上辊开设中心槽对薄壁焊管辊弯成形质量的影响研究

王建森[1*] 王 旭[1] 刘少君[2] 张 鑫[2] 刘 彬[2]
1.兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州,730050
2.天水风动机械股份有限公司,天水,741020

摘要:为提高不锈钢薄壁焊管成形几何质量,针对辊弯成形中的平辊阶段,研究了上辊开设中心槽结构对成形过程的影响。基于W成形工艺,通过ABAQUS建立了有无中心槽结构的两种辊弯成形有限元仿真模型,计算对比分析了两种结构板材成形各道次下的应力和应变分布特征,揭示了平辊阶段上辊中心槽结构对薄壁焊管成形几何质量的影响机制。结果表明,开设中心槽结构使上辊与板材间接触方式由整体式接触变为分段式接触,可减小材料塑性变形流动阻力,改善流动均匀性,降低局部应力和应变幅值,有效提高边缘成形精度并抑制板材回弹。辊弯成形实验及成形几何精度检测结果表明,仿真结果与实验结果误差小于5%,验证了研究方法的有效性。

关键词:薄壁焊管;辊弯成形;中心槽结构;有限元仿真;成形质量
中图分类号:TG335
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Influences of Central Grooves in Upper Rolls on Roll_forming Quality of Thin-walled Welded Pipe

WANG Jiansen[1*] WANG Xu[1] LIU Shaojun[2] ZHANG Xin[2] LIU Bin[2]
1.College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou,730050
2.Tianshui Pneumatic Machinery Co., Ltd.,Tianshui,Gansu,741020

Abstract: Abstract: To improve the forming quality of thin-walled stainless steel welded pipes, the influence of a center-grooved upper roll on the flat roll stages of roll forming was investigated. Based on the W-forming process, two finite element models, with and without a center-grooved upper roll, were established in ABAQUS. The stress and strain distributions of the sheet under the two structures were compared during forming passes to reveal the influence mechanism of the center-grooved upper roll on forming quality. Results show that the center groove changes the contact between the upper roll and the sheet from continuous to segmented contact, reducing material flow resistance during plastic deformation, improving flow uniformity, decreasing local stress and strain amplitudes, enhancing edge forming accuracy, and suppressing springback. Roll-forming experiments and geometric accuracy measurements showed errors below 5% between simulation and experiment, verifying the effectiveness of the method.

Key words: thin-walled welded pipe; roll forming; center grooved upper roll; finite element simulation; forming quality

0 引言

辊弯成形是制造薄壁焊管的常见成形方法。作为一种高效的连续成形工艺,辊弯成形通过多道次辊轧使金属带材逐步弯曲成管状,具有生产效率高、材料利用率高等优点[1-2],在汽车制造[3]、航空航天[4]、建筑结构[5]等领域得到广泛应用。辊弯成形质量直接影响焊管终产品的几何精度、机械性能和使用可靠性。在实际生产过程中,由于新型强韧材料的应用及材料塑性变形的复杂性,使得传统辊弯成形工艺面临诸多挑战,如高强钢材料回弹难以控制、边缘区域易产生波浪变形、截面尺寸一致性差等问题,严重制约了产品质量的提高。

近年来,随着计算机软硬件技术的迅速发展,国内外学者通过有限元方法对辊弯成形工艺展开了大量研究。邢刚等[6]研究了不同整形方案对产品精度的影响,发现整形工艺对回弹的控制效果随成形角增大而增强;韩飞等[7-8]通过试验、理论

收稿日期:2025-10-29
基金项目:甘肃省技术创新引导计划(22CX8GA119);甘肃省科技计划(科技重大专项)(22ZD6GE066)

及仿真相结合的方法，探究了圆角半径、板厚对板材回弹量的影响机理，揭示了板宽、板厚及弯角区硬度对成形力的影响规律；赵彬荐等[9]提出了基于改进多目标灰狼算法（MOGWO）的高强钢辊弯成形工艺优化方法，结合LS-DYNA仿真与响应面法，阐明了关键工艺参数对辊弯件偏差角与纵弓高度的作用规律；FANG等[10]通过有限元法提出了基于预扩口角的工艺优化方案。

