

超声喷丸 FGH97 粉末高温合金 表面粗糙度试验与数值分析

蔡晋¹, Kiplagat Collins Cherutich¹, 李威¹, 师俊东², 林爽²

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 目的 为了探究超声喷丸对 FGH97 粉末高温合金表面粗糙度的影响规律, 验证超声喷丸有限元粗糙度预测模型的可行性。方法 在 0.13 A 与 0.18 A 的喷丸强度下进行超声喷丸表征试验及数值模拟分析, 研究了 FGH97 粉末高温镍基合金超声喷丸后的粗糙度变化。建立了超声喷丸三维有限元模型(腔室几何模型、批量弹丸模型、振动系统、Johnson-Cook 材料本构模型), 两种喷丸强度下沿试样横向与纵向的 R_a 、 R_z 试验值测量数目均为 25 个, 计算了两种喷丸强度下试样横纵向粗糙度均值的相对标准偏差。结果 0.18 A 超声喷丸试验横纵向整体粗糙度均值 R_a 、 R_z 值分别为 0.96 μm 、4.25 μm , 0.18 A 超声喷丸数值仿真横纵向粗糙度 R_a 、 R_z 均值分别为 1.02 μm 、4.3 μm , 横纵向粗糙度仿真值与试验数据最终评估值的差异小于 10%, 证实了 FGH97 粉末高温合金超声喷丸数值仿真预测的有效性, 得出 10 个极值的取样测量数目更能准确反映出超声喷丸后试样表面粗糙度情况。结论 喷丸强度的增加降低了粗糙度值分布的离散度, 同时, 相对标准偏差的差异性结果证明, 在超声喷丸强化表面粗糙度分析前, 对试样前处理状态进行测量分析是必要的。

关键词: 超声喷丸; 粉末高温镍基合金; 粗糙度; 有限元; 相对标准偏差

中图分类号: TG668 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)06-0250-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.028

Surface Roughness Numerical and Test Evaluation of FGH97 Powder Superalloy by Ultrasonic Shot Peening

CAI Jin¹, Kiplagat Collins Cherutich¹, LI Wei¹, SHI Jun-dong², LIN Shuang²

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

ABSTRACT: In order to explore the influence of ultrasonic shot peening on the surface roughness of FGH97 powder nickel-based alloy, and verify the feasibility of the finite element roughness prediction model of ultrasonic shot peening,

收稿日期: 2020-05-23; 修订日期: 2020-09-07

Received: 2020-05-23; Revised: 2020-09-07

基金项目: 中国航发产学研合作项目 (HFZL2019CXY024-1); 国防基础科研项目 (JCKY2019213C011)

Fund: Supported by Industry University Research Cooperation Project of AECC (HFZL2019CXY024-1), National Defense Basic Scientific Research Program of China (JCKY2019213C011)

作者简介: 蔡晋 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面强化工艺、疲劳分析、工艺仿真。邮箱: saucui@163.com

Biography: CAI Jin (1979—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: surface strengthening process research, fatigue analysis, process simulation and optimization. E-mail: saucui@163.com

引文格式: 蔡晋, Kiplagat Collins Cherutich, 李威, 等. 超声喷丸 FGH97 粉末高温合金表面粗糙度试验与数值分析[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 250-257.

CAI Jin, Kiplagat Collins Cherutich, LI Wei, et al. Surface roughness numerical and test evaluation of FGH97 powder superalloy by ultrasonic shot peening[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 250-257.

characterization test and numerical simulation analysis are carried out under the shot peening intensities of 0.13 A and 0.18 A, respectively. The roughness variation of FGH97 powder nickel-based alloy after ultrasonic shot peening is studied, and the three-dimensional ultrasonic shot peening finite element model (chamber geometric model, batch spheres model, vibration system, Johnson-Cook material constitutive model) is established. Under the two shot peening intensities, the number of measurement of R_a and R_z test values along the horizon and vertical directions of the sample are 25, respectively, and the relative standard deviation of the average value of the horizon and vertical roughness of the sample are calculated. The results show that the mean R_a and R_z values of the overall roughness are 0.96 μm and 4.25 μm , respectively. Based on the numerical simulation prediction analysis of 0.18 A ultrasonic peening process parameters, it is obtained that the average values of the horizon and vertical roughness R_a and R_z are 1.02 μm and 4.3 μm , respectively. The difference between the horizon and vertical roughness values and the final evaluation value of the test data is less than 10%, which confirms the validity of FGH97 powder nickel-based alloy ultrasonic shot peening numerical simulation prediction, and it is concluded that the number of 10 extreme sampling measurements can more accurately reflect the surface roughness of the sample after ultrasonic shot peening. The increase in shot peening intensity reduces the dispersion of the distribution of the roughness value. At the same time, the difference in relative standard deviation proves that the measurement and analysis of the pretreatment state of the sample before ultrasonic shot peening is necessary.

