

引文格式: 李发桂, 刘全双, 杨凯, 等. 5B70铝合金焊缝的超声振动应力调控技术研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 118–127.

LI Fagui, LIU Quanshuang, YANG Kai, et al. Research on ultrasonic vibration stress control technology of 5B70 aluminum alloy welds[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(19): 118–127.

5B70铝合金焊缝的超声振动应力调控技术研究*

李发桂¹, 刘全双¹, 杨凯², 张斌², 仇恒毅², 高立国², 赖小明², 杨吟飞¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

[摘要] 在航天飞船舱体的数控加工中, 焊接残余应力是导致舱体加工变形的关键因素。为降低加工变形, 本文开展了 5B70 铝合金舱体电子束焊缝的超声振动应力调控仿真与试验研究, 揭示了振幅与处理次数对焊缝残余应力的影响规律, 提出了 45 mm 厚板材对接焊缝的应力调控工艺方案: 超声振幅 30 μm 、重复处理焊缝正面 2 次。应力调控后, 焊缝背面表层的横向残余应力 σ_x 和纵向残余应力 σ_y 峰值分别降低了 33.94% 和 67.05%, 均化率分别为 22.22% 和 22.37%。铣削试验表明, 应力调控后的试样在 Z 方向上的加工变形量减小了 64.48%, 验证了超声振动调控焊接残余应力对降低舱体加工变形的有效性。

关键词: 铝合金舱体; 焊接残余应力; 超声振动; 应力调控; 加工变形

中图分类号: V25; TB404

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.19.118

Research on Ultrasonic Vibration Stress Control Technology of 5B70 Aluminum Alloy Welds

LI Fagui¹, LIU Quanshuang¹, YANG Kai², ZHANG Bin², ZHANG Hengyi², GAO Ligu²,

LAI Xiaoming², YANG Yinfei¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Spacecrafts Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] Welding residual stress is a critical factor contributing to the deformation of spacecraft cabin bodies during CNC machining. To mitigate such machining deformation, this paper conducts simulation and experimental studies on ultrasonic vibration-based stress regulation of electron beam welds in 5B70 aluminum alloy cabin bodies. This reveals the influence of the law of amplitude and treatment times on weld residual stress. A stress regulation process scheme for 45 mm thick plate butt welds is proposed: An ultrasonic amplitude of 30 μm , with two repeated treatments on the front side of the weld. After stress regulation, the peak values of transverse residual stress σ_x and longitudinal residual stress σ_y on the back surface of the weld are reduced by 33.94% and 67.05%, respectively. And the corresponding homogenization rates are 22.22% and 22.37%, respectively. Milling tests show that the machining deformation of the stress-regulated specimens in the Z-direction is reduced by 64.48%, which validating the efficacy of ultrasonic vibration-based regulation of welding residual stress in reducing cabin body machining deformation.

Keywords: Aluminum alloy cabin; Welding residual stress; Ultrasonic vibration; Stress regulation; Machining deformation

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3404704)。

5B70 铝合金具有低密度、高比强度、优良的导热性能及良好的机械加工性等诸多优点^[1-2],不仅适合制造航空、航天、交通等领域的重要零部件,还逐步应用于航天飞船舱体、低温燃料贮箱以及载人深空探测器的主体结构中^[3-4]。因为采用了 5B70 铝合金整体焊接方法,航天飞船舱体的零部件与传统结构相比,数量减少、质量减轻^[5]。但在数控加工过程中,舱体焊缝的焊接残余应力不稳定释放会导致工件变形,影响加工精度和使用寿命^[6]。通过对焊缝及其周围区域采用拉伸、振动时效、超声冲击等后处理工艺,可促使焊缝表层产生塑性形变并促进内部应力释放^[7],从而降低舱体在铣削加工过程中的变形。

超声振动冲击是一种强化金属力学性能的新方法。研究表明,超声振动在金属表面施加冲击载荷可显著细化其表层结构并引起压缩塑性变形,同时,冲击在焊缝中引入残余压应力,从而提高了金属的力学性能^[8-9]。为了研究超声振动的作用机理、振动参数与冲击后残余应力之间的关系,国内外学者对超声振动数值模拟开展了一系列研究。Mo 等^[10]通过 ABAQUS 有限元仿真软件,提出了一种基于固有应变理论的数值分析方法来模拟 304 不锈钢焊接应力叠加和后续的应力叠加,结果表明超声波冲击处理后焊接接头形成了厚度约 0.13 mm 的残余压应力层,数值模拟结果与试验结果一致。Chen 等^[11]提出了一种包括热机械耦合焊接模拟和动态弹塑性超声波冲击处理模拟在内的三维数值分析方法,通过验证,数值计算结果与试验数据相吻合。Zhang 等^[12]采用 COMSOL 有限元仿真方法,研究了超声波振动消除焊接铝合金板残余应力的理论机制,结果表明,经超声振动处理后,铝合金板的残余应力得到降低,且残余应力释放率与引入的振动应力水平成正比。Novák 等^[13]模拟了铝合金电子束焊接工艺参数对残余应力的影响,结果表明,焊缝路径的偏心度为 0.3 mm 时,对焊接结构的 Von Mises 残余应力影响大,第一、第三主应力随着预热温度的升高而减小。贾翠玲等^[14-16]运用 ABAQUS 仿真模拟了超声振动冲击参数对 7A52 铝合金焊接残余应力的影响,试验表明,增大振幅可以显著提高焊缝处残余压应力值;冲击频率增大,焊缝处残余压应力先增大后稳定;增加处理次数,沿焊缝深度方向的残余压应力影响范围增大;随着冲击速度的增大,焊接接头处残余压应力变小。

上述研究通过对比不同铝合金材料的超声振动数值模拟结果与试验结果,证实了超声振动数值模拟的可行性与可靠性。然而,现有研究多聚焦于超声振动处理后焊缝正面受冲击区域的残余应力分布,对焊缝背面受冲击区域的残余应力及零件后续加工变形的关注较少,因此有必要开展深入研究。

1 焊接应力及超声调控仿真

1.1 电子束焊接应力仿真

仿真材料的成分见表 1。5B70 铝合金保留了铝镁合金优良的性能,并且由于 $Al_3(Sc, Zr)$ 相的存在^[17],其耐蚀性和焊接性得到显著提升。为减少仿真时间,对焊缝的超声调控仿真与加工试验均在局部试件上开展,该试件的材料、厚度及焊接工艺均与舱体保持一致。试件模型如图 1 所示,其中焊缝长度为 300 mm,宽为 7 mm,焊缝余高为 1 mm。仿真用铝合金材料的热物理性能参数见表 2,采用完全耦合法分析模型焊接残余应力场,对模型底面节点进行图 2 所示的约束。

表 1 5B70 铝合金材料成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 5B70 aluminum alloy (mass fraction) %

