

结构应力集中和表面完整性对 17-4PH 钢轴向疲劳性能的影响 *

王 欣¹, 胡云辉², 曾惠元², 钟 平³, 汤智慧¹, 宋颖刚¹

(1. 北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空重点实验室, 北京 100095; 2. 西安航空发动机(集团)有限公司 研制中心, 西安 430012; 3. 北京航空材料研究院 第三研究所, 北京 100095)

摘 要: 结构因素和加工方式对零件疲劳性能具有重要的影响。采用车削、磨削和喷丸等方法改变光滑($K_t=1$)和缺口($K_t=2$)两种结构应力集中状态试样的表面完整性, 表征了 6 种应力集中和表面完整性状态下 17-4PH 沉淀硬化不锈钢的高频轴向疲劳应力寿命曲线, 并研究了表面残余应力和表面粗糙度等表面完整性参数。将光滑车削状态的疲劳极限作为基线。结果表明: 在光滑条件下, 磨削、车削喷丸和磨削喷丸后疲劳极限较基线分别提高 18.1%, 21.4% 和 26%; 而在缺口条件下, 相比于基线, 磨削疲劳极限下降了 20.8%, 喷丸后的疲劳性能较磨削提高 25.9%。车削、磨削、车削喷丸和磨削喷丸后粗糙度分别为 1.733、0.819、2.251 和 2.228 μm 。结构应力集中状态对于疲劳性能的影响大于表面完整性, 但对于确定的结构, 表面完整性对于疲劳性能亦有重要影响。

关键词: 结构应力集中; 表面完整性; 疲劳性能; 喷丸

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9269(2016)02-0111-06

Effects of Structural Stress Concentration and Surface Integrity on Axial Fatigue Property of 17-4PH Steel

WANG Xin¹, HU Yun-hui², ZENG Hui-yuan², ZHONG Ping³, TANG Zhi-hui¹, SONG Ying-gang¹

(1. Aviation Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection on Aviation Materials, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095; 2. Manufacturer Center, Xi'an Aero-engine (Group) LTD., Xi'an 430012; 3. Laboratory 3, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095)

Abstract: Structure factor and meehining process have important effects on the fatigue property. Turning, grinding and shot peening were applied to specimens of two structural stress concentration conditions (smooth; stress concentration coefficient $K_t=1$, notched; $K_t=2$) to introduce different surface integrity. Axial fatigue S-N curves of 17-4PH steel on six structural stress concentration and surface integrity conditions were characterized; moreover, the surface residual stress and roughness were tested. The smooth turning condition was chosen as the baseline. The results show that on the smooth condition, fatigue limits of grinding, turning-peening and grinding-peening increase 18.1%, 21.4% and 26%, respectively, compared with the baseline. However, in contrast on the notched condition, the fatigue limit of grinding decreases by 20.8% compared with the baseline. Moreover, the fatigue property after grinding-peening increase 25.9% in comparison of grinding. The surface roughnesses R_a after turning, grinding, turing-peening and grinding-peening are 1.733, 0.819, 2.251 and 2.228 μm , respectively. The effects of structural stress concentration on fatigue performance are greater than that of surface integrity. However, surface integrity also has an important influence on fatigue for the certain structure.

Keywords: structural stress concentration; surface integrity; fatigue property; shot-peening

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2016-01-27; 基金项目: * 航空科学基金(2015ZF21017); 中国航空工业集团公司创新基金(2013E62137R)

通讯作者: 王欣(1983—), 男(汉), 工程师, 硕士; 研究方向: 抗疲劳的表面改性技术; Tel: (010) 6249 6450; E-mail: Rasheed990918@163.com

网络出版日期: 2016-04-13 11-27; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160413.1127.006.html>

引文格式: 王欣, 胡云辉, 曾惠元, 等. 结构应力集中和表面完整性对 17-4PH 钢轴向疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 111-116. WANG X, HU Y H, ZENG H Y, et al. Effects of structural stress concentration and surface integrity on axial fatigue property of 17-4PH steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 111-116.

