



考虑材料-结构-工艺参数的 铆接质量多目标优化设计

许文超, 王登峰

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

摘 要: 为提高铝镁合金压铆接头的铆接质量, 本文提出了考虑材料-结构-工艺参数的多目标优化设计方法。首先, 通过金属的拉伸和压缩试验, 获取了铆钉和铆接板材料的本构模型参数; 其次, 建立了压铆接头的有限元仿真模型, 并对接头的干涉量水平和干涉均匀度进行了分析和评价, 将仿真与试验结果对比, 验证了仿真的准确性; 最后, 选取压铆接头的材料、结构和工艺参数为设计变量, 以接头的关键测点的相对干涉量、整体平均相对干涉量和相对干涉量标准差系数为优化目标, 基于田口稳健性实验设计和灰色相关分析方法, 结合熵权法得到的目标响应的权重值对压铆接头进行了一体化多目标优化, 得到了各设计变量的最佳参数组合。多目标优化后, 压铆接头的整体平均相对干涉量, 从 1.67% 提高到 2.36%, 提升了 41.3%, 且优化后的值在航天工业标准推荐的范围内, 相对干涉量标准差系数, 从 67.49% 降低到 41.0%, 降低了 39.3%, 接头的整体干涉量水平和干涉量均匀度得到了双重提升。

关键词: 压铆接头; 相对干涉量; 灰色相关分析; 熵权法; 多目标优化

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0497-12

中图分类号: U463.82

文献标志码: A

引文格式: 许文超, 王登峰. 考虑材料-结构-工艺参数的铆接质量多目标优化设计[J]. 中国有色金属学报, 2021, 32(2): 497-508. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37846

XU Wen-chao, WANG Deng-feng. Multi-objective optimization design of riveting quality considering material-structure-process parameters[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 32(2): 497-508. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37846

汽车车身和底盘用材逐渐向多材料混合应用方向发展, 在多材混合连接结构中, 接头的力学性能对整车安全有重要影响。对于车身厚板或结构件多采用实心铆钉压铆的连接方法。在实心铆钉压铆接头中, 其材料-结构-工艺因素, 如铆钉和母板的材料特性^[1]、铆模的类型和尺寸^[2]、铆钉的结构参数以及压铆过程的工艺参数^[3], 会影响铆钉成形过程中的材料流动, 进而对铆钉的成形质量和接头的力学性能产生重要影响。ABDELAL 等^[1]探究了铆模设计、压铆力、铆钉间距和铆钉材料对铆接母板的变形的影响; CUI 等^[2]研究了铆模角度对铆接形成头的材料流动和微观分布的影响; AMAN 等^[3]

研究了压铆力、铆钉尺寸和孔径公差对铆接质量的影响, 发现减少沉头深度可使得铆钉和孔之间没有间隙, 进而保证更高水平的铆钉质量。

国内外学者对压铆接头的成形质量展开了大量的研究^[4-6], 得出铆接干涉量是最为关键的指标之一, 在一定范围内, 铆钉干涉量和孔壁周边的径向和环向残余应力是正相关的, 而环向残余应力能够有效抑制孔壁表面和接触面疲劳裂纹的形成和扩展, 进而提高接头的疲劳寿命。而铆接干涉量沿板件厚度方向的分布均匀度^[7], 反映了接头残余应力分布的均匀度, 是衡量接头服役稳定性的重要指标^[6]。目前, 针对铆接接头的成形均匀性进行的优

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975244, 51475201)

收稿日期: 2020-11-09; **修订日期:** 2021-07-19

通信作者: 王登峰, 教授, 博士; 电话: 13504466507; E-mail: caewdf@jlu.edu.cn

化设计较少。WANG 等^[8]使用 Kriging 近似模型和粒子群算法,通过优化铆接结构的参数,改善了飞机装配中的变形均匀性;QIN 等^[9]以电磁铆接接头的整体平均干涉量为优化目标,以铆模的结构尺寸为设计变量,采用径向基近似模型和 Hooke-Jeeves 优化算法对接头进行了优化设计,优化后接头的干涉量水平提升,进而提高了接头的力学性能。现有研究中,将铆接接头的材料-结构-工艺参数集成在一起,并同时考虑铆接接头的整体平均干涉量和干涉量均匀度指标,对接头铆接质量进行一体化的匹配性优化设计的研究相对匮乏。

1 实验

1.1 铆接材料拉伸和压缩试验

使用考虑应变和应变速率强化的 Johnson-Cook^[6]模型来模拟铆钉的动态塑性行为。依照标准 GB/T 7314—2017,从 5056 铝合金铆钉杆截取 $d 5 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 的单向压缩试样,并在 EPU-G 型号高速伺服压力机上对压缩试样分别进行 0.5、10

和 20 mm/s 速度下的单向压缩试验。

使用考虑应变和应变速率强化的小变形幂指数材料模型^[6]来模拟铆接板材的力学性能。依照标准 GB/T 16865—2013 制备 ZK61M 镁合金、6061 铝合金材料的单向拉伸试样,并在 WDW3100 型万能拉伸试验机上以 2 mm/min 的速度进行单向拉伸试验。

1.2 压铆试验与有限元仿真方案

本文研究的 6061 铝合金和 ZK61M 镁合金板材为厚板,板厚为 8 mm,采用实心铆钉压铆连接的方式,选取直径 6 mm $\times$ 23 mm 的 5056 铝合金半圆头实心铆钉。半圆头实心铆钉压铆的过程分为钉杆整体自由墩粗、顶杆局部受限墩粗及墩头成形、铆钉和板材回弹共三个阶段,如图 1 所示。铆接模具包括上模和下模,上模开有铆槽,用于冲铆,下模开有半圆头槽,用于固定铆钉半圆头。所使用上模、下模和铆钉的主要尺寸如图 2 所示。

设计铝镁合金十字搭接接头结构,用来研究接头的铆接质量,如图 3 所示,上下两层板尺寸以及

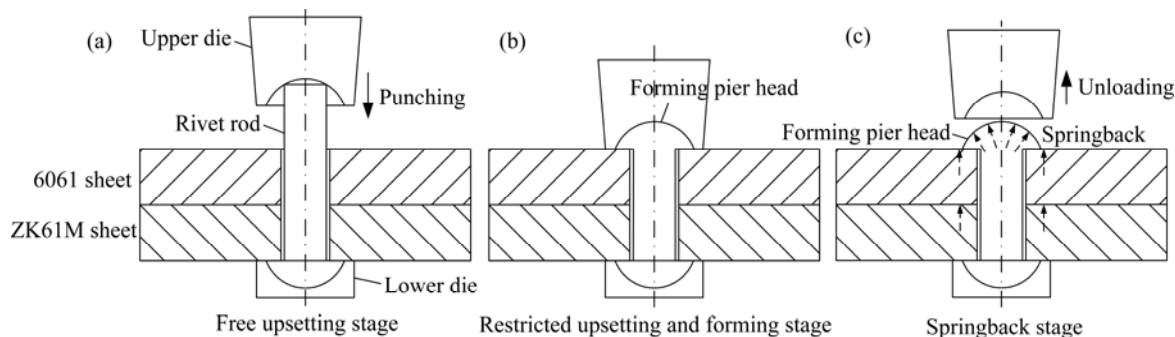


图 1 半圆头铆钉压铆连接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of punch-forming riveting process of semiround head rivet: (a) Free upsetting; (b) Restricted upsetting and forming; (c) Springback

