

5182 铝合金椭圆孔电磁翻边数值模拟研究

欧航, 安浩, 孙式进, 崔俊佳, 李光耀

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 研究异形孔电磁翻边成形规律及不同预制孔尺寸对翻边质量的影响。**方法** 基于电磁成形平台实现椭圆孔电磁翻边试验, 建立三维电磁成形仿真模型对3种预制孔的翻边过程进行模拟。通过显微硬度值、翻边轮廓、翻边高度及端部厚度等指标分析异形孔电磁翻边规律。**结果** 3种预制孔的翻边高度均表现为从长轴到短轴不断增大, 随着预置高度从15 mm降到10 mm, 长短轴两处的翻边高度差由2 mm下降至0.75 mm, 且翻边零件与模具贴合效果逐渐变好。**结论** 电磁翻边件在长、短轴处的变形存在着明显差异; 基于中性层不变原理的预制孔公式, 在侧壁与模具贴合良好的案例中低估了电磁翻边高度; 变形区域内较为均匀的电磁力密度分布有益于实现与模具良好贴合, 同时翻边高度更加均匀。

关键词: 5182 铝合金; 电磁成形; 椭圆孔翻边; 成形质量

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.002

中图分类号: TG361 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0009-07

Numerical Simulation Study on Oblique Hole-Flanging with 5182 Aluminum Alloy Produced by Electromagnetic Forming (EMF)

OU Hang, AN Hao, SUN Shi-jin, CUI Jun-jia, LI Guang-yao

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the mechanism of oblique hole flanging conducted by electromagnetic forming (EMF) and the effect of prefabricated hole on flanging quality. Experimental works based on the EMF platform and 3D numerical model were carried out to simulate the electromagnetic flanging process of three kinds of prefabricated holes. The rule of electromagnetic flanging of special shaped hole was analyzed by microhardness value, flanging contour, flanging height and end thickness. The results show that flanging heights of all three types of prefabricated holes exhibit increasing from the long axis to the short axis, and the difference in flap height between the long and short axis decreases from 2 mm to 0.75 mm as the preset height decreases from 15 mm to 10 mm and the fit of the flap parts to the mold gradually becomes better. There are obvious differences in the deformation of electromagnetic flanging parts in the long and short axis. Based on the principle of neutral layer invariance, the formula of prefabricated hole underestimates the electromagnetic flanging height when the side wall fits well with the mold. Better die gap fitness and uniform flanging height could be achieved by more uniform magnetic force density generated in deforming region.

KEY WORDS: 5182 aluminum alloy; electromagnetic forming; oblique hole flanging; forming quality

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51975202); 湖南省自然科学基金(2019JJ30005)

作者简介: 欧航(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车零部件电磁成形。

通讯作者: 李光耀(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源汽车制造、异种材料高效连接技术、汽车轻量化、冲击动力学。

轻量化是实现汽车制造及航空航天领域节能减排的关键技术路线。据统计,飞机机体减重和汽车的轻量化效果尤为明显,能够显著提升运载工具的续航里程,减少碳排放^[1]。高强度、轻质合金材料的应用是实现轻量化的重要思路之一^[2]。新型铝合金、钛合金、镁合金已成为提高承载构件能力极限的良好材料,在新一代运载工具中得到广泛应用,例如运载火箭大量的薄壁壳体零件拟采用铝、钛轻合金材料^[3]。

铝合金等轻质材料室温下成形塑性较差,微观裂纹产生并扩展,回弹控制难,因此,沿用传统的成形工艺将面临诸多难题^[4]。例如铝质方形深冲零件往往需要进行5次冲压,且必须采用中间退火工艺以尽可能消除加工硬化,产品质量控制难,成本较高,类似的问题还出现在大型壳体零件的局部特征成形中,如壁板上的异型翻边翻孔等,这些局部特征的成形效果受到材料成形性能和模具结构等因素的限制。

