doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2011.05.012

喷丸表面覆盖率对 Ti60 高温钛合金疲劳性能的影响

王 欣，蔡建明，王 强，宋颖刚，陆 峰
（北京航空材料研究院 第五研究院，北京 100095）

摘 要： 采用新型的陶瓷弹丸，对 Ti60 钛合金进行相同喷丸强度和不同表面覆盖率（100%，200%，400%）的喷丸强化，研究了喷丸前后的表面形貌、表面粗糙度、残余应力场、X 射线衍射峰半高宽等表面完整性特征参数以及其对高温疲劳寿命的影响。结果表明，喷丸覆盖率对表面完整性具有重大影响，因此不同覆盖率喷丸 Ti60 钛合金试样具有显著差异的疲劳寿命。采用 200%覆盖率喷丸，可以使钛合金 Ti60 保持较小的表面粗糙度（R_a=1.2 μm），较大的尖端圆角曲率半径（相对磨削加工），较好的残余应力分布和稳定的强化层微观组织，这些较好的表面完整性状态使 Ti60 钛合金的高温旋转弯曲疲劳寿命提高了 4 倍左右；而采用其他表面覆盖率（100%，400%）喷丸时，Ti60 钛合金的高温疲劳寿命提高了 2 倍左右。

关键词： 喷丸强化；表面覆盖率；陶瓷弹丸；表面完整性；高温疲劳性能
中图分类号： TG668；Q346.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1007-9289(2011)04-0058-06

Effect of Shot Peening Surface Coverage on the Fatigue Property in Ti60 High-temperature Titanium Alloy

WANG Xin, CAI Jian-ming, WANG Qiang, SONG Ying-gang, LU Feng
(Laboratory of Number 5, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095)

Abstract: Ti60 high-temperature titanium alloy was peened by the ceramic shot, with the same shot peening intensity and the different coverages (100%, 200% and 400%). The changes of surface integrity such as surface morphology, roughness, residual stress profile and full wave at half maximum caused by different coverage shot peening and their effects on high temperature fatigue life were investigated. The results show that the shot peening coverage has a significant influence on surface integrity, so that high temperature fatigue property of Ti60 titanium differs under different surface coverage. However, compared with the other surface coverage, Ti60 titanium alloy has the smoother surface (R_a= 1.2 μm), larger micro-notch radius, excellent residual stress profile and stable micro-structure when shot peened under 200% surface coverage, and the high temperature rotating-bending fatigue life on Ti60 titanium was improved by about 4 times due to the perfect surface integrity. Moreover, the high temperature fatigue life was improved by about 2 times when shot peened under 100% and 400% surface coverages.

Key words: shot peening (sp); surface coverage; ceramic shot; surface integrity; high temperature fatigue property

0 引 言

随着先进航空发动机推重比的不断提高，对新材料新技术的依赖程度愈来愈大，同时航空发动机对新材料的要求也更加苛刻，要求具备轻质、高强、高韧、耐高温、抗氧化、耐腐蚀等性能，这几乎是结构材料中最高的性能要求。针对镍基高温合金密度较大的问题，国内外发展了大量 600 ℃高温钛合金材料[1]，如 IMI834、Ti1100 等。采用高温钛合金代替镍基高温合金 IN718，作为压气机整体叶盘的材料，可以明显减轻航空发动机的重量，以提高推重比。Ti60 高温钛合金是我国自行研制的含 β 稳定元素 Ta 和较高含量的 Si 元素设计的新型钛合金[2]，可以在 600 ℃以下服役。

由于高温钛合金制备的整体叶盘中叶片设计轻薄，叶片刚度相应减小。叶盘服役过程中容易发生高频振动，使叶片在服役过程中受到了严重高温高周疲劳的作用。喷丸强化是目前国内外使用最广泛的抗疲劳表面强化技术[3]。由于钛合金的应力集中敏感性高，喷丸后钛合金的表面完整性状态与喷丸前的机械加工表面有较大变化[4]，因此，钛合金的疲劳性能受到喷丸工艺