为了实现产品成形质量及辊轧工艺参数的精准预测，进一步促进辊弯成形领域智能化发展，WIEBENGA等[11]和QIU等[12]采用鲁棒优化技术与数值模拟相结合的方法对辊压成形工艺进行了优化；GAO等[13]通过建立出口速度简化表达式，推导出了纵向曲率半径计算公式，并结合响应面法与修正系数，提出了一种高精度的板材连续辊弯成形形状预测方法；KOCBAY等[14]建立了薄板与壳状结构弯曲过程中的塑性模型，通过与三维全解及板理论积分结果对比验证了模型的精度；BADR等[15]引入了均质各向异性硬化模型，证实HAN模型能够有效预测Ti-6Al-4V大半径辊压成形中的回弹行为；REN等[16]开发了六维数字孪生模型，为辊压成形工艺的质量控制优化提供了新方法；YAN等[17]通过构建考虑拉压不对称的Verma本构模型，开发了VUMAT子程序并将其嵌入仿真模型，提出了一种针对AZ31镁合金辊弯回弹的高精度预测方法。

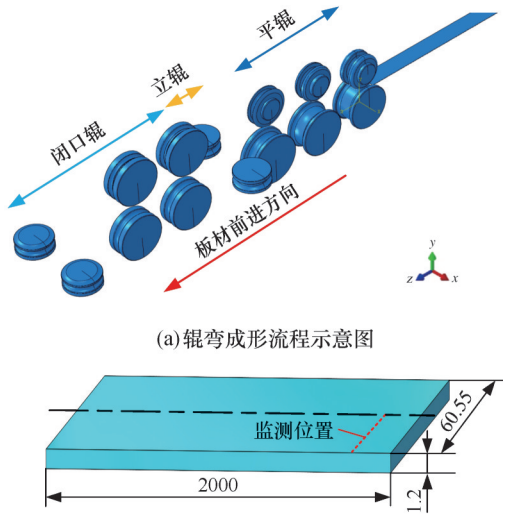
综上可见，当前针对板材辊弯成形质量提高在工艺参数优化及成形质量预测方面已展开诸多研究，但在平辊段上辊中心槽这一特定结构对成形过程的影响机制方面仍缺乏深入分析。本文以平辊段上辊有无中心槽结构为研究对象，通过仿真对比分析有无中心槽条件下板材在成形过程中的应力、应变分布规律，探究中心槽结构对材料流动与回弹行为的影响机制，并结合实验对仿真结果进行验证，以期为辊弯成形工艺的结构优化与性能提升提供理论依据。

1 模型建立

1.1 几何模型建立

辊弯成形可分为平辊、立辊、闭口辊三个阶段，有限元计算辊轧几何模型如图1a所示，辊轧板材尺寸及计算监测点见图1b。

本文焊管辊弯采用“W”成形工艺，即平辊段第一道轧辊孔型采用“W”孔形，可通过辊弯成形过程中带钢边缘的正向弯曲与中间部分的反向弯曲协同作用，使带材边缘充分变形，减少材料鼓包、褶皱及过度变形等缺陷[18]。图2为平辊三道次截面形状图，图2a、图2c、图2e为上辊加中心凹槽结构，图2b、图2d、图2f为传统平辊结构。