研究表明,提升材料变形速率,铝合金室温下的成形性能有显著的改善^[5-6]。Oliveira等^[7]开展了5系铝合金的电磁自由胀形和模具成形试验。相较于传统胀形试验,电磁成形结果表明,试验过程中板材达到的成形高度更大。Imbert等^[8]进行了铝合金材料电磁自由胀形和锥形模具成形两类工艺试验的对比,统计结果显示,变形材料和模具间的撞击和熨烫效应对材料成形效果有显著影响。Golovashchenko等^[9]以破裂位置的失效应变为主要指标,对比研究了电磁自由成形和V形凹模成形,研究成果进一步表明成形性的提高有板料与模具的高速撞击效应的贡献。正由于电磁成形在提升轻质合金室温成形性方面的显著优势,电磁成形技术在翻边翻孔工艺上的应用研究也引起了诸多研究学者的关注。于志达^[10]利用5系铝合金和QCr0.8铜合金板材进行磁脉冲翻边试验,探索了放电电压等工艺参数对样件翻边高度和减薄的影响。陈超军等^[11]开发了一种新型多层变匝数阶梯式线圈并进行了圆孔电磁翻边试验,其试验结果显示该创新设计有助于提高翻边高度。杨澍^[12]基于电磁成形技术开展了管件侧翻边试验,分析了线圈长度、放电电压等工艺参数对管件三通成形的影响,并采用作图法对预制孔设计进行了探索。Su等^[13]提出了结合磁脉冲翻边成形与磁脉冲校形的成形工序,以提升零件与模具的贴合效果,通过两步磁脉冲翻边实现大型钣金件局部圆孔翻边特征的成形。

当前电磁翻边研究多集中于工艺试验层面的圆孔翻边零件成形,并未对预制孔尺寸与翻边零件的成形质量之间的联系进行研究。文中拟采用运载工具中常用的5182铝合金材料,开展椭圆孔电磁翻边试验,验证电磁成形工艺在异形孔翻边当中应用的可行性。其次,建立准确的数值仿真模型,对电磁翻边过程中的材料变形行为进行研究,分析不同预制孔尺寸对翻边质量(轮廓和高度等)的影响,以此为电磁翻边工

艺研究提供理论指导和科学依据。

1 电磁翻边数值建模

1.1 力学性能及材料模型

试验材料为5182铝合金,厚度为1.2 mm。电磁成形过程中变形区域材料的应变率可达到 500 s^{-1} 以上,为探究变形速率对材料力学性能的影响,文中采用标准试样^[14]对材料进行了不同应变速率下($0.001\sim 800\text{ s}^{-1}$)的力学性能试验。材料中的各元素质量分数见表1。应力-应变曲线如图1所示。

表1 AA5182 铝合金成分(质量分数)
Tab.1 Composition of AA5182 aluminum alloy
(mass fraction) %

Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Cu	Al
4.0~5.0	0.4	0.018	0.3	0.10~0.15	0.15	余量

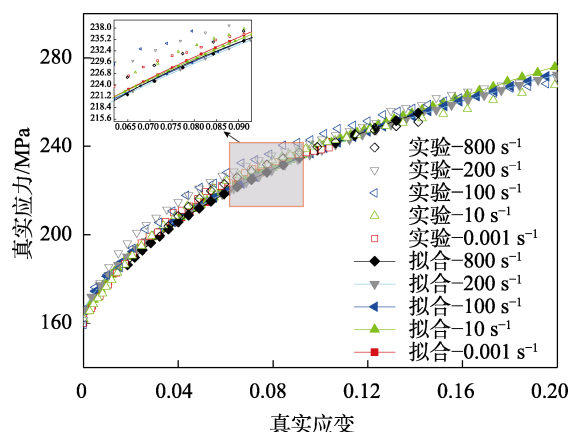


图1 AA5182 铝合金不同应变率下的力学性能曲线
Fig.1 Mechanical properties of AA5182 aluminum alloy under various strain rates

Johnson-Cook 模型^[15]常用于描述材料动态特性,模型中考虑了应变硬化、应变速率和温度3个因素的影响。电磁成形过程通常在毫秒级别内完成,瞬态温升的影响通常可忽略不计,因此,文中对材料模型进行了相应的简化,去掉了本构方程中的温度项。模型中待定系数则基于准静态和动态拉伸力学性能曲线进行拟合计算得到,准静态下的流动应力 A 为161.0769 MPa,硬化指数 B 为288.0241 MPa,硬化系数 n 为0.4225,代表应变率的系数 C 为-0.003 393。

1.2 仿真模型的建立

电磁成形过程中,板材变形速度极快,持续时间极短,难以对其过程进行记录和测量,因此专家学者多通过数值模拟的手段,对其变形过程进行研究。L'Eplattenier等^[16]开发了电磁(EM)模块来进行电磁和变形场的耦合模拟。在EM模块中,通过有限元分析(FEA)和边界元法(BEM)相结合的方式,解决