收稿日期： 2011-06-06；**修回日期：** 2011-09-02
作者简介： 王欣（1983—），男（汉），福建福州人，工程师，硕士。

参数的影响很大,即采用适宜的喷丸参数,才能有效提高钛合金的疲劳寿命;无论欠喷或者过喷,都可能影响甚至降低钛合金的疲劳寿命。在国外,喷丸表面覆盖率对于疲劳性能的影响已经得到一定程度的重视,相关国防报告[5]报道了喷丸覆盖率对于合金钢疲劳性能的影响,结果说明了喷丸覆盖率对于 4340 钢常温抗拉疲劳性能影响很大。然而在我国,虽然喷丸强化技术在很多工业领域得到了应用,但工艺技术研究还不够充分。实际研究、零件设计图纸和实际生产应用都很重视喷丸强度对于钛合金疲劳寿命的影响,部分图纸强调了应采用的弹丸介质,但大多都忽略了表面覆盖率的实际作用,仅要求喷丸覆盖率超过 100%,没有确定的表面覆盖率值。实际上,表面覆盖率是喷丸强化的重要参数,采用不同的表面覆盖率进行喷丸对表面形貌、表面粗糙度和表面残余应力分布等表面完整性参数都有较大影响。因此,对于钛合金疲劳性能也有较大影响,有必要开展喷丸表面覆盖率对钛合金表面完整性和高周疲劳性能的影响研究。陶瓷弹丸是一种新型喷丸介质[6],相比于传统的铸钢丸,陶瓷弹丸硬度高,冲击能量传递性好;相比于玻璃丸,陶瓷弹丸又具备不易破碎的优点,因此,陶瓷弹丸是国外非铁基航空发动机材料的重要喷丸介质[7],但在我国,陶瓷弹丸喷丸研究才刚刚起步[8],需要进一步推广应用。因此,研究针对 Ti60 高温钛合金,开展了陶瓷弹丸喷丸对于钛合金表面完整性影响的研究,分析了喷丸表面覆盖率(100%、200%、400%)对于 Ti60 高温钛合金高温高周疲劳性能的影响。

1　试验材料与方法

研究针对的材料是高温钛合金 Ti60。名义成分为 Ti-5.8Al-4Sn-4Zr-0.7Nb-1.5Ta-0.4Si-0.06C。

表面完整性研究的试样表面经过精磨,尺寸为 15 mm×15 mm×15 mm。疲劳试样选用光滑旋转弯曲疲劳试样,试样如图 1 所示。

在气动式喷丸机上,按照航空工业标准 HB/Z 26,采用陶瓷弹丸 Z600(名义直径 0.60 mm)对 Ti60 钛合金试样分组进行不同覆盖率的喷丸,其中 D 组为未喷丸的原始试样。喷丸工艺如表 1 所示。喷嘴与试样的间距为 120 mm,与试样中心的法线夹角小于 15°。喷丸强化的表面覆盖率采用 10 倍放大镜进行观察。通过多次试验,确定了达到 100%覆盖率的时间为 5 min,达到 200%覆盖率的时间为达到 100%覆盖率时间的两倍,即 10 min,以此类推。

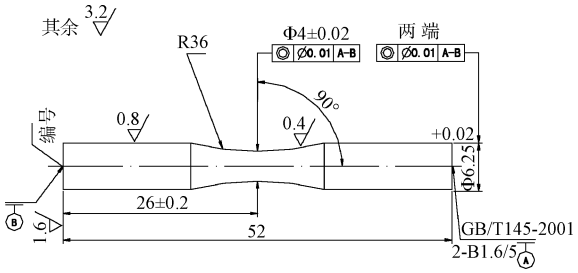


图 1 光滑旋转弯曲疲劳试样

Fig. 1 Smooth rotating-bending fatigue sample

表 1 Ti60 钛合金试样的不同喷丸工艺

Table 1 Different parameters of shot peening on Ti60 titanium alloy samples

喷丸工艺	表面覆盖率/%	喷丸强度/A
A(喷丸)	100	0.15
B(喷丸)	200	0.15
C(喷丸)	400	0.15
D(磨削)	0	0

采用 Phase Shift MicroXAM 白光干涉仪观察了喷丸后试样的表面三维形貌,采用 FTS-i120 触针式表面粗糙度仪测试了喷丸后试样的表面二维轮廓;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了 Ti60 钛合金试样的残余应力场测试和衍射峰半高宽分析,采用的靶材为 TiKα 靶,测试结果“+”值表示拉应力,“-”值表示压应力;采用 E6 旋转弯曲疲劳试验机按 HB 5153 要求进行了高温高周旋转弯曲疲劳试验,温度 600 ℃,应力幅 430 MPa。

