

二次喷丸 42CrMo 钢表面完整性的数值模拟研究

何嘉禧¹, 汪舟¹, 甘进², 杨莹¹, 王晓丽¹, 石明¹, 任旭东¹

(1. 武汉理工大学 a. 汽车工程学院 b. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 交通学院, 武汉 430063)

摘要: **目的** 探究二次喷丸工艺参数对 42CrMo 钢零件表面完整性的影响规律。**方法** 建立三维随机喷丸有限元模型, 并通过实验验证有限元模型预测残余应力的准确性。将一次喷丸后零件的表面形貌和应力应变结果作为初始状态导入到二次喷丸模型中, 构建出二次喷丸预测模型。分析二次喷丸参数对 42CrMo 钢零件表面残余应力场、表面粗糙度以及等效塑性形变场的影响情况。**结果** 二次喷丸后, 42CrMo 钢零件近表层 (0~100 μm) 的残余压应力值均比初始状态有所增加。增加二次喷丸覆盖率对表面残余应力的提升作用最为明显, 最大可比初始状态提高 63.3%, 而增加二次喷丸直径对残余应力的改善效果最不明显。过度增加二次喷丸速度会导致表面粗糙度明显增加, 提高二次喷丸覆盖率可显著降低表面粗糙度, 覆盖率为 300% 时, 粗糙度比初始状态减小了 14.4%。表层 PEEQ 值随着二次喷丸速度、弹丸直径和覆盖率的增加而增加, 但当二次喷丸速度、弹丸直径和覆盖率增加到一定程度后, 表层 PEEQ 值会趋于饱和。**结论** 二次喷丸预测模型揭示了二次喷丸参数与 42CrMo 钢零件表面完整性之间的影响规律, 为二次喷丸的工业应用提供了一定的参考意义。

关键词: 二次喷丸; 有限元模拟; 表面完整性; 残余应力; 等效塑性形变; 表面粗糙度

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)06-0216-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.06.026

Numerical Simulation on Surface Integrity of 42CrMo Steel after Dual Shot Peening

HE Jia-xi¹, WANG Zhou¹, GAN Jin², YANG Ying¹, WANG Xiao-li¹, SHI Ming¹, REN Xu-dong¹

(1.a. School of Automotive Engineering, b. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the influence of dual shot peening parameters on the surface integrity of 42CrMo steel components. A 3D random shot peening (SP) finite element model (FEM) was established and the accuracy of predicting the

收稿日期: 2019-12-09; 修订日期: 2020-05-08

Received: 2019-12-09; Revised: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51405356, 51772228)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51405356, 51772228)

作者简介: 何嘉禧 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车轻量化、多物理场耦合仿真。

Biography: HE Jia-xi (1995—), Male, Master, Research focus: lightweight of automobile, multiphysics coupling simulation.

通讯作者: 汪舟 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为汽车轻量化、汽车零部件先进制造、多物理场耦合仿真。邮箱: wangzhou@whut.edu.cn

Corresponding author: WANG Zhou (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: lightweight of automobile, advanced manufacturing of auto parts, multiphysics coupling simulation. E-mail: wangzhou@whut.edu.cn

引文格式: 何嘉禧, 汪舟, 甘进, 等. 二次喷丸 42CrMo 钢表面完整性的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 216-223.

HE Jia-xi, WANG Zhou, GAN Jin, et al. Numerical simulation on surface integrity of 42CrMo steel after dual shot peening[J]. Surface technology, 2020, 49(6): 216-223.

residual stress by the model was verified by experimental data. The surface topography and stress-strain results of the component after single shot peening were imported into the dual shot peening model as the initial state, to construct the prediction model of dual shot peening. The effects of the dual shot peening parameters on the surface residual stress field, surface roughness and equivalent plastic deformation (PEEQ) field of 42CrMo steel components were analyzed. The compressive residual stress value near the surface layer (0~100 μm) of 42CrMo steel components after dual shot peening increased compared with the initial state, and the dual shot peening coverage ratio had the most obvious effect on the improvement of the surface residual stress, with the maximum increase of 63.3% compared with the initial state. On the contrary, the improvement effect of dual shot peening diameter on residual stress was the least obvious. The excessive increase of the dual shot peening speed would lead to the significant increase of the surface roughness while the increase of the dual shot peening coverage ratio could significantly reduce the surface roughness, and the roughness was 14.4% less than the initial state when the coverage ratio was 300%. The surface PEEQ value ascended with the increase of the dual shot peening speed, shot diameter and coverage ratio. However, when the shot speed, shot diameter and coverage ratio increased to a certain extent, the PEEQ value tended to be saturated. The prediction model of dual shot peening reveals the relationship between dual shot peening parameters and surface integrity of 42CrMo steel component, which provides some guidance for the industrial application of dual shot peening.

