

# 变曲率网格式镁合金壁板级进压弯成形数值模拟及实验研究

王忠堂, 李艳娟, 柳泉, 梁海成, 杨君宝, 刘永哲

(沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:**采用数值模拟方法研究了网格式镁合金壁板变曲率级进压弯成形工艺曲率半径的变化规律。完成了实验研究工作, 获得了几种规格的变曲率网格式镁合金壁板部件, 壁板曲率半径范围为 205.67~72.56 mm。确定了合适的变曲率网格式镁合金壁板级进压弯成形工艺参数。结果表明, 壁板部件曲率半径与压下高度有关, 随着压下高度增大, 壁板曲率半径随之减小。随着压下高度增大, 模拟结果与实验结果的绝对偏差减小, 相对误差随之增大。随着壁板曲率半径增大, 绝对偏差随之增大, 相对误差随之减小。对于镁合金变曲率内网格式壁板, 壁板曲率半径模拟值与实验值的最大相对误差为 5.22%。对于镁合金变曲率外网格式壁板, 壁板曲率半径模拟值与实验值的最大相对误差为 5.51%。采用母线直线度方法来评价镁合金壁板蒙皮表面内凹缺陷程度, 随着壁板曲率半径减小, 母线直线度偏差随之增大, 母线直线度系数随之增大。当壁板曲率半径为 72.56 mm 时, 母线直线度偏差最大值为 0.083 mm, 对应母线直线度系数最大值为 0.237%。

**关键词:** 镁合金; 网格式壁板; 变曲率; 级进压弯成形

**中图分类号:** TG301

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)11-3217-07

整体壁板是航空航天飞行器上非常重要的大型壳体部件。目前常用的整体壁板材料有高强度铝合金和钛合金。由于铝、钛轻金属资源逐年减少, 亟待开发新型材料替代高强度铝合金和钛合金材料, 以满足航空航天领域对大型壁板部件的需求。金属镁的资源优于铝和钛, 镁合金材料的刚度、强度、密度等一些物理性能指标正符合航空航天装备中壁板部件所需要的重要性能指标。因此, 镁合金材料将是未来航天器中的重要应用材料之一。

Livi 等<sup>[1]</sup>提出了一种用于制造机身蒙皮面板桁条的方法, 制造出具有复合层压桁条的复合层压材料的机身面板, 桁条中的树脂与形成外壳的层压材料的金属层之间的树脂同时固化。Sikulskiy 等<sup>[2]</sup>采用数值模拟方法研究了加筋整体壁板的板肋局部成形过程中材料流动规律, 确定了合适的成形工艺参数。He 等<sup>[3]</sup>提出了一种钛合金飞机蒙皮冷拉伸成形的优化方法, 确定了合理工艺参数, 有效地减少了回弹量, 提高了零件形状精度。王磊等<sup>[4]</sup>研究了某型号飞机腹板构件较早发生筋条疲劳破坏的原因, 提出了改进措施, 降低了筋条应力水平, 提高了腹板构件的疲劳寿命。薛克敏等<sup>[5]</sup>研究发现, 高温

钛合金网格式壁板在电脉冲辅助压弯成形时, 随着筋条高度的增加, 整体壁板失稳屈曲程度越来越大, 筋条失稳时所需的临界载荷越小, 筋条的稳定性越差; 此外, 纵向筋条间距增大, 筋条稳定性越差, 筋条失稳屈曲也越严重。李焯琪等<sup>[6]</sup>提出了一种离散填料辅助滚弯成形方法, 并且应用在铝合金整体壁板滚弯成形工艺中, 分析了填料数量、上下垫板厚度等因素对筋条屈曲与失稳的影响规律, 确定了合适的填料数量和垫板厚度等重要参数。刘纯国等<sup>[7]</sup>研究了铝合金整体壁板多点成形时存在的失稳和断裂缺陷形式, 采用多道次成形方式有效控制了筋条断裂和失稳缺陷的产生, 并确定了单筋条多点压弯成形时的极限弯曲曲率半径。邹方利等<sup>[8]</sup>研究了 2024 铝合金整体壁板电磁成形时材料流动规律, 分析了电磁成形工艺参数及边界条件对铝合金壁板部件质量的影响, 确定了合适的电磁成形工艺参数。Park 等<sup>[9]</sup>介绍了镁合金汽车仪表盘冲压成形技术的相关重要技术, 在变形温度 250~300 °C 时, 成功加工出了镁合金仪表盘部件。Shin<sup>[10]</sup>分析了采用镁合金发动机罩面板替代钢或铝合金的可行性, 确定了发动机罩内板和加强件的尺寸及形状, 与钢板相比, 镁合金发动机罩面板具有更高的抗

