

表面完整性对 C250 型超高强度钢高周疲劳性能的影响

王 欣^{1a}, 滕佰秋², 曾惠元³, 江志华^{1b}, 汤智慧^{1a}

(1. 北京航空材料研究院 a. 第五研究室, b. 第三研究室, 北京 100095; 2. 沈阳发动机设计研究所 通用技术中心, 沈阳 110015; 3. 西安航空动力股份有限公司 研制中心, 西安 710021)

摘 要: 利用圆磨、一次喷丸和二次喷丸 3 种不同的加工方法, 在 C250 型超高强度钢(C250 钢)上引入不同的表面完整性状态。研究了不同表面完整性状态下 C250 钢试样的表面形貌、表面粗糙度和表面残余应力等表面完整性参数并分析了其在室温下的光滑(应力集中系数, $K_t=1$)旋转弯曲疲劳 S-N 曲线和缺口($K_t=1.7$)旋转弯曲疲劳 S-N 曲线。结果表明: 由于表面完整性状态的优化, 相比圆磨状态, 一次喷丸后 C250 钢光滑试样和缺口试样的疲劳极限分别提高 15.4% 和 18.1%, 二次喷丸后分别提高 26.2% 和 20.1%, 在 C250 钢疲劳性能方面二次喷丸增益更大。然而, 二次喷丸后 C250 钢的缺口敏感性较一次喷丸有所增大, 原因是二次喷丸带来的表面平滑化和最大残余压应力外移效果对光滑试样疲劳性能影响明显, 但对缺口试样影响相对较小。

关键词: 表面完整性; 超高强度钢; 喷丸; 疲劳极限; 缺口敏感性

中图分类号: TG668; TG115.57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)02-0069-06

Effect of Surface Integrity on the High Cycle Fatigue Property of C250 Ultra-high Strength Steel

WANG Xin^{1a}, TENG Bai-qiu², ZENG Hui-yuan³, JIANG Zhi-hua^{1b}, TANG Zhi-hui^{1a}

(1a. Laboratory of Number Five, 1b. Laboratory of Number Three, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095; 2. General Technical Research Center, Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015; 3. Research Center, Xi'an Aero-engine (group) Ltd., Xi'an 710021)

Abstract: Different surface integrity conditions were induced on C250 ultra-high strength steel, by different surface finishing methods, including circle grinding, single shot peening and double shot peening. The surface topography, surface roughness and residual stress profile and rotating-bending fatigue S-N curves with smooth specimens (stress concentration coefficient, $K_t=1$) and notch specimens ($K_t=1.7$) at room temperature were investigated. The results indicate that, compared with circle grinding, the fatigue limit of smooth and notch specimens after single shot peening increases 15.4% and 18.7%, respectively; the fatigue limit after double shot peening increases 26.2% and 20.1%, respectively, because of the optimization of surface integrity by peening. It means that double shot peening is more significant in extending the fatigue lives of C250 steel. However, the fatigue notch sensitivity of C250 steel after double shot peening is higher than that of single shot peening, because surface smoothing and moving-outside of residual stress peak, using double shot peening have more influence on the fatigue property of smooth specimens than that of notch specimens.

Key words: surface integrity; super-high strength steel; shot peening; fatigue limit; fatigue notch sensitivity

收稿日期: 2013-10-10; 修回日期: 2014-02-10

作者简介: 王欣(1983-), 男(汉), 福建福州人, 工程师, 硕士; 研究方向: 金属零件的抗疲劳表面强化技术

网络出版日期: 2014-02-11 17:17; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140211.1717.001.html>

引文格式: 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.

