

激光冲击强化和喷丸强化对 FGH97 高温合金疲劳性能的影响

高玉魁¹, 仲政¹, 雷力明²

(1. 同济大学, 上海 200092)

(2. 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

摘要: 对 FGH97 粉末高温合金进行激光冲击强化和喷丸强化, 利用 X 射线应力分析仪测定强化层的残余应力, 测定 650 °C 下旋转弯曲疲劳性能, 利用 SEM 观察分析疲劳断口特征。结果表明, 2 种表面强化方法都可以提高 FGH97 粉末高温合金的疲劳性能, 但激光冲击强化比喷丸强化具有更深的残余压应力层和较好的表面粗糙度, 且残余应力在高温疲劳载荷下的松弛较小, 因此具有更好的强化效果; 与未表面强化的试样相比, 喷丸强化和激光冲击强化试样的疲劳裂纹源都出现在亚表面, 而未强化试样的疲劳裂纹源则出现在表面。

关键词: 激光冲击强化; 喷丸强化; 残余应力; 疲劳

中图分类号: TG132.3+2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1230-05

现代飞机的主要性能如安全性、可靠性、耐久性和经济性都主要依赖于飞机发动机, 而近年来对核心机的设计性能要求越来越高, 相应地对材料的性能也提出了较高要求, 尤其是对高推比的航空发动机材料。与变形高温合金相比, 粉末高温合金具有晶粒细小和组织均匀等优点, 使合金屈服强度高、疲劳性能好并节省原料, 已成为制造航空发动机涡轮盘、压气机盘、篦齿盘、封严盘和涡轮盘挡板等关键部件的较佳材料。FGH97 是我国仿制 EP741NP 而研发的粉末高温合金, 它比 FGH96 具有更好的力学性能, 而且可以通过双性能热处理来提高其疲劳损伤容限耐久性, 用来制造航空发动机的盘、轴零件^[1]。

粉末高温合金在其冶金制备过程中难免存在夹杂物, 它对疲劳性能的影响已有研究^[2-4]。关于表面强化对钢铁^[5]、钛合金^[6]、铝合金^[7]、变形^[8]和铸造^[9]高温合金等材料疲劳性能影响的研究已有很多, 但却鲜见表面强化对粉末高温合金疲劳性能影响的研究。如何采用表面强化来提高粉末合金的疲劳性能是理论上和工程应用上都需要关注的问题, 而且随着高能表面强化技术如激光冲击强化的发展, 其对粉末高温合金疲劳性能的影响机制和强化机理也都是值得研究的课题。

本工作对 FGH97 粉末高温合金表面进行常规喷丸

和激光冲击强化, 测定了 2 种表面强化引入的残余应力, 分析了 650 °C 下表面残余应力在疲劳作用下的松弛规律, 对比了 650 °C 下激光冲击强化、喷丸强化和未强化试样的疲劳性能, 为推动表面强化技术在 FGH97 粉末高温合金的应用和提高航空发动机的使用寿命提供研究基础和理论依据。

1 实验

实验用 FGH97 粉末高温合金的主要化学成分(质量分数, %)为: Co 15.2, Cr 9.2, W 5.4, Al 4.9, Mo 3.8, Nb 2.6, Ti 2.2, C 0.05, Hf 0.4, Mg 0.01, Zr 0.014, B 0.012, Ce 0.008, Ni 余量。采用真空感应炉熔炼母合金棒。用等离子旋转电极工艺制粉。将粒度范围内的合金粉脱气、装套、封焊后, 直接经热等静压成形并热处理后获得材料毛坯。热处理制度为 1200 °C 保温 8 h 炉冷到 1170 °C, 空冷至室温; 870 °C 保温 32 h 空冷至室温。

疲劳试样的形状与尺寸见图 1。对加工后的试样进行喷丸强化和激光冲击强化。喷丸时采用陶瓷弹丸 Z300 在 A 类弧高度试片饱和点为 0.20 mm 的条件下对旋转试样进行 90°喷射 4 min。激光冲击强化在固体钨玻璃激光脉冲设备上, 脉冲的频率 10 Hz、脉

