

# 表面完整性研究现状及发展趋势

何柏林, 邓海鹏

(华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 疲劳失效是金属结构失效的重要形式之一,提高零件疲劳性能可以有效增加结构使用寿命。对于低周和高周疲劳,绝大多数疲劳裂纹萌生于零件表面。因此,表面完整性对金属材料疲劳行为有重要影响。简述了表面完整性的内涵,指出表面完整性不仅包括如粗糙度、波纹度、表面裂纹等的表面形貌特征,也包含如加工之后零件表面的残余应力、塑性变形、组织形貌等物理化学变化特征。总结了表面完整性工艺的研究现状,说明机械铣削、电火花线切割、磨削、喷丸强化、光饰等加工工艺对表面完整性的影响。综述了表面完整性表征模型的建立,指出各表面完整性特征参数对表面完整性影响的比重。分析了国内表面完整性发展趋势,指出表面完整性工艺研究与表面完整性表征模型相互促进的作用,提出表面完整性工艺与表面完整性表征模型的交叉研究。最后,对提高表面完整性及建立影响表面完整性的参数模型提出了建议。

**关键词:** 表面完整性; 表面状态; 表面性能; 加工工艺; 表征模型

**中图分类号:** TG113.25      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2015)09-0140-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.023

## Research Status and Development Trend of Surface Integrity

HE Bo-lin, DENG Hai-peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**ABSTRACT:** Fatigue failure is one of the important forms of metal structure failure. Improving the fatigue performance of parts can effectively increase the life of structure. For low and high cycle fatigue, the majority of the fatigue cracks are born on the surface of the parts. Therefore, the surface integrity has important influence on the fatigue behavior of metal materials. The connotation of surface integrity was briefly introduced in this review, pointing out that surface integrity does not only include the surface characteristics such as roughness, waviness and surface crack, but also the physical and chemical characteristics such as surface residual stress, plastic deformation and microstructure of the processed parts. The current research status of surface integrity process was summarized, showing the effects of mechanical milling, wire-electrode cutting, grinding, shot peening, and light decoration on the surface integrity. The building of description models for surface integrity was overviewed. The importance of every element to the surface integrity was pointed out. The domestic development trends of surface integrity were analyzed. It was pointed out that process technology of surface integrity and surface integrity characterization model promote each other, and interdisciplinary

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-06-28

Received: 2015-06-02; Revised: 2015-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(51365014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51365014)

作者简介: 何柏林(1962—),男,博士,教授,主要从事材料表面强化技术。

Biography: HE Bo-lin (1962—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: Surface strengthening technology of materials.

research on surface integrity process and surface integrity description model was proposed. Finally, suggestions were put forward to improve the surface integrity, and to establish the model of surface integrity.

**KEY WORDS:** surface integrity; surface texture; surface properties; processing technique; description model

在不同载荷条件下,零件的设计准则是不同的。对于同一种材料而言,疲劳强度往往比静载强度低很多。所以,受循环载荷的零件将疲劳寿命作为其设计准则。随着工程中受疲劳载荷的结构越来越多,对结构性能要求越来越高,提高零件的疲劳性能变得尤为重要。

当零件的加工尺寸及其结构形式和材料属性确定以后,零件的加工表面质量变得尤为重要,成为影响其疲劳寿命的关键因素。疲劳寿命对零件表面状态相当敏感,表面缺陷、表面裂纹、表面组织变化都将引起疲劳寿命的改变。研究发现,大部分的疲劳裂纹都萌生于表面,也有部分萌生在零件内部夹杂等应力集中处。所以,零件的表面质量受到很大重视,提高表面质量就能提高零件抵抗疲劳裂纹萌生的能力。零件在投入使用之前,要经过一系列的加工成型和表面处理等工艺过程,不同的加工工艺产生不同的加工表面质量,会对疲劳寿命有不同程度的影响。零件加工表面质量包括两个方面的内容,表面形貌特征和表面变质层材料与物理力学性能变化状况。表面形貌特征的内容包含零件最外层表面的几何尺寸和形状,一般可以使用波纹度、刀纹方向、粗糙度等表示;材料在加工之后,也会引起表面变质层材料与物理力学性能变化,包括残余应力、硬度、金相组织以及结构性能变化等<sup>[1]</sup>。为了表征加工表面质量与疲劳寿命之间关系,评价零件加工之后产生的表面形貌和内部冶金物理变化对零件的性能的影响,在 1964 年,Field 等<sup>[2]</sup>首次确切提出表面完整性这个概念。