KEY WORDS: ultrasonic shot peening; high temperature powder nickel-based alloy; roughness; finite element; relative standard deviation

粉末冶金高温合金因晶粒细小、组织均匀等特点,广泛应用于航空发动机涡轮盘、压气机盘、涡轮轴等高温承力转动部件。FGH97 粉末高温镍基合金是我国研制的与俄罗斯 EP741NP 牌号相近的合金。工作温度下的抗疲劳性能是 FGH97 合金的重要特征之一,而夹杂物、表面形貌不均匀等缺陷的存在,对粉末冶金高温合金的疲劳寿命有严重的负面影响,因此通常采用喷丸强化提高 FGH97 合金承受循环载荷、微动磨损和应力腐蚀的抵抗力^[1-2]。

针对喷丸对材料疲劳性能的影响, S. Bagherifard 等^[3-4]通过旋转弯曲疲劳试验评估了喷丸纳米层对疲劳强度的影响,结果显示,与低粗糙度喷丸试样相比,较高的粗糙度降低了疲劳寿命,增加了结果的离散度,降低了疲劳预测的准确性,提出了控制喷丸参数降低粗糙度以改善疲劳性能的重要性。Y. Akiniwa^[5]与 A. K. Gujba 等^[6]的研究表明,对于承受疲劳载荷的构件,表面粗糙度会部分抵消残余压应力场的优势,并导致疲劳强度降低,在特定点上引起应力集中,从而加速裂纹萌生。Wen Ai-ling 等^[7]研究了喷丸强化对疲劳强度的改善作用,结果表明,喷丸及复合喷丸强化对可以显著提高目标材料的疲劳极限,同时提出了材料表面状态的控制是影响疲劳寿命、疲劳裂纹萌生及扩展的关键。G. G. Feldmann 等^[8]提出航空发动机的旋转部件需采用喷丸处理,以抑制裂纹的萌生和扩展,但喷丸引起的表面粗糙度增加会降低翼型的空气动力学效率,因此需要研究喷丸工艺参数以控制表面粗糙度分布在设计要求的使用区间。何家文^[9-10]对喷丸引起的形变纳米化组织结构及相关性能的研究表明,高强度喷丸后表面特征的剧烈塑性变化,导致

塑性大幅下降,粗糙度急剧提高,过喷丸使疲劳强度显著下降,导致零件失效几率增加,因此对目标材料表面质量的控制极为重要,同时基于表面形变各影响因素对疲劳裂纹扩展作用的试验,提出残余压应力是提高疲劳性能的主导因素,这一结论与美国空军研究院^[11]、巴西大学^[12]及英国拉夫堡大学^[13]的研究结果相似。

针对喷丸对材料耐蚀性的影响, A. A. Ahmed^[14]与 C. Aparicio 等^[15]提出耐腐蚀性能与表面粗糙度有关,较高的表面粗糙度和不均匀性可以为破坏钝化膜提供作用点,腐蚀电流密度与粗糙度之间呈线性关系。英国 Rolls-Royce 公司与斯旺西大学罗罗技术研究中心^[16]研究了镍基合金喷丸后的热腐蚀行为,结果表明,未喷丸试件表面粗糙度较低,可以减少 S 的扩散,提高表面含 Cr 氧化层的附着力,而喷丸试件表面产生弯曲应力,同时较高的表面粗糙度诱导产生氧化裂纹,一旦氧化膜破裂,腐蚀性物质攻击基质导致耐蚀性降低。

S. Kumar 等^[17]的研究表明,与其他表面处理工艺相比,超声喷丸 (USP, Ultrasonic shot peening) 处理结果具有较低的表面粗糙度,通过产生较低的表面粗糙度和有利的残余压应力场,提高了合金材料的疲劳性能。德国 MTU 公司和克劳斯塔尔技术大学^[18]在两种喷丸强度下对超声喷丸与传统喷丸进行比较研究,结果表明,喷丸强度相同时且覆盖率为 100% 的情况下,超声喷丸的表面粗糙度明显小于传统喷丸。法国 Sonats 和日本东京精工^[19]研究了超声喷丸对高强钢疲劳极限的影响,试验结果表明,超声喷丸处理后样品的表面粗糙度低于传统喷丸获得的表面

粗糙度,并认为造成结果差异的原因是超声喷丸的弹丸冲击速度要比气动喷丸的速度小。M. Taro 等^[20]将有限元结果与超声喷丸表面粗糙度测量结果进行比较,验证了仿真模型的有效性,针对常用金属材料的超声喷丸工艺参数范围,给出了工艺参数对表面粗糙度及几何形貌的影响。刘辉等^[21]基于有限元仿真研究了超声喷丸与传统喷丸的表面应力场,证实了超声喷丸具有较低的表面粗糙度以及较深的残余压应力层。蔡晋等^[22]基于仿真结合试验研究了腔室形状对超声喷丸冲击力分布的影响,研究表明,改变超声喷丸腔室形状及振幅可以控制零件目标区域的均匀强化。王业辉等^[23]研究了超声喷丸工艺参数对残余应力场的影响,结果显示,改变超声喷丸工艺参数可以控制表面残余应力及残余应力层的深度范围。杨天南等^[24]通过有限元方法研究并预测了超声喷丸表面的基本几何轮廓变化规律,建立了应力覆盖范围与几何形貌及覆盖率之间的关系。以上超声喷丸强化工艺的研究集中在覆盖率、残余应力、力学影响等方面,在表面形貌的探究中仅对单一粗糙度参数进行基于不同工艺的数值仿真对比,没有从试验、前后道工序等角度综合评估超声喷丸对表面粗糙度的影响,且强化材料多为钛合金,而在粉末高温合金超声喷丸粗糙度领域仍需进一步探究。因此,本文通过试验结合仿真技术,探究不同喷丸强度下,FGH97 粉末高温合金超声喷丸后的表面粗糙度变化规律,并建立超声喷丸有限元粗糙度预测模型,实现 FGH97 粉末高温合金超声喷丸后表面粗糙度的数值评估。