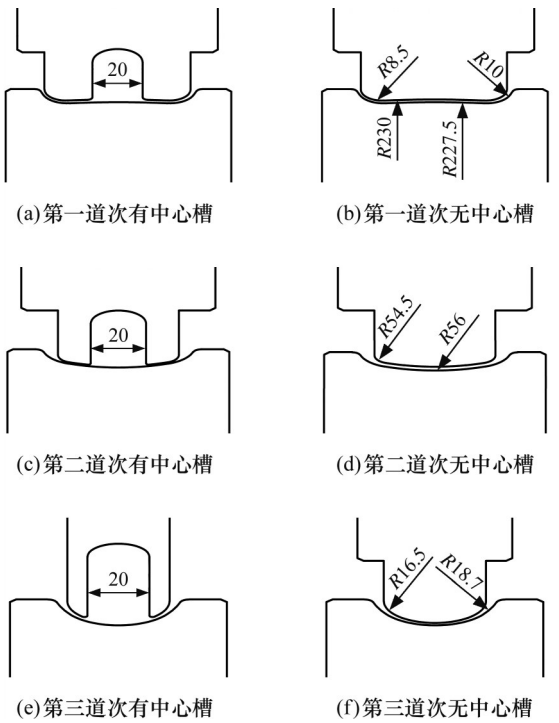


(a)辊弯成形流程示意图

(b)板材尺寸及计算监测点

图1 辊弯成形有限元计算几何模型

Fig.1 Finite element calculation geometric model for roll forming



(a)第一道次有中心槽　(b)第一道次无中心槽

(c)第二道次有中心槽　(d)第二道次无中心槽

(e)第三道次有中心槽　(f)第三道次无中心槽

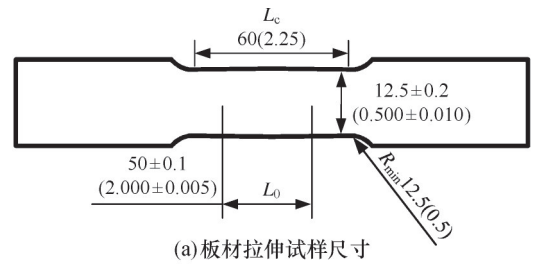
图2 平辊截面图

Fig.2 Cross-sectional view of the flat roller

1.2 材料特性

板件材料为310S不锈钢，其力学特性试验按GB/T 228.1—2010金属材料拉伸试验标准第一部分室温试验方法进行，拉伸试样参照Q/SY BG 1032—2022《耐蚀连续油管》标准规定制备，样件尺寸参见图3，拉伸计采用岛津AGS-

X300型电子万能试验机，得到310S的真实应力-应变曲线如图4所示，材料的主要力学属性见表1。



(a)板材拉伸试样尺寸



(b)拉伸试验样　　(c)拉伸断裂样

图3　板材拉伸试验样件图

Fig.3　Diagram of tensile test for sheet metal

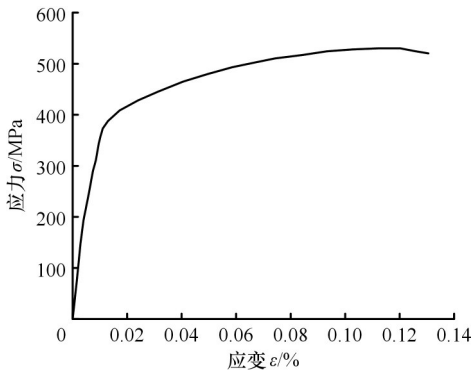


图4　310S真实应力-应变曲线图

Fig.4　Real stress-strain curve of 310S

表1　310S材料力学属性

Tab1　Mechanical properties of 310S

项目	数值
密度/(kg·m^{-3})	7.98×10^3
弹性模量/GPa	200
泊松比	0.3
屈服强度/MPa	355.7
抗拉强度/MPa	477.2
伸长率/%	27

1.3　网格划分

轧辊材质为Cr12MoV锻件，热处理后硬度达60～62HRC，在焊管的辊弯成形过程中，轧辊相对于板材的变形量非常小，可忽略不计，将轧辊设置为解析刚体。板材网格选用C3D8R单元六面体网格，为兼顾计算精度和求解效率，沿板厚方向设计4组网格方案，进行无关性验证，结果见表2。由表可见，当网格达到6层后，继续加密网格对计算结果的影响已经可以忽略，故后续分析采用6层网格。网格局部示意图见图5。

1.4　求解控制

分析步采用显式动力学中心差分算法，设定

表2　网格无关性验证

Tab.2　Grid independence verification

板厚单元数	板材单元数	回弹量/mm	轧制力/N
3	36 000	0.168	1547
5	60 000	0.143	1911
6	72 000	0.124	1805
8	96 000	0.123	1817

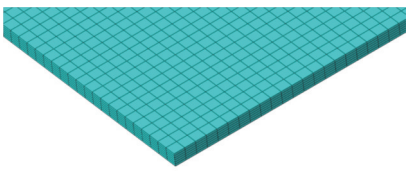


图5　板材局部网格划分示意图

Fig.5　Schematic diagram of local grid division of the sheet material

质量缩放因子为10 000以加快求解速度，在保证动能与内能比值不超过5%的前提下有效缩短计算周期，确保模拟过程满足准静态特性[19]。求解控制采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)自适应网格方法，通过拉格朗日步与网格自适应重映射相结合的分步求解格式，在保证冲击波传播等关键问题计算精度的同时，有效抑制网格畸变，确保计算稳定性[20]。

1.5　边界条件

将轧辊定义为刚性体，仿真计算中每个成形辊内所有节点的自由度都耦合到成形辊的质心上[21]，仅开放成形辊绕轴旋转自由度，其他自由度均受约束。对金属板材施加轧制进给方向的速度，速度与后续焊接工艺的焊接速度相匹配，值为0.56 m/min。