此后,国内也开展了对表面完整性的研究<sup>[3-10]</sup>。其中包括两个方面的内容:一方面是探究加工工艺对表面完整性的影响,如振动切削、高速铣削、磨削加工、电火花加工、喷丸强化和激光喷丸等;另一方面是对加工零件的表面完整性建立表征模型,确定表面完整性模型中的特征参数。本文从这两个方面进行总结,并探讨它们之间的相互关联,以期对我国表面完整性理论研究和实践应用提供一些参考和建议。

1 表面完整性的内涵

表面完整性是零部件加工后表面几何和物理性

质的总称<sup>[11-12]</sup>。从广义上来讲,表面完整性包括两个组成部分:1)与零件表面纹理变化有关的部分,称为外部效应,其中包括表面粗糙度、波纹度、刀纹方向和宏观缺陷(例如裂纹、压痕、划伤、发纹和杂质等);2)与零件表层冶金物理特性变化的有关部分,即内部效应,其中包括显微结构变化、再结晶、晶间腐蚀、热影响区、显微裂纹、硬度变化、塑性变形、残余应力、材料非同质性和合金贫化等<sup>[13]</sup>。如图 1 所示,表面完整性有两个方面内涵,一是表面状态,二是表面性能。表面状态包括物理状态、化学状态、力学状态和几何状态等;表面性能包括物理性能、化学性能、力学性能和几何性能等。表面状态与表面性能关系密切,一方面表面状态决定或影响了表面性能,另一方面表面性能体现出表面状态<sup>[14]</sup>。所以表面完整性应该反映表面状态和表面性能之间的关系,可以从定性向定量研究。

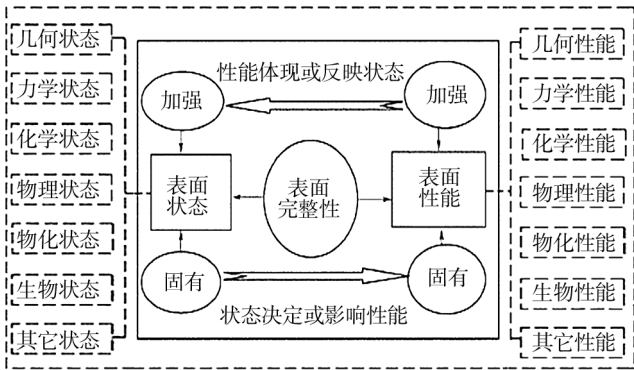


图 1 表面完整性的内涵<sup>[6]</sup>  
Fig. 1 The connotation of surface integrity<sup>[6]</sup>

2 表面完整性研究现状

2.1 加工工艺对表面完整性的影响

零件的表面状态与性能和加工过程有着密切的联系<sup>[15-19]</sup>。零件在加工过程中,受力和热的作用。在热作用下,金属表面材料可能会发生组织晶粒的变化,可能会导致晶粒长大和微观组织的改变,这必将引起零件表面性能发生转变。在力的作用下,表面形貌必然受到影响,加工工艺不同,零件的表面形成不同的表面形貌如不同的波纹度、不同的毛刺棱角,这些会在零件受力时,导致不同程度的应力集中。同

时,在力的作用下,零件近表面的晶粒发生变形,在零件近表面产生未释放的残余应力,导致零件表面与内部有着不同的组织状态和物理化学状态。这些热机综合效应最终会影响零件的使用性能<sup>[20-26]</sup>。为了控制零件的表面完整性,达到零件较高的使用要求,必须对表面完整性工艺进行研究。在了解加工工艺与表面完整性之间的关系之后,才能对零件的表面完整性加以改善和提高。

随着国外对表面完整性越来越重视<sup>[27-31]</sup>,国内的高校和研究所也展开了对表面完整性研究<sup>[32-37]</sup>。姜大志等<sup>[38]</sup>研究了振动切削对零件表面完整性影响。其过程为,让工件或零件产生一定的振动,这样可以与由于切削产生的振动相互作用,从而减小加工时的振动,即达到提高零件加工精度和改善零件表面质量的目的。这种振动切削或加工的方法,是通过超声振动的切削或加工时间与刀具工件振动的时间相差较大,使被加工的零件或工件还没有振动,刀具已经离开所加工的零件表面。通过研究表明:这种振动切削方法,加工精度和形状精度很高,因为振动切削刀具和零件的相对位置不随时间变化,而且由于产生脉冲切削力,其切削力减小很多。与此同时,振动切削所加工工件的表面变形较小,在工件表面留下的加工残余应力也很小,由于加工引起的表层组织变化层的深度较浅。所以,振动切削加工方法可以提高被加工零件的表面完整性。

