

2219 铝合金带筋板辊轧工艺

许志强, 钱应平

(湖北工业大学 机械工程学院 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为实现筋板类构件连续成形及提高筋条质量, 提出一种使用两辊辊轧机来成形带筋板的工艺方法, 并利用 Deform 有限元模拟软件, 建立了带筋板辊轧成形的有限元模型, 阐述了工艺原理, 揭示了带筋板在辊轧过程中筋条区域与底板区域的金属流动变形行为以及等效应变分布情况, 并分析研究了不同板厚以及压下率对带筋板成形的影响。结果表明: 该方法可以实现薄壁高筋类构件的成形加工, 通过调控板厚和压下率可以提高带筋板的成形筋高, 当板厚小于 8 mm、压下率小于 60% 时, 最高可成形筋高为 1.8 mm 的带筋板。该研究可为此类构件的辊轧工艺及模具的优化设计提供理论参考。

关键词: 2219 铝合金; 筋板类构件; 辊轧; 筋高; 轧制力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.015

中图分类号: TG335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0125-07

Rolling process of 2219 aluminum alloy ribbed plate

Xu Zhiqiang, Qian Yingping

(Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, School of Mechanical Engineering,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to realize the continuous forming of ribbed plate components and improve the quality of ribs, a process method of forming ribbed plate using a two-roller rolling mill was proposed, and the finite element model of ribbed plate rolling was established by finite element simulation software Deform. Then, the process principle was explained, the metal flow deformation behavior and equivalent strain distribution in the rib area and the bottom plate area during the rolling process of ribbed plate were revealed, and the influences of different plate thicknesses and reduction rates on ribbed plate forming were analyzed and studied. The results show that this method realizes the forming processing of thin-walled and high-ribbed components. The formed rib height of ribbed plate can be improved by adjusting plate thickness and reduction rate. When the plate thickness is less than 8 mm and the reduction rate is less than 60%, the maximum rib height of formed ribbed plate is 1.8 mm. Thus, this research provides a theoretical reference for the rolling process and mold optimization design of such components.

Key words: 2219 aluminum alloy; ribbed plate components; rolling; rib height; rolling force

筋板类构件是带筋薄壁构件中的一类重要和典型的代表, 广泛应用于航空航天和武器装备领域。但由于筋板类构件往往具有复杂的异型截面、外形轮廓不规则、厚向截面不均匀等特点, 使其加工存在很多困难^[1]。目前, 传统制造技术以及加工方法主要是将较厚的铝合金板材直接机械加工, 但机械加工会导致筋部位置的金属流线被切

割, 精密铸造构件缺少塑性变形强化, 易造成内部晶粒组织粗大, 同时厚板直接机加工使得原材料的利用率很低^[2]。

现有采用整体成形方法加工筋板类构件的研究主要为环轧、辊轧、摆辗和挤压等^[3-7]。万斯哲等^[8]通过 ABAQUS 软件研究了一种外壁带凸台锥形截面环件的一体成形轧制工艺, 并通过实验证实了该工艺的可行性。李媛等^[9]采用有限元分析软件 Deform, 得到二辊孔型轧制过程中轧制力的有限元仿真结果, 再通过 H 型钢轧制的实际数据对模型进行修正。冯玮等^[10]采用 Deform 有限元模拟软件建立了带内网格筋环件轧制成形的有限元模型, 模拟分析了构件金属流动情况、成形力变化等宏观变形

收稿日期: 2024-08-12; 修订日期: 2024-11-06

基金项目: 湖北省科技厅重点项目 (2020BAB037)

作者简介: 许志强 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 565967538@qq.com

通信作者: 钱应平 (1970-), 男, 博士, 教授

E-mail: qianyp98@163.com

规律。王康培等^[11]提出了一种径向挤压、周向展成的局部连续体积成形旋挤方法,模拟分析了外筋筒壳的成形过程,并针对筒壳易产生的扩径现象进行了工艺改进。昌江郁等^[12]采用金相显微镜、织构分析、力学拉伸以及有限元技术等分析测试方法研究了 7056 铝合金的轧制变形,得出轧制过程中厚板 1/4 层的剪切应力显著比表层与心部的大,引起轧制变形不均匀。

