

# 机械加工表面完整性影响试件疲劳性能的研究现状\*

徐汝锋<sup>1</sup>, 周永鑫<sup>1</sup>, 杨慎亮<sup>2</sup>, 李 勋<sup>2</sup>, 王海宁<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**[摘要]** 机械加工表面完整性对试件的疲劳性能有直接的影响。因此, 国内外的研究者对此做了许多研究和分析。在总结表面完整性及其对试件疲劳性能影响规律和机理的基础上, 分析了机械加工表面完整性各主要指标影响试件疲劳性能的研究现状和形成的主要成果, 并且阐述了表面粗糙度、表面加工硬化、表面残余应力等关键指标对试件疲劳性能影响机理方面需要进一步完善的理论, 为抗疲劳制造领域后续研究工作的开展提供了相应的参考。

**关键词:** 表面完整性; 疲劳性能; 机械加工; 表面粗糙度; 表面加工硬化

## Research Status of Influence Mechanism of Surface Integrity on Fatigue Behavior of Workpieces

XU Rufeng<sup>1</sup>, ZHOU Yongxin<sup>1</sup>, YANG Shenliang<sup>2</sup>, LI Xun<sup>2</sup>, WANG Haining<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Machined surface integrity has an impact on fatigue behavior of specimens directly. Therefore, researchers have done a lot of studies and analyses. Based on summarizing the previous research achievements, research status and main achievements of influence mechanism of machined surface integrity on fatigue behavior of specimens were presented and analyzed. Moreover, it is pointed out clearly that several key theories of fatigue behavior of specimens influenced by surface roughness, surface micro-hardness and surface residual stress should be developed and completed in the further, which provides a corresponding reference for the subsequent research work in the field of anti-fatigue manufacturing.

**Keywords:** Surface integrity; Fatigue life; Machining; Surface roughness; Surface work hardening

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.096

目前, 我国航空工业已经取得了举世瞩目的成就。国产大型客机 C919 的成功试飞, 首台商用大涵道比涡扇发动机核心验证机“长江 1000AX”完成总装下线, 军用运 20、歼 20、轰 6K 的服役, 直 10、直 19、AC313 的成功研制和批量装备等, 是我国航空工业取得辉煌成就的典型代表, 也是我国航空工业具备研制并生产高性能飞机的标志。但据统计, 航空承力结构件 80% 的失效形式是疲劳破坏<sup>[1-2]</sup>, 而对于这些要载人并且多次重复使用的航空飞行器来说, 关键承力结构件的疲劳性能及其稳定性对整机的安全性至关重要<sup>[2]</sup>。经过长期的基础理论研究和实践积累发现, 机械加工工艺及其条件对试件的加工表面完整性有直接的影响, 进而影响试件的疲

劳性能, 因此, 研究加工表面完整性指标及其形成机理是提升试件疲劳性能的关键。国内外研究者对此展开了多方面的研究, 形成了较多的研究成果。但是, 针对不同的加工方式形成的表面粗糙度曲线的多尺度特征、加工表面纤维化及其方向、不同服役条件下加工表面残余应力的释放程度等因素, 对试件疲劳性能的影响机理及表面完整性影响试件疲劳性能的量化模型等方面, 还需继续进行系统、深入的研究。

### 1 机械加工表面完整性概念的提出及其影响因素

研究加工表面完整性指标及其形成机理是提升零件疲劳性能的关键。国内外研究者对此展开了许多研究, 早在 1964 年, Field 和 Kahles 最早引入了表面完整性的概念<sup>[3]</sup>, 并获得表面完整性数据的具体步骤<sup>[4]</sup>。他

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51875028); 国家科技重大专项(2018ZX04005001); 山东省自然科学基金(ZR2017MEE060); 山东省重点研发计划(2019GGX104094)。

们在表面完整性的前期研究方面做出了较大的贡献,并且参与完成表面完整性美国国家标准的建立。表面完整性是指在一定的加工工艺条件下产生的零件表面及亚表面结构的物理和化学特性,针对的是工件加工后表面0.2~0.5mm以下的微观几何特征和材料组织特性及其改变规律,表面完整性是对工件已加工表面层的改变及性能的总体描述,其主要表现形式如图1所示。

研究加工表面完整性对试件疲劳性能的影响规律和机理,首先要研究机械加工工艺和条件对加工表面完整性各指标的影响机理和规律,如图2所示<sup>[5]</sup>;其次再研究加工表面完整性各指标对试件疲劳性能的影响;最后,在以上两个方面的研究成果基础上进行分析,建立加工工艺及其条件对试件疲劳性能的影响规律,进而指导实际零件的生产。