2　试验结果

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,利用压电式精密位移平台推动物镜垂直位移,通过分析干涉条纹和最大光强,得到待测工件表面的相对高度。图 2 为喷丸前后 Ti60 高温钛合金表面三维形貌对比。

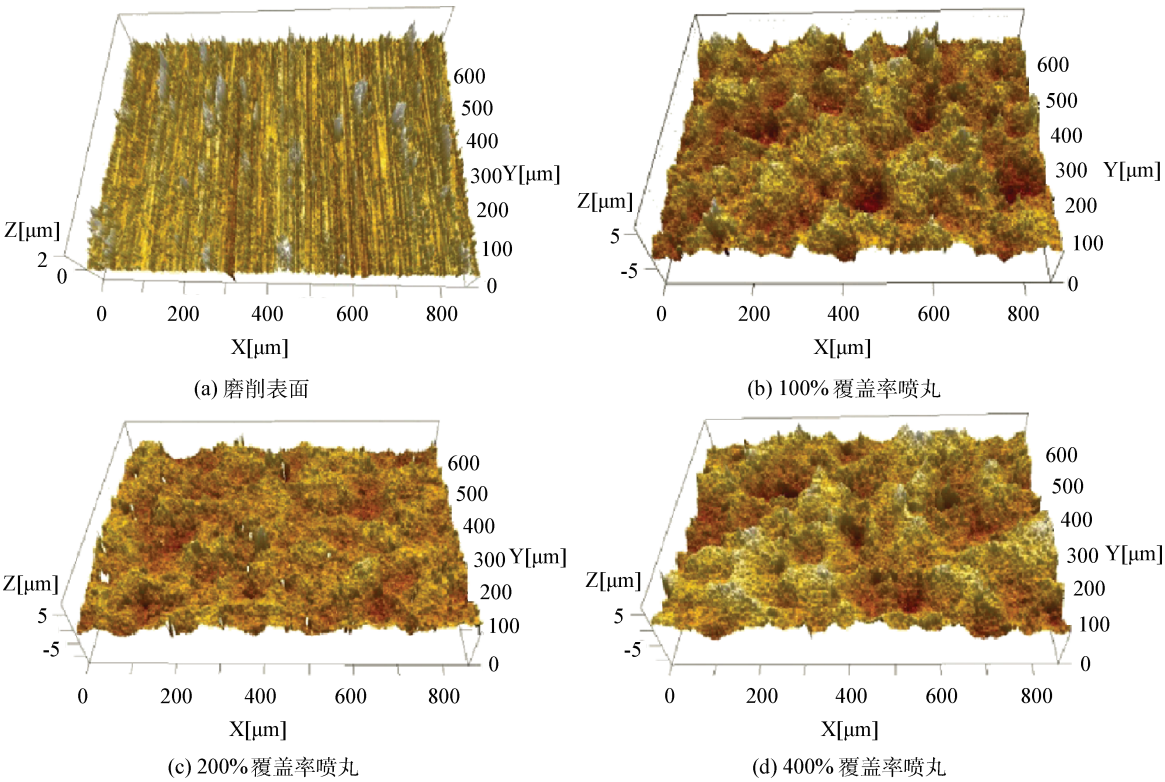


图 2 不同表面覆盖率喷丸后的三维表面形貌

Fig. 2 3-D morphology after shoot peening with different coverage

经过磨削之后，表面粗糙度较好，达到 Ra0.7 μm；经过喷丸强化之后，表面粗糙度都有了一定的提高，达到 Ra1 μm 以上。喷丸覆盖率为 100% 与 200% 时，表面粗糙度基本接近，为 Ra1.2 μm 左右，而经过 400% 覆盖率喷丸强化后，表面粗糙度明显增大，达到 Ra1.6 μm。喷丸是一个表面循环塑性形变的过程，随着覆盖率的上升，表面受到弹丸打击的次数也随之增加，塑性形变加剧，因此，表面粗糙度也随之提高。

