

基于随机碰撞的 GCr15 钢强化研磨 表面粗糙度数值模拟

刘晓初^{a,b,c}, 刘镇^{a,b,c}, 梁忠伟^{a,b,c}, 黄建枫^{a,b,c}, 高伟林^{a,b,c}, 萧金瑞^{a,b,c}

(广州大学 a.机械与电气工程学院 b.广州市金属材料强化研磨高性能加工重点实验室
c.广东省强化研磨高性能微纳加工工程技术研究中心, 广州 510006)

摘 要: **目的** 探索强化研磨工艺参数对表面粗糙度的影响规律。**方法** 采用小球均布大球模型来模拟研磨粉附着在钢珠表面对工件的强化作用, 基于 Abaqus/Python 建立强化研磨随机碰撞有限元模型, 设置不同喷射速度、喷射角度、钢珠直径、喷射时间等工艺参数进行仿真模拟。运用 Matlab 提取靶材表面形貌, 并基于此形貌, 沿 4 种不同路径计算表面粗糙度, 分析不同参数下表面粗糙度的变化规律。**结果** 随喷射时间的增加, 强化研磨表面粗糙度先增加, 后趋于稳定。喷射角度 θ 为 90° , 钢珠直径 D 为 0.8mm, 喷射速度 v 分别为 30、50、70 m/s 条件下, 随着喷射时间的增加, 表面粗糙度增加至稳定后, 分别在 $1\sim 1.2$ 、 $1.7\sim 1.9$ 、 $2\sim 2.5$ μm 波动; 喷射速度 v 为 50 m/s, 钢珠直径 D 为 0.8mm, 喷射角度 θ 分别为 30° 、 60° 、 90° 条件下, 随着喷射时间的增加, 表面粗糙度增加至稳定后, 分别在 $1.1\sim 1.3$ 、 $1.5\sim 1.7$ 、 $1.7\sim 1.9$ μm 波动; 喷射速度 v 为 50 m/s, 喷射角度 θ 为 90° , 钢珠直径 D 分别为 0.4、0.8、1.2 mm 条件下, 随着喷射时间的增加, 表面粗糙度增加至稳定后, 分别在 $0.7\sim 0.8$ 、 $1.7\sim 1.9$ 、 $2.4\sim 2.6$ μm 波动。经过试验验证, 发现试验结果与仿真结果平均误差为 8.15%。**结论** 强化研磨随机碰撞有限元模型能可靠预测强化研磨工艺下工件的表面粗糙度, 可为后续研究提供理论基础。

关键词: 强化研磨; 表面粗糙度; 随机碰撞; 数值模拟; GCr15 钢

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0385-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.041

Numerical Simulation of Surface Roughness of GCr15 Steel Strengthened Grinding Based on Random Impact

LIU Xiao-chu^{a,b,c}, LIU Zhen^{a,b,c}, LIANG Zhong-wei^{a,b,c}, HUANG Jian-feng^{a,b,c},
GAO Wei-lin^{a,b,c}, XIAO Jin-rui^{a,b,c}

收稿日期: 2020-03-14; 修订日期: 2020-05-26

Received: 2020-03-14; Revised: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1601204, 51975136); 广东省科技计划项目 (2017A010102014); 国家重点研发计划 (2018YFB2000501); 广东省科技专项资金 (“大专项+任务清单”) 项目 (2019B020404); 广东省高等学校重点领域专项 (2019KZDZX1009); 广东省高等学校科技创新团队项目 (2017KCXTD025); 广州大学科研项目 (YJ2021002)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (U1601204, 51975136); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2017A010102014); National Key Research and Development Project (2018YFB2000501); Science and Technology Special Fund for Major Items and Task List of Guangdong (2019B020404); Special Projects in Key Areas of Guangdong's Colleges (2019KZDZX1009); Technology Innovation Team of Guangdong University (2017KCXTD025); The Research Project of Guangzhou University (YJ2021002)

作者简介: 刘晓初 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能制造及装备技术。

Biography: LIU Xiao-chu (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: intelligent manufacturing and equipment technology.

通讯作者: 萧金瑞 (1988—), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为金属材料表面强化技术。邮箱: xjr640@163.com

Corresponding author: XIAO Jin-rui (1988—), Male, Master, Experimentalist, Research focus: surface hardening technology of metal materials. E-mail: xjr640@163.com

引文格式: 刘晓初, 刘镇, 梁忠伟, 等. 基于随机碰撞的 GCr15 钢强化研磨表面粗糙度数值模拟[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 385-392.

LIU Xiao-chu, LIU Zhen, LIANG Zhong-wei, et al. Numerical simulation of surface roughness of GCr15 steel strengthened grinding based on random impact[J]. Surface technology, 2021, 50(4): 385-392.