综上所述,传统加工方法主要适用于使用性能要求不高的筋板类构件。针对筋板类构件特殊的质量要求,如整体质量轻、占用空间面积小、承受载荷大以及支撑、防护、联结效果优等,本文选择辊轧成形方法,该方法能够使轧件组织致密、晶粒细化,并且材料纤维组织流线沿零件轮廓连续分布,力学性能较好^[13]。本文提出一种一次性连续成形的带筋板辊轧工艺,辊轧机的下辊设置有凹槽,通过上辊下压初步成形筋板前端,同时上下辊夹紧坯料

为后续进给提供足够的摩擦力,阻止坯料发生打滑现象。并应用有限元模拟软件 Deform-3D,对不同工艺参数下金属在变形过程中的受力情况进行模拟,分析不同工艺参数对辊轧过程的影响,为现场生产实践提供必要的指导。

1 带筋板辊轧成形原理

带筋板轧制成形原理如图 1 所示,包括上辊、开槽下辊、坯料以及环形挡板。其中, ω 为开槽下辊角速度, v 为板料的进给速度。图 1a 为带筋板轧制前各部件的位置关系图,为了防止轧制过程中板料的轴向移动,将环形挡板置于坯料两侧。根据目标零件的尺寸形状设计下辊凹槽尺寸以及数量。整个轧制过程分为下压变形阶段和进给变形阶段。如图 1b 所示,在下压变形阶段,辊轧机的上辊以恒定速度向下移动至所需下压量停止,坯料发生初步变

