

# 相同喷丸强度条件下喷丸强化效果的 数值模拟研究

盛湘飞<sup>1a</sup>, 李智<sup>1b</sup>, 赵科宇<sup>1a</sup>, 程秀全<sup>2</sup>

(1. 南华大学 a. 机械工程学院, b. 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001;  
2. 广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院, 广州 510403)

**摘 要:** **目的** 优化喷丸工艺参数的匹配方式, 进一步提升喷丸强化效果。**方法** 采用预定义场和基于移动矢量的快速建模方法, 实现了受喷构件表面 100% 表面覆盖率的喷丸模拟, 并借助三维喷丸有限元模型研究了不同喷丸工艺参数匹配方式对受喷构件表面粗糙度、弹丸撞击时的能量转变方式的影响。**结果** 当喷丸强度均为 0.35 mmN 时, 四种喷丸工艺参数匹配方式对应的表面粗糙度分别为 3.156、2.760、2.249、2.081  $\mu\text{m}$ , 应力集中系数分别为 1.205、1.142、1.103、1.071, 动能消耗率分别为 89.94%、85.53%、82.86%、80.04%, 应变能转化率分别为 7.99%、9.67%、11.82%、14.29%。**结论** 与其他喷丸工艺参数匹配方式相比, 所用喷丸工艺参数中弹丸直径愈大、喷射速度愈低, 对应受喷构件表面粗糙度和应力集中系数愈小, 有利于降低喷丸强化效果的削弱程度。在弹丸撞击初始动能大致相当的情况下, 尽管“大弹丸直径+低喷射速度”参数条件下对应的动能消耗率较低, 但应变能转化率较高, 撞击过程中摩擦耗散能较少, 有利于大塑性应变和残余压应力的产生, 可获得较好的喷丸强化效果。

**关键词:** 喷丸强度; 表面粗糙度; 应力集中; 撞击能量; 强化效果; 数值模拟

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0042-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.006

## Numerical Simulation Research on Strengthening Effect of Shot Peening at Identical Intensity

SHENG Xiang-fei<sup>1a</sup>, LI Zhi<sup>1b</sup>, ZHAO Ke-yu<sup>1a</sup>, CHENG Xiu-quan<sup>2</sup>

(1.a. School of Mechanical Engineering, b. School of Architecture and Construction, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. School of Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize matching method of shot peening process parameters, and to further improve strengthening effect of shot peening. Predefined field and moving vector-based rapid modeling method were adopted to realize simulation of shot peening which covered 100% surface of the peened component. The influences of matching method of shot peening process parameters on surface roughness of peened component and conversion mode of impact energy were researched by using a 3D finite element model (FEM). Provided with shot peening intensity of 0.35 mmN, surface roughness, stress concentration factor, kinetic energy consumption ratio and strain energy conversion ratio corresponding to four kinds of matching

收稿日期: 2018-03-15; 修订日期: 2018-06-04

**Received:** 2018-03-15; **Revised:** 2018-06-04

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51575117); 国家自然科学基金 (民航联合基金) (61179051); 湖南省教育厅项目 (15C1183)。

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(51575117); National Natural Science Foundation of China and Civil Aviation Administration of China (61179051); Project of education department in Hunan province (15C1183)

**作者简介:** 盛湘飞 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事喷丸强化工艺及装备研究。

**Biography:** SHENG Xiang-fei (1984—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: shot peening technology and equipment.

methods of shot peening process parameters were (3.156  $\mu\text{m}$ , 2.760  $\mu\text{m}$ , 2.249  $\mu\text{m}$ , 2.081  $\mu\text{m}$ ), (1.205, 1.142, 1.103, 1.071), (89.94%, 85.53%, 82.86%, 80.04%) and (7.99%, 9.67%, 11.82%, 14.29%), respectively. Compared with other matching methods of shot peening process parameters, among the used shot peening process parameters, the larger the shot diameter is, the lower the peening speed is, and the lower are surface roughness and stress concentration factor of the peened component, which helps reduce impairment effect of shot peening effect. Provided that initial kinetic energy of shot impact was nearly the same, under the parameter conditions of “a larger shot diameter + a lower impact velocity”, kinetic energy consumption ratio is lower but strain energy conversion ratio is higher, and friction dissipation energy is lower, which contributes to generation of larger plastic strain and residual compressive stress, and also a better effect of shot peening.