KEY WORDS: dual shot peening; numerical simulation; surface integrity; residual stress; equivalent plastic deformation; surface roughness

喷丸是一种利用大量高速弹丸撞击零件表面来提高金属疲劳寿命的机械表面强化工艺。它通过向零件表层引入残余压应力来阻碍金属表面裂纹的萌生和扩展^[1-3], 同时还能使零件近表层产生晶粒细化和加工硬化^[4-5], 提高零件的抗疲劳和抗应力腐蚀能力^[6]。喷丸强化工艺不受材料种类和几何形状尺寸的限制, 因此被广泛运用于机械制造、船舶、航天航空、汽车生产等领域^[7]。二次喷丸是在传统喷丸的基础上, 通过比一次喷丸强度更小的弹丸流撞击零件表面, 来进一步改善喷丸强化效果, 其在工业界有着广泛的应用前景。

随着计算机技术的迅猛发展, 利用计算机模拟分析喷丸工艺过程已经成为喷丸领域不可或缺的研究手段之一。近几十年来, 众多学者在喷丸有限元仿真上做了许多有意义的工作。Bagherifard 等人^[8]利用三维有限元模型预测高能喷丸对表面纳米结构的影响, 提出了一种利用等效塑性形变值来判断纳米层生成的数值方法, 最后分析了喷丸参数与残余应力、加工硬化和纳米层深度之间的关系。Miao 等人^[9]考虑了弹丸空间分布的随机性, 联合 Matlab 和 ANSYS 建立了随机喷丸模型, 并研究了弹丸数量与喷丸强度、覆盖率和粗糙度之间的数值关系, 结果表明, 该随机喷丸模型对喷丸强化效果的预测比传统喷丸模型更准确。Hong 等人^[10]结合有限元和离散元研究了弹丸入射和回弹过程中的接触问题, 并揭示了喷丸工艺参数对残余应力的影响规律。梁若等人^[11]提出了 34CrNiMo6 钢随机多弹丸的周期性有限元模型, 并分析了复合喷丸的强化效果以及不同喷丸强度对残余应力场的影响。赵莉莉等人^[12]利用分批顺序撞击的 9 丸粒有限元模型, 研究了弹丸速度、重复打击次数、搭接率以及

多丸粒分布对残余压应力的影响, 为获得理想残余应力提供了理论依据。

之前的喷丸数值模拟工作绝大部分都仅围绕一次喷丸展开, 学术界针对二次喷丸强化效果的模拟研究相对较少。而在实际生产中, 二次喷丸可进一步提高零件的表面残余压应力值, 并降低表面粗糙度, 因此对二次喷丸进行仿真具有重要的研究意义^[11]。本文结合 ABAQUS 和 Python 程序, 建立了二次喷丸预测模型, 系统地分析了二次喷丸参数对受喷零件表面残余应力、表面粗糙度和等效塑性形变的影响。研究结果可为二次喷丸仿真领域提供一定的参考价值。

1 三维随机喷丸有限元模型建立

本文采用有限元软件 ABAQUS 6.10 建立三维随机喷丸有限元模型, 模型由 42CrMo 钢受喷零件以及空间上随机分布的弹塑性弹丸所组成, 如图 1 所示。建模过程分为两步: 1) 通过一次喷丸仿真, 获取一次喷丸后零件的表面形貌和应力应变结果; 2) 把计算结果作为初始状态导入到二次喷丸模型中, 构建出二次喷丸预测模型, 并完成后续仿真。前后两次仿真采用相同的受喷零件, 零件模型为 3 mm×3 mm×10 mm 的长方体, 网格单元为减缩积分单元 (C3D8R)。为了减少模型内部剪切波和膨胀波回弹对残余应力结果的影响, 模型四周设置了无限边界条件, 单元类型为无限单元 (CIN3D8)。零件底面节点的自由度均被约束。选取零件中心 1 mm×1 mm×2 mm 的区域作为塑性变形观测区, 并在该区域内分析残余应力、表面粗糙度和等效塑性形变, 如图 1b 的中心

区域所示。伍刚等人^[13]的研究结果表明,网格密度对残余应力模拟结果有较大影响。综合考虑模拟结果的准确性和计算效率,设置观测区网格长度为 0.02 mm,其他区域采用渐变网格。采用 Python 程序实现弹丸在三维空间上的随机分布,式(1)为弹丸中心点坐标的

生成公式。

$$\begin{aligned} x &= (-0.5 + 1.0 \times \text{random.random()}) \times 10^{-3} \\ y &= (-0.5 + 1.0 \times \text{random.random()}) \times 10^{-3} \\ z &= (-0.3 - (N \times 0.2 \times \text{random.random()})) \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (1)$$

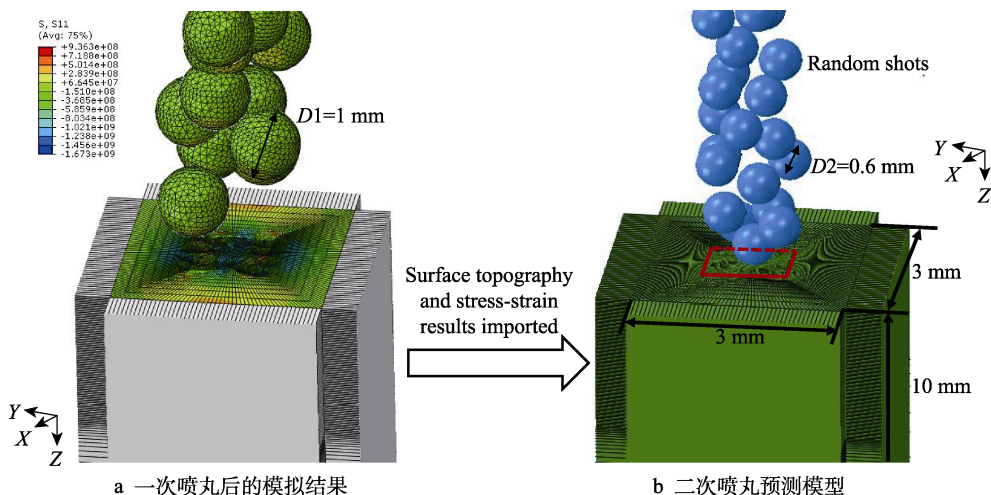


图 1 三维随机二次喷丸预测模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D random dual shot peening prediction model: a) simulation results after one shot peening; b) prediction model of secondary shot peening