研究机械加工表面完整性及其影响因素的成果较多,并且初步形成了一些共识性结论和模型,包括不同的加工工艺及组合工艺、加工参数及条件、刀具及几何参数等,还针对不同材料加工后的表面完整性指标进行了系统的研究。比如美国的Guo等、英国的Hughes等针对多种钛合金、高温合金铣削加工、车削加工后的表面完整性及其影响因素进行了研究,为表面加工硬化、表面残余应力及其表面变质层的研究和机理分析提供了许多理论基础和参考<sup>[6-9]</sup>。美国Rutgers University的Ulutan和Ozel<sup>[10]</sup>通过分析120多篇相关学术论

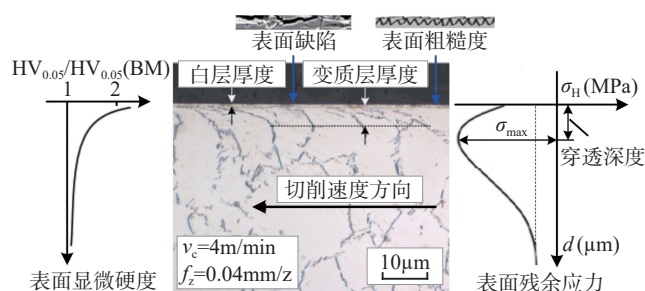


图1 加工表面完整性的关键指标  
Fig.1 Key indicators of surface integrity

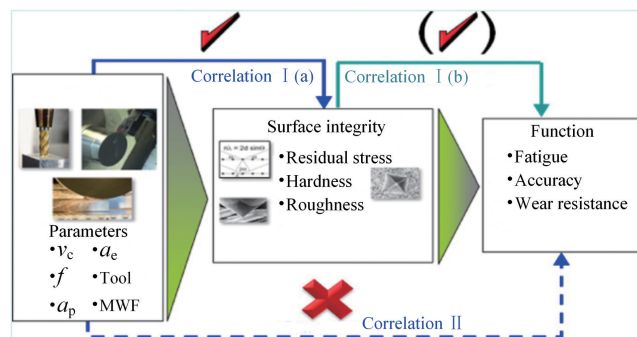


图2 机械加工表面完整性研究现状  
Fig.2 Research status of machined surface integrity

文,总结了钛合金和高温合金多种加工方式及其工艺条件对加工表面完整性影响规律和机理,为本领域的后续研究提供了全面、深入的参考。CIRP联合美国Kentucky大学、德国Bremen大学、瑞典Seco刀具公司、英国Birmingham大学、葡萄牙Catholic大学和意大利Calabria大学的研究者组成表面完整性研究工作组,历时4年(2008~2011年),针对铣削、粗磨及精磨、车削、电解加工方式及其40多种加工工艺条件对多种钛合金、高温合金、不锈钢等材料加工后的表面完整性及其影响因素进行了全面、深入的试验研究,形成了大量的试验数据和研究成果,为这些材料在不同加工方式下的表面完整性预测和工程应用提供了坚实的试验基础和理论支持<sup>[5]</sup>。同时,从2012年开始,CIRP每两年召开1次表面完整性研究专题研讨会(CIRP Conference on Surface Integrity, CSI),总结、研讨有关表面完整性方面的研究成果和进展。

## 2 机械加工表面完整性对试件疲劳性能的影响

针对机械加工表面完整性指标影响试件疲劳性能、抗磨损性能等方面规律的研究,是建立在加工参数及工艺条件对表面完整性指标影响规律的基础上进行的。在表面完整性的这些指标中,表面粗糙度、加工硬化和表面残余应力及其影响深度是非常重要的指标,如图1所示。它们对零件的疲劳性能有直接的影响,尤其是经过机械加工后,零件的表层和亚表层是疲劳破坏的主要起源,典型的疲劳起源形式如图3所示。

### 2.1 表面粗糙度对试件疲劳性能的影响

首先,加工表面粗糙度被认为是表面完整性中最主要的指标<sup>[10]</sup>,是零件获得高质量加工表面的基础。同时,在某些条件下,加工表面粗糙度对零件疲劳性能起到主要影响作用<sup>[11]</sup>。