**KEY WORDS:** shot intensity; surface roughness; stress concentration; impact energy; strengthening effect; numerical simulation

喷丸工艺能显著提高受喷构件的抗疲劳和抗应力腐蚀性能, 目前已广泛应用于航空、航天、汽车及船舶等领域<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着计算机软、硬件技术的发展, 愈来愈多的研究人员尝试采用有限元仿真技术探索喷丸工艺的强化机理及其变化规律, 所用有限元模型也从最初的 2D 逐渐发展到 3D, 从单弹丸发展到多弹丸规则排列再到随机弹丸<sup>[3-5]</sup>。相比较而言, 随机弹丸模型因更加接近喷丸工艺实际, 模拟结果与实验结果吻合度更高<sup>[6-7]</sup>。然而, 在现有的主流随机弹丸模型中, 因受计算效率和建模难度的制约, 所用模型尺寸总体偏小, 表面覆盖率偏低, 难以准确表征不同喷丸工艺参数条件下的强化特点<sup>[8-9]</sup>。

喷丸强度作为喷丸工艺的可控指标之一, 对喷丸强化效果有显著影响。王永芳等<sup>[10]</sup>分析了喷丸强度对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢局部高频淬火试样的表面质量与残余应力沿结构件深度变化的影响, 并发现喷丸强度为 0.5 A 的喷丸工艺优于喷丸强度为 0.4 A 和 0.6 A 的喷丸工艺。OLMI G 等<sup>[11]</sup>从试验角度针对喷丸强度对齿轮疲劳寿命的影响进行了研究, 通过选择合适的喷丸强化工艺参数, 齿轮的疲劳寿命可提高 20%~30%。熊谛等<sup>[12]</sup>研究了三种不同喷丸强度对铸态镍铝青铜喷丸强化效果的影响, 结果发现, 随着喷丸强度的提高, 镍铝青铜表面的残余压应力和加工硬化程度都逐渐增大; 但喷丸强度过大时, 因表面粗糙度明显增大并伴随有显微裂纹产生, 从而削弱了喷丸强化效果。

事实上, 在弹丸种类确定后, 喷丸强度主要取决于弹丸直径和喷射速度, 而且不同的喷丸工艺参数搭配方式 (如 “大弹丸直径+低喷射速度” 或 “小弹丸直径+高喷射速度”) 可获得相同的喷丸强度值<sup>[13]</sup>。由于在不同的喷丸工艺参数搭配方式下, 弹丸撞击构件表面后的几何特征和撞击时的能量转化并不相同, 导致喷丸强化效果进一步受到工艺参数搭配方式的影响。本文将首次采用预定义场和基于移动矢量的快速建模方法, 建立满足全覆盖的喷丸有限元分析模型, 提高模拟计算效率, 并从受喷构件的表面粗糙度和弹丸撞击动能的转化等方面对不同喷丸工艺参数匹配方式下的喷丸强化效果进行评价, 研究结果可为喷丸工艺参数的合理匹配提供理论指导。

## 1 建立三维喷丸有限元分析模型

由于实际喷丸工艺中弹丸间关系异常复杂, 为降低建模难度, 提出了三种假设: 1) 所有弹丸均为球体, 且具有相同的尺寸和物理性质; 2) 弹丸只撞击构件一次; 3) 忽略弹丸间的接触与干涉。

本文采用 Python 语言开发了生成弹丸随机坐标信息的子程序, 并借助 Abaqus 6.10 软件平台建立了随机弹丸束有限元模型, 如图 1 所示, 其中  $S_d$  为任意两弹丸间距离,  $d_s$  为弹丸直径,  $n_s$  为弹丸数量。该模型采用动态显式算法对弹丸与构件间的撞击过程进行运算。网格划分阶段, 由于弹丸撞击构件时的大塑性变形发生在表面层, 为提高模拟计算效率, 仅对模型表层网格进行细化, 所用单元类型为八节点六面体减缩积分单元 C3D8R, 划分后的网格数为 192 887。另外, 因 Johnson-Cook 本构模型可反映材料在塑性变形过程中的应变硬化、应变速率硬化和温度软化效应, 故采用该模型对喷丸过程中材料的变形特性进行描述, 如式 (1) 所示。其中, 模型常数  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$  和  $m$  的取值如表 1 所示, 弹丸和构件的材料力学性能参数如表 2 所示。该有限元模型的可靠性在文献 [14] 得以验证。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