收稿日期: 2015-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(11372226); 国家重点基础研究发展计划(2010CB833105); 中央高校基本业务费专项资金(13302380043); 同济大学英才计划项目(1330219133)

作者简介: 高玉魁, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092, 电话: 021-65981290, E-mail: yukuigao@tongji.edu.cn

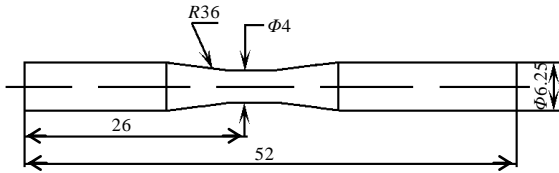


图 1 旋转弯曲疲劳试样
Fig.1 Rotating bending fatigue specimen

冲宽度 10 ns、波长 1.064 μm、脉冲能量 4 J，用黑漆作为吸收层、流动水作为约束层。激光冲击时疲劳试样旋转并水平进给，但激光光斑位置固定不动。

利用 MarSurf XR20 型轮廓仪测定试样的表面粗糙度。用加拿大 Proto 公司生产的 X 射线应力仪测定残余应力。测定采用 Mn 靶，衍射晶面为 (311)。采用电解抛光方法逐层测定表面强化层内的残余应力。在 650 °C 下进行旋转弯曲疲劳试验，在相同的应力水平下测定 4 根试样，取其寿命的对数平均值作为疲劳寿命。采用升降法测定疲劳极限。测定 650 °C 和 740 MPa 与 660 MPa 应力下不同循环周次下激光冲击强化试样和喷丸强化试样的表面残余应力，以研究残余应力在高温和疲劳载荷作用下的松弛规律。利用 Quanta 200 扫描电镜 (SEM) 观察试样的表面形貌和断裂试样的疲劳断口。

2 实验结果

2.1 残余应力

激光冲击强化和喷丸强化试样表面强化层内残余应力的分布见图 2。可以看出，激光冲击强化最大残余压应力在表面，而喷丸强化最大压残余应力通常在距表面几十微米的次表面；激光冲击强化表面残余压应力比喷丸强化的表面残余压应力大 80 MPa；激光冲击强化残余压应力场较深，约 840 μm，而喷丸强化残余压应力场深 280 μm，仅为激光冲击强化残余压应力场的 1/3；激光冲击强化残余应力在近表面区域梯度较小。未强化试样的表面残余压应力在 42~67 MPa 之间，且影响层很浅，约为 30 μm。

在 650 °C 和 740 MPa 与 660 MPa 应力下测定不同循环周次的激光冲击强化和喷丸强化试样的表面残余应力，结果如图 3 所示。可以看出，激光冲击强化试样即使在 740 MPa 应力和 650 °C 高温作用下，其表面仍然可在一定的循环周次内保持较高的残余压应力，而喷丸强化试样则较快地发生了松弛，残余应力很快就变得很小；但在 660 MPa 应力和 650 °C 高温作用下，两者表面都可在一定的循环周次内保持较高的残余压应力，虽然喷丸强化所引入的残余应力松弛速率略高，

但残余应力在 1×10^7 循环周次后变得稳定。

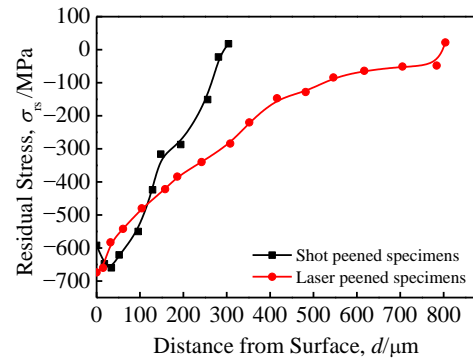


图 2 表面强化层内的残余应力分布
Fig.2 Residual stress distribution in the surface enhanced layers