0 引言

疲劳是交变载荷服役零件的主要失效模式。以航空发动机为例,从 60 年代中期至 90 年代中期影响较大的 14 起重复出现 3 次以上的转动部件失效事件中有 13 起是由疲劳断裂引起的^[1],造成了重大的经济损失。部件的疲劳强度与设计、材料和制造息息相关。可以预见,当零件设计存在有孔、槽、键等应力集中结构时,该零件疲劳性能就相对薄弱,而应力集中结构为该零件的疲劳薄弱部位。许多发动机都曾发生过应力集中部位的疲劳开裂,如某三级低压压气机叶片销钉孔出现疲劳裂纹^[2]及某型机篦齿盘均压孔多次出现裂纹等^[3],说明结构应力集中对于疲劳性能具有重要影响。

在选材上,随着航空航天等高端装备对“状态”要求日益提高,许多新兴高强度材料得到了应用,而这些材料多存在所谓应力集中敏感性问题^[4-5]。如某型超高强度钢室温拉伸强度可达到 1 800 MPa 以上;当室温、轴向、应力比为-1,应力集中系数 $K_t=1$ 时,疲劳强度为 890 MPa;而 $K_t=3$ 时疲劳强度为 415 MPa,不到 $K_t=1$ 时的一半; $K_t=5$ 疲劳强度为 215 MPa,不到 $K_t=1$ 时的 25%^[6],可见高应力集中条件下,高强度材料的疲劳强度也将显著下降。因此,若高强度材料部件存在应力集中结构时,对其疲劳强度给予特别关注。

制造是文中研究主要关注的内容。在零件制造过程中,最终加工工序决定零件的表面完整性,对零件的服役性能具有重大的影响。早在上世纪 70 年代,美国空军材料实验室的加工数据手册^[7]明确说明,要求通过控制最终加工工序参数以保障表面完整性,甚至对加工后的表面残余应力状态也提出了要求,说明制造过程对零件表面完整性和疲劳性能具有重要影响。近年来,许多学者开展了制造过程的表面完整性和疲劳性能研究。

组织研究方面,宋颖刚等^[8]分析了 GH4169 合金喷丸后的组织状态,喷丸能够形成约 1.2 mm 厚的弹塑性变形层,晶粒内部的变形是位错和孪晶共同作用的结果;最终加工工序研究方面,李占明等^[9]研究了铣削和磨削以及喷丸对于 30CrMnSiNi2A 试样疲劳性能的影响,认为喷

丸可以提高铣削试样的疲劳性能,但对磨削试样无明显抗疲劳强化效果;在疲劳过程研究方面,吴益文等^[10]研究了 40Cr 钢疲劳过程中组织的变化过程,并推导了位错增殖和疲劳循环周次的数值关系。前面的文献多为表面完整性与制造方法的关联性研究,而关于结构应力集中与制造方法的关联性研究相对较少。

文中以发动机和地面燃机的重要材料 17-4PH 不锈钢作为研究对象,侧重研究结构应力集中与表面完整性的交互关系,及其对疲劳性能的影响,通过对比分析多种状态下的疲劳性能增益曲线,提出提高构件疲劳性能的方法,为结构设计和制造技术提供参考。

1 材料与工艺

试样由 17-4PH 不锈钢棒材下料加工后得到,力学性能如表 1 所示。

表 1 17-4PH 不锈钢棒材的力学性能
Table 1 Mechanical properties of the 17-4PH steel bar
($w/\%$)

Temperature/ ℃	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5	ψ
20	1 374	1 250	14.7	56.3

在棒材上长度方向取样,按照图 1 加工。在试样工作段的最小截面上,车削转速 2 000 r/min,切削深度 0.3 mm,进给量 0.3 mm/min;在试样工作端磨削方面,光滑试样采用外圆磨削,缺口试样采用螺纹磨削,两种磨削方法切削深度一致,均为 0.15 mm。