## 2 模拟结果与分析

本文采用的研究方案如下: 1) 选取四种喷丸工艺参数匹配方式, 如表 3 所示, 对应喷丸强度均为 0.35 mmN (由式 (2) 计算所得); 2) 表面覆盖率为 100%, 通过采用文献 [15] 所述方法计算不同工艺参数匹配方式达到 100% 表面覆盖率所需弹丸数如表 3 所示。

$$AH = \frac{3M_x l_m^2}{2E_T b_a t^3} \quad (2)$$

式中:  $M_x$  为弯矩;  $l_m$  为参考长度;  $E_T$  材料弹性模量;  $b_a$  为试片宽度;  $t$  为试片厚度。

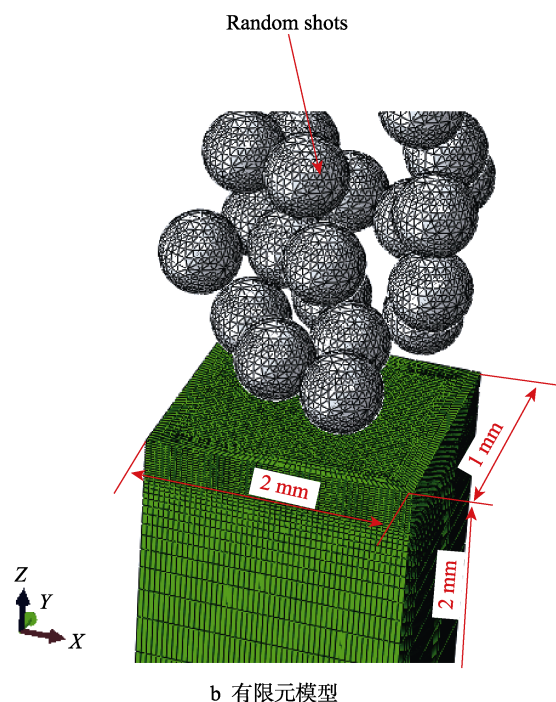
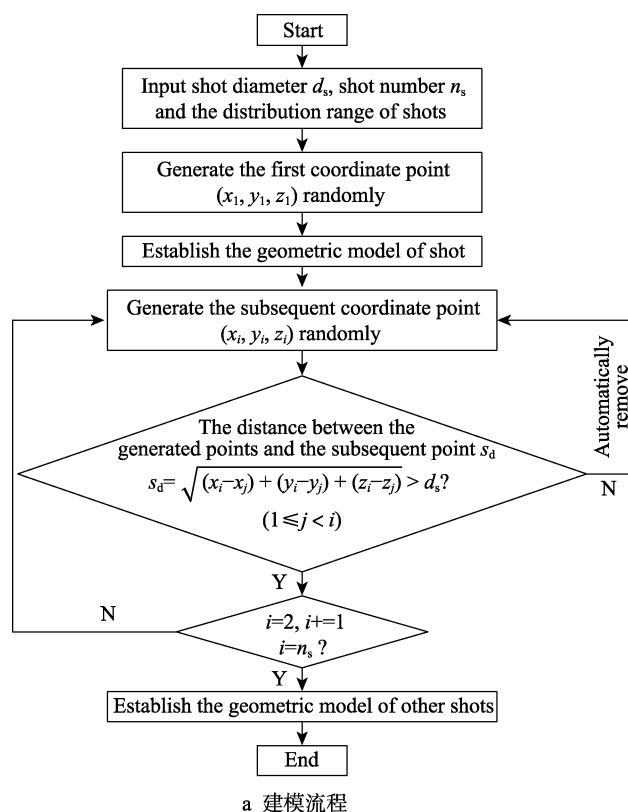


图1 喷丸有限元分析模型

Fig.1 Finite element model for analyzing shot peening process

表1 7075 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型常数  
Tab.1 Johnson-Cook constitutive model constants of 7075 aluminium alloy

Materials	The constants of Johnson-Cook constitutive model				
	A/MPa	B/MPa	C	m	n
7075 aluminium alloy	305	347	0.017	1.61	0.5

表2 材料静态力学性能参数  
Tab.2 Static mechanical property parameters of glass shots and 7075 aluminum alloy

Materials	Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Young's modulus $E/\text{GPa}$	Poisson's ratio $\nu$
Glass shots	2700	7.9	0.30
7075 aluminium alloy	2810	70.5	0.29

在喷丸工艺数值模拟过程中,若单个有限元模型中弹丸数量过多,因模型网格数量巨大,且弹丸与受喷构件表面接触关系复杂,极易导致模拟计算过程中断,严重影响模拟计算效率。针对该问题,本文将单个多弹丸模型简化为多个少弹丸模型,并采用预定义场方法实现模型间历史计算信息的自动传递。另外,采用基于移动矢量的快速建模方法,在保留所有建模信息的前提下,仅通过改变弹丸空间位置来获得后续其他模型,大幅度减少了前期建模工作。