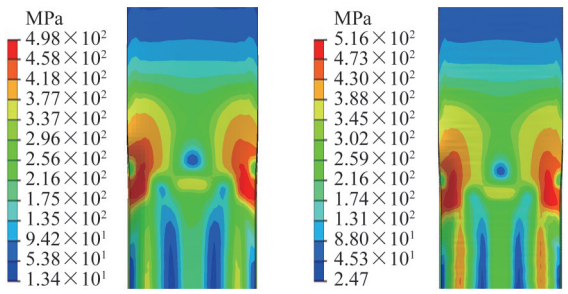
辊轧方式使用上辊下压的方式，即预留一段距离，等板材通过轧辊后再让轧辊落下至轧制位置，以使板材能够顺利进入轧辊。模拟过程中摩擦对管坯的成形影响较小，切向行为采用罚摩擦模型，不锈钢-钢的摩擦因数约为0.10～0.12[22]，本文取0.10。法向行为选用硬接触，允许接触后分离[23]。

2　计算结果分析

2.1　应力应变对比分析

图6～图8分别为平辊阶段第1～3道次上辊有无中心槽结构板材上表面Mises等效应力分布对比云图。

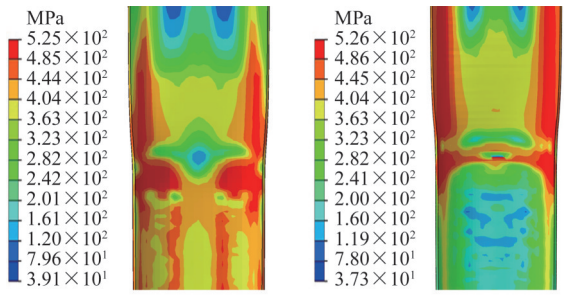
由图6可见，第一道次成形过程中，两种结构下板材轧制区应力分布大致相似，说明在辊弯成形过程中，材料所受轧制力的基本模式相近；由于轧辊为“W”孔形，板材边缘区域弯曲与中部区域



(a)有中心槽　　(b)无中心槽

图6　第一道次板材Mises等效应力云图

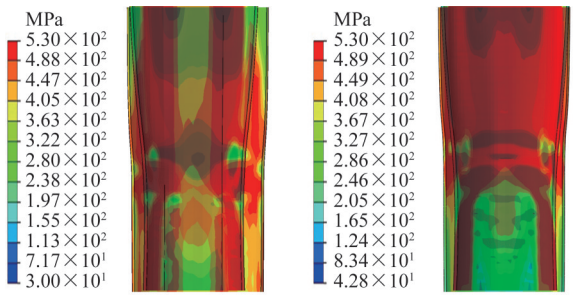
Fig.6　Mises equivalent stress cloud of the first rolling plate



(a)有中心槽　　(b)无中心槽

图7　第二道次板材Mises等效应力云图

Fig.7　Mises equivalent stress cloud of the second rolling plate



(a)有中心槽　　(b)无中心槽

图8　第三道次板材Mises等效应力云图

Fig.8　Mises equivalent stress cloud of the third rolling plate

弯曲方向相反，边缘区域需大致弯曲至成形件半径大小，故此处变形较大，高应力区主要集中在板材边缘处。提取两种结构下应力幅值，有无中心槽时板材的最大应力分别为498 MPa、516 MPa。第一道次成形时中心槽结构可减小板材变形应力，应力峰值降低约3.5%。

由图7可见，第二道次成形过程中，两种结构下板材轧制区应力分布呈现显著差异，虽然板材边缘处都存在高应力集中情况，但有中心槽结构板材高应力区集中分布于中心槽附近，沿横向分布范围更广，中心槽结构减小了轧辊与板材的接触面积，改变了二者的接触模式，局部接触使应力传递路径发生变化，不仅驱动边缘变形，也在槽口附近引发应力集中，通过这种应力分布的调整，可更精准地引导板材在关键区域的塑性流动；在无中心槽的宽幅面接触下，板材中部区域缺乏有效的材料容纳空间，导致其横向塑性流动严重受阻。为满足体积不变条件，变形主要流向两侧的自由边缘区域，从而在边缘变形区产生了应力集中。

由图8可见，第三道次成形过程中，有中心槽结构板材高应力区与中低应力区相间分布，高应力区多分布于板材边缘及槽口附件处，应力梯度相对小，应力过渡平缓，不同区域间应力差异相对较小，改善了应力分布的均匀性，有利于板材成形质量的提高；无中心槽结构下板材成形过程中大范围被高应力区覆盖，反映出外部载荷分布不均、力的传递缺乏引导的弊端，这种广域高应力状态不仅导致材料塑性潜力被过早耗尽、回弹控制难度加大，更会显著增加成形缺陷与疲劳失效风险。

