

## 基于DEM-FEM耦合的喷丸强化响应面模型构建及工艺参数影响分析

张洪伟<sup>1</sup> 闫锡超<sup>1,2</sup> 高师<sup>1</sup> 陈涛<sup>1</sup>

(1. 北京石油化学学院 机械工程学院, 北京 102617)

(2. 齐鲁理工学院 智能制造与控制工程学院, 济南 250200)

**摘要:** 为了模拟喷丸强化过程,实现喷丸强化效果快速预测,基于Abaqus软件采用离散元法-有限元法(Discrete Element Method-Finite Element Method, DEM-FEM)耦合建立随机多丸粒喷丸强化模型,并以TC4钛合金为研究对象,通过喷丸强化试验来验证耦合模型的准确性。采用Box-Behnken设计(Box-Behnken Design, BBD)法,针对弹丸大小、喷丸速度和喷丸覆盖率3个工艺参数设计了三因素三水平的喷丸仿真试验方案,采用仿真分析获得表面残余应力值及表面粗糙度值,并通过Design-Expert软件进行数值拟合,最终得到喷丸工艺参数与表面残余应力和表面粗糙度之间的函数模型,采用响应面法分析弹丸大小、喷丸速度、喷丸覆盖率三因素之间的交互作用以及对喷丸强化效果的影响规律。结果表明,响应面预测模型结果与仿真计算结果误差低于5%,所建立的响应面预测模型具有较高的近似精度和可靠性,利用此模型可实现喷丸强化效果的有效预测。

**关键词:** 喷丸强化; 响应面; 离散元-有限元耦合; Box-Behnken设计

**中图分类号:** TP391.9; TG668 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.03.008

## 0 引言

喷丸强化是一种广泛应用于机械表面处理的方法,通过大量丸粒高速轰击金属部件表面来改善金属部件的疲劳性能。此类表面处理方法使工件表层产生残余压应力,从而抑制或延缓疲劳裂纹的萌生和扩展<sup>[1]</sup>。丸粒尺寸、喷丸速度、喷丸覆盖率等喷丸工艺参数对金属构件的疲劳性能影响很大,过度或不充分的喷丸处理不仅不能改善疲劳性能,反而在一定程度上对喷丸件的疲劳性能有害。因此,选择合适的喷丸强化参数以获得最佳喷丸强化效果,对于喷丸强化工艺设计者来说至关重要。

HONG等<sup>[2]</sup>利用数值模拟的方法得出,残余压应力深度随弹丸直径的增加成线性增加,而表面残余应力基本保持不变。OHTA等<sup>[3]</sup>通过高速摄像机获取图像,利用粒子图像测速(Particle Image Velocity, PIV)技术直接测量气动喷丸的速度,测量了不同气压下的残余应力分布和弧高值;建立了弹丸速度对高强度铝合金板残余应力分布影响的有限元模型;得出当弹丸速度小于或等于50 m/s时,Almen试片强度与实测弹丸速度近似成正比。罗峰<sup>[4]</sup>以TA15钛合金为研究对象,分析喷丸速度对喷丸强化效果的影响规律,当喷丸速度为50 m/s时所引入的残余应力场和

表面粗糙度的效果较好。MAJZOABI等<sup>[5]</sup>通过有限元数值模拟发现,喷丸速度对残余应力分布有显著影响;当速度达到90 m/s时进一步增大喷丸速度反而使最大残余应力值变小。张洪伟等<sup>[6]</sup>构建了多弹丸仿真模型,探究了表面覆盖率对喷丸强化后残余应力场的影响,得到了增大喷丸覆盖率可以使残余应力场分布更均匀的结论。FUHR等<sup>[7]</sup>通过低覆盖率和高覆盖率对疲劳寿命影响的研究发现,低覆盖率(20%)导致疲劳性能下降,高覆盖率(1200%)在大多数情况下表现为表面粗糙度和残余压应力的轻微增加。

虽然许多有限元方法侧重于结果与试验的一致性,但在实际加工制造中更为关心的是通过分析残余应力、表面粗糙度以及硬度等指标来研究喷丸工艺参数对喷丸强化效果的影响。大多数试验研究只关注一个特定的喷丸强化工艺参数,如喷丸速度、喷丸覆盖率、喷丸距离等。然而,当只研究一个或两个喷丸强化工艺参数时,往往忽略了不同喷丸强化参数之间的相互作用。仿真优化方法包括遗传算法、响应面法和神经网络算法等,采用优化参数的仿真优化方法已逐渐应用于喷丸强化过程中。

MAHAGAONKAR等<sup>[8]</sup>采用全因子设计方法,分析喷丸压力、弹丸种类、喷丸时间和喷嘴距离对显微硬度的影响,并研究了上述4个参数之间的相互作用。

收稿日期: 2023-06-26 修回日期: 2023-09-02

作者简介: 张洪伟,男,1978年生,山东济南人,博士,副教授,硕士研究生导师; 主要研究方向为表面强化、机械加工变形及数值模拟; E-mail: Zhanghw@bipt.edu.cn。

引用格式: 张洪伟,闫锡超,高师,等. 基于DEM-FEM耦合的喷丸强化响应面模型构建及工艺参数影响分析[J]. 机械强度,2025,47(3):67-74.

ZHANG Hongwei, YAN Xichao, GAO Shi, et al. Construction of shot peening enhanced response surface model based on DEM-FEM coupling and the influence analysis of process parameter[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(3): 67-74.