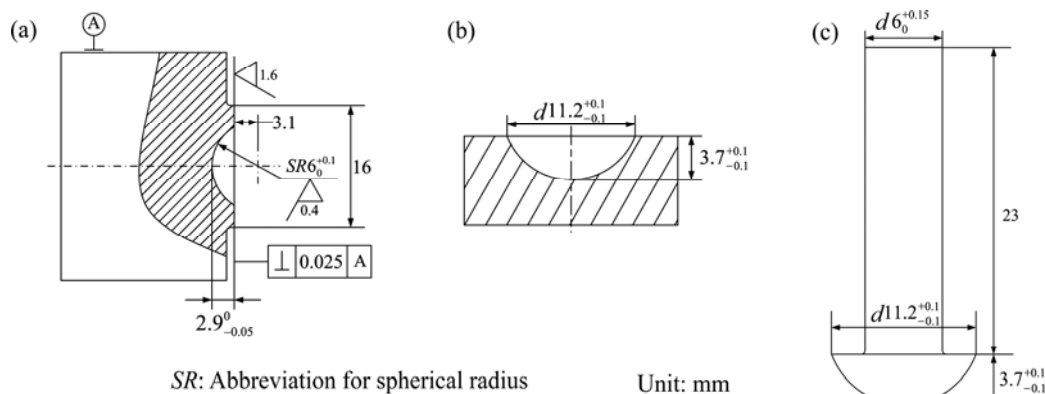


图 2 铆钉和压铆模具结构尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagrams showing structural size of rivet and dies: (a) Upper die; (b) Lower die; (c) Rivet

中心预制孔直径均相同, 上板材料为 6061 铝合金, 下板材料为 ZK61M 镁合金, 铆钉材料为 5056 铝合金。将十字搭接接头装夹在下模上, 如图 4 所示, 将上模安装在压铆试验机的作动器上, 以 20 mm/s 的速度对十字搭接接头的铆钉进行向心垂直压铆试验, 压铆后, 上模在作动器带动下沿冲压相反的方向等速撤回。

在冲击动力学软件 Ls-dyna 中建立铝镁合金十字搭接接头的压铆试验的有限元仿真模型, 如图 5 所示。铆钉和板材采用六面体单元划分, 单元总数为 1169728, 节点总数为 1208069, 上模采用壳单元划分, 为刚体材料模型, 铆钉顶杆与上模铆槽、铆钉与铆钉孔、铆钉半圆头与下板材、上板材与下板材间建立自动面-面接触, 摩擦因数设为 0.18^[10]。铆钉半圆头的外圆弧面施加绑定约束, 模拟下模对半圆头的固定作用。上板材、下板材的约束条件具体如图 5 所示。上模对铆钉杆的加载采用强制速度

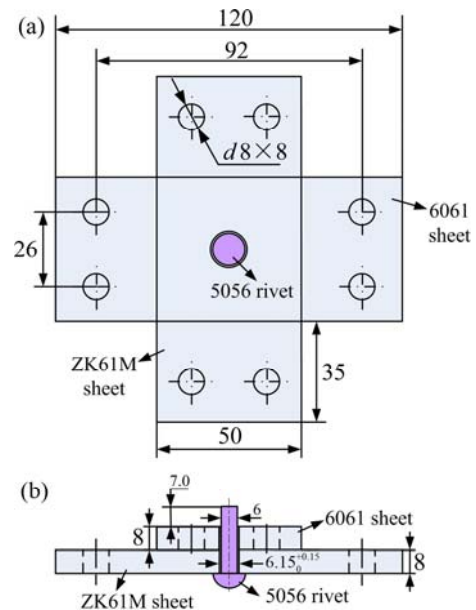


图 3 十字搭接接头结构示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of cross lap joint structure (Unit: mm): (a) Top view; (b) Front sectional view

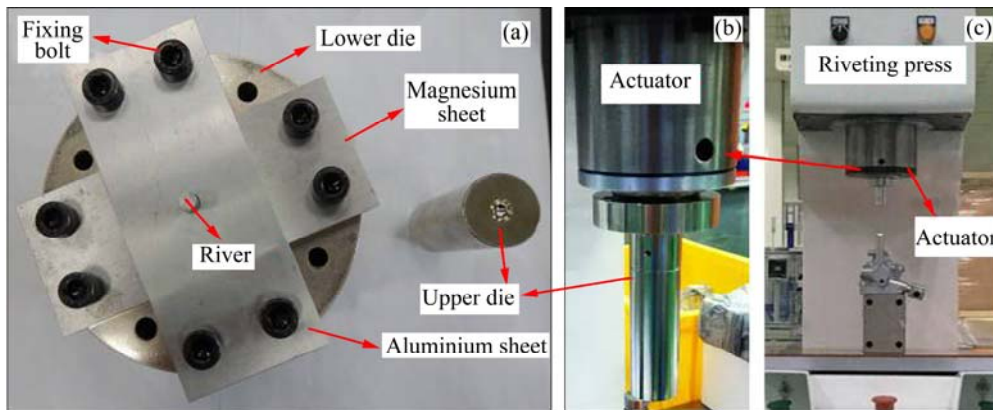


图 4 压铆试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of punch-forming riveting experiment: (a) Fixture and die; (b) Actuator; (c) Riveting press