表3 喷丸工艺参数匹配方式及其对应的喷丸强度和达到一定表面覆盖率所需弹丸数

Tab.3 Matching methods of shot peening process parameter and corresponding intensity, and shots required to reach a certain surface coverage

Matching methods	Shot diameter $d_s/\text{mm}$	Impact velocity $V_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Intensity/mmN	The required shot number to reach 100% surface coverage
1	0.2	93.5	0.35	517
2	0.3	53.2	0.35	366
3	0.4	34.5	0.35	333
4	0.5	24.3	0.35	317

## 2.1 表面完整性

图2为在不同工艺参数匹配方式下的喷丸有限元模拟结果,从图2b中的受喷表面几何轮廓特征大致可以看出,与“大弹丸直径+低喷射速度”的参数匹配方式相比,构件在“小弹丸直径+高喷射速度”参数条件下获得的受喷表面几何轮廓中凸峰和凹坑数量较多,且凸峰与凹坑的间距更小,高度差更大。

为定量分析不同参数条件下受喷表面粗糙度  $Ra$  的变化情况,将构件模型表面所有节点的  $Z$  向位移量提出并绘制成截面轮廓曲线,通过计算该轮廓曲线上各点  $Z$  向位移量的算术平均偏差,得到各参数组合对应的  $Ra$  值,如图3所示。计算结果表明,在相同喷

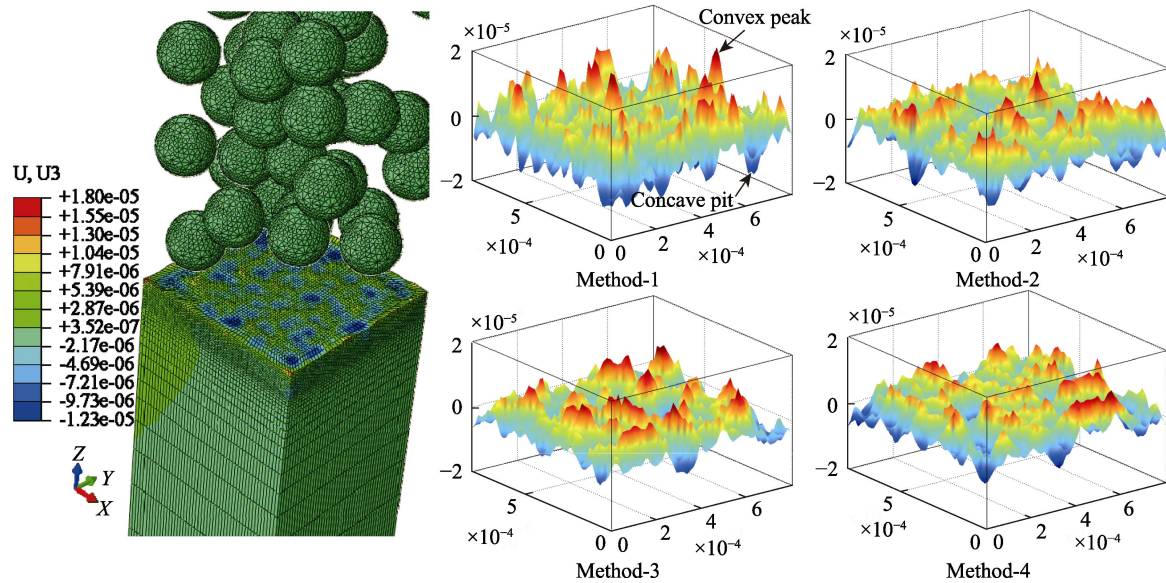


图 2 不同喷丸工艺参数匹配方式下的有限元模拟结果

Fig.2 Finite element simulation results in different matching methods of shot peening process parameters