1 试验

1.1 材料

试验材料为 FGH97 粉末高温合金,采用真空感应炉熔炼棒,等离子旋转电极工艺制粉。经热等静压成形热处理后获得材料毛坯。将粉末高温合金板材切割成 50 mm×60 mm×5 mm 的试样。热处理制度为 1200 °C 保温 8 h,炉冷到 1170 °C;870 °C 保温 32 h,空冷至室温。FGH97 的化学成分如表 1 所示,FGH97 试样喷丸前表面状态如图 1 所示。



图 1 FGH97 试样超声喷丸前的表面状态

Fig.1 Surface state of FGH97 sample before ultrasonic shot peening

表 1 FGH97 粉末高温合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of FGH97 powder superalloy wt%

C	Cr	Co	Al	Ti	W	Mo
0.04	9.0	15.5	5.0	1.8	5.5	4.0
Nb	Hf	B	Zr	Mg	Ce	Ni
2.6	0.3	0.012	0.01	0.01	0.008	Bal.

1.2 超声喷丸处理

对 FGH97 粉末高温合金试样进行超声喷丸处理,采用氧化锆陶瓷弹丸,弹丸直径为 2.5 mm,弹丸数目为 500 个,振幅分别为 40 μm 与 60 μm,喷丸强度分别为 0.13 A 与 0.18 A。FGH97 粉末高温合金超声喷丸工艺参数如表 2 所示。

表 2 FGH97 粉末高温合金超声喷丸工艺参数

Tab.2 Ultrasonic shot peening process parameters of FGH97 powder superalloy

Spheres material	Spheres diameter /mm	Spheres number	Amplitude/μm	Coverage/%	Almen intensity /A
ZrO ₂	2.5	500	40	≥98	0.13
ZrO ₂	2.5	500	60	≥98	0.18

1.3 粗糙度检测

采用 VHX-900 表面轮廓仪测定试样的表面粗糙度 R_a (轮廓平均算数偏差) 与 R_z (轮廓最大高度)。其中 R_a 的表达式见式(1),其中 $Y = f(x)$ 表示采样长度内的峰值高度。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

另一个在研究中被广泛认可的表面参数是 R_z ,即剖面的最大高度,定义为采样长度内最大剖面峰高 (R_p) 和最大剖面谷深 (R_v) 之和^[25-26]。根据其定义, R_z 是形貌的极值特征值。 R_z 的表达式为:

$$R_z = R_p + R_v \quad (2)$$

每个试样取 10 条测量线(横向 5 条,纵向 5 条),每条线测 5 个数据点,即每个试样表面测量 50 个数据点(横向 25 个数据点、纵向 25 个数据点),分别测量每个点的 R_a (轮廓平均算数偏差) 与 R_z (轮廓最大高度)。

采用变异系数 V 定义粗糙度均值的相对标准偏差,设 X_1, X_2, \dots, X_n 为总体 $N(\mu, S^2)$ 的随机样本。分别采用 25 个值(所有数据点)、10 个极值、5 个极值,计算 0.13 A 与 0.18 A 喷丸强度下试样表面横向与纵向粗糙度均值的相对标准偏差,以反映不同极值数据测量数目下粗糙度值的离散度波动情况。

样本标准差 S 为:

$$S = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

(3)

样本均值 \bar{X} 为：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

(4)

变异系数 V 为：

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

(5)

2 有限元模型的建立

2.1 本构模型

在超声喷丸过程中，材料的屈服应力和屈服极限在不同的应变速率下将发生改变，FGH97 粉末高温合金材料的塑性参数采用 Johnson-Cook 模型（在材料定义时选择 Rate dependent）。材料的屈服极限用为^[27]：

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

(6)

式中： σ 为材料应力； A 为材料静态屈服应力； B 为材料应变幂指数； ε 为材料等效塑性应变； 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； T^* 为温度影响因子； m 为温度敏感性系数。设置材料熔点和参考温度（一般取室温），相应的参数见表 3。

表 3 FGH97 材料本构模型参数
Tab.3 Parameters of material constitutive model of FGH97

A/MPa	B/MPa	n	m	Melting point/K	Reference temperature/K	C
845	246	0.8	1.42	1270	298	0.08

2.2 模型尺寸及边界条件

试件尺寸为 50 mm×60 mm×5 mm，单元类型采用六面体结构化网格，下表面 1 mm 层深单元尺寸采用 0.5 mm×0.5 mm×0.05 mm，向上逐渐增加至 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm，网格类型为 C3D8R。腔室尺寸为 156 mm×136 mm×116 mm，壁厚为 8 mm，网格尺寸为 8 mm，网格类型为 C3D8R（采用刚性体约束，不考虑变形），振动头单元尺寸为 7 mm，网格类型为 C3D8R（采用刚性体约束，不考虑变形）。超声喷丸数值模型如图 2 所示。