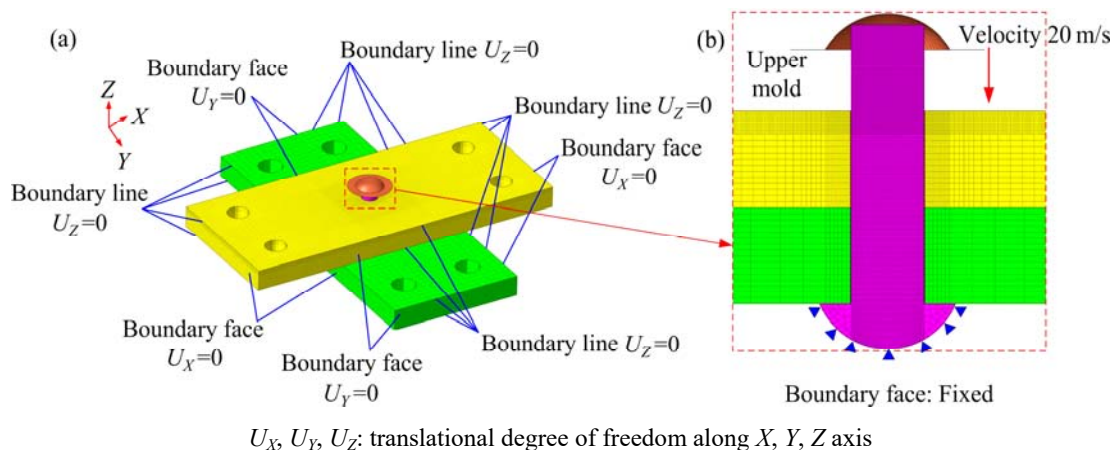


图 5 压铆仿真有限元模型

Fig. 5 Punch-forming riveting simulation finite element model: (a) Overall axonometric view; (b) Local sectional view

加载法, 加载速度 20 mm/s, 当上模下降到指定的最深位置后, 上模逐渐脱离铆钉墩头端面向上移动, 压铆和卸载过程各用时 0.2 s。

1.3 多目标一体化优化设计

基于田口实验设计, 灰色相关分析和熵权法对铆接接头的铆接质量进行多目标一体化优化设计, 主要的步骤如下。

1) 基于前文建立的压铆仿真模型, 采用专业的网格变形软件 DEP/Meshworks, 对各设计变量进行参数化, 得到压铆接头的参数化仿真模型, 并针对设计变量建立田口正交实验表, 将田口试验设计的各组设计变量赋予参数化仿真模型, 并分别进行压铆仿真分析, 从仿真结果中提取可得到各性能响应的数值。

2) 基于灰色相关分析方法, 对田口实验设计的计算结果进行归一化处理^[11], 即“灰生成”, 针对具有“越大越好”特性, “越靠近特定值 T , 其性能越好”特性和“越小越好”特性的目标响应, 灰色相关分析提供了三种对应的归一化方法。根据灰色相关分析原理, 对“灰生成”结果进行计算, 得到各实验组对应的灰色相关系数。

3) 基于计算得到的各实验设计组的灰色相关系数, 采用熵权法对各性能响应进行赋权^[12], 得到各性能响应的权重值。

4) 将得到的灰色关联系数与其对应的权重相乘来计算灰色关联度 G , 如式(1)所示, 计算得到各试验组的灰色相关度 G , 灰色关联度值 G 越最高的设计方案, 则代表综合性能最优的方案:

$$G = \sum_{k=1}^n \beta_k \gamma, \sum_{k=1}^n \beta_k = 1 \quad (1)$$

式中: γ 为灰色关联系数; β_k 为第 k 个目标响应的权重值; n 为目标响应的个数。

5) 采用主效应分析法^[11], 得到各设计变量的水平与灰色关联度的主效应图, 进而选择使得灰色关联度数值最大的设计变量的水平为最优设计参数。

2 结果与分析

2.1 铆接材料本构模型

铆钉材料的压缩试验如图 6(a)所示, 测得试样

在不同压缩应变速率下的压缩应力应变曲线如图 6(b)所示。使用 Johnson-Cook 材料模型来描述 5056 铝合金铆钉材料的本构关系, 如式(2)所示:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (2)$$

式中: σ 为流变应力(MPa); ε 为等效应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率(s^{-1}); $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率(s^{-1}); A 为材料屈服应力(MPa); B 为应变强化系数; n 为应变强化指数; C 为应变速率强化系数。

采用 MATLAB 软件拟合得到 5056 铝合金铆钉材料的 Johnson-Cook 本构关系如式(3)所示:

$$\sigma = (292.79 + 164.01\varepsilon^{0.274}) \left(1 + 0.066 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (3)$$

Johnson-Cook 模型的 A 、 B 、 n 参数的拟合的相关系数达到了 95.4%, 可信度较高, 拟合后的曲线如图 6(b)所示。

铆接板材料的拉伸试验如图 7(a)所示, 测得

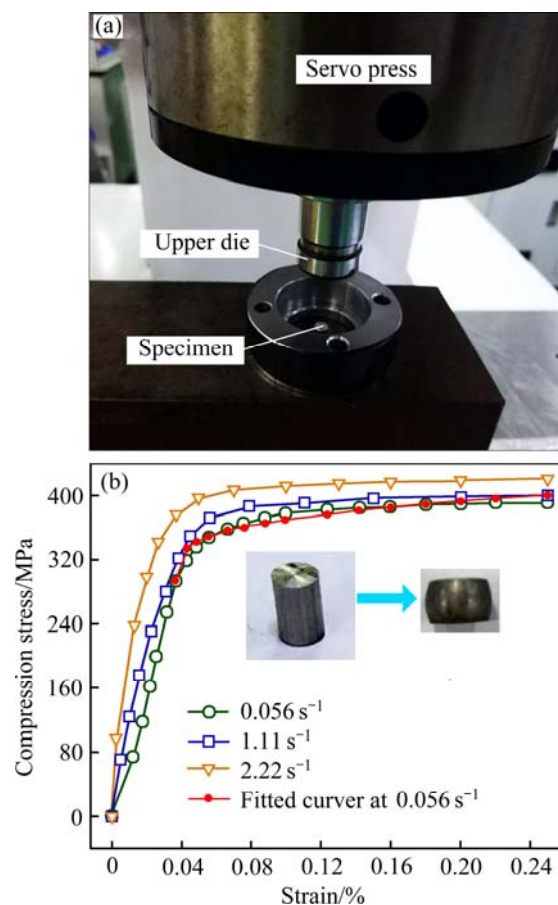


图 6 铆钉材料压缩试验

Fig. 6 Compression test of rivet material: (a) Servo press; (b) Compressive stress-strain curves