海阔等<sup>[39]</sup>研究了铝锂合金的机械铣削加工工艺对于其表面完整性的影响。研究在干切情况与液氮冷却情况下切削三要素以及上一道滚压工艺对于表面完整性的影响,通过正交试验的方法全面考察了工艺参数对于表面形貌各个指标、表层亚表层金相组织以及残余应力的影响权重,并且验证了其显著性。比较了干切与液氮低温切削情况下,表面形貌以及残余应力状态的异同点,验证了液氮冷却切削对于铝锂合金表面完整性提升的有效性,为提高铝锂合金疲劳性能提供了实验依据。

黄新春等<sup>[40]</sup>研究了用单晶刚玉砂轮磨削镍基高温合金 GH4169 时,磨削参数对表面完整性中的表面特征的影响。通过改变砂轮磨削工艺参数,来分析表面残余应力、表面显微硬度、表面形貌特征和表面粗糙度的变化。研究结果表明:表面残余应力对砂轮的速度变化最为敏感,同时表面显微硬度对砂轮的速度变化最为敏感,且表面粗糙度对工件速度的变化最为敏感。通过改变磨削参数,研究工艺对工件表面残

余应力、微观组织、显微硬度、表面形貌的影响。通过综合分析,揭示了表面变质层形成规律:其塑性变形层在  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,显微硬度变化影响层为  $80 \sim 100 \mu\text{m}$ ,残余应力影响层厚度为  $80 \sim 200 \mu\text{m}$ ,为磨削镍基高温合金表面完整性控制研究提供相关的实验数据基础。

赵国光等<sup>[41]</sup>研究了电火花线切割加工的工艺参数对表面完整性影响,并提出了改善表面完整性的措施。他认为热作、电化学反应、化学腐蚀作用等因素影响电火花加工的表面完整性,提出多次切割、防电解、优化放电能量分配和喷丸挤压研磨等辅助措施来改善零件表面完整性。

夏明莉等<sup>[42]</sup>探讨了喷丸强化对钛合金表面完整性及其疲劳行为的影响规律。结果表明:采用合理的喷丸强化工艺能够显著提高 TC4 钛合金的拉-拉疲劳抗力,以强度  $0.10 \sim 0.15 \text{ mmA}$ ,覆盖率 100% 的条件喷丸处理 TC4 钛合金,能够使其疲劳极限提高 14.5%。然而,过高强度 ( $0.15 \sim 0.20 \text{ mmA}$ ) 的喷丸处理,并不能达到显著提高 TC4 钛合金疲劳抗力的目的。喷丸强化处理提高了 TC4 钛合金的表面完整性,且对钛合金的疲劳行为产生很大影响。当喷丸引入的表面残余压应力及组织强化因素为主导时,钛合金疲劳抗力能够得到显著地提高。

曹子文等<sup>[43]</sup>用方形激光斑点喷丸冲击 TC17 钛合金。结果表明:激光脉冲能量很大程度上影响表面形貌和表面残余应力大小。当激光脉冲能量大于 55J 时,残余压应力大小达到饱和。在激光斑点重合的地方,重合率大小严重影响表面形貌和参与压应力,当重合率为 8% 时,可以获得光滑的表面形貌和均匀的残余压应力。

此外,也有人研究复合加工工艺对表面完整性的影响。王欣等<sup>[44]</sup>采用圆磨、一次喷丸和二次喷丸处理燃气轮机转子用钢 C250。韩秀全等<sup>[45]</sup>使用喷丸强化和光饰强化航空材料 Ti6Al4V。邓建新<sup>[46]</sup>采用磨削抛光加工、金刚石锯片切割加工、超声波加工和电火花线切割加工技术对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  陶瓷材料进行加工,研究了各加工方法对陶瓷材料的加工表面完整性及其可靠性的影响。

## 2.2 表面完整性表征模型

在表面完整性工艺研究的基础上,如果能建立一个表征模型来表述表面完整性各工艺参数与表面特征参数之间的关系,就可以对加工零件的表面性能及



使用性能加以预测。通过该模型预测被加工零件表面的粗糙度、硬度、残余应力、疲劳性能,这会对表面完整性的控制有很大意义。表面完整性表征模型的建立要包含所有影响表面完整性的因素,通过对各因素的特征值的数学加工,得到各因素与表面完整性之间的关系趋势和各因素对表面完整性的重要程度。从而,在零件加工之前,选择合理的加工工艺和路线。