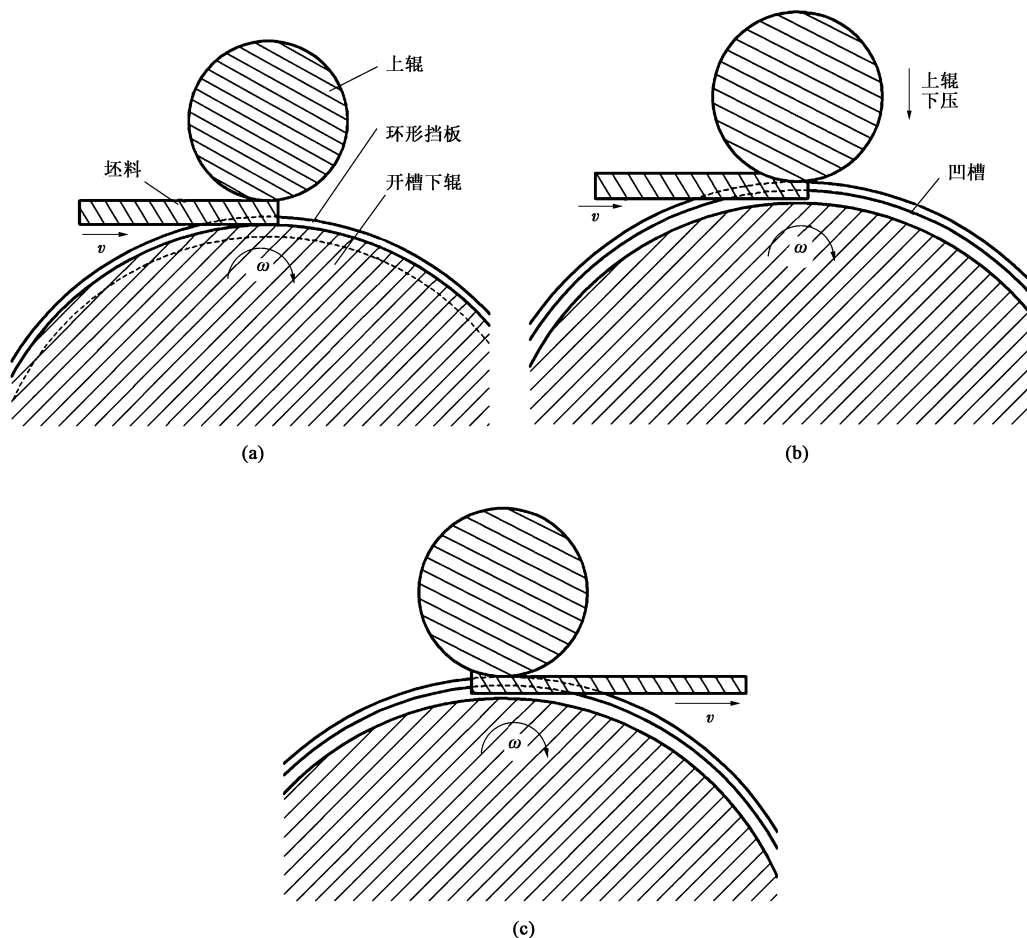


图 1 带筋板辊轧成形原理图

(a) 轧制前 (b) 下压变形阶段 (c) 进给变形阶段

Fig. 1 Principle diagrams of rolling forming for ribbed plate

(a) Before rolling (b) Compression deformation stage (c) Feed deformation stage

形：坯料与下辊接触部分受到下压与下辊凹槽的限制，下表面局部发生塑性变形，金属向下辊凹槽内流动，形成带筋板的前端；坯料与上辊接触部分受到上辊挤压发生变形。如图 1c 所示，在进给变形阶段，在下辊转动的作用下，坯料不断进给发生局部塑性变形，在两辊的限制下完成后续辊轧筋条，成形出最终的带筋板。

2 带筋板辊轧成形有限元模型

2.1 材料模型的建立

材料采用 2219 铝合金，假设轧辊为刚性辊，上下辊与板料接触均采用剪切摩擦模型，辊轧过程中板料最初温度为 450 ℃，材料的具体物理性能参数如表 1 所示。

表 1 辊轧板件的物理性能参数

Table 1 Physical performance parameters of rolled plate				
参数	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·mm ⁻³)
数值	290	73000	0.33	2.77×10 ⁻⁶

2.2 几何模型与边界条件

在模拟仿真过程中，为了兼顾辊轧工艺的实际情况和模型计算效率，对辊轧机进行一定的简化，并根据简化后的辊轧机实际尺寸建立几何模型。在满足辊轧工艺稳定性的前提下，对代加工板件的形状尺寸进行缩小。在下辊上设置 3 条凹槽来研究带筋板在多根筋条并列成形时所遇到的问题。为防止坯料在辊轧过程中发生不利于成筋的横向金属流动，在坯料两侧设置环形挡板限制横向变形。最终建立如图 2 所示的几何模型。

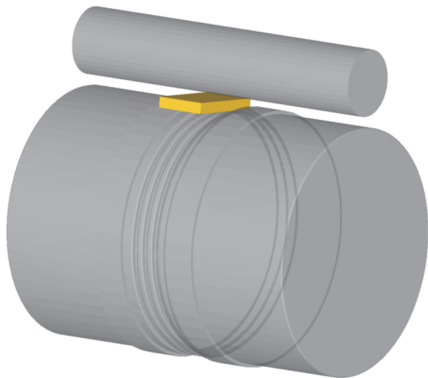


图 2 带筋板辊轧的有限元模型
Fig. 2 Finite element model of ribbed plate rolling

使用 Deform 建立铝合金板料辊轧成形带筋板的

仿真模型。在建模过程中，将两辊辊轧机简化为上下两辊、坯料 3 个部件。坯料视为塑性体，其余均视为刚体。Deform 具有自动划分四面体网格的功能，为了细化网格从而提高运算精度，在塑性变形体开启体积补偿后，在板料和下辊凹槽接触部分，利用 Deform 的网格窗口进行局部网格细化，网格单元最小边长为 0.399 mm。带筋板辊轧的有限元模型的几何尺寸与边界条件如表 2 所示。

表 2 辊轧几何模型尺寸与边界条件

Table 2 Dimensions and boundary conditions of rolling geometric model	
参数	数值
上辊直径/mm	Φ40
下辊直径/mm	Φ148
上下辊长度/mm	100
环形挡板外圆直径/mm	Φ152
板件坯料尺寸/(mm×mm×mm)	50×30×7
下辊凹槽尺寸/(mm×mm)	3×3
上辊转速/(r·min ⁻¹)	3.7
下辊转速/(r·min ⁻¹)	1.0