了电磁场计算与变形场计算之间的耦合问题。文中基于 LS-DYNA 软件中的 EM 模块，建立椭圆孔电磁翻边的数值模型，如图 2 所示。模型中主要包括凹模、压边圈、线圈和板坯。采用壳单元对凹模和压边圈进行划分并定义为刚体。根据 EM 模块的求解要求，板坯为实体单元，为保证厚度方向变形求解的准确性，在厚度方向上设置了 4 层网格。对从预制孔边缘向外 20 mm 的主要变形区域进行网格细化，椭圆圆周范围内均匀布置 360 个网格。文中设置 3 种预置高度(孔 1、孔 2、孔 3)，预计高度为 15，12.5，10 mm，对每种预制孔均采取相同网格细化分。

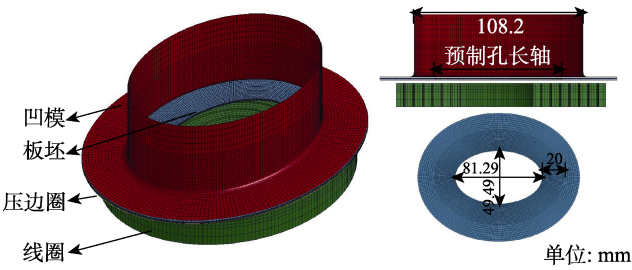


图 2 椭圆孔电磁翻边仿真模型
Fig. 2 Simulation model of oval hole flanging by EMF

线圈采用实体网格，将实验中通过罗氏线圈采集到的电流曲线作为激励源输入到线圈中，实现电磁场

的求解。11.5 kJ 放电能量下，实测电流峰值为 54 kA，频率 7.7 kHz。查阅文献^[17]得铝合金板坯及线圈的电导率为 $1.799 \times 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。凹模、压边圈与板坯的接触类型为 *CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE，摩擦因数设为 0.2。

2 结果与讨论

2.1 实验结果

电磁翻边试验电磁成形平台开展，平台包含脉冲发生器、同轴线缆及成形工装。其中脉冲发生器最大放电能量为 48 kJ，放电电压为 16 kV。成形工装如图 3 所示。椭圆形线圈由 6 系硬质铝合金线切割制成，其矩形截面尺寸为 5 mm×15 mm，匝间距为 1.5 mm。

图 4 所示为 3 种不同尺寸椭圆孔电磁翻边图，3 种椭圆孔成形能量均为 11.5 kJ。翻边样件外形上观察，翻边样件外形完整未破裂，与模具贴合良好。3 种椭圆孔长轴高度的对比如图 4d 所示，孔 1 翻边高度最高，孔 2 次之，而孔 3 翻边高度最小。椭圆孔电磁翻边试验结果表明电磁成形工艺具备应用于异形孔翻边的可行性。后续章节将研究放电能量以及其他参数对翻边质量的影响，并借助有限元仿真研究异形孔电磁翻边的变形规律。