0 引言

疲劳失效是危及飞行器服役可靠性的重要问题^[1],零件疲劳性能与其制造后形成的表面完整性状态密切相关,因此,表面完整性的概念得到越来越多的关注。表面完整性是零部件加工后表面几何和物理性质的总称^[2-3],涵盖了表面粗糙度、波纹度、几何形状、微观组织、塑性变形、再结晶以及残余应力等参数。美国空军材料实验室(AMFL)曾于1973年发表了《美国加工数据手册第五章——表面光洁度和表面完整性》,囊括了切削、磨削、电加工以及表面形变强化等方法对多种重要金属材料疲劳性能影响的数据,标志着美国从成形加工向表面完整性加工的转变^[4]。从20世纪80年代以来,我国针对重要构件的制造表面完整性也进行了一些研究。赵振业^[5]综述了超高强度钢、高强度铝合金及钛合金表面完整性抗疲劳应用技术的研究,并提出了“零应力集中的抗疲劳制造技术”的发展前景。陶春虎^[6]等从安全性评估的角度提出了转动件表面完整性研究的重要性,说明喷丸改善表面完整性是提高疲劳极限的主要原因。王仁智^[7]系统地研究了喷丸工艺与金属表面完整性与疲劳性能的关系,并编写了相关著作。然而,目前关于C250型超高强度钢表面完整性的报道较少。

C250钢是一种在国外广泛应用的18%Ni型马氏体时效钢^[8]。“C”表示强化元素为Co,“250”表示其强度级别为250 ksi,即1 700 MPa以上。C250钢屈服强度很高,但由于表面应力集中敏感,裸材状态的疲劳极限较低(仅为屈服强度的1/3左右),交变载荷作用下易发生疲劳失效,严重限制了C250钢在我国燃气轮机转子部件上的使用。然而在国外,该型钢是燃气轮机低温高载转子部件的主要材料,可通过提高表面完整性状态来保证C250钢零件的疲劳抗力。日本的Kawagoishi等^[9]研究了二次喷丸对于18%Ni型马氏体钢旋转弯曲疲劳性能的影响,结果表明二次喷丸对18%Ni型马氏体钢的疲劳增益效果较一次喷丸更显著,但文献主要针对光滑试样进行研究,未分析表面完整性对于不同应力集中系数结构的疲劳性能影响。二次喷丸是我国新编《航空零件喷丸强化工艺》(HB/Z 26-2011)中引入的喷丸强化方法,通过二次喷丸可以提高特定零件的疲劳抗力。

文中通过圆磨、一次喷丸和二次喷丸3种不同的表面处理方法在C250钢表面引入不同的表面完整性状态,研究了二次喷丸的表面完整性状态对室温下光滑试样(应力集中系数, $K_t=1$)与缺口试样($K_t=1.7$)旋转弯曲疲劳性能的增益影响,并利用不同应力集中系数下疲劳极限数据,分析了二次喷丸工艺使C250钢缺口敏感性因子提高的原因。

1 材料及方法

试验材料为C250钢。该钢强度高,韧性好,屈服强度 $\sigma_{0.2} \geq 1\ 830$ MPa,断裂强度 $\sigma_b \geq 1\ 900$ MPa,延伸率 $\delta_5 > 9.5\%$,颈缩率 $\psi > 59.5\%$ 。所选用的光滑($K_t=1$)与缺口($K_t=1.7$)旋转弯曲疲劳试样如图1所示。光滑试样为单轴受力状态,缺口试样为双轴受力状态,根部位置(图1的R0.75位置)存在结构应力集中,在疲劳试验过程中实际受力很大。以外加载荷500 MPa的旋转弯曲疲劳试验举例:光滑试样工作端(图1左的R36底部位置)外载受力即为500 MPa,而 $K_t=1.7$ 的缺口疲劳试样根部位置外载受力为850 MPa。由于在实际疲劳过程中受力较小,因此加工状态下光滑试样的疲劳极限高于缺口试样。