为清晰起见，提取两种结构下三个轧制道次轧辊中心位置板材上表面处板材横向应力及横向应变沿截面横坐标的变化曲线，见图9、图10所示。由图可见，第一道次以边缘弯曲为主，板材整体变形量小，边缘区域与轧辊直接接触，产生压应力；而由于下辊中间部分反弯幅度较小，板材并未过多接触到中心槽区域，导致中心槽的几何效应在第一道次中并未体现；经过下辊反弯后，板材凸侧处于弯曲拉伸状态，同时，边缘区域的压缩塑性变形通过材料的连续性向中心区域传递横向拉伸作用，进一步加大了中心区的拉应力水平。两种辊型下，接触压力均集中于板材两端弯曲区域，应力-应变响应差异并不明显。

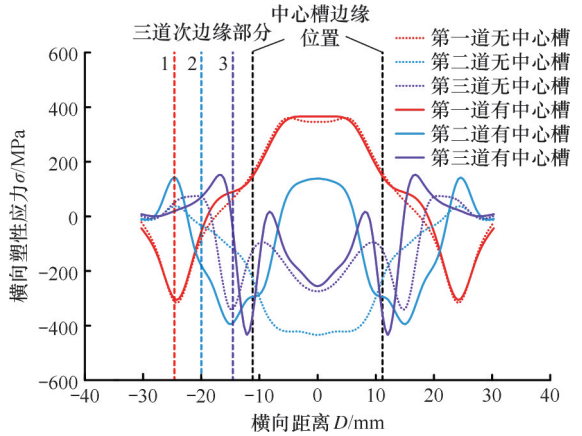


图9　前三道次截面横向应力对比

Fig.9　Comparison of transverse stress in the first three rolling plate

在第二道次，随着变形量增大及上辊宽度变化，板材的主要变形区域发生转移，第一道次边缘

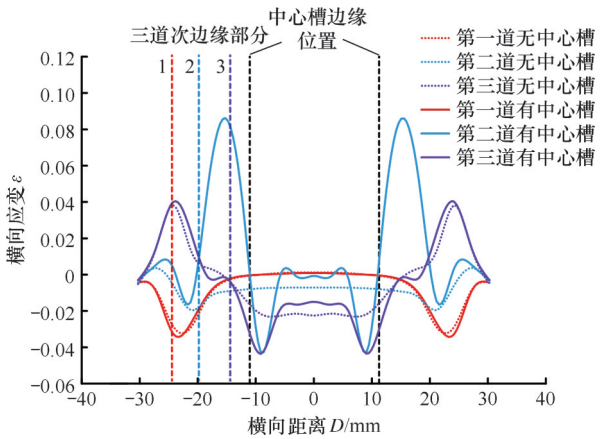


图 10　前三道次截面横向应变对比

Fig.10　Comparison of the transverse strains of the first three rolling plate

区因已充分变形，在第二道次不再与上辊直接接触，其下表面受压状态延续，导致上表面仍维持拉应力和拉应变。由于中心槽的存在，板材中部缺乏上辊的横向约束，根据塑性流动的最小阻力定律，应力向中心区域汇集，形成向中间挤压的趋势。这一趋势使得轧辊接触区下表面承受更大的接触压力，进而导致接触区上表面产生显著的拉应变。此时，接触区上下表面均表现为压应力状态，变形状态延续“W”成形特征。回弹发生时，板材中间区域也开始参与回弹，且与边缘区域的弹性回复方向相反，回弹相互抵消，从而降低了整体回弹量。相比之下，无中心槽上辊与板材呈宽幅面接触，形成近似均匀分布的接触压力，板材在较强的横向约束下整体压缩，回弹时各区域方向一致，难以相互抵消，故回弹量应大于有中心槽时的情况。

第三道次时，板材在轧辊引导下逐渐趋圆，原本的W形截面在下辊作用下向外拉伸，中心区域由外凹内凸转为外凸内凹，应力由拉应力转变为压应力，应变亦呈受压状态。与此同时，板材W形底部及最边缘区域出现应力很小、应变较大的现象，标志着该区域材料在屈服后应力基本维持稳定而应变持续累积，弹性应变能占比极低，已进入充分的塑性应变状态，从根源上削减了卸载后的回弹驱动力。相比之下，无中心槽结构下，这些区域的应力与应变幅度均较小，变形虽平稳却未能引发充分的塑性变形，并且回弹区域小，弹性储能较高，回弹时驱动力更大，因此其总体回弹量必然大于有中心槽的情况。

图11为两种结构下仿真结果所得辊花图，由图可见，有中心槽结构实现了双道次“W”成形过程，克服了传统单道次“W”成形钢带边缘曲率不当严重影响成形质量。后续段修正困难等问题[24]，更适用于强度高、反弹大的不锈钢材料辊轧成形。