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2023JH2/101300214)

作者简介: 王忠堂, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159, 电话: 024-24680841, E-mail: ztwang@imr.ac.cn

凹陷性能。Kishimoto 等<sup>[11]</sup>确定了镁合金管无模拉拔成形工艺参数, 评估了材料晶体取向与外表面粗糙度的内在联系。Shi 等<sup>[12]</sup>研究了 AZ31 镁合金空心三通道接头热挤压成形技术, 确定了合适的成形工艺参数。苏辉等<sup>[13]</sup>研究发现, 对于 AZ31 镁合金轴向拉伸-压缩变形时, 轴向拉伸变形初期以基面滑移系为主, 屈服应力较高; 随着变形程度增大, 棱柱面滑移成为主导变形机制, 应变硬化率降低。李振亮等<sup>[14]</sup>研究发现 AZ80 镁合金在铸态、均质化处理态和塑性变形态的晶粒尺寸逐渐减小, 材料塑性和强度得到提高, 出现了典型的基面织构。严侃等<sup>[15]</sup>采用周向剪切挤压变形方法制备了细晶镁合金, 晶粒尺寸达到 3.2 μm。杨泽明等<sup>[16]</sup>基于数字化工艺设计和有限元仿真技术相结合设计了某大型客机蒙皮零件精确拉伸成形技术方案, 获得了合格的加工零件。李昊等<sup>[17]</sup>研究发现 Mg-1Gd-0.75Er-0.5Zn-0.18Zr 镁合金经过热挤压后, 动态再结晶机制为连续动态再结晶机制, 合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率得到明显提升。李亚琴等<sup>[18]</sup>研究发现差热—等通道转角挤压工艺对 Mg-5Sn-2Zn-0.5Zr 镁合金微观组织具有明显影响, 镁合金晶粒得到明显细化, 第二相呈弥散分布且显著细化。安治国等<sup>[19]</sup>采用单点渐进成形方法实现了 AZ31B 镁合金翻边成形工序, 确定了合适的成形工艺参数。肖罡等<sup>[20]</sup>研究发现镁合金的断裂失效机制为微裂纹的形核和穿晶扩展引起的, 微裂纹优先在剧烈变形区和孪晶交叉的晶界处形核, 然后沿与拉伸载荷夹角 45° 的方向扩展, 直至贯穿多个晶粒。

以上研究工作涉及镁合金塑性成形工艺方法及特征、工艺参数确定、微观组织演变规律等内容, 但未涉及镁合金整体壁板塑性成形方面研究工作。以上相关研究成果对于确定镁合金整体壁板压弯成形工艺参数、材料性能参数、数值模拟几何模型等研究工作提供重要参考作用。本文采用数值模拟方法和实验研究方法研究压弯成形工艺参数对变曲率网格式镁合金壁板曲率半径的影响规律, 探索镁合金壁板蒙皮表面内凹缺陷程度评价方法, 完善变曲率网格式镁合金壁板压弯成形应用基础理论。

### 1 变曲率壁板级进压弯成形工艺特征

镁合金壁板级进压弯成形工艺原理如图 1a 所示, 通过适当的变形工艺参数, 合理控制弯曲凸模的行程以及弯曲凹模尺寸, 适当控制进给量, 就可以加工出不同曲率半径的镁合金壁板。

壁板曲率半径 ( $r$ ) 取决于弯曲凹模宽度 ( $s$ ) 和压下高度 ( $h$ )。壁板尺寸精度取决于进给量 ( $\Delta u$ )。根据壁板压弯成形技术特征, 在模具结构参数中, 确定进给量  $\Delta u=n(b_0+b_1)$ , 凹模宽度  $s=2n(b_0+b_1)$ , 其中,  $n$  为正自然数,  $b_0$  为网格间距,  $b_1$  为筋条宽度。壁板结构及尺寸定义如图 1b 所示, 其中, 整体壁板厚度 ( $t_0$ )、蒙皮厚度 ( $t_1$ )、筋条高度 ( $t_2$ )、网格间距 ( $b_0$ )、筋条宽度 ( $b_1$ )。镁合金变曲率壁板部件结构如图 1c 所示,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  分别为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  弧段的曲率半径。