NAM等<sup>[9-10]</sup>通过分析42CrMo和AA2124-T851材料喷丸强化后的残余应力、表面粗糙度和硬度,用响应面法(Response Surface Methodology, RSM)分析喷丸距离、喷射角度、喷丸速度和喷丸覆盖率等参数对喷丸强化效果的影响,采用Box-Behnken设计(Box-Behnken Design, BBD)和中心复合设计(Central Composite Design, CCD)对喷丸工艺参数进行优化分析,并和试验结果进行对比。UNAL等<sup>[11-12]</sup>通过RSM研究了Almen强度、表面粗糙度、表面硬度和纳米层结构变化,得出在一定的表面粗糙度和弹丸尺寸水平下,可以获得最大的表面硬度。陈家伟等<sup>[13]</sup>采用BBD法,利用试验与仿真相结合的方式得到喷丸距离、丸粒尺寸、喷丸气压3种工艺参数与喷丸表面应力和硬度之间的函数模型。胡磊等<sup>[14]</sup>BBD法确定试验方案,分析喷丸后试样表面残余及硬度的变化规律,构建了工艺参数与表面硬度及表面残余应力的预测函数模型。

目前国内外针对喷丸强化效果的研究主要集中在喷丸强化处理后预测结果真实性上,如残余应力、等效塑性应变、表面粗糙度等的验证。针对航空航天用钛合金材料喷丸强化过程的相关研究很少,特别是难以建立工艺参数与喷丸强化效果之间的数学关系,以快速预测喷丸强化效果。各个工艺参数并非确定数值,而是在一定范围内变化的,造成强化残余应力场和表面粗糙度的不确定性,并且工艺参数之间具有一定相关性且相互影响。针对这种工艺参数的不确定性,只能重复进行有限元分析,若想得出最优喷丸工艺参数组合,需耗费大量时间和精力,目前这方面的研究工作仍缺乏。

本文利用Abaqus软件建立离散元法-有限元法(Discrete Element Method-Finite Element Method, DEM-FEM)随机多丸粒喷丸强化耦合模型,并通过试验验证模型的准确性,通过BBD法制定了三因素三水平试验方案,结合试验和仿真计算得到多种方案下喷丸工件表面残余应力和表面粗糙度的变化规律,通过响应面分析构建工艺参数与表面残余应力和表面粗糙度的函数预测模型,利用此模型实现喷丸强化效果和工艺参数的双向预测。

## 1 喷丸强化DEM-FEM数值模拟

### 1.1 DEM-FEM耦合模型

DEM-FEM耦合方法是离散元和有限元相结合的一种方法。对于喷丸耦合模型来说,有限元分析主要是几何模型构建和材料属性的赋予,离散元则是利用颗粒生成器模拟丸粒连续喷射的过程,且在喷射模拟过程中充分考虑丸粒与丸粒、丸粒与靶材之间的相互作用。其技术路线如图1所示。

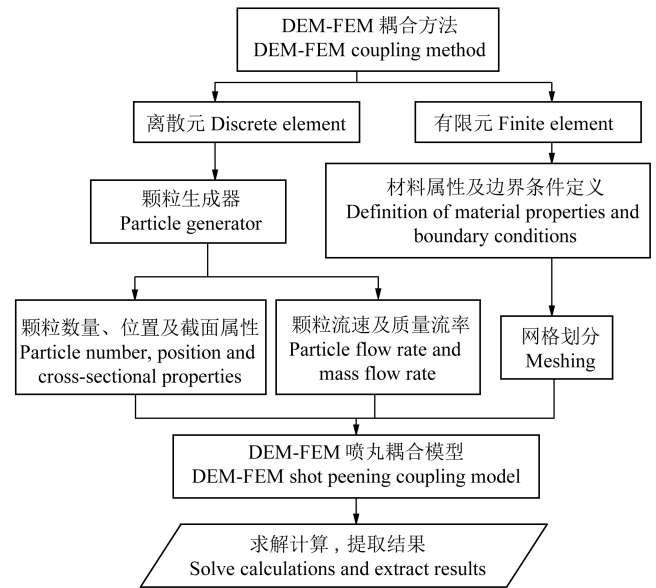


图1 DEM-FEM耦合技术路线图

Fig. 1 Road map of DEM-FEM coupling technology

通过Abaqus有限元仿真软件,利用DEM-FEM耦合模型模拟大量弹丸喷丸强化过程。喷丸强化数值分析中,几何模型分为弹丸模型和工件靶材模型,工件靶材和弹丸所选取的材料分别为TC4钛合金和铸钢丸,其基本力学参数如表1所示。采用3种规格的弹丸(S70、S110和S170对应的弹丸尺寸直径分别为0.18、0.28、0.43 mm),由于弹丸直径较小,工件靶材尺寸太大不利于计算,影响结果的准确性。为了保证模型的有效性,将靶材尺寸参数定义为 $4D \times 4D \times 5D$ ,其中 $D$ 为弹丸直径。

表1 材料基本力学参数

Tab. 1 Basic mechanical parameters of materials

| 材料<br>Material                | 密度<br>Density/(g/cm <sup>3</sup> ) | 弹性模量<br>Modulus of<br>elasticity/GPa | 泊松比<br>Poisson ratio |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| TC4钛合金<br>TC4 titanium alloy  | 4.43                               | 114                                  | 0.342                |
| 铸钢弹丸<br>Cast steel projectile | 7.8                                | 210                                  | 0.3                  |

喷丸强化具有大变形和高应变率等特点,是一种动态力学问题。采用Johnson-Cook(J-C)本构模型<sup>[15]</sup>描述TC4钛合金在喷丸强化过程中的动态力学特性。该本构模型具体表达式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C' \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 为流动应力; $A$ 为屈服应力; $B$ 为幂指数; $\varepsilon$ 为等效塑性应变; $n$ 为硬化系数; $C'$ 为应变率敏感系数; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲等效塑性应变率; $T^*$ 为无量纲温度; $m$ 为温度敏感系数。TC4钛合金J-C本构模型参数如表2所示。

