

不同丸粒对铝合金表面喷丸影响的仿真分析及实验

陈家伟, 廖凯, 李立君, 高自成, 钟利萍

(中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘 要: **目的** 研究不同材质丸料喷丸处理对铝合金材料表面粗糙度的影响情况。**方法** 首先利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 建立多丸撞击铝合金靶材的有限元模型, 并且根据 Ra 离散化计算式, 统计有限元模型节点位移数据, 计算仿真粗糙度值。然后改变模型材料参数, 得到不同材质丸料对粗糙度的影响情况。再结合实验所得粗糙度值和硬度值, 分析验证丸料材质对表面粗糙度和硬度值的影响规律。**结果** 实验值与模拟值对比表明, 喷丸仿真模型的模拟结果与实验吻合较好。一方面, 经陶瓷丸、钢丸、玻璃丸喷覆后, 粗糙度模拟值和实验值偏差分别为 4.8%、7.8%、4.1%, 说明仿真模型具有较高的准确性。另一方面, 实验所测不同材质丸料喷丸后, 试样硬度值变化趋势与粗糙度变化趋势一致, 间接说明模型具有可靠性。**结论** 三种不同丸粒喷丸效果比较表明, 钢丸获得的硬度最高, 玻璃丸获得的粗糙度最小, 而陶瓷丸则同时获得了较好的硬度和粗糙度效果。

关键词: 喷丸强化; 有限元模型; 表面粗糙度; 硬度; 铝合金

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0121-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.012

Simulation and Experiment for Shot Peening Effect of Different Projectiles on Al-based Alloy

CHEN Jia-wei, LIAO Kai, LI Li-jun, GAO Zi-cheng, ZHONG Li-ping

(Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of shot peening (SP) with different projectile materials on the surface roughness of Al-based alloy. Firstly, the finite element model (FEM) of multiple SP was established by ANSYS/LS-DYNA to impact the Al alloy, and the displacement data of FEM nodes were collected by the Ra discretization calculation formula to calculate simulation roughness value. Then, model parameters were changed to study the effects of different projectile materials on roughness. Finally, according to the experimental roughness and hardness, the influence rule of different projectiles on the surface roughness and hardness was verified. From the comparison, the results of SP simulation model were approximately same as the experimental results. The deviation of calculated roughness value and the experimental value of the ceramic projectile,

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2019-07-18

Received: 2019-03-26; Revised: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51475483); 湖南省重点研发计划项目 (2018NK2065, 2016NK2142); 湖南省高校科技创新团队支持计划项目 (2014207); 湖南省研究生科研创新项目 (CX20190630)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51475483), the Key Research and Development Program of Hunan Province (2018NK2065, 2016NK2142), the Science and Technology Innovation Team Support Program of Hunan Province (2014207), Graduate Research and Innovation Program of Hunan Province (CX20190630)

作者简介: 陈家伟 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为铝合金薄壁件表面处理。

Biography: CHEN Jia-wei (1994—), Male, Master, Research focus: surface treatment of aluminum alloy thin wall parts.

通讯作者: 廖凯 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为铝合金薄壁件变形调控。邮箱: 44806474@qq.com

Corresponding author: LIAO Kai (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: deformation control of thin-walled aluminum alloy parts. E-mail: 44806474@qq.com

steel projectile and glass projectile after SP were 4.8%, 7.8% and 4.1%, respectively. It was proved that the simulation model had higher correctness. Furthermore, the hardness value change trend of the samples after SP of different projectiles was consistent with the change trend of roughness value, which reflected the accuracy of FEM indirectly. The comparison of three different shot peening results shows that steel projectiles provide the highest hardness and glass projectiles provide the lowest roughness, while ceramic projectiles provide relatively good hardness and roughness effects.