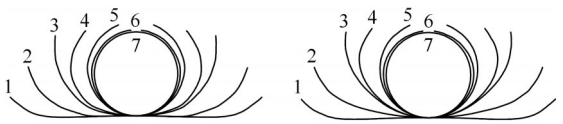


图 11　辊花图

Fig.11　Roller pattern

2.2　回弹量比较

由于横截面不同位置的回弹是不一样的，采用常规方式不能反映不同区域回弹量的差异，因此可通过计算对比管坯横截面在回弹前后同一节点之间距离差，较为直观地看出各个节点区域回弹量的变化趋势[25]。本文采用对板材端点回弹前后的横向距离差 ΔD 来表示回弹量的变化，回弹计算通过板材端点处节点的位移历史确定。当节点的横向位移在连续0.2 s内的变化小于0.01 mm时，判定回弹稳定。最终回弹量由此时节点的空间坐标计算得到，如图12所示。图13为有无中心槽结构下前三道次辊轧仿真所得回弹量随轧制道次的变化曲线。由图可见，中心槽结构可有效抑制板材回弹量，有中心槽相对于无中心槽回弹量缩减最大达到38%。

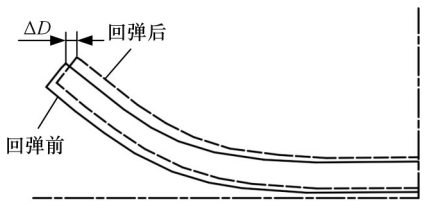


图 12　辊弯成形回弹量示意图

Fig.12　Schematic of springback in roll forming

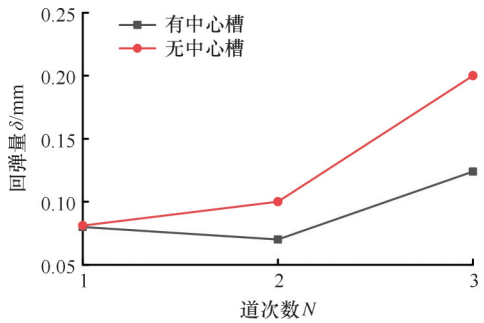


图 13　回弹量仿真结果

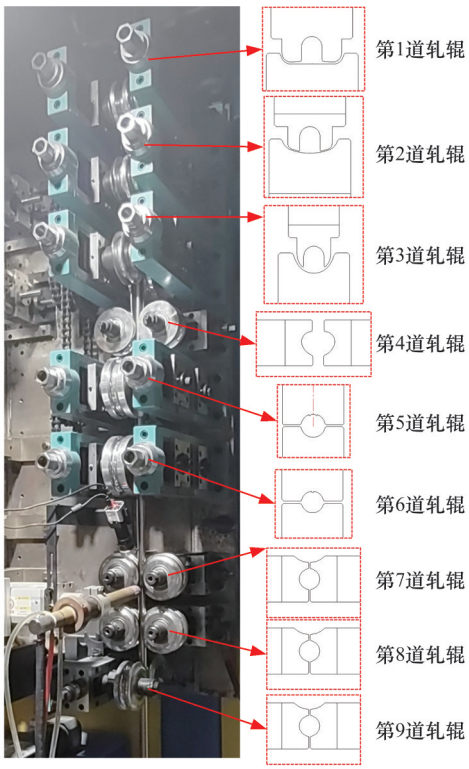
Fig.13　Rebound simulation results

3　实验及成形几何质量检测

3.1　辊弯成形实验

板材成形后要求尺寸为 ϕ20.0 mm×1.2 mm，辊弯成形实验轧辊布置如图14a所示，其中第1～7道为成形轧辊段，包括有3道平辊段、1道立辊段

和3道闭口段；第8、9道为焊后孔形精整段；第7道和第8道间布置有焊接段，图14b所示为成形样件图片。



(a)焊管成形工艺流程轧辊布置图



(b)成形样件

图14　焊管成形工艺流程轧辊布置图及成形样件

Fig.14　Diagram of rolling layout and formed pipe sample

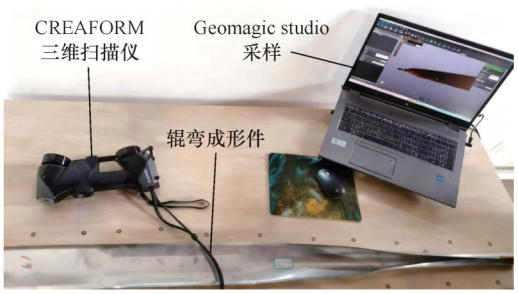
3.2　几何质量检测

提取板材辊弯成形样件，利用CREAFORM高精度光学三维扫描仪对成形板材样件几何形状进行逆向测绘，所得数据通过GEOMAGIC软件处理生成数字几何模型，检测布置图及三维扫描成形图分别见图15a、图15b，提取三个轧制道次轧辊位置处板材上表面成形几何外形仿真与实测曲线，对比图见图16。

