

喷砂表面的多尺度分析与表征

王春水, 何声馨, 张二亮, 李大磊

(郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 对喷砂表面的复杂轮廓特征进行分析和表征,以选取能表征最佳工艺参数的三维粗糙度参数。**方法** 以喷砂工作距离为变量对 AISI 304L 不锈钢试样进行喷砂处理,对喷砂处理后试样的表面形貌开展多尺度分析,选取 5 个评价尺度,每个评价尺度下采用 12 个常用的三维粗糙度参数进行表面形貌表征;分析各个粗糙度参数对于评价尺度的变化规律,同时进一步考虑喷砂工作距离对喷砂表面形貌的影响,在适宜评价尺度下建立粗糙度参数和工艺参数之间的线性回归模型。**结果** 大部分三维粗糙度参数(S_{ku})的最优评价尺度均为 80 μm ,在该评价尺度下, S_{ku} 与喷砂工作距离之间存在线性关系,且其线性相关系数最大;随着喷砂工作距离的增加, S_{ku} 随之增大,试样表面形貌的峰谷数量也随之增大。**结论** 本次喷砂工艺实验的最优评价尺度为 80 μm ,最优表面形貌表征参数为 S_{ku} ,与普遍使用的 S_a 和 S_q 相比, S_{ku} 包含更多三维形貌信息,能更好地刻画喷砂工作距离对表面形貌的影响。

关键词: 喷砂; 三维粗糙度; 多尺度分析; 回归分析

中图分类号: TG580.692

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)06-0127-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.06.024

Analysis and Characterization of Sandblasted Surfaces Using Multi-scale Analysis

WANG Chun-shui, HE Sheng-xin, ZHANG Er-liang, LI Da-lei

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze and characterize the complicated surface topography of sandblasted surface, so as to obtain the 3D roughness parameter which is optimal in describing the influence of sandblasting parameters on surface topography. **Methods** The multi-scale analysis was conducted on the sandblasted surfaces of AISI 304L steel specimens, which were sandblasted at different distances as the processing parameter. Each surface was characterized using 12 common 3D roughness parameters at 5 evaluation scales. The variation trend of each roughness parameter against the evaluation scale was analyzed, meanwhile, the influence of process parameter (distance) on surface topography was considered, the linear regression model between the roughness parameters and the process parameter was established at an appropriate evaluation scale. **Results** The optimal evaluation scale of most roughness parameters was 80 μm , and a linear relationship was found to be pertinent in modeling S_{ku} as a function of the distance at this evaluation scale, besides, the coefficient of determination of S_{ku} was the biggest among the 12 roughness parameters. The number of

收稿日期: 2015-01-16; 修订日期: 2015-03-18

Received: 2015-01-16; Revised: 2015-03-18

作者简介: 王春水(1992—),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为机械制造及自动化。

Biography: WANG Chun-shui(1992—), Male, from Henan, Master graduated student, Research focus: machinery manufacturing and automationhan nationality.

通讯作者: 张二亮(1979—),男,河南人,副教授,主要研究方向为机械制造及自动化。

Corresponding author: ZHANG Er-liang(1979—), Male, from Henan, Associate professor, Research focus: machinery manufacturing and automationhan nationality.

high peaks and low valleys of the surface topography increased and the value of S_{ku} increased with the increasing of sandblasting distance. **Conclusion** For this sandblasting experiment, the optimal evaluation scale was 80 μm , the parameter S_{ku} was more promising than the widely used S_a and S_q as it collected more spatial information which allowed to better describing the effect of distance on the sandblasted topography.