(a.School of Mechanical & Electric Engineering, b.Guangzhou Key Laboratory for Strengthened Grinding and High Performance Machining of Metal Material, c.Guangdong Engineering and Technology Research Centre for Strengthened Grinding and High Performance Micro-Nanomachining, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the law of the influence of strengthening grinding process parameters on the surface roughness. The effect of abrasive on the workpiece was simulated by the model of small balls uniformly distributed on the surface of large balls. Based on Abaqus/Python, a finite element model of random impact of intensified grinding was established, the process parameters such as different jet speed, jet angle, steel ball diameter and jet time were set for simulation. The surface morphology of the target was extracted by MATLAB. The surface roughness was calculated according to the four different paths of the surface topography, and the variation rule of the roughness under different parameters was analyzed. The results were as follows: With the increase of jet time, the surface roughness of the strengthened grinding surface increases first and then tends to be stable. When the jet angle is 90° , the diameter of the steel ball is 0.8 mm, and the jet speed is 30, 50, 70 m/s, the surface roughness increases with the jet time and stabilizes to $1\sim 1.2$, $1.7\sim 1.9$, $2\sim 2.5$ μm . When the jet speed is 50m/s, the diameter of the steel ball is 0.8 mm, and the jet angle is 30° , 60° , 90° , the surface roughness increases with the jet time and stabilizes to $1.1\sim 1.3$, $1.5\sim 1.7$, $1.7\sim 1.9$ μm . When the jet speed is 50 m/s, the jet angle is 90° , the diameter of the steel ball is 0.4, 0.8, 1.2 mm, the surface roughness increases with the jet time and stabilizes to $0.7\sim 0.8$, $1.7\sim 1.9$, $2.4\sim 2.6$ μm . It was found that the error between test results and simulation results is 8.15%. Therefore, the finite element model of random impact of strengthening grinding can reliably predict the surface roughness of strengthening grinding process and provide theoretical basis for subsequent research.

KEY WORDS: strengthened grinding; surface roughness; random impact; numerical simulation; GCr15 steel

强化研磨是一种抗疲劳、抗腐蚀、抗磨损的金属精密加工技术，其工作原理是：利用高压气体驱动研磨料（由钢珠、研磨粉、研磨液组成），等概率地随机喷射至工件表面（如图 1 所示）。该技术在材料表面引入残余压应力，提高表面硬度，在表面形成有利于抗疲劳、耐磨损的表面油囊和纹理^[1-3]。然而，强化研磨过程中，钢丸和研磨粉高速冲击工件表面，使其发生剧烈的塑性变形，进而使其粗糙度增加。在课题组的前期研究中，通过实验的方法探索了不同工艺参数和研磨料循环次数对工件表面粗糙度的影响规律^[4-9]，但强化研磨粗糙度数值模拟方面还尚未有学者进行研究。目前缺少一种能可靠

预测强化研磨粗糙度的数学模型，导致强化研磨加工粗糙度的研究仍依赖于大量的实验，这不但消耗大量的人力物力，还严重制约了强化研磨加工的研究效率。

在表面冲击强化中，影响工件表面粗糙度的主要参数有冲击时间、冲击速度、冲击角度、钢珠尺寸、工件表面初始粗糙度等。为了探究这些参数对工件表面粗糙度的影响规律，国内外学者建立了许多不同的模型。张建荣等^[10]建立了单个钢珠碰撞模型，提出了一种工件表面粗糙度预测模型。郑林彬等^[11]建立了 9 丸粒对称 3D 有限元模型，研究了不同钢珠直径对工件表面粗糙度的影响。QIANG Bin 等^[12]、GHASEMI A 等^[13]、MIAO H Y 等^[14]分别建立了三维随机碰撞模型，探究了覆盖率对工件表面粗糙度的影响规律。TARO M 等^[15]、MYLONAS G 等^[16]、BAGHERIFARD S 等^[17]分别基于三维随机冲击模型，提出了一种喷丸表面粗糙度的预测方法。以上研究中，单个钢珠和多个对称钢珠碰撞模型不能体现强化研磨加工中钢珠在空间分布的随机性，而三维随机碰撞模型只研究了钢珠与工件的碰撞作用，研磨粉附着在钢珠上对工件的碰撞效果未能体现。

综上所述，本文旨在建立一种新的强化研磨随机碰撞模型，探究不同强化研磨工艺参数对工件表面粗糙度的影响规律，通过实验验证仿真模型的合理性，以期提高强化研磨加工研究效率，并对后续的工艺参数选择提供理论指导。

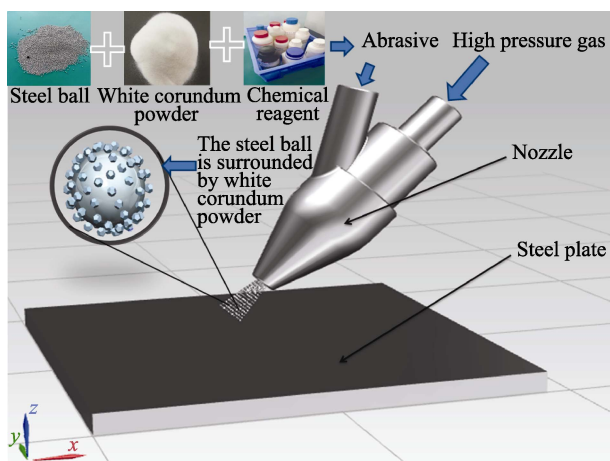


图 1 强化研磨加工原理
Fig.1 Principle of strengthened grinding

1 建立强化研磨模型

强化研磨加工是一个复杂的循环动态碰撞接触过程,涉及到材料非线性、几何非线性、边界非线性等问题,建立完全符合实际情况的仿真模型极为困难。因此,为了简化仿真计算过程,在不影响研究结果的前提下,做出如下假设^[18]:研磨粉与钢珠不发生相对运动;所有钢珠、研磨粉与靶材的碰撞速度大小和方向均相同,无速度差;靶材初始表面为理想光滑平面;靶材为均匀且各向同性材料。

