

2195 铝锂合金非等厚壁板增量压弯成形工艺裂纹分析与结构优化

陈乐乐¹, 胡德友¹, 南康斌², 韩运奇², 娄淑梅², 初冠南³

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 山东科技大学 智能装备学院, 山东 泰安 271019;

3. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 针对 2195 铝锂合金非等厚壁板增量压弯成形过程中, 在凸台、孔洞与筋条三者交汇处出现的裂纹, 通过 ABAQUS 进行有限元分析, 确定开裂原因为剪切力引起的剪切变形, 并且由于断裂位置处的应力状态为三向拉应力, 从而加速了壁板的断裂。根据模拟结果及生产条件, 提出通过坯料凸台过渡处蒙皮的厚度渐变来缓解过大的厚度差异带来的应力分布不均和剪切塑性变形, 增强该区域的结构强度和稳定性, 进而降低因应力集中而导致的断裂风险。利用 ABAQUS 对优化方案进行有限元分析, 发现优化后的 Mises 等效应力、正应力和剪切应力的分布更为均匀, 优化后原裂纹位置处的应力明显减小, 材料的抗裂性能得到了有效提升, 可以加工出满足要求的产品。

关键词: 2195 铝锂合金; 非等厚壁板; 增量压弯成形; 裂纹; 应力集中

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.009

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 07-0067-07

Crack analysis and structural optimization on incremental press bending process for non-uniform thickness plate of 2195 aluminum-lithium alloy

Chen Lele¹, Hu Deyou¹, Nan Kangbin², Han Yunqi², Lou Shumei², Chu Guannan³

(1. Tianjin Aerospace Long March Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. Department of Intelligent Equipment, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: For the cracks occurred at the intersection of bosses, holes and ribs in the incremental press bending process for non-uniform thickness plate of 2195 aluminum-lithium alloy, the finite element analysis was performed by ABAQUS, and it was determined that these cracks were generated by the shear deformation caused by shear force and the stress state at the fracture location was triaxial tensile stress, which accelerated the fracture of the plate. Then, based on the simulation results and production conditions, it was proposed to alleviate the uneven stress distribution and the shear plastic deformation caused by excessive thickness differences through a gradual thickness transition in skin at the blank boss interface, which enhanced the structural strength and stability of this area and reduced the fracture risk caused by stress concentration. Furthermore, the optimized scheme was subjected to finite element analysis by ABAQUS. The results show that the distributions of Mises equivalent stress, normal stress and shear stress after optimization are more uniform. The stress at the original crack location is significantly reduced, the crack resistance of the material is effectively improved, and the products meeting the requirements are processed.

Key words: 2195 aluminum-lithium alloy; non-uniform thickness plate; incremental press bending; crack; stress concentration

增量压弯成形是利用专用压力机驱动压头, 在整体壁板表面上按照预定路径分段逐点实施局部三点弯曲变形, 通过逐点变形的累积效果, 最终使整个壁板表面弯曲成所需的单曲率或多曲率的型面^[1-4]。其基本原理是通过一系列渐进的局部变形

来实现整体结构的塑性变形。

增量压弯成形工艺的优势在于能够生产具有大变形量和复杂结构的整体壁板; 使用专用模具可以实现曲率的连续变化; 此外, 该工艺相对简单, 成本较低。然而, 这项技术也存在一些缺点, 例如在分部位成形时, 压线处可能会出现应力集中现象^[5-7], 导致材料在成形过程中容易失稳甚至断裂。因此, 研究不同工艺对压弯成形大型网格壁板的影响及其工艺优化, 对于提升壁板压弯成形质量具有重要的理论与实际意义^[8-12]。

收稿日期: 2024-12-15; **修订日期:** 2025-03-20

作者简介: 陈乐乐 (1986-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: chenlele86@126.com

通信作者: 娄淑梅 (1979-), 女, 博士, 教授

E-mail: msl7119@163.com

新型铝锂合金具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度高、疲劳裂纹扩展速率低和低温性能好等优点，是航空航天领域最理想的结构材料，具有广泛的应用前景^[13-14]。在室温条件下铝合金存在成形性较差、易破裂、易回弹等缺陷^[15-16]，铝锂合金壁板结构与常规铝合金壁板相比更容易出现这些缺陷。因此，在铝锂合金壁板增量压弯工艺中更需要采取措施，尽量避免这些失效情况的发生^[17]。