表面完整性包含两个方面的内容,一方面是零件表面几何形貌特征,另一方面零件表面下变质层的冶金物理化学变化特征。所以,表面完整性表征模型也需要包含两个方面的内容,一方面需要包含表面几何特征参数,另一方面应包含变质层内的残余应力、显微硬度、金相组织等特征参数。为了准确描述零件的表面完整性,不但要定性而且要用相应的参数定量的表示零件的表面完整性<sup>[1]</sup>。

曾泉人等<sup>[1]</sup>提出了机械加工零件表面完整性表征模型,定义 3 个特征集合来表征机械加工零件的表面完整性,分别为表面完整性特征类的集合  $SI$ , 表面完整性的工艺类集合  $P$  和表面完整性的疲劳性能类集合  $F$ 。

$$SI=SI(SI_1, SI_2, SI_3, \cdots, SI_j) \quad (1)$$

$$P=P(P_1, P_2, P_3, \cdots, P_j) \quad (2)$$

$$F=F(F_1, F_2, F_3, \cdots, F_m) \quad (3)$$

式中:  $SI_1, SI_2, \cdots, SI_i$  分别表示加工后零件的表面残余应力、微观组织特征、低倍组织特征、显微硬度以及表面形貌特征等;  $P_1, P_2, \cdots, P_j$  分别表示各种加工工艺过程;  $F_1, F_2, \cdots, F_m$  分别表示疲劳极限和对应的应力循环次数等疲劳试验参数。

王成贵等<sup>[45]</sup>用 8 项指标来度量零件的表面完整性,这 8 项指标分别为棱边质量、表面形貌、表面粗糙度、残余应力、加工硬化、表面缺陷、金相组织和其他特征。采用层次分析与专家询问相结合的方法确定各指标间的相对重要性。然后根据各指标间的相对重要性得到判断矩阵  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 5 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 3 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1 & 2 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 3 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

然后,计算判断矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$ 。由最大特

征值  $\lambda_{\max}$  计算上述判断矩阵的一般一致性指标  $I_c$ 。最后,查表可得上述判断矩阵的随机一致性指标  $I_{sc}$  的值。根据式(4)计算判断矩阵的随机一致性比率  $R_c$ :

$$R_c = I_c / I_{sc} \quad (4)$$

当  $R_c < 0.1$  时,判断矩阵具有较强的一致性。

### 3 表面完整性国内发展趋势

目前国内表面完整性研究分为两个部分,即加工工艺对表面完整性影响研究和表面完整性表征模型研究。目前这两个部分相对孤立,所以今后国内表面完整性研究必定会将两个部分结合起来,形成完整的表面完整性理论。如图 2 所示,表面完整性工艺的研究可以验证表面完整性表征模型正确性。另一方面,表面完整性表征模型可以指导表面完整性工艺的研究,两者相互促进,形成完善的表面完整性理论。

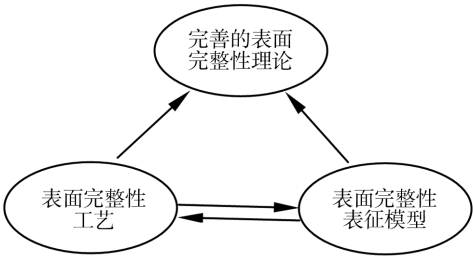


图 2 表面完整性工艺与表征模型关系

Fig. 2 The relationship between process and description model of surface integrity

表面完整性工艺的研究,一方面探究了加工工艺与零件表面完整性之间的关系,另一方面也要研究新方法新技术来提高表面完整性。表面完整性工艺研究,通过分析零件显微组织、表面硬度、残余应力、表面形貌、表面粗糙度等表面完整性特征,可以帮助我们理解加工工艺对零件表面状态、表面性能影响的内在机理<sup>[47—52]</sup>。表面完整性表征模型的研究,需要积累大量数据,进行分析、加工、处理,得出表面完整性特征参数之间的数学关系。通过该模型,可以指导零件的加工,同时也要在实践中不断修正。

### 4 结语

尽管前人对表面完整性进行大量研究,但国内表面完整性理论尚属起步阶段。加工工艺与表面性能、表面状态之间的机理仍有待进一步研究,通过对该机

理的理解,进一步提高零件的表面完整性。表面完整性表征模型的研究有一定的进展,但是影响表面完整性的各参数间的数学关系仍未建立。

基于目前研究成果,今后可以从以下2个方面开展进一步研究:1)表面完整性工艺与表征模型交叉研究,工艺研究提供大量数据验证和完善表征模型,表征模型指导工艺研究,两者有机结合起来,可以相互更正;2)通过表面完整性的监测和控制系统进行控制和改善表面完整性,研制表面完整性监测和控制设备,对重要零件的生产进行严格的表面完整性控制。