1.1 几何模型

在强化研磨加工中,研磨粉的平均粒径通常为 0.16 mm 左右,形状差异很大(如图 2 所示),对研磨粉进行建模难度较大。为降低建模难度,本文采用半径为 $r=0.08$ mm 的球模拟研磨粉颗粒,并将研磨粉颗粒均匀地粘附在钢珠表面,形成一组研磨料。如图 2 所示,小球均匀分布在大球周围,小球重心位于大球的表面,小球的数量根据式(1)进行计算。

$$n = \frac{4\pi R^2}{2\sqrt{3}r^2} \quad (1)$$

式中: n 为研磨粉(即小球)数目; R 为钢珠半径; r 为小球半径。

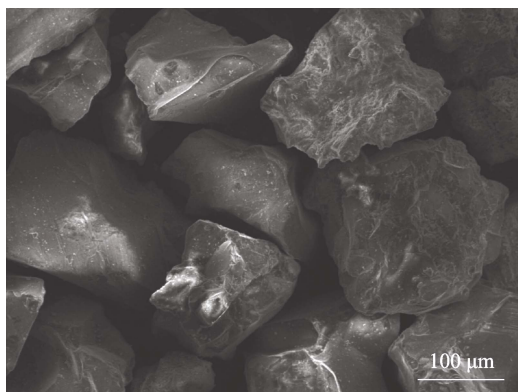


图 2 研磨粉形状

Fig.2 Shape of grinding powder

强化研磨加工过程为连续不断的钢珠、研磨粉对工件表面进行撞击,钢珠和研磨粉在空间的分布具有随机性。为了提高研究效率,选取工件中一部分区域作为靶材,其上方为在空间随机分布的一定数目的钢珠与研磨粉(研磨粉与钢珠如图 3 所示)。基于 Abaqus/Python,建立了一个新的强化研磨随机冲击有限元模型如图 4 和图 5 所示。靶材形状为长方体,其中长度 $L=1.5$ mm,宽度 $W=1.5$ mm,高度 $H=2.5$ mm;撞击区域为长方体,其中长度 $L_x=0.5$ mm,宽度 $L_y=0.5$ mm,高度 $h=0.8$ mm;撞击平面 A 的面积为 0.25 mm²。研磨料在空间中的位置由 Python 编程软件中的随机函数确定。当喷射角为 90°时,任意

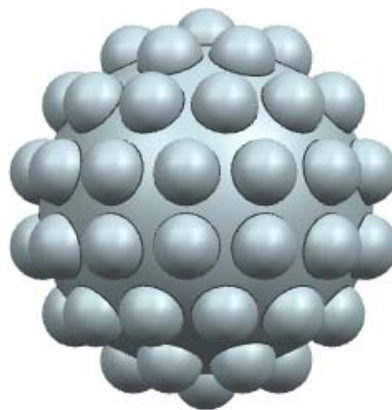


图 3 研磨粉均匀分布模型

Fig.3 Grinding powder uniform distribution model

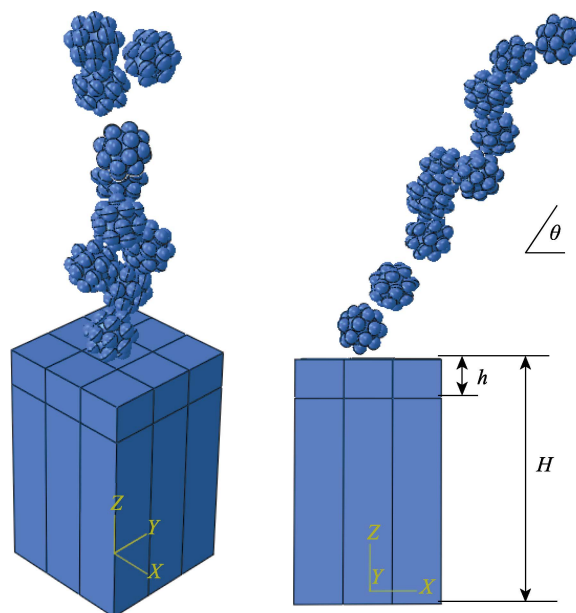


图 4 三维强化研磨随机碰撞模型

Fig.4 3D stochastic-Strengthen grinding FEM

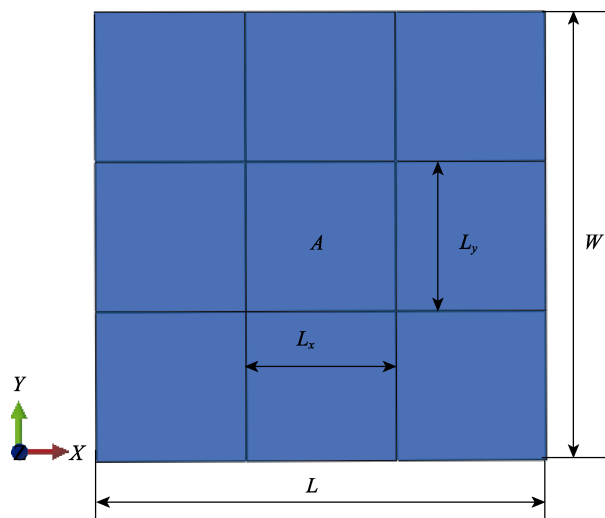


图 5 冲击区域尺寸

Fig.5 The dimensions of target

一组研磨料质心的三维坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 如式(2)所示,坐标原点位于靶材底面的中心。当喷射角度不为 90° 时,任意一组研磨料质心的三维坐标 (X_{ia}, Y_{ia}, Z_{ia}) 如式(3)所示。