由于 Johnson-cook 模型考虑了应变硬化、应变率硬化以及温度软化对材料流动应力的影响,因此本文采用 Johnson-cook 模型作为零件材料的本构模型,如式(2)所示。

$$\sigma_{eq} = \left(A + B \varepsilon_{eq}^n \right) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中, A 、 B 、 C 、 m 和 n 分别代表环境温度 (T_r) 下的初始屈服应力、应变硬化参数、应变率敏感系数、温度软化系数和应变硬化指数。42CrMo 钢的 Johnson-cook 模型参数如表 1 所示。弹丸的屈服强度为 1550 MPa, 密度为 7850 kg/m³, 杨氏模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。

表 1 42CrMo 钢的 Johnson-Cook 本构模型参数
Tab.1 Johnson-Cook constitutive model parameters of 42CrMo steel

Material	E/GPa	ν	ρ /(kg·m ⁻³)	A/MPa	B/MPa	n	m	C
42CrMo	208E9	0.3	7830	680	510	0.26	1.03	0.015

图 2 为随机喷丸模型弹坑示意图, 采用 Kirk^[14]等人推导的公式, 计算特定覆盖率下所需的弹丸数量:

$$Cr = (1 - e^{-Ar}) \times 100\% \quad (3)$$

$$Ar = \frac{N \times \pi (di/2)^2}{\pi (D/2)^2} \quad (4)$$

式中, Cr 为喷丸覆盖率, Ar 为中间变量, N 为

弹丸数量, di 为单弹坑直径, D 为覆盖率计算区域的直径, 取值为 1 mm。表 2 为不同二次喷丸工艺参数和对应的弹丸数量。

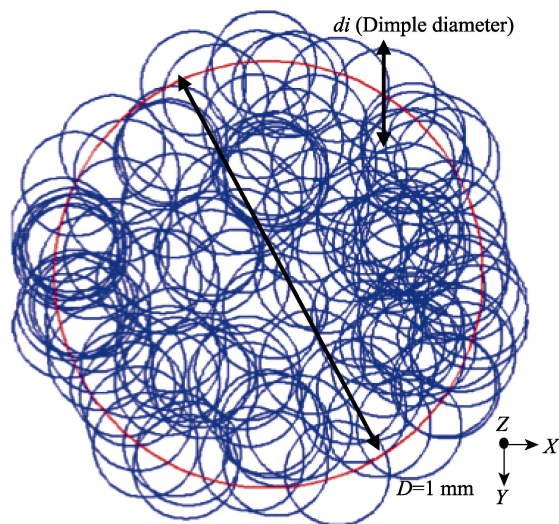


图 2 随机喷丸模型弹坑示意图^[15]

Fig.2 Schematic diagram of random shot peening model dimple pattern^[15]

为了准确评估零件表面残余应力和等效塑性形变 (PEEQ), 利用 Python 程序提取观测区沿层深各层节点的残余应力平均值和 PEEQ 平均值, 提取范围为直径 1 mm 的圆, 以便与 X-ray 实验测得的残余应力值进行对比。表面粗糙度采用轮廓算术平均偏差

表 2 不同二次喷丸工艺参数和对应的弹丸数量
Tab.2 Different shot peening parameters and the corresponding number of shots

Sample	Impact velocity $V_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Shot diameter d_s/mm	Dimple diameter d/mm	Coverage ratio $Cr/\%$	The number of shots N
1	60	1	4.08×10^{-4}	100	25
2	60	0.8	3.26×10^{-4}	100	38
3	60	0.6	2.44×10^{-4}	100	68
4	60	0.5	2.03×10^{-4}	100	98
5	60	0.3	1.22×10^{-4}	100	269
6	50	0.6	2.02×10^{-4}	100	99
7	80	0.6	2.86×10^{-4}	100	49
8	100	0.6	3.28×10^{-4}	100	38
9	60	0.6	2.44×10^{-4}	50	34
10	60	0.6	2.44×10^{-4}	200	136
11	60	0.6	2.44×10^{-4}	300	204

R_a 作为评价指标, 利用 Python 程序计算受喷零件表面各节点的 Z 向位移量的算术平均偏差, 得到各喷丸参数下的 R_a 值。

一次喷丸和二次喷丸的工艺参数如表 3 所示。除了图 3 中残余应力验证所用的一次喷丸参数为 $V=35\text{ m/s}$ 、 $D=0.56\text{ mm}$ 、 $C=100\%$ 以外, 后续的二次喷丸仿真中采用的一次喷丸的速度、直径和覆盖率均为 60 m/s 、 1 mm 和 100% 。由于本文二次喷丸仿真参数较多, 为了便于区分, 对仿真组有如下定义: V 代表速度, D 代表直径, C 代表覆盖率。例如 $V50D06C100$ 代表速度为 50 m/s , 直径为 0.6 mm , 覆盖率为 100% 的仿真组。

表 3 一次喷丸和二次喷丸的工艺参数
Tab.3 Process parameters of single shot peening and dual shot peening

Treatments	Process parameters	Simulation variables	Simulation constants
Single shot peening	Velocity/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	35, 60	—
	Diameter/ mm	0.56, 1	—
	Coverage ratio/ $\%$	100	—
Dual shot peening	Velocity/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	50, 60, 80, 100	Initial state Diameter: 0.6 mm Coverage ratio: 100%
	Diameter/ mm	0.3, 0.5, 0.6, 0.8	Initial state Velocity: 60 m/s Coverage ratio: 100%
	Coverage ratio/ $\%$	50, 100, 200, 300	Initial state Velocity: 60 m/s Diameter: 0.6 mm

