

复合喷丸对 2024-T3 铝合金表面形貌及残余应力影响机制

韩明刚¹,周利娟²,王子昱^{3a},张龙波^{3a},宋彦峭^{3b}

(1. 咸阳职业技术学院 机电学院,陕西 西安 712000;

2. 中航西飞汉中航空零组件制造有限公司,陕西 汉中 723000;

3. 南京航空航天大学 a. 机电学院; b. 航空学院; 江苏 南京 210016)

摘要:采用有限元方法,探讨复合喷丸对 2024-T3 铝合金表面变形、残余应力、等效塑性应变影响规律,结果表明:一次喷丸下,随着弹丸尺寸从 0.6 mm 增加至 1.8 mm,材料表面变形量差值显著增加,材料内残余应力层深度与塑性应变层深度也随着增大,而最大残余应力并没有展现出明显的规律;在二次喷丸作用下,材料表面变形更加均匀,但局部变形量较小,在 10 μm 以内,二次喷丸对材料内残余应力层深度与塑性应变层深度并没有显著影响。

关键词:复合喷丸;2024-T3 铝合金;表面形貌;残余应力;影响机制

中图分类号:TG146.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)04-0052-05

Influence Mechanism of Composite Shot Peening on Surface Morphology and Residual Stress of 2024-T3 Aluminum Alloy

HAN Minggang¹, ZHOU Lijuan², WANG Ziyu^{3a}, ZHANG Longbo^{3a}, SONG Yanqiao^{3b}

(1. Institute of Electrical and Mechanical, Xianyang Vocational Technical College, Xi'an 712000, China;

2. AVIC XAC Aerostructure (Hanzhong) Manufacturing Co., Ltd., Hanzhong 723000, China;

3. a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The effects of composite shot peening on surface deformation, residual stress and equivalent plastic strain of 2024-T3 aluminum alloy were studied by finite element method. The results show that the deformation increases significantly with the increase of shot size from 0.6 mm to 1.8 mm. And the depth of residual stress layer and plastic strain layer also see an increase, but the maximum residual stress shows no obvious rules. The secondary shot peening brings about more uniform surface deformation of the material, but with less local deformation. Thus secondary shot peening has no significant effect on the depth of residual stress layer and plastic strain layer within 10 μm.

Keywords: composite shot peening; 2024-T3 aluminum alloy; surface morphology; residual stress; influence mechanism

0 引言

喷丸作为一种表面处理方法,可显著提高工件的疲劳寿命^[1]。复合喷丸是指在一次喷丸的基础上,采用小尺寸弹丸对材料表面再次进行喷丸,从而使工件获得更好的残余应力场和表面形貌的一种表面处理方式^[2]。

李克等^[3]研究表明复合喷丸后使材料表面质量提高,材料表面更加细密均匀。华程等^[4]研究了单次喷丸和复合喷丸工艺下材料表面形貌、表面粗糙度、残余应力场的分布特征,研究表明复合喷丸能够获得更平整的表面形貌和表面粗糙度。陈天运等^[5]研究了喷丸对材料疲劳性能的影响,研究发现复合喷丸改善了表面粗糙度,抑制了加工刀痕,使零件疲劳强度极限值较未喷丸零件提高了 37%,提高了零件抗疲劳断裂的能力。梁若等^[6]采用有限元方法建立了复合喷丸周期性有限元模型,发现复合喷丸

使材料表面残余应力更加均匀。

本文以 2024-T3 铝合金为研究对象,研究一次喷丸和二次喷丸工艺对材料的表面形貌特征、残余应力的分布以及等效塑性应变的影响规律,为后续进一步研究材料性能提供依据。

1 试验材料与有限元模型

1.1 试验材料与方案

试验材料选用 2024-T3 铝合金,其弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2.77 g/cm³。

喷丸属于高应变率问题,因此对材料塑性行为采用 Johnson-Cook 进行描述,如式(1)^[7]所示,其具体参数如表 1^[8]所示。

基金项目:江苏省重点研发计划项目(KYCX21_0231);江苏省研究生创新计划项目(BE2021060)

第一作者简介:韩明刚(1984—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为机械制造与自动化。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力, MPa; A 为屈服应力, MPa; B 为材料应变强化参数, MPa; n 为硬化指数; C 为应变率强化参数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T 为当前温度, $^{\circ}\text{C}$; T_r 为参考温度, $^{\circ}\text{C}$; T_m 为材料熔点, $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 2024-T3 Johnson-Cook 本构模型参数