零件表面最终加工工艺对表面完整性影响

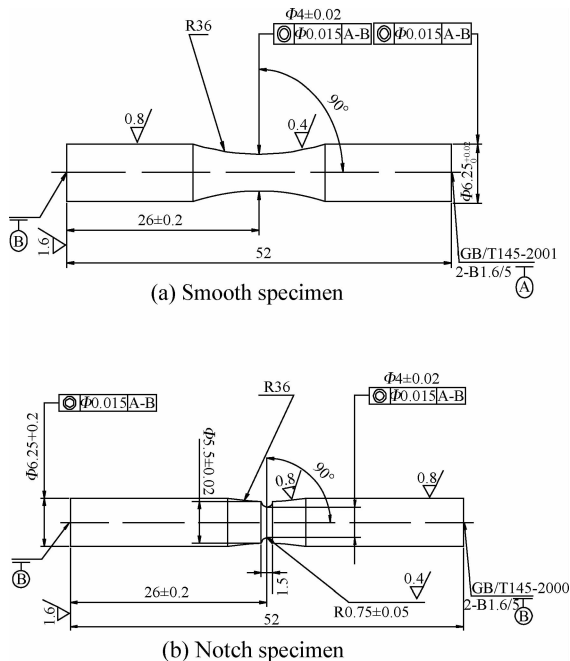


图1 光滑和缺口旋转弯曲疲劳试样(单位:mm)

Fig. 1 Smooth and notch rotating-bending fatigue specimens (Unit: mm)

最大。为研究表面完整性对疲劳性能的影响,研究选择圆磨(Circle grinding,CG)、一次喷丸(单喷,Single shot peening, SSP)和二次喷丸(双喷,Double shot peening,DSP)3 种典型的零件最终加工方法对 C250 钢试样进行处理,以制造不同的表面完整性状态。圆磨前经过粗车、半精车和精车工序,精车、精磨和喷丸工艺如表 1 所示。其中,Rev 为转速,r/min; f_z 为进给量,mm/r; α_p 为切深,mm。在单喷组中,在气动式喷丸机 KX-3030 上,按照航空工业标准 HB/Z 26-2011,采用铸钢弹丸 ZG85(名义直径 0.85 mm)对 C250 钢试样进行喷丸。在双喷组中,利用气动式喷丸机 PWG,采用陶瓷弹丸 CZ10(名义直径 0.1 mm)对经过单喷的试样组进行第二次喷丸处理。双喷组的表面覆盖率总和为 300%。

表 1 表面处理方法		
Table 1 Surface treatment methods		
Methods	Parameters	Values
CG	Rev/(r · min ⁻¹)	1 500
	f_z /(mm · r ⁻¹)	0.05
	α_p /mm	0.30
SSP	Surface coverage/%	150
	Intensity/A	0.45
DSP (First)	Surface coverage/%	150
	Intensity/A	0.45
DSP (Second)	Surface coverage/%	150
	Intensity/A	0.10

采用 MicroXAM 白光干涉仪测试了表面加工方法实施后疲劳试样工作端的表面粗糙度 R_a ;采用 Xstress-3000 型 X 射线衍射残余应力测试仪,使用交相关定峰法进行 C250 超高强度钢的表面残余应力测定,采用的靶材为 Cr K α 靶,采用电解抛光法逐层测定残余应力沿层深的分布,测试结果中“+”值表示拉应力,“-”值表示压应力;采用 PQ-6 旋转弯曲疲劳试验机按 HB5152-96 要求进行了室温高周旋转弯曲疲劳试验,应力比 $R=-1$,频率 83.3 Hz,采用升降法确定 10^7 条件下的疲劳极限。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