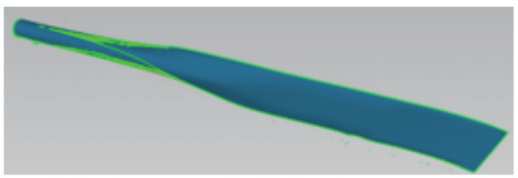
由图16可见，实验结果板材回弹量比仿真结果略大，二者在板材外缘端点处周向最大偏差约为3.9%，仿真与实验的宏观截面轮廓误差小于5%，可满足工程预测精度需求，验证了模型及方法的有效性。

4　结论

通过上辊有无中心槽结构薄壁焊管辊弯成形



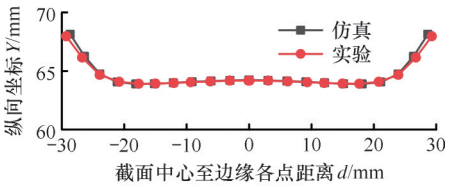
(a)样件三维几何形状检测布置图



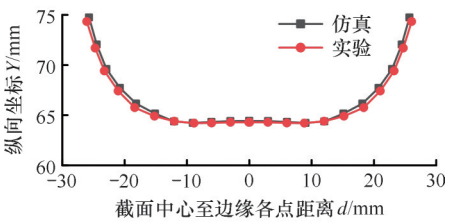
(b)样件三维几何扫描成形图

图15　样件几何质量三维扫描检测

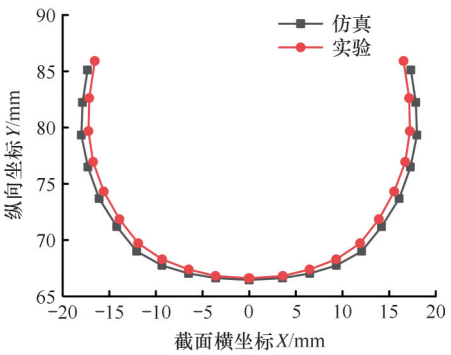
Fig.15　Three dimensional scanning inspection of geometric quality of samples



(a)第一道次



(b)第二道次



(c)第三道次

图16　成形截面几何形状对比图

Fig.16　Comparison diagram of geometric shapes of formed sections

仿真对比分析及有中心槽结构板材辊弯实验，可得到如下结论：

1)在应力-应变分布方面，无中心槽结构下板材变形应力应变分布范围较广，板材变形总体较为平缓，但该结构下板材呈现大面积高应力，会导

致材料承载效率降低，有局部过载风险；有中心槽结构可将应力-应变引导至板材边缘及槽口等关键变形区，使应力状态分布从“广域高应力”转变为“应力集中于关键变形区”，具有降低板材应力峰值、调整应力分布、改善辊弯成形质量的作用，峰值应力降低约3.5%。

2)在成形精度方面，两种结构下边缘成形精度均随辊轧道次数增加逐步提高，但有中心槽结构通过优化板材应变分布，加快了边缘成形精度的收敛速率；通过多道次渐进重构应力流场，加大回弹区域，先利用不同区域回弹方向的不同使回弹量相互抵消，进而引导局部区域发生充分塑性应变以削减弹性储能，从而显著抑制总体回弹。相对于无中心槽回弹量缩减最大达到38%。

3)在结构可靠性方面，有中心槽结构能有效分散板材内部的应力，可减少因应力集中导致的材料损伤，有助于从根源上抑制开裂、起皱等缺陷，提高成形件可靠性与剩余使用寿命。

本文在分析时，将轧辊视为解析刚体，仅讨论了有无中心槽结构的影响，未涉及槽宽、槽深的影响机制及规律分析，此部分内容尚待后续作进一步研究。

参考文献：

[1] DEB S . Roll Forming in Sheet Metal Forming [M]. CRC Press eBooks, 2024: 1-20.

[2] 韩飞，宁梓淮．辊弯成形技术研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报，2025，61(11)：279-300.
HAN Fei, NING Zihuai. Status of Research and Development Trend of Roll Forming Technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(11): 279-300.