A/MPa	B/MPa	n	C	m	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_r/^{\circ}\text{C}$
285	426	0.34	0.015	1.7	620	25

表中 m 为软化系数。

表 2 列出了仿真方案, 其中一次喷丸直径分别为 0.6 mm、1.2 mm 与 1.8 mm, 复合喷丸(本文选用二次喷丸)采用 0.3 mm 弹丸进行光整喷丸。

表 2 仿真实验方案 单位: mm

编号	一次喷丸弹丸直径	编号	复合喷丸弹丸直径
Case1	0.6	Case4	0.6+0.3
Case2	1.2	Case5	1.2+0.3
Case3	1.8	Case6	1.8+0.3

在喷丸仿真中, 喷丸压力与流量分别为 0.4 MPa 与 10 kg/min。根据式(2)^[9]计算当前工艺下弹丸速度汇总于表 3 中。

$$v = \left(\frac{16.350P}{1.530q_m + P} + \frac{29.500P}{0.598d + P} + 4.830P \right) \quad (2)$$

式中: v 为弹丸速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P 为喷丸压力, 0.1 MPa; q_m 为喷丸流量, kg/min ; d 为弹丸直径, mm 。

表 3 仿真弹丸速度

项目	弹丸直径 / mm	弹丸速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
一次喷丸	0.6	49.78
	1.2	47.72
	1.8	45.95
二次喷丸	0.3	50.94

1.2 随机弹丸建模方法

为了保证仿真与实际喷丸更为接近, 采用随机弹丸法进行建模, 计算单弹丸凹坑直径, 根据凹坑直径计算 0.6 mm×0.6 mm 正方形区域内, 覆盖率为 97% 以上弹丸所需数量, 并采用统计学方法选择不同工况下弹丸数量的中位值, 最终确定弹丸个数, 弹丸生成逻辑如图 1 所示, 弹丸个数和覆盖率见表 4。

表 4 弹丸个数及覆盖率

弹丸直径 / mm	0.6	1.2	1.8	0.3
弹丸个数 / 个	50	14	7	125
覆盖率 / %	98.1	99.1	100.0	98.3

1.3 有限元模型

根据 1.2 节所述方法, 一次喷丸与二次喷丸建模如图

2 所示。为了进一步保证有限元模型计算的准确性, 在应力梯度较大区域进行了网格二次加密, 网格最小尺寸为 0.01 mm, 单元类型采用 C3D8R, 摩擦系数采用 0.05。弹丸设置为刚体, 基体整体尺寸为 6 mm×6 mm×6 mm 立方体, 且底部自由度全部约束。

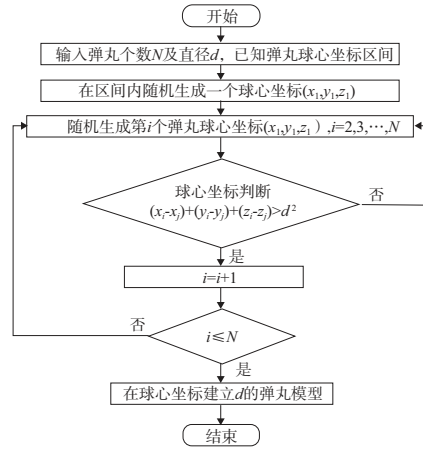


图 1 随机弹丸生成流程图



图 2 有限元模型

2 结果与讨论

2.1 复合喷丸下表面形貌演变规律

图 3 为一次喷丸与二次喷丸工艺下表面形貌等高线图。从图中可以看出, 在一次喷丸中, 随着弹丸尺寸的增大, 其等高线分布更加稀疏, 这意味着弹坑也就更加显著, 且弹坑更深, 从 25 μm 增加至 58 μm ; 在二次喷丸后, 材料表面形貌更加复杂, 尤其是当一次喷丸弹丸尺寸分别为 1.2 mm 与 1.8 mm 时, 二次喷丸有明显的表面形貌变化, 然而 0.6 mm 弹丸表面形貌变化并不显著。