白光干涉是一种表面形貌的光学非接触测量方法,通过分析白光干涉条纹和最大光强,得

到待测工件表面的相对高度。图 2 为光滑疲劳试样的表面形貌。圆磨、单喷和双喷后表面粗糙度 R_a 分别达到 0.42、1.52 和 0.86 μm 。

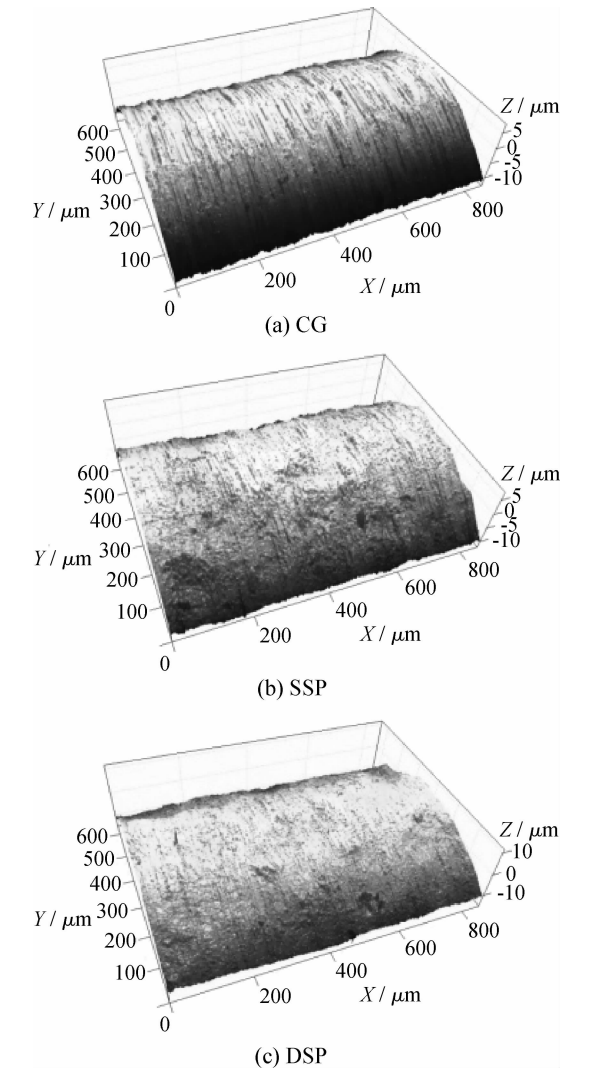


图 2 3 种加工状态下 C250 钢表面形貌
Fig. 2 Surface morphologies of the C250 steel treated by three kinds of processing methods

2.2 残余应力场

残余应力对材料/零件疲劳断裂抗力影响的一般规律^[7]是:残余压应力使疲劳断裂抗力增高,而残余拉应力使疲劳断裂抗力下降。图 3 为 3 种加工状态下 C250 钢的残余应力场分布。由图可知:圆磨后表面残余应力达到-400 MPa,随着深度的增加,残余应力方向由负转正,在 30 μm 深度达到最大拉应力 200 MPa 后,残余拉应力逐渐减小,在 100 μm 深度转为压应力。单喷后表面残余应力为-820 MPa,最大残余压应力为

-1 050 MPa,最大残余压应力处对应的深度为 30 μm ,残余压应力场深度 150 μm ,呈典型的“倒钩状”。双喷后表面残余压应力-1 000 MPa,最大残余压应力“外移”,出现在近表面位置,为-1 030 MPa,残余压应力场深度与单喷基本一致。残余应力场测试趋势与文献^[10-11]较为相似。

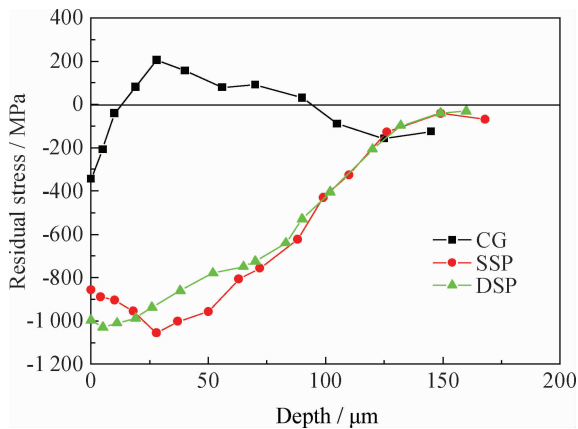


图3 3种加工状态下C250钢的残余应力场分布

Fig. 3 Residual stress distribution of the C250 steel treated by three kinds of processing methods

2.3 疲劳性能

分析表面完整性状态的目的是为提高零件或材料的疲劳抗力。为分析表面完整性状态对于不同应力集中状态下的C250钢疲劳性能的影响,研究了不同表面完整性状态下C250钢的光滑试样和缺口试样的疲劳S-N曲线,如图4所示。疲劳S-N曲线中,纵坐标为疲劳交变应力幅,横坐标为疲劳寿命。