2.2 残余应力场

喷丸产生的残余应力大小及残余应力的分布对于疲劳性能具有较大的影响。各种工艺喷丸后的残余应力场如图 3 所示。

未喷丸的磨削试样表面残余应力为 −208 MPa。经过不同表面覆盖率喷丸强化之后，表面的残余压应力数值都大于未喷丸的磨削试样。随着表面覆盖率的增加，表面残余压应力数值略微有所降低，这是由于随着表面覆盖率的增大，表面塑性形变加剧，造成表面残余应力松弛的缘故。经过不同表面覆盖率喷丸后，残余压应力在深度 30～50 μm 处达到最大值，喷丸覆盖率达到 200% 时，最大残余压应力达到 −605 MPa，相比之下，表面覆盖率为 100% 和 400% 时，最大残余压应力分别为 −550 MPa 和 −545 MPa。另一方面，观察喷丸的残余应力场分布，当喷丸表面覆盖率达到 100% 时，残余压应力场深度仅为 200 μm；表面覆盖率为 200% 时，残余压应力场深度达到 300 μm 左右，而表面覆盖率继续增大到 400%，残余压应力场深度基本维持稳定。

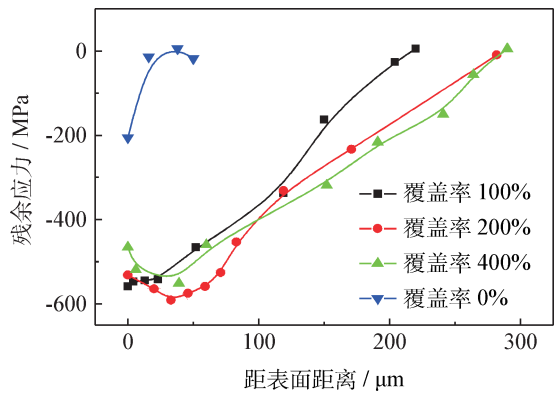


图 3 不同表面覆盖率喷丸后的表面残余应力场

Fig. 3 Residual stress after shot peening with different surface coverage

2.3　X 射线衍射峰半高宽

半高宽(FWHM)指的是衍射峰最大强度 1/2 处所占的角度范围。在仪器固定的情况下,半高宽反映了材料冷作硬化程度、微观残余应力的大小以及晶体内部位错密度的高低等。冷作硬化程度加剧、晶粒细化、微观残余应力增大以及位错密度提高,都可能导致衍射峰宽化,即半高宽增加。图 4 是经过不同表面覆盖率喷丸后,半高宽随深度的变化趋势。

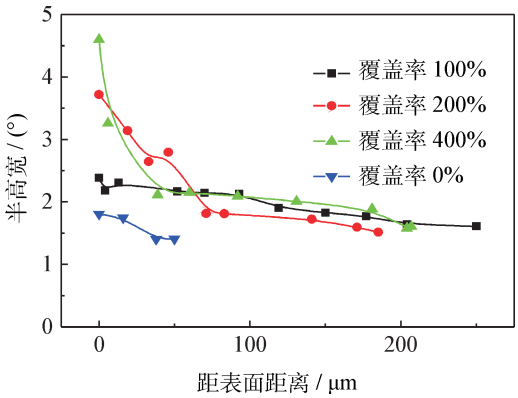


图 4 不同覆盖率喷丸后半高宽随深度变化趋势

Fig. 4 The FWHM after shot peening with different surface coverage

从图 4 中可见,由于精磨过程中存在刀具接触点前方区域的“塑性凸出”效应和刀具后刀面对工件表面的“挤光”效应,这两种效应导致金属表面的塑性变形,因此精磨过程经过精磨的原始试样表面半高宽比基体略微增加,为 1.8°左右,当深度达到 50 μm 左右时,半高宽降到 1.4°,可以认为这是基体的半高宽数值;而经过喷丸的试样,半高宽显著增大,表面半高宽值与喷丸覆盖率成正比,半高宽值随着深度增加逐渐缩小,当深度超过 70 μm 时,半高宽值基本不再减小,相比残余压应力场深度(200 μm 左右),喷丸对于半高宽的影响层深度小于残余应力场深度。表面覆盖率为 400% 时,影响层深度更小,仅为 50 μm。