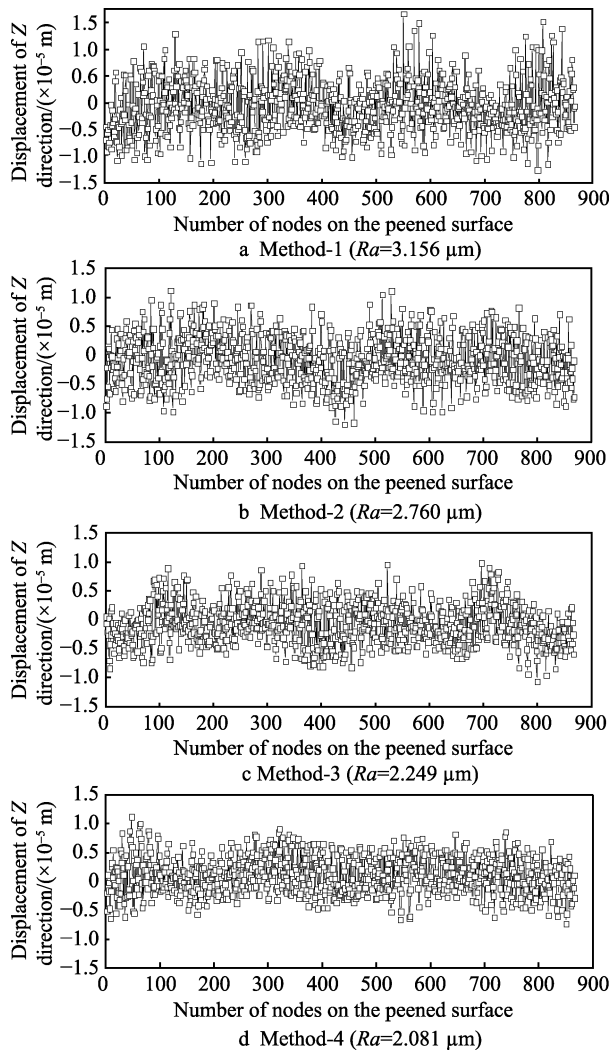


图 3 不同喷丸工艺参数匹配方式下的受喷表面截面轮廓曲线

Fig.3 Section profile curve of peened surface in different matching methods of shot peening process parameters

丸强度条件下，所用喷丸工艺参数中弹丸直径越大、喷射速度越低，对应的  $Ra$  越小。

表面粗糙度  $Ra$  虽然能在一定程度上反映受喷构件的表面质量，但不能准确度量喷丸工艺参数匹配方式对受喷构件强化效果的削弱程度。本文将进一步探索喷丸工艺参数匹配方式对受喷表面几何特征应力集中系数  $k_t$  的影响，并采用文献[16]所述方法（如式（3））对  $k_t$  进行了计算，结果如图 4 所示。由图 4 可知， $k_t$  与  $Ra$  随喷丸工艺参数改变的变化趋势基本保持一致。

$$k_t = 1 + 4.0 \left( \frac{h}{2a} \right)^{1.3} \left( \frac{h}{2a} < 0.15 \right) \quad (3)$$

式中： $h$  为受喷表面弹坑的深度； $a$  为弹坑半径，如图 5 所示。

测量了图 5 所示的单个完整弹坑的几何特征参数（包括弹坑深度  $h$  和弹坑直径  $2a$ ），并计算了弹坑

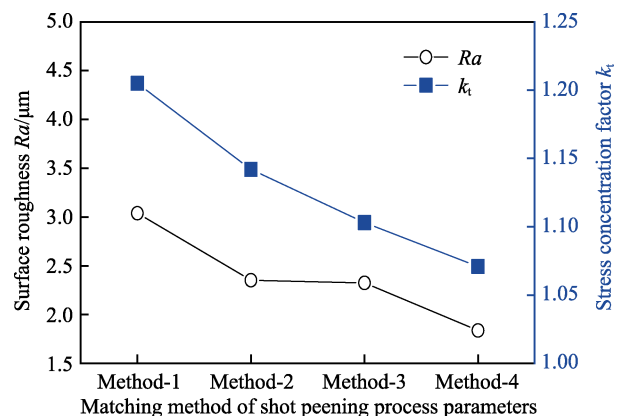


图 4 喷丸工艺参数匹配方式对受喷构件表面粗糙度及应力集中系数的影响

Fig.4 Influence of matching methods of shot peening process parameter on surface roughness and stress concentration factor of peened component