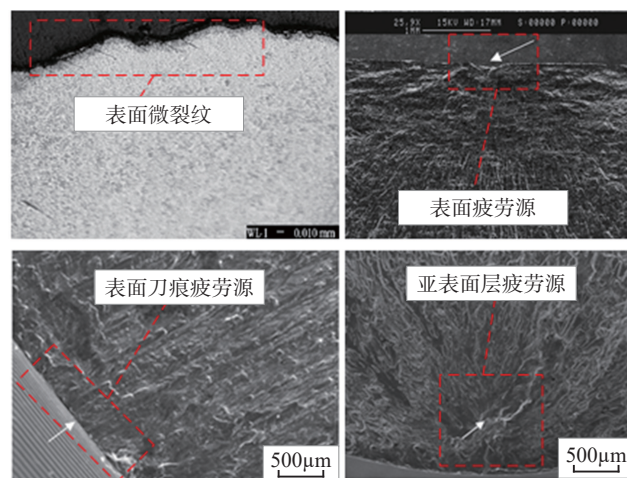


图3 零件疲劳破坏的典型起源  
Fig.3 Typical origin of fatigue destroy of parts

不同的表面粗糙度对零件的疲劳性能有明显的影响。一般认为,表面粗糙度越大,表面微观沟痕越深,局部应力集中越严重,导致零件抗疲劳破坏的能力越差<sup>[12-14]</sup>。例如,法国航空制造工程师学院的 Suraratchai 等<sup>[15]</sup>针对航空铝合金表面粗糙度对试件疲劳寿命的影响规律进行了有限元建模和试验验证<sup>[15]</sup>,结果表明,随着粗糙度数值的增大,试件的疲劳强度逐渐降低。Tarasov<sup>[16]</sup>对低强度钢进行试验研究,发现粗车相对于精磨后的疲劳极限会下降达 25%。Suhr<sup>[17]</sup>对高强度钢进行试验研究,发现在类似的情况下,其疲劳极限下降的幅度会更大。日本研究者 Itoga<sup>[18]</sup>对于高速钢的研究结果也说明了表面粗糙度对试件的疲劳寿命有较大的影响,如图 4 所示,其中 BF、R10、R16 和 R19 分别代表试件的表面粗糙度  $R_a$  为  $0.092\mu\text{m}$ 、 $1.386\mu\text{m}$ 、 $2.142\mu\text{m}$  和  $3.154\mu\text{m}$ 。随着表面粗糙度的增大,试件的疲劳强度逐渐降低,尤其是在低周疲劳的情况下。

国内的研究者针对表面粗糙度影响试件疲劳性能也进行了较多的研究。西北工业大学杨茂奎教授<sup>[19]</sup>研究了表面粗糙度对 GH4169 试件疲劳性能的影响规律,试验结果表明,常温状态下,表面粗糙度对 GH4169 疲劳寿命有显著的影响,表面粗糙度越大,疲劳寿命越低;  $650^\circ\text{C}$  高温状态下,因为加工表面残余应力的释放,致使表面粗糙度对试件疲劳性能的影响更为显著。西北工业大学任敬心教授<sup>[20]</sup>对高温合金材料磨削和车削加工后试件的疲劳寿命进行了研究,结果表明,粗糙度是影响试件疲劳性能的主要因素,较大的表面粗糙度造成较高的局部应力集中,导致了疲劳寿命的下降。Wang 等<sup>[21-22]</sup>分别研究了高温合金 GH4169 铣削和车削加工表面完整性对试件疲劳性能的影响规律和机理,结果表明,试件的疲劳性能随着表面粗糙度的增大而降低,而表面硬度和表面残余应力对试件的疲劳性能没有明显的影响。Yao 等<sup>[23]</sup>针对 TB6 钛合金表面粗糙度影响试件疲劳寿命进行了研究,结果表明,利用标准粗糙度系数能够更好地预测和反映表面粗糙度对试件疲劳寿命的影响规律,如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示。

由以上的成果可以得出,研究者普遍认为表面粗糙度影响试件疲劳寿命的本质原因是微观应力集中系数  $K_t$ ,  $K_t = 1 + 2\sqrt{\gamma \frac{R_z}{\rho}}$ , 其中  $\gamma$ 、 $R_z$ 、 $\rho$  与表面粗糙度及其曲线特征有关<sup>[12-15, 19-20, 22]</sup>。但是,  $\gamma$  和  $\rho$  的选择非常困难,尤其是在不同加工方式或加工条件下,一般选择  $\gamma=1$ ,  $\rho$  的数值也很难准确量化,因此,基本上忽略了不同加工方式形成的表面粗糙度曲线特征对  $K_t$  的影响<sup>[15, 24]</sup>, 得出表面粗糙度数值  $R_z$  越大,  $K_t$  就越大,试件的疲劳性能也就逐渐降低的结论<sup>[15, 23, 25-27]</sup>。

## 2.2 表面硬化对试件疲劳性能的影响

在机械加工过程中,加工表面硬化是工件表层金属受到切削力的作用,产生强烈的塑性变形,使金属的晶格严重扭曲,晶粒破碎、拉长和纤维化,从而阻碍金属进一步的变形,使工件表面硬度提高,塑性降低的一种现象。而在表面完整性的指标中,加工表面硬化是影响试件疲劳性能的主要因素之一。但是,针对加工硬化影响试件疲劳性能的研究结论并不统一,一般来说,表面加工硬化能够提高试件疲劳强度,不过在某些情况下,