Mg	Mn	Sc	Zr	Cu	Zn	Al
6.17	0.39	0.23	0.13	<0.05	<0.05	余量

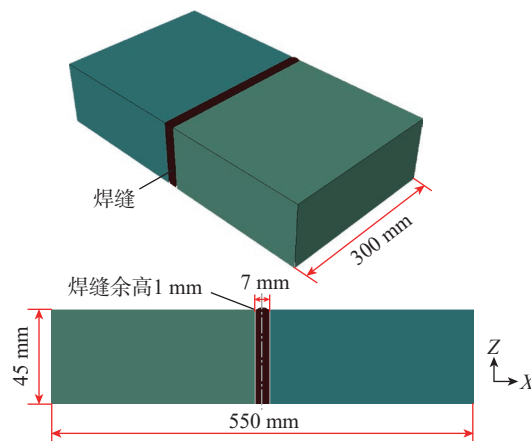


图 1 电子束焊接试件有限元模型

Fig.1 Finite element model of an electron beam welded specimen

表 2 仿真用铝合金热物理性能参数

Table 2 Thermophysical properties of aluminum alloy for simulation

材料参数	性能数值
温度/°C	20, 100, 200, 500, 587, 630
杨氏模量 E /GPa	70, 70, 61, 41, 10, 1
线膨胀系数 $\alpha_l/(\times 10^{-6} \cdot K^{-1})$	0.000093, 1.91, 4.50, 13.3, 15.9, 17.6
泊松比 ν	0.35
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2750, 2730, 2710, 2640, 2630, 2450
热导率 $K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	118, 121, 126, 138, 140, 140
比热 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	898, 951, 1003, 1150, 1195, 1165
屈服强度 σ_s/MPa	130, 100, 54, 10, 5, 5

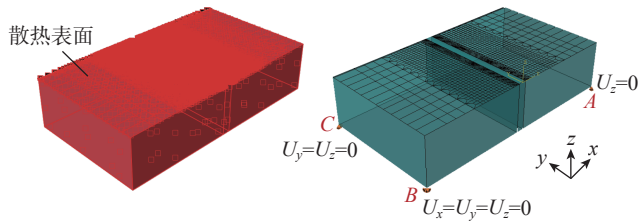


图2 边界条件
Fig.2 Boundary conditions

电子束焊接熔池表面轮廓采用高斯表面热源模型,熔池熔深部分采用高斯旋转体热源模型^[18-19]。通过编写自定义复合热源子程序对焊接速度、热源功率、空间位置、热输入分配等进行描述。图3展示了焊接过程中5 s、9 s、11 s(焊接结束)以及5600 s(冷却结束)4个时刻的等效应力云图。如图4所示,冷却结束后,焊缝以及热影响区表层存在约110 MPa的残余应力。