### 参考文献

- [1] 曾泉人,刘更,刘岚. 机加工零件表面完整性表征模型研究[J]. 中国机械工程,2010,21(24):2995—3008.  
ZENG Quan-ren, LIU Geng, LIU Lan. Quantitative Description Model of Surface Integrity for Machined Parts [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(24): 2995—3008.
- [2] FIELD M, KAHLES J F. The Surface Integrity of Machined and Ground High Strength Steels [J]. DIMC Report, 1946, 210:54—58.
- [3] 金磊,苏彬. 表面完整性对超高强度钢疲劳性能的影响[J]. 锻压技术,2005(增刊):145—148.  
JIN Lei, SU Bin. Effect of Surface Integrity on Fatigue Properties of Ultra-high Strength Steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2005(Suppl): 145—148.
- [4] 陆涛,曹伟,师汉民,等. 基于分形特征的表面微观形貌模拟和分析[J]. 华中理工大学学报,1996,22(7):22—24.  
LU Tao, CAO Wei, SHI Han-min, et al. Simulation and Analysis of Surface Topography based on Fractal Characteristics [J]. Journal of Huazhong Science and Technology University, 1996, 22(7): 22—24.
- [5] 张为,郑敏利. 钛合金 Ti-6Al-4V 车削加工表面硬化[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(8):1052—1056.  
ZHANG Wei, ZHENG Min-li. Surface Work-hardening Experiment of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Turning [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8): 1052—1056.
- [6] CAO Zi-wen, XU Hai-ying, ZOU Shi-kun, et al. Investigation of Surface Integrity on TC17 Titanium Alloy Treated by Square-spot Laser Shock Peening [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25: 650—656.
- [7] 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, 27(2):69—74.  
WANG Xin, TENG Bai-qi, 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, 27(2): 69—74.
- [8] 曹秀中. 表面完整性对 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能的影响[J]. 航空制造技术,2014,14:95—100.  
CAO Xiu-zhong. Influences of Surface Integrity on Fatigue Property of Ti6Al4V Alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 27(2): 69—74.
- [9] 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.
- [10] 张义平,秦义. 钛合金高速铣削表面完整性研究[J]. 机械设计与制造,2006,9:106—108.  
ZHANG Yi-ping, QIN Yi. Study on Surface Integrity of High Speed Milling of Titanium Alloy [J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, 9: 106—108.
- [11] 王仁智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力[J]. 中国表面工程,2011,24(4):55—57.  
WANG Ren-zhi. Surface Integrity and Fracture Resistance of Engineering Metallic Materials and Components [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(4): 55—57.
- [12] 陈雷,吕泉,马艳玲,等. 表面完整性对航空发动机零件疲劳寿命的影响分析[J]. 航空精密制造技术,2012,48(5):47—55.  
CHEN Lei, LYU Quan, MA Yan-ling, et al. Analysis of the Effect of Surface Integrity on the Fatigue Life of Aeroengine Parts [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(5): 47—55.
- [13] 王尚志. 航空零件的表面完整性[J]. 航空工艺技术, 1982, 2:31—33.  
WANG Shang-zhi. The Surface Integrity of Aerospace Components [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1982, 2: 31—33.
- [14] 高玉魁,赵振业. 齿轮的表面完整性与抗疲劳制造技术的发展趋势[J]. 金属热处理,2014,39(4):1—6.  
GAO Yu-kui, ZHAO Zhen-ye. Development Trend of Surface Integrity and Anti-fatigue Manufacture of Gears [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(4): 1—6.
- [15] 王仁智. 残余应力测定的基本知识[J]. 理化检验-物理分册,2007,43:535—539.  
WANG Ren-zhi. Basic Knowledge of Residual Stress Determination [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2007, 43: 535—539.