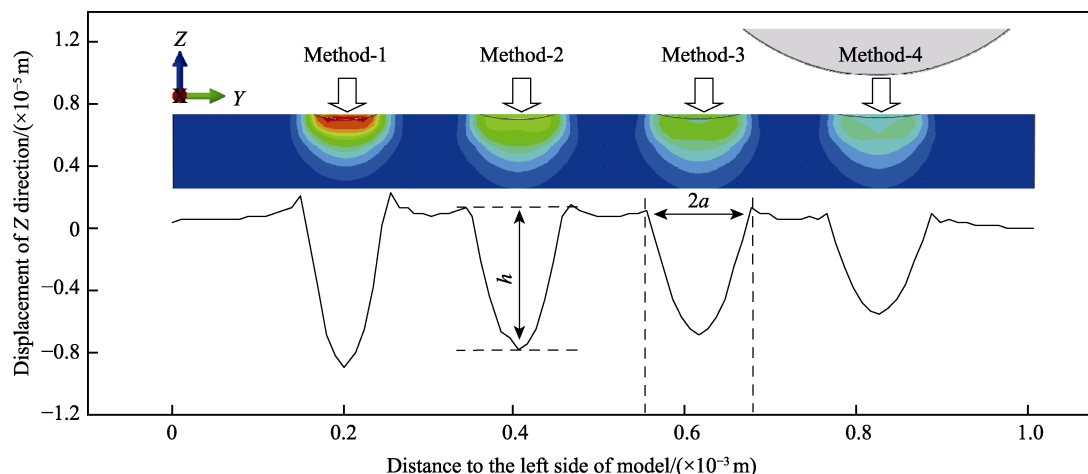


图5 不同喷丸工艺参数条件下的弹坑截面轮廓形状

Fig.5 Section profile of concave pit after shot peening under different shot peening process parameters

深度与弹坑直径之间的比值  $\frac{h}{2a}$ , 结果如表4所示。

计算结果表明, 在相同喷丸强度条件下,  $h$  随弹丸直径的增加 (或喷射速度的降低) 而减少, 而  $2a$  的变化规律与之相反。另外,  $\frac{h}{2a}$  亦随弹丸直径的增加 (或喷射速度的降低) 而减少, 与表面粗糙度和应力集中系数的变化规律保持一致。由此可见, 在相同喷丸强度条件下, 所用喷丸工艺参数中弹丸直径愈大、喷射速度愈小, 获得的弹坑直径愈大、深度愈浅, 有利于降低喷丸强化效果的削弱程度。

表4 不同喷丸工艺参数条件下受喷表面弹坑几何特征参数的计算

Tab.4 Calculation of geometric characteristic parameters of concave pit on peened surface under different shot peening process parameters

Matching methods	Depth of pit $h/\text{mm}$	Diameter of pit $2a/\text{mm}$	$\frac{h}{2a}$
1	0.0097	0.095	0.1020
2	0.0079	0.103	0.0767
3	0.0072	0.119	0.0605
4	0.0053	0.120	0.0442

## 2.2 撞击能量

喷丸强度作为喷丸工艺中弹丸撞击能量的主要表征形式, 对喷丸残余应力场分布和组织细化效果均有显著影响。本文借助有限元模型分析了四种不同喷丸工艺参数匹配方式下的初始动能转化情况, 结果如图6所示。从图6可以看出, 当弹丸与受喷构件表面接触后, 弹丸动能急剧减少 (如图中AB段), 逐渐转变为热能和材料变形能; 随后, 动能出现小幅增加 (如BC段), 主要是因为材料的部分弹性变形恢复, 将部分弹性变形能重新转变为弹丸动能, 但因在弹丸

撞击作用下, 材料的形变速度较快, 仍有部分弹性形变来不及恢复; 最后, 弹丸离开构件表面, 动能趋于稳定, 如图中C点及以后。

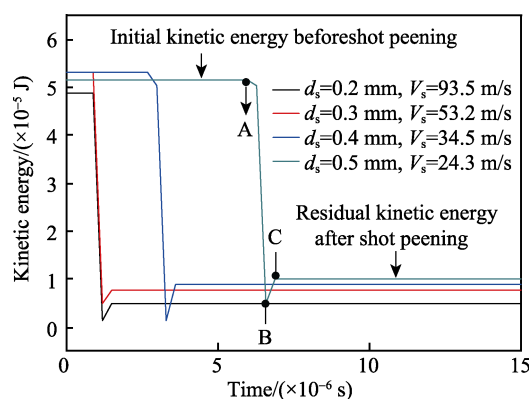


图6 弹丸撞击动能随时间的变化

Fig.6 Variation of kinetic energy during shot impact over time

本文基于弹丸撞击前的初始动能 IKE 和撞击后的残余动能 RKE, 计算了弹丸在撞击过程中动能的消耗量 CKE 及其与初始动能的比值, 结果如表5所示。计算结果表明, 在弹丸撞击初始动能大致相同的情况下, 所用喷丸工艺参数中弹丸直径越大 (或喷射速度越低), 弹丸初始动能转变为其他形式能量的比例就越低, 撞击后弹丸的残余动能越大。