为了消除焊缝内部的残余应力,本文沿焊缝深度方

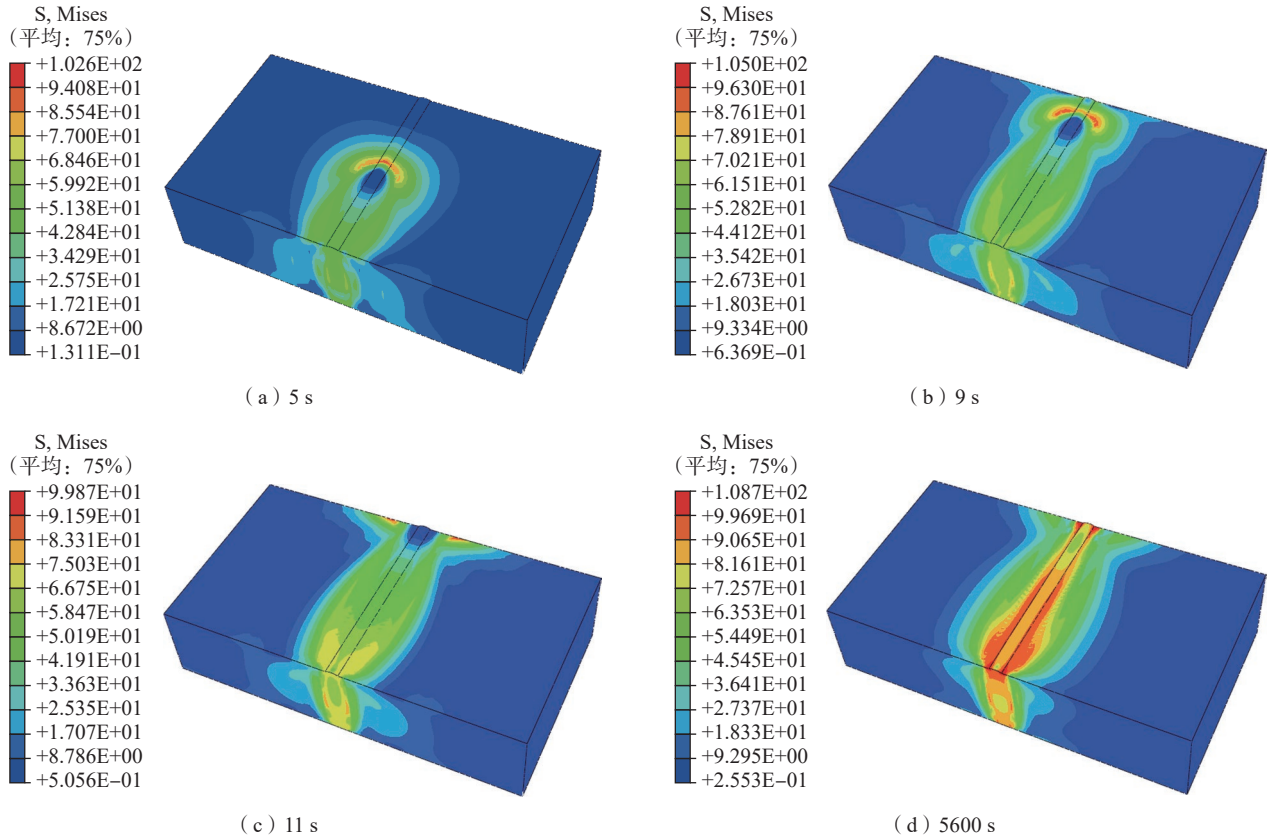


图3 4个时刻的等效应力
Fig.3 Equivalent stress at four moments

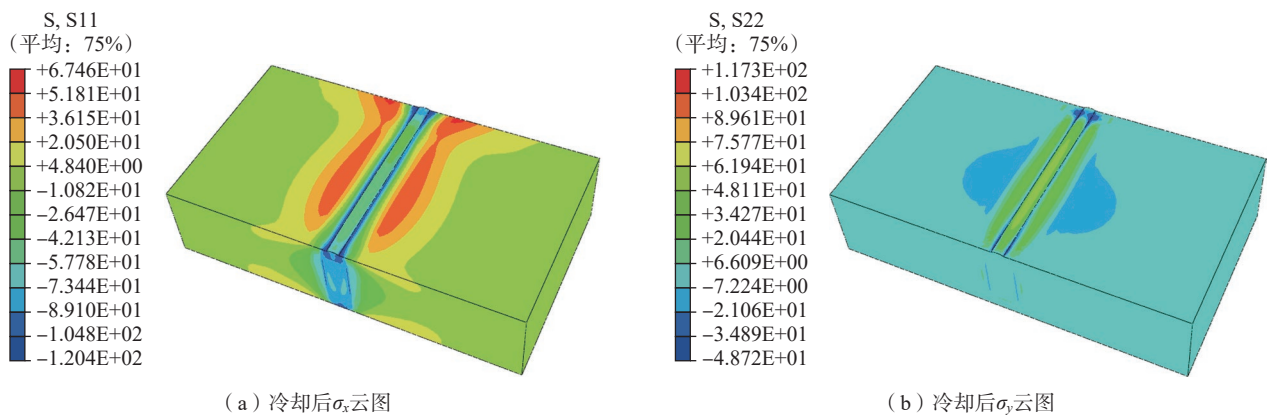


图4 5600 s时残余应力云图
Fig.4 Contour map of residual stress at 5600 s

向(图5 路径 III-III)研究焊接残余应力的分布规律。图6 中路径 III-III 上的焊缝正面、背面表层的横向压应力峰值约为 -52 MPa,焊缝内部则存在峰值约 39 MPa 的拉应力;纵向应力均为拉应力,其中焊缝内部的纵向拉应力峰值约为 118 MPa。因此研究纵向残余应力变化能够直接揭示超声振动对残余应力的影响。

1.2 超声振动应力调控仿真

对 1.1 节中得到的模型进行超声振动处理,处理模型采用 Johnson-Cook, 仿真力学性能参数见表 3。有限元分析中采用 $\Phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的冲击针冲击焊缝

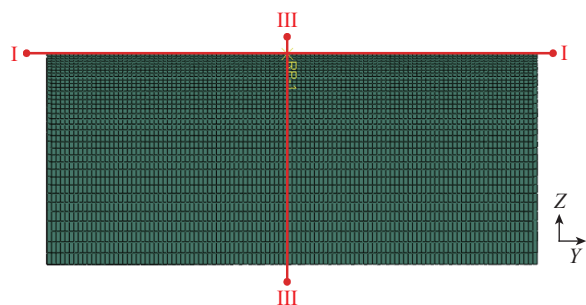


图5 沿焊缝深度方向路径
Fig.5 Path along the weld depth direction

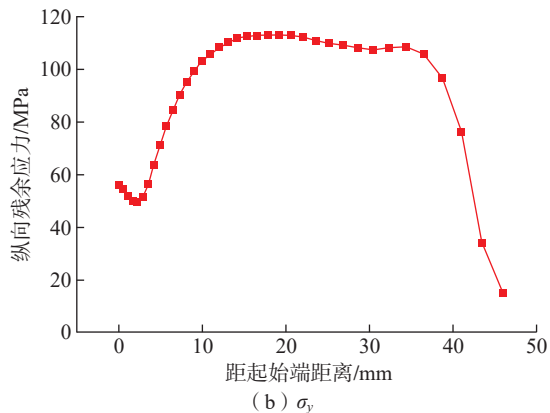
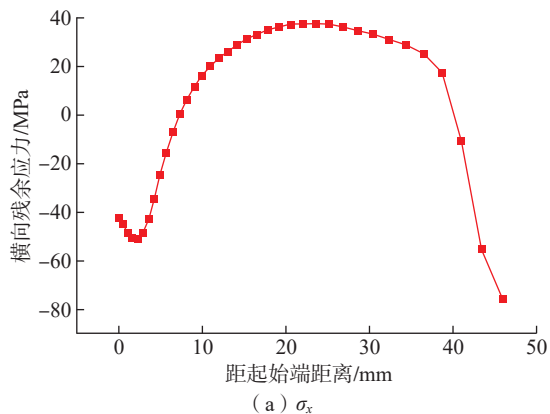


图6 路径 III-III 上的残余应力分布
Fig.6 Distribution of residual stresses on path III-III

中心线,设定冲击频率为 20 kHz,有限元仿真模型如图 7 所示。

选取冲击针头部的冲击中心点作为对象,观察振幅为 50 μm , 振动 0.1 s 后焊缝内应力的变化(图 8),从而确定冲击的时长^[20]。如图 9 所示,焊缝表层残余应力下降至 -200 MPa。

图 10 显示了冲击中心点沿路径 III-III 的位移曲线。0 s 时冲击中心点位于 502 μm 处,振动 0.01 s 时冲击中心点位移下降至 14 μm , 振动 0.02 s 时位移下降至 -287 μm 并趋于稳定。图 11 为冲击中心点沿路径 III-III 的残余应力变化曲线,振动超过 0.02 s 后横向残余应力由 -31 MPa 降低至 -4 MPa 附近,纵向残余应力由 45 MPa 降低至 -35 MPa 附近,因此 0.02 s 为最短冲击时长。

为研究振幅与超声振动影响层的关系,按照表 4 中的数据对模型焊缝进行处理。由图 12 可知,处理后,路

表 3 仿真力学性能参数
Table 3 Mechanical properties for simulation

杨氏模量 E/GPa	密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	C	n	m
70	2750	167.0	443.7	0.022	0.44	2.3