为进一步说明一次喷丸与二次喷丸表面形貌变化规律, 提取表面中心位置高度曲线进行对比分析(图 3)。如图 3(a)所示, 当弹丸尺寸为 0.6 mm 时, 经 0.3 mm 小弹丸二次喷丸后, 其表面高度变化不大, 而 1.2 mm 与 1.8 mm 弹丸经二次喷丸后期高度有所下降, 在 10 μm 以内。结合图 3 与图 4, 二次喷丸有对表面形貌有一定的改善作用, 但其效果并不十分显著, 这可能是由于覆盖率较低所导致的。

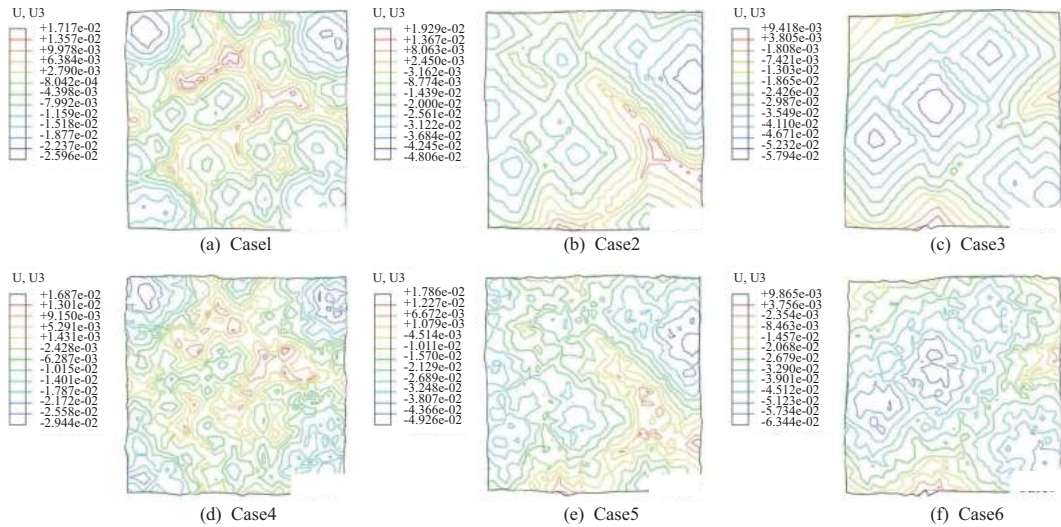


图3 一次喷丸与二次喷丸工艺下表面形貌等高线图

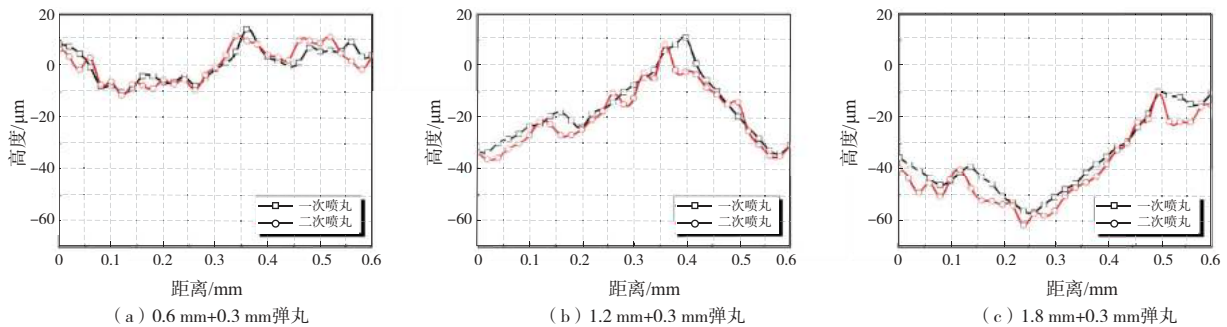


图4 一次喷丸与二次喷丸表面中心位置高度曲线

2.2 复合喷丸下材料内 PEEQ 分布规律

图5为一次喷丸与二次喷丸工艺下等效塑性应变(PEEQ)分布云图。从图中可以看出,随着弹丸尺寸的增加,塑性变形层深度明显增加。然而,当弹丸尺寸较小时(0.6 mm与1.2 mm),材料表层塑性应变分布并不均匀,局部塑性应变较大。这是由于覆盖率相同的情况下,小弹丸需要更多的弹丸个数,可能导致同一位置处弹丸撞击次数较多,材料塑性变形累积较大。经二次喷丸后,材料表层塑性变形更加均匀。然而在0.6 mm与0.3 mm复合喷