根据喷丸实际情况,喷丸耦合模型在数值模拟中主要体现为约束、接触问题以及边界条件的设定。对

工件底面进行全约束,丸粒与丸粒之间采用赫兹接触,丸粒与靶材之间采用罚函数,摩擦因数为 0.3。喷丸速度是对弹丸赋予初速度,初速度计算式<sup>[16]</sup>为

$$v = \frac{16.35p_s}{1.53M_s + p_s} + \frac{29.50p_s}{0.598D + p_s} + 4.83p_s \quad (2)$$

式中,  $v$  为弹丸的初始速度, m/s;  $M_s$  为弹丸流量,  $M_s=1.5$  kg/min;  $p_s$  为喷丸气压,  $p_s=0.7$  MPa。

表 2 TC4 钛合金 J-C 模型参数

Tab. 2 Parameters of J-C model of TC4 titanium alloy

| 参数 Parameter | A/MPa | B/MPa | $n$  | $C'$  | $m$ |
|--------------|-------|-------|------|-------|-----|
| 值 Value      | 1 098 | 1 098 | 0.93 | 0.014 | 1.1 |

如图 2 所示,采用 SFM3D4R 单元对喷嘴进行网格划分,采用 C3D8R 单元对靶材进行网格划分,采用细化网格的方式解决沙漏问题。在靶材表面与弹丸接触区域,将网格尺寸设置为弹丸直径的 1/10<sup>[17]</sup>。

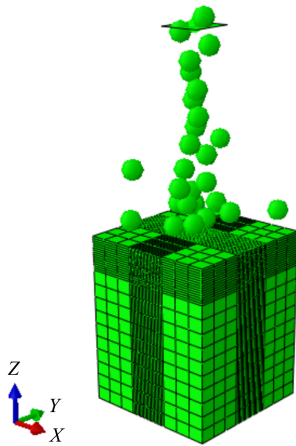


图 2 DEM-FEM 喷丸仿真模型

Fig. 2 Simulation model of DEM-FEM shot peening

### 1.2 试验及模型验证

为了验证 DEM-FEM 耦合模型的有效性,严格控制试验和仿真所涉及参数的一致性,通过分析表面残余应力和表面粗糙度  $R_a$ ,对比了喷丸数值模拟和试验结果。根据 GB/T 3075—2021,制备了图 3 所示的 Ti6Al4V 试验件。

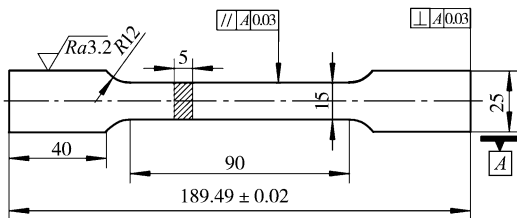


图 3 喷丸试件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shot peening specimens

试验采用气压式喷丸机,喷丸介质为铸钢丸,喷枪直径为 8 mm,喷枪到喷丸区的距离为 120 mm,喷枪安装角度范围为 30°~45°,气压范围为 0.6(1±15%) MPa。

为保证喷丸质量,须利用阿尔门试片对喷丸强度

进行标定。本文采用 DB-A1 型试片进行喷试,利用 B65 型弧高值测量仪进行喷丸强度的测试。喷丸试验工艺参数如表 3 所示。

表 3 喷丸强化工艺参数

Tab. 3 Process parameters of shot peening

| 喷丸工艺 Shot peening process | 喷丸强度 Shot peening strength/mmA | 喷丸覆盖率 Shot peening coverage/% |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 工艺 1 Process 1            | 0.1                            | 100、200、300                   |
| 工艺 2 Process 2            | 0.2                            | 100、200、300                   |
| 工艺 3 Process 3            | 0.3                            | 100、200、300                   |

分别进行喷丸试验和数值模拟。针对试验结果,利用 PROTO X 射线残余应力检测设备对喷丸处理后的工件表面进行残余应力检测;对于仿真残余应力数据结果的提取,利用 Python 脚本提取喷丸区域内沿深度方向上所有节点的应力数据,经平均后获得最终仿真应力数据。图 4 所示为表面残余应力的数值模拟结果与试验结果的对比情况。由图 4 可以观察到,数值模拟和试验在表层趋势基本一致。随着喷丸覆盖率增加,模拟值和试验值在喷丸覆盖率为 300% 时存在最大差距,分别为 -903.86、-918.17 MPa,误差约为 1.66%。这可能是由于仿真模型与试件的材料参数存在一定误差。综上所述,所建立的 DEM-FEM 耦合模型对喷丸强化后表面残余应力的分布具有一定的预测性。

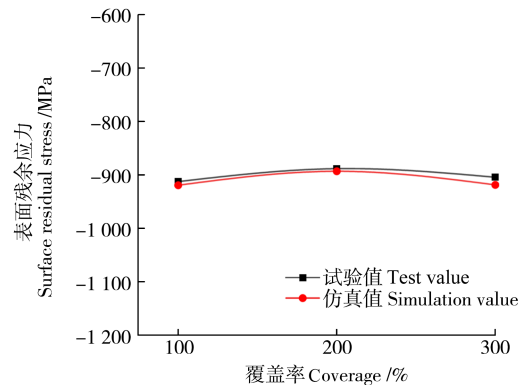
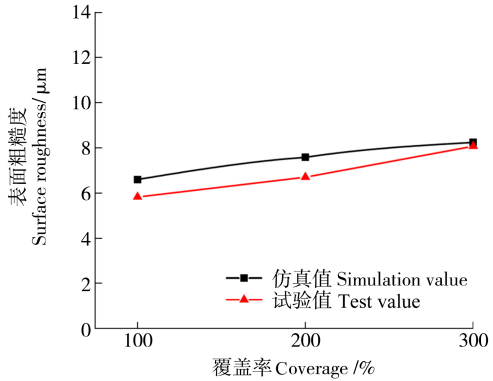