喷丸采用铸钢弹丸 S110,喷丸强度 0.20~0.28 mmA,喷丸过程符合 HB/Z 26—2011。由于条件限制,缺口试样未采用仿形车刀加工,因此不研究车削缺口试样疲劳性能。应说明的是:图 1(a)(b)两种试样在工作端截面尺寸是一致的,均为 $\Phi 5$ mm。

试样按不同应力集中和表面状态进行分组,为方便表述,每种状态英文标注方式为:加工方式英文首字母+结构应力集中系数,如光滑车削状态标注为 T1(车削, $K_t=1$),光滑车削喷丸状态标注为 TP1(车削喷丸, $K_t=1$),光滑磨削状态标注为 G1(磨削, $K_t=1$),依此类推,见表 2。

采用 Taylor 型针扫描式轮廓仪对 T1、G2、

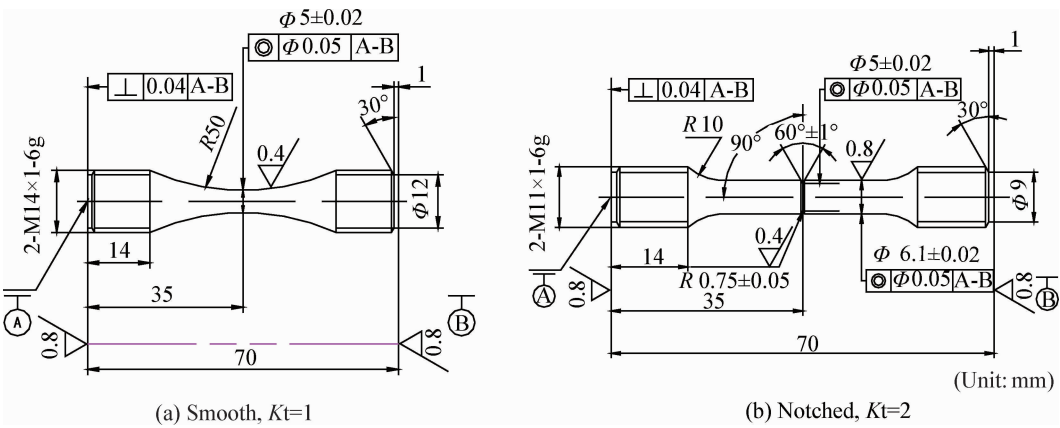


图 1 光滑与缺口轴向疲劳试样示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the smooth and notched axial fatigue specimens

表 2 试样的应力集中、表面完整性与状态编号

Table 2 Stress concentration (SC), surface integrity (SI) and state number of the samples

State No.	SC, Kt	Turning	Grinding	Peening
T1	1	✓		
G1	1		✓	
TP1	1	✓		✓
GP1	1		✓	✓
G2	2		✓	
GP2	2		✓	✓

TP1 和 GP1 共 4 种状态进行表面粗糙度表征,选取一件试样在不同位置测试 3 次粗糙度,取平均值。采用 X-3000 型 X 射线衍射残余应力测试仪对每种状态试样进行表面残余压应力表征,测试 3 件试样取平均值,采用 Cr K α 靶,管电流 6 mA,管电压 30 kV,测试过程符合 GB/T 7704-2008。由于条件限制,未进行缺口试样的表面完整性表征。

采用高频疲劳试验机,按照 HB 5287-1996 的方法,表征了每种状态的室温疲劳寿命增益曲线,频率为 100 Hz,应力比 $R=-1$ 。

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度

表面粗糙度参数是表面完整性的重要指标。T1,TP1,G1 和 GP1 共 4 种状态下的表面平均粗糙度 R_a 如表 3 所示。由表 3 可知,车削后表面粗糙度 R_a 为 1.733 μm ,磨削后 R_a 为 0.819 μm ,而无论原始状态时车削还是磨削,喷丸后表面粗糙度达到了 2.0 μm 以上。这说明,当喷丸前表