丸下,材料表面局部仍存在较大的塑性变形区域,并没有在二次喷丸后得到改善。

图6进一步揭示了一次喷丸与二次喷丸工艺下沿深度方向 PEEQ 分布规律。从图6中可以看出,喷丸后材料表面出现明显的塑性变形层,且随着深度的增加,塑性变形减小;在相同位置处,随着弹丸尺寸的增加,塑性变形更大;二次喷丸后,在材料的近表层塑性应变明显增大。这是由于二次喷丸塑性应变累积所导致。然而,随着深度的增加,一次喷丸和二次喷丸塑性应变基本趋于一致,说明二次喷丸对材料内塑性应变的影响较小。

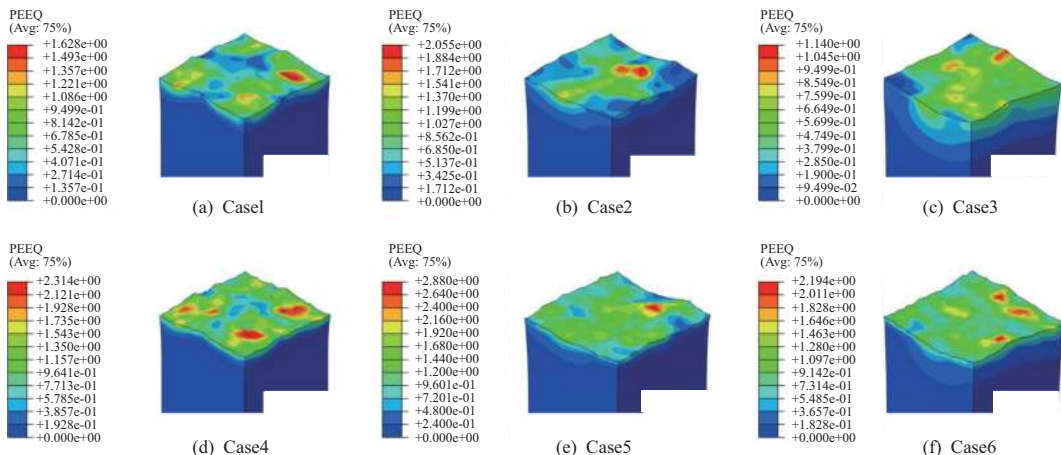


图5 一次喷丸与二次喷丸工艺下 PEEQ 分布云图

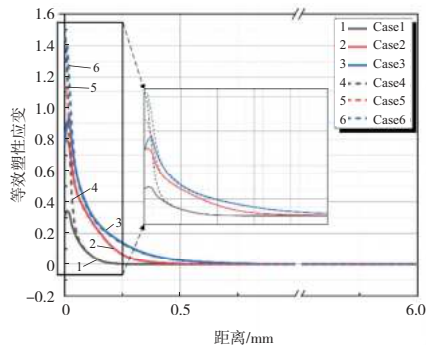


图6 一次喷丸与二次喷丸工艺下沿深度方向 PEEQ 分布曲线

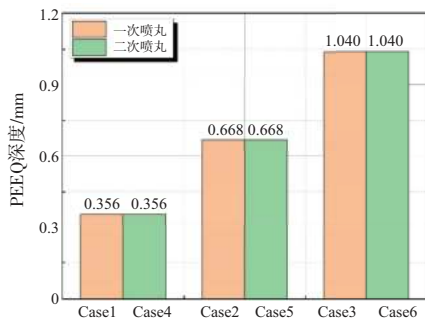


图7 一次喷丸与二次喷丸工艺下 PEEQ 深度

图7与图8进一步给出了一次喷丸与二次喷丸工艺下 PEEQ 深度与最大值。从图7中可以看出,当弹丸尺寸分别为 0.6 mm、1.2 mm、1.8 mm 时,塑性应变层深度分别为 0.356 mm、0.668 mm、1.040 mm,基本呈现出线性增加规律。然而,塑性应变层深度在二次喷丸作用下没有发生改变,因此塑性应变层深度主要取决于一次喷丸的弹丸尺寸大小。此外,从图8可知,无论是一次喷丸还是二次喷丸,材料内 PEEQ 变化并没有显著规律。这主要是由于弹丸随机撞击导致。