本文针对 2195 铝锂合金非等厚壁板增量压弯加工中，在凸台、孔洞与筋条三者交汇处出现的裂纹，通过 ABAQUS 进行仿真，分析裂纹产生的原因，提出了壁板坯料厚区厚度阶梯变化的结构优化方案，并通过仿真分析和实际压弯验证了这一优化方案的有效性，确保了 2195 铝锂合金非等厚壁板增量压弯工艺的可行性和生产效率。

1 成形工艺和工况分析

采用三点增量压弯成形技术成形 2195 铝锂合金非等厚壁板。壁板的外廓尺寸为 1183 mm×685 mm×18 mm，蒙皮与凸台的厚度差为 15.9 mm；凹模间距为 200 mm，y 轴正方向（图 1a）为下压方向，蒙皮内表面目标半径为 2496 mm。在该壁板压弯生产过程中出现了裂纹（图 1b 和图 1c）。裂纹发生位置如图 1a 所示，裂纹面大致与板的底面平行，基本分布在蒙皮与筋条的交汇处。

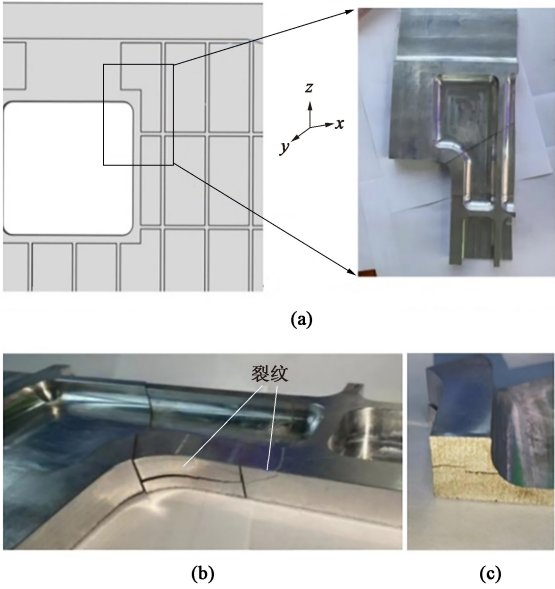


图 1 裂纹的位置 (a)、形貌 (b) 和剖面 (c)
Fig. 1 Location (a), morphology (b) and section (c) of cracks

2 拉伸试验和有限元模拟

为了分析壁板产生裂纹的原因，采用 ABAQUS 软件分析该非等厚壁板的压弯成形过程。

2.1 材料属性

对 2195 铝锂合金进行常温单轴拉伸试验，通过式 (1) 和式 (2) 将应力-应变曲线转化得到了真实应力-真实应变曲线，如图 2 所示，相关材料参数见表 1。

$$\sigma = \sigma_{com}(1 + \varepsilon_{com}) \tag{1}$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{com}) \tag{2}$$

式中： σ 为真实应力； ε 为真实应变； σ_{com} 为名义应力； ε_{com} 为名义应变。

2.2 仿真模型

根据三点增量压弯工艺中每一步凸模和凹模的位置，采用三维建模软件Solidworks进行壁板和模

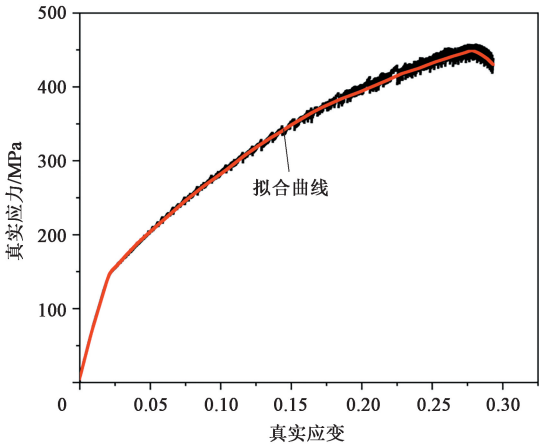


图 2 2195 铝锂合金的真实应力-真实应变曲线
Fig. 2 True stress-true strain curve of 2195 aluminum-lithium alloy

表 1 2195 铝锂合金板料的力学性能参数
Table 1 Mechanical performance parameters of 2195 aluminum-lithium alloy plate

参数	弹性模量/ GPa	密度/ (g · cm ⁻³)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	泊松比
数值	76	2.72	150	450	0.33