- [16] 韩荣第. 金属切削原理与刀具[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.  
HAN Rong-di. Metal Cutting Principle and Tool[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.
- [17] 《中国材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
The Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China Aeronautical Materials Handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [18] 王珉. 抗疲劳制造原理与技术[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.  
WANG Min. Principle and Technology of Anti-fatigue Manufacturing[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999.
- [19] 李金桂, 肖定全. 现代表面工程设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
LI Jin-gui, XIAO Ding-quan. Modern Surface Engineering Design Handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [20] RAJMOHAN T, PALANIKUMAR K, PAULO DA VIM J. Analysis of Surface Integrity in Drilling Metal Matrix and Hybrid Metal Matrix Composites[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(8): 761—768.
- [21] SU Hong-hua, LIU Peng, FU Yu-can, et al. Tool Life and Surface Integrity in High-speed Milling of Titanium Alloy TA15 with PCD/PCBN Tools[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25: 784—790.
- [22] YANG Chang-yong, XU Jiu-hua, DING Wen-feng, et al. Dimension Accuracy and Surface Integrity of Creep Feed Ground Titanium Alloy with Monolayer Brazed CBN Shaped Wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23: 585—590.
- [23] 韩野, 崔海军, 张平. 电火花加工技术相关表面完整性的研究[J]. 电加工与模具, 2012, 5: 58—63.  
HAN Ye, CUI Hai-jun, ZHANG Ping. Research on EDM Surface Integrity[J]. Electric Machining and Mould, 2012, 5: 58—63.
- [24] 王仁智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力[J]. 中国表面工程, 2011, 24: 55—57.  
WANG Ren-zhi. Surface Integrity and Fracture Resistance of Engineering for Materials and Components[J]. China Surface Engineering, 2011, 24: 55—57.
- [25] 洪泉, 王贵成. 精密加工表面完整性的研究及其进展[J]. 现代制造工程, 2004, 8: 12—15.  
HONG Quan, WANG Gui-cheng. The Status and Development to Machined Surface Integrity in Precision Machining[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2004, 8: 12—15.
- [26] DING Wen-feng, XU Jiu-hua, CHEN Zhen-zhen, et al. Grindability and Surface Integrity of Cast Nickel-based Superalloy in Creep Feed Grinding with Brazed CBN Abrasive Wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23: 501—510.
- [27] ARRAZOLA P J, OZEL T, UMBRELLO D. Recent Advances in Modelling of Metal Machining Processes In RP Annals Manufacturing Technology[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2013, 62(2): 695—718.
- [28] ATTANASIO A, UMBRELLO D, CAPPELLINI J, et al. Tool Wear Effects on White and Dark Layer Formation in Hard Turning of AISI 52100 Steel[J]. Wear, 2012(286/287): 98—107.
- [29] SCHULZE V, ZANGER F. Development of a Simulation Model to Investigate Tool Wear in Ti-6Al-4V Alloy Machining[J]. Advanced Materials Research, 2011, 223: 535—544.
- [30] RATCHEV S M, AFAZOV S M. Mathematical Modeling and Integration of Micro-scale Residual Stresses into Axisymmetric FE Models of Ti6Al4V Alloy in Turning[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science Technology, 2011, 4(1): 80—89.
- [31] 张为, 程晓亮, 郑敏利. 切削加工表面完整性建模现状与发展趋势[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(5): 519—525.  
ZHANG Wei, CHENG Xiao-liang, ZHENG Min-li, et al. Status and Development Trend of Surface Integrity Modeling in Metal Cutting[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(5): 519—525.
- [32] 朱有利, 刘开亮, 黄元林. 应力集中和表面完整性对平尾大轴抗疲劳性能的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 93—97.  
ZHU You-li, LIU Kai-liang, HUANG Yuan-lin. Effects of Stress Concentration and Surface Integrity on Anti-fatigue Performances of Horizontal Stabilizer Shaft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 93—97.
- [33] 李培林, 炊明伟, 王威, 等. 粗糙纹理表面数字化模拟[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 88—90.  
LI Pei-lin, CHUI Ming-wei, WANG Wei, et al. Numerical Simulation of Rough Texture Surface[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 88—90.
- [34] 田峰, 杨辉. AM50 镁合金孔挤压强化对其疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 55—58.  
TIAN Feng, YANG Hui. Effect of Pore Extrusion Strengthening on Fatigue Properties of AM50 Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 55—58.
- [35] 裴旭明, 陈五一. 制孔工艺对 7075 铝合金孔表面完整性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28: 319—322.