表5 不同喷丸工艺参数条件下弹丸的撞击动能

Tab.5 Kinetic energy during shot impact under different shot peening process parameters

Matching methods	Initial kinetic energy IKE/ ( $\times 10^{-5}$ J)	Residual kinetic energy RKE/ ( $\times 10^{-5}$ J)	Consumed kinetic energy CKE/ ( $\times 10^{-5}$ J)	$\frac{\text{CKE}}{\text{IKE}}/\%$
1	4.87	0.49	4.38	89.94
2	5.32	0.77	4.55	85.53
3	5.31	0.91	4.40	82.86
4	5.16	1.03	4.13	80.04

另外,本文分析了喷丸过程中已消耗动能转变为应变能的情况,如图 7 所示,随弹丸撞击时间的增加,受喷构件表层材料积聚的应变能越来越多,直到 A 点达到峰值,该点的应变能为弹丸撞击构件表面后产生的总应变能;随撞击时间的进一步增加,因变形材料内部的部分弹性应变能释放,使得总应变能出现下降,直到 B 点达到最低稳定应变能(以塑性应变能为主,包含少量的未恢复的残余弹性应变能)。

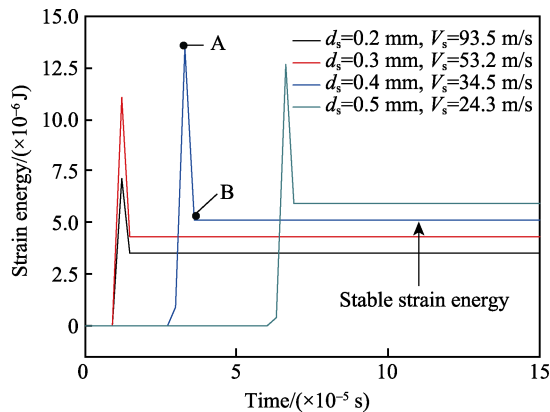


图 7 应变能随时间的变化  
Fig.7 Variation of strain energy over time

计算了不同喷丸工艺参数匹配方式下的总应变能 TSE 和稳定后的应变能 SSE 分别与已消耗动能 CKE 的比值,结果如表 6 所示。结果表明,所用喷丸工艺参数中弹丸直径越大(或喷射速度越低),总应变能占已消耗动能的比值越高,相比较而言,即有更少的动能因摩擦转变为热量而耗散。另外,稳定后的应变能占已消耗动能的比值也具有相同的变化规律,即说明在相同撞击能量的条件下,弹丸直径越大(或喷射速度越低)更有利于将弹丸的动能转变为材料的应变能。

表 6 不同喷丸工艺参数条件下的应变能  
Tab.6 Strain energy under different shot peening process parameters

Matching methods	Total strain energy TSE/( $\times 10^{-5}$ J)	$\frac{TSE}{CKE}/\%$	Stable strain energy SSE/( $\times 10^{-5}$ J)	$\frac{SSE}{CKE}/\%$
1	0.72	16.44	0.35	7.99
2	1.11	24.40	0.44	9.67
3	1.35	30.68	0.52	11.82
4	1.27	30.75	0.59	14.29

2.3 试验验证

文中对表面粗糙度  $Ra$  的有限元模拟结果进行了试验验证,如图 8 所示,试验结果中  $Ra$  的变化趋势与模拟结果保持一致。另外,文中测量了不同喷丸工艺参数匹配方式下构件的表面残余应力  $\sigma_{sur}$ ,其变化

特点与弹丸撞击能量的有限元分析结果基本吻合。可见,文中所采用的喷丸有限元模型具有较高的准确性。

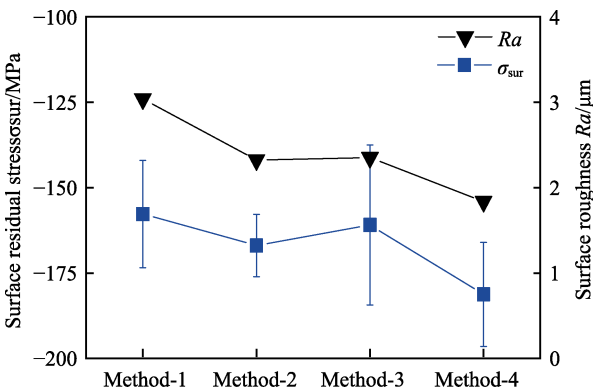


图 8 表面粗糙度和喷丸残余应力的试验结果  
Fig.8 Experimental results of surface roughness and shot peening residual stress