具建模，然后将装配好的模型导入 ABAQUS 软件中，完成模型设置。

由于工艺中裂纹位置主要出现在方形厚区或者厚区与薄区的交界处，所以，取方形凸台附近的压弯步进行结果分析，凸模下压量取 3 mm。方形凸台

附近压弯步的凸凹模位置及坯料三维模型如图3所示, 两凸台与蒙皮的厚度差为15.9 mm。

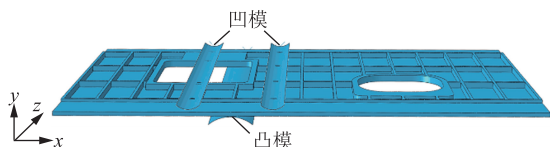


图3 三维仿真模型

Fig. 3 3D simulation model

采用 C3D8R (8 节点线性六面体减缩积分单元) 结构网格, 将整个壁板划分为 87654 个网格单元; 凹模、凸模设置为离散刚体, 单元类型为 R3D4。模型网格如图4所示。

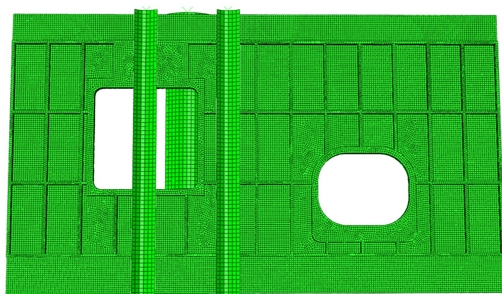


图4 模型网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model grid

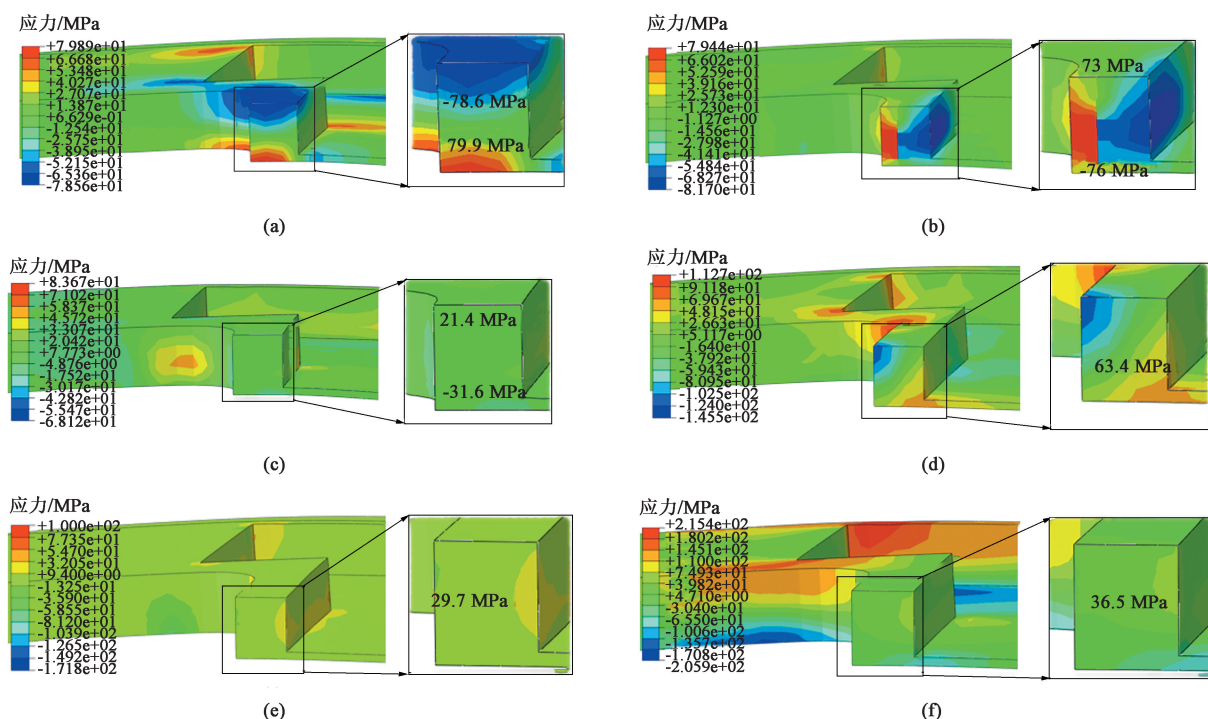


图5 裂纹切面处应力分布

(a) τ_{xz} (b) τ_{xy} (c) τ_{yz} (d) σ_x (e) σ_y (f) σ_z

Fig. 5 Stress distributions at cross-section of crack

3 仿真结果分析

3.1 原始模型裂纹成因及应力值

模型的裂纹位于凸台、孔洞与筋条三者交汇处, 见图1。从图5a、图5b和图5c中发现, 压弯试验中裂纹位置附近 yz 面 (图5a所示截面) 的上下、左右两组剪切力均相反, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 分别为材料的6个应力分量, τ_{xz} 分别为79.9和-78.6 MPa, τ_{xy} 分别为73和-76 MPa, 越靠近表面, 应力值越大, τ_{yz} 分别为21.4和-31.6 MPa。