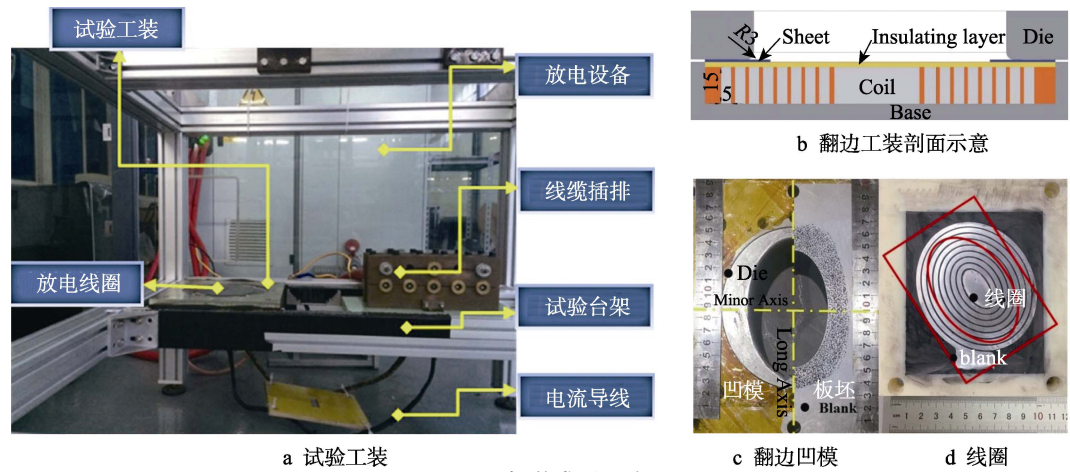


图 3 电磁成形平台
Fig.3 EMF setup

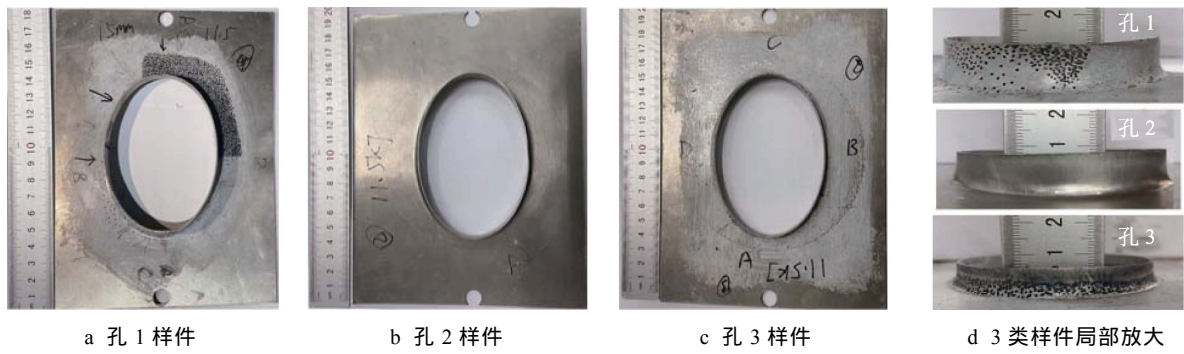


图 4 电磁翻边实验结果
Fig.4 Experimental results of EM flanging

文中选取孔 3 翻边样件进行显微硬度测试,以便从微观角度揭示电磁翻边过程中材料的变形程度。文

中的椭圆形(异形孔)翻边样品,选取翻边件长、短轴位置的材料进行制样,经研磨抛光的样品如图 5 所示。

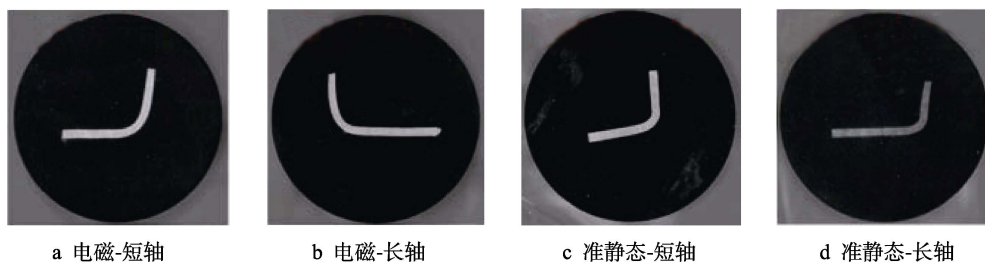


图 5 硬度测量试样

Fig.5 Specimens prepared for micro-hardness tests

文中采用 TUKON1102 维氏显微硬度计测量翻边件材料的硬度,分别在室温下进行 3 组重复性试验,测量过程中选取的保压载荷为 0.3 kg,保压时间为 15 s。电磁翻边件的每个金相制样件选取端部(1)、直臂(2)以及圆角区(3)进行硬度测量,在每个区域上作一条垂直弧线轮廓的截线,并在每条截线上取点进行硬度测量,每条截线上选择 6 个测量点,每个点之间的间隔为 0.15 mm。去除每一点的最大和最小硬度值,然后将其余 4 个数据点的平均值作为试样的硬度结果,如图 6 所示。硬度测试结果显示,短轴位置的硬度值由小到大依次为直臂区、端部和圆角区;而对于长轴位置,直臂区最小,端部最大,达到 84.2HV。3 个测试区域内,短轴硬度值均低于长轴的硬度值。硬度测试结果表明电磁翻边件在长、短轴处的变形存在着明显差异。