KEY WORDS: sandblasting; 3D roughness; multi-scale analysis; regression analysis

喷砂是通过把细小的磨料砂粒高速喷射到工件表面,借助于砂粒的撞击和冲刷作用来优化表面性能的表面处理工艺。喷砂处理后的表面形貌主要受砂粒特性(形状、硬度、成分等)和喷砂工艺参数(压力、角度、工作距离等)的影响。国内外研究人员针对喷砂工艺参数对表面形貌影响的定性分析已作了大量研究^[1-5],主要以二维参数 R_a 为粗糙度表征参数;其中,钟鹏等^[1]分析了4种不同的磨料对工件表面清洁度和粗糙度的影响;王晓洁等^[2]研究了不同砂粒粒度和喷砂压力条件下,钛表面粗糙度的变化规律;MARTINELLI 等^[3]对比分析了不同的喷砂粒度、压力和工作距离对 Co-Cr 合金表面粗糙度的影响,SCHWANKL 等分别研究了两种砂粒粒度和喷砂压力对铝板表面粗糙度的影响。然而, R_a 只反映了轮廓峰谷的均值而难以判别峰谷特性,因此,罗正国等认为不应仅仅依赖于单个参数 R_a 来表征表面粗糙度,而应合理运用标准规定的各类评定参数^[6-10]。随着图像采集与数据处理技术的不断发展,表面形貌评定已从传统的二维表征转向三维综合表征。针对各种特定的表面应用,提出了许多三维粗糙度参数,造成了所谓的“参数爆炸”的局面^[11],妨碍了表面形貌评价工作的开展。因此,选择合理的粗糙度参数表征加工表面形貌需要深入的研究。

机械加工表面形貌通常可视为由具有不同频率的谐波分量叠加而成,具有多尺度特性,在不同评价尺度下形貌特性亦不同,而形貌特性的形成与加工工艺息息相关,因此,多尺度分析被应用于加工表面形貌的评定^[12-17],用来选取适宜的表面形貌评价尺度,并获得理想的形貌表征参数。

喷砂表面是由大量不均匀砂粒的随机碰撞和反复冲刷形成的,具有多尺度特性和随机特性。基于多尺度分析,本文提出一种表面形貌表征参数的优选方法,对实验获得的表面形貌数据进行多尺度分析,提取多个评价尺度下的形貌图像进行对比,获取最优的评价尺度,并在该评价尺度下建立工艺参数和表面粗糙度参数之间定量的函数关系,并以相关系数 R^2 为评价准则,选取能表征最佳工艺参数的三维粗糙度参数。以 AISI 304L 不锈钢的喷砂表面为研究对象,以喷砂工作距离为工艺参数变量,通过分析获取其最优

评价尺度和最优粗糙度表征参数,验证本文所提出方法的有效性。

1 实验

喷砂工艺实验使用的材料为 AISI 304L 不锈钢,其化学成分(以质量分数计)为: C 0.022%, Mn 1.58%, Si 0.35%, S 0.024%, P 0.039%, Ni 8.08%, Cr 18.60%, Mo 0.39%, Cu 0.60%, N 0.046%, Fe 余量。制备了4个直径为 50 mm、厚度为 5 mm 的试样。首先对所有试样进行研磨,直至获得镜面,然后使用 CSF 70 V 喷砂机对试样进行喷砂处理。基本工艺参数如下: SiC 砂粒直径约 0.1~0.25 mm,角度为 90°,压力为 0.4 MPa,持续时间为 60 s,喷砂工作距离分别为 5, 10, 15, 20 cm。

运用配备有高速摄像机(320×240 像素,20 倍的 Mirau 物镜)的白光干涉仪 NewView7300(ZYGO)对喷砂表面进行三维测量。测量工作距离为 4.70 mm,光学分辨率为 0.71 μm ,采样空间为 1.09 μm ×1.09 μm 。为获取可靠的测量数据和统计特征,对每个试样的表面形貌进行多次采样,以 0.35 mm×0.26 mm 的区域作为基本图元,由 16 个基本图元以 20% 的重叠度拼接在一起,构成尺寸为 1.19 mm×0.89 mm 的大尺寸拼接测量图像。

材料表面的轮廓特征数学本质上可视为一个非平稳随机过程,是由不同频带的谐波分量构成的,具有多尺度特征。多尺度分析的基本思想在于利用不同带通的滤波器将表面形貌划分到不同的特定频段中,实现和表面功能相关的各种表面元素在不同尺度上的成功分离^[14],提取出表面形貌的微观几何特征用于各种形貌评定参数的计算,能有效克服传统评定方法的众多缺陷。

通过多尺度分析获得最佳的评价尺度,在该尺度下观测到的表面形貌能很好地反映加工工艺信息,为了获取表面形貌与加工工艺之间的关系,需要选取适当的参数来表征表面形貌。本文研究了 12 个常规三维粗糙度参数,主要分为幅度参数、空间参数和综合参数,见表 1。

