

# 基于 DEM-FEM 耦合模型的质量流量对 喷丸强化效果的影响

侯宏禹<sup>1</sup>, 张闯<sup>1</sup>, 裴悦涵<sup>1</sup>, 陈岩<sup>1</sup>, 宋华<sup>1\*</sup>, 关士学<sup>1</sup>,  
汪洋<sup>1</sup>, 李捷<sup>2</sup>, 王晓雪<sup>3</sup>

(1. 辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051; 2. 太原科技大学, 太原 030024;  
3. 鞍钢股份有限公司, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** **目的** 提出一种将有限元 (FEM) 与离散元 (DEM) 相耦合的新方法, 即通过定义关键字的方式在 ABAQUS 软件内实现 DEM-FEM 耦合功能, 并应用此方法建立喷丸强化模型。**方法** 将弹丸视为等直径刚体, 利用刚体动力学模拟弹丸-弹丸和弹丸-靶材之间相互作用以及整个弹丸流。通过建立的 DEM-FEM 耦合喷丸强化模型研究质量流量对残余应力场和表面粗糙度的影响。**结果** 质量流量对喷丸强化效果有显著影响, 最大残余应力随质量流量的增加而减小, 由 2 kg/min 时的 -596.77 MPa 下降到 6 kg/min 时的 -581.91 MPa; 表面残余应力随质量流量的增加先增大后减小, 由 2 kg/min 时的 -420.86 MPa 增大到 4 kg/min 时的 472.06 MPa, 随后减小到 6 kg/min 时的 -450.50 MPa; 表面粗糙度  $Ra$  随质量流量的增加减小, 由 2 kg/min 时的 11.21  $\mu\text{m}$  减小到 6 kg/min 时的 9.82  $\mu\text{m}$ 。设计了喷丸强化实验, 对质量流量 2 kg/min 的结果进行了验证。**结论** 实测值与模拟值吻合较好, 所建立的模型可以准确反映实际喷丸强化过程。质量流量对喷丸强化效果具有显著影响。

**关键词:** 喷丸; DEM-FEM 耦合; 质量流量; 最大残余应力; 表面残余应力; 粗糙度

**中图分类号:** TG668 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)17-0186-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.17.017

## Impact of Mass Flow Rate on Shot Peening Effect Based on Coupled DEM-FEM Model

HOU Hongyu<sup>1</sup>, ZHANG Chuang<sup>1</sup>, PEI Yuehan<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, SONG Hua<sup>1\*</sup>,  
GUAN Shixue<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, WANG Xiaoxue<sup>3</sup>

(1. University of Science and Technology Liaoning, Liaoning Anshan 114051, China; 2. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 3. AnGang Steel Company Limited, Liaoning Anshan 114009, China)

**ABSTRACT:** In the previous finite element shot peening model, only the stress and strain occurred in the target material after shot peening can be studied, and in the previous discrete element shot peening model, only the collision interference between the shots can be studied. The two types of shot peening models have their own advantages and disadvantages, but it is not possible

收稿日期: 2023-11-17; 修订日期: 2024-05-26

Received: 2023-11-17; Revised: 2024-05-26

基金项目: 辽宁省重点实验室开放基金资助项目 (2022KFKT-08)

Fund: Open Fund of Liaoning Key Laboratory (2022KFKT-08)

引文格式: 侯宏禹, 张闯, 裴悦涵, 等. 基于 DEM-FEM 耦合模型的质量流量对喷丸强化效果的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(17): 186-195.  
HOU Hongyu, ZHANG Chuang, PEI Yuehan, et al. Impact of Mass Flow Rate on Shot Peening Effect Based on Coupled DEM-FEM Model[J].  
Surface Technology, 2024, 53(17): 186-195.

\*通信作者 (Corresponding author)

to study the interactions between the shot-pellet and shot-target materials in the peening process at the same time. However, the shot-pellet and shot-target interactions during the peening process cannot be investigated simultaneously, and the shot velocities are artificially given in the previous studies, which is obviously not in line with the reality. Therefore, based on the above reasons, the work aims to propose a new method of coupling finite elements (FEM) with discrete elements (DEM), i.e., the DEM-FEM coupling function has been realized within the ABAQUS software by defining the key words, and this method has been applied to establish the shot peening model. In this method, the shot is regarded as an equal-diameter rigid body, and the shot-pellet and shot-target interactions as well as the entire shot flow are effectively simulated by rigid-body dynamics, and it is verified that the established model can accurately reflect the actual shot peening process. In this work, the shot velocity is calculated by Fluent fluid software.

Mass flow rate has an important impact on the shot peening effect. In the case of a certain shot peening pressure, the mass flow rate is different while the intensity of the collision interference between the shots is different, the shot peening velocity is different and the effective energy transferred from the shot to the target material is different, which ultimately leads to different shot peening effect. In the established DEM-FEM coupled shot peening model, the magnitude curve mass flow rate and the magnitude curve velocity were introduced to control the shot generation rate, the parameters of the two magnitude curves were adjusted, and the effects of the mass flow rate (2 kg/min, 4 kg/min and 6 kg/min) on the maximum residual stress, surface residual stress and surface roughness were investigated. The numerical simulation results showed that the mass flow rate had a significant impact on the peening effect, the maximum residual stress decreased with the increase of mass flow rate, from -596.77 MPa at 2 kg/min to -581.91 MPa at 6 kg/min, the surface residual stress increased and then decreased with the increase of mass flow rate, from -420.86 MPa at 2 kg/min to -420.86 MPa at 4 kg/min and the surface residual stress decreased with the increase of mass flow rate, from -420.86 MPa at 2 kg/min to 472.06 MPa at 4 kg/min, and then decreased to -450.50 MPa at 6 kg/min and the surface roughness decreased with the increase of mass flow rate from  $Ra=11.21\ \mu\text{m}$  at 2 kg/min to  $Ra=9.82\ \mu\text{m}$  at 6 kg/min. The shot peening experiment is designed, and the mass flow rate of 2 kg/min is selected. The surface residual stress and surface roughness of the simulation results are compared with the experimental results, and the errors are found to be within the allowable range, which proves the accuracy of the numerical simulation.