首先分析相同结构、不同表面完整性状态下C250钢的疲劳性能。观察光滑试样的疲劳S-N曲线,经过双喷后,无论在相对大应力状态(1 000~1 200 MPa),还是在较低的交变载荷(750~850 MPa)下,其疲劳寿命明显长于单喷和圆磨;经过双喷、单喷和圆磨后,C250钢的疲劳极限分别为813、743和644 MPa,双喷和单喷后C250钢的光滑试样的疲劳极限较圆磨分别提高26.2%和15.4%。由C250钢的缺口试样的疲劳S-N曲线可得,经过喷丸后,在所有应力条件下,疲劳性能均比圆磨试样有明显提高;与光滑结构趋势相同,经过双喷后,在620~800 MPa应力下,缺口试样的疲劳寿命均高于单喷;经过双喷、单喷和圆磨后,C250钢的缺口疲劳极限分别为610、600和508 MPa,双喷和单喷后C250钢的缺

口试样的疲劳极限较圆磨分别提高20.1%和18.1%。相比圆磨,单喷和双喷都显著提高了C250钢光滑试样和缺口试样的疲劳性能,且双喷对疲劳性能的增益效果优于单喷。

相比单喷,双喷的主要优点在于:①通过第2次的细小弹丸的喷丸,起到了表面平滑化的作用,降低了最终加工产生的应力集中;②在交变的弯曲载荷的作用下,表面受力最大,双喷后最大残余应力位置出现在试样表面,有效地缓和了外加拉伸载荷的影响。以上两个表面完整性优化的结果使得双喷对于光滑试样和缺口试样的疲劳极限均高于单喷,也显著高于圆磨。

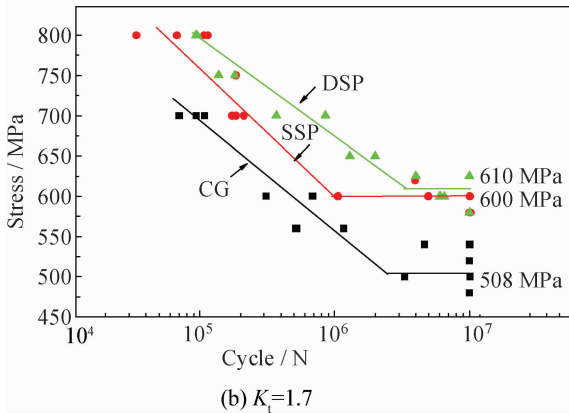
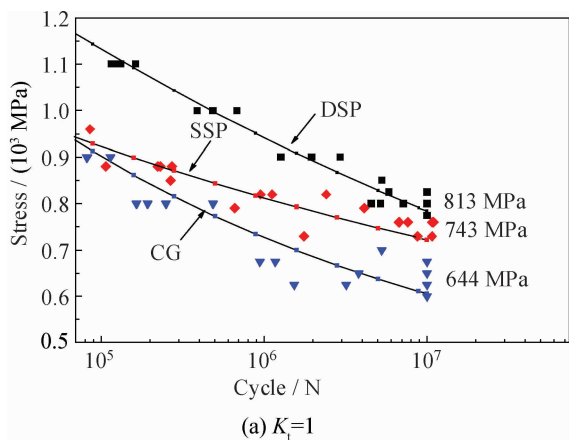


图4 表面完整性对不同应力集中系数疲劳S-N曲线的影响

Fig. 4 Effects of surface integrity on fatigue S-N curves with different stress concentration

表2为表面完整性对不同应力集中系数下疲劳极限的影响。由表2可得:缺口的存在对C250钢的疲劳性能产生了弱化作用。圆磨、单喷和双喷后,缺口试样的疲劳极限较光滑试样的疲劳极限分别降低了21%、20%和25%。这里,引用缺口敏感度 $q^{[12]}$ 反映缺口对于疲劳性能的影响。

响,表达方式如公式(1)所示。一般认为, q 表征疲劳过程中表面层金属发生应力重新分布,降低应力集中的能力。 q 值越小,说明该材料的表面状态对于缺口的“容忍能力”越强,即缺口的存在对疲劳性能的弱化作用越小。