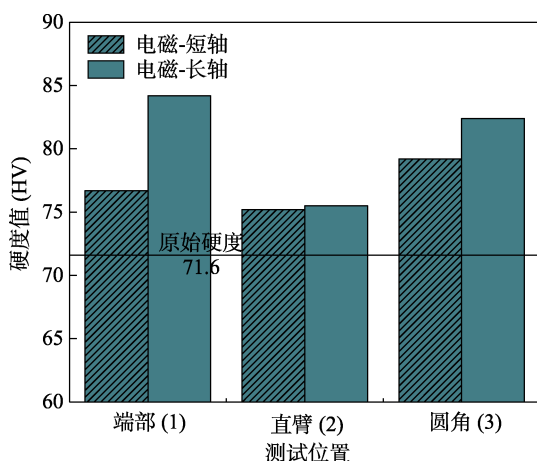


图 6 微观硬度测试结果

Fig.6 Results of micro-hardness tests

2.2 仿真结果与实验对标

为验证建立的仿真模型的准确性,本节选取的是孔 1(对应预置翻边高度 15 mm)放电能量为 11.5 kJ 的试验案例进行仿真对标。由图 7 可知,试验样件中,长短轴在翻边结束时刻的轮廓状态有明显差异,长轴端部有向法兰侧(即凹模直臂)弯曲接近的趋势,而

在短轴端部则可以观察到远离法兰侧的弯曲趋势。文中建立的仿真模型对轮廓的模拟得到了接近结果,在长轴位置,端部更靠近凹模直臂,而端部下方的翻边侧壁则有远离凹模的弯曲变形;在短轴位置,仿真模型预测到了端部远离凹模直臂的趋势。以上的轮廓分析结果表明文中建立的仿真模型能够较为准确地预测到翻边轮廓。

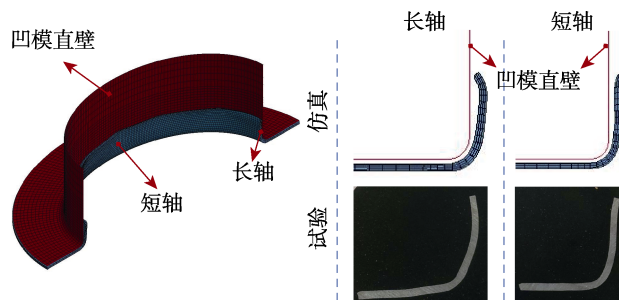


图 7 长、短轴处的翻边轮廓的仿真与试验对比

Fig.7 Comparison on numerical and experimental profiles at long and short axis

为进一步验证仿真计算的准确性,提取长轴到短轴范围内 5 个点(长轴端部对应点 1,短轴端部对应点 5)的翻边高度和端部厚度与试验样件的实测数值进行对比。如图 8 所示,对翻边试样的 5 个点进行

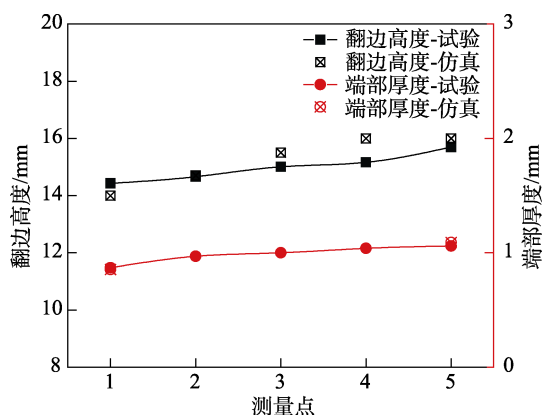


图 8 翻边高度和端部厚度的仿真与试验对比

Fig.8 Comparison on numerical and experimental flanging height and edge thickness

实测, 结果与仿真高度存在差异, 最大偏差为 5.5% (点 4), 偏差值仍在接受范围内。整体看, 从长轴到短轴翻边高度呈现不断增大的趋势, 仿真模型能够准确模拟得到该结果。对于端部厚度, 文中采用长轴和短轴两处实测值与仿真进行对比, 最大偏差为短轴处 2.8%, 偏差在可接受范围内, 综合以上的试验仿真对比分析, 可认为文中建立的仿真模型是准确可靠的, 后续用于分析的仿真数据是可信的。

2.3 不同预制孔尺寸下的翻边高度

文中根据塑性理论中的体积守恒以及几何中性层不变来推导预置高度与预制孔尺寸之间的关系^[18]。翻边工艺中试样变形过程及模具结构如图 9 所示, 模具几何尺寸及试样尺寸存在式 (1) 描述的关系; 随后根据中性层不变原理, 有式 (2) 和 (3), 结合式 (1—3), 可推导得到预置翻边高度与预制孔尺寸的关系 (式 (4))。

