

弹丸介质及尺寸对7075铝合金喷丸残余应力场及粗糙度的影响研究

周晶晶¹ 孔庆东² 刘湘波² 戴浩¹ 龙祥麟² 王猛² 魏艳红^{2,3}

[1. 昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333002]

[2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106]

[3. 南京航空航天大学无锡研究院, 无锡 214187]

摘要:【目的】在航空器轻量化制造中,通常使用喷丸强化技术来提升铝合金的性能,但目前对喷丸强化残余应力的数值模拟多基于弹丸随机分布模型,且对不同介质弹丸喷丸后靶材粗糙度的相关研究较少,有必要针对该问题展开研究。【方法】建立弹丸概率随机分布有限元模型,开展喷丸强化数值模拟,研究不同介质及尺寸弹丸对7075-T651铝合金靶材喷丸强化后残余应力场及表面粗糙度的影响。【结果】结果表明,相同喷丸参数分别使用铸钢丸、玻璃丸、陶瓷丸喷丸强化靶材,压应力层深依次减小;陶瓷弹丸直径从0.3 mm增大至0.58 mm,最大残余压应力由559 MPa增大至641 MPa,当弹丸直径进一步增大至0.71 mm时,最大残余压应力增幅减缓;陶瓷弹丸直径从0.71 mm减小到0.3 mm,喷后靶材表面粗糙度 R_z 从22.6 μm 减小到5.1 μm ,应力集中系数 K_t 从1.368 3减小到1.166 7。

关键词: 喷丸强化; 7075-T651 铝合金; 数值模拟; 表面粗糙度; 残余应力; 弹丸概率随机分布模型

中图分类号: TG178 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.03.017

0 引言

铝合金在航空器轻量化制造中发挥着重要作用,铝合金部件可以有效降低机身质量^[1]。为提高铝合金部件的疲劳强度,延长服役寿命,通常使用喷丸强化技术来提升铝合金的性能^[2-3]。

喷丸强化作为一种具有高适应性、高通用性、高生产效率等优点的表面强化技术^[4],广泛应用于航空机械领域^[5]。喷丸强化过程中的材料行为复杂,强化效果影响因素多,采用以试验手段的试错法对喷丸强化工艺参数进行优化,成本极高。因此,研究人员通常采用数值模拟技术研究喷丸强化过程中弹丸的动力学行为和靶材金属的流变行为。通常,喷丸强化弹丸分布模型有阵列式分布弹丸模型^[6-7]和随机分布弹丸模型^[8]2类,但二者均属理想化模型,较难同时考虑弹丸冲击靶面的随机性及弹丸间的碰撞作用。因此,王成等^[9]在弹丸随机模型中引入概率函数来控制弹丸分布,一定程度上考虑了弹丸间的干涉碰撞作用,但未探讨概率随机分布的不同介质弹丸对喷后靶材粗

糙程度的影响规律;MARINI等^[10]采用陶瓷丸对7075-T651靶材进行模拟,发现基于阵列式分布的弹丸模型喷丸后,靶材表面残余应力与靶材表面粗糙度没有明显规律性,且残余应力分布随喷丸弹丸数量的增大而趋于稳定;盛湘飞等^[11]基于阿尔门试片,分析了弹丸直径、喷射压力及喷射距离对喷丸强度的影响权重,结果表明,弹丸直径对喷丸强度的影响显著。

弹丸分布模型及弹丸直径均对数值模拟的靶材应力分布及粗糙度产生显著影响,但结合目前的研究,对7075铝合金不同直径弹丸喷后靶材残余应力数值模拟多基于弹丸随机分布模型,因随机分布弹丸模型难以考虑弹丸间干涉作用,弹丸分布的高度随机性容易造成靶材局部区域过喷,降低数值模拟结果的准确性,且研究主要集中在以特定弹丸介质下分析不同喷丸参数对靶材的强化作用,而对不同介质弹丸喷丸后靶材粗糙度的研究较少,因此,文中以7075-T651铝合金为研究对象,建立弹丸概率随机分布有限元模型,基于发展的模型较为全面地分析不同介质及尺寸的弹丸对受喷靶材残余应力及粗糙度的影响。

收稿日期: 2024-07-04 修回日期: 2024-10-09

作者简介: 周晶晶,女,1984年生,湖北宜昌人,高级工程师;主要研究方向为喷丸强化工艺; E-mail: cwcdzfp2020@avic.com。

刘湘波(通信作者),男,1991年生,湖南娄底人,博士;主要研究方向为电弧增材过程凝固显微组织演变的多物理场多尺度相场模拟; E-mail: xiangbolu56@foxmail.com。

引用格式: 周晶晶,孔庆东,刘湘波,等. 弹丸介质及尺寸对7075铝合金喷丸残余应力场及粗糙度的影响研究[J]. 机械强度,2026, 48(3):152-158.

ZHOU Jingjing, KONG Qingdong, LIU Xiangbo, et al. Study on the influence of shot material and diameter on residual stress and roughness of shot-peened 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(3): 152-158.