$$\begin{cases} X_i = \text{Random.uniform}\left(-\frac{L_x}{2}, \frac{L_x}{2}\right) \\ Y_i = \text{Random.uniform}\left(-\frac{L_y}{2}, \frac{L_y}{2}\right) \\ Z_i = \text{Random.uniform}(H+R+r, (R+r) \cdot 2N) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_{ia} = X_i + (Z_i - H - R - r) \cdot \cos \theta \\ Y_{ia} = Y_i \\ Z_{ia} = (Z_i - H - R - r) \cdot \sin \theta + H + R + r \end{cases} \quad (3)$$

式中: Random.uniform 为 Python 软件中的随机函数; θ 为喷射角度。

当研磨料颗粒与目标碰撞时,球表面只有一小部分研磨颗粒(小球)可以与目标表面接触,不同的接触情况会产生不同的碰撞效果。实际强化研磨加工过程中,在气流的作用下,研磨料会产生旋转,因此每组研磨料与工件表面的接触情况是不确定的。为了模拟这种接触的随机性,研磨料与靶材碰撞之前,朝任意方向旋转一个随机的角度,角度的大小由式(4)确定。在实际强化研磨加工过程中,为了防止研磨料之间发生干涉,约束任意两组研磨料之间的距离 $L_i > 2R+r$, 整个模型随机过程的实现如图6所示。

$$\beta = \text{Random.uniform}(0, 360) \quad (4)$$

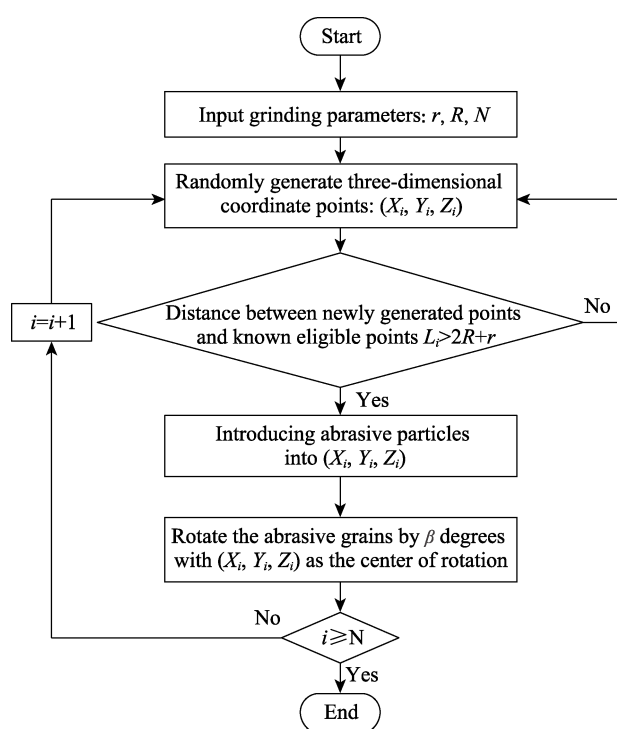


图6 分析流程

Fig.6 Procedure of analysis

1.2 网格划分与边界条件

在网格划分上,研磨料采用四节点线性四面体单元C3D4。靶材采用八节点线性减缩积分单元C3D8R,并进行沙漏控制。HAN K等^[19]的研究表明,在靶材的网格尺寸不大于钢珠直径1/10的前提下,喷丸有限元仿真结果较为稳定,故在冲击区域 $(L_x \times L_y \times h)$ 进行局部网格细化,靶材上最小的网格尺寸为 $0.016 \text{ mm} \times 0.016 \text{ mm} \times 0.016 \text{ mm}$ 。

在整个仿真过程中,约束靶材下表面所有自由度,限制其转动与位移。研磨料并不作为研究对象,故在计算过程中将其约束为刚体。定义研磨料与靶材的接触为面-面接触,接触算法为罚函数接触法,研磨料与靶材的摩擦系数取0.3^[20]。采用Abaqus/Explicit模块对整个模型进行计算求解,分析步时长 t 按式(5)计算。

$$t = t_0 + \frac{2(R+r) \cdot (N-1)}{v_0} \quad (5)$$

式中: t_0 为一般单个钢珠碰撞模型稳定时长,根据文献[21], t_0 取 $10 \mu\text{s}$; N 为研磨料数目; v_0 为研磨料的初始速度。

1.3 材料模型

研磨料和靶材的材料均为GCr15轴承钢,其主要力学性能参数见表1。强化研磨加工过程中,工件会在短时间内发生强烈的塑性变形,而Johnson-cook本构模型能够很好地描述材料在高应变率条件下的应力应变关系^[22-23],故在靶材中应用该本构模型,其具体表达式见式(6)。

$$\sigma = \left(A + B \bar{\epsilon}^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\bar{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (6)$$