3 模拟结果分析

3.1 带筋板几何形状变化过程

带筋板在辊轧成形过程中的几何形状变化过程如图 3 所示。图 3a~图 3c 分为 0、5、15 s 时刻位置。0~5 s 为下压变形阶段，坯料下表面受到下辊突起结构的限制，在上辊的作用下发生塑性变形。随着下压量的增加，坯料与下辊凹槽接触面积增加，发生金属流动，材料流入凹槽形成局部筋条。并且随着下压量的增加，板料变形区域不断增大，筋条长度不断增加。金属在塑性变形过程中，其质点均沿着阻力最小的方向移动。上表面变形较大，金属材料一部分流向尾部，最终板料尾部翘起，下表面金属一部分流向凹槽形成前端筋条。5~15 s 为进给变形阶段，上辊固定，在摩擦力的作用下板料进给。在上下辊、凹槽和环形挡板的限制下，坯料发生连续局部塑性变形，直至全部板料通过上下辊辊缝，成形过程结束。

3.2 等效应变分析

带筋板辊轧成形过程中不同位置的等效应变分布图如图 4 所示。图 4a 为坯料与上辊接触表面，板料沿凹槽方向呈现分层的应变情况，具体表现为凹槽正上方坯料应变较小，其余部分应变较大。这是

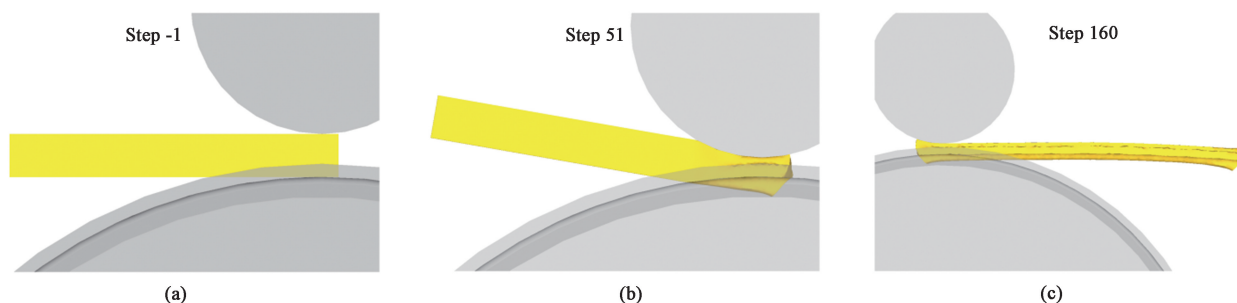


图 3 带筋板辊轧过程中不同时刻几何形状变化

(a) 0 s (b) 5 s (c) 15 s

Fig. 3 Geometric shape changes at different times during rolling process of ribbed plate

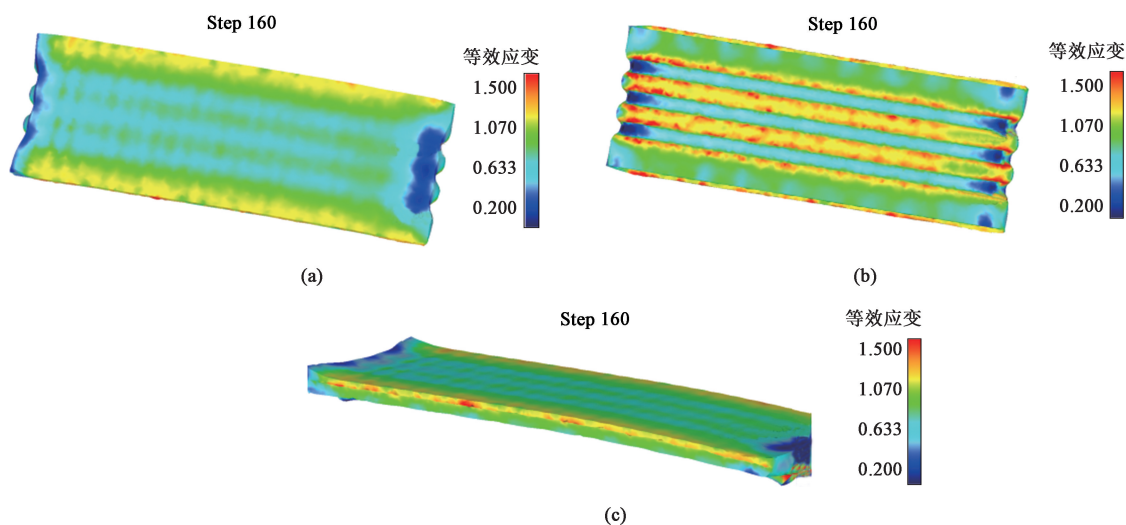


图 4 带筋板辊轧过程中不同位置的等效应变分布

(a) 坯料上表面 (b) 坯料下表面 (c) 坯料侧面

Fig. 4 Equivalent strain distributions of ribbed plate at different positions during rolling process