### 2 壁板坯料尺寸及成形工艺参数

镁合金网格式壁板坯料结构及尺寸如图 2 所示。壁板材料为 AZ31 镁合金, 网格式壁板坯料尺寸 300 mm×150 mm×9 mm, 壁板整体厚度 ( $t_0$ ) 为 9 mm, 筋条高度 ( $t_2$ ) 为 5 mm, 蒙皮厚度 ( $t_1$ ) 为 4 mm, 筋条间距 ( $b_0$ ) 为 30 mm, 筋条宽度 ( $b_1$ ) 为 5 mm, 网格型腔的尺寸为 30 mm×30 mm×5 mm, 壁板筋高比 ( $K_h=t_2/t_1$ ) 为 1.25。变曲率镁合金壁板部件尺寸如图 1c 所示,  $L_1=L_2=L_3=70$  mm, 镁合金壁板部件曲率半径分布见表 1。根据不同规格的镁合金壁板部件尺寸, 确定镁合金变曲率壁板级进压弯成形工艺方案, 即镁合金壁板部件 A 的压下高度 ( $h$ ) 变化规律为 3→3→5→5→7→7 mm; 镁合金壁板部件 B 的压下高度变化规律为 3→3→7→7→9→9 mm。镁合金壁板部件 C 的压下高度变化规律为 5→5→7→7→9→9 mm。确定镁合金变曲率壁板压弯成形工艺参数, 包括变形温度 ( $T$ ) 为 260 °C, 模具预热温度 ( $T_1$ ) 为 150 °C, 压下速度 ( $V$ ) 为 2 mm/s, 进给量 ( $\Delta u$ ) 为 35 mm, 凹模宽度 ( $s$ ) 为 70 mm, 凸模半径为 20 mm, 凹模圆角半径为 5 mm。压下高度 ( $h$ )

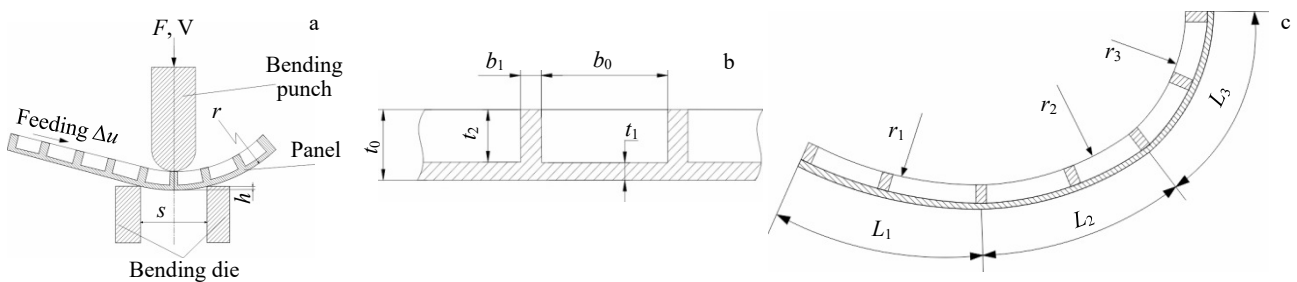


图 1 级进压弯成形工艺原理及壁板部件结构示意图

Fig.1 Principle of progressive bending technology (a) and schematic diagrams of panel blank structure (b-c)

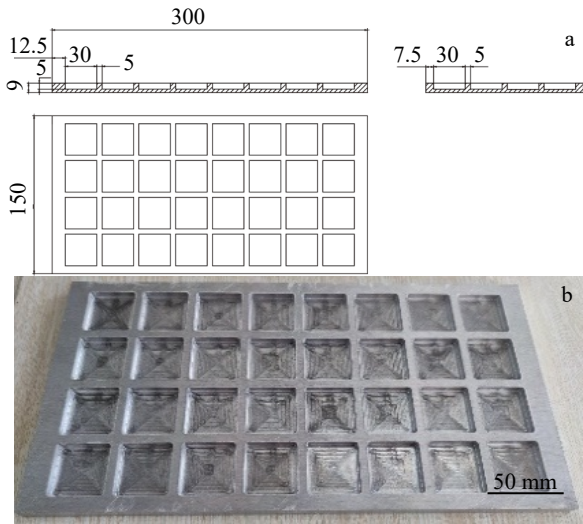


图 2 镁合金壁板坯料结构及尺寸

Fig.2 Structure and dimension of magnesium alloy panel blank (a); appearance of magnesium alloy panel blank (b)

表 1 变曲率壁板结构及尺寸

Table 1 Structure and size of variable curvature panel (mm)				
Panel	$r_1$	$r_2$	$r_3$	Arc length, $L$
Panel A	205.67	125.00	91.00	$L_1=L_2=L_3=70$
Panel B	205.67	91.00	72.56	$L_1=L_2=L_3=70$
Panel C	125.00	91.00	72.56	$L_1=L_2=L_3=70$