式中: σ 为材料的动态屈服应力; A 为初始屈服应力; B 为材料的应变硬化模量; C 为材料的应变率强化参数; n 为材料应变硬化指数; m 为材料热软化指数; $\bar{\epsilon}^p$ 为材料的等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为材料的参考塑性应变率; T 、 T_r 、 T_m 为与温度有关的参数,强化研磨一般在常温下进行,故忽略温度对本模型的影响。

A 、 B 、 C 、 n 、 m 为通过实验得到的材料本构参数,GCr15的Johnson-Cook本构模型参数见表2^[24-25]。

表1 GCr15钢的力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties of GCr15 bearing steel

Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Young's modulus/GPa	Yield limit/ MPa	Poisson's ratio
7850	217	1744	0.3

表2 GCr15的Johnson-Cook参数

Tab.2 Johnson-Cook parameters of GCr15

A/MPa	B/MPa	C	n	m
2482.4	1498.5	0.027	0.19	0.66

2 表面粗糙度计算

强化研磨仿真计算后, 冲击区域的表面形貌如图 7 所示, 使用 Matlab 提取所有表面节点在 Z 方向上的位移 (U_3), 并进行表面粗糙度评估。

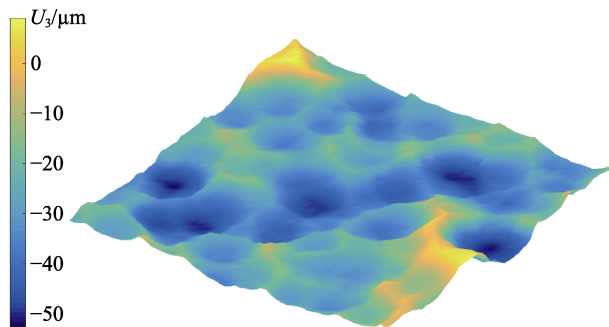


图 7 强化研磨有限元模拟结果

Fig.7 Finite element simulation results of strengthened grinding

采用轮廓算术平均偏差 Ra 对强化研磨有限元模拟后的表面粗糙度进行评估, 其表达式如式 (7) 所示^[26]。

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x) - Z_l| dx \quad (7)$$

式中: l 为取样长度; $Z(x)$ 为采样点的幅值。 $Z=Z_l$ 为最小二乘中线。

为了将仿真计算结果用于计算表面粗糙度, 将式 (7) 进行扩展并离散化, 得到式 (8)。

$$Ra = \frac{1}{UV} \sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V |Z_{ij} - Z_s| \quad (8)$$

式中: U 、 V 分别为冲击区域 A 表面长度、宽度方向上的节点数; Z_{ij} 为节点 ij 在 z 方向上的位移; Z_s 为冲击区域表面拟合出的最小二乘曲面。

3 结果与分析

在实际强化研磨加工过程中, 磨料的流量基本不变, 因此用研磨料数量 N 与冲击区域面积 A 的比值 N/A 表示强化研磨加工过程中的喷射时间, N/A 与实际加工过程中的喷射时间 t 的对应关系如式 (9) 所示。在此基础上, 研究喷射速度、喷射角度和钢珠直径对强化研磨表面粗糙度的影响规律。

$$t = \frac{\pi \rho D^3 S N}{3Q A} \quad (9)$$

式中: t 为喷射时间, min; ρ 为钢珠密度, kg/m^3 ; N 为钢珠数目; D 为钢珠直径, m; S 为研磨料在工件上的覆盖面积; A 为仿真计算时冲击区域面积; Q 为研磨料流量, kg/min 。

3.1 喷射速度对表面粗糙度的影响

取喷射角度 $\theta=90^\circ$, 钢珠直径 $D=0.8 \text{ mm}$, 喷射速度 v 分别为 30、50、70 m/s。不同喷射速度下, 表

面粗糙度 Ra 随 N/A (喷射时间) 的变化规律如图 8 所示。在强化研磨加工初期, 研磨料与冲击区域碰撞产生塑性变形, 导致表面粗糙度升高, 同时对靶材表面产生强化作用, 靶材的屈服应力增大, 故粗糙度增加速度随 N/A 增加而变慢。另一方面, 冲击区域表面覆盖率达到 100% 后, 表面凸峰会被研磨料碰撞形成新的凹坑, 而在凹坑边缘形成新的凸峰 (如图 9 所示)。此时表面粗糙度趋于稳定, 但每一次碰撞的塑性变形量会有所波动, 如图 8 所示, 随 N/A 的增加, 表面粗糙度 Ra 先增加、后趋于稳定, 并在一定范围内波动。