**KEY WORDS:** shot peening; DEM-FEM coupling; mass flow rate; maximum residual stress; surface residual stress; roughness

喷丸强化作为一种高效的金属表面处理工艺,在海洋工业中拥有广泛的应用,用于提高海工钢 E690 零件的疲劳寿命。喷丸过程中,大量的弹丸随机撞击金属表面(如图 1 所示),使金属靶材表层发生循环塑性应变<sup>[1-2]</sup>。由于次表层弹性变形区的恢复和表层不可恢复的塑性变形区的约束,在金属靶材的表面和次表层之间形成了有益的残余压应力层<sup>[3]</sup>,残余压应力层对提升疲劳寿命起到主要作用。

在传统的有限元模型中<sup>[4-10]</sup>,仅考虑了弹丸与靶材之间的相互作用,虽然弹丸在生成时不会出现干涉情况,但在撞击靶材后的反弹过程中,不同弹丸之间

却出现了穿透的现象<sup>[11]</sup>。这是不符合实际的,且有限元模型中也无法引入弹丸质量流量这一参数。

离散元方法(DEM)利用牛顿运动定律和本构定律记录每个粒子运动轨迹以及与其他粒子的相互作用<sup>[12]</sup>,采用离散元(DEM)与有限元(FEM)耦合的方法可以有效地模拟弹丸-弹丸和弹丸-靶材之间相互作用,以及整个弹丸流,同时在此方法中也可以引入质量流量这一控制参数。Tu 等<sup>[13]</sup>建立了一种 DEM-FEM 顺序耦合喷丸强化模型,他们首先在离散元软件 Yade 中模拟弹丸流,提取撞击前弹丸的速度和位置,随后将提取到的速度、弹坑直径和位置等参

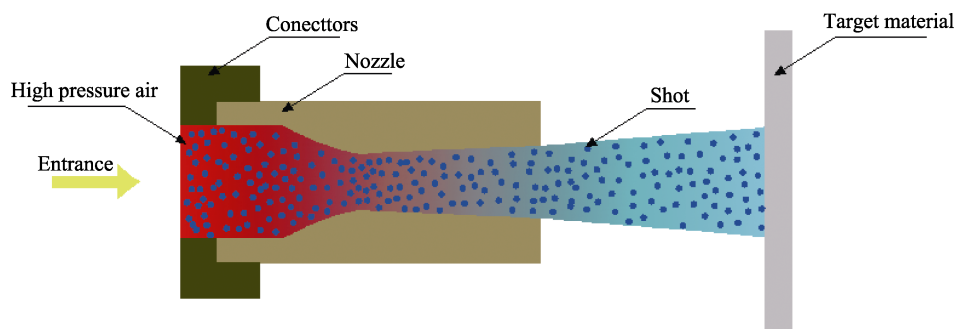


图 1 喷丸强化过程  
Fig.1 Shot peening process

数作为初始计算条件输入到有限元软件 ABAQUS 中进行有限元部分的计算,研究了弹丸-弹丸、弹丸-靶材之间的相互作用,对残余应力和粗糙度作出了成功的预测。Hong 等<sup>[14]</sup>则是通过一种特殊的方式实现了 DEM-FEM 耦合喷丸强化模型的建立,他们首先在有限元软件 ABAQUS 中研究了弹丸与靶材之间的动力学过程,将参数设置相同后,在离散元软件 EDEM 中研究了反射弹丸与入射弹丸之间的相互作用,证明了在较大的质量流量下,弹丸之间相互作用导致的能量消耗更大。Murugaratnam 等<sup>[12]</sup>提出了一种两步式的 DEM-FEM 耦合方法,他们首先在离散元软件 EDEM 中模拟弹丸流撞击靶材,随后通过创建的用户定义库 (UDL) 将记录到的弹丸位置和撞击速度输入到有限元软件 ABAQUS 中,在有限元中研究了喷丸角度、初速度对残余压应力的影响,在离散元中通过记录弹丸碰撞前和碰撞后速度的方式,研究了质量流量不同时弹丸之间的相互作用情况。结果表明,当质量流量较大,初速度较小时,弹丸在撞击时能够保持初速度的弹丸数量减少。Baskaran 等<sup>[15]</sup>建立了一种单向的 DEM-FEM 耦合喷丸强化模型,他们首先通过 CAD 软件创建几何模型,随后以 STL 格式导入到离散元软件 EDEM 中模拟弹丸流,最后将接触力等关键信息导入到 ANSYS 中进行有限元分析,计算残余压应力。Wu 等<sup>[16]</sup>在 EDEM 软件中模拟了弹丸流撞击靶材,随后使用软件自带的耦合功能,实现了与 ABAQUS 软件的耦合,然后在 ABAQUS 软件中对喷丸强化后的靶材进行了有限元分析。

综上所述,现有的 DEM-FEM 耦合喷丸强化模型中,耦合方式均是通过特殊接口在 2 个软件间实现,其操作难度大,结果准确性对接口类型要求较高,特别是某些特殊情况需要自己编写接口,这更是加大了耦合难度。同时,在现有的各种有关喷丸强化研究中,对喷丸质量流量方面的研究较少,仅对质量流量不同时弹丸之间的相互作用进行了研究,并未涉及质量流量对靶材的影响。质量流量不同时,反射弹丸与入射

弹丸之间的碰撞干涉强度不同,弹丸向靶材传递的有效能量也不同,最终会导致喷丸强化效果的不同。基于以上原因,本文着重开发一种新的耦合方法,通过定义关键字的方式在 ABAQUS 软件内完成了 DEM-FEM 耦合喷丸强化模型建立,用于研究喷丸质量流量对喷丸强化效果的影响。通过定义关键字的方式实现了 DEM-FEM 耦合在单一软件内的实现,并给出了具体建模过程以及参数。本文以质量流量这一参数为切入点,研究了质量流量对残余应力场的和表面粗糙度的影响规律。

## 1 DEM-FEM 喷丸强化模型的建立

### 1.1 喷丸强化模型的建立

传统的 DEM-FEM 耦合是将 DEM 软件 (如 EDEM 和 PFC) 与 FEM 软件 (如 ABAQUS 和 ANSYS) 耦合起来,将 DEM 软件的计算结果传递到 FEM 软件中进行分析。其缺点是计算量大,操作复杂,难度较大。不同于传统的 DEM-FEM 耦合方法,本文提出一种新的耦合方法,即仅通过定义关键字的方式就可以在 ABAQUS 一个软件内实现 DEM-FEM 的耦合过程,这种方法在一定程度上简化了操作流程,降低了计算成本。DEM-FEM 耦合喷丸建模流程如图 2 所示,首先在 CAE 环境下建立几何模型,为靶材赋予材料属性,进行单元网格的划分,随后将设置好的模型生成 INP 文件,通过在 INP 文件里定义关键字的方式实现 DEM-FEM 的耦合。