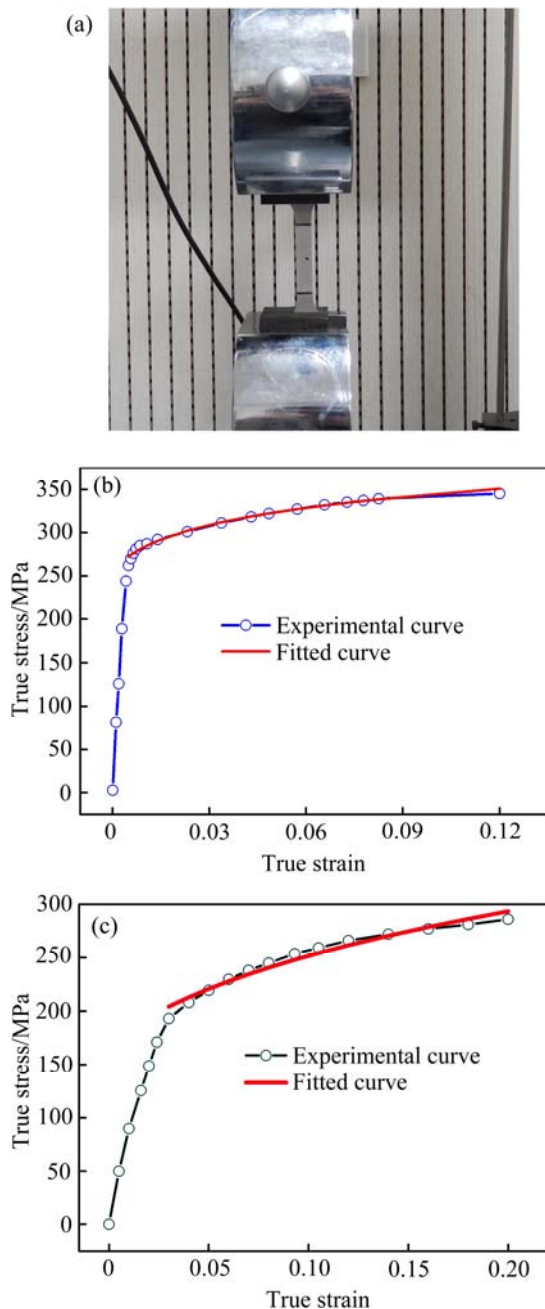


图 7 铆接板材料拉伸试验

Fig. 7 Tensile test of riveted sheet material: (a) Tensile testing machine; (b) 6061 aluminum alloy stress-strain curve; (c) ZK61M magnesium alloy stress-strain curve

6061、ZK61M 的应力应变曲线, 如图 7(b)~(c)所示。在 MATLAB 软件中拟合得到 6061 铝合金、ZK61M 镁合金的幂指数材料模型如式(4)和(5)所示。6061 铝合金和 ZK61M 镁合金的幂指数材料模型的拟合的相关系数分别达到了 96.3%和 98.3%, 可信度较高, 拟合后的曲线如图 7(b)和(c)所示。

$$\sigma = 431.63 \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{6500} \right)^{\frac{1}{4}} \right] [\varepsilon_e + \varepsilon_{eff}^p]^{0.1} \quad (4)$$

$$\sigma = 436.42 \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{7124.56} \right)^{\frac{1}{1.56}} \right] [\varepsilon_e + \varepsilon_{eff}^p]^{0.27} \quad (5)$$

式中: σ 为流变应力(MPa); ε_e 为材料屈服应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率(s^{-1}); ε_{eff}^p 为等效塑性应变。

2.2 压铆试验与仿真结果

压铆有限元仿真完成后的接头如图 8(a)所示, 将铆钉沿着对称中心平面剖切, 得到其剖面图如图 8(b)所示, 可以看出, 铆钉墩头呈“半椭圆”状, 进一步提取铆钉墩头部位的应变云图如图 8(c)所示。墩头变形部分按变形程度的大小可分为三个区域, 第 1 区变形程度最小, 第 2 区变形程度最大, 第 3 区在刚开始变形时, 由于不受模具内腔的约束, 变形较大, 随着钉头材料贴紧模具内腔, 变形越来越小, 总的变形程度居中, 这与邓将华等^[13]的研究一致。三个变形区的交界处为剪切带, 是由铆钉材料轴向流动和径向流动所产生的, 轴向和径向流动越不均匀, 则材料变形越剧烈, 产生的剪切带越明显, 相应的剪应力越大。

压铆试验后十字搭接接头如图 9(a)所示, 为对比仿真与试验的一致性, 将仿真和试验得到接头剖面进行对比, 如图 9(b)所示。从图中可以看出, 仿真和试验得到的铆接形成头的半径和高度的相对误差分别为 0.8%和 2.1%, 吻合度较高。

进一步对比仿真与试验得到的接头的干涉量水平。铆接结构的相对干涉量是铆钉径向膨胀而使钉孔径向产生的胀大量, 其计算公式如下:

$$\delta_i = \frac{D_i - D_0}{D_0} \quad (6)$$

式中: i 为铆钉钉杆上测量点; D_i 为压铆后铆钉钉杆上各测量点处的直径; D_0 为铆接前铆孔的直径; δ_i 是压铆后各测量点的相对干涉量。

为研究铆钉干涉量沿着板厚方向的分布情况, 沿顶杆轴向取 3 个测点, 分别测量仿真与试验得到的接头的 3 个测点处的相对干涉量, 测量与对比结果如图 10 所示。从图 10 可以看出, 钉杆相对干涉量沿墩头至半圆头方向依次递减, 原因是远离墩头处的材料流动变少。从图 10 中计算得出, 测点 1、

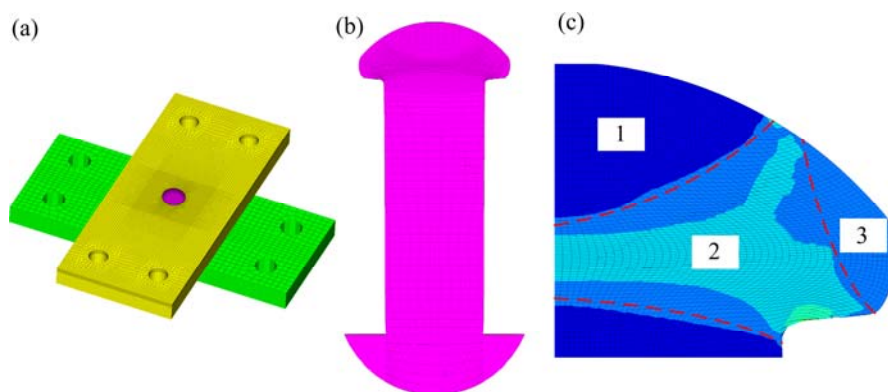


图 8 压铆仿真后接头的变形

Fig. 8 Deformation of the joint after punch-forming riveting simulation: (a) Overall deformation of joint; (b) Section view of deformed rivet; (c) Strain cloud diagram and deformation zone of rivet head