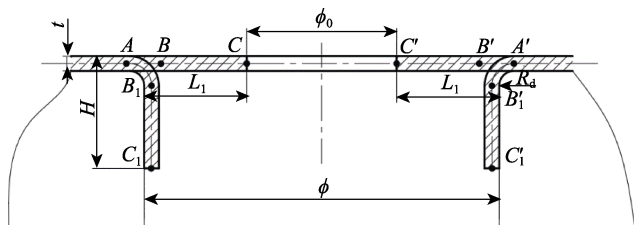


图 9 翻边预制孔设计原理

Fig.9 Design principal of prefabricated hole geometry in flanging process

$$\Phi - \Phi_0 = 2 \times (|AB| + |BC| - R_d) \quad (1)$$

$$|AB| = \widehat{AB_1} = \frac{1}{4} \pi \left(R_d + \frac{t}{2} \right) \quad (2)$$

$$|BC| = |B_1C_1| = H - t - R_d \quad (3)$$

$$\Phi_0 = \Phi - 2(H - t - R_d) - \frac{\pi}{2} \left(R_d + \frac{t}{2} \right) + 2R_d \quad (4)$$

式中: Φ_0 为预制孔尺寸; Φ 为模具尺寸 (文中模具长轴为 108.2 mm, 短轴为 74.6 mm); R_d 为翻边模具圆角; t 为翻边板料厚度; H 为预翻边高度。

基于上述公式求解, 可得 3 种预制孔对应在中性层不变条件下的预置高度为 15, 12.5, 10 mm。本节基于数值仿真结果, 分析不同预制孔尺寸对翻边高度的影响。如图 10 所示, 3 种类型的预制孔在电磁翻边后, 样品的高度分布趋势类似, 从长轴到短轴呈现出不断变大的趋势。孔 1 到孔 3 长短轴高度差分别为 2, 1.7, 0.75 mm, 随着预置高度和翻边高度的下降, 翻边样品长短轴高度也随之下降。此外, 如图 10 所示, 实际翻边高度对比依据中性层不变、各点变形一致等假设给出的预置高度值, 能够清晰反映椭圆孔翻边的不一致性。具体地, 翻边高度较大的孔 1 和孔 2, 在长轴附近翻边高度低于预置高度, 随后实际高度大

于预置高度, 随着翻边高度下降, 低于预置高度的区域逐渐减小, 而孔 1 则从长轴到短轴实际翻边高度均高于预置高度。

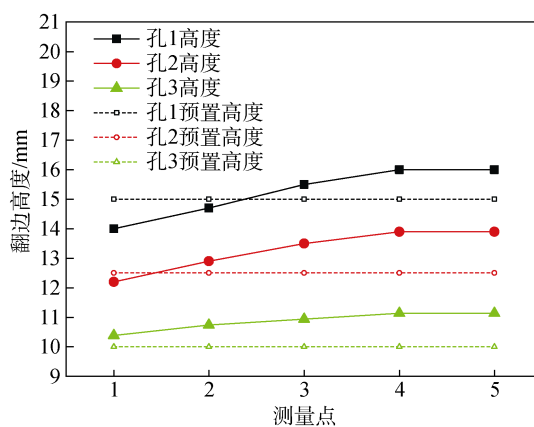


图 10 不同预制孔尺寸下的翻边高度

Fig.10 Flanging heights under various dimensions of prefabricated holes

2.4 不同预制孔尺寸下的翻边轮廓

2.2 节中基于孔 1 的案例, 从翻边轮廓、翻边高度和厚度等方面对仿真结果进行了验证。本节基于仿真模型, 分析不同预制孔尺寸下的电磁翻边轮廓。如图 11 所示, 从孔 1 到孔 3, 长轴的翻边轮廓与模具贴合程度逐渐提升, 在孔 1 中, 长轴端部存在明显弯曲, 孔 3 则表现为直臂轮廓, 孔 2 端部有明显的减薄现象; 对于短轴, 与模具贴合质量仍呈现孔 1 到孔 3 直臂范围逐渐提升的现象, 但差异较长轴处要小。