具体流程如下,通过关键字 Particle Generator 定义一个颗粒生成器,并将其命名为 Generator。颗粒生成器生成的弹丸的单元类型设置为 PD3D,将生成的弹丸视为刚体,直径  $D=0.6\text{ mm}$ 。通过关键字 Maximum Number of Particles 设置颗粒生成器生成的最大颗粒数目,通过关键字 \*Particle Generator inlet, surface=out, \*particle generator mixture ball 设置生成颗粒的类型,通过关键字

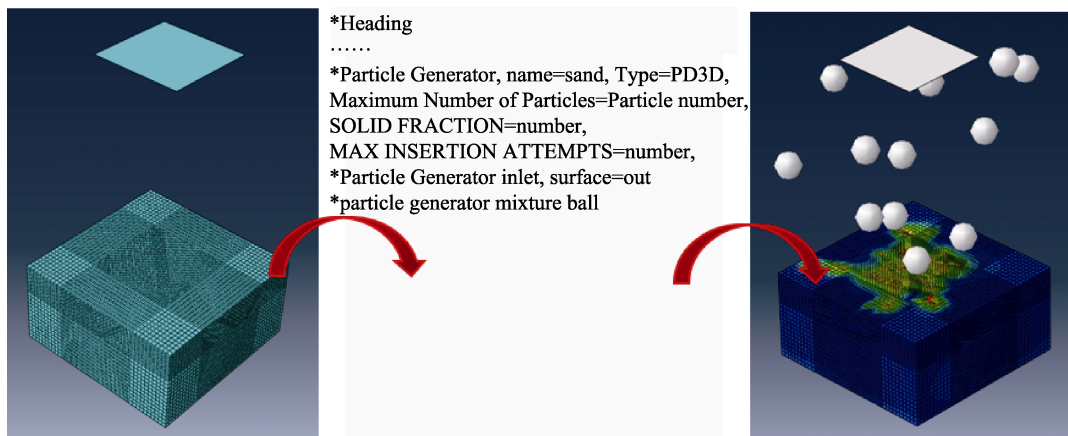


图 2 DEM-FEM 喷丸强化建模流程  
Fig. 2 DEM-FEM shot peening modeling process

\*probability Density function 定义颗粒尺寸概率分布表, 通过关键字\*surface interaction 定义颗粒与颗粒、颗粒与靶材之间的接触属性, 通过引入特定幅值曲线 mass flow 和 velocity flow 设置颗粒的质量流率和颗粒流速, 最后通过关键字\*particle generator flow 激活颗粒生成器。根据显示动力学的计算特性, 由于 PD3D 单元粒子是刚性的, 因此无法计算每个粒子的稳定时间增量, 必须为纯 DEM 分析指定固定时间增量, 对于 DEM-FEM 耦合分析可以使用自动时间增量, 其中质量流率和颗粒流速需要满足协调方程:

$$\dot{M}_s(t) = Q(t)\rho\varepsilon(t)$$

(1)

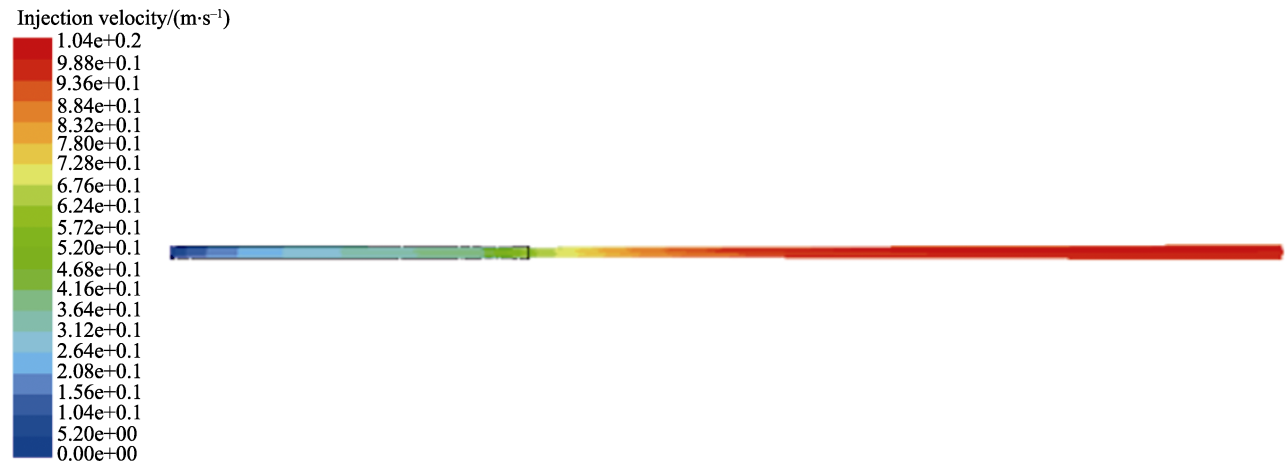


图 3 弹丸流场  
Fig.3 Shot flow field diagram

表 1 不同质量流量对应的弹丸喷射速度  
Tab.1 Shot injection velocity values corresponding to different mass flow rates

Mass flow rate/(kg·min <sup>-1</sup> )	2	4	6
Injection velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	106.32	98.83	91.21

为研究质量流量对喷丸强化效果的影响, 首先在数值模拟软件的 CAE 界面创建一个长×宽×高为 8 mm×8 mm×4 mm 的靶材, 采用沙漏控制的三维八节点缩减积分单元 (C3D8R) [17-19] 对靶材进行网格划分。初始时, 撞击区域网格划分为 0.02 mm, 然而由于弹丸喷射速较高, 靶材变形量大, 计算不收敛, 需要增大网格。经过多次试算, 最终发现撞击区域网格为 0.1 mm 时, 运算结果收敛且稳定, 因此本文将距撞击表面 1 mm 的撞击区域的网格划分为 0.1 mm, 非撞击区域的网格为 0.3 mm。将靶材的底面完全固定。颗粒生成器生成的弹丸呈束状, 因此颗粒生成器的高度对喷丸强化效果没有影响, 在靶材上方 10 mm 处设置一个边长为 5.3 mm×5.3 mm 的正方形颗粒生成器来模拟喷嘴。计算时间以最后一个弹丸撞击完靶材为准。同时, 为了加快计算速度, 减小边界效应, 选取靶材受喷区域内 2 mm×2 mm×1 mm 为研究区域。接触设置在喷丸强化模型中非常重要, 丸粒与丸粒之间, 丸粒与靶材之间的接触属性, 切向接触均采用罚