KEY WORDS: shot peening; FEM; surface roughness; hardness; Al-based alloy

7075-T651 铝合金是一种高强度结构铝合金, 具有结构紧密、耐腐蚀性强、加工性能好等特点, 广泛应用于飞行器结构件^[1-3]。但随着科技的发展, 对材料性能要求越来越高。喷丸强化处理成本低、效果好、适应性广, 可以改善结构件的抗疲劳、应力腐蚀、磨损开裂等性能, 是业内普遍采用的表面强化技术^[4-7]。喷丸强化处理后, 材料表层存在残余压应力, 该残余压应力可以有效阻止微裂纹的扩张, 即残余压应力是提高材料抗疲劳性能的主要因素^[8-13]。但喷丸处理也会使材料表面粗糙度发生变化, 产生应力集中现象, 对提高材料抗疲劳性能产生不利的影响^[14-17]。故研究喷丸处理对材料表面粗糙度的影响情况是十分必要的。

国内外学者均对喷丸强化处理后, 材料表面粗糙度的变化情况做了相关研究, 常采用实验与仿真相结合的方式, 来研究弹丸速度、覆盖率和弹丸直径等工艺参数对材料表面粗糙度的影响情况, 得到了表面粗糙度与上述工艺参数间的相互关系^[18-19]。同时, 他们也探究了不同工艺参数组合方式、不同的表面原始粗糙度对喷丸表面粗糙度的影响^[20-21]。徐戊娇等人^[22]采用 BP 神经网络模型等方式, 对实验结果进行处理, 得到喷丸表面粗糙度与工艺参数之间的预测模型。此外, Hong 等人^[23]着力于构建更加贴近实验环境的有限元仿真模型, 并以模型为基础, 探究喷丸过程中, 材料弹塑性动态的变化情况。这些研究说明, 工艺变化将直接影响材料表面特征。Liu 等人^[24]则致力于探究喷丸过程中, 材料微观组织变化机理, 寻求合适的工艺组合。U. Okan 等人^[25]研究了常规喷丸、剧烈喷丸与反复喷丸等不同喷丸方式所引起的材料塑性变形行为, 以降低表面粗糙度为目标, 探求适宜的喷丸方式。S. Bagherifard 等人在研究过程中, 采用多个粗糙度指标 (如 R_a 、 R_z 、 R_c), 从多个角度描述喷丸强化处理过程中表面粗糙度的演变规律^[26]。可见, 表面粗糙度是经常用来评价表面处理效果的重要指标, 且受工艺参数影响大。现有文献主要研究喷丸压力、弹丸直径和喷丸时间等因素对粗糙度的影响, 对不同材质丸料喷丸后, 材料表面粗糙度变化情况研究较少。

综上, 本文将喷丸工艺下的粗糙度和硬度作为主要指标参数, 衡量不同丸粒下的表面质量特征。通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立三维多丸粒模型, 对 7075-T651 铝合金的喷丸强化处理过程进行数值模拟, 并结合喷丸实验, 利用粗糙度测量仪、光学显

微镜、硬度测量仪, 测量分析材料粗糙度值 R_a 和维氏硬度值, 验证有限元模型的准确性。最后结合有限元模型和实验, 研究不同材质弹丸对材料表面粗糙度和硬度的影响情况。

1 喷丸有限元模型

利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件建模, 建立一种多丸喷丸三维模型, 三组仿真模型的弹丸材料分别为钢、陶瓷、玻璃, 弹丸直径为 0.3 mm, 喷射压力为 0.3 MPa, 喷射距离为 100 mm, 靶材均为 7075-T651 铝合金材料。为节省计算时间, 提高效率, 对靶材进行划分, 细化撞击区域的网格, 其网格大小为 0.02 mm, 小于弹丸直径的十分之一; 非撞击区域的网格大小为 0.1 mm。弹丸在空间中呈不均匀分布, 其对网格细化区的撞击呈现随机性, 最大程度模拟实际喷丸环境。表 1 为材料力学性能参数, 具体建模方法参考文献[27]。

表 1 材料力学性能参数
Tab.1 Mechanical properties of materials

	λ	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	σ_s/MPa	G/MPa
Steel	0.31	7.85	206	—	—
Ceramic	0.26	3.85	350	—	—
Glass	0.3	2.60	7.9	—	—
Target	0.33	2.81	71	510	1027

图 1 为喷丸有限元模型, 弹丸偏置分布, 相邻两弹丸在 XY 平面内的搭接率为 0.5^[28], 这能使弹丸流尽可能完全地冲击覆盖网格, 细化区域, 减少盲点, 从而保证网格细化区域的喷丸覆盖率。靶材尺寸大小