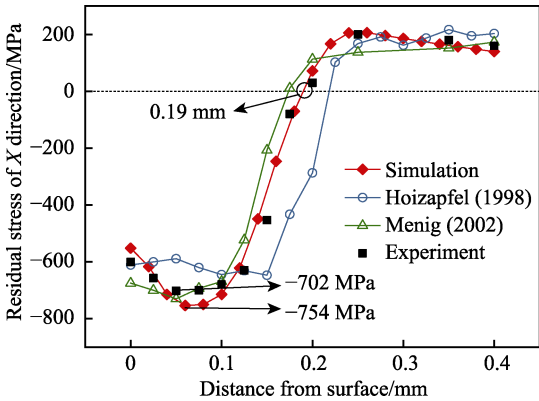


图 3 一次喷丸后 42CrMo 钢零件的残余应力模拟和实验结果
Fig.3 Simulated and experimental results of residual stress of 42CrMo steel components after single shot peening

图 3 为一次喷丸后 42CrMo 钢零件的残余应力模拟与实验结果, 喷丸参数 $V=35\text{ m/s}$ 、 $D=0.56\text{ mm}$ 、 $C=100\%$, 仿真弹丸数量 $N=154$ 。实验采用了 Holzapfel^[16]、Menig^[17]的实验数据和学校实验室所测数据。由图可知, 在应力曲线的形状和幅值方面, 仿真值与三组实验值基本吻合, 残余压应力层深在 $0.15\sim 0.25\text{ mm}$ 范围内, 最大残余压应力层深在 $0.05\sim 0.1\text{ mm}$ 范围内。其中, 仿真值和实验室所测值的表面残余应力分别为 -552 MPa 和 -600 MPa , 模拟误差为 8.0% ; 最大残余压应力分别为 -754 MPa 和 -702 MPa , 模拟误差为 7.4% ; 最大残余压应力层深和残余压应力层深基本一致。这表明所建喷丸模型对残余应力有较好的预测能力, 能用于描述受喷零件表面残余应力的变化情况。

2 实验方法

采用 42CrMo 钢作为实验材料, 其热加工工艺为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下淬火 20 min (水冷), 然后回火至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 2 h (空冷)。材料的初始屈服强度、抗拉强度和硬度分别为 680 MPa 、 930 MPa 和 250HV 。表 4 为 42CrMo 钢的化学成分。

表 4 42CrMo 钢化学成分
Tab.4 Chemical composition of 42CrMo steel

wt.%									
C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	S	Al	P	Fe
0.44	1.21	0.22	0.28	0.81	0.07	0.03	0.03	0.02	Bal.

采用 XN-9065P 型气动式喷丸机, 完成喷丸强化实验。根据 Klemenz^[18]的经验公式(5), 建立仿真参数和实验参数之间的对应关系。

$$v = \frac{16.35 \times p}{1.53 \times m + p} + \frac{29.50 \times p}{0.598 \times d + p} + 4.83 \times p \tag{5}$$

式中, d 为弹丸直径, m 为丸料进给流量, p 为喷丸压力, v 为弹丸速度。例如实验中 $m=2\text{ kg/min}$ 、 $d=1\text{ mm}$ 、 $p=5\text{ bar}$, 由公式(5)可得弹丸的平均速度 v 约为 60 m/s 。

残余应力通过 X 射线衍射仪和 Mn-K α 辐射仪检测, 根据 $\sin 2\varphi$ 方法^[19-20]分析 $\gamma\text{-Fe}(211)$ 的衍射峰位移, 在 $-70^\circ\sim 70^\circ$ 范围内, 每变化 10° 测定一次 φ 角。为了获取零件沿层深方向的残余应力, 通过电解法对样品进行剥层处理, 并根据 Moore 等人^[21]提出的方法修正残余应力值。

3 结果与分析

3.1 二次喷丸参数对初始残余应力的影响

喷丸后, 零件表层区域的残余应力场对喷丸材料疲劳性能的改善十分关键。为了准确评估残余应力场, 通常定义表面残余应力、最大残余压应力、最大残余压应力层深以及残余压应力层深四个特征参数。

图 4 为二次喷丸中, 弹丸直径为 0.6 mm , 覆盖率为 100% , 弹丸速度分别为 50 、 60 、 80 、 100 m/s 时, 42CrMo 钢零件 X 方向的残余应力沿层深的分布示意图。由图可知, 二次喷丸后, 零件近表层 ($0\sim 100\text{ }\mu\text{m}$) 内的残余压应力值均比初始状态有所增加, 这说明二次喷丸能有效改善零件表层的残余应力场。当二次喷丸速度在 $50\sim 100\text{ m/s}$ 范围内, 最大残余压应力随着弹丸速度的增加而增加, 表面残余应力和最大残余压应力层深有所波动, 残余压应力层深则基本不变。造成这种结果的原因是, 二次喷丸强度往往小于一次喷丸强度, 二次喷丸对残余应力场的影响主要是增加了近表层的残余压应力值, 而对残余压应力层深基本没影响, 这也被华程等人^[22]的实验结果所证实。弹丸速度为 50 m/s 和 100 m/s 的最大残余压应力分别为 -823 MPa 和 -961 MPa , 比初始状态提高了 4.0% 和