- PEI Xu-ming, CHEN Wu-yi. Effect of Drilling Processes on Surface Integrity of 7075-aluminum Alloy Holes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28:319—322.
- [36] 孙雅洲, 刘海涛, 卢泽生. 基于热力耦合模型的切削加工残余应力的模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1):187—193.
- SUN Ya-zhou, LIU Hai-tao, LU Ze-sheng. Simulation and Experimental Research of Machining Residual Thermal Coupling Model based on Stress[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1):187—193.
- [37] 王志光. 切削奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9 加工硬化的试验研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(24):2952—2954.
- WANG Zhi-guang. Experimental Study on Work Hardening in Cutting Austenitic Stainless Steel 0Cr18Ni9[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(24):2952—2954.
- [38] 姜大志, 孙俊兰. 振动切削技术与零件加工表面完整性[J]. 工具技术, 2001, 35(5):19—22.
- JIANG Da-zhi, SUN Lan-jun. Vibration Cutting Technology & Machined Surface Integrity of Components[J]. Tool Engineering, 2001, 35(5):19—22.
- [39] 牟海阔, 黄信达, 袁益楚, 等. 铝锂合金高速铣削表面完整性实验研究[J]. 中国科学, 2004, 44(1):89—98.
- MU Hai-kuo, HUANG Xin-da, YUAN Yi-chu, et al. Study on Surface Integrity in High Speed Milling Experiments of Aluminum Lithium Alloy[J]. Science China Press, 2004, 44(1):89—98.
- [40] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 镍基高温合金 GH4169 磨削参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3):621—628.
- HUANG Xin-chun, ZHANG Ding-hua, YAO Chang-feng, et al. Effects of Grinding Parameters on Surface Integrity of GH4169 Nickel-based Superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3):621—628.
- [41] 赵国光. 电火花线切割加工的表面完整性[J]. 电加工, 1999(3):17—19.
- ZHAO Guo-guang. Surface Integrity of Electrospark Wire-electrode Cutting[J]. Electromachining, 1999(3):17—19.
- [42] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴. 喷丸强化对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(8):1349—1358.
- XIA Ming-li, LIU Dao-xin, DU Dong-xing. Effects of Shot Peening on Surface Integrity and Fatigue Properties of TC4 Titanium Alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(8):1349—1358.
- [43] CAO Zi-wen, XU Hai-ying, ZOU Shi-kun, et al. Investigation of Surface Integrity on TC17 Titanium Alloy Treated by Square-spot Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(4):650—656.
- [44] 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, 27(2):69—74.
- WANG Xin, TENG Bai-qiu, ZENG Hui-yuan, et al. Effect of Surface Integrity on the High Cycle Fatigue Property of C250U ltrahigh Strength Steel[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2):69—74.
- [45] 曾秀中, 韩秀全, 盖鹏涛. 表面完整性对 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能的影响[J]. 航空制造技术, 2014, 14:94—100.
- ZENG Xiu-zhong, HAN Xiu-quan, GAI Peng-tao. Influences of Surface Integrity on Fatigue Property of Ti6Al4V Alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 14:94—100.
- [46] 邓建新. 陶瓷材料加工表面完整性及其对材料可靠性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2001, 5:38—42.
- DENG Jian-xin. Surface Integrity in Machining of Ceramic Composite and Its Effects on the Material Reliability[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2001, 5:38—42.
- [47] 王成贵, 洪泉, 朱云明, 等. 精密加工中表面完整性的综合评价[J]. 兵工学报, 2005, 26(6):821—824.
- WANG Cheng-gui, HONG Quan, ZHU Yun-ming, et al. Comprehensive Evaluation System of Surface Integrity in Precision Machining[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(6):821—824.
- [48] 高维林. 五阶段加工硬化理论[J]. 东北工学院学报, 1993, 14(2):188—192.
- GAO Wei-lin. Five Stages of Work Hardening Theory[J]. Journal of Northeast University of Technology, 1993, 14(2):188—192.
- [49] 高玉魁, 杨庆详, 蔡大勇, 等. 表面加工对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2004, 29(9):38—40.
- GAO Yu-kui, YANG Qing-xiang, CAI Da-yong, et al. Process of Heat Treatment for Shearer's Pick with Surfacing Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(9):38—40.
- [50] 赵荣国, 罗希延, 蒋永洲, 等. 航空发动机涡轮盘用 GH4133B 合金疲劳损伤与断口分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6):92—100.
- ZHAO Rong-guo, LUO Xi-yan, JIANG Yong-zhou, et al. Analysis on Fatigue Damage and Fractography of GH4133B Super Alloy used in Turbine Disk of Aero-engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6):92—100.
- [51] 侯哲哲, 杜彦良, 赵维刚. 基于支持矢量机的疲劳应力集中系数预测模型研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4):40—43.