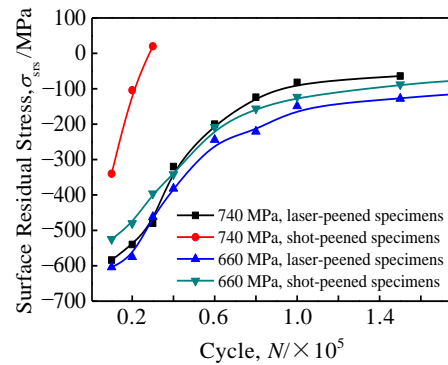


图 3 激光冲击强化和喷丸强化试样在 650 °C 温度和不同应力下的表面残余应力

Fig.3 Surface residual stresses of laser-peened specimens and shot-peened specimens at 650 °C and different stresses

2.2 表面粗糙度与形貌

未强化、激光冲击强化和喷丸强化试样的表面粗糙度分别为 0.44, 0.52 和 0.76 μm。3 种试样表面形貌的 SEM 像如图 4 所示。可以看出，未强化试样存在明显的机加刀痕；激光冲击强化试样的刀痕局部不清晰，但大部分清晰可见，这与激光冲击强化铝合金试样的表面形貌相同^[10]；喷丸强化试样表面则是被弹坑所覆盖，机械加工刀痕很难观察到。

2.3 疲劳 S-N 曲线

650 °C 下旋转弯曲疲劳试验 S-N 曲线见图 5。把 1×10^7 循环周次下试样不发生疲劳断裂的临界应力定义为疲劳强度。可以看出，未强化、激光冲击强化和喷丸强化试样的疲劳强度分别为 392, 551 和 486 MPa。此外，在 740 MPa 应力水平下，与未强化试样的疲劳寿命相比，激光冲击强化试样的疲劳寿命有所提高，而喷丸强化试样的疲劳寿命低于未强化试样，直到

630 MPa 应力时喷丸强化试样的疲劳寿命才与未强化

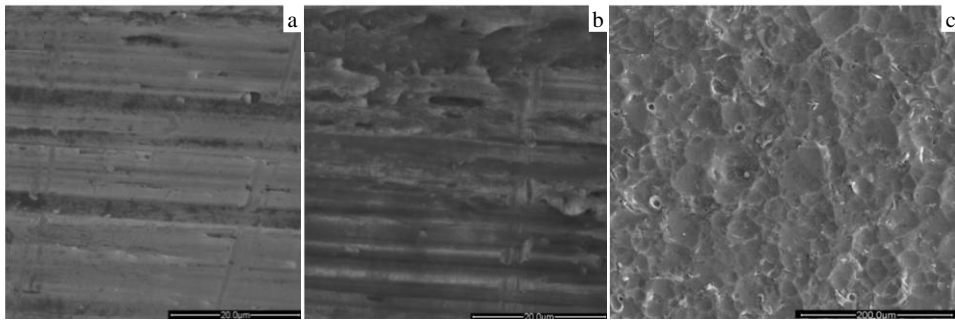


图 4 未强化、激光冲击强化和喷丸强化试样表面形貌

Fig.4 Surface topographies of untreated (a), laser-peened (b) and shot-peened (c) specimens

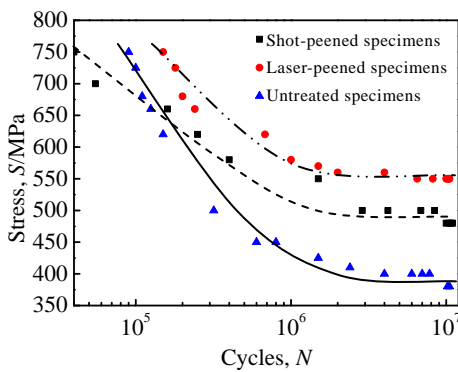


图 5 不同表面强化处理试样的 S-N 曲线

Fig.5 S-N curves of different surface enhanced specimens

试样大致相当。低于 630 MPa 应力水平时，喷丸强化

试样的疲劳寿命高于未强化试样。

2.4 疲劳断口

不同表面强化处理试样接近 1×10^7 循环周次疲劳断裂断口形貌如图 6 所示。可以看出，未强化试样疲劳源在表面加工刀痕处形成，喷丸强化和激光冲击强化试样的疲劳源都在表面层下萌生，如图 6 中的箭头所示。