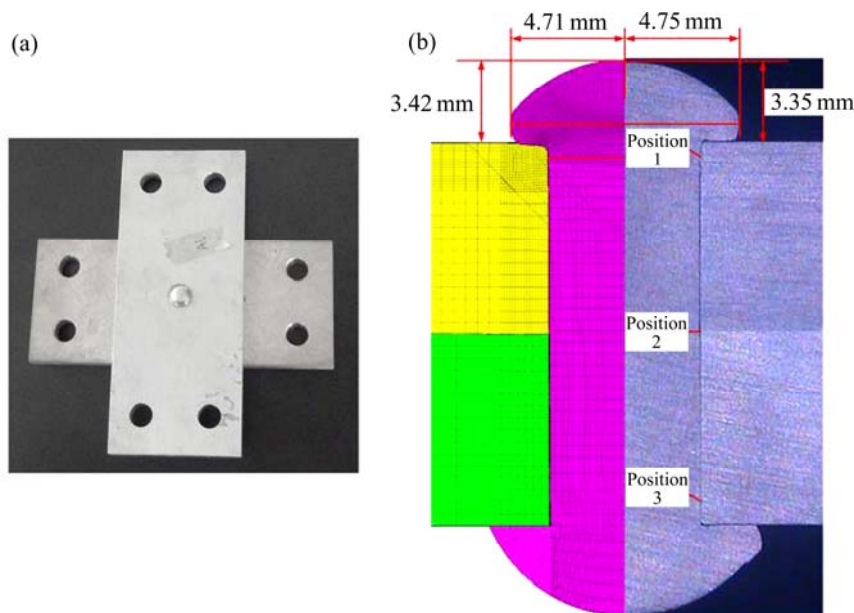


图 9 压铆接头形貌的仿真与试验对比

Fig. 9 Simulation and experimental comparison of appearance of punch-forming riveting joint: (a) Joint obtained by punch-forming riveting experiment; (b) Cross-sectional view of joint obtained by simulation and experiment

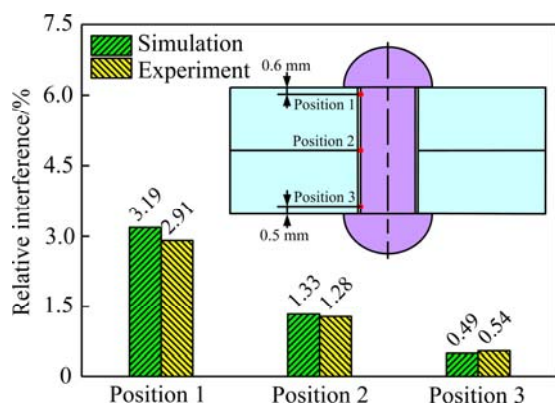


图 10 钉杆轴向三个测点处的相对干涉量

Fig. 10 Relative interference value at three measuring positions along shaft axis

2 和 3 的相对干涉量的仿真与试验的相对误差分别为 9.6%、3.9%和 9.3%，均小于 10%，可信度较高。取 3 点的相对干涉量的平均值作为铆钉的整体平均相对干涉量，如式(7)所示，仿真与试验的平均相对干涉量分别为 1.67%和 1.58%，相对误差为 5.7%，可信度较高。

$$\delta_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \quad (7)$$

式中： N 表示测量点的个数，此处取 3； δ_A 是压铆后各测量点的相对干涉量的平均值。

为表征铆钉干涉量沿板件厚度方向的分布均匀度，定义标准差系数 V 来描述 3 个测点的相对干

涉量的均匀度^[7-8], 如式(8)所示:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta_i - \delta_A)^2}}{\delta_A} \quad (8)$$

式中: V 是各测量点的相对干涉量的标准差系数。可以得出, V 差值越小, 铆钉干涉量均匀性越好, 进而接头的铆接质量越好。仿真与试验得到的标准差系数分别为 67.49% 和 62.66%, 相对误差为 7.7%, 可信度较高。鉴于本文后期的优化主要是针对仿真结果开展, 故将接头的仿真值作为对标值。

综上所述, 3 个测点的平均相对干涉量值均为 1.67%, 根据 HB/Z 142—1989 标准^[14]和相关文献^[15], 铝合金铆钉铆接时推荐的最佳干涉量范围为 1.5%~3.0%, 故本接头的整体相对干涉量, 满足推荐值的要求, 且有进一步提升的空间。3 个测点的相对干涉量得标准差系数值为 67.49%, 干涉量均匀度有进一步提高的空间^[7]。

2.3 多目标一体化优化设计结果

2.3.1 设计变量

上模的尺寸、铆钉和母材的材料和结构参数、压铆的工艺参数对压铆接头的成形质量至关重要, 因此, 本文以上模槽孔的直径和高度、铆钉的外伸量、压铆下压位移因子、铆钉的材料、铆接孔直径为设计变量, 如图 11 所示, 采用田口 L25(56)试验设计, 得到各因素和水平如表 1 所示。铆钉材料选取适用于镁铝合金连接的镁合金或铝合金, 其 Johnson-Cook 模型参数根据现有研究^[16-18]获取, 具体参数如表 2 所示。

2.3.2 优化问题定义

确定优化目标时, 遵循如下几条原则: 1) 铝合

金铆接接头推荐的最佳干涉量范围为 1.5%~3.0%, 在达到最佳干涉量之前, 钉杆的整体平均相对干涉量(δ_A)越大, 越有利于实现更好的力学性能^[15]; 2) 铆接相对干涉量的标准差系数(V)越小, 接头的铆接均匀性越好, 力学性能越优^[7-8]; 3) 由于钉杆的干涉量分布为沿墩头端到半圆头端递减, 若要求整体平均相对干涉量(δ_A)较大, 很容易造成测量点 1 的相对干涉量(δ_1)过大, 进而可能导致孔周产生裂纹^[19], 因此, 限制测量点 1 的相对干涉量(δ_1)的数值越接近 3.0 越好, 对于测量点 2, 其相对干涉量(δ_2)越大, 对接头的锁紧作用越好, 故使测点 2 的相对干涉量(δ_2)尽可能大, 对于测量点 3, 其相对干涉量(δ_3)数值越接近 3.0, 越有利于增加干涉量均匀度。上述 3 条原则间相互关联且又相互制约, 达到最佳平衡后的效果是: 整体平均相对干涉量(δ_A)尽可能大, 但贴近 3.0, 且测量点 1 的相对干涉量(δ_1)不会出现过大, 各测量点相对干涉量的标准差系数