(a) Upper surface of blank (b) Lower surface of blank (c) Side surface of blank

因为位于下辊凹槽正上方两侧的金属受到轧辊的挤压后流入凹槽, 导致等效应变较大。图 4b 为坯料与下辊接触表面, 随着坯料不断发生局部塑性变形, 由于下辊设有凹槽与板料局部接触面积较小, 坯料与下辊接触位置等效应变较大。图 4c 为坯料的侧面与环形挡板接触的等效应变情况, 在坯料与上辊接触表面的两侧, 各有一块应变较大的区域。这是由于为实现下压过程, 环形挡板应低于板厚, 从而导致坯料与上辊接触的部分在辊轧过程中沿平行辊轴方向发生塑性变形。

3.3 轧制力分析

带筋板辊轧过程中轧制力随时间变化如图 5 所示, 轧制力随时间变化的趋势在下压变形阶段和进给变形阶段有较大的差异。在带筋板的下压变形阶段, 由于上辊下压量逐渐增大, 轧制力逐渐增加。在进给变形阶段, 坯料发生塑性变形金属流入凹槽

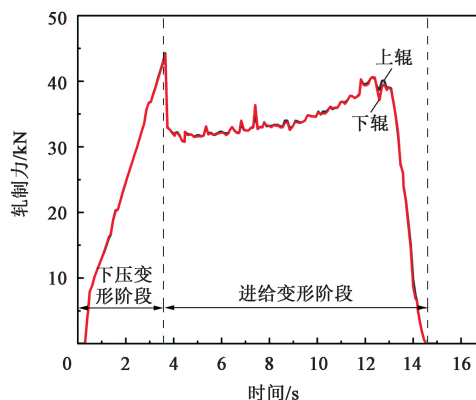


图 5 轧制力随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of rolling force with time

以及沿进给方向流动, 轧制力减小。轧制力在 35 kN 附近小范围波动, 这是由于坯料变形量一定, 且进入辊轧的坯料不断重复同样的塑性变形, 轧制

力趋于稳定, 但实际辊轧过程中一部分材料不断向后堆积导致轧制力出现波动。

由于辊轧机功率与下压轧制力需在安全范围内, 针对不同的筋条与底板的比例, 研究轧制力与板厚

以及下压量之间的关系。分别设置板厚为 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0 和 8.0 mm; 压下率为 40%、45%、50%、55% 和 60%。轧制力与压下率和板厚的关系分别如图 6a 和图 6b 所示。