表 2 表面完整性对不同应力集中系数下疲劳极限的影响
Table 2 Effect of surface integrity on fatigue limits with different stress concentration

Stress concentration coefficiency	Method	Fatigue limit/MPa	Improvement/ %
$K_t=1$	CG	644	
	SSP	743	15.4
	DSP	813	26.2
$K_t=1.7$	CG	508	
	SSP	600	18.1
	DSP	610	20.1

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \tag{1}$$

其中, K_f 为光滑试样的疲劳极限 σ_{smooth} 与缺口试样的疲劳极限 σ_{notch} 的比值; K_t 为缺口试样的应力集中系数。计算可得,圆磨、单喷和双喷的表面完整性状态下,C250 钢的缺口敏感性因子 q 分别为 0.386、0.343 和 0.475。以圆磨作为基线,C250 钢经过单喷后缺口敏感性下降,而经过双喷后缺口敏感性上升。

许多文献均认为喷丸能降低材料的缺口敏感性^[13],即喷丸在一定程度上弱化了缺口对于疲劳性能的不利影响。文中,单喷降低了 C250 钢的缺口敏感性,这一结果与众多文献结果一致,这里不加赘述。

文中双喷后缺口敏感性上升,与一般认识相反。缺口试样应力集中系数 $K_t=1.7$,公式(1)的分母 $K_t-1=0.7$ 为定值。双喷后缺口敏感度 q 较圆磨状态上升主要来源于 $K_{f(双喷)}$ 大于 $K_{f(圆磨)}$ 和 $K_{f(单喷)}$,即对比于圆磨和单喷状态,双喷后光滑试样的疲劳极限 σ_{smooth} 与缺口试样的疲劳极限 σ_{notch} 的比值增大。应该说明的是,双喷后无论 σ_{smooth} 还是 σ_{notch} 均高于圆磨和单喷状态,其主要原因分析如下。

首先,从表面形貌(表面应力集中)分析,C250 钢是一种超高强度钢,应力集中敏感性很

强,单喷后表面粗糙度达到 $Ra\ 1.52\ \mu\text{m}$,双喷中的小弹丸“抚平作用”使表面粗糙度得以减小,达到 $Ra\ 0.86\ \mu\text{m}$ 。对于光滑试样,双喷可以减小粗糙度,使表面微观应力集中降低,显著提高光滑结构的疲劳性能;但缺口试样存在结构应力集中,结构影响大于加工(或喷丸)产生的表面微观应力集中,双喷产生的表面平滑化效果影响有限。因此,双喷的表面平滑化效果可以提高光滑试样的疲劳性能,但缺口试样的疲劳性能影响较小。

在旋弯疲劳模式中,表面受载最大,由外向内逐渐减小。从残余应力角度分析,对于光滑试样,双喷后最大残余压应力外移,根据 Goodman 关系^[14],更有效地缓和外加拉应力影响,提高光滑试样的疲劳性能。然而,与光滑试样不同的是,缺口疲劳试样存在结构应力集中($K_t=1.7$),在双喷的疲劳极限(610 MPa)试验时,缺口根部的理论受力为 1 037 MPa,实际受力较大,疲劳裂纹萌生较早^[15],近表层残余压应力因疲劳裂纹萌生而发生松弛。虽有文献认为喷丸后缺口根部存在残余压应力集中现象^[16],但对于 C250 钢这类应力集中敏感度很高的材料,结构应力集中的影响也高于喷丸残余压应力集中,因此,最大残余压应力外移的效果在缺口结构的疲劳过程中也不能有效发挥。因此,双喷的残余压应力外移效果对于光滑试样的疲劳极限的增益作用也大于缺口试样。

因此,从表面形貌和残余应力的角度分析,双喷对于光滑试样的疲劳增益效果大于缺口结构,使得光滑试样的疲劳极限 σ_{smooth} 很高,而缺口试样的疲劳极限 σ_{notch} 相对圆磨提高有限,从而计算得到的缺口敏感性因子 q 上升。