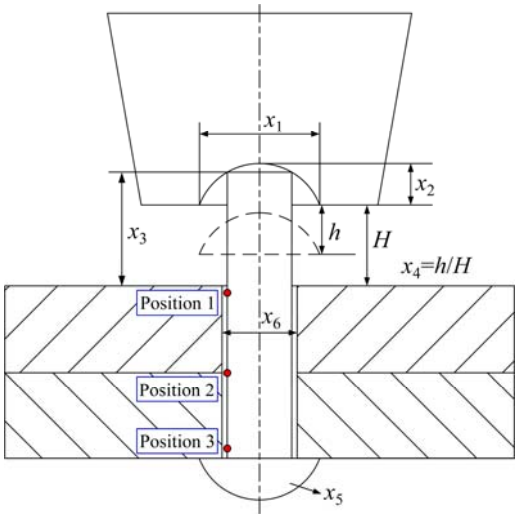


图 11 设计变量
Fig. 11 Design variables

表 1 设计变量及取值水平

Table 1 Design variables and levels

Design variable	Description	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
x_1	Groove diameter of upper die/mm	8.1	8.4	8.7	9.0	9.3
x_2	Groove height of upper die/mm	2.4	2.7	2.9	3.1	3.4
x_3	Rivet shaft length outside sheet/mm	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
x_4	Riveting displacement scale factor	0.76	0.80	0.84	0.88	0.92
x_5	Rivet material	6061-T6	AZ91D	5056	2A10	2A12
x_6	Riveting hole diameter/mm	6.10	6.15	6.20	6.25	6.30

表 2 铆钉材料 Johnson-Cook 模型参数

Material	A/MPa	B/MPa	n	C
6061-T6 ^[16]	270.0	138.2	0.179	0.1300
AZ91D ^[17]	164.0	343.0	0.283	0.0210
5056	293.0	164.0	0.274	0.0660
2A10 ^[6]	243.0	618.8	0.200	0.0100
2A12 ^[18]	370.4	1798.7	0.733	0.0128

(V)尽可能大。最终，建立的多目标优化模型函数表达式如式(9)所示：

find $\mathbf{x}=(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6)^T$
$$\begin{cases} \max \{ \delta_A(\mathbf{x}), \delta_2(\mathbf{x}), -V(\mathbf{x}) \}, \\ \delta_1(\mathbf{x}) \rightarrow 3.0, \delta_3(\mathbf{x}) \rightarrow 3.0 \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_U \end{cases} \quad (9)$$

表 3 田口试验设计和仿真结果

Table 3 Taguchi experiment design and simulation results

Experiment No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	$\delta_1/\%$	$\delta_2/\%$	$\delta_3/\%$	$\delta_A/\%$	$V/\%$
1	1	1	1	1	1	1	4.20	1.64	0.62	2.15	69.83
2	1	2	2	2	2	2	4.55	2.34	0.94	2.61	56.88
3	1	3	3	3	3	3	4.35	2.81	1.03	2.73	49.70
4	1	4	4	4	4	4	16.83	3.78	1.47	7.36	91.89
5	1	5	5	5	5	5	18.35	7.33	3.68	9.79	63.69
6	2	1	2	3	4	5	8.29	1.71	0.60	3.53	95.92
7	2	2	3	4	5	1	22.16	7.02	3.48	10.89	74.46
8	2	3	4	5	1	2	12.85	3.97	1.50	6.10	79.85
9	2	4	5	1	2	3	3.45	2.84	1.03	2.44	42.07
10	2	5	1	2	3	4	1.28	0.35	0.19	0.61	78.89
11	3	1	3	5	2	4	4.42	2.50	1.06	2.66	51.82
12	3	2	4	1	3	5	3.37	1.30	0.48	1.71	70.87
13	3	3	5	2	4	1	20.89	4.52	2.07	9.16	91.20
14	3	4	1	3	5	2	10.37	3.93	1.89	5.40	66.99
15	3	5	2	4	1	3	2.74	1.29	0.48	1.51	62.06
16	4	1	4	2	5	3	16.68	5.42	2.35	8.15	75.55
17	4	2	5	3	1	4	8.90	3.30	1.18	4.46	72.98
18	4	3	1	4	2	5	1.37	0.44	0.19	0.67	75.69
19	4	4	2	5	3	1	3.38	1.80	1.02	2.07	47.51
20	4	5	3	1	4	2	5.17	1.07	0.55	2.27	91.16
21	5	1	5	4	3	2	23.32	5.01	1.95	10.09	93.48
22	5	2	1	5	4	3	5.58	1.16	0.45	2.40	94.63
23	5	3	2	1	5	4	4.99	1.79	0.86	2.55	69.36
24	5	4	3	2	1	5	1.81	0.48	0.19	0.83	85.48
25	5	5	4	3	2	1	3.70	2.49	1.34	2.51	38.34

式中： $\mathbf{x}$ 为设计变量； $\mathbf{x}_L$ 和 $\mathbf{x}_U$ 分别为设计变量的上下限值和上限值。

2.3.3 田口实验设计结果

田口试验设计结果如表 3 所示。

2.3.4 多目标一体化优化设计结果

“灰生成”结果如表 4 所示。采用熵权法对各性能指标进行赋权^[12]，得到 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_A 和 V 的权重值分别为 0.376、0.183、0.049、0.228 和 0.164。计算得到各试验组的灰色关联度，如表 4 所示。各设计变量的水平与灰色关联度的主效应图，如图 12 所示，进而选择使得灰色关联度数值最大的设计变量的组合为上模槽孔的直径取 8.1 mm，高度取 3.4 mm、铆钉的外伸量取 6.0 mm、压铆下压位移因子取 0.84、铆钉的材料取 AZ91D、铆接孔直径取 6.10 mm。