面粗糙度较小($<2.0 \mu\text{m}$)时,按照文中参数,喷丸的表面粗糙度仅与喷丸工艺方法有关,与喷丸前基体状态的表面粗糙度无关。

表面粗糙度也是表征表面加工应力集中系数的重要参数。在其他粗糙度参数一定的情况下,疲劳性能随着表面粗糙度的上升而下降。在本研究中,相比于车削的基线状态,磨削后表面粗糙度有明显的下降,在不考虑其他因素(烧伤、组织变化等)的情况下,对疲劳性能具有积极的影响;而喷丸后表面粗糙度上升是一种“可能”的疲劳弱化作用,因为在粗糙度上升的同时,喷丸引入的半球型弹坑对疲劳性能具有一定的强化作用,粗糙度上升和圆滑弹坑的竞争结果将决定着喷丸产生的表面轮廓变化对构件疲劳的影响程度^[11-12]。

表 3 4 种表面完整性状态的表面粗糙度

Table 3 Surface roughness of the four SI conditions

Remark	$R_{a1}/\mu\text{m}$	$R_{a2}/\mu\text{m}$	$R_{a3}/\mu\text{m}$	Average/ μm
T1	1.670	1.565	1.849	1.733
G1	0.875	0.812	0.769	0.819
TP1	2.203	2.215	2.335	2.251
GP1	2.316	2.208	2.159	2.228

2.2 表面残余应力

可以预见,当疲劳裂纹在最表面萌生时,表面残余应力将对疲劳性能具有重要影响。表 4 为 T1,TP1,G1 和 GP1 共 4 种状态下表面残余应力的表征情况。由表 4 可得:车削后表面残余应力呈拉应力状态,而磨削和喷丸后表面残余压

应力为压应力,且喷丸残余应力数值明显大于磨削,该结果与众多研究^[13]结果相符。应该指出的是,无论前道工序是磨削还是车削,喷丸后表面残余应力基本一致(TP1 和 GP1)。

表 4 4 种表面完整性状态的表面残余应力

Table 4 Surface residual stress (SRS) of the four SI conditions

Remark	SRS ₁ / MPa	SRS ₂ / MPa	SRS ₃ / MPa	Average / MPa
T1	323.6	412.3	350.9	363.3
G1	-205.6	-252.7	-192.8	-217.0
TP1	-535.3	-560.1	-610.2	-568.3
GP1	-570.9	-591.5	-581.2	-581.2

2.3 疲劳性能

图 2、3 和 4 分别为结构应力集中系数 $K_t=1$ 车削(T1)和车削喷丸(TP1)、磨削(G1)和磨削喷丸(GP1)以及 $K_t=2$ 的磨削(G2)和磨削喷丸(GP2)等表面完整性状态下 17-4PH 不锈钢的疲劳曲线。每条曲线采用 30 件试样进行,每件试样的疲劳试验应力和寿命在图中表现为一个点。采用 HB 5287 中的升降法计算得到的 6 种表面完整性和应力集中状态下的疲劳极限如表 5 所示。同时,表 5 给出了喷丸对于疲劳性能的影响,可知:① 无论是车削还是磨削状态,喷丸后都能提高疲劳极限;② 对于光滑状态,车削后喷丸对于疲劳性能提高幅度大于磨削后喷丸;③ 喷丸对于缺口磨削状态的疲劳极限的增益效果最大,达到了 25.9%。

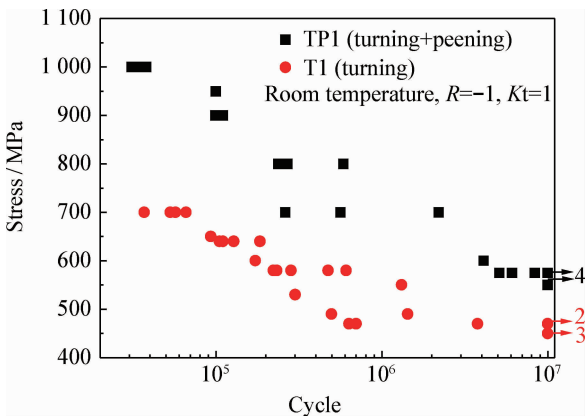


图 2 车削和车削喷丸条件下 17-4PH 钢的疲劳曲线 ($K_t=1$)