对于喷丸强化工艺,半高宽宽化的主要原因是由于表面冷作硬化程度上升以及位错增殖。由图 4 可知,经过喷丸强化之后,表面半高宽均有明显增大。这是由于喷丸冷作硬化的体现,随着表面覆盖率的增加,循环塑性形变次数增加,冷作硬化加剧,表面半高宽数值也明显增大。

2.4　疲劳寿命

不同表面覆盖率与疲劳寿命的关系如图 5。经过不同覆盖率的喷丸强化之后,Ti60 钛合金的高温高周疲劳寿命明显增加。原始试样的疲劳寿命在 10^6 次左右,而进行 100%、200%和 400% 覆盖率喷丸强化后,Ti60 钛合金高温高周疲劳寿命分别达到 2×10^6,4.5×10^6 和 2.2×10^6 次,其中,以 200%覆盖率喷丸后寿命增益最为明显,比未喷丸的原始试样提高了 4 倍以上。

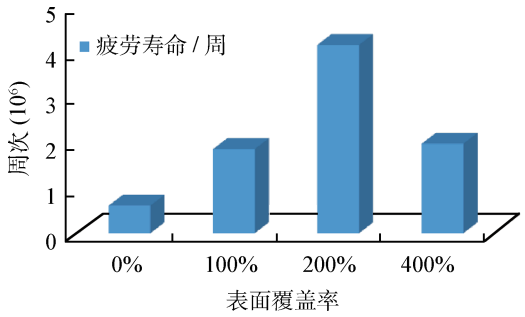


图 5 表面覆盖率对疲劳寿命的影响

Fig. 5 Fatigue lives after shoot peenign with different surface coverage

3　分析和讨论

高温疲劳数据说明,喷丸强化的表面覆盖率对钛合金的高温疲劳性能具有明显的影响,而疲劳性能是表面完整性的综合表现,喷丸强化对于表面完整性的影响主要包括 3 个方面:①表面形貌;②表面残余应力场;③微观组织(位错密度、晶格畸变)。

首先,经过不同表面覆盖率喷丸强化后,表面粗糙度都有了一定的上升。实际上,导致疲劳裂纹萌生的主要因素是表面局部应力集中,应力集中越强烈,裂纹萌生时间越短[9]。应力集中不仅与表面粗糙度有关,也与尖端圆角的曲率半径有关,即表面粗糙度越大,尖端圆角的曲率半径越小,则表面应力集中越强烈。将无限平整的“无应力集中”表面($R_a=0$)作为基线,无论磨削加工还是喷丸强化,都会造成表面应力集中。磨削加工后,表面粗糙度 R_a 较小,如图 2(a),但形成刀痕的尖端圆角的曲率半径较小,如图 6(a)所示;而喷丸强化后表面粗糙度和弹坑尖端圆角的曲率半径显著增大,如图 6(b)所示。因此,分析喷丸强化和磨削对于表面局部应力集中的影响,

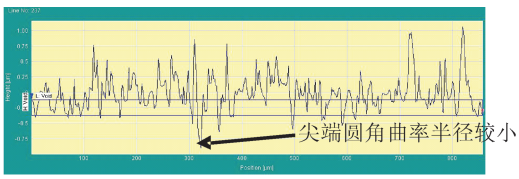
可以认为是表面粗糙度与尖端圆角(刀痕和弹坑)的曲率半径的竞争关系,而不能简单的认为喷丸强化带来的表面粗糙加大会对原有的磨削表面完整性以及疲劳性能有不利的影响,还应考虑喷丸后弹坑的尖端圆角的曲率半径较大对于表面完整性和疲劳性能的作用。