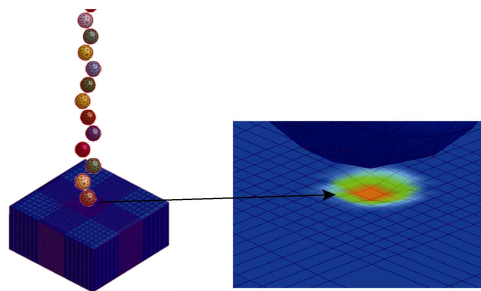


图 1 喷丸有限元模型
Fig.1 FEM of shot peening

为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 对其侧面施加非反射边界条件, 底面施加全约束, 模拟实际喷丸时靶材的约束状态。从图 1 中可以看出, 当弹丸与靶材接触后, 产生了一个明显的塑性变形弹坑。

使用后处理软件 LS-PREPOST, 运行 ANSYS/LS-DYNA 软件求解器生成的 3dplot 计算结果文件。从图 2 中可以看出, 受撞击后, 靶材表面出现不同深浅的弹坑, 弹坑近圆形, 其交界处凸起, 受多次撞击区域的变形明显大于单次撞击区域。喷丸区域出现不均匀的情况: 盲点、弹坑和多次撞击点共存, 表明弹丸空间位置的随机排布性贴近实际喷丸情况。

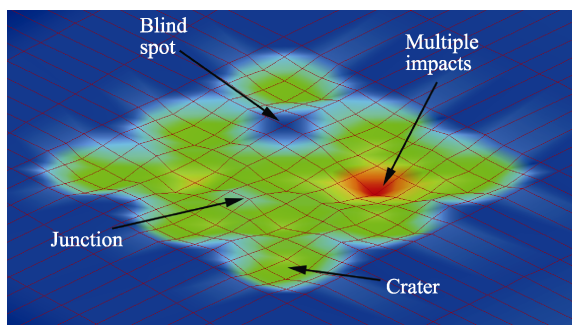


图 2 塑性变形云图
Fig.2 Plastic deformation contour

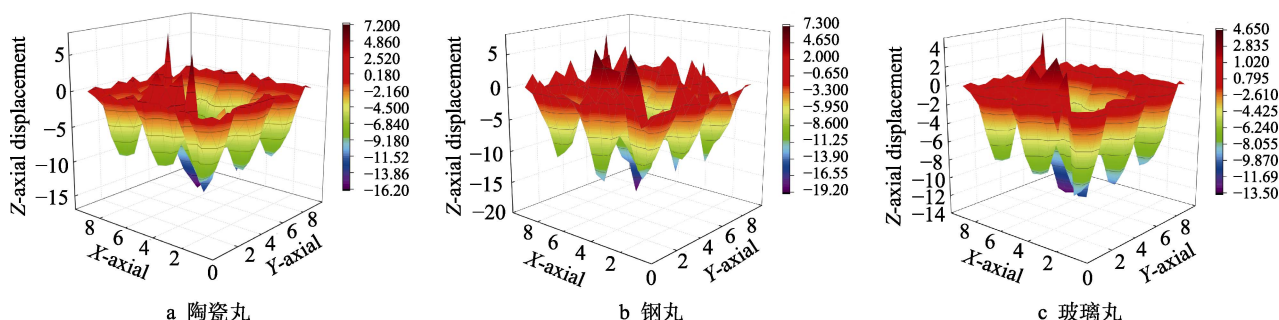


图 3 撞击区域三维图
Fig.3 3D plot of impact area: a) ceramic projectile; b) steel projectile; c) glass projectile

2 实验与分析

2.1 实验

为了检验有限元模型模拟的结果, 设置相同条件的实验。试样为 7075-T651 铝合金, 使用线切割机床将铝合金厚板加工成小块, 其尺寸为 $9\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 96\text{ mm}$, 为了使材料表面光整, 减小原始粗糙度对实验结果的影响, 对材料进行铣削加工, 刀具转速为 2000 rad/min , 进给速度为 500 mm/min , 最后使用 2000 目砂纸对试样受喷面进行打磨。采用 ST-1960 吸入式喷丸机, 喷嘴直径为 5 mm , 喷射压力为 0.3 MPa , 喷射距离为 100 mm , 弹丸直径均为 0.3 mm , 丸料分别为陶瓷丸、铸钢丸、玻璃丸。在试样受喷表