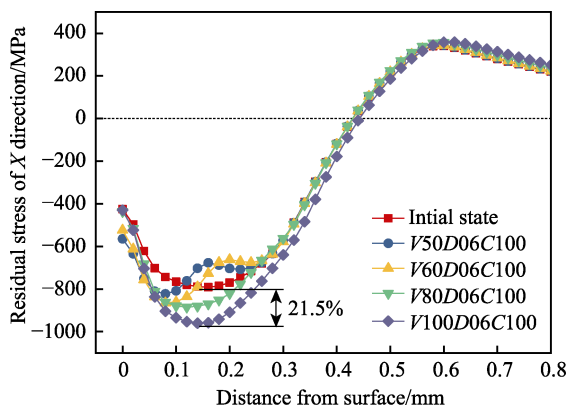


图 4 不同二次喷丸速度下 42CrMo 钢零件 X 方向沿层深的残余应力曲线

Fig.4 Residual stress curve along X direction in depth profile of 42CrMo steel components at different dual shot peening velocities

21.5% 。这表明适当提高二次喷丸速度, 可获得更大的最大残余压应力。

值得注意的是, 当二次喷丸的弹丸速度为 50 m/s 和 60 m/s 时, 残余应力曲线出现一定的波动。造成这种波动的原因是, 二次喷丸使表面残余应力增加的同时, 由于内部残余应力需要得到平衡, 在零件次表面必然会产生一个拉应力方向的波动。随着二次喷丸弹丸速度的增加, 所产生的应力波动的影响深度和一次喷丸的最大残余压应力深度互相重叠, 因此当弹丸速度增加到 80 m/s 以后, 残余应力曲线的波动最终消失。

图 5 为二次喷丸中, 弹丸速度为 60 m/s , 覆盖率为 100% , 弹丸直径分别为 0.3 、 0.5 、 0.6 、 0.8 mm 时, 42CrMo 钢零件 X 方向残余应力沿层深的分布示意图。由图可知, 增加二次喷丸直径对残余应力的提高作用并不明显。在零件近表层内, 弹丸直径为 0.5 、 0.6 、 0.8 mm 的三条应力曲线基本重叠, 这表明残余应力值已趋于饱和。和图 4 类似, 当二次喷丸弹丸直径为 0.3 、 0.5 、 0.6 mm 时, 残余应力曲线出现波动, 而直径增加到 0.8 mm 时波动消失。这种波动是一次喷丸和二次喷丸的残余应力内部平衡的结果。增加二次喷丸的弹丸直径后, 二次喷丸所产生的应力波动的深度和一次喷丸的最大残余压应力深度重叠, 波动最终消失。

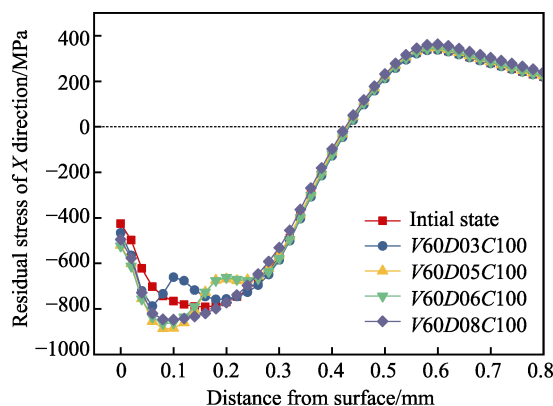


图 5 不同二次喷丸直径下 42CrMo 钢零件沿层深的 X 方向残余应力曲线

Fig.5 Residual stress curve along X direction in depth profile of 42CrMo steel components at different dual shot peening diameters

图 6 为二次喷丸中, 弹丸速度为 60 m/s , 直径为 0.6 mm , 覆盖率分别为 50% 、 100% 、 200% 、 300% 时, 42CrMo 钢零件 X 方向残余应力沿层深的分布示意图。由图可知, 当二次喷丸覆盖率在 $50\%\sim 300\%$ 范围内, 增加覆盖率可显著提高零件的表面残余应力, 最大可比初始状态提高 63.3% 。覆盖率为 50% 时, 表面残余应力略微小于初始状态, 而当覆盖率为 100% 和 300% 时, 其表面残余应力分别为 -524 MPa 和 -694 MPa ,

比初始状态提高了 23.3% 和 63.3%。这表明增加二次喷丸覆盖率对表面残余应力的提高作用最为明显。对比覆盖率为 200% 和 300% 的两条应力曲线发现,最大残余压应力分别为 -944 MPa 和 -939 MPa, 两者幅值基本相等。这表明覆盖率增大到一定程度后, 最大残余压应力值会达到饱和。

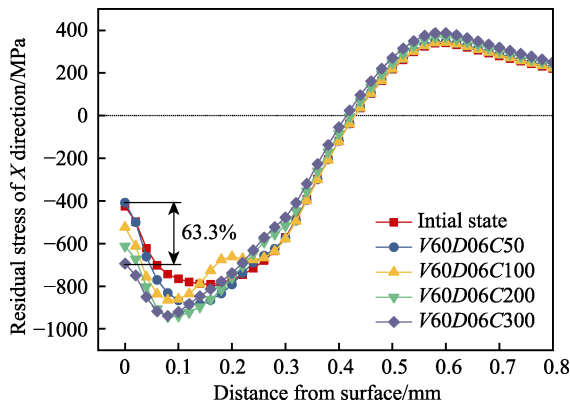


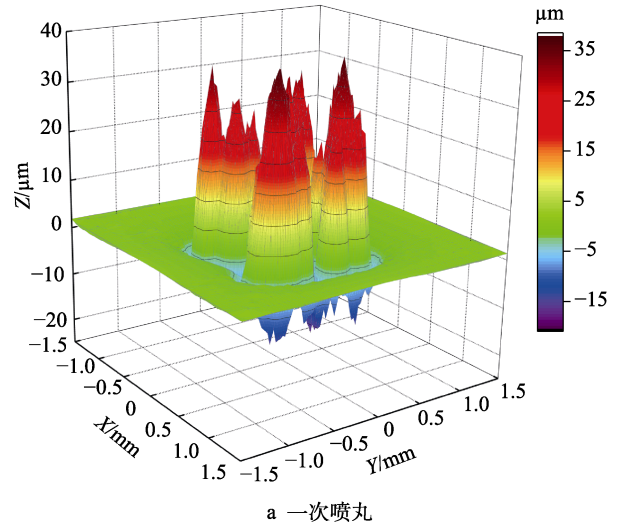
图 6 不同二次喷丸覆盖率下 42CrMo 钢零件沿层深的 X 方向残余应力曲线