以下引用 Li[10] 等人的方法,计算通过对比200%覆盖率喷丸和原始试样的表面应力集中系数,来分析喷丸弹坑和刀痕对于应力集中的影响。

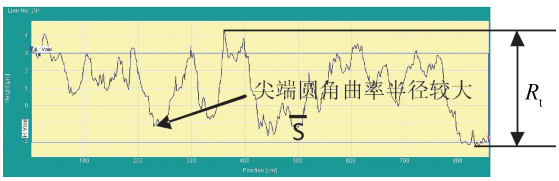
$$K_t = 1 + 2.1 \times (R_t / S) \quad (1)$$

其中,K_t 为实际应力集中系数,R_t 为峰谷名义高度,S 为两个相邻峰的半宽。对疲劳性能影响最大的表面薄弱区域应是当峰谷高度差 R_t 较大,而 S 较小的位置,在后面的计算中应选择 S 较小的轮廓。

观察图 6A 和图 6B,结合试验数据可知:当表面覆盖率为 200%时,S 约为 25 μm,$R_t = |R_{min}| + |R_{max}| = 21$ μm,则计算得到 $K_t = 2.76$;对于未喷丸试样,S 约为 4 μm,$R_t = |R_{min}| + |R_{max}| = 4$ μm,则计算得到 $K_t = 3.1$。因此,不能简单的从表面粗糙度 R_a 增大,推断出喷丸后表面应力集中系数增大。对于 Ti60 进行覆盖率 200%的喷丸后,表面应力集中反而减低了。



(a) 磨削表面



(b) 喷丸覆盖率为200%的表面

图 6 经磨削和喷丸强化后的表面二维轮廓

Fig. 6 The 2-D morphology of the surface under grinding and shot peening

此外,对于不同表面覆盖率喷丸强化,由于采用了相同的陶瓷弹丸和喷丸强度,基本可以认为喷丸后产生的弹坑尖端圆角的曲率半径相同,表面覆盖率达到 100%和 200%时粗糙度基本相同,而覆盖率达到 400%时,表面粗糙度明显上升。覆盖率达到 400%时,弹坑尖端圆角的曲率半径与其他覆盖率相同,但表面粗糙度比其他两种覆盖率更大。从表面形貌角度分析,对钛合金进行陶瓷弹丸喷丸,覆盖率过高,不利于形成一种抗疲劳性能更佳的表面形貌。

其次,相比于磨削后较浅的表面残余应力场,喷丸可以在钛合金表面产生数值深度均较大的表面残余压应力场分布,喷丸强化产生的表面残余压应力场起到了重要的抗疲劳强化作用,较大的表面残余压应力数值既可以抵抗外加交变应力作用,延长疲劳裂纹萌生时间,同时,较深的残余压应力场还可以阻止裂纹在较深尺度上进一步扩展[11]。因此,从残余应力的角度出发,喷丸可以明显提高钛合金的疲劳抗力。采用不同表面覆盖率进行喷丸,将会影响喷丸后残余应力场的分布。试验的残余应力场分析结果说明,不同表面覆盖率喷丸后,钛合金表面的残余应力分布不同,而喷丸覆盖率有一个优化值,利用这个优化值进行喷丸强化,可以产生最佳的表面残余压应力场分布。既可以产生数值较大的表面残余压应力,又可以产生深度较深的残余压应力场;当覆盖率低于这个优化值,则残余压应力场深度有限;而当覆盖率高于这个优化值,既会由于循环塑性形变产生表面残余压应力松弛而降低表面的残余压应力数值,又会由于喷丸时间的延长造成工程上的耗费。因此,从残余应力分析角度出发,选择优化的表面覆盖率可以明显提高 Ti60 钛合金的表面完整性及其疲劳性能。

再次,喷丸对于微观组织的影响是喷丸对于高温服役材料的另一种重要的强化作用,甚至有学者[12]认为在高温(600 ℃)服役时,喷丸产生的组织强化作用大于残余应力强化作用。在高温交变疲劳的作用下,位错密度较大的冷作硬化组织可以增大裂纹扩展的激活能,阻碍裂纹扩展,提高疲劳寿命。喷丸后 X 衍射峰的半高宽主要反映了表面冷作硬化程度和位错密度,冷作硬化程度越高,位错密度越大,半高宽宽化越强烈,半高宽数值越大。未经过喷丸的磨削试样,半高宽较小,在高温下裂纹扩展激活能小,扩展速率较快,因此疲劳寿命较低;经过喷丸强化的试样,位错密度和冷作硬化程度明显上升,可以阻碍裂纹扩展,提高疲劳寿命。