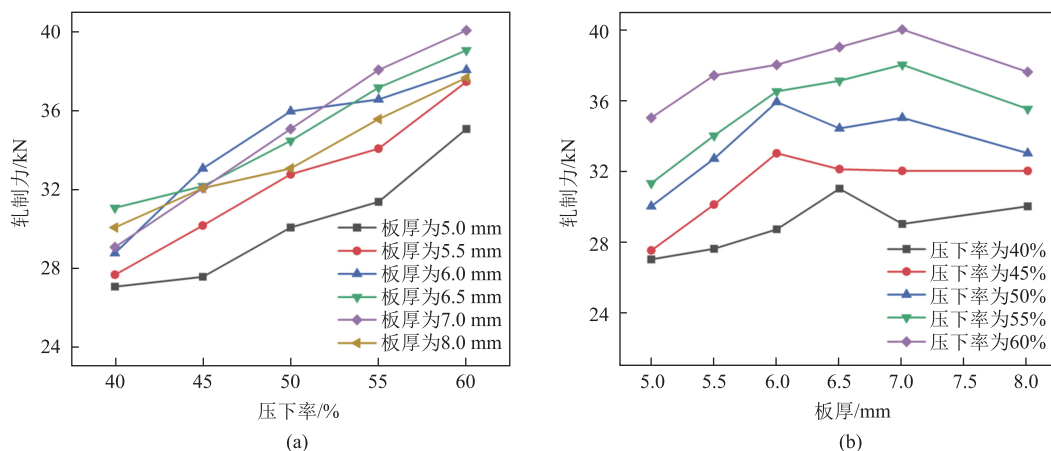


图6 不同参数下轧制力的变化曲线

(a) 压下率 (b) 板厚

Fig. 6 Variation curves of rolling force under different parameters

(a) Reduction rate (b) Plate thickness

图 6a 中, 随着压下率的提高, 辊轧过程中的轧制力有明显提高; 图 6b 中, 在压下率不变的情况下, 随着板厚的增加, 轧制力变化趋势为短暂提高后均有下降的趋势。这是因为当压下率不变时, 随着板厚的增加, 坯料内应力减小, 主要变形区域靠近坯料上表面, 即远离筋条的一侧, 此时金属主要沿着轧辊的旋转方向流动, 增加带筋板长度, 流入筋条的金属并无明显增多。

3.4 筋高分析

为提高带筋板件质量, 研究板厚与压下率对筋高

的影响趋势。带筋板分为底板以及底板上方的筋条部分, 以带筋板筋条顶部至底板顶部垂直距离的平均值为筋条高度, 简称筋高。压下率 η 的计算公式如下:

$$\eta = \frac{\Delta h}{H} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δh 为压下量, mm; H 为坯料厚度, mm。

筋高随压下率与板厚的变化曲线如图 7 所示。筋高受压下率与板厚因素影响下的变化趋势与轧制力的变化趋势一致: 由图 7a 可知, 筋高随着压下率的提高有明显的增高, 表明筋高与压下率关系较大,

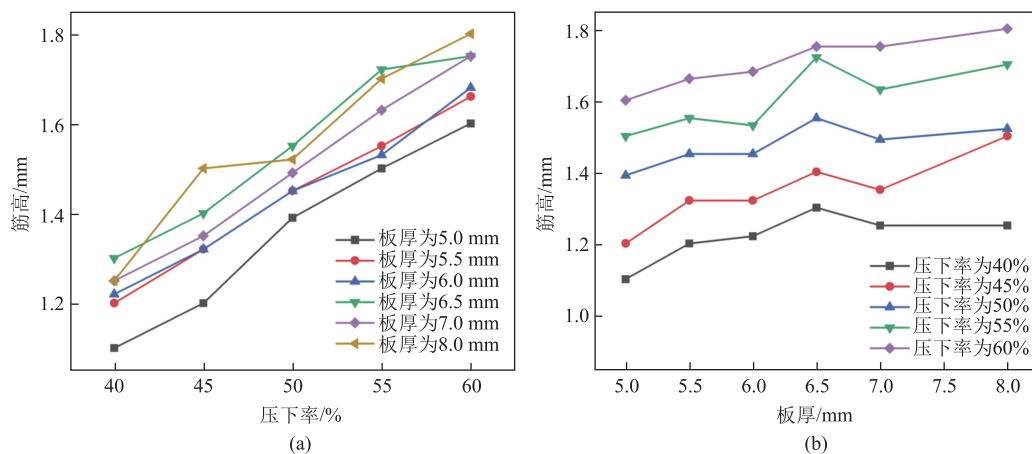


图7 不同参数下筋高的变化曲线

(a) 压下率 (b) 板厚

Fig. 7 Variation curves of rib height under different parameters

(a) Compression rate (b) Plate thickness

由上文可知,随着压下率的提高轧制力有明显的增大趋势,更大的轧制力促进了金属流动,从而在辊轧过程中发生局部塑性变形时,使筋条附近应变增大;由图 7b 可知,随着板厚的增加筋高无明显提高,表明筋高与板厚的关系较小,因为在压下率不变的条件下,随着板厚的增加,轧制力无明显增大,从而在辊轧过程中发生局部塑性变形时,使筋条附近应变增加较少,导致筋高增加量较小。