表 4 灰色关联分析结果

Table 4 Grey relational analysis results

Reference experiment No.	Grey relational generation					Grey relational coefficient					Grey relational grade
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_A	V	δ_1	δ_2	δ_3	δ_A	V	
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
1	0.941	0.184	1.846	0.150	0.453	0.917	0.380	0.556	0.370	0.478	0.605
2	0.924	0.285	1.732	0.195	0.678	0.889	0.412	0.665	0.383	0.608	0.629
3	0.933	0.352	1.700	0.207	0.803	0.905	0.435	0.703	0.387	0.717	0.660
4	0.319	0.490	1.544	0.657	0.070	0.434	0.495	0.979	0.593	0.350	0.495
5	0.245	1.000	0.757	0.893	0.560	0.408	1.000	0.335	0.824	0.532	0.628
6	0.740	0.195	1.853	0.285	0.000	0.674	0.383	0.551	0.411	0.333	0.499
7	0.057	0.955	0.831	1.000	0.373	0.355	0.917	0.357	1.000	0.444	0.620
8	0.515	0.518	1.535	0.535	0.279	0.521	0.509	1.000	0.518	0.410	0.523
9	0.978	0.356	1.700	0.178	0.935	0.982	0.437	0.703	0.378	0.885	0.715
10	1.085	0.000	1.999	0.000	0.296	0.877	0.333	0.457	0.333	0.415	0.557
11	0.930	0.307	1.692	0.199	0.766	0.900	0.419	0.713	0.384	0.681	0.649
12	0.982	0.136	1.898	0.108	0.435	0.990	0.367	0.518	0.359	0.470	0.624
13	0.120	0.598	1.333	0.832	0.082	0.371	0.554	0.661	0.748	0.353	0.502
14	0.637	0.513	1.396	0.466	0.502	0.594	0.507	0.741	0.484	0.501	0.545
15	1.013	0.134	1.896	0.087	0.588	1.000	0.366	0.520	0.354	0.548	0.639
16	0.327	0.726	1.230	0.734	0.354	0.437	0.646	0.563	0.653	0.436	0.530
17	0.710	0.422	1.646	0.375	0.398	0.649	0.464	0.778	0.444	0.454	0.543
18	1.080	0.013	2.000	0.006	0.351	0.883	0.336	0.456	0.335	0.435	0.564
19	0.981	0.208	1.706	0.142	0.841	0.989	0.387	0.696	0.368	0.758	0.685
20	0.893	0.103	1.871	0.161	0.083	0.845	0.358	0.537	0.373	0.353	0.553
21	0.000	0.667	1.373	0.923	0.042	0.342	0.600	0.710	0.866	0.343	0.527
22	0.873	0.116	1.907	0.174	0.022	0.818	0.361	0.512	0.377	0.338	0.540
23	0.902	0.206	1.760	0.189	0.461	0.857	0.386	0.634	0.381	0.481	0.590
24	1.059	0.018	2.000	0.021	0.181	0.918	0.337	0.456	0.338	0.379	0.569
25	0.965	0.307	1.589	0.185	1.000	0.959	0.419	0.878	0.380	1.000	0.731

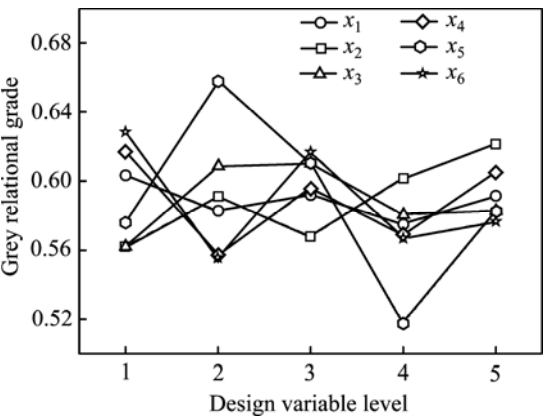


图 12 灰色关联度与设计变量水平的关系

Fig. 12 Effect of design variable levels on grey relational grade

2.3.5 优化结果与讨论

将优化得到的设计参数赋予参数化仿真模型，并在前文相同条件下进行压铆仿真分析，仿真结果表明，优化后的墩头呈“凸”字形，优化前后铆钉钉杆的变形对比如图 13 所示。提取得到铆钉钉杆各测点的相对干涉量值，可得优化前后钉杆各测点相对干涉量对比如图 14 所示。根据式(7)计算得到优化后钉杆的整体平均相对干涉量为 2.36%，较优化前的 1.67%，提升了 41.3%，且小于航空工业标准^[14]和相关研究^[15]推荐的铝合金铆接结构最大干涉量(3.0%)，说明优化后接头的干涉量水平得到大幅提升；根据式(8)计算，得到优化后钉杆的各测点

的相对干涉量的标准差系数为 41.00%，较优化前的 67.49%，降低了 39.3%，如图 15 所示，说明接头的

铆接均匀性得到了大幅提升。上述结果表明，压铆接头的铆接质量得到有效提升。

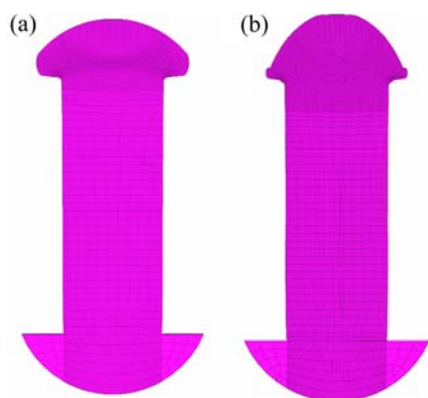


图 13 优化前后铆钉钉杆变形对比

Fig. 13 Comparison of rivet shaft deformation before and after optimization: (a) Before optimization; (b) After optimization

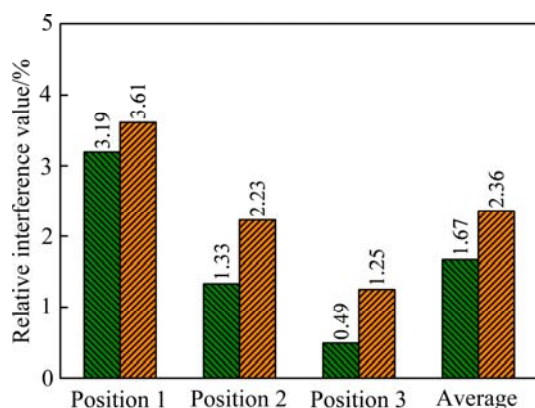


图 14 优化前后铆钉钉杆相对干涉量对比

Fig. 14 Relative interference value comparison of rivet shaft before and after optimization

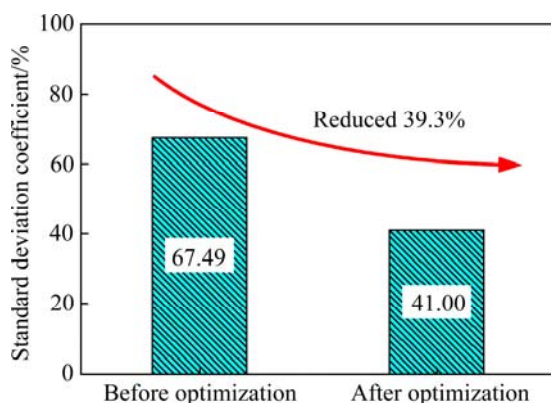


图 15 优化前后标准差系数对比

Fig. 15 Comparison of standard deviation coefficient before and after optimization

3 结论

1) 测量了 5056 铝合金铆钉的压缩以及 6061 铝合金和 ZK61M 镁合金铆接板的拉伸性能，拟合了 5056 铝合金的 Johnson-Cook 材料模型，6061 铝合金以及 ZK61M 镁合金的幂指数材料模型。

2) 建立了十字搭接接头的压铆仿真模型，测量和分析了铆钉各关键测点的相对干涉量以及相对干涉量的均值和标准差系数，将仿真和试验得到的铆钉成型头的尺寸、钉杆各关键测点的相对干涉量、相对干涉量均值和标准差系数进行对比，相对误差均在 10% 以内，说明仿真的可信度较高。