3 分析与讨论

激光冲击强化作为一种新型的高能束流表面形变改性工艺，在国外已经发展了 40 余年^[11, 12]，国内近年来才有系统的研究^[13-15]，尤其是在高性能的脉冲激光器和自动控制系统设备上还需要进一步研究，在强化机理和工程应用方面也需要逐步推进。激光冲击强

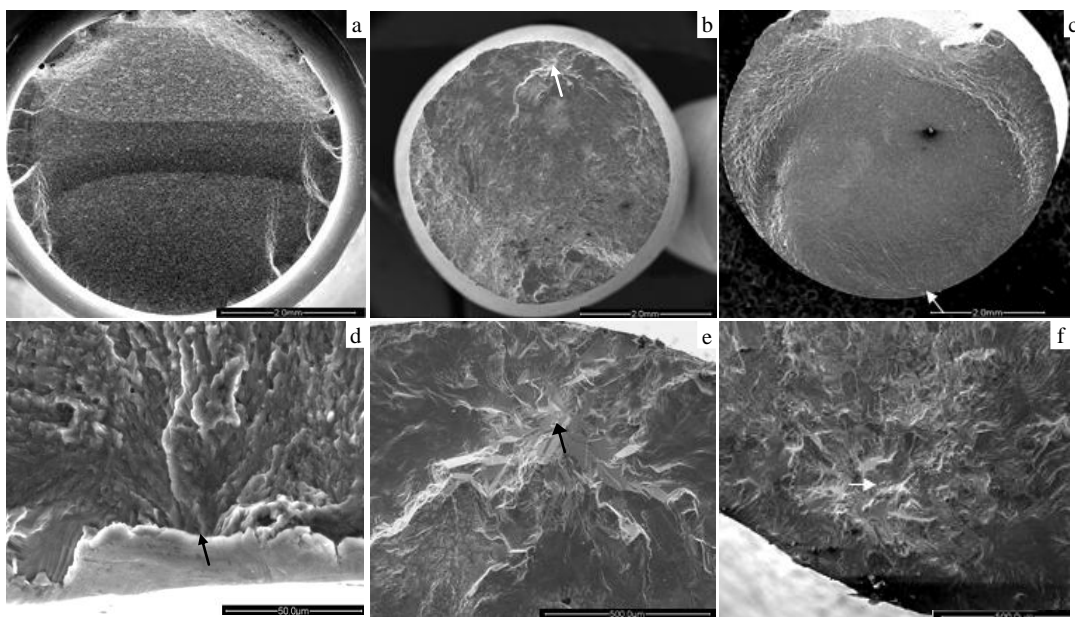


图 6 不同表面强化处理试样的疲劳断口形貌

Fig.6 SEM fractographs of untreated (a, d), laser-peened (b, e), and shot-peened (c, f) specimens (arrows indicate fatigue sources)

化作为一种无丸冲击, 是利用高压爆破的离子体来高速冲击材料表层, 使其发生弹塑性变形的力学效应, 而非热效应, 在表层形成残余压应力, 以提高疲劳性能^[16-18]和应力腐蚀开裂抗力^[19, 20]。

与传统的喷丸强化相比, 激光冲击强化具有脉冲时间短、频率高、单位面积能量密度大和强化部位控制精准以及覆盖率便于调整等优点, 从而率先在美国的航空发动机钛合金压气机叶片上得以应用。从强化机理上来看, 激光冲击强化所引入的残余压应力层更深, 本工作的 FGH97 激光冲击强化残余压应力层深约为喷丸强化残余压应力层深的 3 倍。较深的残余压应力层对于延长裂纹的扩展寿命有利, 将减小裂纹的扩展速率^[7]; 此外, 较高的残余压应力将有效减小表面的载荷, 对于抵抗裂纹的萌生有利。试样经表面强化形成表层残余应力可使疲劳裂纹难以在表面萌生, 这对于提高疲劳性能是非常有利的^[5, 21-26]。残余应力要想维持住这种有效作用, 需要在一定循环周次下稳定在一定水平, 在 740 MPa 应力水平下, 与未强化试样的疲劳寿命相比, 激光冲击试样的疲劳寿命有所提高, 而喷丸强化试样的疲劳寿命低于未强化试样, 这就是因为在较高温度和较大应力的联合作用下, 喷丸强化的残余压应力松弛较大和不稳定所造成的。