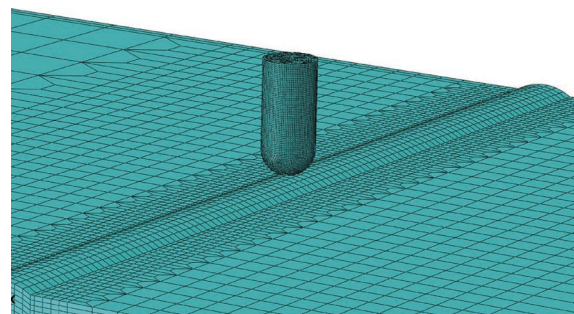


图7 超声振动有限元模型
Fig.7 Ultrasonic vibration finite element model

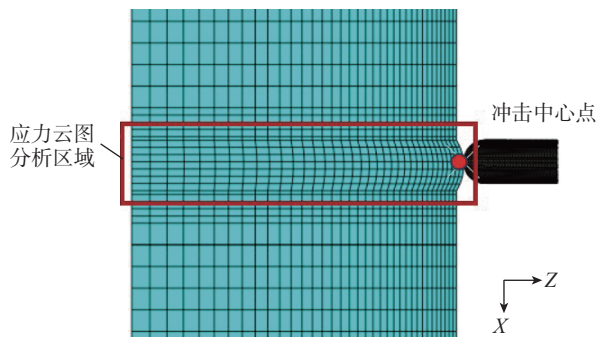


图8 应力云图分析区域
Fig.8 Analysis area of stress contour map

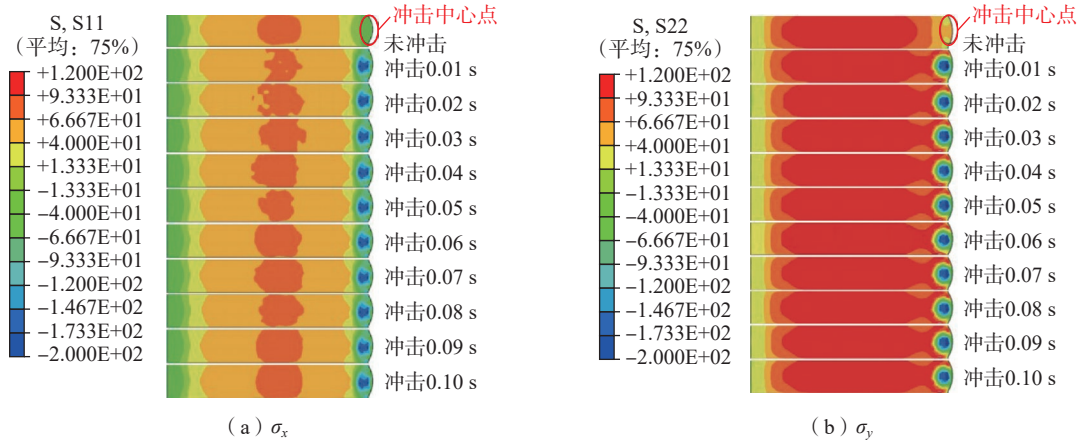


图9 冲击时间对焊缝处应力的影响
Fig.9 Effect of impact time on weld stress

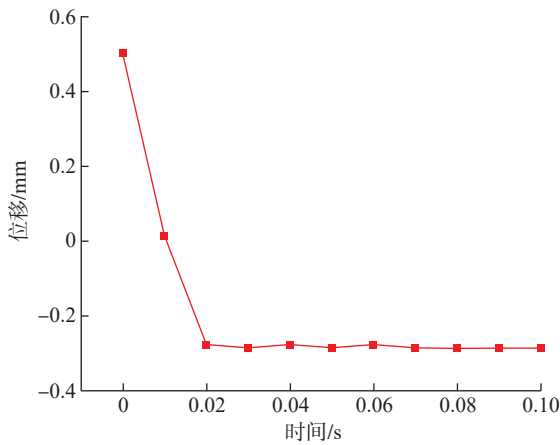


图10 冲击中心点位移变化曲线
Fig.10 Displacement variation curve of the impact center

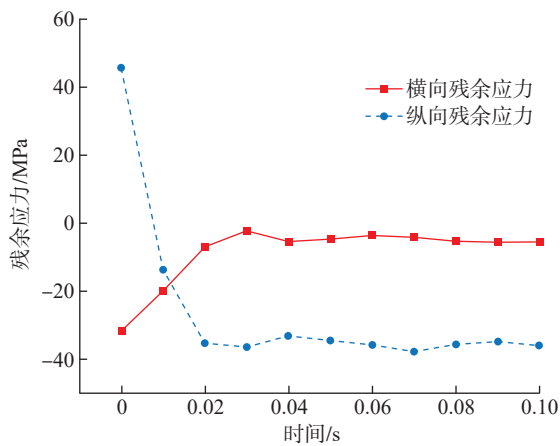


图11 冲击中心点应力变化曲线
Fig.11 Stress variation curves of the impact center

径 III-III 上纵向残余应力由拉应力变为压应力,随着深度的增加压应力先增大后减小,超过 11 mm 后应力趋于平稳。振幅为 20 μm 时焊缝纵向残余压应力的峰值为 -69

表4 超声振动仿真参数

Table 4 Simulation parameters of ultrasonic vibration

超声振动仿真参数	数值
冲击频率 f/kHz	20
振幅 $A/\mu\text{m}$	20, 30, 40, 50
处理次数	1
冲击时长/s	0.02

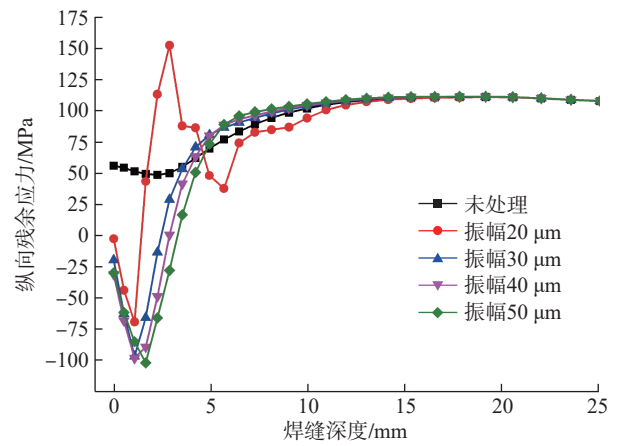


图12 一次冲击处理后路径 III-III 上 σ_y 的变化
Fig.12 Variation of σ_y on path III-III after one impact treatment

MPa,超声振动影响层约为 1.3 mm;振幅为 30 μm 和 40 μm 时残余压应力峰值分别为 -96 MPa 和 -98 MPa,影响层范围分别为 2.65 mm 和 2.8 mm;当振幅为 50 μm 时残余压应力峰值为 -102 MPa,影响层范围为 3 mm。

路径 III-III 上振幅 30 μm 、40 μm 、50 μm 的曲线分布规律基本一致。振幅由 20 μm 增加到 30 μm ,残余压应力峰值和超声振动影响层增幅为 43.48% 和 103.85%,结

合焊缝表层塑性形变确定,在应力调控试验中超声振幅为 $30\ \mu\text{m}$ 。振幅对纵向残余应力分布影响的焊缝剖面云图如图 13 所示。

为研究处理次数与超声振动影响层的关系,分别对焊缝正面处理 6 次,分析路径 III-III 上纵向残余应力的变化情况,如图 14 (a) 所示。两次超声振动处理后的曲线在 11 mm 后和未处理曲线几乎重合,因此影响层约为 11 mm, 3 次及以上处理后的曲线和未处理曲线始终不重合,但仿真模型的最大厚度为 45 mm,所以影响层约为 45 mm。由图 14 (b) 可知,前两次处理后纵向残余应力平均值相近,下降率分别为 15.3% 和 16.1%,从未处理到 3 次处理后,纵向残余应力均值从 89 MPa 下降至 40 MPa,下降率为 55.1%,处理次数增加,纵向残余应力均值减小。

根据上述仿真结果可知,冲击针高频冲击板材焊缝使其表层产生压缩塑性变形,表层残余拉应力降低并产生残余压应力;处理次数增加使焊缝表层产生加工硬化,被冲击区域不再产生塑性变形,此时冲击的能量聚