免费获取

1 数值建模

1.1 喷丸强化有限元模型

根据已有的 7075-T651 铝合金喷丸试验条件^{[12]23-26}, 创建如图 1 所示的喷丸强化有限元模型。由于实际喷丸过程弹丸数量庞大, 有限元建模通常取靶材局部微小区域作为研究区, 为防止应力波在微小模型中产生动态反射影响模拟结果, 在长方体靶材周围设置一层无限单元, 由于无限单元只允许具有线弹性行为, 因此需要将其设置与有限单元足够远的距离以保证模拟精度。长方体靶材整体尺寸为 6 mm×6 mm×2 mm, 靶材撞击区域尺寸为 1.5 mm×1.5 mm×2 mm, 受喷局部区域最小网格为 15 μm^[13], 弹丸直径 D 为 0.58 mm, 摩擦因数设置为 0.03。

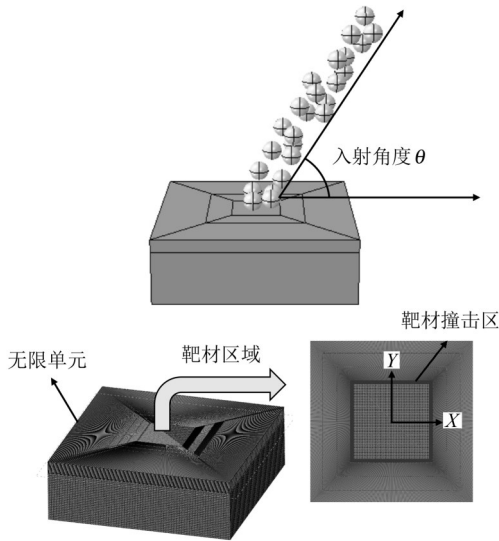


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the finite element model

由于弹丸硬度远大于靶材, 所以忽略弹丸的弹塑性作用对靶材应力的影响, 将弹丸约束为刚体, 并约束靶材底面的法向位移, 在弹丸球心处施加初始速度场, 通过 KLEMENZ 等^[14]推导的弹丸平均速度经验计算式[式(1)], 计算得到弹丸平均速度 v 为 50 m/s。

$$v = \frac{163.5p_s}{1.53m_d + 10p_s} + \frac{295p_s}{0.598D + 10p_s} + 48.3p_s \quad (1)$$

式中, p_s 为喷射压力; m_d 为弹丸流量, 取 5 kg/min。

喷丸强化数值模拟通常采用考虑应变率强化的 Johnson-Cook(J-C)模型来表征靶材的本构模型, 其表达式为

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})][1 - (\frac{T - T_s}{T_r - T_s})^m] \quad (2)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为等效流动应力; A 、 B 、 C 、 n 、 m 均为对应本构模型的拟合参数; $\bar{\epsilon}$ 、 $\dot{\epsilon}$ 分别为塑性应变和塑性应变率; T 为温度; T_s 、 T_r 分别为室温和熔点。本文靶材的本构

模型参数^{[15]5261-5267} 如表 1 所示。

表 1 7075-T651 的 J-C 本构模型参数

Tab. 1 Parameters of 7075-T651 J-C constitutive model

| 参数 | A /MPa | B /MPa | C | n | m |
|----|----------|----------|-------|------|------|
| 值 | 527 | 692 | 0.017 | 0.71 | 1.61 |

1.2 弹丸概率随机分布模型

在实际喷丸过程中, 尤其当弹丸垂直冲击靶材时, 大量弹丸之间会发生碰撞作用, 现有的弹丸模型大多采用随机分布或阵列分布模型, 其中阵列分布由于其将弹丸位置视为交错堆叠的规则模型而忽略了弹丸生成位置的随机性, 难以反映出靶材表面凹凸不平的粗糙效果; 而随机分布的弹丸模型会导致多个弹丸冲击同一位置导致过喷。为了能在有限元模型中同时考虑弹丸生成位置的随机性以及弹丸间的碰撞作用, 由随机函数先后生成 2 个弹丸, 记为 e 和 f , 两弹丸冲击靶材表面留下 2 个弹坑。引入概率方程[式(3)]来调控多弹丸的空间位置。

$$P(D_e^f) = [1 - \exp(-\lambda \frac{D_e^f}{\Phi})] \times 100\% \quad (3)$$

式中, D_e^f 为相邻两弹坑中心之间距离; Φ 为弹坑直径; λ 为概率函数控制的弹丸离散程度。

如果 $D_e^f=0$, 表明两弹丸发生碰撞, 此时撤回弹丸 f 并重新生成; 若 2 个弹坑中心的间距为弹坑直径, 即 $D_e^f=\Phi$, 此时弹丸生成概率 $P(\Phi)=98\%$, 则难以反映出喷丸碰撞的高度随机性, 因为喷丸过程弹丸撞击靶材产生的回弹效应导致后入射弹丸势必会与先入射弹丸发生碰撞, 若此时设定过高, 相邻弹坑依旧呈现高度交叠分布状态, 如图 2 中两实线圆交叠的阴影区域。当 $D_e^f=\Phi$ 、 $P(\Phi)=85\%$ 时, 可得到良好的弹坑分布, 将 $P(\Phi)=85\%$ 代入概率函数中得出 $\lambda=\ln(0.15)$, 如果第 f 个弹丸与第 e 个弹丸产生弹坑间距在 $0\sim\Phi$, 则第 f 个弹丸产生的概率由概率函数调控。