3 结论

- 1) 建立了基于随机弹丸束的三维喷丸工艺有限元分析模型,并通过采用基于预定义场的模型简化方法和基于矢量移动的快速建模方法,实现了弹丸在随机分布条件下的 100%表面覆盖率的模拟分析,大幅度提升了建模效率。
- 2) 在相同喷丸强度条件下,若采用“大弹丸直径+低喷射速度”的喷丸工艺参数匹配方式,可降低受喷构件的表面粗糙度和应力集中系数,进而降低喷丸强化效果的削弱程度。
- 3) 在弹丸撞击初始动能大致相当的情况下,若采用“大弹丸直径+低喷射速度”的喷丸工艺参数匹配方式,尽管对应动能消耗率较低,但应变能转变率较高,撞击过程中摩擦耗散能较少,有利于大塑性应变和残余压应力的形成。

参考文献:

[1] 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.

[2] HARDING M D, DONALDSON 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(3): 31-39.

[3] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening[J]. Applied surface science, 2012, 258(18): 6831-6840.

- [4] MURUGARATNAM K, UTILI S, PETRINIC N. A combined DEM-FEM numerical method for shot peening parameter optimization[J]. *Advances in engineering software*, 2015, 79: 13-26.
- [5] WU B, ZHANG L J, ZHANG J X, et al. An investigation of ultrasonic nanocrystal surface modification machining process by numerical simulation[J]. *Advances in engineering software*, 2015, 83: 59-69.
- [6] SHENG Xiang-fei, XIA Qin-xiang, CHENG Xiu-quan. Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy[J]. *Transactions of nonferrous metals society of China(English edition)*, 2012, 22(s2): 261-267.
- [7] FEI Y, LIN H, WANG X M, et al. Numerical modeling and experimental approach for surface morphology evaluation during ultrasonic shot peening[J]. *Computational materials science*, 2014, 92: 28-35.
- [8] 李源, 雷丽萍, 曾攀. 弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(22): 43-48.  
LI Yuan, LEI Li-ping, ZENG Pan. Shot stream finite element model for shot peening numerical simulation and its experiment study[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2011, 47(22): 43-48.
- [9] 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.
- [10] 王永芳, 刘禹炯, 冉广. 1Cr12Ni3Mo2VN 钢高频淬火过度区的喷丸强化和残余应力[J]. *金属热处理*, 2006, 31(5): 53-56.  
WANG Yong-fang, LIU Yu-jiong, RAN Guang. Shot peening and residual stress distribution in the induction hardening transition zone of 1Cr12Ni3Mo2VN steel[J]. *Heat treatment of metals*, 2006, 31(5): 53-56.
- [11] OLMÍ G, COMANDINI M, FREDDI A. Fatigue on shot-peened gears: Experimentation, simulation and sensitivity analysis[J]. *An international journal for experimental mechanics*, 2010, 46(4): 382-395.
- [12] 熊谛, 王立强, 徐小严. 不同喷丸强度下镍铝青铜的表面喷丸强化效果[J]. *机械工程材料*, 2017, 41(4): 15-19.  
XIONG Di, WANG Li-qiang, XU Xiao-yan. Surface strengthening effect of nickel-aluminum bronze treated by shot peening at different intensities[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2017, 41(4): 15-19.
- [13] BASKARAN B, SIVAKUMAR M S, BOB M. Numerical simulation of Almen strip response due to random impacts with strain-rate effects[J]. *International journal of mechanical sciences*, 2011, 53: 417-424.
- [14] 张建荣, 程秀全, 盛湘飞. 喷丸工艺对 7075 铝合金表面粗糙度的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2014, 42(9): 54-59.  
ZHANG Jian-rong, CHENG Xiu-quan, SHENG Xiang-fei. Effects of shot peening process on roughness of 7075 aluminum alloy[J]. *Light alloy fabrication technology*, 2014, 42(9): 54-59.
- [15] MIAO H, ZUO D W, WANG M, et al. Effect of shot peening on surface integrity of NAK80 steel[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and technology edition)*, 2011, 41(5): 1290-1294.
- [16] LI J K, YAO M, WANG D. An analysis of stress concentrations caused by shot peening and its application in prediction fatigue strength[J]. *Fatigue and fractures engineering materials structure*, 1992, 15(12): 1271-1279.