图 4 表面残余应力仿真与试验结果对比

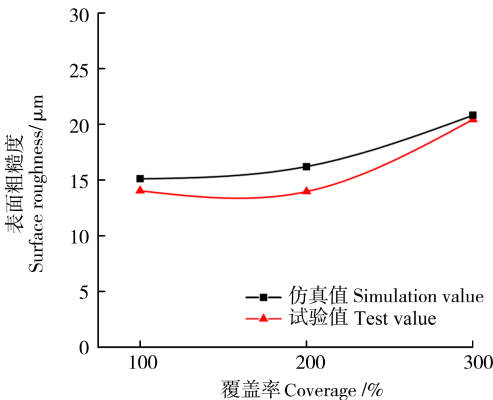
Fig. 4 Comparison of surface residual stress simulation and test results

采用 TIME3220 型手持粗糙度测量仪测量喷丸后的表面粗糙度。以  $R_a$  为表面粗糙度的评价参数。图 5 所示为不同喷丸强度和喷丸覆盖率下表面粗糙度  $R_a$  的仿真与试验结果对比。由图 5 可知,表面粗糙度随着喷丸强度和喷丸覆盖率的增大而增大。图 5(a) 中,在 0.1 mmA 喷丸强度下仿真表面粗糙度  $R_a$  从 6.60  $\mu\text{m}$  分别提高到 7.59、8.25  $\mu\text{m}$ ,增长率分别为 15% 和 25%。图 5(b) 中,在喷丸强度为 0.2 mmA 时,仿真表面粗糙度  $R_a$  从 15.12  $\mu\text{m}$  分别提高到 16.11、

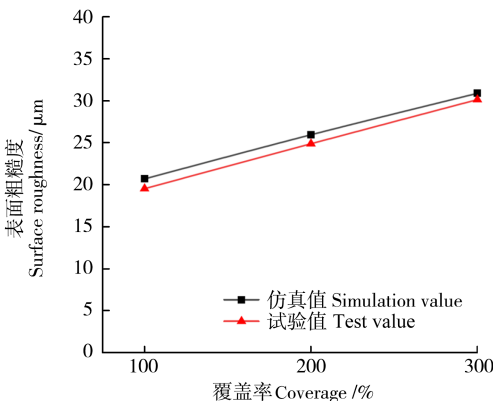
20.47  $\mu\text{m}$ , 增长率分别为 6.54%、35.38%。图 5(c) 中, 在喷丸强度为 0.3 mmA 时, 仿真表面粗糙度  $R_a$  从 20.72  $\mu\text{m}$  分别提高到 25.91、30.92  $\mu\text{m}$ , 增长率分别为 25.04% 和 49.22%。由仿真值和试验值曲线对比可以看出, 两者曲线趋势基本一致, 且数值差异不大。因此, DEM-FEM 耦合模型对表面粗糙度  $R_a$  的预测具有较好的可靠性。



(a) 喷丸强度 0.1 mmA  
(a) Shot peening strength 0.1 mmA



(b) 喷丸强度 0.2 mmA  
(b) Shot peening strength 0.2 mmA



(c) 喷丸强度 0.3 mmA  
(c) Shot peening strength 0.3 mmA

图 5 表面粗糙度仿真与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of surface roughness simulation and test results

## 2 响应面模型构建及参数设计

不同的喷丸工艺参数组合对工件表面强化效果的影响程度不同。为了获得良好的喷丸效果, 须对喷

丸工艺参数进行优化处理, 以得到最优工艺参数组合。响应面法是一种简单高效的分析方法, 通过设计合理的试验方案并采用试验或仿真的方式获得相应数据, 运用多元回归方程拟合因子与响应值之间的函数关系式, 最后通过回归分析确定最优参数组合。本文以丸粒直径  $D$ 、喷丸速度  $v$  和喷丸覆盖率  $C$  等 3 个因素为因子, 以喷丸强化后的表面残余应力值  $\sigma_{\text{res}}$  和表面粗糙度  $R_a$  为响应值, 利用 Design-Expert 软件, 采用 BBD 法进行三因素三水平试验设计, 以 -1、0、1 为水平编码, 因子水平如表 4 所示。

表 4 设计因子和因子水平

Tab. 4 Design factor and factor level

| 设计因子<br>Design factor         | 因子水平 Factor level |      |      |
|-------------------------------|-------------------|------|------|
|                               | -1                | 0    | 1    |
| 丸粒直径 Particle diameter/mm     | 0.18              | 0.28 | 0.43 |
| 喷丸速度 Shot peening speed/(m/s) | 60                | 80   | 100  |
| 喷丸覆盖率 Shot peening coverage/% | 100               | 200  | 300  |

### 2.1 试验方案及仿真结果

运用 Design-Expert 软件设计三因素三水平设计方案并采用 DEM-FEM 耦合方法依次建立不同工艺参数仿真模型, 其试验方案与仿真结果如表 5 所示。

表 5 试验参数和仿真结果

Tab. 5 Test parameters and simulation results

| 序号<br>Serial number | 设计参数<br>Design parameter     |                                  |                                  | 响应值<br>Response value                 |                                 |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
|                     | 丸粒直径<br>Particle diameter/mm | 喷丸速度<br>Shot peening speed/(m/s) | 喷丸覆盖率<br>Shot peening coverage/% | 表面残余应力<br>Surface residual stress/MPa | 粗糙度<br>Roughness/ $\mu\text{m}$ |
| 1                   | 0                            | 1                                | -1                               | -955.06                               | 40.75                           |
| 2                   | 1                            | -1                               | 0                                | -849.636                              | 31.24                           |
| 3                   | 1                            | 1                                | 0                                | -1 052.92                             | 51.31                           |
| 4                   | 0                            | 0                                | 0                                | -992.71                               | 30.46                           |
| 5                   | 1                            | 0                                | 1                                | -938.14                               | 46.29                           |
| 6                   | -1                           | -1                               | 0                                | -824.68                               | 13.59                           |
| 7                   | 0                            | 0                                | 0                                | -996.84                               | 30.46                           |
| 8                   | -1                           | 0                                | 1                                | -1 161.33                             | 20.47                           |
| 9                   | 0                            | 0                                | 0                                | -992.02                               | 30.46                           |
| 10                  | 0                            | -1                               | -1                               | -744.18                               | 22.57                           |
| 11                  | 0                            | -1                               | 1                                | -744.18                               | 22.57                           |
| 12                  | 0                            | 0                                | 0                                | -991.98                               | 30.46                           |
| 13                  | -1                           | 1                                | 0                                | -1 157.82                             | 30.99                           |
| 14                  | 0                            | 0                                | 0                                | -993.65                               | 30.46                           |
| 15                  | 0                            | 1                                | 1                                | -1 155.60                             | 46.41                           |
| 16                  | -1                           | 0                                | -1                               | -820.27                               | 14.07                           |
| 17                  | 1                            | 0                                | -1                               | -918.79                               | 45.89                           |