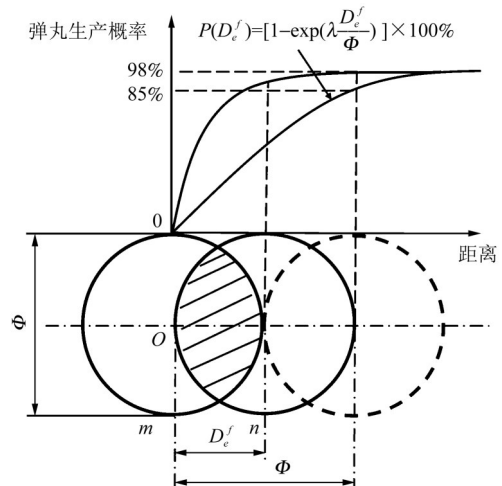


图 2 弹丸冲击形成的弹坑位置与弹丸生成概率的关系

Fig. 2 Relationship between crater position and shot generation probability

2 模拟过程及参数选择

2.1 靶材及弹丸的材料参数

喷丸过程中,当弹丸撞击靶材表面任意位置时,每个弹丸撞击靶材产生的弹坑面积一定,所以弹坑面积与靶材撞击区域面积之比为常数。基于这种假设,KIRK等^[16]提出采用Avrami方程来预测喷丸覆盖率,即

$$C(N) = [1 - \exp(-\lambda'N)] \times 100\% \quad (4)$$

式中, $C(N)$ 为喷丸覆盖率; λ' 为单弹丸冲击靶材形成的弹坑面积与撞击区面积的比值; N 为弹丸个数。如图3所示,采用Avrami方程拟合3种弹丸介质不同弹丸个数达到的表面覆盖率。

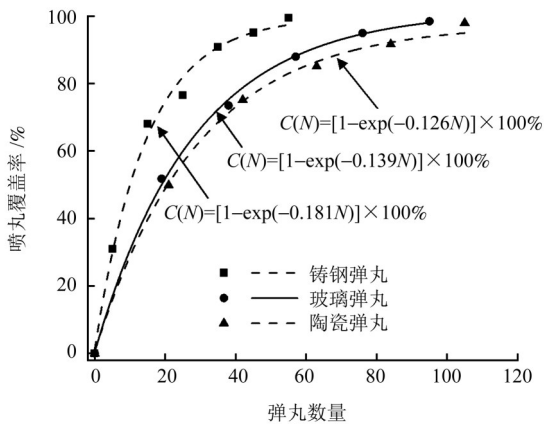


图3 喷丸覆盖率与弹丸个数间的关系

Fig. 3 Relationship between shot peening coverage and the number of shots

$$C(N)_{\text{steel}} = [1 - \exp(-0.181N)] \times 100\% \quad (5)$$

$$C(N)_{\text{glass}} = [1 - \exp(-0.139N)] \times 100\% \quad (6)$$

$$C(N)_{\text{ceramic}} = [1 - \exp(-0.126N)] \times 100\% \quad (7)$$

式中, $C(N)_{\text{steel}}$ 、 $C(N)_{\text{glass}}$ 和 $C(N)_{\text{ceramic}}$ 分别为弹丸介质为铸钢、玻璃以及陶瓷的喷丸覆盖率。

靶材及弹丸的力学性能如表2所示。由表2可知,在相同喷丸参数下不同弹丸介质所达到满覆盖率的程度不同,式(5)中的铸钢丸 $\lambda'_{\text{steel}}=0.181$ 明显高于式(6)中的玻璃丸 $\lambda'_{\text{glass}}=0.139$ 和式(7)中的陶瓷丸 $\lambda'_{\text{ceramic}}=0.126$ 。说明采用铸钢丸单位面积内覆盖率增长较快,而采用玻璃丸及陶瓷丸则次之。这是因为相同喷射速度下,铸钢丸具有更高的密度,其初始动能也相应更大,撞击靶材形成弹坑面积较大达到全覆盖率所需弹丸个数更少,因此覆盖率增长较快。

表2 靶材及弹丸的力学性能

Tab. 2 Mechanic properties of shots and component

| 材料 | 密度/(kg/m ³) | 弹性模量E/GPa | 泊松比 |
|-----------|-------------------------|-----------|-----|
| 玻璃丸 | 2 700 | 7.9 | 0.3 |
| 陶瓷丸 | 2 300 | 300 | 0.3 |
| 铸钢丸 | 7 800 | 210 | 0.3 |
| 7075-T651 | 2 810 | 71.9 | 0.3 |