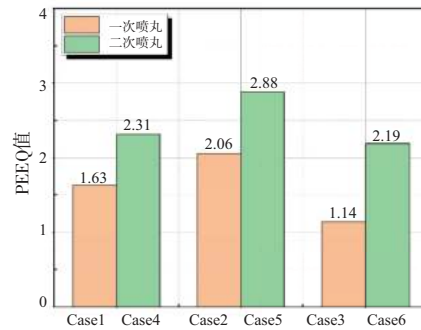


图8 一次喷丸与二次喷丸工艺下最大 PEEQ 值

2.3 复合喷丸下材料内残余应力分布规律

图9为一次喷丸与二次喷丸工艺下金属表面残余应力分布云图。由图可知,随着弹丸尺寸的增加,残余压应力层深度显著增加,这与先前的研究一致,而内部残余应力在随机弹丸的撞击下呈现不均匀分布,在二次喷丸作用下,材料表面残余应力基本为压应力,相较于一次喷丸,应力分布更加均匀。

图10进一步揭示了残余应力沿深度方向的分布规律。从图中可以看出,在喷丸作用下,材料表层整体呈现残余压应力,内部为拉应力,而材料内残余应力的分布主要取决于一次喷丸(即大弹丸作用)。当弹丸尺寸为 0.6 mm 时,二次喷丸和一次喷丸残余应力分布基本保持一致,而当弹丸尺寸为 1.2 mm 与 1.8 mm 时,材料表层残余压应力无显著变化,而其内部残余拉应力有略微增大的趋势。