Fig. 2 Fatigue curves of 17-4PH steel on turing and turing+peening condition when $K_t=1$

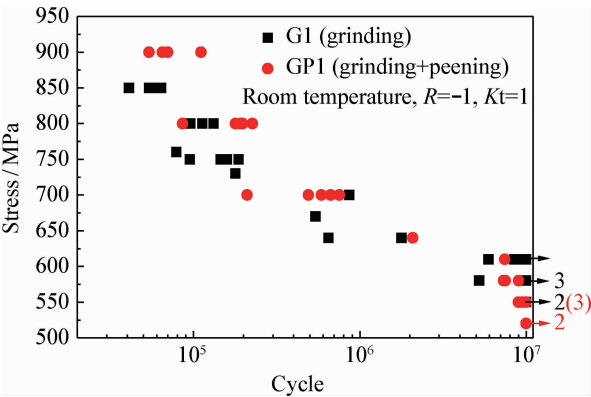


图 3 磨削和磨削喷丸条件下 17-4PH 钢的疲劳曲线 ($K_t=1$)

Fig. 3 Fatigue curves of 17-4PH steel on grinding and grinding+peening condition when $K_t=1$

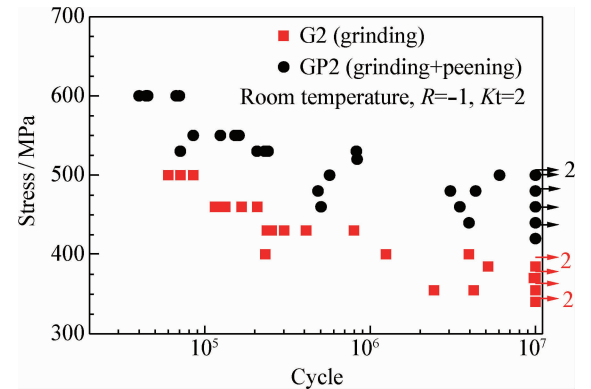


图 4 磨削和磨削喷丸条件下 17-4PH 钢的疲劳曲线 ($K_t=2$)

Fig. 4 Fatigue curves of 17-4PH steel on grinding and grinding+peening condition when $K_t=2$

表 5 6 种应力集中和表面完整性状态下的疲劳极限

Table 5 Fatigue limit of six conditions on SC and SI

State No.	Fatigue limit/MPa	Compared with T1/%	Peening gain/%
T1	468		
G1	553	18.1	
TP1	568	21.4	21.4(with T1)
GP1	590	26.0	6.6(with G1)
G2	371	-20.8	
GP2	467	-0.3	25.9(with G2)

由于开展的疲劳试验数据较多,可以对疲劳性能进行结构应力集中和表面完整性等两个维度的对比分析。由于研究的最终加工工艺确定,因此表面完整性与最终加工工艺密切相关。

首先,在一个结构应力集中条件下分析不同表面完整性对于疲劳性能的影响。当试样为光滑结构时,疲劳极限从低到高分别为车削、磨削、车削喷丸和磨削喷丸。观察车削组,可以看出喷丸可以显著提高车削后的疲劳性能,提高幅度达到 21%。由于车削后表面相对粗糙,且存在表面残余拉应力,可以认为,对于光滑结构,当试样(或零件)的表面完整性状态不佳时,喷丸可以显著提高其疲劳性能。观察磨削组,喷丸对于磨削后 17-4PH 钢疲劳性能提高非常有限(小于 7%),认为磨削后表面状态较好,表面粗糙度小且存在数值较小的残余压应力,因此对于光滑结构,当 17-4PH 钢的表面完整性状态良好时,喷丸工序对于疲劳性能的影响不大。然而,许多学者^[14-16]在对钛合金 TC4、结构钢进行研究时发现:喷丸一样能够大幅提高光滑磨削试样的疲劳性能,在这一点上,文中的研究不具备一般性代表意义。