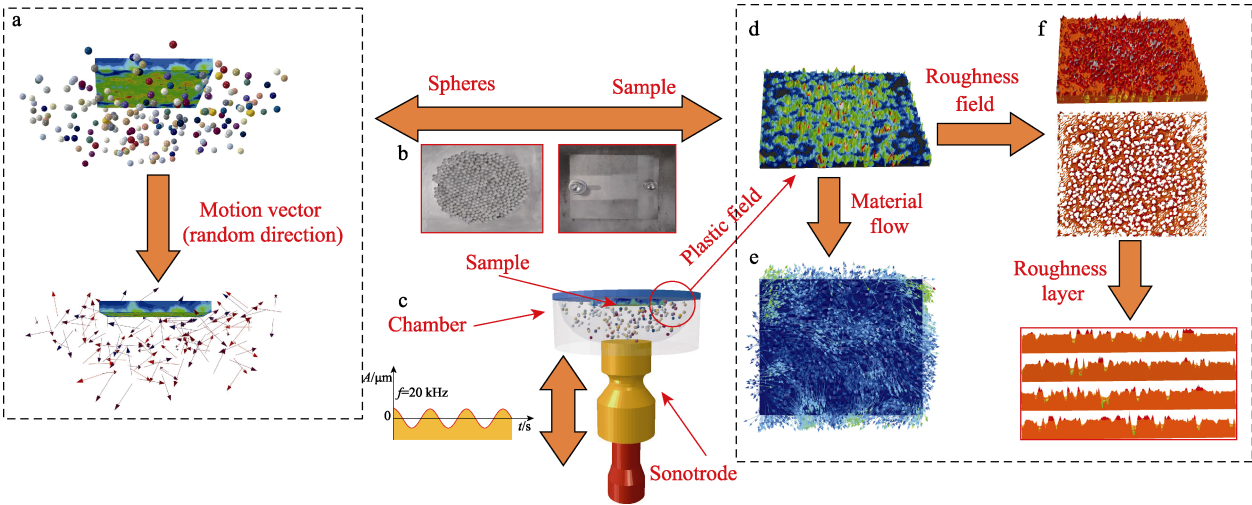


图 2 超声喷丸材料流动与粗糙度场数值分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of numerical analysis of ultrasonic shot peening material flow and roughness field: (a) spheres distribution and motion vector field; (b) spheres and sample; (c) ultrasonic shot peening device; (d) surface equivalent strain field; (e) surface material flow; (f) surface roughness field

3 结果与讨论

3.1 超声喷丸表面粗糙度的数值评估

采用喷丸强度 0.18 A 的超声喷丸试验工艺参数，对试样表面进行超声喷丸数值仿真，放大试样表面竖直方向变形，分析超声喷丸表面宏观形貌。图 3a 为超声喷丸表面粗糙度形貌的透视化反馈，反映出超声喷丸表面宏观粗糙度形貌较为均匀，并未有较多的孤立峰值与谷值出现。图 3b 为超声喷丸仿真表面的总

体形貌情况，试样表面冲击凹坑密度分布均匀，峰谷值在不同的区域差异较小，试样边部区域的较大变形是由一定程度的应力集中引起的。

为了比较数值模型结果与试验数据的差异性大小，对超声喷丸试样沿横向与纵向在位移场中的粗糙度截面分割，沿全局坐标系 X 轴均分截取 5 个粗糙度截面，沿 Y 轴同样截取 5 个粗糙度截面，截取方式如图 3c—d 所示。其中图 3c 表示截取试样横向表面粗糙度，图 3b 表示截取试样纵向表面粗糙度。基于切片表面峰谷值，对超声喷丸试样的二维粗糙度值进行数值评估。