为定量分析不同材质弹丸撞击后, 材料表面粗糙度 Ra 的变化情况, 采集撞击区域的 Z 向位移数据, 利用 Ra 定义式对数据进行统计, 如式 (1) 所示:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (1)$$

其中 l 代表取样长度 (mm); y 代表取样点处轮廓偏距 (μm); x 代表取样点坐标。为便于节点数据带入计算, 将 (1) 式近似写成式 (2):

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z| \quad (2)$$

其中, n 代表取样节点个数, z 代表节点的 Z 方向位移值 (μm)。对节点数据进行统计, 得出喷丸 (钢丸、陶瓷丸、玻璃丸) 后的靶材表面粗糙度 Ra 值分别为 5.57 、 4.59 、 $3.78\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 3 可以看出, 三种不同材质弹丸喷丸处理后粗糙度大小为: 钢丸 > 陶瓷丸 > 玻璃丸。而粗糙度值一定程度上反映了材料受撞击后, 表面弹塑性变形的剧烈程度, 粗糙度值越大, 有限元模型网格变形就越明显。根据有限元计算规则, 应力由网格的应变计算而来, 粗糙度值越大, 材料残余压应力值越大, 适当的压应力可以提高材料的抗腐蚀性能和抗疲劳性能, 过大的压应力则会导致应力集中, 影响材料的寿命和使用性能。

面涂抹一层颜料, 待颜色基本消失, 则认为该区域受到 100% 覆盖。图 4 为喷丸后的试样。如图 4a 所示, 陶瓷丸撞击后的弹坑直径约为 $77\sim 91\text{ }\mu\text{m}$, 钢丸撞击后的弹坑直径约为 $83\sim 109\text{ }\mu\text{m}$ (图 4b), 玻璃丸撞击后的弹坑直径约为 $74\sim 93\text{ }\mu\text{m}$ (图 4c)。可知钢丸撞击产生的弹坑要明显大于陶瓷丸和玻璃丸撞击产生的弹坑, 对比陶瓷丸和玻璃丸撞击后的表面, 发现陶瓷丸撞击留下的弹坑要深于玻璃丸撞击后的弹坑。

2.2 粗糙度测试

使用 Mitutoyo SJ-201P 便携式表面粗糙度测量仪, 测量喷丸处理后材料的表面粗糙度 Ra , 该设备测头半径为 $5\text{ }\mu\text{m}$, 评价长度为 12.5 mm , 测量范围为 $0.01\sim 100\text{ }\mu\text{m}$, 设备误差不大于 3%。经粗糙度标准片校准后, 对喷丸试样表面进行测量, 如图 5 所示。

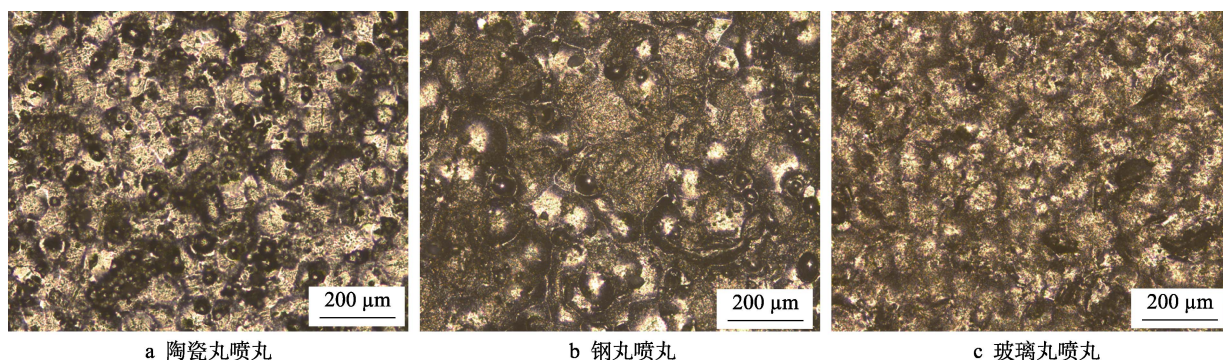


图4 喷丸试样表面形貌

Fig.4 Surface topography of specimen after SP: a) ceramic shot peening; b) steel shot peening; c) glass shot peening