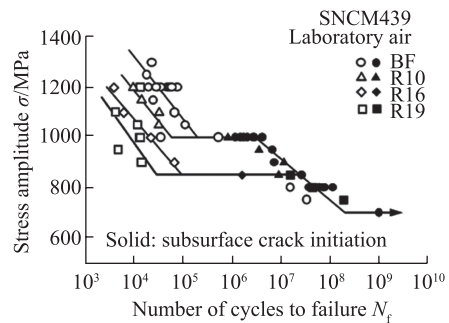
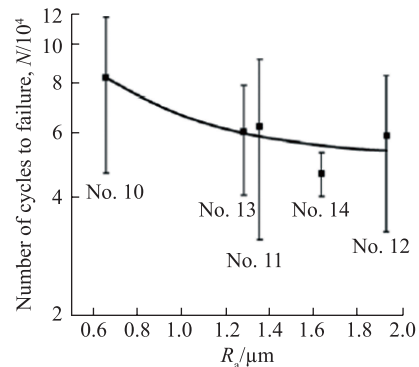
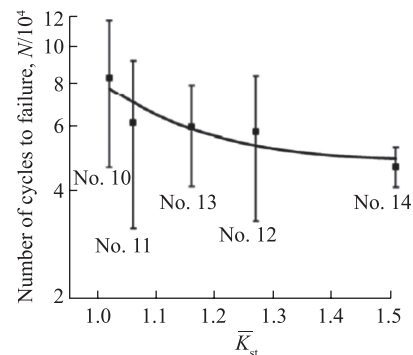


图4 表面粗糙度对试件疲劳寿命的影响  
Fig.4 Influence of surface roughness on fatigue life of specimens



(a) 表面粗糙度  $R_a$  对试件疲劳寿命的影响



(b) 标准粗糙度系数  $\bar{K}_{st}$  对试件疲劳寿命的影响

图5 表面粗糙度  $R_a$  和标准粗糙度系数  $\bar{K}_{st}$  对试件疲劳寿命的影响规律  
Fig.5 Influence of surface roughness and standard coefficient on fatigue life

尤其是在高温条件下,加工表面层被拉伸、纤维化金属组织的扩散能力增强,进而有可能使表面层承载能力降低,试件的疲劳强度反而会降低。

根据苏联的研究结论可知:针对不同的钛合金材料,表面加工硬化可以提高试件的疲劳强度,也可使其降低,具体情况受加工表面硬化深度和程度的影响。例如,当表面加工硬化率在14%~24%之间时,BT9钛合金试件在450°C条件下的疲劳强度会降低,表面硬化层的深度也会对试件的疲劳寿命有较大的影响。Nishida<sup>[28]</sup>通过试验得出结论:疲劳强度需要由残余压应力、细长表面微观结构和加工硬化共同作用才能得到提高。Josefson<sup>[29]</sup>指出,适度的表面加工硬化使试件表面产生塑性变形,屈服强度提高,硬度增加,阻止位错线向表面伸出,进而阻止已有裂纹的扩展和新裂纹的产生,提高零件的疲劳强度。美国西北大学Xie等<sup>[30]</sup>指出,大部分情况下,增大材料表面层的硬度(采用表面热处理方法)可以提高试件的低周疲劳性能。Suárez等<sup>[31]</sup>对超声波辅助端铣加工镍基718合金的研究结果表明,超声波辅助端铣加工能够提高试件的疲劳寿命,其主要原因是表面加工硬化抑制了试件表面裂纹萌生。另一方面,国内研究者<sup>[32]</sup>对高强度钢等材料的研究结果表明,加工表面硬化对试件的疲劳性能具有不利的影响,随着表面硬化率的增大,试件的弯曲疲劳性能大幅降低。

### 2.3 表面残余应力对试件疲劳性能的影响

加工表面残余应力是指机械加工后在工件内部保持自身平衡的一种内应力。在表面完整性指标中,加工表面残余应力无疑对试件的疲劳性能存在影响。早在20世纪中期,Henriksen<sup>[33]</sup>就对零件表面加工产生的残余应力进行了研究,他认为表面加工残余应力是影响零件疲劳性能的重要原因之一。其影响机理普遍认为是:残余应力与外加循环应力代数相加,将使表面层材料承受的载荷发生变化,如果使最大的循环载荷减小,则试件的疲劳强度就会提高<sup>[34]</sup>。依据此理论可得到:加工表面残余压应力可提高疲劳强度,而残余拉应力会降低疲劳强度。20世纪末,Suresh<sup>[35]</sup>提出当表面残余应力叠加到疲劳载荷上时,就会改变疲劳试验中的平均应力,从而影响试件的疲劳寿命。澳大利亚莱奥本大学的Javidi等<sup>[36]</sup>对不同刀尖半径( $r_e=0.2\text{mm}$ 、 $0.4\text{mm}$ 和 $0.8\text{mm}$ )和进给速度影响试件疲劳寿命的规律和机理进行了研究,研究结果表明,在给定试验条件下,加工表面残余应力是影响试件疲劳寿命的主要因素,其影响程度大于加工表面粗糙度,如图6所示。