本文为了横向比较结构优化前后剪切力的改变, 压下量取3 mm, 切应力数值不大, 但裂纹附近符号相反的剪切力较其他部位有明显的应力集中, 足以证明此处在下压量逐步变大会率先产生剪切塑性变形, 使材料最早产生裂纹。另外, 在图5d、图5e和图5f中可以看出, 此处单元对应的正应力均为拉应力。在材料的滑移面上, 由于剪切滑移容易产生显微剪切缺陷, 如果此时滑移面上作用拉应力, 会进一步促使金属滑移面彼此分离, 加快在塑性变形中的损伤, 加速破坏和断裂, 其原理如图6所示。在后续的增量压弯中, 剪切力持续增大时, 剪应力的集中和三向拉应力的协同作用最终导致了裂纹的产生。

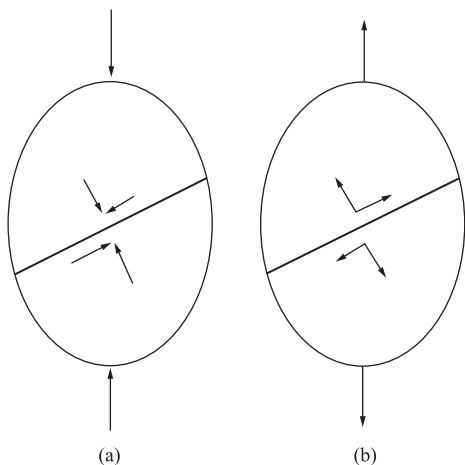


图 6 滑移面上受压应力 (a) 和拉应力 (b) 示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of compressive stress (a) and tensile stress (b) on slip surface

3.2 结构优化方案仿真分析

3.2.1 结构优化方案

凸台与蒙皮交界处的剪切应力集中问题比较严重, 经分析可通过增加凸台过渡处蒙皮的厚度来解决, 见图 7。图 7 中的数字表示蒙皮与凸台的厚度差 (例如: 数字“3”表示该区域蒙皮与凸台的厚度差

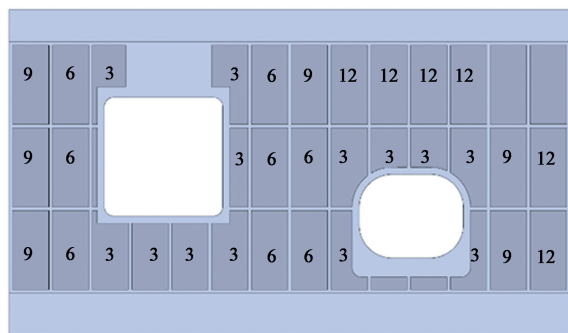


图 7 结构优化方案简图

Fig. 7 Simplified diagram of structure optimization scheme

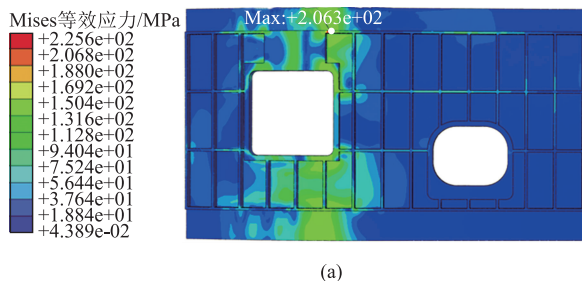
为 3 mm); 未标数字处表示蒙皮厚度没有发生变化, 为初始的厚度差值 15.9 mm。