分别为 3、5、7、9 mm，对应的壁板曲率半径 ( $r$ ) 分别为 205.67、125.00、91.00、72.56 mm。

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 镁合金变曲率内网格壁板部件曲率半径

根据预设的镁合金变曲率网格式壁板级进压弯成形工艺参数，完成了压弯成形实验，加工出了多种规格的合格的等曲率内网格镁合金壁板部件，蒙皮表面没有出现压痕、裂纹、筋条压塌、筋条屈曲等缺陷，壁板部件表面质量良好，壁板部件的圆弧连续，型腔处的蒙皮部分略微有些内凹。实验结果证明，压弯成形模具结构合理，成形工艺参数合理。图 3 所示为镁合金变曲率内网格式壁板部件曲率半径分布的数值模拟结果和实验结果，结果表明，壁板部件数值模拟结果与实验结果相吻合。镁合金壁板曲率半径的数值模拟值与实验值对比分析如图 4 所示，数值模拟值与实验值相吻合。对于镁合金壁板部件 A，最大的相对误差为 3.15%。对于镁合金壁板部件 B，最大的相对误差为 5.22%。对于镁合金壁板部件 C，最大的相对误差为 2.46%。

镁合金变曲率内网格式壁板曲率半径数值模拟值与实验值偏差如图 5 所示，随着压下高度增大，绝对偏差减小，相对误差随之增大。随着壁板曲率半径增大，绝对偏差增大，相对误差随之减小。镁合金壁板曲率半径模拟值与实验值吻合较好，最大相对误差为 5.22%。

#### 3.2 镁合金变曲率外网格壁板部件曲率半径

图 6 为镁合金变曲率外网格壁板外形数值模拟结果与实验结果对比，数值模拟值与实验值偏差如图 7 所示。随着压下高度增大，绝对偏差减小，相对误差随之增大。随着壁板曲率半径增大，绝对偏差增大，相对误差随之减小。壁板曲率半径模拟值与实验值吻合较好，最大相对误差为 5.51%。

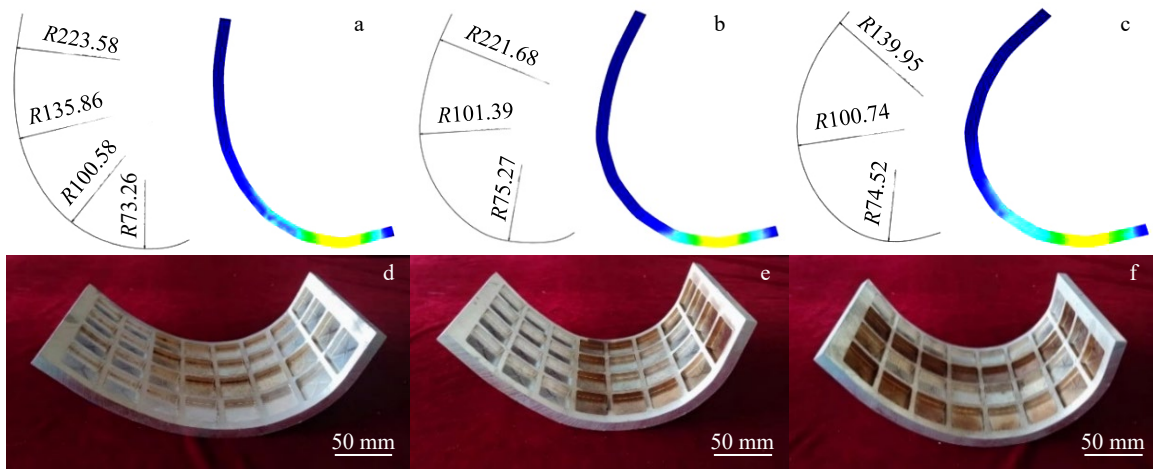


图 3 镁合金变曲率内网格壁板模拟结果和实验结果

Fig.3 Simulation (a-c) and experiment (d-f) results of variable curvature inner grid panel of magnesium alloy: (a, d) panel A, (b, e) panel B, and (c, f) panel C