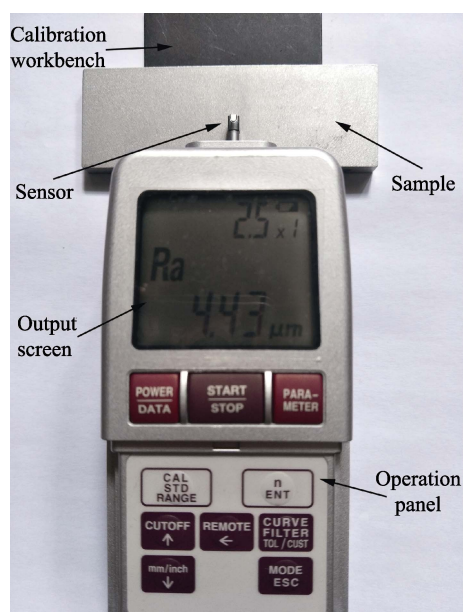


图5 粗糙度测试

Fig.5 Roughness test

2.3 仿真与实验对比

将得到的实验结果和仿真结果进行对比,如图6所示,其中 Sim. R_a 表示仿真模型粗糙度值 (simulation roughness), Exp. R_a 表示实验粗糙度值 (experimental roughness)。可以看出,模拟值和实验值的变

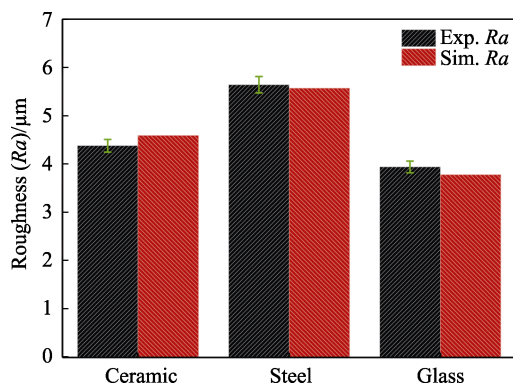


图6 粗糙度对比图

Fig.6 Roughness comparison chart

化趋势呈一致性。其中钢丸喷覆的模拟值和实验值偏差最小,处于设备测量误差范围内;陶瓷丸喷覆的仿真值和实验值差距最大,偏差值略大于设备测量误差。三者模拟值和实验值的最大偏差不大于5%,表明仿真模型具有良好的准确性。

弹丸反复撞击材料表面,使材料表层发生塑性变形,导致表面粗糙度发生改变,同时反复的塑性变形会引起表面冷作硬化,进而影响材料表层硬度值,故表面硬度值和粗糙度值是有密切联系的。材料显微硬度对材料的性能也有极大影响,图7为试样的维氏硬度值对比图,同原始表面硬度值相比,三组试样的表面硬度值均有提高。陶瓷丸喷覆后表面硬度达到 $(197.4 \pm 4.18)\text{HV}$,表面粗糙度为 $(4.38 \pm 0.13)\mu\text{m}$;钢丸喷覆后表面硬度达到 $(205.32 \pm 4.11)\text{HV}$,表面粗糙度为 $(5.64 \pm 0.20)\mu\text{m}$;玻璃丸喷覆后表面硬度达到 $(184.34 \pm 3.81)\text{HV}$,表面粗糙度为 $(3.94 \pm 0.12)\mu\text{m}$ 。其中,钢丸喷覆处理后,铝合金试样硬度值增幅约为20%;陶瓷丸喷覆处理后,铝合金试样硬度值增幅约为14%;玻璃丸喷丸后,试样硬度值增幅最小,仅为7%。对比图6粗糙度值的变化趋势,发现图7中硬度值的变化趋势同粗糙度值的变化趋势具有相似性,粗糙度增幅变大,则硬度增幅也变大。同时结合图7中有限元模型变形剖面云图可见,表面粗糙度的变化和硬度的变化具有相关性。