2.2 喷丸表面全覆盖的参数选择

工程上进行喷丸强化时,受喷靶材至少要达到全覆盖(覆盖率大于98%)。喷丸强化模拟时,通过识别靶材弹坑形貌来判断表面覆盖率是不精确的,但可以根据单弹丸撞击过程来确定每一个弹丸形成的弹坑尺寸以及弹坑坐标来间接计算出表面覆盖率。

利用概率随机算法生成特定工艺参数下弹丸空间坐标,通过计算可得到各弹丸投影到靶材表面形成的弹坑位置,结合单弹丸数值分析得到的弹坑直径,即可将该工艺下所有弹丸形成的弹坑表示出来。图4为不同个数铸钢丸喷后靶材表面覆盖情况。由图4可知,覆盖率随弹丸数量的增加逐渐增大,但当弹丸数量超过15时,随着撞击区弹坑数量增多,重叠部分更多,覆盖率增幅逐渐减小,当弹丸数量为55时,表面覆盖率为98.9%,此时已达到全覆盖。

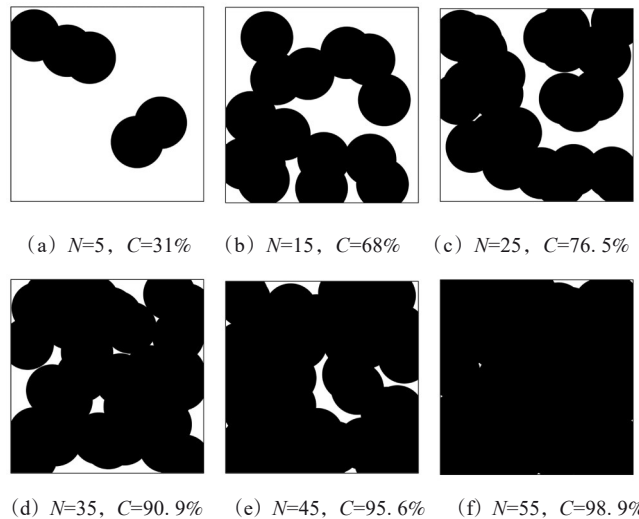


图4 不同弹丸个数所能达到的表面覆盖率

Fig. 4 Surface coverage achieved by different number of shots

计算不同介质及尺寸弹丸对受喷靶材残余应力及表面粗糙度的影响,应先确定不同喷丸参数在全覆盖率条件下的最少弹丸个数,避免靶材局部区域过喷对模拟结果产生影响。不同喷丸参数下满足全覆盖的弹丸最少个数如表3所示。

表3 不同喷丸参数下全覆盖的最少弹丸个数

Tab. 3 Minimum number of shots for full coverage under different shot peening parameters

| 组别 | 弹丸材料 | 弹丸直径/mm | 入射角度/(°) | 入射速度/(m/s) | 弹丸个数 |
|----|------|---------|----------|------------|------|
| 1 | | 0.3 | | | 228 |
| 2 | 陶瓷 | 0.425 | 90 | 50 | 158 |
| 3 | | 0.58 | | | 105 |
| 4 | | 0.71 | | | 59 |
| 5 | 玻璃 | 0.71 | | | 55 |
| 6 | 铸钢 | 0.71 | | | 45 |

2.3 喷丸强化有限元模型的验证

利用陈飞^[12]和 SHENG 等^[15]对 7075-T651 铝合金喷丸强化试验数据来验证本文喷丸模型的准确性。

试验测量受喷靶材厚度方向应力分布与数值预测结果如图 5 所示,模型预测的应力分布趋势基本符合试验测得的应力分布,最大残余压应力误差为 13.3%,因此本文建立的有限元模型能够基本预测 7075-T651 铝合金喷丸强化靶材应力分布趋势。但模拟结果与实际仍偏高。原因是靶材采用的本构模型没有考虑多弹丸冲击过程中的材料的动态硬化与软化行为,将弹丸约束为理想刚体忽略了弹丸本身的弹塑性对靶材应力场的影响。