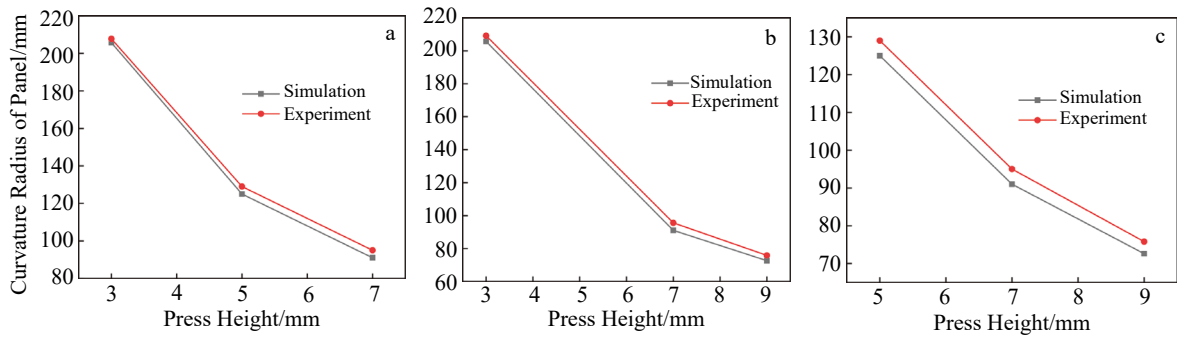


图 4 镁合金变曲率壁板曲率半径的模拟值与实验值对比

Fig.4 Comparison of simulation and experiment data of curvature radius panels of magnesium alloy: (a) panel A, (b) panel B, and (c) panel C

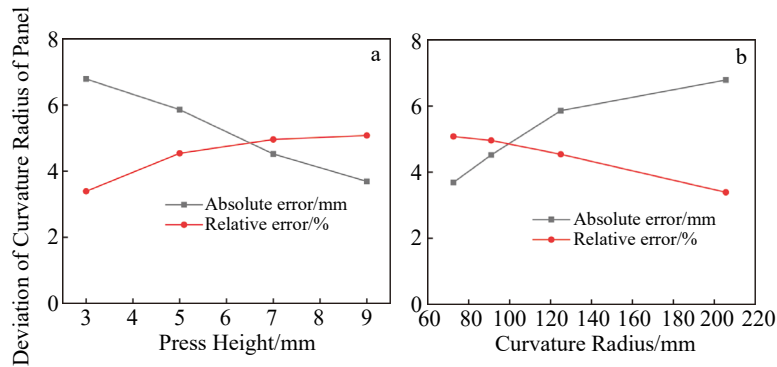


图 5 镁合金变曲率内网格壁板曲率半径数值模拟值与实验值偏差

Fig.5 Deviation between numerical simulation value and experimental value of curvature radius of magnesium alloy inner grid panel: (a) influence of pressing height and (b) influence of curvature radius

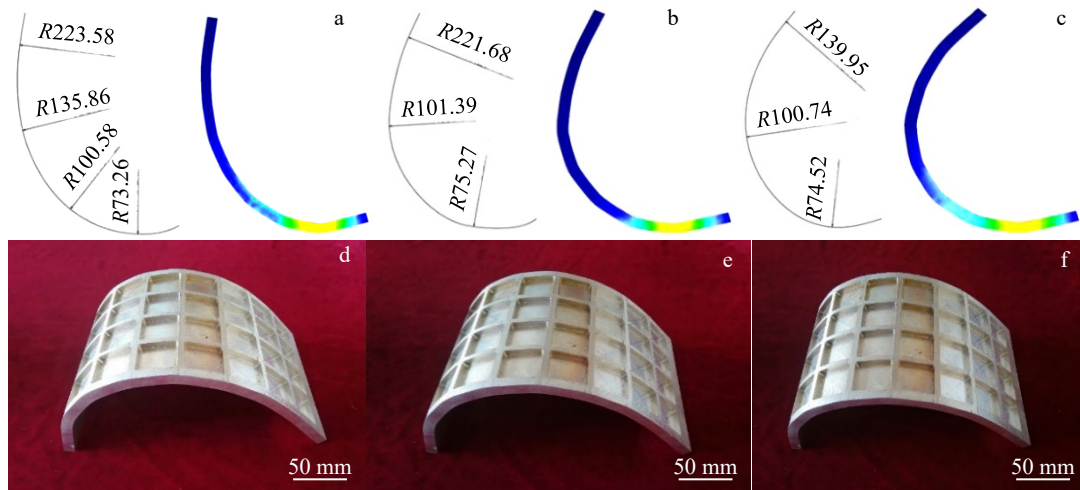


图 6 镁合金变曲率外网格壁板数值模拟结果与实验结果对比

Fig.6 Simulation (a-c) and experiment (d-f) results of variable curvature outer grid panel of magnesium alloy: (a, d) panel A, (b, e) panel B, and (c, f) panel C