集在焊缝表层;处理次数继续增加,表层能量通过高频振动向焊缝内部传递,内部的残余应力从拉应力转变为压应力。超声振动重复处理 3 次时,振动影响层扩展到背面,因此可以通过冲击试件焊缝正面,观察焊缝背面残余应力的变化,以此来判断焊缝内部残余应力是否发生改变。

2 应力调控及加工试验

2.1 超声振动应力调控试验

试验采用 JH-Q50 型超声振动冲击枪,振幅 $30\ \mu\text{m}$ 、频率 20 kHz、移动速度 2.5 mm/s,试验装置如图 15 所示。试件尺寸为 $300\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 45\ \text{mm}$, $\Phi 6\ \text{mm}$ 冲击针垂直于焊缝正面并沿着焊缝方向移动。每次超声振动处理后,使用 $\mu\text{-X360}$ 型 X 射线残余应力测定仪沿焊缝方向测量焊缝背面残余应力的情况。

图 16 为未处理和处理 1 次后焊缝背面的残余应力情况,横向残余应力峰值从 $-109\ \text{MPa}$ 下降至 $-100\ \text{MPa}$,降幅 8.26%,横向残余应力平均值从 $-82\ \text{MPa}$ 变为 -81

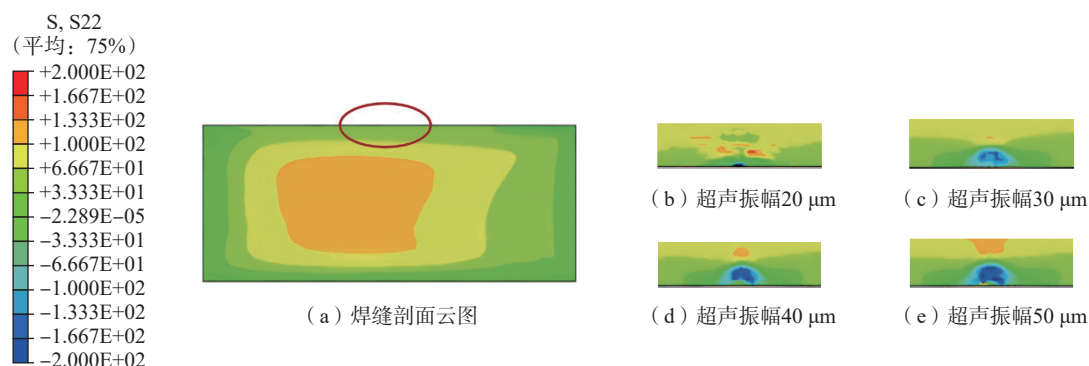


图 13 振幅对表层应力的影响

Fig.13 Effect of amplitude on surface stress

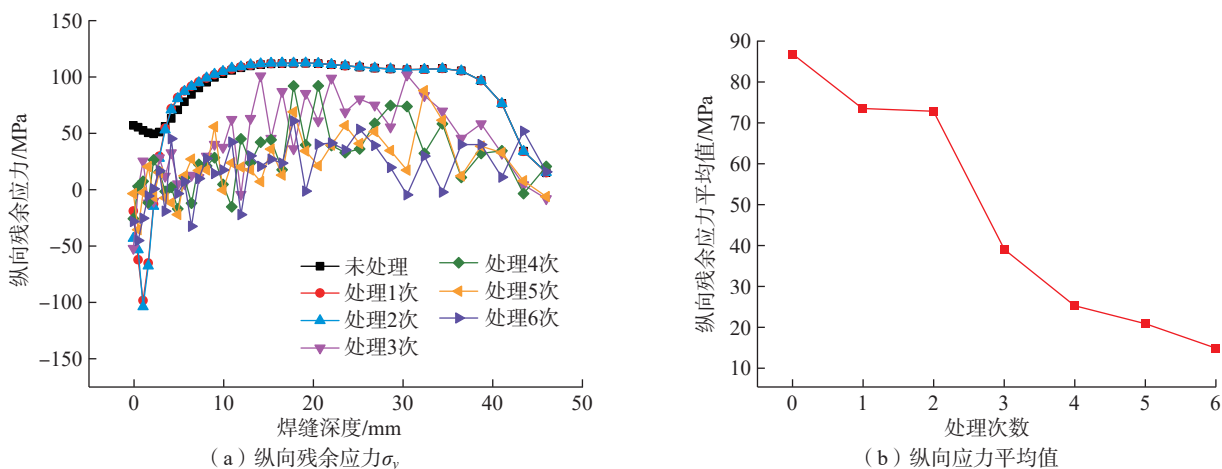


图 14 处理次数对路径 III-III 纵向残余应力的影响

Fig.14 Effect of treatment times on longitudinal residual stress of path III-III

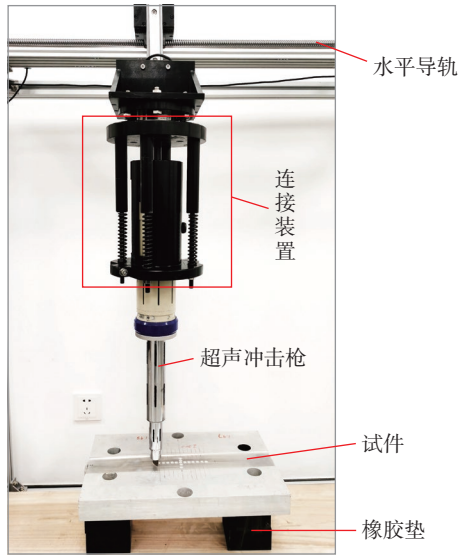


图 15 试验装置图

Fig.15 Diagram of experimental device

MPa, 降幅 1.22% ; 纵向应力峰值从 88 MPa 降低至 78 MPa, 降幅 11.36%, 纵向残余应力平均值从 50 MPa 下降至 45 MPa, 降幅 10.00%。

图 17 显示了未处理和处理 2 次后焊缝背面的残余应力情况, 焊缝背面的横向残余应力峰值从 -109 MPa 降低至 -72 MPa, 降幅为 33.94%, 横向残余应力平均值从 -82 MPa 变为 -56 MPa, 降幅 31.71% ; 纵向残余应力峰值从 88 MPa 变为 -29 MPa, 降幅 67.05%, 纵向残余应力平均值从 50 MPa 变为 -3.5 MPa, 降幅 93.00%。

处理 3 次、4 次后焊缝背面的残余应力分别见图 18 和 19。处理 4 次引起了焊缝背面残余应力的二次加载, 纵向残余应力峰值上升了 30%。

应力均化率是评定振动时效工艺效果的关键指标, 应力均化率的表达式如下。

$$\text{应力均化率} = (\text{冲击前应力离散度} - \text{冲击后应力离散度}) / \text{冲击前应力离散度} \times 100\% \quad (1)$$