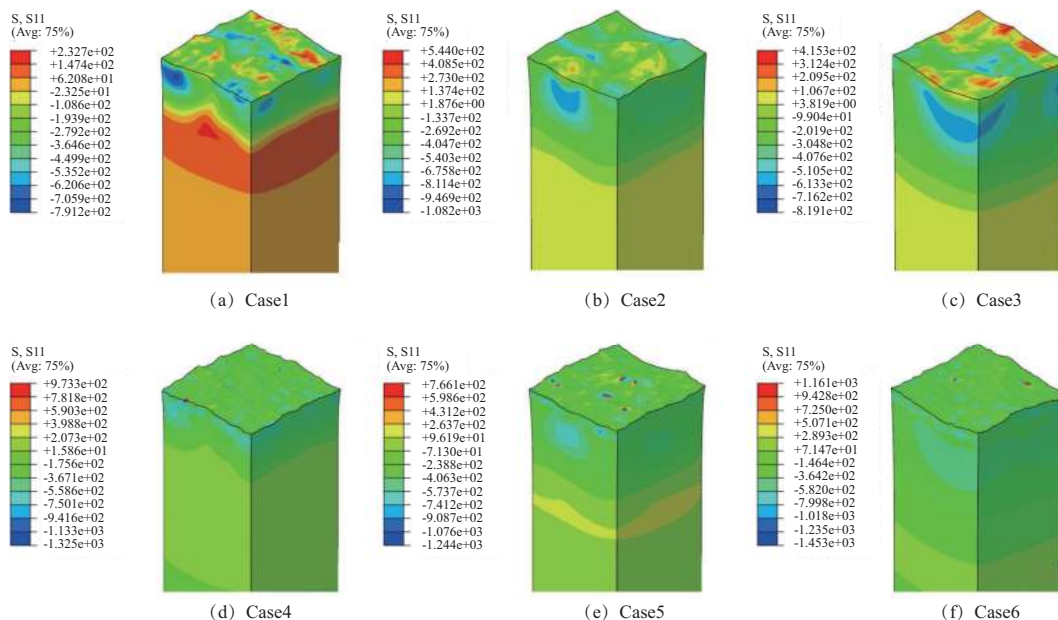


图9 一次喷丸与二次喷丸工艺下金属表面残余应力分布云图

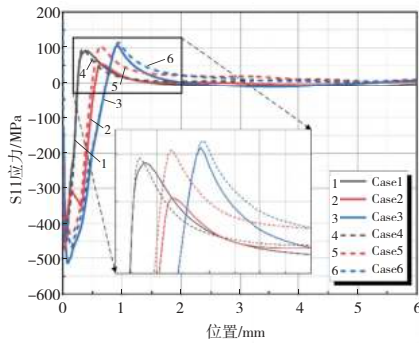


图 10 一次喷丸与二次喷丸工艺下沿深度方向平均残余应力曲线

图 11 与图 12 分别为一次喷丸与二次喷丸工艺下残余应力层深度与最大值。从图 11 可知,弹丸尺寸从 0.6 mm 提高至 1.8 mm 时,其残余压应力层深度由 0.250 mm 提高至 0.749 mm,说明弹丸尺寸越大,其残余压应力作用层更深,而二次喷丸对残余压应力层并没有显著影响。因此,当弹丸覆盖率为 97% 以上时,小弹丸更多的还是光整作用。从图 12 可知,残余压应力的最大值并没有展现出很好的规律性,这是由于相同覆盖率下,因弹丸的随机撞击,可能导致相同位置处发生多次撞击情况,因此所引起的残余压应力值也并不相同。

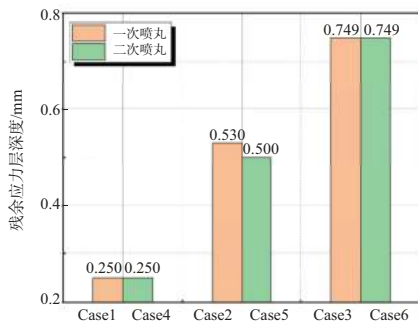


图 11 一次喷丸与二次喷丸工艺下残余压应力层深度

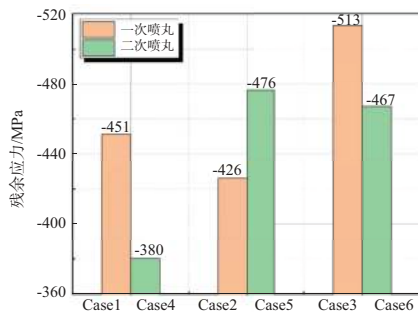


图 12 一次喷丸与二次喷丸工艺下最大残余压应力

3 结语

本文以 2024-T3 铝合金为研究对象,研究了一次喷丸与二次喷丸下材料表面形貌及内部残余应力与塑性应变演变规律,结论如下:

1) 相比于一次喷丸,二次喷丸可在一定程度上降低材料表面粗糙度,但在弹丸覆盖率为 97%~100% 时,这种改善作用并不显著;

2) 随着弹丸尺寸增加,塑性应变层深度加大,在二次喷丸下,材料表面塑性应变会进一步累积,且塑性应变分布更均匀;但当深度超过一定值后,二次喷丸对材料内塑性应变分布基本没有影响;

3) 喷丸后材料内残余应力的深度随着弹丸尺寸增大显著增加,二次喷丸材料内应力分布不变,当覆盖率为 97%~100% 时,二次喷丸不会导致更深的残余应力层,且在随机弹丸的作用下,最大残余压应力值并没有出现明显分布规律。

参考文献:

- [1] 胡孝均. 螺旋弹簧断裂失效分析[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 57-60, 88.
- [2] 韩雨辰,朱文龙,姜传海. 复合喷丸对铝-铜-镁合金表面形貌和硬度的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(5): 6-9, 13.
- [3] 李克,朱文龙,宋逸思,等. 复合喷丸对 0Cr₁₆Ni₅Mo₁ 马氏体不锈钢表面组织和性能的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(12): 32-37.
- [4] 华程,姚兰,李国庆,等. 复合喷丸强化对 A-100 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 137-142.
- [5] 陈天运,盛伟. 复合喷丸对 300M 钢圆筒零件疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(7): 183-185.
- [6] 梁若,庞思勤,程冠华,等. 34CrNiMo6 钢复合喷丸强化的有限元模拟[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 99-103, 108.
- [7] 赵莉莉,王建明,裴信超,等. 喷丸残余应力场有限元数值模拟分析[J]. 材料保护, 2015, 48(1): 17-20, 6.
- [8] TAHAN G, ARRIGONI M, BIDAUD P, et al. Evolution of failure pattern by laser induced shockwave within an adhesive bond[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106224.
- [9] 卢国鑫,王强,陆峰. 300M 钢多弹丸喷丸强化的有限元模拟[J]. 材料保护, 2014, 47(1): 28-30, 43, 8.

收稿日期: 2022-04-12