### 4 镁合金壁板表面质量评价

镁合金变曲率壁板部件蒙皮表面质量如图 8 所示, 实验结果表明, 镁合金变曲率内网格壁板蒙皮表面

质量较好。对于筋高比 ( $K_h$ ) 为 1.25 的镁合金壁板, 没有出现筋条压塌缺陷和筋条屈曲缺陷, 在蒙皮表面出现的内凹缺陷也较轻, 无明显触摸感缺陷。

采用母线直线度方法来评价镁合金壁板蒙皮表面内

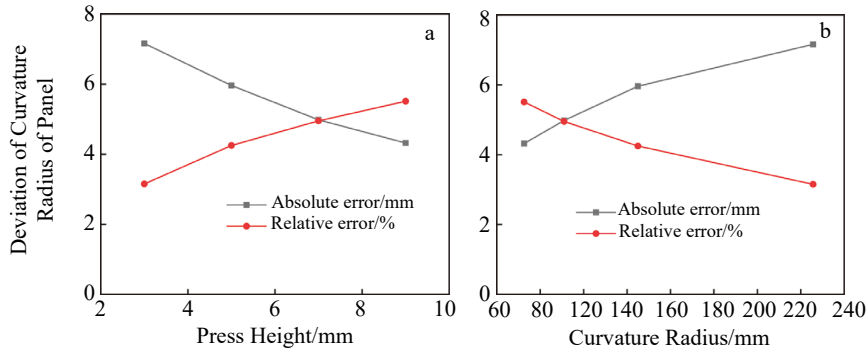


图 7 镁合金变曲率外网格式壁板曲率半径数值模拟值与实验值偏差

Fig.7 Deviation between numerical simulation value and experimental value of curvature radius of magnesium alloy outer grid panel: (a) influence of pressing height and (b) influence of curvature radius

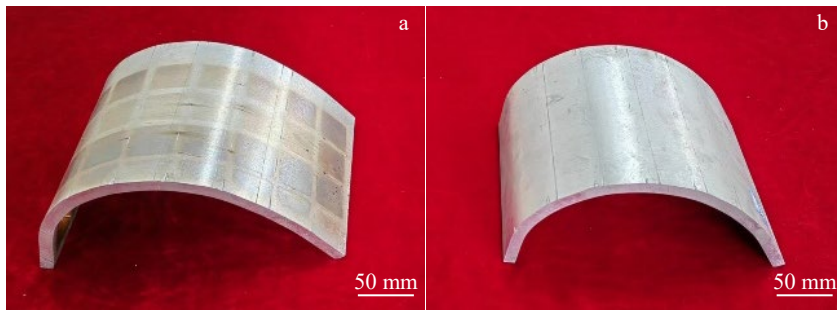


图 8 镁合金变曲率内网格壁板蒙皮表面质量

Fig.8 Skin quality of variable curvature internal grid panel of magnesium alloy: (a) panel A and (b) panel C

凹缺陷程度, 母线直线度偏差 ( $\Delta H$ ) 定义为壁板母线方向上理论外形轮廓与实际外形轮廓的偏差, 母线直线度系数 ( $K_m$ ) 与母线直线度偏差和壁板网格尺寸有关:

$$K_m = \Delta H / (b_0 + b_1) \quad (1)$$

即母线直线度系数越小, 说明壁板蒙皮表面内凹缺陷越轻, 壁板蒙皮表面质量越好。通过测量特征点沿着壁板母线方向的母线直线度偏差值和母线直线度系数来评价镁合金壁板部件蒙皮表面质量。在镁合金壁板部件上设定 28 个测量特征点, 如图 9 所示, 其中 P2、P4、

P10、P12、P18、P20、P26、P28 为网格沟槽中心点, 在壁板蒙皮表面网格中心处的内凹缺陷程度最大, 因此只分析网格中心点的母线直线度偏差和母线直线度系数即可。

对于内网格镁合金壁板部件, 图 10 所示为镁合金网格式壁板母线直线度偏差 ( $\Delta H$ ) 和母线直线度系数 ( $K_m$ ) 实验测量结果。对于镁合金内网格式壁板, 当壁板曲率半径为 205.67 mm 时, 母线直线度偏差最大值为 0.038 mm, 应母线直线度系数最大值为 0.157%。当壁板曲率半径为 91.00 mm 时, 对应母线直线度偏差最大值为 0.072 mm,