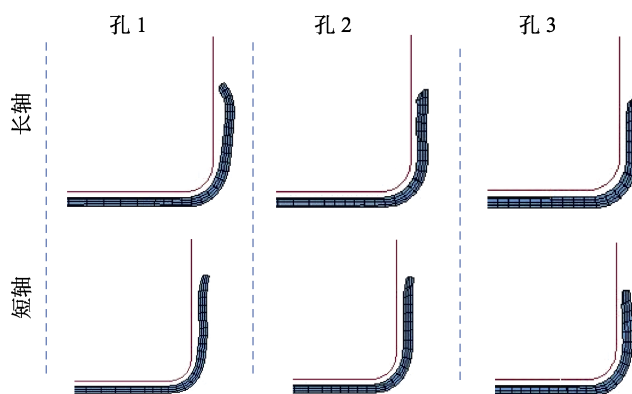


图 11 不同预制孔对应的翻边轮廓

Fig.11 Deformed profiles under various dimensions of prefabricated hole

根据上述对翻边样品轮廓的论述, 选取与模具贴合效果较差和较好的两组 (孔 1 和孔 3), 通过电磁翻边过程中磁压力在长、短轴处的分布状况来解释翻边件与模具贴合质量存在的差异。长短轴处的特征点分别以端部网格开始, 每隔 3 个网格选取一个进行电磁力密度输出, 如图 12 所示, 由于翻边高度不同, 特征点在 2 种预制孔的案例中位置也不相同, 对于孔

1, 长短轴处 D 点均位于圆角之上的变形区域内, 而孔 3, D 点已经位于压边法兰的弱变形区域。

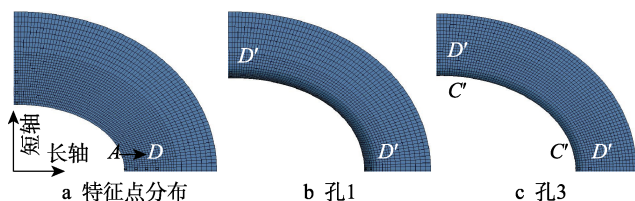


图 12 电磁力密度分析特征点分布

Fig.12 Typical points for the analysis of the magnetic force density

2 组预制孔长轴处的电磁力密度分布如图 13a 所示, 孔 3 在端部 A 点电磁力密度大于孔 1 的 A 点, 从右上角的局部放大图可观察到, 孔 3 上的其余 3 个特征点的数值均大于孔 1 上对应的测量点。短轴的电磁力密度分布在两组案例的趋势与长轴处的分布趋势相似 (如图 13b 所示), 但对比端部 A 点的数值可知, 孔 1 在长短轴处的电磁力密度差异大于孔 3。综合以上数据分析, 电磁力密度较小导致了孔 1 翻边特征与模具贴合效果较差, 端部因较大的电磁力密度, 使变形速度较大, 但是翻边臂上的其余点由于电磁力密度较小, 与模具贴合的效果不足; 此外, 孔 1 长短轴两处的端部 A 点电磁力密度差异过大则导致变形終了时, 长短轴的轮廓存在差异。

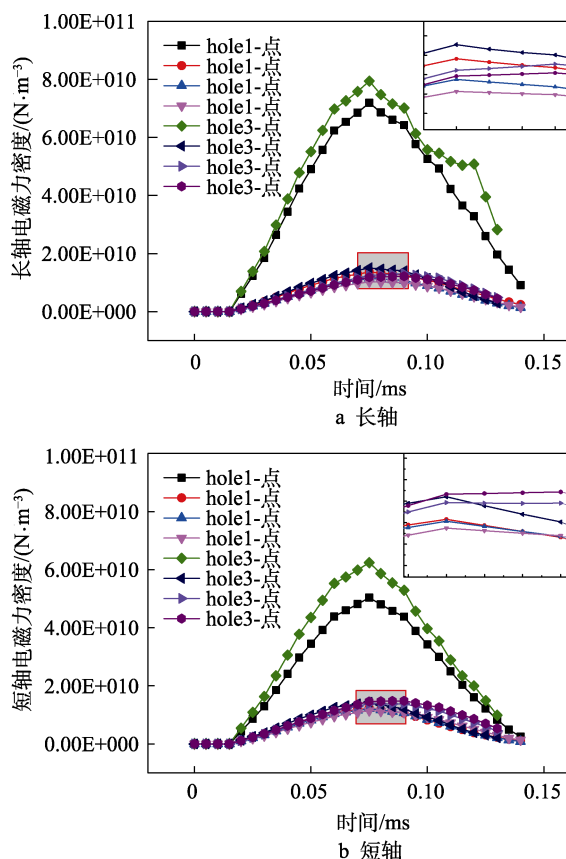


图 13 翻边样件特征点处的电磁力密度分布情况

Fig.13 Distributions of the magnetic force density

3 结语

1) 放电能量为 11.5 kJ, 电流峰值为 54 kA 时, 能够完成预置高度为 15 mm 的椭圆形孔电磁翻边; 硬度测试结果表明长短轴处的材料在电磁翻边过程中存在较大差异, 长轴端部硬度值最大, 达到 84.2HV。