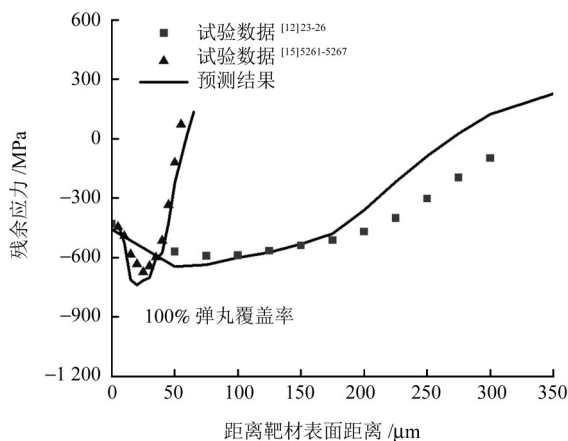


图 5 预测结果与试验结果的比较

Fig. 5 Comparative analysis of predicted results and test results

3 模拟结果及讨论分析

3.1 弹丸介质和尺寸对靶材残余应力的影响

提取撞击区沿靶材厚度方向每一层单元积分点

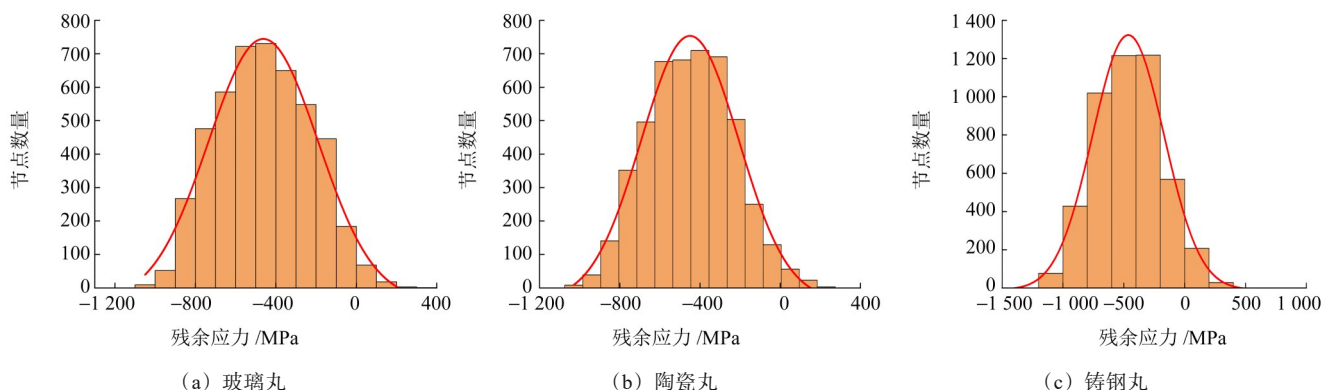


图 6 直径为 0.71 mm 不同介质的弹丸喷丸后表面残余应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution on the surface of different shot materials with a diameter of 0.71 mm

3.2 弹丸介质和尺寸对受喷靶材表面粗糙度的影响

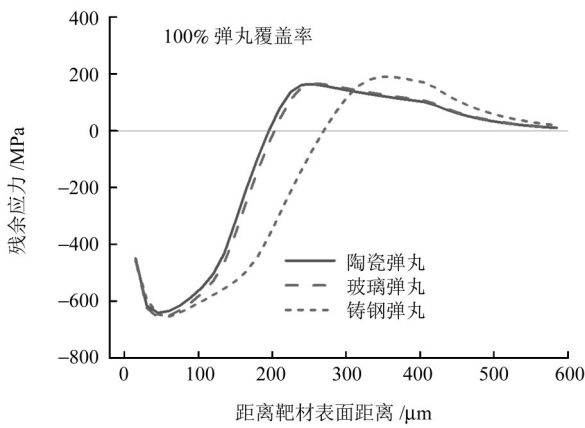
受喷靶材表面粗糙度的增加易造成应力集中。图 8 为不同介质喷丸后靶材表面的三维形貌,由图 8 可知,铸钢丸喷丸强化的靶材表面粗糙度,显著高于

处的残余应力均值。图 6 所示为在全覆盖下靶材表面残余应力分布统计直方图,靶材表面应力分布整体呈正态分布。根据正态分布函数计算,当分别以玻璃丸、陶瓷丸、铸钢丸进行喷丸强化后,靶材表面残余压应力均值分别为 456、449、458 MPa。说明不同弹丸介质对喷丸表面残余应力的影响并不显著,但当以铸钢丸喷丸时,如图 6(c)所示,表面残余应力超过 800 MPa 的节点数量为 504 个,明显高于陶瓷丸的 206 个及玻璃丸的 328 个,当以铸钢丸进行喷丸时,较前 2 种介质弹丸产生的应力集中现象更为明显。图 7 所示为不同弹丸介质喷丸后沿靶材层级单元方向的残余应力均值。如图 7(a)所示,铸钢丸、陶瓷丸和玻璃丸在喷丸强化后,最大残余压应力均位于距靶材表面约 57 μm 处,应力维持在 650 MPa 左右。铸钢丸产生的压应力层深为 269 μm 明显高于陶瓷丸的 193 μm 和玻璃丸的 208 μm 。这归因于铸钢丸的密度较大,在相同喷射速度下,其初始动能更大。撞击靶材时更高的动能转化为靶材的塑性变形能和弹性能,并逐渐向靶材厚度方向转移。

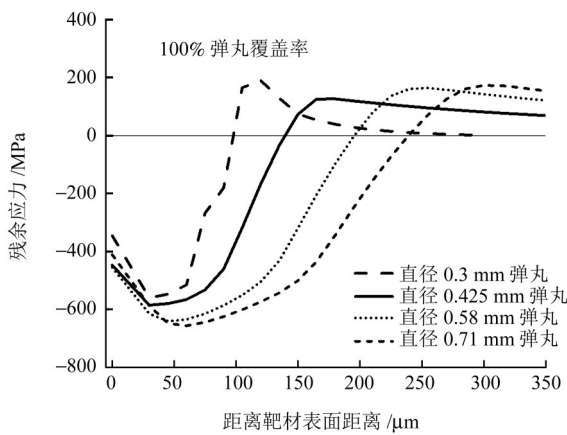
以陶瓷作为介质,分别统计不同直径弹丸喷丸后靶材厚度方向上残余应力分布,如图 7(b)所示。由图 7(b)可知,靶材表面残余压应力随弹丸直径的增大其增幅并不明显,当弹丸直径增大到 0.71 mm 时表面残余压应力发生应力松弛反而出现应力降低。沿厚度方向上应力区别较为明显,最大压应力层深与弹丸直径整体呈正相关。最大残余压应力随弹丸直径的增加增幅较大后趋于平缓,当弹丸直径增大至 0.71 mm 时,最大残余压应力最终稳定在 625 MPa 附近。