表 1 三维粗糙度参数

Tab.1 Three-dimensional roughness parameters

幅度参数 (Amplitude parameter)	空间参数 (Spatial parameter)	综合参数 (Comprehensive parameter)
均方根偏差 S_q 、10 点高度 S_z 、高度分布峭度 S_{ku}	表面的结构形状比率 S_{tr} 、表面的纹理方向 S_{td}	展开界面面积比率 S_{dr}
峰顶最大高度 S_p 、谷底最大深度 S_v	最速衰减自相关长度 S_{al}	表面均方根斜率 S_{dq}
算术平均偏差 S_a 、高度分布偏度 S_{sk}		

粗糙度参数的估计值与评价尺度密切相关,因此在 $[8\text{ }\mu\text{m},1080\text{ }\mu\text{m}]$ 内选取 5 个评价尺度:8,25,80,250,1080 μm 。使用商用表面分析软件 MountainsMap 对在 4 种不同喷砂工作距离下获得的表面进行纹理处理,具体步骤如下:

- 1) 对测量图像进行 motif 分形处理;
- 2) 借助高斯滤波,剔除表面形状误差,保留粗糙度信息;
- 3) 提取 5 个评价尺度下的表面形貌电子图像;
- 4) 每一评价尺度下,计算对应的表面三维粗糙度参数组。

2 结果和讨论

首先根据 12 个三维粗糙度参数在不同的喷砂工作距离下相对于 5 个评价尺度的变化规律得到最佳评价尺度,然后在最佳评价尺度下根据各个粗糙度参数与喷砂工作距离的相关性得到与喷砂工艺最相关的粗糙度参数。

2.1 最佳评价尺度

在不同的喷砂工作距离下, S_{ku} 评价尺度之间的关系如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,当评价尺度小于 80 μm 时, S_{ku} 的数值随着评价尺度的增大而明显减小;当评价尺度大于 80 μm 时, S_{ku} 趋于稳定,不再有显著变化。所以对于 S_{ku} ,选取 80 μm 作为其最佳评价尺度。同理,对其余的 11 个参数也采用同样的分析方法,可得到每个粗糙度参数所对应的最佳评价尺度,结果见表 2。

由表 2 可见,大部分粗糙度参数的最佳评价尺度都是 80 μm ,故可初步选取 80 μm 作为本次实验所研究喷砂表面形貌的最佳评价尺度。

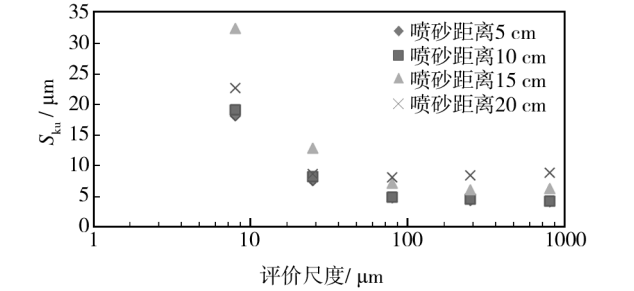


图 1 S_{ku} 随评价尺度的变化

Fig.1 S_{ku} changes at different evaluation scales

表 2 各参数的最佳评价尺度

Tab.2 The best evaluation scale of each parameter

参数	最佳评价尺度/ μm	参数	最佳评价尺度/ μm
S_q	250	S_a	800
S_{sk}	80	S_{al}	800
S_{ku}	80	S_{tr}	80
S_p	80	S_{td}	80
S_v	80	S_{dq}	80
S_z	80	S_{dr}	80

为了更加清晰和直观地了解不同评价尺度下的喷砂表面形貌,可提取 5 种评价尺度下的表面形貌电子图像,并通过对比进一步确认最优评价尺度。以喷砂工作距离为 5 cm 为例,不同评价尺度下喷砂表面形貌的电子图像如图 2 所示。