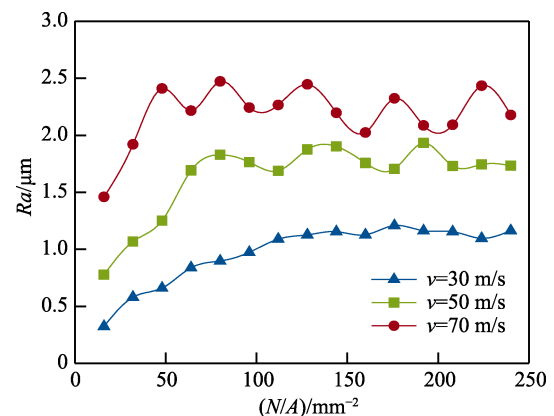


图 8 不同喷射速度下表面粗糙度随 N/A 的变化规律

Fig.8 Variation of surface roughness along N/A at different jet speeds

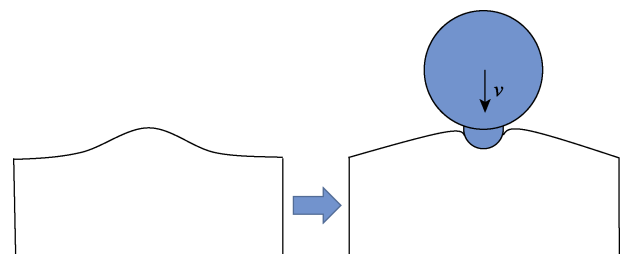


图 9 凸峰与研磨料碰撞

Fig.9 Abrasive collide with convex peak

喷射速度 v 为 30、50、70 m/s 时, 随 N/A 的增加, Ra 增加至稳定后分别在 1~1.2、1.7~1.9、2~2.5 μm 波动。由于喷射速度越大, 研磨料的动能越大, 每一次碰撞靶材的塑性变形量也越大, 所以 Ra 峰值和平稳后的波动幅度随喷射速度的增加而增加。

3.2 喷射角度对表面粗糙度的影响

取喷射速度 $v=50 \text{ m/s}$, 钢珠直径 $D=0.8 \text{ mm}$, 喷射角度 θ 分别为 30° 、 60° 、 90° 。不同喷射角度下, 表面粗糙度 Ra 随 N/A (喷射时间) 的变化规律如图 10 所示。喷射角度 θ 为 30° 、 60° 、 90° 时, 随 N/A 的增加, Ra 增加至稳定后, 分别在 1.1~1.3、1.5~1.7、1.7~1.9 μm 波动。由于喷射角度越大, 研磨料在与靶材垂直的方向上的分速度也越大, 传递给靶材的能量也越大, 靶材塑性变形也越大, 但是研磨料在平行于

靶材平面方向上的分速度产生的切削作用也能引起粗糙度的变化。随喷射角度的增加, Ra 的峰值增加, 波动幅度则变化不明显。

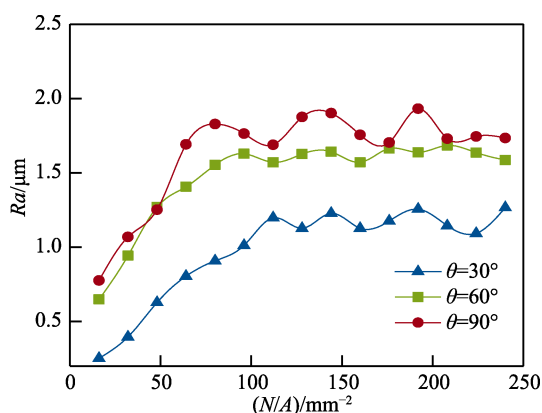


图 10 不同喷射角度下表面粗糙度随 N/A 的变化规律
Fig.10 Variation of surface roughness along N/A at different jet angle

3.3 钢珠直径对表面粗糙度的影响

取喷射速度 $v=50$ m/s, 喷射角度 $\theta=90^\circ$, 钢珠直径 D 分别为 0.4、0.8、1.2 mm。不同喷射角度下, 表面粗糙度 Ra 随 N/A (喷射时间) 的变化规律如图 11 所示。随 N/A 的增加, Ra 增加至稳定后分别在 0.7~0.8、1.7~1.9、2.4~2.6 μm 波动。钢珠直径增大, 钢珠本身质量增大, 加上钢珠上能附着更多的研磨粉, 研磨料质量显著增大, 传递给靶材的能量也显著增大, 使得靶材表面塑性变形显著增大, 因此随钢珠直径的增大, 粗糙度峰值显著增大。另一方面, 钢珠直径增大, 碰撞时与靶材接触的研磨粉数量最大值增大, 导致钢珠直径对粗糙度平稳后的波动幅度的影响无明显规律。

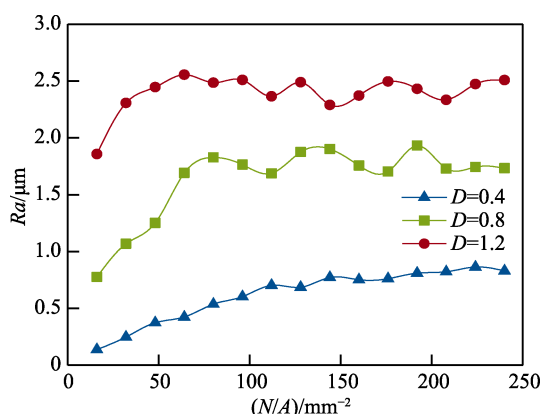


图 11 不同钢珠直径下表面粗糙度随 N/A 的变化规律
Fig.11 Variation of surface roughness along N/A at different Steel ball diameter

4 实验验证

实验使用的材料为经淬火回火后的 GCr15 钢板, 其规格为 100 mm×75 mm×10 mm, 实验设备为广州

大学金属材料强化研磨高性能加工实验室自主研发的强化研磨机 (如图 12 所示)。实验前, 对钢板待加工表面进行抛光处理, 消除钢板初始粗糙度对实验结果的影响。为了充分验证该模型的可靠性, 设计 3 组实验与仿真结果进行对比, 实验方案和具体的工艺参数见表 3。