3) 选取铆钉的材料参数，铆钉、母板和模具的结构参数，铆接工艺参数为设计变量，以接头的关键测点的相对干涉量、整体平均相对干涉量和相对干涉量标准差系数为目标，采用田口实验设计和灰色相关分析方法，结合熵权法确定的各目标响应的权重，对压铆接头进行了一体化多目标优化，优化后得到了最为匹配的铆钉材料，得到了最佳的结构和工艺参数。和优化前相比，压铆接头的整体平均干涉量，从 1.67% 提高到 2.36%，提升了 41.3%，且在航天工业标准的推荐范围内，相对干涉量标准差系数，从 67.49% 降低到 41.0%，降低了 39.3%，优化结果表明接头的整体干涉量水平和干涉量均匀度得到了双重提升，进而说明接头的铆接质量得到有效提升。

REFERENCES

- [1] ABDELAL G F, GEORGIU G, COOPER J, et al. Numerical and experimental investigation of aircraft panel deformations during riveting process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering Transactions of the ASME, 2015, 137(1): 011009.
- [2] CUI J J, QI L, JIANG H, et al. Numerical and experimental investigations in electromagnetic riveting with different rivet dies[J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11(6): 839-853.
- [3] AMAN F, CHERAGHI S H, KRISHNAN K K, et al. Study

- of the impact of riveting sequence, rivet pitch, and gap between sheets on the quality of riveted lap joints using finite element method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(1-4): 545–562.
- [4] DE MATOS P F P, MOREIRA P M G P, CAMANHO P P, et al. Numerical simulation of cold working of rivet holes[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 41(9/10): 989–1007.
- [5] DE MATOS P F P, MOREIRA P M G P, PINA J C P, et al. Residual stress effect on fatigue striation spacing in a cold-worked rivet hole[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2004, 42(2): 139–148.
- [6] 张旭. 电磁铆接过程铆钉动态塑性变形行为及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHANG Xu. Research on dynamic plastic deformation behavior and microstructure and mechanical properties of rivets in electromagnetic riveting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [7] 陈如明, 范治松, 黄伍平, 等. 镦窝及凹模对无头铆钉电磁铆接变形的影响[J]. *塑性工程学报*, 2017, 24(5): 25–31.
- CHEN Ru-ming, FAN Zhi-song, HUANG Wu-ping, et al. Effect of dimple structures and concave die on headless rivet deformation in electromagnetic riveting[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24(5): 25–31.
- [8] WANG Z Q, CHANG Z P, LUO Q, et al. Optimization of riveting parameters using Kriging and particle swarm optimization to improve deformation homogeneity in aircraft assembly[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(8): 1–13.
- [9] QIN Y F, JIANG H, CONG Y J, et al. Rivet die design and optimization for electromagnetic riveting of aluminium alloy joints[J]. *Engineering Optimization*, 2021, 53(5): 770–788.
- [10] RANS C, STRAZNICKY P V, ALDERLIESTEN R. Riveting process induced residual stresses around solid rivets in mechanical joints[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44: 323–329.
- [11] WANG D F, XU W C. Fatigue failure analysis and multi-objective optimisation for the hybrid (bolted/bonded) connection of magnesium-aluminium alloy assembled wheel[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 112: 104530.
- [12] CAI K F, WANG D F. Optimizing the design of automotive S-rail using grey relational analysis coupled with grey entropy measurement to improve crashworthiness[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 56(6): 1539–1553.
- [13] DENG J H, TANG C, ZHAN Y R, et al. Effect of die forms on rivet deformation and microstructure[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 634/638: 2827–2830.
- [14] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册[M]. 第2版. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- 《Aeronautical Manufacturing Engineering Manual》Editor-in-Chief. *Aviation manufacturing engineering manual*[M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.
- [15] 杜洪增. 飞机结构疲劳强度与断裂分析[M]. 北京: 中国民航出版社, 1996.
- DU Hong-zeng. *Fatigue strength and fracture analysis of aircraft structure*[M]. Beijing: China Civil Aviation Press, 1996.
- [16] MANES A, PERONI L, SCAPIN M, et al. Analysis of strain rate behavior of an Al 6061 T6 alloy[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 3477–3482.
- [17] 周霞, 赵昌美, 李利, 等. 基于 SHPB 实验的挤压 AZ91D 镁合金动态力学行为数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(8): 1968–1975.
- ZHOU Xia, ZHAO Chang-mei, LI Li, et al. Numerical simulation of dynamic behavior of extruded AZ91D magnesium alloy based on SHPB experiment[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(8): 1968–1975.
- [18] 李春雷. 2A12 铝合金本构关系实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- LI Chun-lei. Experimental investigation into the constitutive relationship of 2A12 aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [19] SKORUPA M, MACHNIEWICZ T, SKORUPA A, et al. Fatigue life predictions for riveted lap joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 41–57.

Multi-objective optimization design of riveting quality considering material-structure-process parameters

XU Wen-chao, WANG Deng-feng

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper proposed a multi-objective optimization design method for the riveting quality of magnesium-aluminum alloy punch-forming rivet joint considering material-structure-process parameters. Firstly, the constitutive model parameters of rivet and riveted sheet materials were obtained through the metal tensile and compression tests; secondly, a finite element simulation model of punch-forming rivet joint was established, and the riveting interference level and uniformity of the rivet joint were analyzed and evaluated, the simulation and test results were compared to verify the accuracy of the simulation; finally, the material, structure and process parameters of the rivet joint were selected as the design variables, the relative interference values of key measuring positions, the average and the standard deviation coefficient of the measured relative interference values were determined as the optimization objectives, an integrated multi-objective optimization of the rivet joint was conducted based on Taguchi experiment and grey relational analysis method, combined with the weight values of the target responses obtained by the entropy weighting method, the optimal combination of the design variable levels was obtained. The results show that after multi-objective optimization, the overall average relative interference value of the rivet joint increases from 1.67% to 2.36%, increases by 41.3%, and the optimized overall average relative interference value is within the range recommended by the aerospace industry standard. The standard deviation coefficient of the relative interference values decreases from 67.49% to 41.0%, decreases by 39.3%. The optimization results show that the overall relative interference level and interference uniformity of the rivet joint are effectively improved.

Key words: punch-forming rivet joint; relative interference value; grey relational analysis; entropy weighting method; multi-objective optimization

Foundation item: Projects(51975244, 51475201) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-11-09; **Accepted date:** 2021-07-19

Corresponding author: WANG Deng-feng; Tel: +86-13504466507; E-mail: caewdf@jlu.edu.cn

(编辑 龙怀中)