无论是激光冲击强化还是喷丸强化, FGH97 疲劳试样经过强化处理后表面粗糙度数值都有所增加, 但激光冲击强化增加较少, 而喷丸强化增加较大。表面粗糙度的增加对疲劳性能不利, 这意味着应力集中的增加, 因此表面强化存在一个残余压应力的强化与表面粗糙度的弱化之间的平衡问题, 这也是表面强化工艺参数优化的原因所在。工程应用中对于表面粗糙度的增加关注不大, 但对于 FGH97 合金高应力低周疲劳而言, 表面强化所引入的残余压应力松弛较大, 此时的表面粗糙度作用不可忽视。

表面强化提高疲劳性能的主要机理就是表面完整性的改善^[5, 10]。表面完整性是指材料无损伤或强化的表面状态和性能, 它包含了表面几何、物理、化学、力学等特征参数和性能^[5, 27]。影响疲劳最重要的表面完整性参数是残余应力和表面粗糙度。残余应力的作用常常被考虑为平均应力效应, 表面强化引入的残余应力在表面层是压应力, 因此可有效降低平均应力, 减小疲劳应力比, 从而提高疲劳裂纹的萌生抗力和降低裂纹扩展速率。但如何定量评价残余应力的作用以及怎样明确给出残余应力在疲劳过程中的松弛判定准则都是有待研究的, 而这些恰恰是准确计算疲劳寿命和正确评价表面强化效果的关键。此外, 表面强化的

残余应力是不均匀的, 在表面层内呈现梯度分布状态, 如何计入平均应力也是值得商榷的。表面粗糙度对于疲劳的影响通常归于应力集中效应, 并建立表面粗糙度与应力集中系数的关系来表征其影响。但表面强化试样的粗糙度没有方向性, 测定各个方向的粗糙度, 数值基本一样, 而未强化试样由于机械加工方向对粗糙度具有一定影响, 因此测定不同方向的粗糙度, 其数值相差较大。此外, 表面强化试样由于残余压应力对疲劳性能的作用显著, 往往表面粗糙度的作用难以显示出来, 如本工作经激光冲击强化和喷丸强化等表面强化处理后, 疲劳源难以在表面萌生, 因此受表面粗糙度影响很小。

对于高周疲劳, 疲劳裂纹的萌生占居疲劳寿命的比重很大, 因此表面强化层越深, 疲劳源离表面越远, 疲劳萌生越困难, 疲劳极限越大。关于表面强化对疲劳极限的影响, 文献[21]分析了表面强化对疲劳裂纹萌生临界抗力(即疲劳极限)与疲劳源位置的关系, 从理论上分析了金属材料表面强化试样疲劳极限提高的最大幅值为 41%。本工作未强化试样的疲劳极限为 392 MPa, $392 \text{ MPa} \times 1.41 = 553 \text{ MPa}$, 这与激光冲击强化试样的疲劳极限 551 MPa 非常接近, 验证了文献[21]的正确性和准确性。

疲劳研究的目的是计算预测疲劳寿命。对于表面强化, 人们曾想通过对残余应力、表面粗糙度进行数理解析和建立物理模型, 并对疲劳过程中表面完整性的演化进行定量表征和预测分析, 以计算疲劳寿命, 但这些都是很难正确计算和准确预测的, 尤其是疲劳寿命的准确计算、精确评价。对于金属材料的疲劳裂纹扩展, 目前还只是定性意义上有了很好的认识和理解, 但在定量上的了解和预测还是有限的^[28]。

4 结 论

- 1) 激光冲击强化和喷丸强化可以提高 FGH97 粉末高温合金疲劳性能, 但激光冲击强化的效果较好。
- 2) 与喷丸强化相比, 激光冲击强化试样形成了较深残余压应力层并具有较低的表面粗糙度。
- 3) 经适宜的激光冲击强化和喷丸强化处理, 试样疲劳源难以在表面萌生而是移至次表面层。
- 4) 激光冲击强化形成的残余压应力在较高应力和温度下稳定性很好, 而喷丸强化的残余应力松弛较大。