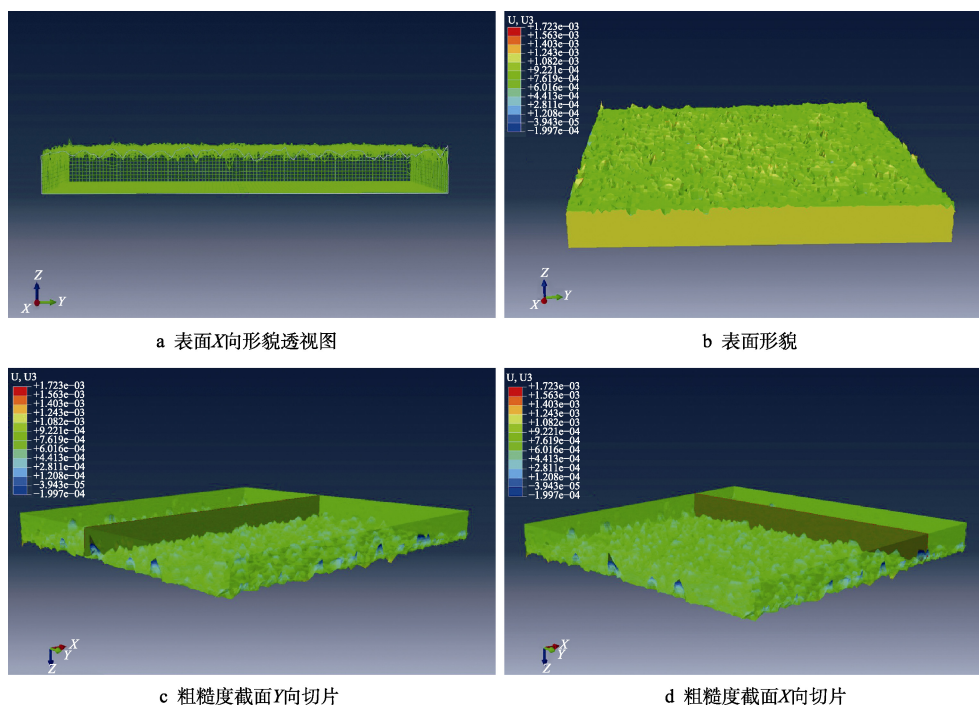


图3 0.18 A 超声喷丸仿真试样整体形貌

Fig.3 Overall morphology of 0.18 A ultrasonic shot peening sample: (a) perspective view of the surface morphology along the X direction; (b) surface morphology; (c) Y direction slice of roughness section; (d) X direction slice of roughness section

根据公式(1)和公式(2),得出切片1横向粗糙度 R_a 、 R_z 分别为 1.12、4.52 μm ,纵向粗糙度 R_a 、 R_z 分别为 1.14、4.48 μm ,同样方式求出横纵向粗糙度切片(2~5)的 R_a 、 R_z 值,得出横纵向粗糙度 R_a 、 R_z 均值分别为 1.02、4.3 μm 。由于仿真结果不受试样前处理造成的外观几何影响,横纵向粗糙度几乎不存在方向性,同时试样表面除边缘区域,其他区域横纵向粗糙度差异较小。

3.2 超声喷丸表面粗糙度的试验评估

图4a、图4b分别为喷丸强度0.13 A与0.18 A超声喷丸处理后的表面状态。随着喷丸强度的增加,喷丸强度为0.18 A时,单位面积内的凹坑数增多,塑性变形分布更均匀,材料表面机加工痕迹被超声喷丸凹

坑覆盖的程度较0.13 A时更高,冲击产生的凹坑与周边凸起区域的塑性变形程度更明显。

图5为0.13 A与0.18 A超声喷丸试样表面粗糙度检测轮廓形貌,弹丸冲击试样表面发生塑性变形,局部出现凹坑(蓝色)和凸起(红色)。0.18 A超声喷丸试样表面凹坑周围凸起高度及凹坑深度明显高于0.13 A试样。表4统计了两种喷丸强度超声喷丸后的试样表面横纵向粗糙度情况,其中两种喷丸强度下横向与纵向的 R_a 、 R_z 值分别为25个,以 R_a 值体现超声喷丸后试样表面整体平均粗糙度轮廓信息,以 R_z 值体现超声喷丸试样表面宏观轮廓信息,粗糙度统计显示,0.13 A喷丸强度下,横纵向整体粗糙度 R_a 、 R_z 均值分别为 0.85、3.85 μm ; 0.18 A喷丸强度下,横纵向整体粗糙度 R_a 、 R_z 均值分别为 0.96、4.25 μm 。