### 2.2 响应面模型建立

通过 BBD 法综合考虑喷丸各工艺参数对喷丸强化后表面残余应力和表面粗糙度之间的相互作用, 发

现均呈抛物线规律。为准确描述这种关系,选择以下二次多元函数作为原始模型:

$$Y = b_0 + b_1D + b_2v + b_3C + b_4Dv + b_5DC + b_6vC + b_7D^2 + b_8v^2 + b_9C^2 \quad (3)$$

式中, $Y$ 为指标响应值; $b_0 \sim b_9$ 为各项的常系数。使用最小二乘法对试验数据进行线性回归,得到各项常系数,之后进行方差分析。

在分析响应面结果时,一般会对响应面模型的精度、可靠性和预测能力进行评估。其中,一些关键的参数和指标包括:相关系数( $R$ -Squared,  $R^2$ )、校正决定系数(Adjusted  $R^2$ )、 $P$ 值、 $F$ 值、预测误差的平均值与其标准偏差的比值(Adeq Precision)和模型对未知数据的拟合能力参数(Pred  $R^2$ )。

### 3 仿真与试验结果分析

#### 3.1 工艺参数对表面残余应力影响分析

表 6 所示为响应面分析中表面残余压应力的方差分析结果。表 6 中, $Dv$ 、 $DC$ 、 $vC$  为交互项参数, $D^2$ 、 $v^2$ 、 $C^2$  为二次项参数。方差分析可以得到喷丸模拟试验中表面残余应力与相关工艺参数之间的关系。由表 6 可知,在表面残余应力与因变量的拟合模型中, $F$  值为 388.36,说明模型拟合结果具有显著性;Adeq Precision 值为 67.226,明显大于 4,表明该模型的预测结果较可靠。此外,在该拟合模型中, $R^2$  值为 0.998 0, Adjusted  $R^2$  值为 0.995 4,预测决定系数(Pred  $R^2$ ) 值为 0.968 3。该组数值说明该模型拟合效果好且预测精度较高,最终得到的二次多项回归方程如下:

$$\sigma_{res} = -995.34 - 0.3D - 132.86v - 52.05C + 23.21Dv - 29.67DC - 28.32vC + 23.91D^2 + 7.6v^2 + 65.26C^2 \quad (4)$$

表 6 表面残余压应力响应面二次模型的方差分析

Tab. 6 Variance analysis of the quadratic model of the response surface for residual compressive stress on the surface

| 数据来源<br>Data source | 方差<br>Variance      | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square   | $F$ 值<br>Value of $F$ | $P$ 值<br>Value of $P$ |
|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 模型 Model            | $2.010 \times 10^5$ | 9                        | 22 329.44           | 388.36                | <0.000 1              |
| $D$                 | 0.73                | 1                        | 0.73                | 0.013                 | 0.913 2               |
| $v$                 | 21 253.25           | 1                        | 21 253.25           | 369.64                | <0.000 1              |
| $C$                 | $1.385 \times 10^5$ | 1                        | $1.385 \times 10^5$ | 2 408.77              | <0.000 1              |
| $Dv$                | 2 198.65            | 1                        | 2 198.65            | 38.24                 | 0.000 5               |
| $DC$                | 3 592.85            | 1                        | 3 592.85            | 62.49                 | <0.000 1              |
| $vC$                | 3 207.18            | 1                        | 3 207.18            | 55.78                 | 0.000 1               |
| $D^2$               | 2 183.74            | 1                        | 2 183.74            | 37.98                 | 0.000 5               |
| $v^2$               | 243.36              | 1                        | 243.36              | 4.23                  | 0.078 7               |
| $C^2$               | 17 934.52           | 1                        | 17 934.52           | 311.92                | <0.000 1              |

$R^2=0.998 0$ ; Adjusted  $R^2=0.995 4$ ; Pred  $R^2=0.968 3$ ; Adeq Precision=67.226

图 6 为表面残余应力试验值与预测值的散点分布图。由图 6 可以看出,试验值和预测值大部分分布在直线  $y=x$  的两侧,说明拟合模型的预测效果比较准确。但同时散点主要出现在表面残余应力较大的区域,说明在这个范围内表面残余应力的机制比较复杂,拟合模型预测表面残余应力可能存在一定的误差,但在合理范围内。

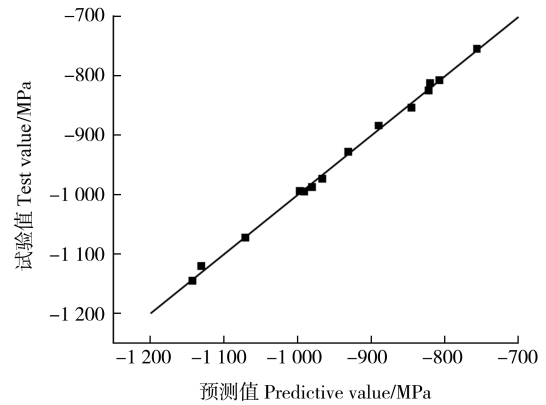


图 6 表面残余应力试验值与预测值的散点分布

Fig. 6 Scatter distribution of test and predictive value of surface residual stress