日本的Sasahara<sup>[37]</sup>研究了45#钢车削加工表面完整性对试件疲劳性能的影响。结果表明,试件车削

加工表面的加工硬化和表面残余应力对试件疲劳性能起主导作用,而表面粗糙度 $R_y$ 在20~180 $\mu\text{m}$ 范围内变化时,对试件疲劳性能影响并不明显。鹿儿岛大学Kawagoishi等<sup>[38]</sup>研究了CBN磨削和电化学抛光两种加工方式对不同材料的疲劳寿命的影响,研究表明,室温下CBN磨削加工能在试件表面产生残余压应力,有效防止裂纹的产生和扩展,进而提高试件的疲劳强度,如图7所示。另外,法国的Souto-Lebel等<sup>[39]</sup>研究发现,通过改变加工工艺条件或刀具的几何参数能使加工后的表面残余应力得到改变,进而达到改变试件疲劳寿命的目的。

但是,针对加工表面残余应力对试件疲劳性能的影响规律及其机理的研究较为复杂。因为,在某些零件服役环境下,加工表面残余应力存在不同程度的释放,进而导致影响试件疲劳性能的程度存在极大的差别。例如,Ross<sup>[40]</sup>针对A-286合金车削试件的研究结果表明,在前期的10~100次交变载荷作用下,加工表面残余应力的释放占其整个释放程度的绝大部分,并且,随着交变载荷的增大,试件加工表面残余应力的整体释放比例会随之增大。Holzapfel等<sup>[41]</sup>研究了喷丸处理后的AISI 4140试件在不同温度和交变载荷条件下的表面残

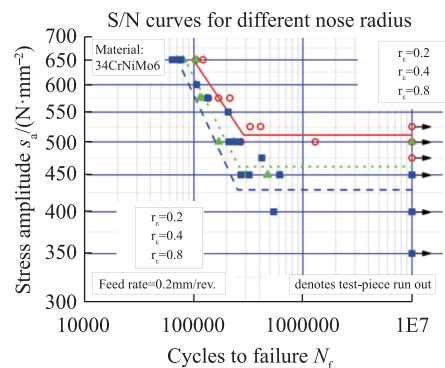


图6 澳大利亚Javidi等的研究结果  
Fig.6 Research results of Javidi

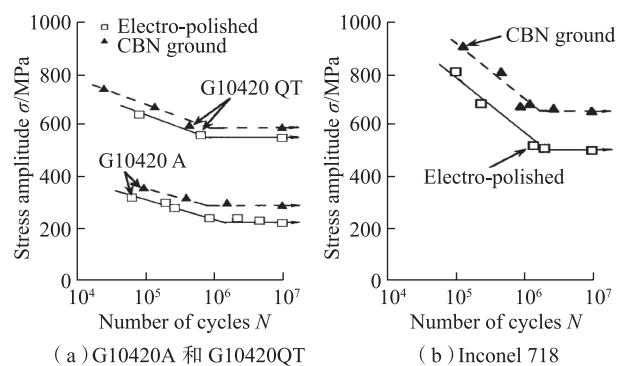


图7 不同的加工方式对不同材料疲劳寿命的影响  
Fig.7 Effect of different processing methods on fatigue life of different materials

余应力释放规律。结果发现,随着环境温度和交变载荷的提高,试件的表面残余应力的释放程度和速度都随之加快。Kim 等学者<sup>[42]</sup>研究了喷丸处理后的中碳钢在高、低周疲劳循环测试下表面残余应力的释放程度,发现在试件承受较大的循环载荷时(试件低周疲劳循环测试时),试件表面残余应力在极短的时间内( $10^3$ 次交变载荷循环后)就可能释放 60% 以上。

### 3 分析及结论

总结和分析以上加工表面完整性各指标对试件疲劳性能的影响规律和机理的研究成果,可以得到以下几点:

(1) 一般情况下,表面粗糙度对试件的疲劳性能有较大的影响,随着表面粗糙度数值的减小,表面微观应力集中系数逐渐减小,从而导致试件的疲劳性能逐渐提高。

但是,根据应力集中现象研究表面微观几何形貌对试件疲劳性能影响规律这一理论,来研究实际零件加工表面完整性对试件疲劳性能的影响规律时存在较大局限性,这是因为在车削、铣削、磨削,甚至表面强化加工过程中,表面材料经过高应变率的塑性变形,其表面材料的力学性能、晶粒组织形态也发生了很大的变化。当试件整体受到外加疲劳载荷作用时,表面层材料和基体材料在一定条件下会形成不同的受力状态,这些不同也会对试件的疲劳性能产生影响。