Fig.6 Residual stress curve along X direction in depth profile of 42CrMo steel components at different dual shot peening coverage ratios

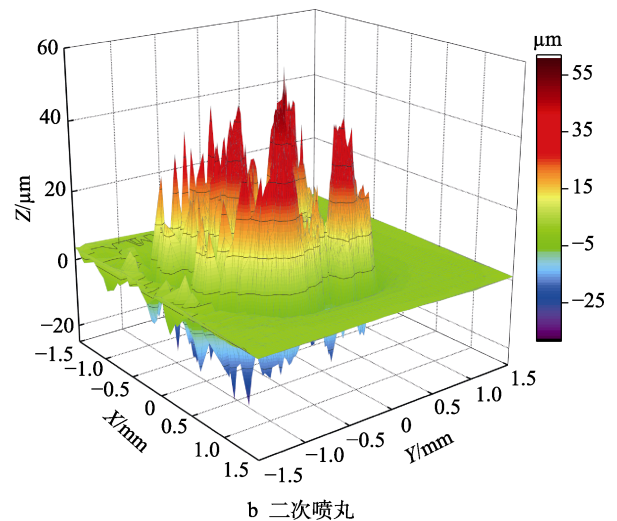
3.2 二次喷丸参数对表面粗糙度的影响

经过一次喷丸后, 零件表面发生了较大的塑性变形, 受喷表面形成的凸峰和凹坑可能会在零件服役中产生应力集中, 容易导致微裂纹的萌生, 降低喷丸强化效果。二次喷丸的主要目标是提高受喷零件的表面质量, 因此还需要考虑二次喷丸参数对表面粗糙度的影响。图 7 分别为一次喷丸和二次喷丸后 42CrMo 钢零件的表面形貌示意图。其中一次喷丸参数为 $V=60$ m/s、 $D=1$ mm、 $C=100\%$ 时, R_a 为 $11.16\ \mu\text{m}$; 而二次喷丸参数为 $V=60$ m/s、 $D=0.6$ mm、 $C=300\%$ 时, R_a 为 $9.55\ \mu\text{m}$ 。在该二次喷丸参数下, 零件的表面粗糙度与一次喷丸相比有所减小。

图 8 为不同二次喷丸参数下的 42CrMo 钢零件表面粗糙度曲线。图中方标为二次喷丸中弹丸直径为 0.6 mm, 覆盖率为 100%, 弹丸速度分别为 50、60、80、100 m/s 时, 42CrMo 钢零件的表面粗糙度 R_a 值。由图可知, 二次喷丸不一定能降低一次喷丸后零件的表面粗糙度, 合理选择二次喷丸参数尤为重要。当速度为 50 m/s 和 60 m/s 时, 表面粗糙度分别为 $10.59\ \mu\text{m}$ 和 $10.06\ \mu\text{m}$, 比初始状态分别降低了 5.1% 和 9.9%, 零件表面质量得到提升。但当速度增加到 80 m/s 和 100 m/s 后, 表面粗糙度比初始状态分别增加了 15.4% 和 50.4%, 并呈急剧上升的趋势, 零件表面变得更粗糙。这表明二次喷丸速度对粗糙度具有显著影响, 过度增加二次喷丸速度会导致表面粗糙度显著增加, 反而降低零件的表面质量。



a 一次喷丸



b 二次喷丸

图 7 一次喷丸和二次喷丸后 42CrMo 钢零件的表面形貌示意图

Fig.7 Surface morphology of 42CrMo steel components after (a) single shot peening and (b) dual shot peening

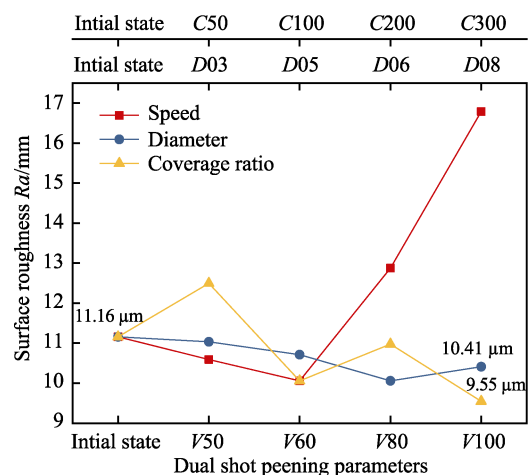


图 8 不同二次喷丸参数下的 42CrMo 钢零件表面粗糙度曲线

Fig.8 Surface roughness curve of 42CrMo steel components under different dual shot peening parameters

图8中圆标为二次喷丸中弹丸速度为60 m/s, 覆盖率为100%, 弹丸直径分别为0.3、0.5、0.6、0.8 mm时, 42CrMo钢零件的表面粗糙度 R_a 值。由图可知, 当二次喷丸直径在0.3~0.8 mm范围内, 二次喷丸后零件表面粗糙度与初始状态相比均有所降低, 降低幅度最大为9.9%。