[3] PERAPRUTCHAYA Y, SURANANTCHAI S. Finite Element Simulation of Forming Process for Automotive Components from Advanced High Strength Steel [J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 257: 02010.

[4] SPAK B, KÄSTNER M. Numerical and Experimental Fatigue Strength Evaluation of Thin-walled Aluminum Components for Aerospace Application Manufactured by Roll Forming [J]. Procedia Structural Integrity, 2024, 57: 445-451.

[5] PRABOWO A, ABDELRAHMAN A H A, DING Y, et al. Stability Design of Cold-formed High and Ultra-high Strength Steel Thin-walled Box Sections Using Effective Stress-strain Model [J]. Structures, 2024, 62: 106189.

[6] 邢刚，韩飞，黄宏江．整型对辊弯成形产品精度的影响机理研究 [J]. 中国机械工程，2024，35(10)：1862-1870.
XING Gang, HAN Fei, HUANG Hongjiang. Mechanism Study of Shaping's Influences on Accuracy of Roll Forming Products [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(10): 1862-1870.

[7] 韩飞，孙玮隆，张若青．不同弯曲方法对辊弯成形回弹的影响研究 [J]. 中国机械工程，2023，34(19)：2353-2361.
HAN Fei, SUN Weilong, ZHANG Ruoqing. Study on the Influences of Bending Methods on Springback in Roll Forming Processes [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19): 2353-2361.

[8] 韩飞，李冲．辊弯成形力影响因素作用的机理分析 [J]. 中国机械工程，2023，34(8)：993-999.
HAN Fei, LI Chong. Analysis of Action Mechanism of Influencing Factors of Roll Forming Force [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(8): 993-999.

[9] 赵彬荐，李兆军，蒋春玲，等．基于改进的MOGWO高强度钢辊弯成形工艺的多目标优化 [J]. 塑性工程学报，2024，31(7)：89-99.
ZHAO Binjian, LI Zhaojun, JIANG Chunling, et al. Multi-objective Optimization of High Strength Steel Roll Bending Forming Process Based on Improved MOGWO [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(7): 89-99.

[10] FANG Gang, GAO Weiran, ZHANG Xiaoge. Finite Element Simulation and Experiment Verification of Rolling Forming for the Truck Wheel Rim [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(7): 1509-1515.

[11] WIEBENGA J H, WEISS M, ROLFE B, et al. Product Defect Compensation by Robust Optimization of a Cold Roll Forming Process [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2013, 213(6): 978-986.

[12] QIU L, ZHANG S, WANG Z, et al. A Robust Optimization Design Method for Sheet Metal Roll Forming and Its Application in Roll Forming Circular Cross-section Pipe [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(11):2903-2916.

[13] GAO J, CAI Z, ZHANG X, et al. Shape Prediction in Continuous Roll Forming of Sheet Metal Based on Rigid Rolls [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 279: 109513.

[14] KOCBAY E, SCHEIDL J, RIEGLER F, et al. Mixed Eulerian-Lagrangian Modeling of Sheet Metal Roll Forming [J]. Thin-walled Structures, 2023, 186: 110662.

[15] BADR O M, ROLFE B, WEISS M. Effect of the Forming Method on Part Shape Quality in Cold Roll Forming High Strength Ti-6Al-4V Sheet [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 513-521.

[16] REN Yinwang, DONG Jie, HE Jingsheng, et al. A Novel Six-dimensional Digital Twin Model for Data Management and Its Application in Roll Forming [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 61: 102555.

[17] YAN Yu, XU Hanzhong, WANG Haibo, et al. AZ31 Magnesium Alloy Roll-forming Springback Prediction Considering Anisotropic and Asymmetric Properties [J]. Materials, 2025, 18(13): 3111.

[18] 张君彩，郑文林，陈青果，等．W孔型在直缝焊管孔型设计中的应用 [J]. 河北工业科技，2002，19(4)：34-36.
ZHANG Juncai, ZHENG Wenlin, CHEN Qingguo, et al. An Application of W-pass in the Pass Design of Welding-tube [J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2002, 19(4): 34-36.

[19] 刘志峰，张敬东，成焕波．基于ABAQUS显式动力学的PCB板跌落研究 [J]. 中国机械工程，2012，23(12)：1456-1461.
LIU Zhifeng, ZHANG Jingdong, CHENG Huanbo. Research on PCB Collision Based on ABAQUS/Explicit Dynamic [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12): 1456-1461.

[20] DOBREV V, KNUPP P, KOLEV T, et al. Simulation-driven Optimization of High-order Meshes in ALE Hydrodynamics [J]. Computers & Fluids, 2020, 208: 104602.

（下转第2961页）