此外,尽管不同的加工方式、不同的刀具或砂轮,在一定的工艺条件下可以得到相同表面粗糙度数值的加工表面,如图 8 所示,但试件疲劳寿命也可能差别很大。因为这种情况下,表面粗糙度曲线的特征及其影响因素可能对试件的疲劳性能有更大的影响。从另一方面来说,在不同的加工方式下,虽然表面粗糙度的数值变化较大,但是,如果其曲线特征对试件疲劳寿命的影响才是主导因素,此时,即使表面粗糙度数值在较大的范围内变化,也依然不会对试件的疲劳性能产生较大的影响。因此,可以针对不同加工方式在不同刀具或砂轮状态下形成的表面粗糙度曲线特征对试件疲劳寿命的影响规律进行充分研究。这方面的研究成果对我国航空工业领域内零件加工方式和刀具状态的选择也是极为重要的。

(2) 表面加工硬化对试件疲劳性能也存在较大的影响,但是针对不同的加工工艺和试件材料,其影响规律相差较大,因此并没有一个统一认识和评价标准。一般来说,表面加工硬化能够提高试件疲劳强度,不过在某些情况下,尤其是在高温条件下,加工表面层被拉伸、纤维化的金属组织的扩散能力增强,进而有可能使表面层

载能力降低,试件的疲劳强度反而会降低。但这些研究结果都是直接从加工表面硬化指标与试件疲劳性能的关系出发的,并没有从加工硬化形成的本质原因出发。

从形成机理来看,加工表面硬化是加工表面材料产生剧烈塑性变形、微观组织纤维化的结果。而表面材料组织的纤维化会改变表层金属晶粒内部沿晶界方向上的受力,并且能够使表面材料组织细化。因此,不同的加工表层组织纤维化程度及其方向也可能会对试件的疲劳性能产生不同的影响。所以研究加工表面组织纤维化及方向对试件疲劳性能的影响规律及其机理可以更直接地反映加工表面塑性变形对试件疲劳性能的影响程度,进而代替加工表面硬化的研究。

(3) 加工表面残余应力可以改变试件承载条件下的表面最大载荷,从而影响试件的疲劳性能。一般情况下,表面残余压应力可以提高试件的疲劳性能,而残余拉应力会降低试件的疲劳性能。

但是,针对机械加工表面残余应力对试件疲劳性能的影响机理和程度还存在许多需要进一步完善的地方,尤其是机械加工表面残余应力在零件不同服役环境下,对零件疲劳性能的影响作用究竟有多大? 不同加工方

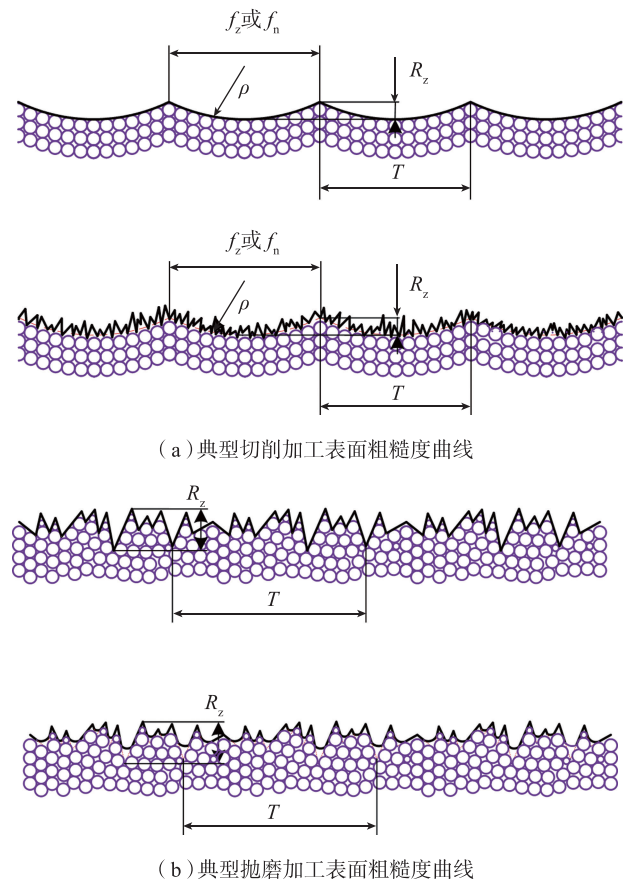


图8 典型表面粗糙度曲线及其工具磨损的影响

Fig.8 Typical curves of surface roughness and influence on tool wear

式形成的表面残余应力对提升零件疲劳性能的作用和程度是否相同? 这些问题及其相应的影响机理仍需要根据不同的材料、工作环境、承载情况进行针对性的深入研究。

(4) 针对加工表面完整性影响试件疲劳性能的机理研究缺乏一个多因素综合分析模型, 以上的研究基本上都是单独分析其中一个指标对试件疲劳性能的影响规律, 而且以表面粗糙度和加工表面残余应力为主。然而, 加工表面完整性影响零件疲劳性能是各指标综合作用的结果, 虽然在机理研究时可以将其解耦单独分析, 但是最终还需将各指标的影响进行综合分析, 建立表面完整性关键指标的多因素综合分析模型。