4 实验验证

在常温条件下,铅的流动性能与高温下的铝合

金相似,因此,可以在常温条件下使用铅材料来有效模拟高温铝合金环件轧制过程中的流动特性。用铅代替带筋板坯料进行辊轧实验,验证新工艺成形的可行性。实验中坯料尺寸为 $50\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 。在压下率为 60%,板厚分别为 5.0、5.5、6.0、7.0 和 8.0 mm 的条件下进行实验,以板厚为 5.0 mm 的带筋板辊轧成品为例,如图 8 所示。测量每组实验的带筋板筋高,并与压下率为 60% 条件下的模拟仿真结果对比。

图 9 为实验和模拟中的筋高对比情况,由图 9 可知,两者数值相近,误差不高于 10%。综上所述,本文提出的轧制新工艺是合理、可行的。

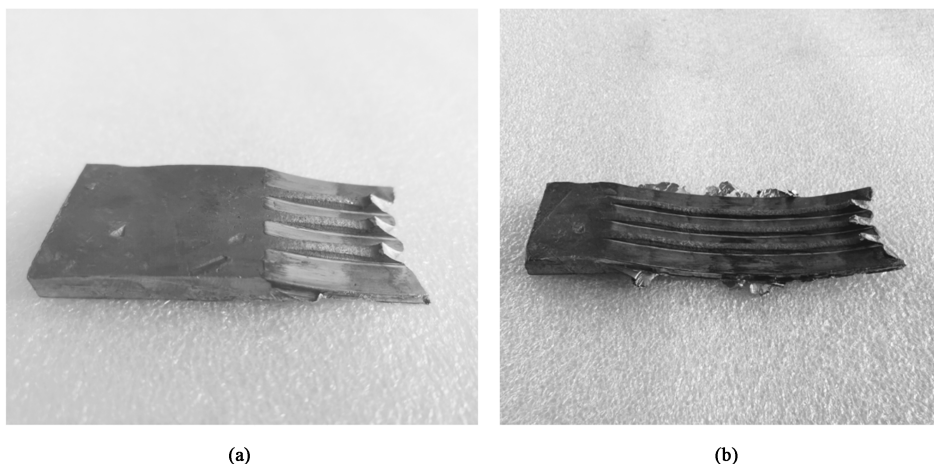


图 8 辊轧成品

(a) 5 s (b) 15 s

Fig. 8 Finished product by rolling

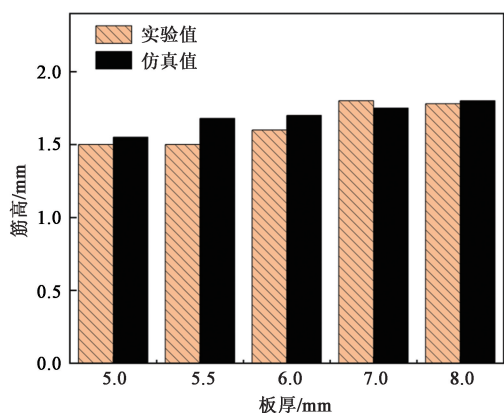


图 9 带筋板筋高的实验值与仿真值对比

Fig. 9 Comparison of rib height between experimental and simulated values for ribbed plate

5 结论

(1) 随着板厚的增加,筋高提高不明显;在相

同板厚时,提高压下率,筋高有明显的提高。根据带筋板的所需成形筋高,调整板厚和压下率,筋条的成形效果更好。

(2) 整个成形过程分为下压变形阶段和进给变形阶段,下压变形阶段与挤压相同,进给变形阶段为连续发生下压变形。

(3) 在带筋板滚轧过程中,下压变形阶段轧制力较大,随着压下率的增大,轧制力迅速增加,所以,在工艺设计中需要注意机器可承受的轧制力与进给量的界限。

(4) 通过数值模拟与实验验证,成功辊轧出筋高符合预期的带筋板,证实了该辊轧工艺的可行性。

参考文献:

- [1] 雷煜东,詹梅,樊晓光,等.带筋薄壁构件成形制造技术的发展与展望[J].西北工业大学学报,2022,40(1):1-17.
Lei Y D, Zhan M, Fan X G, et al. A review on manufacturing