式中:  $\dot{M}_s(t)$  为单位面积的质量流率, kg/min;  $Q(t)$  为丸粒流速, m/s;  $\rho$  是弹丸密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\varepsilon(t)$  为颗粒生成器附近的丸粒体积占比阈值, 一旦超过此阈值, 颗粒生成器将无法生成粒子, 其值默认为 0.4, 为了防止颗粒在入口堵塞, 本文将其值设为 0.8。

在喷丸气体压力一定的情况下, 随着质量流量的增加, 气体对单个弹丸的带动能量减小, 弹丸速度会减小。为了得到不同质量流量时的弹丸喷射速度, 利用 Fluent 软件进行弹丸速度流场模拟。将入口压力设为 0.6 MPa, 弹丸直径为 0.6 mm, 模拟结果如图 3 所示, 得到的不同质量流量<sup>[12]</sup>时的弹丸喷射速度见表 1。

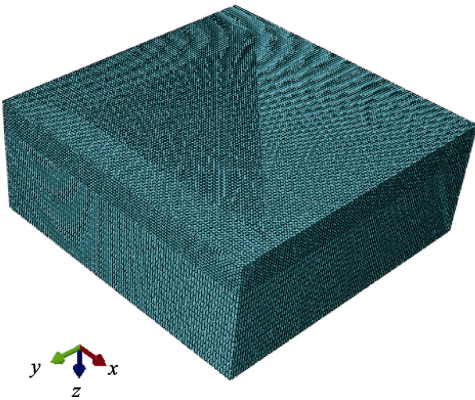


图 4 靶材网格划分  
Fig.4 Schematic diagram of target material meshing

函数的形式, 具体值为 0.3, 法向接触均定义为 Hard 接触。

1.2 材料及本构模型的选择

弹丸撞击靶材过程中, 在靶材表面时刻发生着高速率的塑性应变。由于加工硬化的原因, 材料的屈服应力和屈服极限也发生变化, 因此本文采用适合描述高速弹塑性变形的 Johnson-Cook<sup>[20-21]</sup>本构模型, 其表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m})$$

(2)



式中:  $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T}$ ,  $T_m$  为材料的熔点,  $T_r$  为室温;

$A$  为材料屈服应力;  $B$  为材料的应变幂指数;  $\varepsilon$  为材料应变;  $n$  为应变硬化指数;  $C$  为应变率敏感系数;  $\dot{\varepsilon}^*$  为应变影响因子;  $m$  为温度敏感系数。

Johnson-Cook 模型各项参数见表 2, 本文选用的靶材为海工钢 E690, 弹丸为铸钢弹丸, 性能参数见表 3。

表 2 Johnson-Cook 模型参数  
Tab.2 Parameters of Johnson-Cook model

Symbolic	Value
$A/\text{MPa}$	739
$B/\text{MPa}$	510
$n$	0.3
$C$	0.014 7
$m$	1.03
$T_m/\text{K}$	1 717
$T_r/\text{K}$	298

表 3 海工钢 E690 与铸钢弹丸材料性能参数  
Tab.3 Material performance parameters of offshore steel E690 and cast steel shots

Materials	Elastic Modulus/ ( $10^5 \text{ MPa}$ )	Density/ ( $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	Poisson's ratio
Offshore Steel E690	2.09	7.85	0.3
Cast Steel Shot	2.1	7.8	0.3

### 1.3 覆盖率的计算

覆盖率定义为喷丸后靶材表面弹坑面积之和与受喷面积的比值<sup>[22-23]</sup>。本文选择一般用于评估喷丸覆盖率的 Avrami 公式:

$$C = 100\% \times \left[ 1 - \exp \left( -N \frac{\pi \times r^2}{S} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $C$  为覆盖率;  $N$  为弹丸个数;  $S$  为受喷面积,  $\text{mm}^2$ ;  $r$  为单弹丸垂直撞击靶材形成的弹坑半径,  $\text{mm}$ 。利用后处理的 path 功能, 在后处理时, 选取圆形弹坑凸起最高点之间的距离作为弹坑直径 (如图 5 所示), 具体结果见表 4。分别将表 4 中的数据代入到式 (3) 中, 得出不同质量流量达到 100% 覆盖率所需要的弹丸个数见表 5。

### 1.4 DEM-FEM 喷丸强化模型验证

利用 DEM-FEM 耦合喷丸模型对文献[24]中海工钢 E690 喷丸强化过程进行数值模拟, 将模拟参数与实验参数设置为相同, 沿相同层深位置进行数据提取, 结果如图 6 所示。实验值和模拟值变化趋势相同, 最大相对误差值为 8.06%。因此可以得出, 基于 DEM-FEM 耦合的喷丸模型可以较为准确地模拟实际喷丸强化过程。

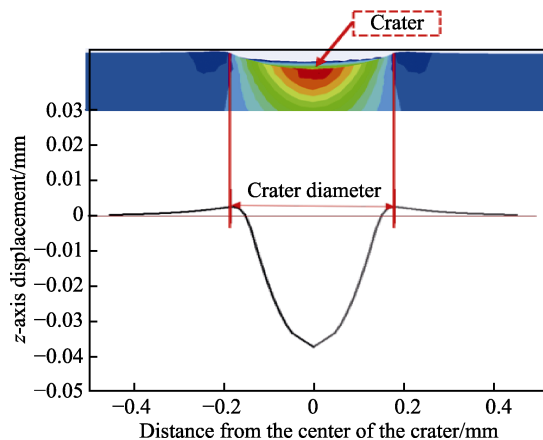


图 5 弹坑直径示意图

Fig.5 Schematic diagram of crater diameter

表 4 不同弹丸喷射速度对应的弹坑直径

Tab.4 Crater diameters corresponding to different shot injection velocities

Injection velocity/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	91.21	98.83	106.32
Crater diameter/mm	0.29	0.33	0.34

表 5 质量流量不同时达到 100% 覆盖率需要的弹丸个数  
Tab.5 Number of shots required to achieve 100% coverage at different mass flow rates

Mass flow rate/( $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	2	4	6
Number of shots	1 865	1 979	2 563

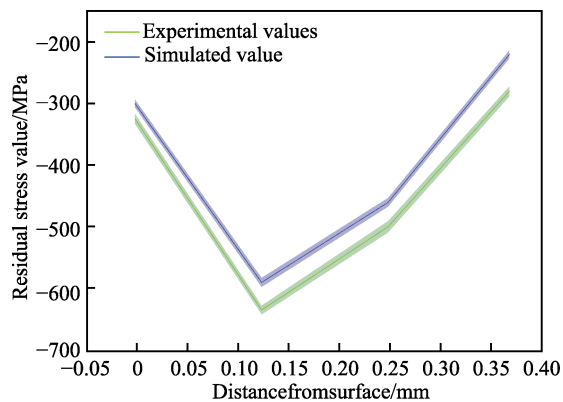


图 6 实验值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of experimental and simulated values