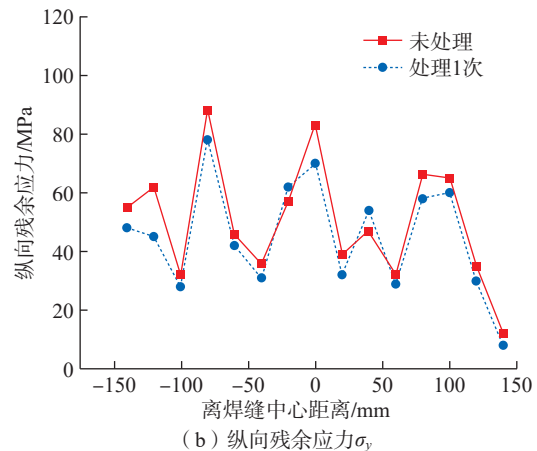
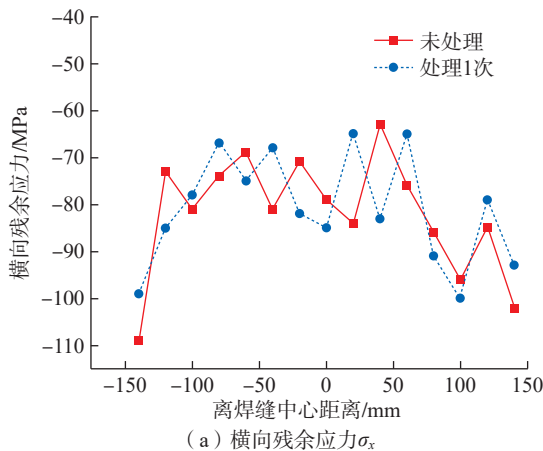


图 16 未处理及 1 次冲击处理后的焊缝背面残余应力对比

Fig.16 Comparison of residual stress on the weld backside between untreated state and after one impact treatment

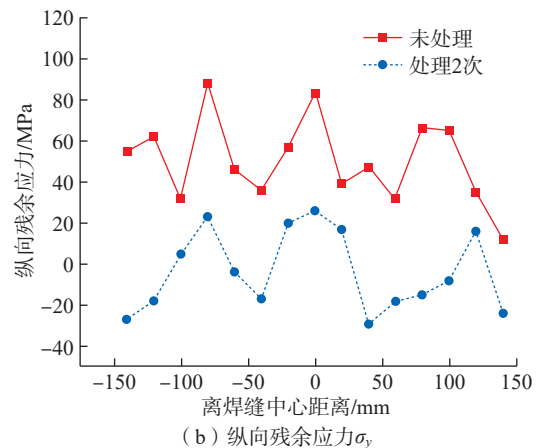
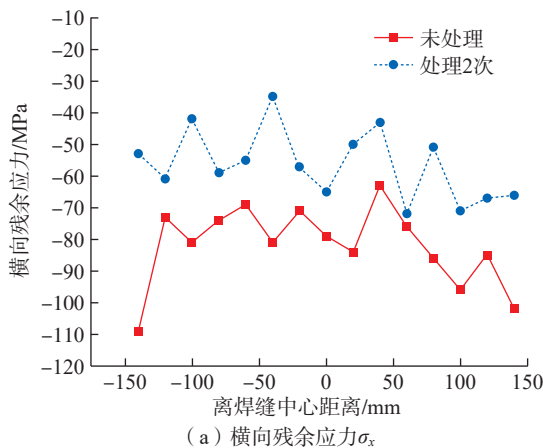


图 17 未处理及 2 次冲击处理后的焊缝背面残余应力对比

Fig.17 Comparison of residual stress on the weld backside between untreated state and after two impact treatments

处理次数对横向、纵向残余应力均化率的影响如表 5 和 6 所示。可以看出,处理两次后焊缝背面的应力均化率为 22.22% 和 22.37%; 处理 3 次、4 次后应力均化率为负值,均化效果较差; 处理 4 次时焊缝背面的纵向应力峰值上升,出现应力二次加载; 考虑到处理次数对

焊缝正面塑性变形的影响,重复处理 2 次为最佳。

2.2 局部焊接试件加工验证

加工试验共有两块 5B70 铝合金 (1 号试件、2 号试件) 进行局部焊接试件。对 2 号试件焊缝正面进行 2 次振幅为 30 μm , 移动速度为 2.5 mm/s 的超声振动处理, 1

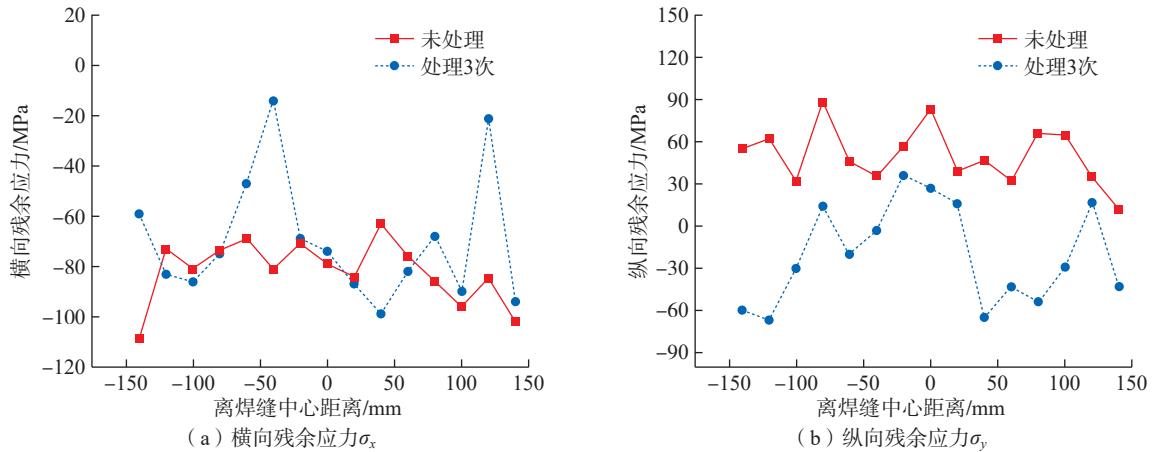


图 18 未处理及 3 次冲击处理后的焊缝背面残余应力对比

Fig.18 Comparison of residual stress on the weld backside between untreated state and after three impact treatments

