件疲劳性能测试，芜湖安博帝特工业有限公司.

致谢

行文至此，皆为终章；匆匆停笔，思绪繁杂。

求学生涯，始于丙申；青葱七载，终于甲辰。

朝来庭下，光阴如箭；星霜荏苒，居诸不息。

北海虽赊，扶摇可接；东隅已逝，桑榆非晚。

在我 27 岁，即将步入而立之年，但我对青春仍然热烈！在绿茵赛场，在 707 工作室，在网红五食堂，目光所至，皆是回忆。终有离别季，会有再相逢，虽万般不舍，却终得挥手告别！夏蝉耳语似昨日，万千文字难诉愁；少年没有乌托邦，心向远方自明朗！

“知遇之恩难回报，人行万里念吾师；承恩阔步青云去，长风浩荡会有时”

我在完成我的论文时，有幸得到了许多人的悉心指导和支持。在这里，我要感谢我的导师，王安恒老师和王雷老师，在我求学的征途中，能够有幸遇到您，是我人生中的幸运。感谢您不仅在学术领域给予我深入的指导和启迪，更重要的是您那独特的教育理念和对学生的关怀。感谢您让我学到了不仅仅是专业知识，更是为人处世的道理和品质。

“烈火散去繁星尽，知交零落各奔驰；长绳难系青春日，他朝重遇如故知”

其次我要感谢我的室友，足球队队友，课题组师弟。我们在同一个屋檐下度过了许多美好的时光。感谢我的足球队队友们。在球场上，我们一同挥洒汗水，一同追逐梦想。感谢我的课题组师弟们。在学术研究中，我们相互支持、相互学习，一同攻克难题。

“山远天高一念牵，海深不抵乡愁情；半世只知双亲爱，未知子女泪长涟”

最后我要感谢我的家人和我的老婆。你们一直在我身边，给予我无尽的爱和关心，无论是在学业上还是生活中，你们始终是我坚实的后盾。我要感谢我的老婆。你是我生活中最亲密的伴侣，也是我最坚强的支持者。你的理解、支持和包容让我感到无比幸福和安心。

衷心感谢你们，我会一直珍惜你们的爱和支持，努力让你们骄傲。愿我们的家庭永远充满温暖、幸福和爱。

但愿吾师，科研顺利，桃李满门！

但愿吾友，前程似锦，功不捐唐！

但愿吾校，蓬勃发展、繁荣昌盛！

岁月不相忘，终会有相逢，北京中路，后会有期！

李凡

尚德敏学 唯实惟新