表 3 强化研磨工艺参数与实验方案

Tab.3 Process parameters of strengthened grinding and experimental scheme

Parameters	Jet speed/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Jet angle/ ($^\circ$)	Steel ball diameter/ mm	Jet distance/ mm	Size of grinding powder/mm
Group 1	30	30	0.4		
Group 2	50	60	0.8	80	0.16
Group 3	70	90	1.2		



图 12 强化研磨机
Fig.12 Strengthened grinding machine

实验过程中, 每隔 10 s 对钢板的表面粗糙度进行一次测量, 测量仪器为 XM-200 型表面形貌测量仪。每次测量取 5 个测量点, 取其平均值作为该时间点的粗糙度 Ra 值。待连续 5 个时间点表面粗糙度没有大幅度上升时, 停止实验, 取这 5 个时间点的粗糙度平均值作为当前工艺参数下工件的粗糙度, 加工前后的实验样品如图 13 所示。

根据表 3 中的实验方案, 进行相应的仿真计算, 由式 (9) 计算出间隔 10 s 对应的 N/A 值为 16 mm^{-2} , 则仿真中 N/A 值分别取 16, 32, 64, \dots mm^{-2} , 仿真与实验的边界条件保持一致。分别将仿真与实验测得的粗糙度数值进行样条拟合, 结果如图 14 所示。取稳定阶段粗糙度数据的平均值作为当前工艺参数下工件的粗糙度, 仿真结果与测量结果见表 4。粗糙度实验数值比仿真数值相比偏小, 推测原因为强化研磨

加工时，钢板强化不均匀，喷射区域中心位置较四周的研磨料更密集。

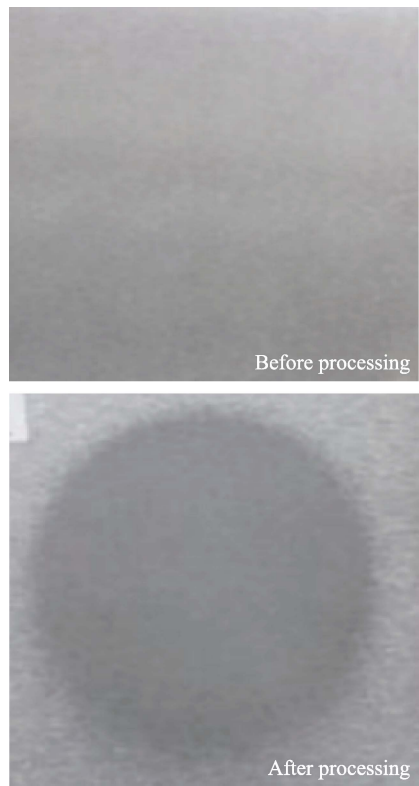


图 13 强化研磨加工前后对比

Fig.13 Comparison before and after strengthened grinding

表 4 R_a 实验结果与仿真结果对比

Tab.4 Comparison of R_a experimental results and simulation results

Results	Simulation result/ μm	Experimental result/ μm	Relative error/%
Group 1	0.52 ± 0.02	0.48 ± 0.03	8.33
Group 2	1.35 ± 0.06	1.24 ± 0.04	8.87
Group 3	2.81 ± 0.06	2.62 ± 0.03	7.25

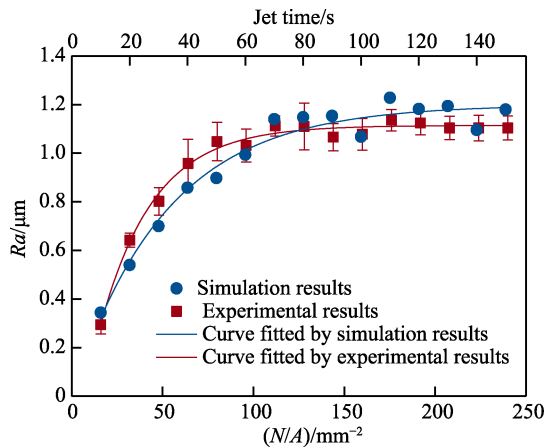


图 14 强化研磨仿真与实验结果对比

Fig.14 Comparison of simulation and experiment results of strengthened grinding

5 结论

基于 Abaqus/Python 建立了强化研磨随机碰撞有限元模型，研究了不同强化研磨工艺参数对表面粗糙度的影响，并通过实验对仿真结果进行验证，得到了如下结论：

1) 在强化研磨前期，表面粗糙度随喷射时间的增加而增加。材料表面达到饱和后，继续延长喷射时间，表面粗糙度会趋于稳定，并在一定范围内波动。

2) 随喷射速度、喷射角度、钢珠直径的增加，材料表面达到饱和后的粗糙度均增加。

3) 强化研磨粗糙度实验测量结果和仿真计算结果平均相对误差为 8.15%，表明模型可用于强化研磨加工中表面粗糙度的预测，为后续研究提供理论基础。

参考文献：

[1] 刘晓初, 萧金瑞, 陶建华, 等. 一种耐磨合金钢工件表面的强化研磨方法: 中国, 103878703B[P]. 2014-06-25.
LIU Xiao-chu, XIAO Jin-rui, TAO Jian-hua, et al. A wear-resistant alloy steel strengthening method for polishing the surface of the workpiece: China, 103878703B[P]. 2014-06-25.

[2] LIANG Zhong-wei, LIAO Shao-peng, WEN Yi-heng, et al. Working parameter optimization of strengthen waterjet grinding with the orthogonal-experiment-design-based ANFIS[J]. Journal of intelligent manufacturing, 2019, 30: 833-854.