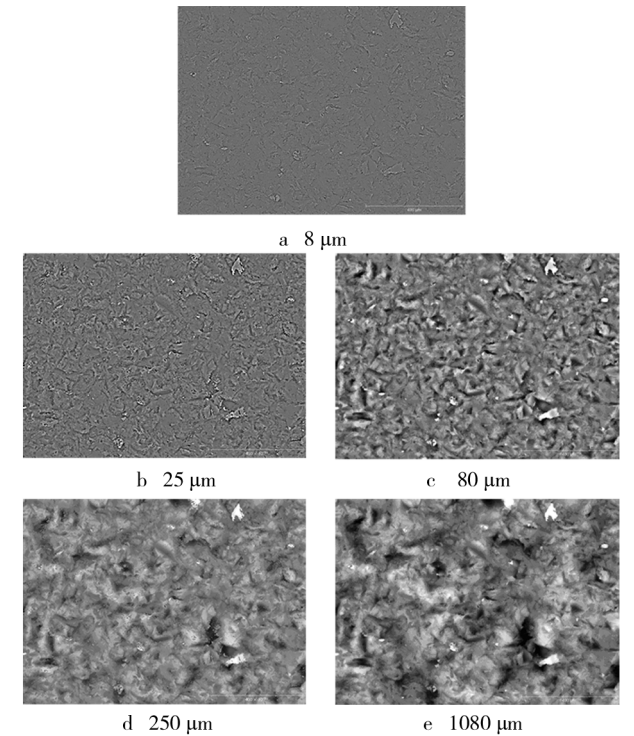


图 2 5 种评价尺度下的表面形貌图像

Fig.2 Textures of surfaces obtained at five evaluation scales

由图 2 可知,砂粒的冲击对试样表面产生的影响是各向同性的,即在不同评价尺度下,喷砂所形成的撞击坑没有呈现出任何特定的方向性。8 μm 评价尺度下的表面数据没有显示出任何显著的形貌特征;25 μm 评价尺度下的表面数据显示出的形貌特征不太显著;80 μm 尺度下表面有明显的撞击坑,反映了喷砂所用砂粒的几何形状;250 μm 和 1080 μm 尺度下,仅显示了表面的宏观波纹,不能展现由砂粒的重复击打所带来的表面局部变形。另外,当喷砂工作距离为 10,15,20 cm 时,亦能得到类似的图像数据。故本实验选取 80 μm 为最佳的评价尺度是合适的。

2.2 最优参数

采用统计回归分析研究表面粗糙度参数与工艺参数之间的关联性,确定用于表面形貌表征的最优参数。采用相关系数 R^2 描述喷砂距离与粗糙度参数之间的线性相关度。针对三维粗糙度参数组,评价尺度为 80 μm 时,表 3 列出了与其相应的相关系数。

表 3 各参数的相关系数

Tab.3 The coefficient of determination of each parameter

参数	R^2	参数	R^2
S_q	0.551	S_a	0.643
S_{sk}	0.892	S_{al}	0.885
S_{ku}	0.922	S_{tr}	0.342
S_p	0.001	S_{id}	0.009
S_v	0.243	S_{dq}	0.275
S_z	0.065	S_{dr}	0.278

由表 3 可知,与 S_{ku} 相对应的相关系数 R^2 最大,即在本实验条件下, S_{ku} 最能表征喷砂表面形貌,反映工艺参数(喷砂工作距离)对表面质量的影响。 S_{ku} 与喷砂工作距离之间存在的线性关系如图 3 所示,随着喷砂工作距离的增加,粗糙度参数 S_{ku} 的值也随之增大。

S_{ku} 属于幅度参数,表示表面轮廓在高度分布方向上的峭度,能描述表面轮廓锐度的概率密度分布,也是高度分布中孤立波峰数量的度量^[7-10,18]。当评价尺度为 80 μm 时,在 4 个不同的喷砂工作距离下,参数 S_{ku} 的平均值分别为:4.75 μm (5 cm),4.93 μm (10 cm),5.16 μm (15 cm),5.18 μm (20 cm)。根据其含义^[18]可知,表面轮廓上波峰和波谷的形状主要是尖锐的,这是因为砂粒的反复击打会导致表面塑性变形层的形成以及撞击坑的相互叠加,最终会导致一系