2) 3 种预制孔的翻边高度均表现为从长轴到短轴逐渐增加的趋势; 随着预置高度的降低, 长短轴两处的翻边高度差由 2 mm 下降至 0.75 mm, 且逐渐避免端部弯曲等现象, 提升了与模具贴合的效果。

3) 基于中性层不变原理的预置高度计算与实际翻边高度存在偏差, 在侧壁垂直的翻边案例中低估了翻边高度。

参考文献:

- [1] 冯志超. 航空钛合金筒型件电磁校形技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019: 5—10.
FENG Zhi-chao. Research on Electromagnetic Sizing Technology of Aeronautical Titanium Alloy Cylindrical Parts[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019: 5—10.
- [2] JIANG Hao, ZENG Chao-chao, LI Guang-yao, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2020, 257: 113162.
- [3] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44—50.
JIANG Zhi-qiang, YANG He, ZHAN Mei, et al. State-of-the-Arts and Prospective of Manufacturing and Application of Titanium Alloy Tube in Aviation Industry[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 44—50.
- [4] 熊奇. 大尺寸铝合金板件电磁成形设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 4—9.
XIONG Qi. Design and Realization of Electromagnetic Forming for Large Scale Aluminum Alloy Sheet[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016: 4—9.
- [5] PSYK V, RISCH D, KINSEY B L, et al. Electromagnetic Forming-A Review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787—829.
- [6] BALANETHIRAM V S, DAEHN G S. Hyperplasticity: Increased Forming Limits at High Workpiece Velocity[J]. Scripta Metallurgica Et Materialia, 1994, 30(4): 515—520.
- [7] OLIEVIERA D A, WORSWICK M J, FINN M, et al. Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet: Free-Form and Cavity Fill Experiments and Model[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005,

- 170: 350—362.
- [8] IMBERT J M, WINKLER S L, WORSWICK M J, et al. The Effect of Tool/Sheet Interaction on Damage Evolution in Electromagnetic Forming of Al Alloy Sheet[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 127: 145—153.
- [9] GOLOVASHCHENKO S F. Material Formability and Coil Design in Electromagnetic Forming[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, 16: 314—320.
- [10] 于志达. 板材磁脉冲翻孔成形与变形规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 4—12.
YU Zhi-da. Experimental and Deformation Law of Magnetic Pulse Flanging of Sheet Metal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 4—12.
- [11] 陈超军. 铝合金板圆孔电磁翻边成形工艺数值模拟和实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019: 6—13.
CHEN Chao-jun. Numerical Simulation and Experimental Study on Electromagnetic Hole-Flanging Forming Process of Aluminum Alloy Sheet[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019: 6—13.
- [12] 杨澍. 管件磁脉冲侧翻边工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 6—10.
YANG Shu. Research on Technologies of Tube Magnetic Pulse Flanging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 6—10.
- [13] SU Hong-liang, HUANG Liang, LI Jian-jun, et al. Inhomogeneous Deformation Behaviors of Oblique Hole-Flanging Parts during Electromagnetic Forming[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 52: 1—11.
- [14] 毛云飞. AA5052 铝合金高速下本构及断裂模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 26—33.
MAO Yun-fei. Research on Constitutive Model and Ductile Fracture Criterion of AA5052 at High Work Piece Speed[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 26—33.
- [15] LI Guang-yao, DENG Hua-kun, MAO Yun-fei, et al. Study on AA5182 Aluminum Sheet Formability Using Combined Quasi-Static-Dynamic Tensile Processes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 373—386.
- [16] L'EPLATTENIER P, COOK G, ASHCRAFT C, et al. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations[J]. *Steel Research International*, 2009, 80(5): 351—358.
- [17] DENG Hua-kun, MAO Yun-fei, LI Guang-yao, et al. A Study of Electromagnetic Free Forming in AA5052 Using Digital Image Correlation Method and FE Analysis[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 37: 595—605.
- [18] YEH F H, WU M T, LI C T. Accurate Optimization of Blank Design in Stretch Flange Based on a Forward-Inverse Prediction Scheme[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2007, 47: 1854—1863.