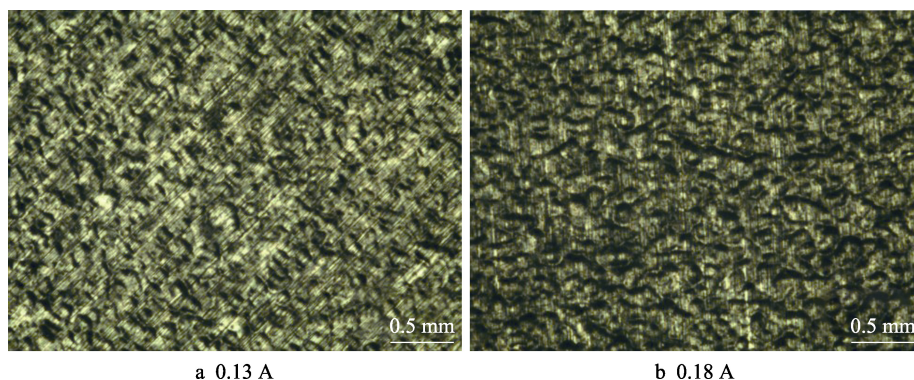


图4 超声喷丸试样的表面形貌

Fig.4 Surface morphology of ultrasonic shot peening sample

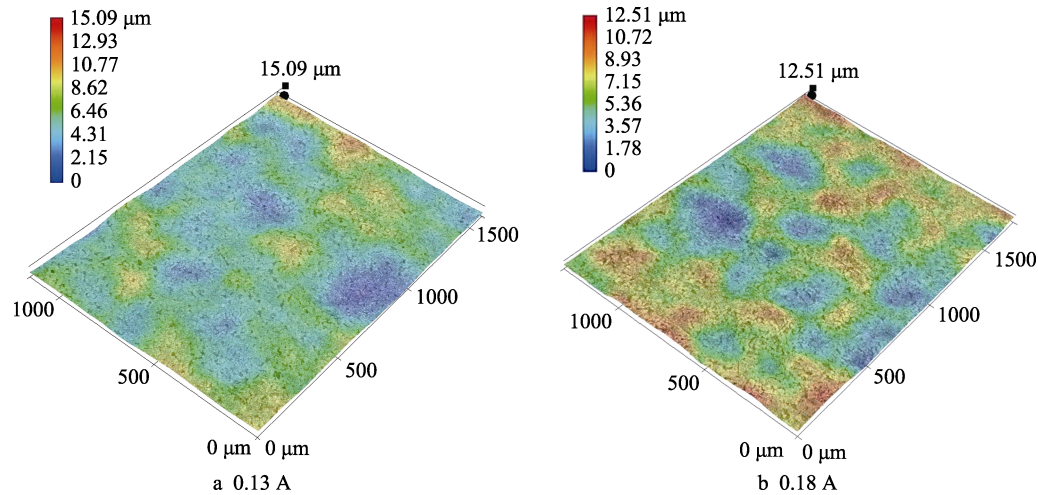


图 5 超声喷丸试样表面粗糙度检测
Fig.5 Surface roughness measurement of ultrasonic shot peening sample

表 4 超声喷丸试样粗糙度
Tab.4 Roughness of ultrasonic shot peening sample

Direction	Almen intensity	Roughness/ μm	1	2	3	4	5
Horizontal	0.13 A	R_a	$0.69^{+0.18}_{-0.15}$	$0.87^{+0.23}_{-0.16}$	$0.82^{+0.11}_{-0.12}$	$0.83^{+0.15}_{-0.13}$	$0.83^{+0.13}_{-0.17}$
		R_z	$3.27^{+0.20}_{-0.24}$	$4.50^{+0.18}_{-0.15}$	$3.65^{+0.20}_{-0.14}$	$3.71^{+0.21}_{-0.16}$	$3.69^{+0.14}_{-0.12}$
	0.18 A	R_a	$1.21^{+0.16}_{-0.12}$	$0.95^{+0.15}_{-0.17}$	$1.04^{+0.22}_{-0.28}$	$0.73^{+0.27}_{-0.22}$	$1.28^{+0.23}_{-0.21}$
		R_z	$5.17^{+0.32}_{-0.13}$	$4.34^{+0.19}_{-0.26}$	$5.21^{+0.21}_{-0.19}$	$3.33^{+0.21}_{-0.24}$	$5.36^{+0.27}_{-0.22}$
Vertical	0.13 A	R_a	$0.88^{+0.15}_{-0.16}$	$0.69^{+0.13}_{-0.12}$	$0.87^{+0.16}_{-0.13}$	$1.07^{+0.13}_{-0.12}$	$0.79^{+0.10}_{-0.16}$
		R_z	$4.75^{+0.23}_{-0.15}$	$3.40^{+0.21}_{-0.22}$	$3.58^{+0.15}_{-0.13}$	$4.67^{+0.24}_{-0.12}$	$3.56^{+0.17}_{-0.15}$
	0.18 A	R_a	$1.12^{+0.25}_{-0.23}$	$0.95^{+0.27}_{-0.15}$	$1.01^{+0.23}_{-0.18}$	$0.99^{+0.21}_{-0.17}$	$0.88^{+0.23}_{-0.22}$
		R_z	$4.20^{+0.28}_{-0.20}$	$3.97^{+0.26}_{-0.23}$	$4.06^{+0.26}_{-0.25}$	$3.81^{+0.29}_{-0.23}$	$3.70^{+0.23}_{-0.24}$

两种喷丸强度下，试样的横向粗糙度与纵向粗糙度并不存在明显的方向性，横向与纵向每条粗糙度测量线下平均粗糙度的标准差范围相近，同一喷丸强度下，每条粗糙度测量线的平均粗糙度浮动不明显，但标准差浮动范围较大，因此需要进一步对测量点进行粗糙度均值的相对标准偏差统计分析。

图 6 为 0.13 A 与 0.18 A 超声喷丸强度下模拟的粗糙度的相对标准偏差数据统计。0.13 A 横纵向粗糙度统计数据表明，25 个测量值统计的情况下，相对标准偏差虽然较小，但横纵向存在约 2% 的浮动；10 个极值统计的情况下，相对标准偏差基本稳定在 10.4% 附近，横纵向相对标准偏差变化低于 0.3%；5 个极值统计的情况下，相对标准偏差超过 15%。0.18 A 横纵向粗糙度统计数据表明，25 个测量值统计的情况下，相对标准偏差虽然较小，但横纵向存在大于 1% 的浮动；10 个极值统计的情况下，相对标准偏差基本稳定在 9.5% 附近，横纵向相对标准偏差变化低于 0.3%；5 个极值统计的情况下，相对标准偏差超过