- ZOU Zhong-li, LI Ning, LI De-yu. Survey of Anti-fingerprint Treatment for Galvanized Steel[J]. Electroplating & Pollution Control, 2008, 28(3): 1—4.
- [2] 朱久发. 耐指纹板及耐指纹液的发展趋势[J]. 武钢技术, 2008, 46(1): 48—51.
- ZHU Jiu-fa. Trend of Development of Fingerprint Resistant Steel Sheet and Fingerprint Resistant Liquid[J]. Wisco Technology, 2008, 46(1): 48—51.
- [3] MORISHITA A, TAKAHASHI A, NAKAZAWA M, et al. Electro and Hot-dip Galvanized Steel Sheets with Chromate-free Treatment Layer on the Surface [J]. Nippon Steel Technical Report, 2003, 87: 30—33.
- [4] 杨芑, 潘燕芳. 家用电器热镀锌钢板的无铬耐指纹钝化[J]. 材料保护, 2011, 44(2): 40—43.
- YANG Peng, PAN Yan-fang. Chrome-free Anti-fingerprint Passivation of Hot-dip Galvanized Steel Sheet of Household Appliances [J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(2): 40—43.
- [5] 钱余海, 李自刚, 李平. 无铬及含铬电镀耐指纹钢板的性能对比研究[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 35—37.
- QIAN Yu-hai, LI Zi-gang, LI Ping. Comparison of Property for Baosteel Electro-galvanized Fingerprint Resistant Steel Sheets with  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{Cr}^{6+}$  Free [J]. Surface Technology, 2005, 34(5): 35—37.
- [6] 岳远广, 张启富, 江社明, 等. 耐指纹液的发展现状[J]. 材料保护, 2007, 40(2): 38—41.
- YUE Yuan-guang, ZHANG Qi-fu, JIANG She-ming, et al. Development Status of Anti-fingerprint Liquid [J]. Journal of Materials Protection, 2007, 40(2): 38—41.
- [7] 王海人, 谢娥梅, 屈钧娥, 等. 钢板耐指纹涂料及其涂膜表征方法的研究进展[J]. 材料保护, 2012, 45(2): 52—54.
- WANG Hai-ren, XIE E-mei, QU Jun-e, et al. Research Progress of Anti-fingerprint Paints and Coatings for Steel Plates [J]. Journal of Materials Protection, 2012, 45(2): 52—54.
- [8] 宫丽, 卢燕平, 于洋. 纳米硅溶胶改性有机复合钝化膜耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2004, 33(6): 18—20.
- GONG Li, LU Yan-ping, YU Yang. Corrosion Resistance of Nano Silicon Sol-modified Organic Composite Film [J]. Surface Technology, 2004, 33(6): 18—20.
- [9] XU Man. Passivation of Batch-galvanized Steel by Silane Treatment [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2007.
- [10] 杨芑, 潘燕芳. 家电用无铬耐指纹热镀锌钢板的研制[J]. 世界钢铁, 2011, 3: 13—17.
- YANG Peng, PAN Yan-fang. Development of Cr-free Anti-fingerprint Hot-dip Galvanized Sheet for Household Appliance [J]. World Iron & Steel, 2011, 3: 13—17.
- [11] 霍胜娟, 黄胜标. 电镀锌钢板上低温固化耐指纹膜的性能[J]. 电镀与精饰, 2009, 31(10): 33—37.
- HUO Sheng-juan, HUANG Sheng-biao. Property of Low Temperature Solidified Fingerprint Resistant Film on Electro Galvanized Steel Plate [J]. Plating and Finishing, 2009, 31(10): 33—37.
- [12] 陈珊, 陈仁霖, 陈学群, 等. 钢材表面硅烷处理后的防腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2008, 41(4): 24—26.
- CHEN Shan, CHEN Ren-lin, CHEN Xue-qun, et al. Corrosion Resistance of Steel Sheets with Silanization Treatment on Surface [J]. Material Protection, 2008, 41(4): 24—26.
- [13] 单凤君. 热镀锌钢板硅烷基涂层制备与性能 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- SHAN Feng-jun. The Synthesis and Properties of Silane Based Coatings for Hot Dip Galvanized Layer [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [14] 王雪明, 李爱菊, 李国丽, 等. 硅烷偶联剂在防腐涂层金属预处理中的应用研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(1): 146—150.
- WANG Xue-ming, LI Ai-ju, LI Guo-li, et al. Studies on the Application for SCA in the Metal Pretreatment of Anti-corrosion Coatings [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2005, 23(1): 146—150.
- [15] 唐静. 冷轧薄板表面粗糙度微观形貌的测试分析[J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(2): 66—69.
- TANG Jin. Test and Analysis on Surface Roughness and Micro-profile of Cold-rolled Steel Sheet [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25(2): 66—69.

(上接第 146 页)

- HOU Zhe-zhe, DU Yan-liang, ZHAO Wei-gang. Application of Support Vector Machine in the Prediction of Fatigue Stress Concentration Factor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 40—43.
- [52] 韩宝军, 何琼, 杨妙. 机械研磨工艺对 AZ91D 镁合金显

微结构的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 78—82.

HAN Bao-jun, HE Qiong, YANG Miao. Effect of Mechanical Attrition on Microstructure of AZ91D Magnesium Alloy [J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 78—82.