[3] LIU Xiao-chu, LIANG Zhong-wei, WEN Gui-lin, et al. Waterjet machining and research developments: A review[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 102: 1257-1335.

[4] 陶建华, 包佑文, 刘华, 等. 强化研磨加工中喷射压力对工件表面粗糙度的影响[J]. 轴承, 2013(11): 30-33.
TAO Jian-hua, BAO You-wen, LIU Hua, et al. Effect of jet pressure on surface roughness of workpiece in strengthening and polishing process[J]. Bearing, 2013(11): 30-33.

[5] 刘晓初, 覃哲, 赵传, 等. 强化研磨工艺下轴承滚道表面织构的变化规律[J]. 轴承, 2018(10): 30-34.
LIU Xiao-chu, QIN Zhe, ZHAO Zhuan, et al. Variation rule of surface texture on bearing raceway under reinforced grinding process[J]. Bearing, 2018(10): 30-34.

[6] 萧金瑞, 刘晓初, 梁忠伟, 等. 钢珠损伤对轴承套圈强化研磨加工表面粗糙度和硬度的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 290-295.
XIAO Jin-rui, LIU Xiao-chu, LIANG Zhong-wei, et al. Effect of steel bead's damage on the surface roughness and hardness of bearing rings under strengthen grinding processing[J]. Surface technology, 2018, 47(12): 290-295.

[7] LIANG Zhong-wei, XIE Bi-hong, LIAO Shao-peng, et al. Concentration degree prediction of AWJ grinding effectiveness based on turbulence characteristics and the improved ANFIS[J]. The international journal of advanced manufac-

- turing technology, 2015, 80: 887-905.
- [8] 刘晓初, 黄俊, 肖苏华, 等. 喷射时间对 GCr15 钢轴承套圈表面粗糙度的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(7): 81-85.
LIU Xiao-chu, HUANG Jun, XIAO Su-hua, et al. Effect of jetting time on GCr15 steel bearing rings surface roughness[J]. Heat treatment of metals, 2014, 39(7): 81-85.
- [9] 刘晓初, 赵传, 周文波, 等. 强化研磨喷射角度对轴承套圈加工质量的影响[J]. 工具技术, 2017, 51(3): 35-38.
LIU Xiao-chu, ZHAO Zhuan, ZHOU Wen-bo, et al. Influence of bearing ring jet angle on grinding processing quality[J]. Tool engineering, 2017, 51(3): 35-38.
- [10] 张建荣, 程秀全, 盛湘飞, 等. 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, et al. Effects of shot peening process on roughness of 7075 aluminum alloy[J]. Light alloy fabrication technology, 2014, 42(9): 54-59.
- [11] 郑林彬, 王建明, 何讯超. 2024 铝合金喷丸粗糙度试验与数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(1): 84-89.
ZHENG Lin-bin, WANG Jian-ming, HE Xun-chao. Experiment and numerical simulation for surface roughness of 2024 aluminum alloy treated by shot peening[J]. Journal of Shandong University(engineering science), 2017, 47(1): 84-89.
- [12] QIANG Bin, LI Ya-dong, YAO Chang-rong, et al. Effect of shot peening coverage on residual stress field and surface roughness[J]. Surface engineering, 2018, 34(12): 938-945.
- [13] GHASEMI A, HASSANI S M, MAHMOUDI A H. Shot-peening coverage effect on residual stress profile by FE random impact analysis[J]. Surface engineering, 2016, 32(11): 861-870.
- [14] 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.
- [15] TARO M, CHAISE T, DANIEL N. A methodology to predict the roughness of shot peened surfaces[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 217: 65-76.
- [16] MYLONAS G I, LABEAS G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction[J]. Surface & coatings technology, 2011, 205: 4480-4494.
- [17] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening[J]. Applied surface science, 2012, 258: 6831-6840.
- [18] 董星, 刘雨庆, 段雄. 前混合水射流多弹丸喷丸模型及残余应力场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 224-232.
DONG Xing, LIU Yu-qing, DUAN Xiong. Numerical simulation of multi-shot shot peening models and residual stress field of premixed water jet[J]. Journal of mechanical engineering, 2020, 56(4): 224-232.
- [19] HAN K, OWEN D R J, PERIC D. Combined finite/discrete element and explicit/implicit simulations of peen forming process[J]. Engineering computations, 2002, 19(1): 92-118.
- [20] 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.
- [21] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses[J]. Finite elements in analysis and design, 1999, 31(3): 179-191.
- [22] SANJURJO P, RODRIGUZE C, PENUELAS I, et al. Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process[J]. Surface and coatings technology, 2014(258): 822-831.
- [23] 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.
- [24] LIU Xian-li, YUE Cai-xu, YU Ming-ming, et al. FEM on constitutive equation of high strength stress steel GCr15[J]. Advanced materials research, 2012, 500: 569-573.
- [25] YUE Cai-xu, WANG Bo, LIU Xian-li, et al. Adiabatic shear mechanisms for the hard cutting process[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2015, 28(3): 592-598.
- [26] 王利平. 喷丸残余应力场及表面粗糙度数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
WANG Li-ping. Numerical simulation research for compressive residual stress and surface roughness of shot peening[D]. Jinan: Shandong University, 2015.