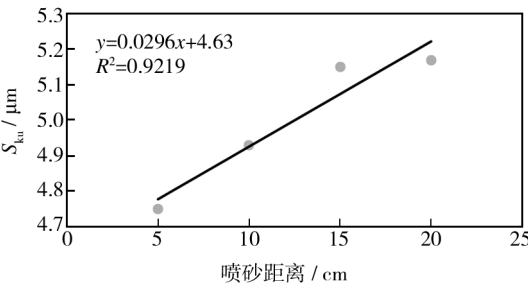


图 3 观测尺度为 80 μm 时 S_{ku} 与喷砂工作距离的线性函数关系

Fig. 3 Linear functional relationship between S_{ku} and the working distance at the scale of 80 μm

列边缘尖锐的峰谷的形成^[5],这与实验所观察到的表面轮廓特征(图 2 和图 4)是相符合的。同时参数 S_{ku} 的值随着喷砂工作距离而增加,这表明轮廓微观表面上的波峰和波谷的数量也随着喷砂工作距离的增加而增加,如图 4 所示;这是因为喷砂工作距离为 5 cm 时,喷砂束集中,冲击在试样表面上的作用面积小、能量集中,易造成表面硬化,喷砂所形成的撞击坑就较少;喷砂工作距离为 20 cm 时,喷砂束分散,冲击在试样表面上的作用面积大、能量分散,表面硬化效果不显著,喷砂所形成的撞击坑就较多。

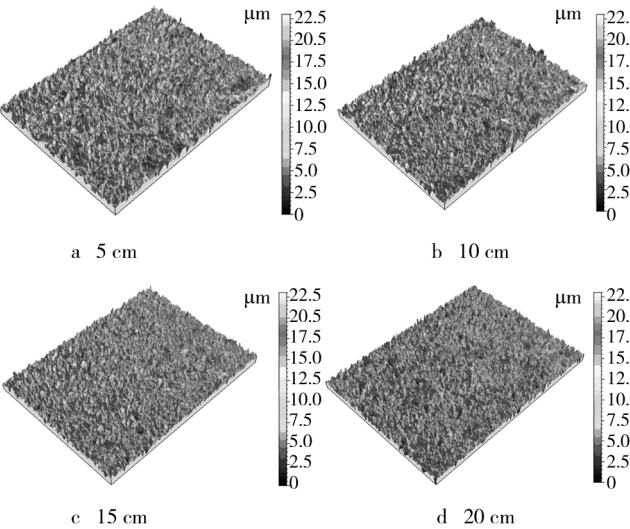


图 4 80 μm 观测尺度下的 3D 表面图像

Fig. 4 3D images at the scale of 80 μm

在三维表面形貌的研究中,粗糙度参数 S_a 和 S_q 被广泛应用于描述经由不同加工工艺获得的表面形貌。 S_a 可很好地描述表面轮廓在高度方向上的整体变化,但不能反映任何有关波长信息,且对轮廓上的细微变化不敏感;相对于 S_a , S_q 对偏差更为敏感,但

不能对表面进行详细描述。在4个不同喷砂工作距离下,估计得到的 S_a 和 S_q 分别为 $(1.893 \pm 0.146) \mu\text{m}$ 和 $(2.511 \pm 0.160) \mu\text{m}$,二者在误差允许范围内可视为常数。对本次喷砂工艺实验而言,相比 S_a 和 S_q ,参数 S_{ku} 包含了更多表面信息,更适宜描述喷砂工作距离对表面形貌的影响。

3 结论

针对本次喷砂工艺实验,本文基于多尺度分析了不同喷砂工作距离对 AISI 304L 不锈钢表面形貌的影响,考虑了5个评价尺度和12个常规的三维粗糙度参数。以不同评价尺度下各粗糙度参数的变化规律和表面形貌图像选取最优评价尺度,并在最优评价尺度下,基于喷砂工作距离与粗糙度参数之间的线性相关系数 R^2 建立了粗糙度参数的优选策略。结果表明,最优评价尺度为 $80 \mu\text{m}$,该尺度下粗糙度参数 S_{ku} 与喷砂工作距离之间的相关性最高,与广泛使用的纹理特性参数 S_a 和 S_q 相比,能更好地刻画喷砂工作距离对表面形貌的影响。本文提出的“多尺度分析-获取最优评价尺度-得到最能反映具体加工工艺参数的粗糙度参数”这一分析方法和思路方法可用于指导喷砂工艺过程设计,提高材料表面性能,同时该方法也可应用于其他工艺参数(如角度、压力等)和其他实验条件。