玻璃丸或陶瓷丸强化的。为进一步表征不同弹丸介质及尺寸对靶材表面粗糙度的影响并评估应力集中程度,采用轮廓最大高度 R_z 和平均宽度 R_{sm} 表征喷丸工件的表面粗糙度以及喷丸参数对靶材应力集中系

数 K_t 的影响。



(a) 直径为 0.71 mm 不同弹丸介质的喷丸



(b) 不同直径陶瓷弹丸喷丸

图 7 沿厚度方向残余应力分布结果

Fig. 7 Residual stress distribution along the thickness direction

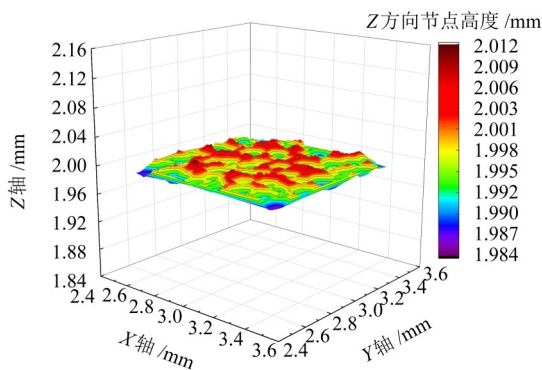
粗糙度样本数据提取方法如图 9 所示, 将提取结果代入式(8)、式(9)中求 R_z 、 R_{sm} [17], 得到

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |y_i| \quad (8)$$

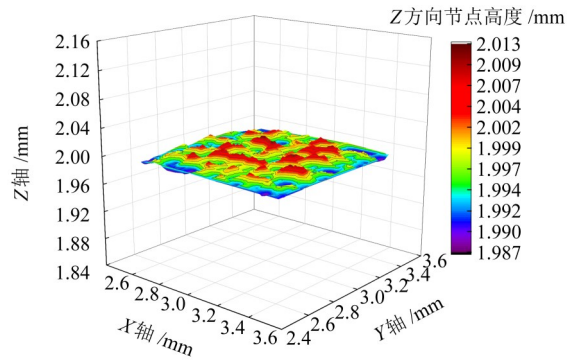
$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |S_i| \quad (9)$$

$$K_t = 1 + 18 \times (R_z/R_{sm})^2 \quad (10)$$

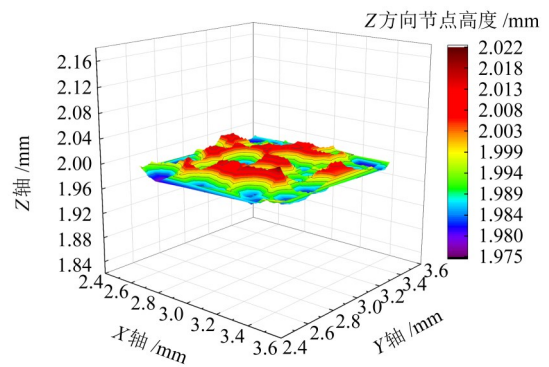
式中, y_i 为波峰与波谷之间的距离; S_i 为轮廓单元平均距离; m 为粗糙度波峰波谷组成的周期数。



(a) 玻璃丸



(b) 陶瓷丸



(c) 铸钢丸

图 8 直径为 0.71 mm 不同介质的弹丸喷后靶面形貌

Fig. 8 Target surface topography after shot peening different material shot with a diameter of 0.71 mm

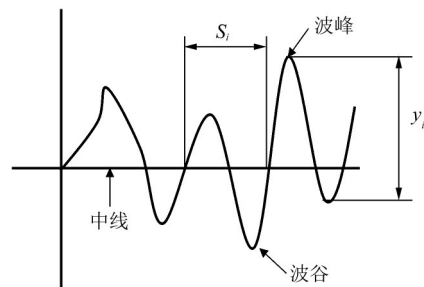


图 9 粗糙表面轮廓示意图

Fig. 9 Schematic diagram of rough surface contour

如表 4 所示, 不同弹丸介质对靶材的 R_z 及 K_t 影响不同, 其中以铸钢丸进行喷丸强化后的靶材表面粗糙度及应力集中系数均明显高于玻璃丸和陶瓷丸强化的, 与陶瓷丸相比, 其表面粗糙度由 $20.9 \mu\text{m}$ 升高到 $35.8 \mu\text{m}$, 应力集中系数由 1.3358 升高到 1.4073。不同弹丸介质对靶材粗糙度及应力集中影响由大到小依次为铸钢丸、玻璃丸、陶瓷丸; 当以陶瓷作为弹丸介质, 不同弹丸直径喷丸后靶材的粗糙度及应力集中系数也出现明显区别, 表现为弹丸直径越小靶材表面粗糙度 R_z 以及应力集中系数 K_t 越小。综上所述, 对铝合金进行喷丸强化时, 应优先采用陶瓷或玻璃作为弹丸介质, 二者相较于铸钢丸, 将产生更小的表面粗糙度, 进而降低应力集中系数; 此外, 更小的弹丸直径也对降低表面粗糙度及应力集中产生正向作用。