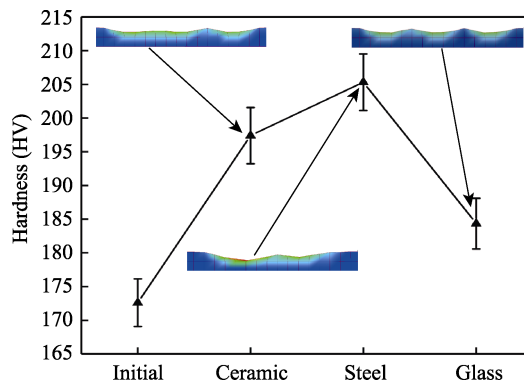


图7 硬度变化图

Fig.7 Hardness change chart

2.4 误差分析

实验结果和仿真结果存在偏差,分析认为主要是由于材料的实际组织状态和仿真模型存在很大差异,仿真模型组织是绝对均匀的,使得其计算结果和实验结果产生偏差。并且从喷丸机压力表读出,实验中喷丸机的输入压力在 0.18~0.2 MPa 之间波动,导致弹丸喷射压力并非恒定。综上因素,仿真结果与实验结果存在一定偏差,但在合理的条件下,偏差值不大,研究结果也证明了这一点。

2.5 可重复性实验

为了检验仿真模型的可重复性,进行三组喷丸实验,其喷射距离为 50 mm,喷射压力为 0.2 MPa,弹丸尺寸为 0.3 mm。对三块喷丸处理后的试样进行测算,主要测量试样的粗糙度 Ra 值和维氏硬度值,实验和仿真结果如表 2 所示。三组试样粗糙度的实验值和仿真值吻合较好,最大偏差小于 7%,弹丸材料对粗糙度和硬度的影响程度表现为钢丸>陶瓷丸>玻璃丸,与前文分析一致,表明该模型具有可重复性。同前文三组喷丸实验结果相对比发现,表 2 中的三组喷丸实验粗糙度值和硬度值明显减小。其中钢丸喷覆后,粗糙度值和硬度值分别下降约 1.9 μm 、17HV;陶瓷丸喷覆后,粗糙度值和硬度值分别下降约 1.2 μm 、14HV;玻璃丸喷覆后,粗糙度值和硬度值分别下降约 0.8 μm 、4HV。并且当喷射压力和喷射距离减小时,三种不同材质丸料喷覆后,靶材粗糙度和硬度相差不大,说明喷射压力和喷射距离的改变,对钢丸喷覆和陶瓷丸喷覆效果影响较大,而对玻璃丸喷覆效果影响较小。

表 2 实验与仿真模型的粗糙度对比
Tab.2 Comparison of roughness between experimental and simulation models

Projectile material	Exp. $Ra/\mu\text{m}$	Sim. $Ra/\mu\text{m}$	Fluctuation/%	Hardness (HV)
Steel	3.74±0.11	3.58	4.3	188.56±3.87
Ceramic	3.21±0.13	3.43	6.8	183.56±3.55
Glass	3.12±0.09	3.29	5.4	180.70±2.87

实验结果说明仿真模型的计算方法是可行的,与郑林彬等人^[19]的工作相比,本文拓展研究了弹丸材质这一工艺参数对表面粗糙度的影响,有更广泛的工程应用意义。与王强等人^[21]的研究相比,本文采用了仿真和实验相结合的方法,研究丸料材质对材料表面粗糙度的影响,更加高效经济。与 Hong 等人^[23]的成果比较,本文在理论上进一步探索了应用价值,更加侧重于实际生产价值。

3 结论

1) 三种材质丸料对材料表面粗糙度和硬度的影

响程度不同,当喷射压力为 0.3 MPa、喷射距离为 100 mm、弹丸直径为 0.3 mm 时,钢丸可以获得最大的硬度,同时粗糙度也最大;使用玻璃丸则粗糙度和硬度均最小;而陶瓷丸喷覆处理后,其硬度值较钢丸相差不大于 4%,粗糙度减小约 22.3%,可获得粗糙度和硬度的良好组合。