参考文献

- [1] 钟鹏,周俐,常立忠,等.风淬转炉渣作为喷砂磨料的可行性及效果研究[J].表面技术,2014,44(2):49—54.
ZHONG Peng,ZHOU Li,CHANG Li-zhong,et al. Feasibility and Application Effect Research of the Wind Quenching Slag as Sand Blasting Abrasive[J]. Surface Technology, 2014,44(2):49—54.
- [2] 王晓洁,郭天文,张玉梅,等.钛表面不同喷砂条件处理对钛/瓷结合强度的影响[J].现代口腔医学杂志,2007(4):389—391.
WANG Xiao-jie, GUO Tian-wen, ZHANG Yu-mei, et al. The Study of Al_2O_3 on the Bond Strength of Porcelain/ Titanium [J]. Journal of Modern Stomatology, 2007(4):389—391.
- [3] MARTINELLI C S M. Co-Cr Alloy: Sandblasting and Percentage Variation in Surface Roughness[J]. Dental Materials, 2013, 29(1):35—37.
- [4] TANGO R N, PEREIRA P C, MACEDO V C, et al. Effect of Sandblasting on Y-TZP Roughness and Biofilm Formation: Preliminary Study [J]. Dental Materials, 2011, 27(1):170—174.
- [5] SCHWANKL M, KELLNER R, SINGER R F, et al. The Influence of Sandblasting on the Morphology of Electroless Deposited Zinc layers on Aluminum Sheets[J]. Applied Surface Science, 2013, 283(15):202—208.
- [6] 罗正国,蒲竞秋.表面结构与粗糙度测量方法浅析[J].工具技术,2006(3):123—125.
LUO Zheng-guo, PU Jing-qiu. Analyze on the Surface Structure and Roughness Measurement [J]. Tool Engineering, 2006(3):123—125.
- [7] GB/T 1031—2009, 产品几何技术规范(GPS)——表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值[S].
GB/T 1031—2009, Geometrical Product Specifications (GPS)——Surface Texture: Profile Method, Surface Roughness Parameters and Their Values[S].
- [8] ISO 25178—2012, Geometrical Product Specifications (GPS)——Surface Texture: Areal—Part 1: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters[S].
- [9] ISO 25178—2012, Geometrical Product Specifications (GPS)——Surface Texture: Areal—Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters[S].
- [10] ISO 25178—2013, Geometrical Product Specifications (GPS)——Surface Texture: Areal—Part 3, Annex B-Default Attribute Values for Parameters from ISO 25178—2013[S].
- [11] 李志强.表面微观形貌的测量及其表征[D].重庆:重庆大学,2006.
LI Zhi-qiang. Measurement and Characterization of Surface Morphology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [12] 胡兆稳,刘小君,王静,等.多尺度表面形貌的功能评定与控制[J].中国机械工程,2010(7):773—777.
HU Zhao-wen, LIU Xiao-jun, WANG Jing, et al. Functional Assessment and Manufacturing Control of Multi-scale Surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2010(7):773—777.
- [13] 李小兵,王清华.基于多尺度理论的三维表面形貌表征研究[J].机械设计与研究,2014(2):119—122.
LI Xiao-bing, Wang Qing-hua. Research of Multi-scale Theory in the Three-dimensional Surface Morphology Characterization[J]. Machine Design and Research, 2014(2):119—122.
- [14] 炊明伟,冯有前,王崴,等.非下采样 Contourlet 变换在表面形貌评定中的应用[J].表面技术,2013,43(1):123—126.
CHUI Ming-wei, FENG You-qian, WANG Wei, et al. The Application of Nonsubsampled Contourlet Transform in Surface Topography Evaluation[J]. Surface Technology, 2013, 43(1):123—126.