综上所述, 机械加工表面完整性对零件疲劳性能的影响规律和机理还需要进一步完善和丰富, 这样才能更好地指导零件的实际生产加工, 推动抗疲劳加工技术在机械制造领域内更广泛的应用。

### 参考文献

- [1] 陶春虎. 航空发动机转动部件的失效与预防 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
TAO Chunhu. Failure and prevention of rotating parts of aero-engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [2] 穆志韬. 直升机结构疲劳 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
MU Zhitao. Fatigue of helicopter structures [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [3] FIELD M, KAHLES J F. The surface integrity of machined-and ground high-strength steels[J]. DMIC Report, 1964, 210: 54-77.
- [4] FIELD M, KAHLES J F, CAMMETT J N T. Review of measuring methods for surface integrity[J]. CIRP, 1972, 21(2): 219-238.
- [5] JAWAHIR I S, BRINKSMIEIER E, M"SAOUBI R, et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 603-626.
- [6] SUN J, GUO Y B. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 4036-4042.
- [7] LI W, GUO Y B, BARKEY M E. Tool wear influence on surface integrity and fatigue life of hard milled surfaces[C]//ASME/STLE 2011 International Joint Tribology Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [8] HUGHES J I, SHARMAN A R C, RIDGWAY K. The effect of cutting tool material and edge geometry on tool life and workpiece surface integrity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(2): 93-107.
- [9] LI W, GUO Y B, BARKEY M E. Effect tool wear during end milling on the surface integrity and fatigue life of Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 546-551.
- [10] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(3): 250-280.
- [11] 任敬心, 黄奇. 加工表面粗糙度对高温合金材料 GH33A 疲劳寿命的影响 [J]. 航空制造技术, 1993, 36(5): 2-7.  
REN Jingxin, HUANG Qi. The influence of machined surface roughness on fatigue life of high temperature alloy GH33A[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1993, 36(5): 2-7.
- [12] MAIYA P S, BUSCH D E. Effect of surface roughness on low-cycle fatigue behavior of type 304 stainless steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1975, 6(9): 1761-1766.
- [13] 肖维灵, 陈海波, 殷琰. 表面粗糙度对 Glidcop 和 Q345 低周疲劳寿命影响的试验研究 [J]. 实验力学, 2014, 29(4): 417-425.  
XIAO Weiling, CHEN Haibo, YIN Yan. Experimental study of surface roughness effect on low cycle fatigue life of Glidcop and Q345[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4): 417-425.
- [14] 朱莉娜, 邓彩艳, 王东坡, 等. 表面粗糙度对 Ti-6Al-4V 合金超高周疲劳性能的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(5): 583-591.  
ZHU Lina, DENG Caiyan, WANG Dongpo. Effect of surface roughness on very high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 52(5): 583-591.
- [15] SURARATCHAI M, LIMIDO J, MABRU C, et al. Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(12): 2119-2126.
- [16] TARAPOV L P. Effects of grinding direction and of abrasive tumbling on the fatigue limit of hardened steel[C]//American Society for Testing Materials. New York, 1958.
- [17] SUHR R W. The effect of surface finish on high cycle fatigue of a low alloy steel[C]//EGF1. London: Mechanical Engineering Publications, 2013.
- [18] ITOGA H, TOKAJI K, NAKAJIMA M, et al. Effect of surface roughness on step-wise S-N characteristics in high strength steel[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(5): 379-385.
- [19] 杨茂奎, 任敬心. 加工表面完整性对 GH4169 高温合金疲劳寿命的影响 [J]. 航空精密制造技术, 1996(6): 28-31.  
YANG Maokui, REN Jingxin. The effects of grinding surface integrity on fatigue life of superalloy GH4169[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996(6): 28-31.
- [20] 任敬心, 黄奇, 张智龙, 等. 机械加工表面完整性对高温合金材料 GH33A 疲劳寿命的影响 [J]. 航空制造技术, 1991, 34(5): 2-5.  
REN Jingxin, HUANG Qi, ZHANG Zhilong, et al. The influence of machined surface integrity on fatigue life of nickelbase superalloy GH33A[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1991, 34(5): 2-5.
- [21] WANG X, HUANG C Z, ZOU B, et al. Experimental study of surface integrity and fatigue life in the face milling of Inconel 718[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(2): 1-8.
- [22] 武导侠, 张定华, 姚倡锋. GH4169 高温合金车削表面完整性对疲劳性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 59-67.  
WU Daoxia, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng. Effect of surface integrity of GH4169 superalloy on fatigue performance[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 59-67.
- [23] YAO C F, WU D X, JIN Q C, et al. Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 650-660.
- [24] AROLA, D, WILLIAMS C L. "Estimating the fatigue stress

concentration factor of machined surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 923-930.