## 2 模拟结果

在喷丸压力、喷嘴尺寸、弹丸类型和大小确定的情况下, 为了保证喷丸速度, 本文将质量流量分别设置为 2、4、6  $\text{kg}/\text{min}$  进行模拟运算。考虑到弹丸撞击的随机性, 为了使数据结果具有一定的代表性, 每个模型都进行 3 次计算, 以下内容均为 3 次计算得到的平均值, 且本文中所有折线图误差带均是通过计算样本的标准偏差得出。

### 2.1 质量流量对残余应力场的影响

由于阻止靶材表面裂纹产生以及扩展的主要因

素是平行于靶材表面的残余应力, 本模型靶材的表面为  $xOy$  面, 因此选择  $x$  轴方向的  $S_{11}$  代表残余应力。通过自编的 Python 脚本提取靶材残余应力场数据的提取。在如图 7 所示 (图示为 1/2 对称模型) 垂直于靶材表面的红色区域内均匀分布 36 条路径, 分别提取每条路径上沿  $z$  轴方向不同深度处的  $S_{11}$  残余应力, 最后计算所有路径同一深度处的平均值, 就可以得出靶材表层的残余应力场数据。

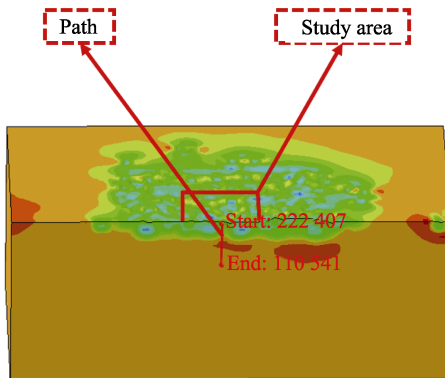


图 7 表层残余应力场提取路径

Fig.7 Schematic diagram of the extraction path of the residual stress field in the surface layer

### 2.1.1 质量流量对表面残余应力的影响

在计算残余应力场数据的方法中, 当层深为 0 时, 计算出的结果即为靶材表面残余应力。表面残余应力随质量流量的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知, 随着质量流量的增加, 表面残余压应力呈现出先增大、后减小的趋势, 由 2 kg/min 时的 -420.86 MPa 增大到 4 kg/min 时的 -472.06 MPa, 随后减小到 6 kg/min 时的 -450.50 MPa。

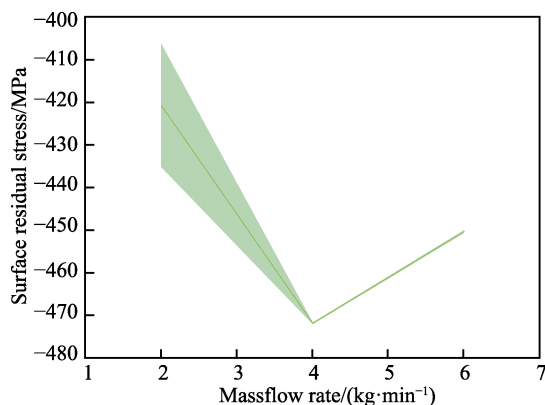


图 8 不同质量流量时的靶材表面残余应力值  
Fig.8 Residual stress values on the target surface at different mass flow rates

出现上述情况可能是, 由于当质量流量由 2 kg/min 增加到 4 kg/min 时, 单位时间内弹丸撞击次数增加, 靶材在前一个弹丸撞击后还未来得及发生弹性恢复, 后一个弹丸又发生了撞击, 靶材受喷区域表层塑性变

形更剧烈, 因此表面残余压应力也就越大。质量流由 4 kg/min 时增加到 6 kg/min 时, 表面残余应力值呈现出减小的趋势是因为随着质量流量的增加弹丸的喷射速度减小, 靶材的塑性变形能减小。同时, 质量流量过大时弹丸之间的碰撞频率更高, 有效撞击次数减小, 损失的能量更大。

### 2.1.2 质量流量对最大残余压应力的影响

不同质量流量时, 残余应力沿层深方向的变化情况如图 9 所示。从图 9 可以看出, 不同的质量流量下, 残余应力沿层深变化趋势基本相同, 表面均为残余压应力, 当层深由 0 mm 增加到 0.2 mm 时, 残余压应力值逐渐增大, 几乎均在 0.2 mm 处达到最大值。当层深由 0.2 mm 增加到 0.47 mm 时, 残余压应力值逐渐减小, 并在 0.47 mm 后逐渐转化为残余拉应力。随着层深的进一步增加, 残余拉应力逐渐趋近于 0。残余压应力的最大值出现在质量流量为 2 kg/min 时, 最大值为 -596.77 MPa; 其次是质量流量为 4 kg/min 时, 最大的残余压应力值为 -587.32 MPa; 当质量流量为 6 kg/min 时, 最大的残余压应力值为 -581.91 MPa。

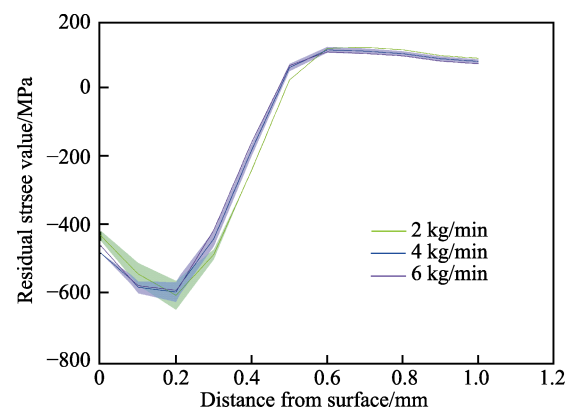


图 9 质量流量不同时残余应力沿层深方向的分布情况  
Fig.9 Distribution of residual stress field along the layer depth direction at different mass flow rates

由图 10 可知, 随着质量流量的增加, 最大残余压应力值逐渐减小。这可能是由于以下原因导致: 在喷嘴入口压力相同的情况下, 当质量流量增加时, 弹丸的喷射速度会相应的减小, 其动能也会减小, 撞击靶材时的塑性变形能就会减小; 质量流量的增加会导致反射弹丸与入射弹丸之间的干涉作用增强, 入射弹丸受到反射弹丸的撞击, 使得入射弹丸速度减小, 动能减小, 导致靶材塑性变形能减小。