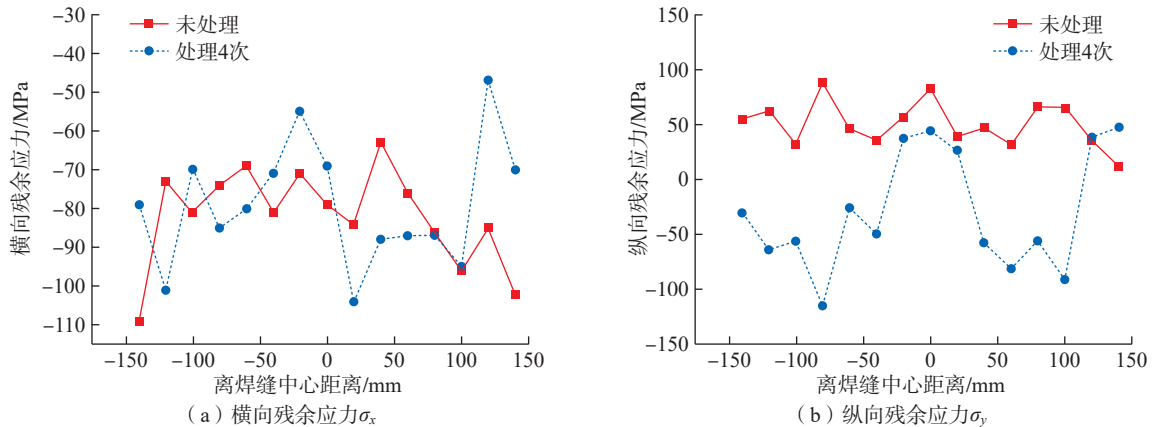


图 19 未处理及 4 次冲击处理后的焊缝背面残余应力对比

Fig.19 Comparison of residual stress on the weld backside between untreated state and after four impact treatments

表 5 处理次数对横向残余应力均化率的影响

Table 5 Impact of treatment times on the homogenization rate of transverse residual stress

处理次数	处理前应力水平/MPa	处理前离散度/MPa	处理后应力水平/MPa	处理后离散度/MPa	应力均化率/%
1	-82	27	-81	19	29.63
2	-82	27	-56	21	22.22
3	-82	27	-70	56	-107.4
4	-82	27	-79	32	-18.52

表 6 处理次数对纵向残余应力均化率的影响

Table 6 Impact of treatment times on the homogenization rate of longitudinal residual stress

处理次数	处理前应力水平/MPa	处理前离散度/MPa	处理后应力水平/MPa	处理后离散度/MPa	应力均化率/%
1	50	38	45	37	2.36
2	50	38	-3.5	29.5	22.37
3	50	38	-20	56	-47.37
4	50	38	-29	86	-126.32

表 7 铣削加工参数

Table 7 Milling processing parameters

主轴转速 $S/(r/min)$	每齿进给量 $f_z/(mm/z)$	切削宽度 a_c/mm	切削深度 a_p/mm	刀具直径 D/mm	刀具刃数
10000	0.15	6	1	10	3

号试件不进行处理。分别对两块试件进行铣削加工,加工参数如表 7 所示。试件加工后网格整体尺寸为 280 mm × 190 mm × 26.5 mm,侧壁厚度为 8 mm,腹板厚度为 8 mm,两个腹板间的加强筋高和宽均为 3 mm (图 20 (a))。在试件上取 3 组测量点,测量在释放装夹后各点位在 Z 方向上的变形量,其中第 2 组测量点在焊缝上(图 20 (b))。

对比分析 1、2 号试件的变形平均值,如图 21 所示。可以看出,释放装夹后,2 号试件测量点的变形平均值相比于 1 号试件明显降低。第 1 组测量点的变形平均

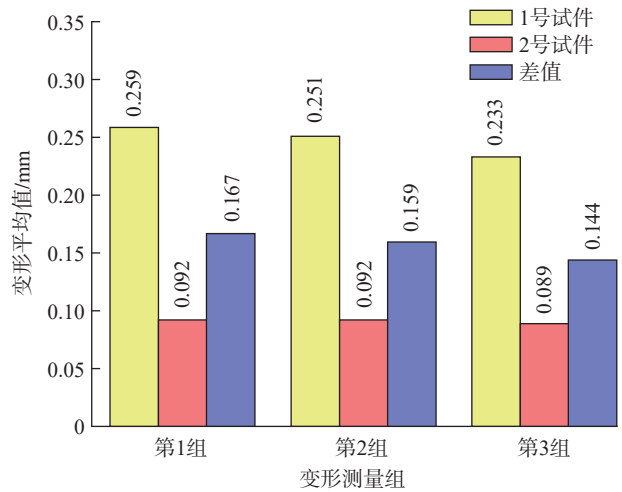


图 21 1 号、2 号试件变形对比

Fig.21 Comparison of deformation of specimens No.1 and No.2

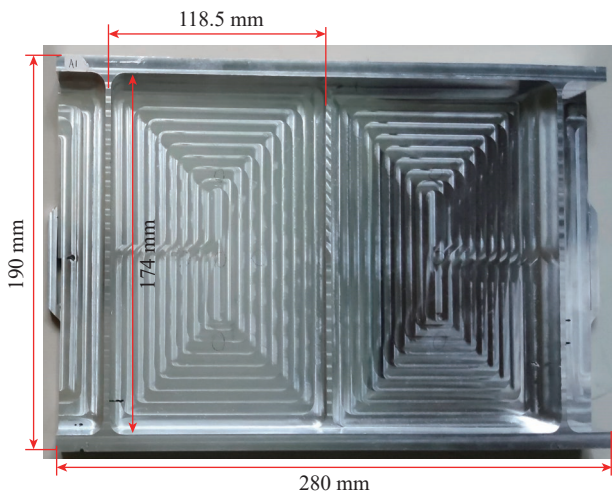
值差值最大,达到 0.167 mm,降低了 64.48%;另外两组的变形平均值分别降至 0.092 mm 和 0.089 mm,降幅为 63.35% 与 61.80%。因此,对 5B70 铝合金舱体局部试件焊缝进行超声振动处理,可显著降低加工成形后试件的变形。

3 结论

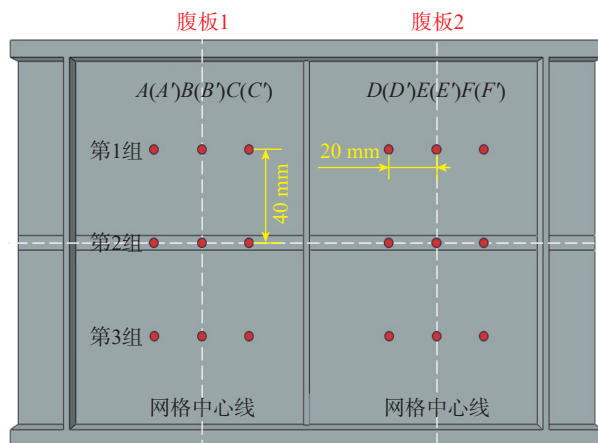
(1) 45 mm 厚 5B70 铝合金板材对接电子束焊接后,在焊缝深度方向上焊缝正面、背面表层的横向应力为峰值约为 -52 MPa 的压应力,焊缝内部是峰值约 39 MPa 的拉应力;纵向应力均为拉应力,焊缝内部峰值约为 118 MPa。