图 7 为各输入因变量在中心点区域的扰动曲线图。由图 7 可知,在试验设计的区域内,喷丸覆盖率  $C$ 、交互项参数  $DC$  和二次项参数  $C^2$  对表面残余应力的响应量影响最大。随着丸粒直径  $D$  和喷丸速度  $v$  的增大,表面残余应力先增大后减小;随着喷丸覆盖率  $C$  的增大,表面残余应力显著增大。随着丸粒直径与喷丸速度的增大,弹丸所携带的动能显著增大,使得靶材表面会发生一定程度的应力松弛,即表面残余应力数值变小的现象。图 8 所示为喷丸速度和喷丸覆盖率对表面残余压应力的交互影响。由图 8 可知,要想获得较大的表面残余应力需要较小的丸粒直径和较大的喷丸覆盖率,但当喷丸覆盖率小于中心点水平时,对表面残余应力影响不明显。

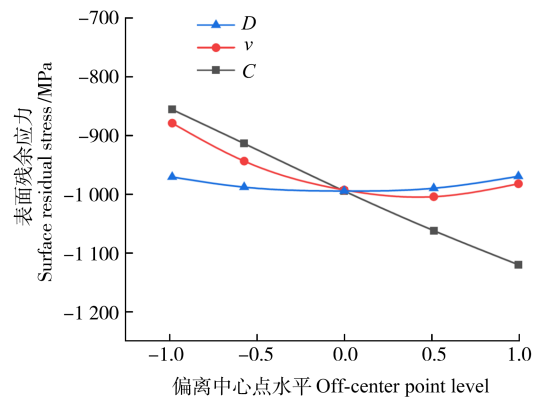


图 7 各因素在中心点附近的表面残余应力扰动曲线

Fig. 7 Disturbance curves of surface residual stress of each factor near the center point

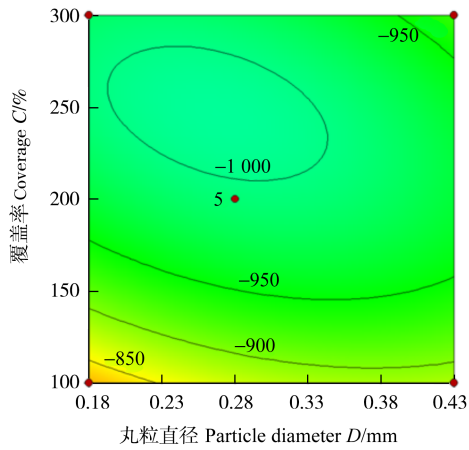


图8 喷丸速度和喷丸覆盖率对表面残余压应力的交互影响

Fig. 8 Interactive effect of shot peening speed and shot peening coverage on surface residual compressive stress

### 3.2 工艺参数对表面粗糙度影响分析

表7所示为响应量最大残余压应力的方差分析结果。表面粗糙度拟合模型的 $F$ 值为71.00,表明该模型设计的合理性。模型的Adeq Precision值达到27.934(>4)是合理的。由 $R^2$ 值为0.9892, Adjusted  $R^2$ 值为0.9752和Pred  $R^2$ 为0.8274可知,该表面粗糙度模型具有较高的吻合性,其数学方程为

$$R_a = 32.51 + 9.85D + 8.19v + 4.94C + 0.90Dv - 5.51DC - 2.26vC + 1.81D^2 + 1.09v^2 + 5.19C^2 \quad (5)$$

表7 粗糙度响应面二次模型的方差分析

Tab. 7 Variance analysis for the quadratic model of the roughness response surface

| 数据来源<br>Data source | 方差<br>Variance | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | $F$ 值<br>Value of $F$ | $P$ 值<br>Value of $P$ |
|---------------------|----------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 模型 Model            | 1 812.77       | 9                        | 201.42            | 71.00                 | <0.000 1              |
| $D$                 | 776.34         | 1                        | 776.34            | 273.65                | <0.000 1              |
| $v$                 | 526.55         | 1                        | 526.55            | 185.60                | <0.000 1              |
| $C$                 | 191.52         | 1                        | 191.52            | 67.51                 | <0.000 1              |
| $Dv$                | 3.32           | 1                        | 3.32              | 1.17                  | 0.315 2               |
| $DC$                | 123.82         | 1                        | 123.82            | 43.64                 | 0.000 3               |
| $vC$                | 20.35          | 1                        | 20.35             | 7.17                  | 0.031 6               |
| $D^2$               | 12.52          | 1                        | 12.52             | 4.41                  | 0.073 8               |
| $v^2$               | 5.04           | 1                        | 5.04              | 1.78                  | 0.224 4               |
| $C^2$               | 113.27         | 1                        | 113.27            | 39.92                 | 0.000 4               |

$R^2=0.9892$ ; Adjusted  $R^2=0.9752$ ; Pred  $R^2=0.8274$ ; Adeq Precision=27.934

图9为表面粗糙度的试验值与预测值散点分布图。由图9可知,各分散点较为紧密地分布在直线 $y=x$ 上下的很小范围内,同时分散点多分布在粗糙度数值较大的区域,说明在该区域内喷丸参数对于粗糙度的影响机制复杂,仅仅通过响应面很难准确预测,但误