2) 喷射压力和喷射距离对三种材质丸料喷覆效果的影响程度不同,当喷射压力为 0.2 MPa,喷射距离为 50 mm,弹丸直径为 0.3 mm 时,陶瓷丸、钢丸、玻璃丸喷覆处理后,材料表面粗糙度/硬度下降幅度分别约为 26.7%/7%、33.7%/8.2%、21%/2%,即喷射压力和喷射距离的变化对玻璃丸喷丸效果影响较小。

3) 喷丸三维有限元模型具有较好的准确性,可用于拓展研究其他喷丸工艺参数对材料表面特征的影响情况。

参考文献:

[1] 焦慧彬, 陈康华, 陈送义, 等. Zr 和 Si 对 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金再结晶行为和性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 544-551.
JIAO Hui-bin, CHEN Kang-hua, CHEN Song-yi, et al. Effects of Zr and Si additions on the recrystallization behavior of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2019, 49(2): 544-551.

[2] 刘辰辰, 陈亚军, 李柯, 等. 7075 航空铝合金原位腐蚀多轴疲劳行为分析[J]. 中国机械工程, 2019(5): 1-7.
LIU Chen-chen, CHEN Ya-jun, LI Ke, et al. Analysis for in-situ corrosion-multiaxial fatigue behaviors of 7075 aerospace aluminum alloys[J]. China mechanical engineering, 2019(5): 1-7.

[3] BENEDETTI M, FONTANARI V, BANDINI M, et al. High- and very high-cycle plain fatigue resistance of shot peened high-strength aluminum alloys: The role of surface morphology[J]. International journal of fatigue, 2015, 70: 451-462.

[4] 赵安安, 张贤杰, 高国强, 等. 大型机翼整体壁板系统化喷丸成形技术[J]. 航空学报, 2019(2): 197-210.
ZHAO An-an, ZHANG Xian-jie, GAO Guo-qiang, et al. A systematic method of shot peen forming of large integral wing shin panel[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2019(2): 197-210.

[5] 曾元松, 黄遐. 大型整体壁板成形技术[J]. 航空学报, 2008(3): 721-727.
ZENG Yuan-song, HUANG Xia. Forming technologies of large integral panel[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2008(3): 721-727.

[6] MIAO H Y, DEMERS D, LAROSE S, et al. Experimental study of shot peening and stress peen forming[J]. Journal of materials processing technology, 2010, 210(15): 2089-2102.

[7] GAO Y K. Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening [J]. Materials science & engineering: A (structural materials: Properties, microstructure and processing), 2011, 528(10-11):