4 结　论

(1) 喷丸的表面覆盖率对于 Ti60 钛合金的高温疲劳性能具有重要的影响,采用 200%覆盖率喷丸时,Ti60 钛合金的高温旋转弯曲疲劳(K_t=1)寿命提高了 4 倍左右,而采用其他表面覆盖率(100%,400%)喷丸时,疲劳寿命提高了 2 倍左右。

(2) 不同表面覆盖率造成钛合金高温疲劳性能差别的主要原因是由于不同覆盖率形成的表面完整性状态(表面形貌、残余应力场和微观组织)存在差别。利用 200%覆盖率喷丸,可以保持较小的表面粗糙度(R_a=1 μm),较大的尖端圆角曲率半径(相对磨削加工),较好的残余应力分布和稳定的强化层微观组织,因此,经过 200%覆盖率陶瓷弹丸喷丸后 Ti60 钛合金的高温疲劳性能较好。

参考文献

[1] 付艳艳,宋月清,惠松骁等. 航空用钛合金的研究与应用进展 [J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-856.

[2] 蔡建明, 李臻熙, 马济民等. 航空发动机用 600℃ 高温钛合金的研究与发展 [J]. 材料导报, 2005, 19(1): 50-53.

[3] 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.

[4] 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(7): 1209-1212.

[5] Prevey P S, Cammett J T. Effect of shot peening Coverage on residual stress, cold work and fatigue in a Ni-Cr-Mo low alloy steel [J/OL]. Germany. doi: 10.1002/3527606580. ch37, 2006, 2.

[6] SAE J1830. 1987. Size Classification & Characteristics of Ceramic Shot for Peening [S].

[7] AMS 2431-7A. 2006. Peening Media-Ceramic Shot [S].

[8] 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.

[9] 王欣, 王强, 宋颖刚等. 陶瓷丸喷丸对 2124 铝合金疲劳性能的影响 [J]. 2011, 44(9): 10-13.

[10] Li J K, Yao M, Wang D, et al. An analysis of stress concentrations caused by shot peening and its application in predicting fatigue strength [J]. Fatigue Fracture Engineering Material Structure, 1992, 15(12): 1271-9.

[11] 陈勃, 高玉魁, 吴学仁等. 喷丸强化 7475-T7351 铝合金的小裂纹行为和寿命预测 [J]. 航空材料学报, 2010, 31(3): 519-525.

[12] 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: 535-539.

作者地址: 北京市海淀区温泉镇环山村　100095

Tel: 138 1005 2934

E-mail: rasheed990918@163.com

·学术动态·

第十届全国摩擦学大会通知

中国机械工程学会摩擦学分会定于 2011 年 11 月 5～8 日在武汉科技会展中心召开第十届全国摩擦学大会。本次会议将通过学术活动和产品展示交流我国摩擦学界在摩擦学研究和应用方面取得的最新成果。会议将对摩擦学分会第七届理事会四年来的工作进行总结,还将成立中国机械工程学会摩擦学分会第八届委员会。

本次会议作为 2011 年中国机械工程学会年会的一个分会场,将邀请摩擦学领域的院士、专家和有关部委及省市领导出席。会议主题包括:润滑、摩擦磨损、微纳摩擦学、涂层、表面/界面摩擦学、生物摩擦学、摩擦化学、摩擦与磨损的测试与仿真、工业摩擦学及其他摩擦学相关问题。欢迎广大在企事业、高等院校和研究机构从事摩擦学研究和应用的摩擦学工作者踊跃参加,促进我国摩擦学科学、工程及技术的发展。会议征集论文,编辑电子版论文汇编,不出版纸质论文集;会议向代表提供录入电子版会议论文集的 U 盘,以便学术交流。稿件要求请查阅会议网站: http://www.cntribo.org/Meeting。

(王文宇 供稿)