- technologies of thin-walled components with ribs [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40 (1): 1-17.
- [2] Li Z D, Zhang Y, Xiong H Q, et al. Fabrication of particle-reinforced aluminum alloy composite: Role of casting and rolling [J]. Mater. Manuf. Process, 2022, 37 (1): 90-98.
- [3] Zheng J, Liu L, Zhang Z M, et al. Multi-pass rolling-extrusion of large-scale thin-walled square tube with longitudinal inner ribs [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2023, 124 (7-8): 2335-2349.
- [4] Tian D Y, Han X H, Hua L, et al. Constraining ring rolling of thin-walled conical rings with transverse ribs [J]. Int. J. Mech. Sci., 2022, 226: 107394.
- [5] 齐会萍, 李永堂, 华林, 等. 环形零件辗扩成形工艺研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (14): 75-80.
- Qi H P, Li Y T, Hua L, et al. Research status and developing trends on the rolling forming process of ring parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (14): 75-80.
- [6] 杨智皓, 路晓辉, 兰箭, 等. 环件轧制多尺度数值模拟研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 1-12.
- Yang Z H, Lu X H, Lan J, et al. Research progress in multi-scale numerical simulation of ring rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (3): 1-12.
- [7] Kraner J, Fajfar P, Palkowski H, et al. Microstructure and texture evolution with relation to mechanical properties of compared symmetrically and asymmetrically cold rolled aluminum alloy [J]. Metals, 2020, 10 (2): 156.
- [8] 万斯哲, 兰箭. 外壁带凸台锥形截面环件轧制成形规律 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 134-138.
- Wan S Z, Lan J. Rolling forming law of ring with convex cone section on outer wall [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 134-138.
- [9] 李媛, 王涛. 大规格 H 型钢粗轧阶段轧制力模型研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 139-144.
- Li Y, Wang T. Study on rolling force model for large-size H-beam steel during rough rolling stage [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 139-144.
- [10] 冯玮, 彭露. 带内网格筋环件约束轧制的成形规律分析 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (5): 84-88, 93.
- Feng W, Peng L. Analysis on forming law of constrained rolling of ring parts with inner mesh stiffeners [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (5): 84-88, 93.
- [11] 王康培, 赵亦希, 陈星翰, 等. 外筋筒壳旋挤成形方法及扩径现象 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (8): 83-91.
- Wang K P, Zhao Y X, Chen X H, et al. Spin extrusion forming method and diameter expansion phenomenon of cylindrical shell with outer rib [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (8): 83-91.
- [12] 昌江郁, 陈送义, 陈康华, 等. 7056 铝合金厚板轧制变形不均匀性的实验研究与数值模拟 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2018, 49 (8): 1914-1921.
- Chang J Y, Chen S Y, Chen K H, et al. Numerical simulation and experimental investigation of rolling deformation inhomogeneity of 7056 aluminum alloy thick plate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49 (8): 1914-1921.
- [13] 王廷溥, 齐克敏. 金属塑性加工学——轧制理论与工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- Wang T P, Qi K M. Metal Plastic Processing: Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程 (锻压) 分会成立于 1963 年, 是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体。经本会理事会研究决定: 凡承认本会章程并符合条件者, 可申请为本会会员。

会员的权利与义务: 1. 颁发个人/单位会员证书及铜牌, 铜牌由秘书处统一制作并颁发, 可申请定制; 2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠; 3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动; 4. 优先获得本会的有关学术资料, 免费获赠会刊《锻压技术》杂志 (个人会员 6 期/年, 单位会员 12 期/年); 5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo 链接; 6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权 (学生会员除外); 7. 接受本会委托, 进行论证、评议、咨询等工作; 8. 享有人会、退会的自由。

申请手续: 1. 通过学会官网 (www.cstp-cmes.org.cn) 点击立即注册在线提交入会申请; 2. 经审批通过后, 将邮件通知申请单位或个人进行会费缴纳; 3. 会员缴纳会费后正式登记, 自行登录个人中心首页-我的证书预览或下载会员证书。

地 址: 北京市海淀区学清路 18 号 711 室塑性工程分会
电 话: 010-62920654
网 址: www.cstp-cmes.org.cn

联系人: 李世龙
邮 箱: duanya@cmes.org

中国机械工程学会塑性工程分会