3.2.2 结构优化方案仿真实验

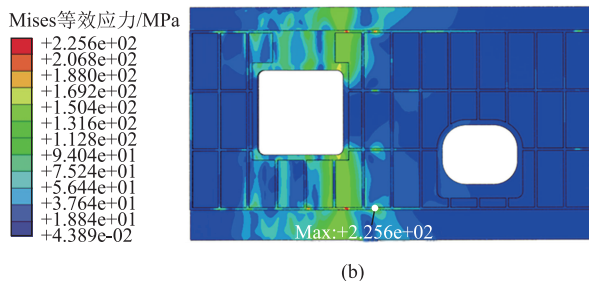
对优化前后断裂位置处的应力进行对比分析。

(1) Mises 等效应力

优化前后的最大 Mises 等效应力分别为 206.3 和 225.6 MPa, 如图 8 所示。虽然优化后的最大 Mises 等效应力因厚区宽度增加, 相较于优化前有所增大, 并分布在筋条与蒙皮的交界处, 但应力集中情况有明显改善, 应力分布更加均匀。



(a)



(b)

图 8 优化前后 Mises 等效应力对比

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 8 Comparison of Mises equivalent stress before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

(2) z 轴正应力 σ_z

优化前后的最大 σ_z 值分别为 215.4 和 209.2 MPa, 如图 9 所示。优化后, σ_z 略有减小, 应力集中现象也有所改善。优化前在同一表面上存在拉压应力交替现象, 意味着该表面存在较大的应力梯度, 这种情况下, 应力集中的区域更容易产生裂纹, 从而导致材料的早期失效; 优化后应力分布梯度有明显改善, 因此, 材料的成形性能得到极大改善。

(3) 剪切应力 τ_{xz}

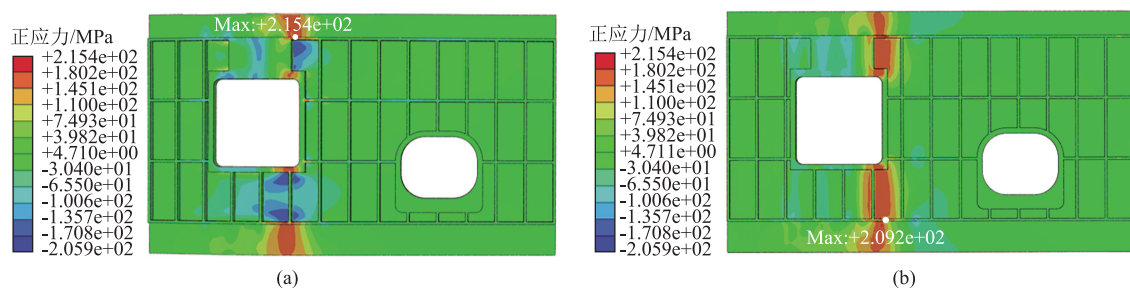
优化前的最大 τ_{xz} 值为 79.89 MPa, 而经过优化这一数值降至 66.3 MPa, 如图 10 所示。尽管剪切

应力的主要集中区域依然位于筋条与蒙皮之间以及凸台与蒙皮之间的交界处, 但应力集中的状况已得到显著改善。

此外, 与正应力 σ_z 的情况相似, 优化后的应力分布情况也得到了显著的改善, 分布更加均匀, 有效减少了在该区域内出现裂纹的风险, 提高了材料的加工性能。

(4) 塑性应变

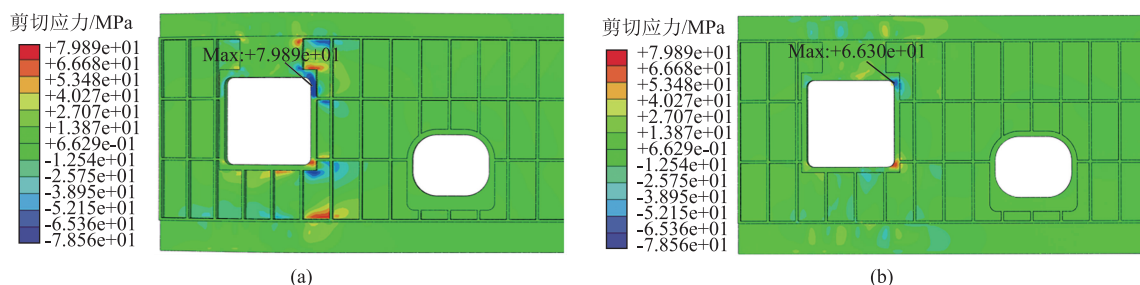
优化前后最大塑性应变分别为 0.028 和 0.065, 如图 11 所示。优化后, 塑性应变积累有所增大, 且应变分布更加均匀, 改善了成形效果。