15%，且横纵向差异超过 3%。横纵向具体 R_a 与 R_z 具体相对标准偏差值如表 5 所示。

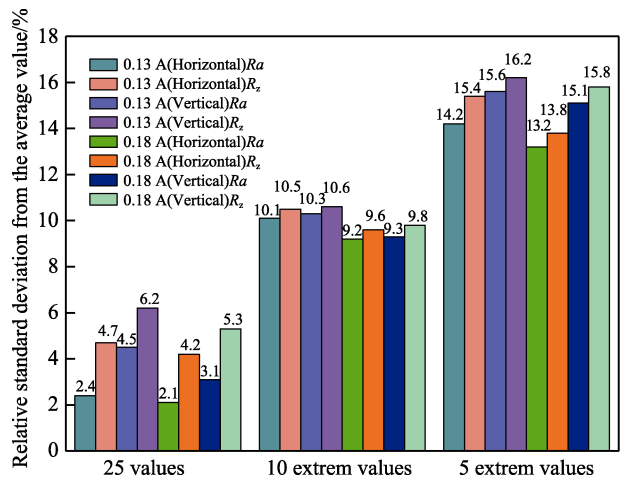


图 6 两种喷丸强度下横纵向粗糙度相对标准偏差
Fig.6 Relative standard deviation of horizontal and vertical roughness under two shot peening intensities

表 5 超声喷丸粗糙度相对标准偏差

Tab.5 Relative standard deviation of roughness of ultrasonic shot peening

Almen intensity	Direction	Relative standard deviation/%	25 values	10 extrem values	5 extrem values
0.13 A	Horizontal	R_a	2.4	10.1	14.2
		R_z	4.7	10.5	15.4
	Vertical	R_a	4.5	10.3	15.6
		R_z	6.2	10.6	16.2
0.18 A	Horizontal	R_a	2.1	9.2	13.2
		R_z	4.2	9.6	13.8
	Vertical	R_a	3.1	9.3	15.1
		R_z	5.3	9.8	15.8

超声喷丸模拟与试验试样表面形貌基本相似,凹坑密度分布均匀,横纵向粗糙度模拟值(R_a 、 R_z 均值分别为 1.02、4.3 μm)与试验数据(R_a 、 R_z 均值分别为 0.96、4.25 μm)最终评估值的差异小于 10%,符合所建议的相对标准公差范围,因此该数值模型可以实现对超声喷丸粗糙度场的评估。比较 0.13 A 与 0.18 A 喷丸强度下,不同测量点数量的 R_a 、 R_z 均值的相对标准偏差。结果表明,两种喷丸强度下,纵向粗糙度相对标准偏差略大于横向,表面机加工痕迹虽然没有对粗糙度均值产生明显的方向性影响,但一定程度上影响了横纵向粗糙度数据的相对标准偏差。比较两种喷丸强度下横纵向在 25 个测量值、10 个极值、5 个极值时的 R_a 与 R_z 均值的相对标准偏差,增加喷丸强度至 0.18 A 后,试样表面横纵向 R_a 与 R_z 相对标准偏差减小,说明喷丸强度的增加虽然增加了 R_a 与 R_z 均值(根据表 5),但一定程度上降低了试样表面横纵向粗糙度分布的离散度。在不同喷丸强度粗糙度相对标准偏差统计下,10 个极值的测量数目体现了最佳的粗糙度数据准确性,两种喷丸强度下,粗糙度标准偏差均低于 10%,且横纵向相对标准偏差变化低于 3%,较其他两种方式,更能准确反映出超声喷丸后试样表面粗糙度的情况。

4 结论

1) 表面机加工痕迹虽然没有对粗糙度均值产生明显的方向性影响,但一定程度上影响了 FGH97 粉末高温合金超声喷丸横纵向粗糙度数据的相对标准偏差,因此对超声喷丸强化表面粗糙度分析前试样的前处理状态进行测量分析是必要的。

2) 喷丸强度的增加虽然增加了 R_a 与 R_z 均值,但一定程度上降低了试样表面横纵向粗糙度分布的离散度。

3) 10 个极值的测量数目体现了最佳的粗糙度数据准确性,样本数目过多或过少都会使相对标准偏差

的离散度增大。与其他两种方式比较,10 个极值的取样测量数目更能准确反映出超声喷丸后试样表面粗糙度的情况。

4) 基于有限元仿真可以对 FGH97 超声喷丸强化表面宏观形貌及数值进行有效的评估和预测分析。

参考文献:

- [1] ZHANG Ying, ZHANG Xi-wen. Fracture character of low cycle fatigue of P/M superalloy FGH97[J]. Acta metallurgica sinica, 2010, 46(4): 444-450.
- [2] XU Chao, YAO Zhi-hao, DONG Jian-xin, et al. Mechanism of high-temperature oxidation effects in fatigue crack propagation and fracture mode for FGH97 superalloy[J]. Rare metals, 2019, 38(7): 642-652.
- [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] BAGHERIFARD S, GUAGLIANO M. Fatigue behavior of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening[J]. Engineering fracture mechanics, 2012, 81: 56-68.
- [5] AKINIW Y, KIMURA H, SASAKI T, et al. Effect of residual stresses on fatigue strength of severely surface deformed steels by shot peening[J]. Powder diffraction, 2008, 24(2): 37-40.
- [6] GUJBA A K, REN Z, DONG Y, et al. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V[J]. Surface & coatings technology, 2016, 307: 157-170.
- [7] WEN A L, REN R M, WANG S W, et al. Effect of surface nanocrystallization method on fatigue strength of TA2[J]. International symposium on eco-materials processing, 2009, 620: 545-549.
- [8] FELDMANN G G, HENNIG W, HAUBOLD T, et al. Comparison of the consequences of shot peening treatment methods on the surface layer characteristics of Ti6246[J]. Advanced engineering materials, 2011, 13(9): 895-900.
- [9] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.
HE Jia-wen. Comments on nanotreatment of surface attrition via historical review[J]. China surface engineering, 2014, 27(5): 1-13.
- [10] 何家文. 关注疲劳再评表面纳米化[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 1-15.
HE Jia-wen. Revaluation on nano-treatment of surface attrition for fatigue[J]. China surface engineering, 2019, 32(2): 1-15.
- [11] MARTINEZ S A, BLODGETT M P, SATHISH S, et al.

- Evolution of fretting fatigue damage and relaxation of residual stress in shot-peened Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical and materials transactions A (physical metallurgy and, materials science)*, 2005, 36(12): 3385-3396.
- [12] UNAL O, VAROL R. Almen intensity effect on micro-structure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening[J]. *Applied surface science*, 2014, 290(290): 40-47.
- [13] CHILD D J, WEST G D, THOMSON R C. Assessment of surface hardening effects from shot peening on a Ni-based alloy using electron backscatter diffraction techniques[J]. *Acta materialia*, 2011, 59(12): 4825-4834.
- [14] AHMED A A, MHAEDE M, WOLLMANN M, et al. Effect of micro shot peening on the mechanical properties and corrosion behavior of two microstructure Ti-6Al-4V alloy[J]. *Applied surface science*, 2016, 363: 50-58.
- [15] APARICIO C, GIL F J, FONSECA C, et al. Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications[J]. *Biomaterials*, 2003, 24(2): 263-273.
- [16] GIBSON G J, PERKINS K M, GRAY S, et al. Influence of shot peening on high-temperature corrosion and corrosion-fatigue of nickel based superalloy 720Li[J]. *High temperature technology*, 2016, 33(3): 225-233.
- [17] KUMAR S, CHATTOPADHYAY K, SINGH V. Effect of ultrasonic shot peening on LCF behavior of the Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2017, 724: 187-197.
- [18] STOLL I, HELM D, POLANETZKI H, et al. Ultrasonic shot peening (USP) on Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aero engine components[J]. *Enginelease aero*, 2011, 217: 25-32.
- [19] DEKHTYAR A I, MORDYUK B N, SAVVAKIN D G, et al. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment [J]. *Materials science and engineering: A*, 2015, 641: 348-359.
- [20] TARO M, CHAISE T, NÉLIAS D. A methodology to predict the roughness of shot peened surfaces[J]. *Journal of materials processing technology*, 2015, 217: 65-76.
- [21] 刘辉, 蔡晋, 孟庆勋, 等. 超声喷丸与传统喷丸对 TC4 钛合金残余应力影响的仿真分析[J]. *航空发动机*, 2020, 46(2): 87-92.
- LIU Hui, CAI Jin, MENG Qing-xun, et al. Simulation analysis of Influence of ultrasonic and conventional shot peening on residual stress of TC4 titanium alloy[J]. *Aero-engine*, 2020, 46(2): 87-92.
- [22] 蔡晋, 刘建邦. 能量输入对 TC4 钛合金超声喷丸力学影响的仿真研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(9): 140-149.
- CAI Jin, LIU Jian-bang. Simulation study on the effect of energy input on ultrasonic shot peening mechanics properties of TC4 titanium alloy[J]. *Surface technology*, 2019, 48(9): 140-149.
- [23] 王业辉. TC4 钛合金超声喷丸强化残余应力数值模拟分析[J]. *航空发动机*, 2019, 45(3): 58-64.
- WANG Ye-hui. Simulation study of effect of excited vibration on ultrasonic shot peening surface state of TC4 titanium alloy[J]. *Aeroengine*, 2019, 45(3): 58-64.
- [24] 杨天南, 林爽, 蔡晋. 超声喷丸激励振动幅值对 TC4 钛合金表面状态影响的仿真研究[J]. *航空精密制造技术*, 2020, 56(4): 14-18.
- YANG Tian-nan, LIN Shuang, CAI Jin. Numerical simulation analysis of residual stress in ultrasonic shot peening of TC4 titanium alloy[J]. *Aviation precision manufacturing technology*, 2020, 56(4): 14-18.
- [25] ZALESKI K, SKOCZYLAS A, BRZOZOWSKA M. The effect of the conditions of shot peening the Inconel 718 nickel alloy on the geometrical structure of the surface[J]. *Advances in science and technology research journal*, 2017, 11(2): 205-211.
- [26] CLAUSEN R, STANGENBERG J. Roughness of shot-peened surfaces-definition and measurement[J]. *Wear*, 1999, 57: 69-77.
- [27] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. *Engineering fracture mechanics*, 1983, 21(1): 541-547.