## 2.2 质量流量对表面粗糙度的影响

在靶材受喷中心红色的正方形区域内, 生成 36 条如图 12 箭头方向所示与靶材表面平行的路径, 提取 U3 方向 (靶材表面法线方向) 的位移, 将其作为粗糙度值, 随后计算每条路径上的  $R_a$  值, 最后将 36 条路径  $R_a$  值的平均值作为靶材的表面粗糙度值。

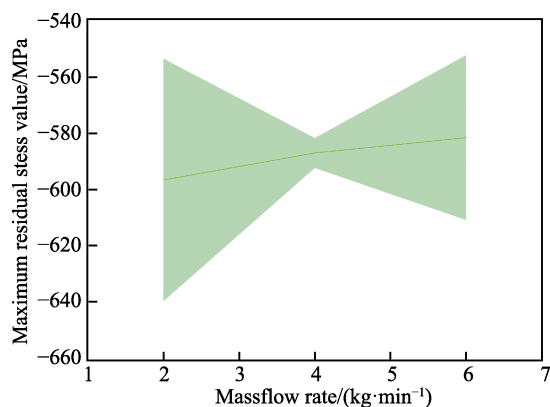


图 10 最大残余压应力值随质量流量的变化情况  
Fig.10 Variation of maximum residual compressive stress value with mass flow rate

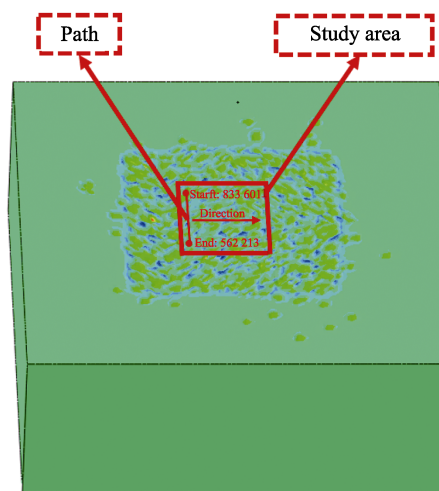


图 11 表面粗糙度提取路径  
Fig.11 Schematic diagram of surface roughness extraction path

表面粗糙度  $Ra$  的定义：在一条取样长度为  $L$  的路径上，轮廓上各点到轮廓中心线距离绝对值的平均值，即：

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (4)$$

为了方便计算，一般将其简化为：

$$Ra \approx \frac{1}{n} \sum_i^n |y| \quad (5)$$

轮廓算术平均偏差  $Ra$  如图 12 所示。

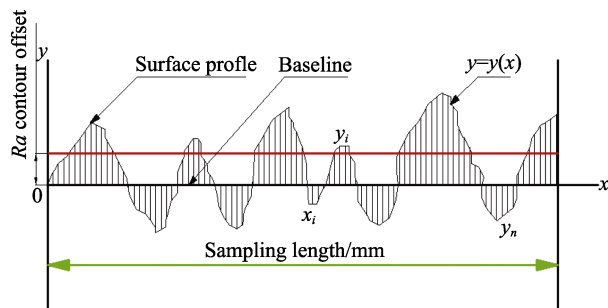


图 12 轮廓算术平均偏差  $Ra$   
Fig.12 Contour arithmetic mean deviation  $Ra$

根据式 (5) 计算出不同值流量时的表面粗糙度，其变化趋势如图 13 所示。随着质量流量的增加，表面粗糙度逐渐减小，由 2 kg/min 时的 11.21  $\mu\text{m}$  下降到 4 kg/min 时的 10.01  $\mu\text{m}$ ，最后下降到 6 kg/min 时的 9.82  $\mu\text{m}$ 。

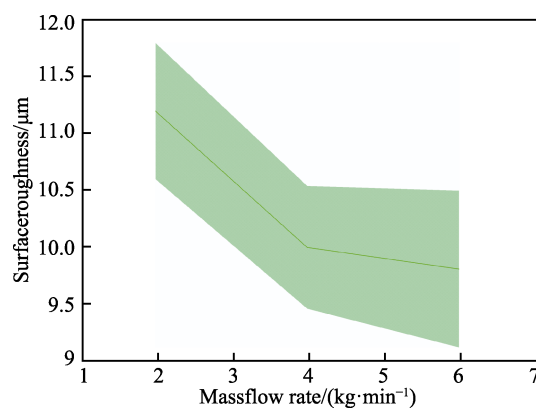


图 13 表面粗糙度随质量流量的变化情况  
Fig. 13 Variation of surface roughness with mass flow rate

不同质量流量时的靶材受喷区域三维形貌如图 14 所示。由图 14 可知，随着质量流量的增加，表面逐渐趋于平整。出现以上规律可能是由于喷嘴的入口压力相同，随着质量流量的增加，弹丸的喷射速度会减小，撞击靶材后的弹坑直径更小、弹坑深度更浅，因此表面粗糙度会减小。

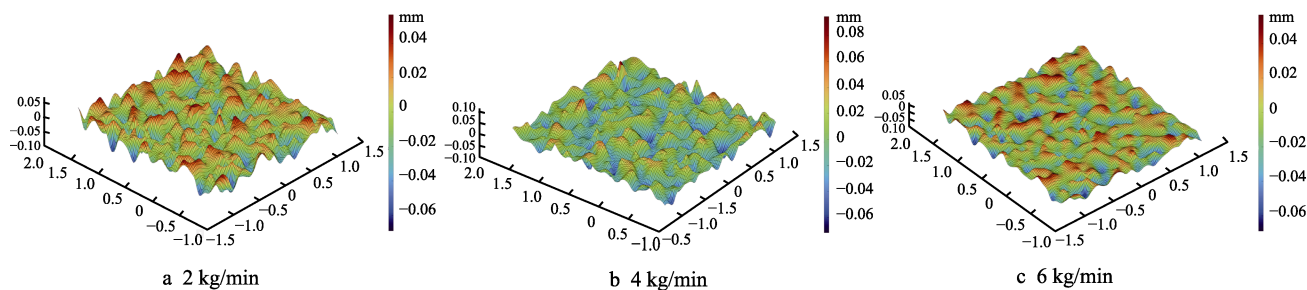


图 14 不同质量流量时受喷区域表面三维形貌  
Fig.14 Three-dimensional morphology of the surface of the sprayed area at different mass flow rates



3 实验验证

本文以海工钢 E690 为靶材, 弹丸材质为铸钢, 选择型号为 BX-MT400/G20/1/X 气动式喷丸机进行实验, 原理如图 15 所示。通过 EI 电磁流量阀控制喷丸的质量流量, 在喷丸机上的操作面板设置质量流量为 2 kg/min, 其他参数设置与模拟相同。实验时, 当覆盖率达到 100%时, 停止喷丸, 对模拟结果中的表面残余应力值和表面粗糙度值的准确性进行验证。为了避免偶然因素, 减小随机误差, 这里选择 3 块试件进行实验, 将检测平均值作为实验的结果。喷丸强化后试件的表面形貌如图 16 所示。