图 9 优化前后 σ_z 对比

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 9 Comparison of σ_z before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

图 10 优化前后 τ_{xz} 对比

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 10 Comparison of τ_{xz} before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

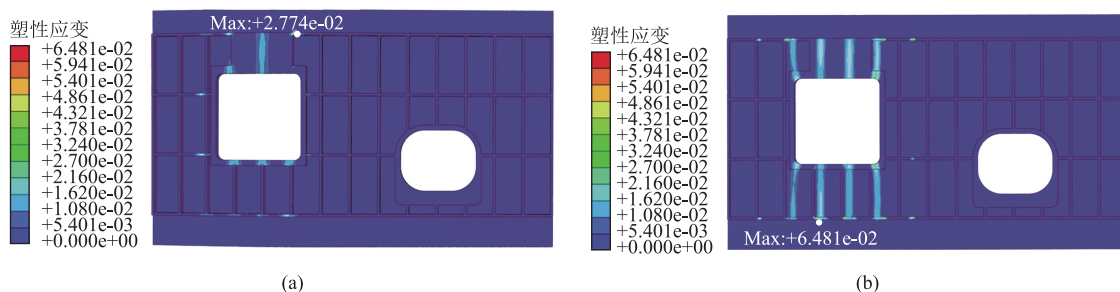


图 11 优化前后塑性应变对比

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 11 Comparison of plastic strain before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

3.2.3 优化后原断裂处应力分析

分别对比优化前后模型断裂位置处的各种应力分布 (图 5、图 12), 发现 σ_x 由 63.4 MPa 下降至 23.5 MPa、 σ_y 由 29.7 MPa 下降至 1.1 MPa、 σ_z 由 36.5 MPa 下降至 11.7 MPa、 τ_{xz} 由 79.9 和 -78.6 MPa 下降至 36.5 和 -40.7 MPa、 τ_{xy} 由 73 和 -76 MPa 下降至 24.3 和 -21.3 MPa、 τ_{yz} 由 21.4 和 -31.6 MPa 下降至 6.9 和 -5.1 MPa。各应力均大幅度降低, 可以得出此次优化对产品断裂位置处的加强效果

显著。

根据优结构化方案, 进行实际压弯加工, 加工过程中未出现裂纹, 如图 13 所示, 表明其压弯抗裂性能得到了有效提升。最终根据优化方案成形并经后期局部铣削, 加工出合格产品。