图8中三角标为二次喷丸中弹丸速度为60 m/s, 直径为0.6 mm, 覆盖率分别为50%、100%、200%、300%时, 42CrMo钢零件的表面粗糙度 R_a 值。由图可知, 提高二次喷丸覆盖率可显著降低表面粗糙度, 覆盖率为300%时, 粗糙度比初始状态减小了14.4%。当二次喷丸覆盖率在50%~300%范围内时, 表面粗糙度随覆盖率的增加而波动。当覆盖率为50%时, 表面粗糙度比初始状态增加了12%。而覆盖率为100%、200%和300%时, 其粗糙度均小于初始状态, 这表明二次喷丸覆盖率大于100%, 才有利于表面质量的提升。

3.3 二次喷丸参数对等效塑性形变(PEEQ)的影响

喷丸工艺不仅能在零件表面引入残余压应力, 还能使零件表层产生晶粒细化, 提高零件的力学性能。研究表明, 等效塑性形变(PEEQ)是判断晶粒细化程度的重要指标, PEEQ值越大, 则晶粒细化程度越高^[23-24]。

图9为二次喷丸中弹丸直径为0.6 mm, 覆盖率为100%, 弹丸速度分别为50、60、80、100 m/s时, 42CrMo钢零件PEEQ值沿层深的变化曲线。由图可知, 二次喷丸能显著提高42CrMo钢零件表层区域的PEEQ值, 有效改善了零件的等效塑性形变场。当二次喷丸速度在50~100 m/s范围内时, 表面PEEQ值和最大PEEQ值随着二次喷丸速度的增加而增加。弹丸速度为50 m/s和100 m/s时, 表面PEEQ值比初始状态分别提高了110%和330%, 最大PEEQ值分别提高了71%和254%, 这表明增加弹丸速度能显著提高

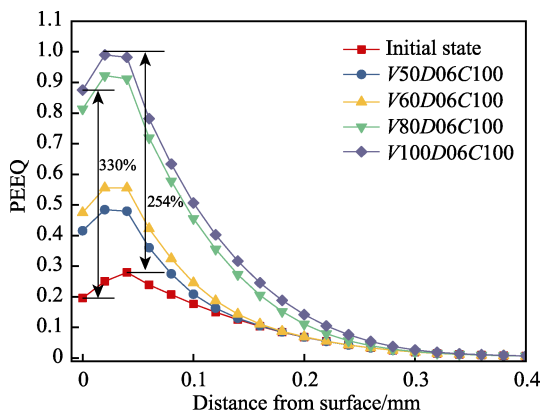


图9 不同二次喷丸速度下42CrMo钢零件沿层深的PEEQ曲线

Fig.9 PEEQ curve in depth profile of 42CrMo steel components at different dual shot peening velocities

PEEQ值。从图中也能看出, 随着二次喷丸速度的增加, PEEQ值增加速率逐渐减小, 这表明弹丸速度增加到一定程度后, PEEQ值会趋于饱和。

图10为二次喷丸中弹丸速度为60 m/s, 覆盖率为100%, 弹丸直径分别为0.3、0.5、0.6、0.8 mm时, 42CrMo钢零件PEEQ值沿层深的变化曲线。与图9的分析结果相似, 表面PEEQ值和最大PEEQ值随二次喷丸直径的增加而增加。当弹丸直径为0.3 mm和0.8 mm时, 表面PEEQ值比初始状态分别提高了135%和160%, 最大PEEQ值分别提高了79%和129%。同样地, 随着二次喷丸弹丸直径的增加, PEEQ值逐渐趋于饱和。

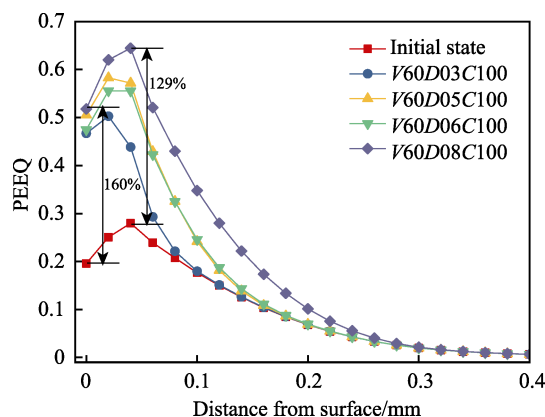


图10 不同二次喷丸直径下42CrMo钢零件沿层深的PEEQ曲线

Fig.10 PEEQ curve in depth profile of 42CrMo steel components at different dual shot peening diameters

图11为二次喷丸中弹丸速度为60 m/s, 直径为0.6 mm, 覆盖率分别为50%、100%、200%、300%时, 42CrMo钢零件PEEQ值沿层深的变化曲线。由图可知, 增加二次喷丸覆盖率对PEEQ值的改善作用最为显著, 覆盖率为300%时, 表面PEEQ值和最大PEEQ值分别比初始状态提高了615%和461%。当二次喷丸

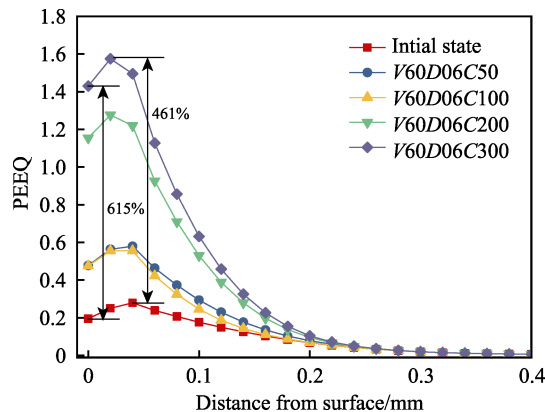


图11 不同二次喷丸覆盖率下42CrMo钢零件沿层深的PEEQ曲线

Fig.11 PEEQ curve in depth profile of 42CrMo steel components at different dual shot coverage ratios