- 3823-3828.
- [8] 李占明, 王红美, 孙晓峰, 等. 高速微粒轰击对微弧氧化铝合金疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2179-2184.
LI Zhan-ming, WANG Hong-mei, SUN Xiao-feng, et al. Effect of high-speed particles bombarding pre-treatment on the fatigue properties of micro-arc oxidation aluminum alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(7): 2179-2184.
- [9] HARDING M D, DONAIDSON I W, HEXEMER R L, et al. Characterization of the microstructure, mechanical properties, and shot peening response of an industrially processed Al-Zn-Mg-Cu PM alloy[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 221: 31-39.
- [10] 臧志刚, 王建明, 郑林彬. 2024 铝合金喷丸试件疲劳寿命试验及仿真研究[J]. 材料保护, 2018, 51(5): 69-73.
ZANG Zhi-gang, WANG Jian-ming, ZHENG Lin-bin. Fatigue life experiment and simulation study on 2024 aluminum alloy specimen with shot peening[J]. Material protection, 2018, 51(5): 69-73.
- [11] 陈国清, 田唐永, 张新华, 等. Ti-6Al-4V 钛合金陶瓷湿喷丸表面强化微观组织与疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 122-127.
CHEN Guo-qing, TIAN Tang-yong, ZHANG Xin-hua, et al. Microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy treated by wet shot peening of ceramic beads[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2013, 23(1): 122-127.
- [12] 侯帅, 朱有利, 邱骥, 等. 喷丸强化对 Ti6Al4V 半椭圆表面裂纹 J 积分和裂纹扩展速率的影响[J]. 材料工程, 2019(1): 139-146.
HOU Shuai, ZHU You-li, QIU Ji, et al. Effect of shot peening on J-integration and propagation rate of semi elliptical surface crack of Ti6Al4V[J]. Materials engineering, 2019(1): 139-146.
- [13] 阴晓宁. TC4 钛合金喷丸强化表面完整性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
YIN Xiao-ning. Study on surface integrity of TC4 titanium alloy shot peening[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [14] MYLONAS G I, LABEAS G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction [J]. Surface and coatings technology, 2011, 205(19): 4480-4494.
- [15] DALAEI K, KARLSSON B, SVENSSON L E. Stability of shot peening induced residual stresses and their influence on fatigue lifetime[J]. Materials science and engineering: A, 2011, 528(3): 1008-1015.
- [16] ZHANG P, LINDEMANN J, LEYENS C. Influence of shot peening on notched fatigue strength of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80[J]. Journal of alloys and compounds, 2010, 497(1-2): 385.
- [17] BAGHERIFARD S, FERNANDEZPARIENTE I, GHELICHI R, et al. Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength of cast iron[J]. International journal of fatigue, 2014, 65: 64-70.
- [18] 强斌, 李亚东, 顾颖, 等. 钢板喷丸处理残余应力场和表面粗糙度数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(4): 691-697.
QIANG Bin, LI Ya-dong, GU Ying, et al. Numerical simulation of residual stress field and surface roughness for steel plate subjected to shot peening[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 691-697.
- [19] 郑林彬, 王建明, 何讯超. 2024 铝合金喷丸粗糙度试验与数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(1): 84-89.
ZHENG Lin-bin, WANG Jian-ming, HE Xun-chao. Experiment and numerical simulation for surface roughness of 2024 aluminum alloy treated by shot peening[J]. Journal of Shandong University(engineering science), 2017, 47(1): 84-89.
- [20] 盛湘飞, 李智, 赵科宇, 等. 相同喷丸强度条件下喷丸强化效果的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 42-48.
SHENG Xiang-fei, LI Zhi, ZHAO Ke-yu, et al. Numerical simulation research on strengthening effect of shot peening at identical intensity[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 42-48.
- [21] 王强, 张志刚, 高玉魁, 等. 喷丸材料及粒径对 300M 钢原始表面粗糙度的影响[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 35-37.
WANG Qiang, ZHANG Zhi-gang, GAO Yu-kui, et al. Effect of shot-peening material and grit size on the surface roughness of 300M steel[J]. Materials protection, 2011, 44(7): 35-37.
- [22] 徐戊娇, 刘承尚, 鲁鑫垚. 喷丸处理后 6061 铝合金工件表面粗糙度的模拟计算与预测研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1280-1287.
XU Wu-jiao, LIU Cheng-shang, LU Xin-yao. Simulation and prediction of surface roughness of 6061 aluminum alloy workpiece after shot peening[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2019, 49(4): 1280-1287.
- [23] HONG T, OOI J Y, SHAW B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses[J]. Engineering failure analysis, 2008, 15(8): 1097-1110.
- [24] LIU Y G, LI M Q, LIU H J. Nanostructure and surface roughness in the processed surface layer of Ti-6Al-4V via shot peening[J]. Materials characterization, 2017, 123: 83-90.
- [25] UNAL O, VAROL R. Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and repeening[J]. Applied surface science, 2015, 351: 289-295.
- [26] BAGHERIFAED S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening[J]. Applied surface science, 2012, 258(18): 6840.
- [27] 陈家伟, 廖凯, 车兴飞, 等. 铝合金喷丸应力-变形的仿真分析与实验[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 41-47.
CHEN Jia-wei, LIAO Kai, CHE Xing-fei, et al. Simulation and experiment study of surface stress-deformation by shot peening on Al-based alloy[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 41-47.
- [28] MAJZOBI G H, AZIZI R, NIA A A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 164-165: 1226-1234.