4 结论

(1) 对于原始模型裂纹的产生, 经模拟分析认

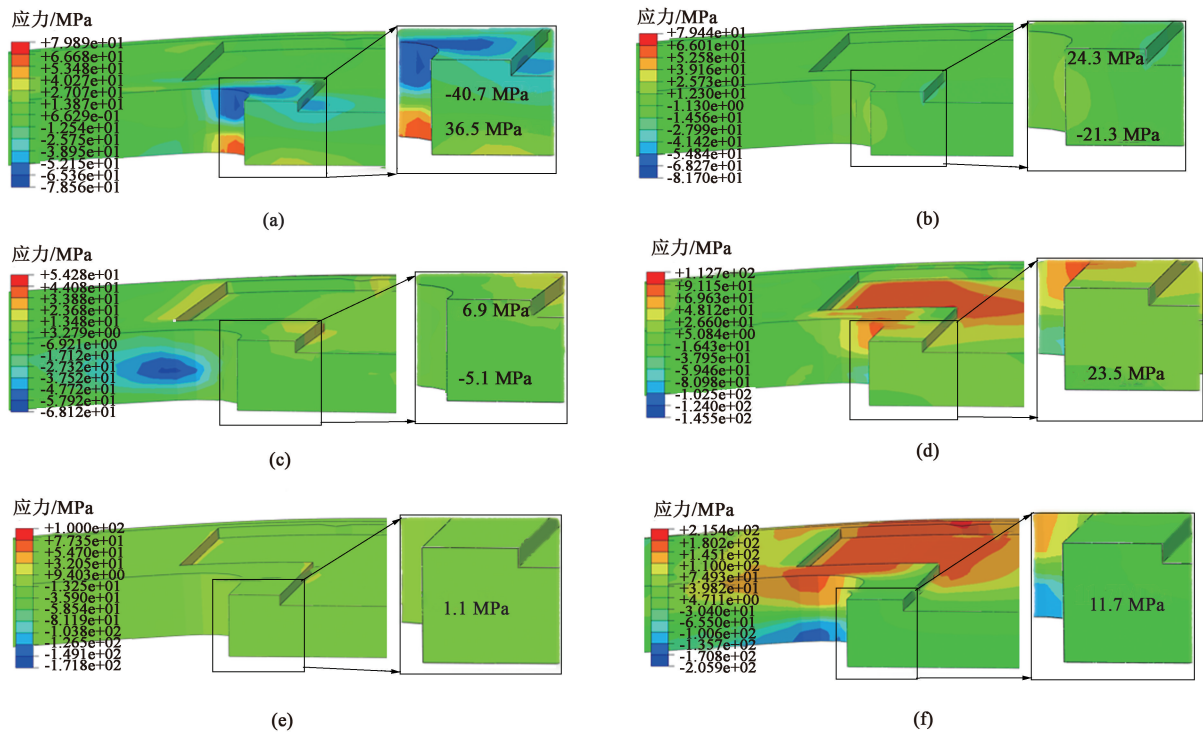


图 12 优化后原断裂位置处的应力分布

(a) τ_{xz} (b) τ_{xy} (c) τ_{yx} (d) σ_x (e) σ_y (f) σ_z

Fig. 12 Stress distributions at original fracture location after optimization

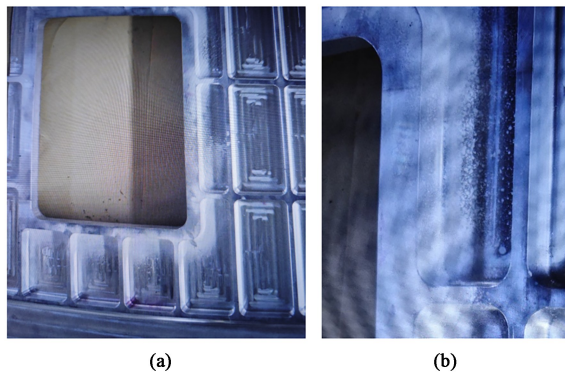
图 13 优化后的合格产品
(a) 孔洞位置 (b) 原裂纹位置

Fig. 13 Qualified product after optimization

(a) Location of hole (b) Location of original crack

为是厚度变化处的剪切应力集中引起了剪切塑性变形,且断裂位置三向受拉,促进剪切面金属裂纹扩展,加速了壁板的破坏和断裂。

(2) 通过减小凸台过渡处的厚度差来缓解厚度差异带来的应力分布不均问题,从而增强了该区域的压弯加工性能,生产出合格产品。

参考文献:

[1] 申世军,倪勇军,齐海雁,等. 2219 铝锂合金网格壁板增量

成形有限元仿真 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (2): 71-75.

Shen S J, Ni Y J, Qi H Y, et al. Finite element simulation of incremental forming for 2219 aluminium integrally stiffened panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (2): 71-75.

[2] 李卫东,万敏,阎显. 整体壁板压弯成形中性层及回弹解析 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (5): 156-161.

Li W D, Wan M, Yan Y. Neutral layer and springback analysis in press bend forming of aircraft integral panels [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (5): 156-161.

[3] Yan Y, Wan M, Wang H. FEM equivalent model for press bend forming of aircraft integral panel [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: 414-421.

[4] 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 (6): 809-815.

Lai S B, Yu D Y, Chen T X. Plastic equivalent model for integrally stiffened panel in bending forming [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33 (6): 809-815.

[5] Yan Y, Wang H B, Wan M. Prediction of stiffener buckling in press bend forming of integral panels [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (11): 2459-2465.

[6] Yan Y, Wang H B, Wan M. Prediction of fracture in press bend forming of aluminum alloy high-stiffener integral panels [J]. Computational Materials Science, 2011, 50 (7):