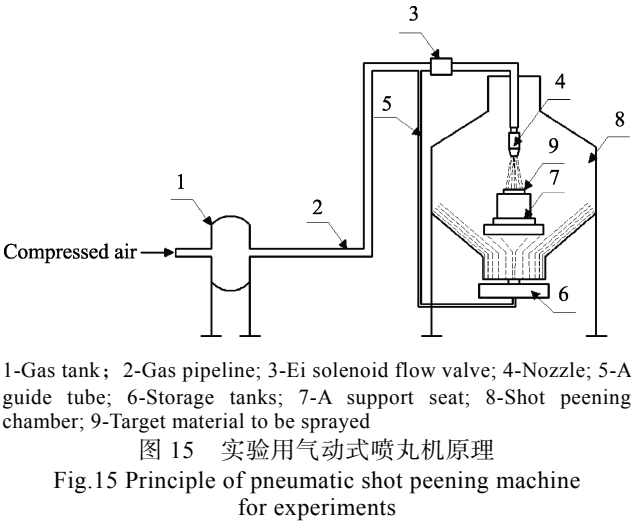


图 16 喷丸强化后试件的表面形貌

Fig.16 Surface morphology of the specimen after shot peening

3.1 表面粗糙度的检测

对喷丸强化后的 3 块试件进行超声清洗去除表面杂质, 随后使用 JB-8E 型接触式表面粗糙度测量仪对每个试件表面粗糙度进行检测, 并记录数据, 测量结果见表 6。由表 6 可知, 表面粗糙度的实验值与模拟值误差为 13.3%, 在允许的误差范围内。模拟值大于实验值, 这可能是由于在模拟中的弹丸直径均为 0.6 mm, 而在实验中弹丸直径是在一个范围内分布的, 平均直径为 0.6 mm, 向靶材传递的动能较小, 最终导致了模拟值大于实验值。

表 6 表面粗糙度测量结果与模拟结果的误差

Tab.6 Error of surface roughness measurement results and simulation results

Specimen number	Test results/ $\mu\text{m}$	Average results/ $\mu\text{m}$	Simulation results/mm	Error/%
1	11.226			
2	8.683	9.884	11.2	13.3
3	9.742			

3.2 表面残余应力的检测

使用 X 射线衍射仪对 3 个试件表面残余应力进行检测, 并记录数据, 测量结果见表 7。由表 7 可知, 表面残余应力的实验值与模拟值误差为 7.4%, 在允许的误差范围内。模拟结果大于实验结果可能是由于模拟中的参数设置较为理想, 同时喷丸实验中弹丸从喷嘴喷射出来的状态是发散的, 作用在受喷表面上的喷丸强度由中心向外减小, 而模拟中弹丸是呈束状的, 作用在整个受喷表面上的喷丸强度是相等的, 因此导致了模拟结果大于实验结果。

表 7 表面残余应力测量结果与模拟结果的误差表

Tab.7 Error of surface residual stress measurement results and simulation results

Specimen number	Test results/MPa	Average results/MPa	Simulation results/MPa	Error/%
1	-410.6			
2	-396.2	-402.50	-432.15	7.4
3	-400.7			

4 结论

本文基于有限元仿真软件 ABAQUS, 通过定义关键字的方式实现了 DEM-FEM 耦合喷丸强化模型在单一软件内的建立。讨论了质量流量为 2、4、6 kg/min 时对表层残余应力、表面残余应力和表面粗糙度等参数的影响。取质量流量为 2 kg/min, 其他参数与模拟参数相同, 进行了喷丸强化实验, 对所建立的耦合模型的准确性进行验证, 具体结论如下:

- 1) 随着质量流量的增加, 表层最大残余压应力值出现下降的趋势, 由 2 kg/min 时的-639.49 MPa 下降到 6 kg/min 时的-592.48 MPa, 下降幅度为 7.35%。
- 2) 随着质量流量的增加, 靶材表面残余压应力呈现出先增大后减小的趋势, 由 2 kg/min 时的-432.15 MPa 增大到 4 kg/min 时的-472.82 MPa, 最后减小到 6 kg/min 时的-413.92 MPa。
- 3) 靶材表面粗糙度随着质量流量的增加呈现出下降的趋势, 由 2 kg/min 时的 11.21  $\mu\text{m}$  下降到 4 kg/min 时的 10.01  $\mu\text{m}$ , 最后下降到 6 kg/min 时的 9.82  $\mu\text{m}$ 。



4) 对喷丸强化实验后的试样检测发现, 表面粗糙度的实验值与模拟值的误差为 13.3%, 表面残余应力的实验值与模拟值的误差为 7.4%, 均在允许误差的范围内, 证明所建立的模型可以准确地反映实际喷丸强化过程。