对于缺口结构,磨削后进行喷丸强化可以显著提高其疲劳抗力,提高幅度接近 25.9%,远高于光滑结构磨削喷丸的提高幅度,这说明,应力集中结构应用喷丸强化技术可以更大幅度提高疲劳性能。特别应该指出的是,在缺口结构磨削喷丸后的疲劳极限与光滑结构车削后很接近,这说明喷丸“消除”了应力集中对于疲劳性能的不利影响。该结果在 TC4 钛合金喷丸技术研究时也得到了重现^[17]。

其次,对比在相同表面完整性条件下应力集中的影响发现:应力集中的影响是决定性的。从 $K_t=1$ 变化到 $K_t=2$,磨削状态的疲劳极限下降了 33%,磨削喷丸状态的疲劳极限下降了 21%。说明结构应力集中的增大将使得疲劳性能显著下降。

应力集中结构是影响构件疲劳性能的重要因素,也是众多零件破坏的起源^[1]。由于设计需要,许多构件不可避免地存在沟、键、槽等应力集中结构。文中的研究说明,对于上述结构应特别重视其疲劳性能,同时,可以合理应用适宜参数的表面强化技术保障或提高其疲劳性能以达到构件安全服役目的。

3 结 论

(1) 应力集中系数从 $K_t=1$ 变化到 $K_t=2$,

磨削状态的疲劳极限下降了 33%,磨削喷丸状态的疲劳极限下降了 21%。说明结构应力集中的增大将使得疲劳性能显著下降。

(2) 对于光滑试样,磨削和车削喷丸疲劳极限较车削分别提高 18.1%和 21.4%,磨削后喷丸疲劳性能仅较磨削提高 7%;对于 $K_t=2$ 的缺口试样,磨削后喷丸疲劳性能较磨削提高 25.9%,达到光滑试样车削疲劳极限。说明最终加工工艺和表面完整性对疲劳性能也具有重要影响,并且对于存在应力集中的结构,适宜参数的喷丸是提高其疲劳极限的重要手段。

参考文献

- [1] 陶春虎,钟培道,王仁智,等.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,2008:6-7.
TAO C H, ZHONG P D, WANG R Z, et al. Failure analysis and prevention for rotor in aero-engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 6-7 (in Chinese).
- [2] 张贵斌,杨俊,郭兵校,等.低压三级转子叶片销钉孔断裂分析[J].失效分析与预防,2013,8(4):254-258
ZHANG G B, YANG J, GUO B J, et al. Failure analysis for pin hole of low-pressure the 3rd stage rotor blade[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(4): 254-258 (in Chinese).
- [3] 郑旭东,蔚夺魁.某发动机高压压气机篦齿盘均压孔孔边裂纹故障分析[J].航空发动机,2013,39(3):49-54.
ZHENG X D, WEI D K. Study of vent hole crack failure for an aeroengine labyrinth seal disk[J]. Aero-engine, 2013, 39(3): 49-54 (in Chinese).
- [4] 赵振业.高强度合金的应用与抗疲劳制造[J].功能材料信息,2009,6(2):1-2.
ZHAO Z Y. Applianse of high strength alloy and anti-fatigue manufactor [J]. Functional Material Information, 2009, 6(2): 1-2 (in Chinese).
- [5] 赵振业.高强度合金抗疲劳应用技术研究与发展[J].中国工程科学,2005,7(3):90-93.
ZHAO Z Y. Research and development of anti-fatigue appliance technology on high strength alloy[J]. Engineering Science, 2005, 7(3): 90-93 (in Chinese).
- [6] 《中国航空材料手册》编辑委员会.航空材料手册第一卷:结构钢、不锈钢[M].第二版.北京:中国标准出版社,2002.
EDITORIAL COMMITTEE of CHINA AERONAUTICAL MATERIALS HANDBOOK. China aeronautical materials handbook volumn one: structural steel, stainless steel[M]. 2nd edition. Beijing: China Standard Press, 2002 (in Chinese).
- [7] KOSTER W P, FIELD M, FRITZ L J. Surface integrity of machined structural components[R]. AFML-TR-70-