差相对较小,在合理范围内,模型预测结果具有可信性。

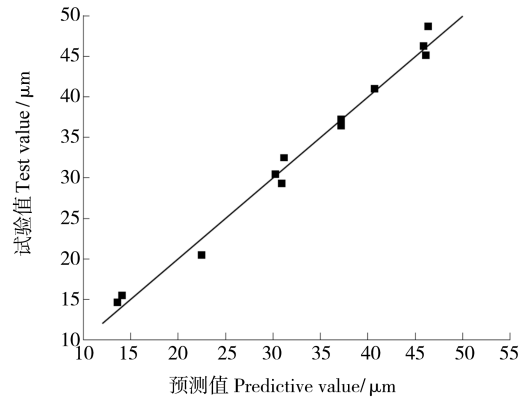


图9 表面粗糙度试验值与预测值的散点分布

Fig. 9 Scatter distribution of test and predictive value of surface roughness

图10所示为表面粗糙度的数学拟合模型中各因素在中心点区域的扰动曲线。在中心点附近区域内,丸粒直径、喷丸速度和喷丸覆盖率对表面粗糙度的影响规律基本一致。当丸粒直径、喷丸速度和喷丸覆盖率低于中心点水平时,表面粗糙度随着三者的增大而增大;当高于中心点水平时,表面粗糙度与丸粒直径、喷丸速度和覆盖率成线性关系增大。

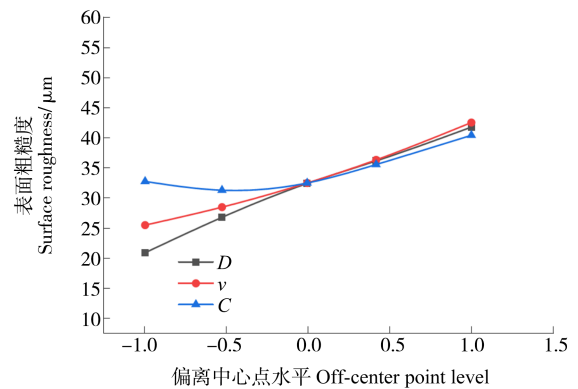


图10 各因素在中心点附近的表面粗糙度扰动曲线

Fig. 10 Disturbance curves of surface roughness of each factor near the center point

由表7可知,丸粒直径和表面覆盖率的交互项 $DC$ 的 $F$ 值为43.64,高于其他交互项的影响,其交互影响如图11所示。当丸粒直径范围为0.18~0.43 mm,覆盖率范围为100%~300%时,表面粗糙度的变化差值最大为37.71  $\mu\text{m}$ ,说明丸粒直径和喷丸覆盖率对表面粗糙度的影响有着非常显著的交互影响。等高线之间的距离随着丸粒直径和喷丸覆盖率的增加而逐渐变大,表明表面粗糙度在较小的丸粒直径和喷丸覆盖率的范围内变化较快,相反,在两者较高的范围内表面粗糙度变化较慢。这种现象可能是随着丸粒直径和喷丸覆盖率的增加,喷丸强化效果逐渐达到一个趋于饱

和的状态,这时再增加丸粒直径和喷丸覆盖率,表面粗糙度不再快速增大。

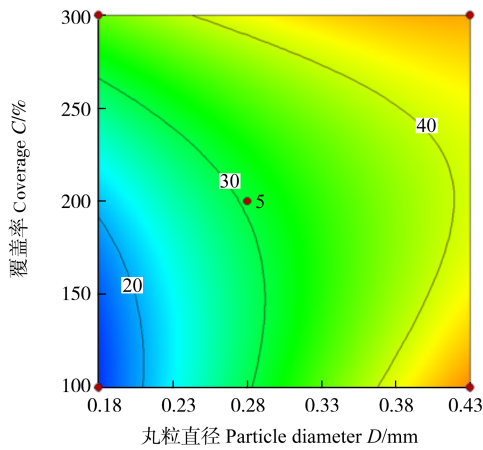


图 11 丸粒直径和覆盖率对表面粗糙度的交互影响

Fig. 11 Interactive effect of particle diameter and coverage on the surface roughness

### 3.3 模型验证

为了验证本文所建立的响应面模型的准确性。在设计空间范围内,随机选取了 6 组设计变量,分别进行了 DEM-FEM 耦合分析和响应面模型预测。其仿真结果及响应面模型预测结果如表 8 所示。

表 8 有限元分析结果及响应面模型预测结果对比

Tab. 8 Comparison of finite element analysis results and response surface model predictive results

| 样本变量             |     |     | 表面残余应力                      |                         | 粗糙度                      |                         |
|------------------|-----|-----|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Sample variables |     |     | Surface residual stress/MPa |                         | Roughness/ $\mu\text{m}$ |                         |
| $D$              | $v$ | $C$ | 仿真值<br>Simulation value     | 预测值<br>Predictive value | 仿真值<br>Simulation value  | 预测值<br>Predictive value |
| 0                | 0   | -1  | -918.79                     | -878.03                 | 31.28                    | 32.76                   |
| 0                | -1  | 0   | -849.64                     | -854.88                 | 26.71                    | 25.41                   |
| 1                | 0   | 0   | -990.19                     | -971.73                 | 46.39                    | 44.17                   |
| 1                | 1   | 1   | -1 162.78                   | -1 118.56               | 58.64                    | 56.71                   |
| -1               | -1  | -1  | -761.61                     | -748.14                 | 11.24                    | 10.75                   |
| -1               | 1   | -1  | -957.86                     | -1 003.64               | 28.87                    | 29.85                   |

由表 8 可以看出,经有限元分析和响应面模型两种方式得到的同一变量差距不大,误差均低于 5%。因此,本文所建立的响应面模型可以代替仿真分析,快速预测设计空间内对应的工艺参数的喷丸强化效果,提高计算效率。

## 4 结论

利用 DEM-FEM 耦合喷丸模型开展喷丸工艺参数影响分析,并进行工艺参数与表面残余应力及表面粗糙度的函数模型构建,得出以下结论:

1) 建立了 DEM-FEM 随机多丸粒喷丸耦合模型,

通过开展不同工艺参数下的喷丸试验,验证了 DEM-FEM 耦合模型的准确性,为后续研究大型工件、实现大规模丸粒仿真提供了基础。

2) 通过 BBD 法设计了多组试验方案,利用 DEM-FEM 耦合模型的喷丸仿真结果,得出喷丸速度、丸粒直径以及覆盖率的增加均会使工件表面残余应力在一定程度上呈现不同幅度的上升趋势的结论,同时表面粗糙度值也会随之增大。