#### 参考文献:

- [1] LIU H B, ZHU W L, JIANG C H, et al. Microstructure Evolution and Residual Stress Distribution of Nano-structured Mg-8Gd-3Y Alloy Induced by Severe Shot Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404: 126465.
- [2] ZHOU J Q, SUN Z D. Numerical Characterization of Shot Peening Induced Work Hardening Gradient and Verification Based on FEM Analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 244/245: 111586.
- [3] OHTA T, HE J X, TAKAHASHI S, et al. Measurement and Identified Prediction Equation for Residual Stress Distribution in Aluminum Alloy A5052 under Various Pneumatic Shot Peening Conditions[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(2): 693-705.
- [4] WU J Z, LIU H J, WEI P T, et al. Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress and Surface Roughness of 18CrNiMo7-6 Steel[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 183: 105785.
- [5] GANGARAJ S M H, GUAGLIANO M, FARRAHI G H. An Approach to Relate Shot Peening Finite Element Simulation to the Actual Coverage[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 243: 39-45.
- [6] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. On the Potential Applications of a 3D Random Finite Element Model for the Simulation of Shot Peening[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(10): 1023-1038.
- [7] ZHAO J Y, TANG J Y, ZHOU W H, et al. Numerical Modeling and Experimental Verification of Residual Stress Distribution Evolution of 12Cr<sub>2</sub>Ni4A Steel Generated by Shot Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 430: 127993.
- [8] LIN Q J, LIU H J, ZHU C C, et al. Investigation on the Effect of Shot Peening Coverage on the Surface Integrity[J]. Applied Surface Science, 2019, 489: 66-72.
- [9] WANG Y Z, LI F, CHEN Y Y, et al. TC4 Shot Peening Simulation and Experiment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1723-1731.
- [10] XU K H, WANG J C, GAO Y K, et al. Deformation Measurement and Simulation of Ti-6Al-4V Blades Induced by Shot Peening Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(11): 5017-5032.
- [11] MAHMOUDI A H, GHASEMI A, FARRAHI G H, et al. A Comprehensive Experimental and Numerical Study on Redistribution of Residual Stresses by Shot Peening[J]. Materials & Design, 2016, 90: 478-487.
- [12] MURUGARATNAM K, UTILI S, PETRINIC N. A Combined DEM-FEM Numerical Method for Shot Peening Parameter Optimisation[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 79: 13-26.
- [13] TU F B, DELBERGUE D, KLOTZ T, et al. Discrete Element-Periodic Cell Coupling Model and Investigations on Shot Stream Expansion, Almen Intensities and Target Materials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 145: 353-366.
- [14] 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.
- [15] BHUVARAGHAN B, POTDAR Y K, AKKARAM S, et al. Shot Peening Modeling by Combining DEM and FEM[C]// International Conference on Shot Peening. [s. l.]: [s. n.], 2008.
- [16] WU G S, SHAO J G, HE Z S, et al. DEM-FEM Coupling Analysis of Shot's Energy Distribution and Target's Residual Stress of Pneumatic Shot Peening[J]. Materials Research Express, 2023, 10(9): 096505.
- [17] 田荟群. TC4钛合金超音速喷丸表面强化及疲劳的仿真研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.  
TIAN H Q. Simulation Study on Surface Strengthening and Fatigue of TC4 Titanium Alloy by Supersonic Shot Peening[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2022.
- [18] 许任宗, 陈勇, 李光鑫, 等. 复合小径喷丸强化对齿轮接触疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(5): 191-200.  
XU R Z, CHEN Y, LI G X, et al. Effect of Composite Small Diameter Shot Peening on Contact Fatigue Performance of Gear[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(5): 191-200.
- [19] 李雁淮, 王飞, 吕坚, 等. 单丸粒喷丸模型和多丸粒喷丸模型的有限元模拟[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 348-352.  
LI Y H, WANG F, LYU J, et al. Finite Element Analysis for Shot-Peening Models of Single Shot Impact and Multiple Impingement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 348-352.
- [20] KUMAR REDDY SIRIGIRI V, YADAV GUDIGA V, SHANKAR GATTU U, et al. A Review on Johnson Cook Material Model[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 3450-3456.
- [21] 蔡晋, 谢广安, 闫雪, 等. TC4 钛合金超声喷丸强化覆盖率试验与数值分析[J]. 航空制造技术, 2021, 64(19): 30-36.  
CAI J, XIE G A, YAN X, et al. Experimental and Numerical Analysis of Coverage of TC4 Titanium Alloy by Ultrasonic Shot Peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(19): 30-36.

- [22] YAN H Z, ZHU P F, CHEN Z, et al. Determination of the Optimal Coverage for Heavy-Duty-Axle Gears in Shot Peening[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(1): 365-376.
- [23] 强斌, 李亚东, 顾颖, 等. 基于喷丸随机模型的表面覆盖率计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1177-1182.
- QIANG B, LI Y D, GU Y, et al. Calculation Method of Surface Coverage Based on Shot Peening Random Model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(6): 1177-1182.
- [24] 高爱云. 超音速喷丸气固双相流的仿真及试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- GAO A Y. Simulation and Experimental Study on Gas-Solid Two-Phase Flow of Supersonic Shot Peening[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021.

(上接第 185 页)

- [16] KWON D K, LEE J H. Performance Improvement of Micro-Abrasive Jet Blasting Process for Al<sub>6061</sub>[J]. Processes, 2022, 10(11): 2247.
- [17] 徐培利. TiAlN 刀具涂层的微喷砂加工表面完整性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 39-50.
- XU P L. Study on Surface Integrity of TiAlN Tool Coating in Micro-Sandblasting[D]. Jinan: Shandong University, 2016: 39-50.
- [18] 李忠敏. 基于正交试验的喷砂工艺参数优化[J]. 江苏科技信息, 2020, 37(12): 42-46.
- LI Z M. Research on Optimization of Sandblasting Parameters Based on Orthogonal Test[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2020, 37(12): 42-46.
- [19] 刘亚男. 基于微喷砂水射流技术的刀具切削刃处理工艺及其强化机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 11-32.
- LIU Y N. Study on the Treatment Technology and Strengthening Mechanism of Tool Cutting Edge Based on Micro-Abrasive Water Jet Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 11-32.
- [20] 王云普, 袁小虎, 李定骏, 等. 喷砂工艺对 CB2 铁素体耐热钢表面粗糙度和夹砂率的影响[J]. 热喷涂技术, 2022, 14(4): 35-41.
- WANG Y P, YUAN X H, LI D J, et al. Effect of Sandblasting Process on Surface Roughness and the Fraction of Grit Residue of CB2 Heat Resistant Stainless Steel[J]. Thermal Spray Technology, 2022, 14(4): 35-41.
- [21] 韩冰源, 徐文文, 朱胜, 等. 面向等离子喷涂涂层质量调控的工艺优化方法研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21105-21112.
- HAN B Y, XU W W, ZHU S, et al. Research on Multi-Factor Parameter Optimization Methods for Quality Control of Plasma Spraying Coatings: A Review[J]. Materials Reports, 2021, 35(21): 21105-21112.
- [22] ALAO A R. Optimization of Surface Roughness, Phase Transformation and Shear Bond Strength in Sandblasting Process of YTZP Using Statistical Machine Learning[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2024, 150: 106245.
- [23] NUGROHO W H, HANDOYO S, HSIEH H C, et al. Modeling Multioutput Response Uses Ridge Regression and MLP Neural Network with Tuning Hyperparameter through Cross Validation[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2022, 13(9): 777-787.
- [24] 吕官记, 季韬. 基于响应面法的三元聚合物砂浆力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 970-976.
- LYU G J, JI T. Mechanical Properties of Ternary Polymer Mortar Based on Response Surface Method[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 970-976.
- [25] 屈盛官, 翟荐硕, 段晨风, 等. TC4 钛合金二维超声振动车削性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(22): 177-185.
- QU S G, ZHAI J S, DUAN C F, et al. Research on Machinability of Two-Dimensional Ultrasonic Vibration Assisted Turning of TC4 Titanium Alloy[J]. Materials Reports, 2023, 37(22): 177-185.