- 11, 1970.
- [8] 宋颖刚, 高玉魁, 陆峰, 等. GH4169 喷丸强化层组织结构研究[J]. 金属热处理, 2010, 35(9): 94-97.
- SONG Y G, GAO Y K, LU F, et al. Investigation of microstructure of GH4169 alloy surface layer after shot peening[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(9): 94-97 (in Chinese).
- [9] 李占明, 朱有利, 黄元林, 等. 喷丸强化后 30CrMnSiNi2A 钢表面完整性对其抗疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 85-89.
- LI Z M, ZHU Y L, HUANG Y L, et al. Influence of surface integrity on fatigue resistance of the 30CrMnSiNi2A steel after shot peening[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(5): 85-89 (in Chinese).
- [10] 吴益文, 汪宏斌, 华沂, 等. 调质态 40Cr 钢旋转弯曲疲劳寿命与显微组织的关系[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 90-95.
- WU Y W, WANG H B, HUA X, et al. Rotate bending fatigue life and microstructure of quenched and tempered 40Cr steel[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(5): 90-95 (in Chinese).
- [11] 王欣, 蔡建明, 王强, 等. 喷丸表面覆盖率对 Ti60 高温钛合金疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 58-63.
- WANG X, CAI J M, WANG Q, et al. Effect of shot peening surface coverage on the fatigue property in Ti60 high-temperature titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5): 58-63 (in Chinese).
- [12] 王欣, 尤宏德, 李嘉荣, 等. 陶瓷弹丸喷丸强化对 DD6 单晶高温合金表面完整性的影响[J]. 材料工程, 2014(4): 53-57.
- WANG X, YOU H D, LI J R, et al. Influence of ceramic-shot-peening on surface integrity on DD6 single crystal superalloy[J]. Material Engineering, 2014 (4): 53-57 (in Chinese).
- [13] 王强, 乔明杰, 张玮, 等. 喷丸对 TC4 钛合金残余压应力场及疲劳寿命的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(12): 53-57.
- WANG Q, QIAO M J, ZHANG W, et al. Effect of shot peening on compressive residual stress fields and fatigue life for TC4 titanium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(12): 53-57 (in Chinese).
- [14] 严振, 梁益龙, 张泽军, 等. 喷丸强化对 TC11 钛合金高周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属, 2014(4): 554-560.
- Y Z, LIANG Y L, ZHANG Z J, et al. High cycle fatigue behavior of TC11 titanium alloy by shot peening strengthening[J]. Rare Metal, 2014(4): 554-560 (in Chinese).
- [15] 吴凌飞, 王强, 张志刚, 等. 喷丸强度对不同粗糙度表面超高强度钢疲劳性能的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(8): 46-50.
- WU L F, WANG Q, ZHANG Z G, et al. Effect of shot peening intensity of fatigue property of ultrahigh strength steel with different surface roughness[J]. Material Protection, 2014, 47(8): 46-50 (in Chinese).
- [16] 曹秀忠, 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): 95-100.
- CAO X Z, HAN X Q, GAI P T. Influence of surface integrity of fatigue property on Ti6Al4V titanium alloy[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2014(14): 95-100 (in Chinese).
- [17] WANG X, LI S Q, YANG Q, et al. Effect of double shot peening on room-temperature notched fatigue property of TC4 titanium alloy[J]. Material Science Forum, 2015, 217: 90-95.

(责任编辑: 黄艳斐)