3 结 论

(1) 相比圆磨,单喷后光滑试样($K_t=1$)和缺口试样($K_t=1.7$)的疲劳极限提高了 15.4%和 18.1%,双喷后提高了 26.2%和 20.1%,双喷对疲劳性能的增益效果优于单喷。

(2) 相比圆磨和单喷,双喷后缺口敏感性因子 q 上升,原因是双喷带来的表面平滑化和最大残余压应力外移效果对于光滑试样的疲劳增益效果大于缺口试样,使得双喷后 $\sigma_{smooth}/\sigma_{notch}$ 大于圆磨和单喷状态。

参考文献

[1] Suresh. 材料的疲劳 [M]. 王中光,译. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 1998: 5-8.

[2] 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(5): 55-57.

[3] 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): 47-50.

[4] 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): 90-94.

[5] 赵振业. 高强度合金应用与抗疲劳制造技术 [J]. 航空制造技术, 2007, 10: 30-33.

[6] 陶春虎, 刘新灵. 航空发动机材料和工艺的安全性评估 [J]. 失效分析与预防, 2007, 2(4): 14-20.

[7] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.

[8] Floren S. 马氏体时效钢的研究 [M]//. 美国金属学会主编金属手册 (第一卷). 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1998: 491-499.

[9] Kawagoishi N, Nagano T, Moriyama M, et al. Improvement of fatigue strength of maraging steel by shot peening

[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2009, 24(12): 1431-5.

[10] 王仁智. 残余应力测定的基本知识——第五讲 金属材料与零件的表面完整性与疲劳断裂抗力间的关系 [J]. 理化检验-物理分册, 2007, 43(10): 535-539.

[11] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1209-12.

[12] 张思倩, 李述军, 郝玉, 等. Ti-24Nb-4Zr-8Sn 合金疲劳缺口敏感性 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 518-522.

[13] 高玉魁. 喷丸对 TC18 钛合金拉-拉疲劳性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(9): 1000-2.

[14] 张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响 [J]. 理化检验物理分册, 2002, 38(6): 231-235.

[15] 何家文, 胡奈赛, 张定铨, 等. 残余压应力对缺口疲劳性能的影响 [J]. 表面工程, 1992, 5(1): 16-19.

[16] 徐可为, 张定铨, 张玉华, 等. 缺口根部和裂纹尖端残余应力的 X 射线衍射法测定 [J]. 实验力学, 1989, 4(4): 16-20.

作者地址: 北京市 81 信箱 5 分箱 100095
北京航空材料研究院第五研究室
Tel: (010) 6249 6450
E-mail: rasheed990918@163.com

(责任编辑: 黄艳斐)

• 本刊讯 •

本刊关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714—2005, 并参考 CAJ—CDB/T1—1998 技术规范, 采用顺序编码著录, 依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出, 并将序号至于方括号内, 排列于文后。参考文献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全, 作者的英文名采用姓前名后格式, 姓用全称且首字母大写, 名用缩写且保留大写的首字母, 作者在 3 名以上只列前 3 名, 后加“, 等”; 题名后应标注文献标识类型; 期刊名称 (包括英文期刊) 采用全称; 著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式如下:

- ① 期刊:[序号] 作者. 文名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码.
- ② 论文集:[序号] 作者. 题名[C]. 编者. 文集名, 出版地: 出版者, 出版年, 起止页码.
- ③ 学位论文:[序号] 作者. 题名[D]. 保存地: 学位授予单位, 年份.
- ④ 专著:[序号] 著者名. 书名[M]. 版本. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑤ 报告:[序号] 作者名. 报告题名[R]. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑥ 标准:[序号] 标准代号. 标准顺序号—发布年. 标准名称[S].
- ⑦ 专利:[序号] 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国名: 专利号. 年一月一日 (批准日期).
- ⑧ 报纸:[序号] 作者. 题名[N]. 报纸名, 年一月一日 (版次).
- ⑨ 电子文献:[序号] 作者名. 题名[J/OL]([EB/OL]或[DB/OL]). 电子文献出处或可获得的地址, 发表或更新日期.

(本刊编辑部 供稿)