覆盖率为 100%、200% 和 300% 时, 表面 PEEQ 值和最大 PEEQ 值随二次喷丸覆盖率的增加而增加, PEEQ 的增加速率则随覆盖率的增加而逐渐减小。

4 结论

1) 二次喷丸后, 42CrMo 钢零件近表层 (0~100 μm) 残余压应力值均比初始状态有所增加。增加二次喷丸覆盖率对表面残余应力的提高作用最为明显, 最大可比初始状态提高 63.3%。增加二次喷丸直径对残余应力的改善效果最不明显。

2) 过度增加二次喷丸速度会导致 42CrMo 钢零件表面粗糙度显著增加。提高二次喷丸覆盖率可显著降低表面粗糙度, 覆盖率为 300% 时, 粗糙度比初始状态减小了 14.4%。

3) 42CrMo 钢零件表层 PEEQ 值随着二次喷丸速度、弹丸直径和覆盖率的增加而增加, 但当二次喷丸速度、弹丸直径和覆盖率增加到一定程度后, 表层 PEEQ 值会趋于饱和。

参考文献:

- [1] KOBAYASHI M, MATSUI T, MURAKAMI Y. Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening[J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A, 1998, 20(5): 351-357.
- [2] TORRES M A S, VOORWALD H J C. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel[J]. International journal of fatigue, 2002, 24(8): 877-886.
- [3] HU Dian-yin, GAO Ye, MENG Fan-chao, et al. A unifying approach in simulating the shot peening process using a 3D random representative volume finite element model[J]. Chinese journal of aeronautics, 2017, 30(4): 1592.
- [4] UNAL O, VAROL R. Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and re-peening[J]. Applied surface science, 2015, 351: 289-295.
- [5] INÉS F P, MARIO G. About the role of residual stresses and surface work hardening on fatigue ΔK_{th} of a nitrided and shot peened low-alloy steel[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202(13): 3072-3080.
- [6] 赵西洋, 陈晓秀, 孟海英. 喷丸强化技术在某型作动筒延寿修理中的应用[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 87-90.
ZHAO Xi-yang, CHEN Xiao-xiu, MENG Hai-ying. Application of shot peening technology on lifetime extension repair of an actuator cylinder[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 87-90.
- [7] 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: 31-39.
- [8] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. A numerical model of severe shot peening (SSP) to predict the generation of a nanostructured surface layer of material[J]. Surface and coatings technology, 2010, 204(24): 4081-4090.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 梁若, 解丽静, 庞思勤. 34CrNiMo6 钢复合喷丸强化的有限元模拟[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 99-103.
LIANG Ruo, XIE Li-jing, PANG Si-qin. Finite element simulation of 34CrNiMo6 steel after dual shot peening[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2017, 60(10): 99-103.
- [12] 赵莉莉, 王建国, 裴信超. 喷丸残余应力场有限元数值模拟分析[J]. 材料保护, 2015(1): 6-7.
ZHAO Li-li, WANG Jian-ming, PEI Xin-chao. Finite element simulation of residual stress field after shot peening[J]. Materials protection, 2015(1): 6-7.
- [13] GANG W, ZHOU W, JIN G, et al. FE analysis of shot-peening-induced residual stresses of AISI 304 stainless steel by considering mesh density and friction coefficient[J]. Surface engineering, 2018, 1-13: 242-254.
- [14] KIRK D, ABYANEH M Y. Theoretical basis of shot peening coverage control[J]. The shot peener, 1993, 2(9): 28-30.
- [15] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments[J]. Applied surface science, 2012, 259: 186-194.
- [16] HOLZAPFEL H, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures[J]. Materials science & engineering A, 1998, 248(1-2): 9-18.
- [17] MENIG R, SCHULZE V, VÖHRINGER O. Optimized warm peening of the quenched and tempered steel AISI 4140[J]. Materials science & engineering A, 2002, 335(1-2): 198-206.
- [18] KLEMENZ M. Anwendung der simulation der randschichtausbildung beim kugelstrahlen auf die abschätzung der schwingfestigkeit gekerbter bauteile[D]. Karlsruhe: Karlsruhe University, 2009.
- [19] MACHERAUCH E, MÜLLER P. Das $\sin 2\psi$ -verfahren der röntgenographischen spannungsmessung[J]. Z angew phys, 1961, 13: 340-345.
- [20] NOYAN I C, COHEN J B. Residual stress-measurement by diffraction and interpretation[M]. New York: Springer Verlag, 1987.
- [21] MOORE M G, EVANS W P. Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction RS analysis[J]. SAE trans, 1958, 66: 340-345.
- [22] 华程, 姚兰, 李国庆, 等. 复合喷丸强化对 A-100 钢旋转弯疲劳寿命的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 137-142.
HUA Cheng, YAO Lan, LI Guo-qing, et al. Effects of double shot peening on rotational bending fatigue life of A-100 steel[J]. China surface engineering, 2019, 32(2): 137-142.
- [23] HUANG H, WANG Z, GAN J, et al. The study of universality of a method for predicting surface nanocrystallization after high energy shot peening based on finite element analysis[J]. Surface and coatings technology, 2019, 358: 617-627.
- [24] UMEMOTO M, TODAKA Y, TSUCHIYA K. Formation of nanocrystalline structure in steels by air blast shot peening[J]. Materials transactions, 2003, 44: 1488-1493.