[25] 杨东. 基于长疲劳寿命的钛合金 Ti6Al4V 铣削加工表面完整性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.

YANG Dong. Milling induced surface integrity and its influence on fatigue life of the titanium alloy Ti-6Al-4V[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[26] AROLA D, WILLIAMS C L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 923-930.

[27] 章刚. 表面粗糙度对表面应力集中系数和疲劳寿命影响分析 [J]. 机械强度, 2010, 32(1): 110-115.

ZHANG Gang. Effect of roughness on surface stress concentration factor and fatigue life[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(1): 110-115.

[28] NISHIDA S I, ZHOU C, HATTORI N, et al. Fatigue strength improvement of notched structural steels with work hardening[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 468-470: 176-183.

[29] JOSEFSON B L, STIGH U, HJELM H E. A nonlinear kinematic hardening model for elastoplastic deformations in grey cast iron[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, 117(2): 145-150.

[30] XIE L, PALMER D, OTTO F, et al. Effect of surface hardening technique and case depth on rolling contact fatigue behavior of alloy steels[J]. Tribology Transactions, 2015, 58(2): 215-224.

[31] SUÁREZ A, VEIGA F, LÓPEZLACALLE L N, et al. Effects of ultrasonics-assisted face milling on surface integrity and fatigue life of Ni-Alloy 718[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25(11): 5076-5086.

[32] 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 Yanchen, PANG Siqin, WANG Xibin, et al. Experimental study on effect of surface integrity on high-strength steel fatigue life[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(6): 759-764.

[33] HENRIKSEN E K. Residual stresses in machined surfaces [J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1951, 73: 69-76.

[34] CHOI Y. Influence of rake angle on surface integrity and fatigue performance of machined surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 81-88.

[35] SURESH S. Fatigue of materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

[36] JAVIDI A, RIEGER U, EICHLSEDER W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10-11): 2050-2055.

[37] SASAHARA H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(2): 131-136.

[38] KAWAGOISHI N, CHEN Q, KONDO E, et al. Influence of cubic boron nitride grinding on the fatigue strengths of carbon steels and a nickel-base superalloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1999, 8(2): 152-158.

[39] SOUTO-LEBEL A, GUILLEMOT N, LARTIGUE C, et al. Characterization and influence of defect size distribution induced by ball-end finishing milling on fatigue life[J]. Procedia Engineering, 2011,

19(1):343-348.

[40] ROSS A S, MORROW J D. Cycle-dependent stress relaxation of A-286 alloy[J]. Journal of Fluids Engineering, 1960, 82(3): 654-658.

[41] 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.

[42] KIM J C, CHEONG S K, NOGUCHI H. Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 56: 114-122.

通讯作者: 李勋, 博士, 副教授, 研究方向为高性能材料先进加工技术及表面完整性, E-mail: lixun@buaa.edu.cn。

(责编 铃兰)

(上接第95页)

[3] 王海艳. 难加工材料螺旋铣孔动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

WANG Haiyan. Study on dynamics in helical milling of difficult-to-cut materials[D]. Tianjing: Tianjing University, 2012.

[4] HE G Y, LI H, JING Y D. Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters[J]. Transactions of Tianjin University, 2015, 21(1): 56-63.

[5] 陆翠. CFRP/Ti-6Al-4V 叠层结构螺旋铣孔过程工艺优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

LU Cui. The optimization research on helical milling of CFRP/Ti6Al4V stacks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[6] KHAN Z A, KAMARUDDIN S, SIDDIQUEE A N. Feasibility study of use of recycled high density polyethylene and multi response optimization of injection moulding parameters using combined grey relational and principal component analyses[J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 2925-2931.

[7] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.

[8] AI H, PAN H. Research on application of grey relevance theory in teaching evaluation[C]// 3rd International Conference on Education, Management and Computing Technology (ICEMCT 2016). Paris: Atlantis Press, 2016.

[9] 张敏, 黎向锋, 左敦稳. 基于主成分分析的 BP 神经网络内螺纹冷挤压成形质量预测 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(1): 51-54.

ZHANG Min, LI Xiangfeng, ZUO Dunwen. Forming quality forecast for internal threads formed by cold extrusion based on principal component analysis and neural networks[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(1): 51-54.

[10] LU H S, CHANG C K, HWANG N C, ET AL. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3808-3817.

通讯作者: 高延峰, 博士, 副教授, 研究方向为焊接自动化, E-mail: gaoyf@nchu.edu.cn。

(责编 铃兰)