- [15] CHEN X, RAJA J, SIMANAPALLI S. Multi-scale Analysis of Engineering Surfaces [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, 35(2): 231—238.
- [16] BIGERELLE M, MATHIA T, BOUVIER S. The Multi-scale Roughness Analyses and Modeling of Abrasion with the Grit Size Effect on Ground Surfaces [J]. Wear, 2012 (286/287): 124—135.
- [17] VANGORP A, BIGERELLE M, GRELLIER A. A multi-scale Approach of Roughness Measurements: Evaluation of the Relevant Scale [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 27: 1434—1438.
- [18] TAYEBI N, A. POLYCARPOU A. Modeling the Effect of Skewness and Kurtosis on the Static Friction Coefficient of Rough Surfaces [J]. Tribology International, 2004, 37: 491—505.

(上接第97页)

- LIU Ying-kun, CHEN He-xing, YU Zhi-ming, et al. Salt Spray Corrosion Resistance of NiCoCrAlY Coatings after Heat Treatment [J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(12): 746—748.
- [13] 陈兴品, 尚都, 余晓伟, 等. 退火工艺对镍基带中立方织构形成的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(12): 47—50.
- CHEN Xing-pin, SHANG Du, YU Xiao-wei, et al. Influence of Annealing Process on Cube Texture in Deformed Nickel Tapes [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(12): 47—50.
- [14] 李洪波, 李海涛, 曲立杰. 不同焊接工艺 0Cr18Ni9 不锈钢焊缝金属盐雾腐蚀性能的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(13): 166—167.
- LI Hong-bo, LI Hai-tao, QU Li-jie. Study on Salt Spray Corrosion Properties of 0Cr18Ni9 Steel Weld Metal Under Different Welding Process [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(13): 166—167.
- [15] 胡进, 卢会湘, 程凯. 微波高频外壳的设计与制造工艺研究[J]. 电子与封装, 2010, 10(3): 5—8.
- HU Jin, LU Hui-xiang, CHENG Kai. The Research of Design and Making for Metal-ceramic Package [J]. Electronics & Packaging, 2010, 10(3): 5—8.
- [16] 徐立鹏, 包春江. 电刷镀工艺对 Ni-Mo 合金镀层表面形貌与硬度的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 106—109.
- XU Li-peng, BAO Chun-jiang. Effect of Brush Plating Technology on the Coating Surface Morphology and Microhardness of Ni-Mo Alloys [J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 106—109.

(上接第126页)

- [48] 王欣, 滕佰秋, 曾惠元, 等. 表面完整性对 C250 型超高强度钢高周疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2014(2): 18.
- WANG Xin, TENG Bai-qiu, ZENG Hui-yuan, et al. Effect of Surface Integrity on the High Cycle Fatigue Property of C250 Ultra-high Strength Steel [J]. China Surface Engineering, 2014(2): 18.
- [49] 李振, 张相琴, 张雪萍. 轴承钢硬切削表面残余应力对滚动接触界面疲劳寿命的影响[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1): 50—55.
- LI Zhen, ZHANG Xiang-qin, ZHANG Xue-ping. Rolling Contact Fatigue Life Prediction on Bearing Steel Pre-residual Stress Surfaces Induced by Hard Turning [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(1): 50—55.
- [50] 刘彦臣, 庞思勤, 王西彬, 等. 表面完整性对高强度钢疲劳寿命影响的试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(6): 759—764.
- LIU Yan-chen, PANG Si-qin, WANG Xi-bin, et al. Experimental Study on Effect of Surface Integrity on High-strength Steel Fatigue Life [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(6): 759—764.
- [51] 高玉魁. 表面强化对 A-100 钢带孔构件疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014(5): 30.
- GAO Yu-kui. Influence of Local Surface Strengthening on Fatigue Properties of Components with Holes of an A-100 Steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014(5): 30.
- [52] 曾泉人, 刘更, 刘岚. 机械加工零件表面完整性表征模型研究[J]. 中国机械工程, 2011(24): 2995—2999.
- ZENG Quan-ren, LIU Geng, LIU Lan. Quantitative Description Model of Surface Integrity for Machined Parts [J]. China Mechanical Engineering, 2011(24): 2995—2999.
- [53] YAN L, YANG W, JIN H, et al. Analytical Modeling of the Effect of the Tool Flank Wear Width on the Residual Stress Distribution [J]. Machining Science and Technology, 2012, 16(2): 265—286.
- [54] YAN L, YANG W, JIN H, et al. Analytical Modelling of Microstructure Changes in the Machining of 304 Stainless Steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1—4): 45—55.