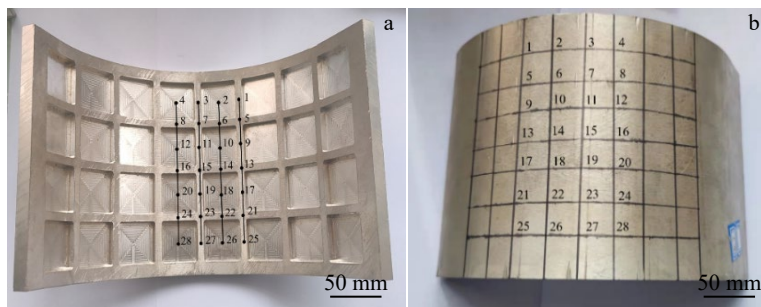


图 9 AZ31 镁合金壁板零件测量点位置分布

Fig.9 Distribution of measurement points for AZ31 magnesium alloy grid panel: (a) inner surface and (b) outer surface

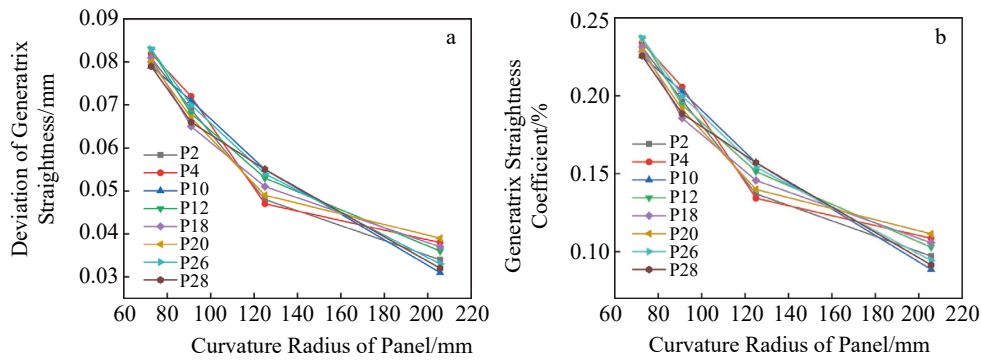


图 10 镁合金壁板蒙皮表面网格中心点的母线直线度偏差和母线直线度系数

Fig.10 Generatrix straightness deviation (a) and generatrix straightness coefficient (b) of grid center point on panel skin of AZ31 magnesium alloy

对应母线直线度系数最大值为 0.206%。当壁板曲率半径为 72.56 mm 时，母线直线度偏差最大值为 0.083 mm，对应母线直线度系数最大值为 0.237%。实验结果表明，随着壁板曲率半径减小，壁板网格槽中心点内凹缺陷程度随之增大，壁板母线直线度偏差随之增大，模型直线度系数随之增大。

### 5 结 论

1) 采用数值模拟方法，分析了镁合金变曲率网格式壁板曲率半径变化规律，结果表明，壁板部件曲率半径与压下高度有关，随着压下高度增大，壁板曲率半径随之减小。

2) 确定了变曲率镁合金壁板级进压弯成形工序，完成了变曲率网格式镁合金壁板级进压弯成形实验研究，获得了多种规格的变曲率网格式镁合金壁板部件，镁合金壁板曲率半径分布规律为 205.67~72.56 mm。

3) 确定了合理的变曲率网格式镁合金壁板级进压弯成形工艺参数，即变形温度 ( $T$ ) 为 260 °C，模具预热温度 ( $T_1$ ) 150 °C，进给量 ( $\Delta u$ ) 35 mm，凹模宽度 ( $s$ ) 为 70 mm。

4) 对镁合金变曲率内网格壁板曲率半径数值模拟值与实验值偏差进行了分析。对于镁合金变曲率内网格壁板，壁板曲率半径最大相对误差为 5.22%。对于镁合金变曲率外网格壁板，壁板曲率半径最大相对误差为 5.51%。随着压下高度增大，绝对偏差减小，相对误差随之增大。随着壁板曲率半径增大，绝对偏差增大，相对误差随之减小。

5) 在镁合金壁板压弯成形时，对于筋高比 ( $K_f=5/4$ ) 为 1.25 的镁合金壁板，没有出现筋条压塌缺陷和筋条屈曲缺陷，在壁板蒙皮表面网格槽中心处出现内凹缺陷，随着壁板曲率半径减小，壁板网格槽中心点的内凹