表 4 不同喷丸工艺靶材粗糙度及应力集中系数

Tab. 4 Target roughness and stress concentration coefficient under different shot peening parameters

| 组别 | 弹丸材料 | 弹丸直径/mm | $R_z/\mu\text{m}$ | $R_{sm}/\mu\text{m}$ | K_t |
|----|------|---------|-------------------|----------------------|---------|
| 1 | 铸钢 | 0.58 | 35.8 | 238 | 1.407 3 |
| 2 | 玻璃 | 0.58 | 23.2 | 160 | 1.378 4 |
| 3 | 陶瓷 | 0.58 | 20.9 | 153 | 1.335 8 |
| 4 | 陶瓷 | 0.71 | 22.6 | 158 | 1.368 3 |
| 5 | 陶瓷 | 0.425 | 12.8 | 123 | 1.194 9 |
| 6 | 陶瓷 | 0.3 | 5.1 | 53 | 1.166 7 |

4 结论

基于弹丸概率随机分布有限元模型,对 7075-T651 铝合金喷丸强化过程进行数值模拟,得到以下主要结论:

1)通过引入有关 7075-T651 铝合金喷丸强化试验数据的验证本文建立的喷丸强化有限元模型预测的应力分布趋势,基本符合试验测得的应力分布,最大残余压应力误差为 13.3%。

2)相同喷丸参数,不同弹丸介质喷丸强化后靶材厚度方向最大残余压应力基本分布在 650 MPa 附近,而压应力层深区别明显,分别使用铸钢丸、玻璃丸、陶瓷丸喷丸强化后的压应力层深依次为 269、208、193 μm ;对比 3 种介质弹丸,发现使用陶瓷喷丸强化后的靶材表面粗糙度 R_z 和应力集中系数 K_t 最小,分别为 20.9 μm 和 1.335 8。

3)使用直径从 0.3 mm 增大到 0.58 mm 的陶瓷弹丸喷丸强化后,铝合金靶材表面残余应力从 345 MPa 增大到 455 MPa,当弹丸直径进一步增大到 0.71 mm 时,表面残余应力为 411 MPa,发生应力松弛出现应力降低的现象;最大残余压应力及压应力层深随弹丸直径增大而增大后趋于稳定,最大压应力层深与弹丸直径整体呈正相关;最大残余压应力随弹丸直径的增加增幅较大后趋于平缓,当弹丸直径增大至 0.71 mm 时,最大残余压应力最终稳定在 625 MPa 附近。

4)当陶瓷弹丸直径从 0.71 mm 减小到 0.3 mm 时受喷靶材表面粗糙度 R_z 从 22.6 μm 减小到 5.1 μm ,应力集中系数 K_t 从 1.368 3 减小到 1.166 7。

参考文献(References)

[1] 熊柏青,闫宏伟,张永安,等. 我国航空铝合金产业发展战略研究[J]. 中国工程科学,2023,25(1):88-95.
XIONG Baiqing, YAN Hongwei, ZHANG Yonggan, et al. Development strategy for the aviation-grade aluminum alloy

industry in China[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(1):88-95. (In Chinese)