3) 基于响应面分析法,考虑工艺参数的不确定性,基于 DEM-FEM 耦合方法建立了喷丸强化响应面数学模型。经验证比较,该模型在设计空间范围内具有很高的近似精度,最大误差精度控制在 5% 之内,可以快速定量预测喷丸强化效果,提高计算效率。

### 参考文献 (References)

- [1] 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 Yadong, 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. (In Chinese)
- [2] 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.
- [3] OHTA T, TSUTSUMI S, MA N S. Direct measurement of shot velocity and numerical analysis of residual stress from pneumatic shot peening[J]. Surfaces and Interfaces, 2021, 22:100827.
- [4] 罗峰. TA15 钛合金型材喷丸强化工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020:46-49.  
LUO Feng. Study on shot peening strengthening technology of TA15 titanium alloy profile [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020:46-49. (In Chinese)
- [5] MAJZOBI G H, AZIZI R, ALAVI NIA A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164:1226-1234.
- [6] 张洪伟,陈家庆,张以都. 基于多丸粒模型的喷丸表面强化过程数值模拟[J]. 塑性工程学报,2012,19(6):118-125.  
ZHANG Hongwei, CHEN Jiaqing, ZHANG Yidu. Numerical simulation of shot-peening process based on multiple shot model [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(6):118-125. (In Chinese)
- [7] FUHR J P, BASHA M, WOLLMANN M, et al. Coverage and peening angle effects in shot peening on HEC performance of Ti-6Al-4V [J]. Procedia Engineering, 2018, 213:682-690.
- [8] MAHAGAONKAR S B, BRAHM ANKAR P K, SEEMIKERI C Y. Effect of shot peening parameters on microhardness of AISI 1045 and 316L material: an analysis using design of experiment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(5/6):563-574.
- [9] NAM Y S, JEONG Y I, SHIN B C, et al. Enhancing surface layer properties of an aircraft aluminum alloy by shot peening using

- response surface methodology [J]. *Materials & Design*, 2015, 83: 566-576.
- [10] WANG X L, WANG Z, WU G, et al. Combining the finite element method and response surface methodology for optimization of shot peening parameters [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 129: 105231.
- [11] UNAL O, MALEKI E, KOCABAS I, et al. Investigation of nanostructured surface layer of severe shot peened AISI 1045 steel via response surface methodology [J]. *Measurement*, 2019, 148: 106960.
- [12] UNAL O. Optimization of shot peening parameters by response surface methodology [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 305: 99-109.
- [13] 陈家伟, 廖凯, 李立君, 等. 铝合金喷丸工艺参数-表面特征值的函数关系与应用 [J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 212-220.  
CHEN Jiawei, LIAO Kai, LI Lijun, et al. Function relationship between shot peening parameters and surface characteristic of Al-based alloy and application [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6): 212-220. (In Chinese)
- [14] 胡磊, 廖凯, 李立君, 等. 基于BBD实验方法的铝合金喷丸工艺预测模型及应用 [J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(4): 150-157.  
HU Lei, LIAO Kai, LI Lijun, et al. Construction and application of SP prediction model of aluminum alloy via BBD method [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2019, 40(4): 150-157. (In Chinese)
- [15] 付敏. TC4钛合金喷丸强化有限元模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 24-27.  
FU Min. Finite element simulation of shot peening strengthening of TC4 titanium alloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 24-27. (In Chinese)
- [16] 邓明明, 彭归滢, 郑明, 等. 基于FEM-DEM的粗糙表面喷丸数值模拟与试验研究 [J]. *机械传动*, 2021, 45(7): 156-160.  
DENG Mingming, PENG Guixi, ZHENG Ming, et al. Numerical simulation and experimental study of shot peening on rough surface based on FEM-DEM [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(7): 156-160. (In Chinese)
- [17] 王淼. 喷丸强化钛合金叶片表面完整性与变形的模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022: 24-25.  
WANG Miao. Simulation of surface integrity and deformation of shot peening reinforced titanium alloy blade [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022: 24-25. (In Chinese)

## Construction of shot peening enhanced response surface model based on DEM-FEM coupling and the influence analysis of process parameter

ZHANG Hongwei<sup>1</sup> YAN Xichao<sup>1,2</sup> GAO Shi<sup>1</sup> CHEN Tao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

(2. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Qilu Institute of Technology, Jinan 250200, China)

**Abstract:** In order to simulate the shot peening process and realize the rapid prediction of the shot peening effect, a random multi-shot pellet shot peening strengthening model was established based on Abaqus software using the discrete element method-finite element method (DEM-FEM) coupling, and the TC4 titanium alloy was used as the research object to carry out the shot peening strengthening test to verify the accuracy of the coupling model. The Box-Behnken design (BBD) method was used to design a three-factor and three-level shot peening simulation test scheme for the three process parameters of projectile size, shot peening speed and shot peening coverage. The surface residual stress value and surface roughness value were obtained by simulation analysis, and the numerical fitting was carried out by Design-Expert software. Finally, the function models between the shot peening process parameters and the surface residual stress or surface roughness were obtained, the interaction between the three factors of projectile size, shot peening speed and shot peening coverage was analyzed by the response surface method, and the influence law of shot peening strengthening effect was analyzed. The results show that the error between the results of the response surface prediction model and the simulation calculation results is less than 5%, the established response surface prediction model has high approximate accuracy and reliability, and the effective prediction of shot peening effect can be achieved by using this model.

**Key words:** Shot peening; Response surface; DEM-FEM coupling; Box-Behnken design

Corresponding author: ZHANG Hongwei, E-mail: Zhanghw@bipt.edu.cn

Received: 2023-06-26 Revised: 2023-09-02