缺陷程度增大。

6) 采用母线直线度方法来评价镁合金壁板蒙皮表面内凹缺陷程度，实验结果表明，随着壁板曲率半径减小，母线直线度偏差随之增大，母线直线度系数随之增大。当壁板曲率半径为 72.56 mm 时，母线直线度偏差最大值为 0.083 mm，对应母线直线度系数最大值为 0.237%。

### 参考文献 References

[1] Livi F, Puccini G. *US Patent*, US20030168555 A1[P], 2003

[2] Sikulskiy V, Sikulskiy S, Maiorova K *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2023, 124(5): 1569

[3] He Dehua, Li Dongsheng, Li Xiaoqiang *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(12): 2350

[4] Wang Lei(王磊), Li He(李鹤), Xu Liang(许良) *et al. Aerospace Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2018, 61(S2): 64

[5] Xue Kemin(薛克敏), Wang Huigan(汪会干), Xie Xiuming(解修明) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2021, 50(5): 178

[6] Li Yeqi(李焯琪), Liu Jinsong(刘劲松), Liu Ting(刘婷) *et al. Forging & Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2020, 45(2): 106

[7] Liu Chunguo(刘纯国), Yue Tao(岳韬), Cui Qi(崔琪). *Aerospace Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2018, 61(18): 16

[8] Zou Fangli(邹方利), Huang Shangyu(黄尚宇), Lei Yu(雷雨) *et al. Forging & Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2016, 41(8): 70

[9] Park Dong-Hwan, Kwon Hyuk-Hong. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*[J], 2015, 16(10): 2159

[10] Shin Hyun-Woo. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*[J], 2012, 13(11): 2011

[11] Kishimoto T, Du P, Furushima T. *Journal of Magnesium and*

- Alloys*[J], 2022, 10(10): 2730
- [12] Shi S N, Wang H Y, Teng F *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2024, 12(1): 98
- [13] Su Hui(苏 辉), Chu Zhibing(楚志兵), Xue Chun(薛 春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(10): 3446
- [14] Li Zhenliang(李振亮), Tian Dongkuo(田董护). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(2): 639
- [15] Yan Kan(严 侃), Wang Yayong(王亚勇), Liu Yongzhe(刘永哲) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2024, 53(19): 103
- [16] Yang Zeming(杨泽明), Wang Bin(王 斌), Chen Wen(陈 文). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2019, 26(2): 138
- [17] Li Hao(李 昊), Zang Qianhao(臧千昊), Zhang Yunfeng(张云峰) *et al. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, Natural Science Edition*(江苏科技大学学报, 自然科学版)[J], 2024, 38(3): 35
- [18] Li Yaqin(李亚琴), Zhang Minjie(张敏洁), Guo Feifei(郭菲菲) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2024, 31(8): 58
- [19] An Zhiguo(安治国), Ye Liao(叶 了), Zhang Tao(张 涛) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2024, 16(5): 99
- [20] Xiao Gang(肖 罡), Guo Pengcheng(郭鹏程), Wang Wenyun(王文韞) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2024, 31(6): 149

## Numerical Simulation and Experimental Study on Progressive Bending of Magnesium Alloy Grid Panel with Variable Curvature

Wang Zhongtang, Li Yanjuan, Liu Quan, Liang Haicheng, Yang Junbao, Liu Yongzhe  
(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** Numerical simulation method was used to study the variation law of curvature radius of magnesium alloy panel formed by progressive bending technology. The experimental research work was completed, and several specifications of magnesium alloy grid panels with variable curvature were obtained. The curvature radius of panel range was from 205.6 mm to 72.56 mm. The suitable process parameters for progressive bending of magnesium alloy panel with variable curvature were determined. The results show that curvature radius of panel is related to amount of press height. As press height increases, curvature radius of panel decreases. With increase in press height, the absolute error between simulation result and experimental result decreases, and the relative error increases. With increase in curvature radius, the absolute error increases and the relative error decreases. For internal grid panel of magnesium alloy, the maximum relative error is 5.22%. For outer grid panel of magnesium alloy, the maximum relative error is 5.51%. The generatrix straightness method was used to evaluate the degree of concave defects on surface of magnesium alloy panel. With decrease in curvature radius of panel, the generatrix straightness deviation increases, and the generatrix straightness coefficient increases. When the curvature radius of panel is 72.56 mm, the maximum deviation of generatrix straightness is 0.083 mm, and the corresponding maximum value of generatrix straightness coefficient is 0.237%.

**Key words:** magnesium alloy; grid panel; variable curvature; progressive bending forming

---

Corresponding author: Li Yanjuan, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, P. R. China, Tel: 0086-24-24680841, E-mail: yanjuanli@syju.edu.cn