(2) 随着超声振幅、处理次数的增加,焊缝的纵向残余压应力峰值和超声振动影响层深度逐渐增大,超声振动重复处理 3 次时影响层扩展到背面,从而调控了焊缝内部及背部的残余应力。

(3) 针对 45 mm 厚 5B70 铝合金板材的对接焊缝,采用 $\Phi 6$ mm 冲击针,30 μ m 超声振幅、重复处理焊缝正面 2 次,焊缝背面横向残余应力 σ_x 峰值可从 -109 MPa 降至 -72 MPa,降幅 33.94%;纵向残余应力 σ_y 峰值可从 88 MPa 降至 -29 MPa,降幅 67.05%;横、纵向应力均化率分别为 22.22%、22.37%。经超声振动处理的试件在铣削加工后变形平均值降低了 61.80%~64.48%,加工变形得到了有效控制。



(a) 试件尺寸



(b) 测试点位置

图 20 网格试样

Fig.20 Grid sample

参考文献

- [1] CHEN C, SHEN Y P, GAO M, et al. Influence of welding angle on the weld morphology and porosity in laser-arc hybrid welding of AA2219 aluminum alloy[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(1): 37–45.
- [2] 赵云鹏, 曾福明, 周志勇, 等. 新型铝合金的发展及其在密封舱结构上的工程应用[J]. *载人航天*, 2016, 22(3): 302–307.
- ZHAO Yunpeng, ZENG Fuming, ZHOU Zhiyong, et al. Development and potential applications of advanced aluminum alloy in spacecraft pressurized cabin[J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22(3): 302–307.
- [3] 赵艳秋. 5A06 铝合金激光-MIG复合焊接气孔缺陷形态与影响因素研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- ZHAO Yanqiu. Research on the porosity morphology and influence factors in laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [4] 刘永康, 王博, 赖小明, 等. 密封舱结构材料5B70铝合金高压压缩实验与晶体塑性模拟研究[J]. *载人航天*, 2021, 27(2): 135–142.
- LIU Yongkang, WANG Bo, LAI Xiaoming, et al. High temperature compression test and crystal plasticity simulation study on structure material of 5B70 aluminum alloy for sealed cabin[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, 27(2): 135–142.
- [5] 孟松, 刘刚, 方杰, 等. 铝合金新材料在载人密封舱主结构中的应用研究进展[J]. *航天器环境工程*, 2015, 32(6): 571–576.
- MENG Song, LIU Gang, FANG Jie, et al. Review of new aluminum alloy materials used in large sealed cabin for manned spaceflight[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32(6): 571–576.
- [6] 张铁浩, 王洋, 方喜凤, 等. 残余应力检测与消除方法的研究现状及发展[J]. *精密成形工程*, 2017, 9(5): 122–127.
- ZHANG Tiehao, WANG Yang, FANG Xifeng, et al. Research status and development of residual stress detection and elimination methods[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2017, 9(5): 122–127.
- [7] GUO Z W, LONG W M, WANG B, et al. Progresses on research and application of welding residual Stress regulation technologies[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(2): 112–121.
- [8] 童第华, 王乃境, 丛家慧, 等. 超声冲击对SMA490BW耐候钢焊接接头腐蚀疲劳的影响[J]. *有色金属工程*, 2024, 14(3): 1–9.
- TONG Dihua, WANG Naijing, CONG Jiahui, et al. Effect of ultrasonic impact on corrosion fatigue performance of welded joint of SMA490BW steel[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2024, 14(3): 1–9.
- [9] 刘成豪, 陈芙蓉. 超声冲击强化7A52铝合金VPPA-MIG焊接接头的疲劳性能[J]. *材料导报*, 2022, 36(15): 141–145.
- LIU Chenghao, CHEN Furong. Fatigue properties of the VPPA-MIG welded joint of the 7A52 aluminum alloy strengthened by ultrasonic impact[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(15): 141–145.
- [10] MO T, CHEN J Q, ZHANG P J, et al. Numerical simulation of the effect of ultrasonic impact treatment on welding residual stress[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2021, 35(17): 2150175.
- [11] CHEN J F, CHU J Y, JIANG W C, et al. Experimental and numerical simulation to study the reduction of welding residual stress by ultrasonic impact treatment[J]. *Materials*, 2020, 13(4): 837.
- [12] ZHANG Q L, YU L, SHANG X F, et al. Residual stress relief of welded aluminum alloy plate using ultrasonic vibration[J]. *Ultrasonics*, 2020, 107: 106164.
- [13] NOVÁK P, SÁGA M, VAŠKO M, et al. Numerical simulation of electron beam welding of aluminum alloys[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2022, 357: 02008.
- [14] 贾翠玲, 陈芙蓉. 超声冲击工艺参数对装甲铝合金焊接应力影响的有限元分析[J]. *焊接学报*, 2016, 37(2): 9–12, 84, 129.
- JIA Cuiling, CHEN Furong. Numerically simulating the effect of ultrasonic impact parameters on welding stress in 7A52 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(2): 9–12, 84, 129.
- [15] 贾翠玲, 陈芙蓉. 基于ABAQUS的铝合金超声冲击处理有限元模拟[J]. *内蒙古工业大学学报*, 2016, 35(3): 201–206.
- JIA Cuiling, CHEN Furong. Finite element simulation of ultrasonic impact treatment of aluminum alloy based on ABAQUS[J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology*, 2016, 35(3): 201–206.
- [16] 贾翠玲, 陈芙蓉. 超声冲击工艺参数对装甲铝合金焊接应力影响的有限元分析[J]. *焊接学报*, 2016, 37(2): 9–12, 84.
- JIA Cuiling, CHEN Furong. Numerically simulating the effect of ultrasonic impact parameters on welding stress in 7A52 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(2): 9–12, 84.
- [17] 吴飞飞, 姜锋, 路丽英, 等. 5B70铝合金大规格锻环不同位置的显微组织和位错密度[J]. *轻合金加工技术*, 2022, 50(2): 55–61, 67.
- WU Feifei, JIANG Feng, LU Liying, et al. Microstructure and dislocation density evolution in different positions of large-size 5B70 aluminum alloy forged ring[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2022, 50(2): 55–61, 67.
- [18] LUO Y, LIU J H, YE H. Simulation on the thermal behavior in vacuum electron beam welding of magnesium alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 189–193: 3317–3325.
- [19] ZHANG B G, CHEN G Q, GUO W, et al. Finite element analysis of thermal effect on large thick titanium alloy electron beam welding with different focus[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 152–154: 665–671.
- [20] 李进一, 凌祥, 周建新. 超声冲击残余应力场的有限元模拟[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(1): 84–88.
- LI Jinyi, LING Xiang, ZHOU Jianxin. Finite element simulation of residual stress field induced by ultrasonic impact treatment[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(1): 84–88.

通信作者: 杨吟飞, 教授, 博士, 研究方向为大型结构件精密切削技术。

(责编 七七)