- 2232-2244.
- [7] 张敏, 田锡天, 李波. 整体壁板压弯成形的形状控制 [J]. 航空学报, 2020, 41 (7): 66-77.
Zhang M, Tian X T, Li B. Shape control for press bend forming of integral panels [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41 (7): 66-77.
- [8] 王忠堂, 吴凯琦, 张宏亮, 等. AZ31 镁合金网格式壁板级进压弯成形试验研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (3): 88-91.
Wang Z T, Wu K Q, Zhang H L, et al. Experimental study on progressive compression bending of AZ31 magnesium alloy grid panel [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (3): 88-91.
- [9] 刘相柱, 陈沛, 刘晓, 等. 航天器 X 型整体壁板加工变形控制技术 [J]. 机械科学与技术, 2023, 42 (2): 223-230.
Liu X Z, Chen P, Liu X, et al. Study on deformation control technology of X-shape integral panel for spacecraft [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42 (2): 223-230.
- [10] 乐晨, 曹昱, 杨帆, 等. 基于 Abaqus 的等边三角形网格加筋壳建模分析方法及试验验证研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2019 (2): 12-16.
Le C, Cao Y, Yang F, et al. The analysis method and experimental verification of isogrid stiffened shell based on Abaqus [J]. Missiles and Space Vehicles, 2019 (2): 12-16.
- [11] Muñoz C Leon, Kohlgrüber D, Langrand B. Analysis of fuselage skin reinforcements with beam element models in flexible aircraft panels for ditching simulations [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1024 (1): 012054.
- [12] Boitsov V B, Gavva M L, Endogur I A, et al. Stress-strain state and buckling problems of structurally-anisotropic aircraft panels made of composite materials in view of production technology [J]. Russian Aeronautics, 2018, 61 (4): 524-532.
- [13] 章润喆, 马云龙, 刘丹阳, 等. 2195 铝锂合金力学性能和组织与冷热变形过程的相关性 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (2): 129-136.
Zhang R Z, Ma Y L, Liu D Y, et al. Dependence of mechanical properties and microstructures of 2195 Al-Li alloy on cold and hot deformation process [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (2): 129-136.
- [14] 马雪菲, 王赫男, 鄂顺, 等. 化学转化处理时间对 2198 铝锂合金硝酸铈转化膜耐腐蚀性的影响 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (11): 1477-1485.
Ma X F, Wang H N, E S, et al. Corrosion resistance of $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ conversion film on 2198 Al-Li alloy with different chemical conversion time [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (11): 1477-1485.
- [15] 王文波, 闫亮明, 胡强, 等. 冷却预处理对 7055 铝合金板材组织与晶间腐蚀性能的影响 [J]. 稀有金属, 2024, 48 (10): 1378-1387.
Wang W B, Yan L M, Hu Q, et al. Microstructures and intergranular corrosion properties of 7055 alloy plate with cooling pretreatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48 (10): 1378-1387.
- [16] 甘国强, 李萍, 薛克敏. 汽车件高强铝合金板件热冲压工艺研究进展 [J]. 稀有金属, 2024, 48 (4): 564-574.
Gan G Q, Li P, Xue K M. Research progress on hot stamping process of high strength aluminum alloy plates for automotive parts [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48 (4): 564-574.
- [17] 张景新, 郭沛欣, 白杰. 先进铝锂合金机身壁板结构承载能力研究 [J]. 航空科学技术, 2013 (3): 23-26.
Zhang J X, Guo P X, Bai J. Strength evaluation of advanced aluminum-lithium fuselage panels [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013 (3): 23-26.

(上接第 49 页)

- Zhang K M, Qin C, She J, et al. Simultaneous improvement of strength and plasticity of closed forging extruded magnesium alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (9): 2866-2876.
- [12] 刘俊杰, 段兴旺, 刘宝胜. 基于 DEFORM-3D 的镁合金齿轮热锻成形工艺优化 [J]. 太原科技大学学报, 2023, 44 (4): 334-338.
Liu J J, Duan X W, Liu B S. Optimization of hot forging process for magnesium alloy gears based on DEFORM-3D [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2023, 44 (4): 334-338.
- [13] 李柱锦. AZ80-Ce 镁合金热锻可行性及其组织演化机理 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
Li Z J. Feasibility and Microstructure Evolution Mechanism of Hot Forging AZ80 Ce Magnesium Alloy [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [14] 王智勇, 王小刚, 刘涛, 等. 航空用 ZK61M 镁合金锻件成形工艺模拟及试验验证 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57 (5): 85-89.
Wang Z Y, Wang X G, Liu T, et al. Simulation and experimental verification of forming process for ZK61M magnesium alloy forgings used in aviation [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57 (5): 85-89.
- [15] 董含武, 叶小舟, 罗素琴, 等. 预制锭无熔剂重熔对 ZM6 镁合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (5): 641-646.
Dong H W, Ye X Z, Luo S Q, et al. The effect of flux free remelting of prefabricated ingots on the microstructure and properties of ZM6 magnesium alloy [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2024, 44 (5): 641-646.