- [2] 贺柏涵,周文龙,程旭,等. 7A65 铝合金喷丸强化表面完整性及疲劳性能[J]. 精密成形工程,2023,15(6):1-10.
HE Baihan, ZHOU Wenlong, CHENG Xu, et al. Surface integrity and fatigue properties of shot peening strengthened 7A65 aluminum alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(6): 1-10. (In Chinese)
- [3] 罗鹏博,廖凯,胡俊,等. 喷丸对 7075-T651 铝合金亚表面裂纹修复能力的影响[J]. 材料热处理学报,2023,44(8):140-148.
LUO Pengbo, LIAO Kai, HU Jun, et al. Effect of shot peening on repair ability of subsurface cracks in 7075-T651 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(8): 140-148. (In Chinese)
- [4] 曾元松,尚建勤,黄遐,等. 喷丸成形与强化技术[M]. 北京:国防工业出版社,2019.
ZENG Yuansong, SHANG Jianqin, HUANG Xia, et al. Shot peen forming and shot peening technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019. (In Chinese)
- [5] 郭敏智,邓明明,姜婷婷,等. 9310 钢螺旋锥齿轮喷丸强化残余应力场计算仿真研究[J]. 航空制造技术,2023,66(8):110-116.
GUO Minzhi, DENG Mingming, JIANG Tingting, et al. Numerical research of shot peening residual stress field for 9310 steel spiral bevel gear[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(8):110-116. (In Chinese)
- [6] 张自鹏,刘存,尹凯军. 喷丸残余应力对加筋壁板压缩强度的影响研究[J]. 机械强度,2020,42(2):492-498.
ZHANG Zipeng, LIU Cun, YIN Kaijun. Study the effect of shot peening residual stresses on compressive strength of stiffened panel[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(2): 492-498. (In Chinese)
- [7] 王帅. 喷丸残余应力和表面粗糙度对疲劳寿命的综合影响研究[D]. 济南:山东大学,2018:26-30.
WANG Shuai. Study on the comprehensive influence of shot peening residual stress and surface roughness on fatigue life[D]. Jinan: Shandong University, 2018:26-30. (In Chinese)
- [8] SEDDIK R, BAHLOUL A, ATIG A, et al. A simple methodology to optimize shot-peening process parameters using finite element simulations [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5):2345-2361.
- [9] 王成,李开发,姚尚成,等. 喷丸强化 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 钛合金的数值模拟[J]. 航空动力学报,2021,36(3):449-457.
WANG Cheng, LI Kaifa, YAO Shangcheng, et al. Numerical simulation of shot peening of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(3): 449-457. (In Chinese)
- [10] MARINI M, FONTANARI V, BANDINI M, et al. Surface layer modifications of micro-shot-peened Al-7075-T651: experiments and stochastic numerical simulations [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 321:265-278.
- [11] 盛湘飞,夏琴香,陈志超,等. 以玻璃弹丸为强化介质的喷丸强度

- 试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 100-106.
- SHENG Xiangfei, XIA Qinxiang, CHEN Zhichao, et al. Experimental investigation into almen intensity with glass beads as strengthening medium [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(9): 100-106. (In Chinese)
- [12] 陈飞. 航空铝合金弓形结构框喷丸强化变形仿真分析与 ABAQUS 二次开发[D]. 成都:西南交通大学, 2020:23-26.
- CHEN Fei. Simulation analysis of aerospace aluminum alloy arc-shaped frame defoamation induced by shot peening and secondary development of ABAQUS [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020:23-26. (In Chinese)
- [13] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. Mesh sensitivity assessment of shot peening finite element simulation aimed at surface grain refinement [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 243:58-64.
- [14] KLEMENZ M, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Finite element simulation of the residual stress states after shot peening [J]. Materials Science Forum, 2006, 524/525:349-354.
- [15] SHENG X F, XIA Q X, CHENG X Q, et al. Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22:s261-s267.
- [16] KIRK D, ABYANEH M Y. Theoretical basis of shot peening coverage control[J]. The Shot Peener, 1995, 9(2):28-30.
- [17] 付宏鸽, 孙青杰, 王伟帅, 等. 7075 铝合金喷丸应力集中及残余应力场有限元分析[J]. 机械设计, 2022, 39(增刊2):51-55.
- FU Hongge, SUN Qingjie, WANG Weishuai, et al. Finite element analysis of stress concentration and residual stress field of 7075 aluminum alloy shot peening [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(Suppl. 2):51-55. (In Chinese)

Study on the influence of shot material and diameter on residual stress and roughness of shot-peened 7075 aluminum alloy

ZHOU Jingjing¹ KONG Qingdong² LIU Xiangbo² DAI Hao¹ LONG Xianglin² WANG Meng² WEI Yanhong^{2,3}

(1. Changhe Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333002, China)

(2. School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(3. Wuxi Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Wuxi 214187, China)

Abstract: [Objective] Shot peening technology is usually used in aircraft lightweight manufacturing to improve the performance of aluminum alloys, but the current numerical simulation of shot peening residual stress is mostly based on the random distribution model of the shot, and there are fewer studies on the roughness of the target material after shot peening with different shot material. It is necessary to conduct research on this issue. [Methods] A shot probability random distribution finite element model was established to carry out numerical simulation of shot peening, and studied the effects of different shot material and shots diameter on the residual stress field and surface roughness of 7075-T651 aluminum alloy targets after shot peening. [Results] The results show that with the same shot peening parameters, the depth of compressive stress layer of cast steel shot, glass shot and ceramic shot are respectively reduced. As the shot diameter increases from 0.3 mm to 0.58 mm, the maximum residual compressive stress increases from 559 MPa to 641 MPa. When the shot diameter is 0.71 mm, the residual compressive stress increases significantly slow down. As the ceramic shot diameter decreases from 0.71 mm to 0.3 mm, the surface roughness R_z decreases from 22.6 μm to 5.1 μm , and the stress concentration factor K_t decreases from 1.368 3 to 1.166 7.

Key words: Shot peening; 7075-T651 aluminum alloy; Numerical simulation; Surface roughness; Residual stress; Shot probability random distribution model

Corresponding author: LIU Xiangbo, E-mail: xiangboliu56@foxmail.com

Received: 2024-07-04 Revised: 2024-10-09

(编辑:刘欢欢)