参考文献 References

- [1] Zhang Ying(张莹), Zhang Yiwen(张义文), Zhang Na(张娜) et al. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2010, 46(4): 444

- [2] Guo Weibin(郭伟彬). *PTCA (Part: A Phys Test)*(理化检验-物理分册)[J], 2008, 44(5): 231
- [3] Jia Bo(贾波), Li Chunguang(李春光). *Failure Analysis and Prevention* (失效分析与预防)[J], 2006, 1(2): 29
- [4] Zhang Ying(张莹), Zhang Yiwen(张义文), Song Pusheng(宋璞生). *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2004, 14(2): 1
- [5] Gao Y K, Li X B, Yang Q X *et al. Materials Letters*[J], 2007, 61(2): 468
- [6] Gao Yukui(高玉魁). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(9): 1000
- [7] Gao Y K, Wu X R. *Acta Materialia*[J], 2011, 59: 3744
- [8] Gao Yukui(高玉魁), Yin Yuanfa(殷源发), Li Xiangbin(李向斌) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2002(4): 40
- [9] Gao Yukui(高玉魁), Jiang Tao(姜涛). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2010, 30(6): 35
- [10] Gao Y K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 3826
- [11] Ding K, Ye L. *Laser Shock Peening Performance and Process Simulation*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006: 1
- [12] Skeen C H, York C M. *Applied Physics Letters*[J], 1968, 12: 369
- [13] Nie X F, He W F, Zhou L C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 594: 161
- [14] Zhou J Z, Huang S, Zuo L D *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2014, 52: 189
- [15] Ren N F, Yang H M, Yuan S Q *et al. Materials & Design*[J], 2014, 53: 452
- [16] Liu X D, Shang D G, Li M *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2013, 54: 127
- [17] Achintha M, Nowell D, Fufari D *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2014, 62: 171
- [18] Ganesh P, Sundar R, Kumar H *et al. Materials & Design*[J], 2014, 54: 734
- [19] Lu J Z, Luo K Y, Yang D K *et al. Corrosion Sciences*[J], 2012, 60: 145
- [20] Hyuntaech L, Pilkyu K, Heomin J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212 (6): 1347
- [21] Gao Y K, Yao M, Shao P G *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2003, 12(5): 507
- [22] Gao Y K. *International Journal of Structure Integrity*[J], 2011, 2(3): 357
- [23] Gao Y K. *Surface Engineering*[J], 2008, 24(5): 322
- [24] Gao Y K. *Journal of Materials Engineering and Performance* [J], 2008, 17(4): 455
- [25] Gao Y K, Lu F, Yin Y F *et al. Materials Science and Technology*[J], 2003, 19(3): 372
- [26] Gao Yukui(高玉魁). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2008, 33(8): 156
- [27] Gao Yukui(高玉魁), Zhao Zhenye(赵振业). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2014, 39(4): 1
- [28] Schijve J. *Fatigue of Structures and Materials*[M]. Dordrecht: Springer, 2009: 584

Influence of Laser Peening and Shot Peening on Fatigue Properties of FGH97 Superalloy

Gao Yukui¹, Zhong Zheng¹, Lei Liming²

(1. Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. AVIC Commercial Aircraft Engine Co. Ltd, Shanghai 201108, China)

Abstract: Effects of laser peening and shot peening on fatigue performance of the powder metallurgical nickel-based FGH97 superalloy were investigated. Compressive residual stresses in the surface layer were determined by X-ray diffraction stress tester. The rotating bending fatigue test at 650 °C was used to compare the surface enhancement effects between laser peening and shot peening. Moreover, the fatigue fracture characteristics were observed by scanning electron microscope. The results show that both laser peening and shot peening can improve the fatigue property of FGH97, but laser peening has much better surface enhancing effect than shot peening due to deeper compressive residual stress layer and good surface roughness, and the compressive residual stresses induced by laser peening are more stable than the ones by shot peening under fatigue process at high temperature. Furthermore, the fatigue crack sources of both laser peened and shot peened specimens initiate at the subsurface, while the untreated at the surface.

Key words: laser peening; shot peening; residual stress; fatigue

Corresponding author: Gao Yukui, Ph. D., Professor, College of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University,

