

GH4133 镍基高温合金激光冲击强化研究

李玉琴, 何卫锋, 聂祥燮, 李靖, 柴艳

(空军工程大学 等离子体动力学实验室, 陕西 西安 710038)

摘要: 为了研究激光冲击强化技术在高温部件上应用的可行性, 研究了 GH4133 镍基高温合金激光冲击后强化效果的热稳定性。分别采用激光冲击强化、激光冲击强化加保温的方法进行处理, 并利用 SEM、显微硬度和残余应力的测试方法分析了温度对激光冲击处理后 GH4133 材料微观组织和力学性能的影响。通过冲击强化后涡轮叶片的高温疲劳试验验证强化效果的热稳定性, 并分析其高温下的强化机制。结果表明, 激光冲击强化可以在 GH4133 镍基高温合金表层产生较大残余压应力, 细化晶粒; 并且在温度作用下, 激光冲击 GH4133 合金形成的细化晶粒在析出相的钉扎作用下具有较好的热稳定性。另一方面残余压应力的应力集中减小, 分布均匀。两者的共同作用提高了强化效果的热稳定性, 有利于疲劳性能的提高。

关键词: GH4133 镍基高温合金; 激光冲击强化; 微观组织; 残余应力; 热稳定性

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)06-1517-05

GH4133 镍基高温合金是以镍-铬固溶为基, γ' [$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$] 为主要强化相的时效硬化型合金, 该合金具有良好的综合性能, 晶粒均匀细小, 屈服强度高, 易于热加工成形, 适合于制造温度在 750 °C 以下航空发动机的涡轮盘和叶片等重要部件^[1]。采用 GH4133 镍基高温合金制备的部件在实际使用过程中, 由于振动疲劳引起的部件疲劳断裂, 严重影响其使用的安全和可靠性^[2,3]。由于疲劳裂纹通常发生在表面, 为了改善部件的表面性能, 提高抗疲劳性能, 常采用表面强化技术对材料进行改性, 研究表明, 激光冲击强化 (laser shock peening, LSP) 是一种新型的表面强化技术, 可以细化材料表层组织^[4-7], 在表层残留较大的残余压应力, 明显提高其疲劳寿命。其原理为: 短脉冲(几十纳秒)的高峰值功率密度 ($>10^9 \text{ W/cm}^2$) 的激光辐照金属表面, 使金属表面涂覆的吸收保护层吸收激光能量并发生爆炸性气化蒸发, 产生高压 ($>1 \text{ GPa}$) 的等离子体冲击波, 冲击波的力效应使表层材料微观组织发生变化, 在较深的厚度上残留压应力, 从而显著提高金属材料抗疲劳^[8-15]、耐磨损^[16]和防应力腐蚀^[17-19]等性能。

采用激光冲击强化技术提高 GH4133 镍基高温合金的疲劳性能, 但由于该合金的实际工作温度较高, 而在高温的作用下, GH4133 镍基高温合金的激光冲击强化效果的稳定性尚不清楚, 目前, 国内未见相关报道。因此本实验研究激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金及温度作用下微观组织和残余压应力分布, 探讨激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在温度影响下的热稳定性, 为实现激光冲击强化技术在 GH4133 镍基高温合金部件上的工程应用提供试验数据和理论依据。

1 实验

实验材料为 GH4133 镍基高温合金, 成分如表 1。

为了对比研究温度对激光强化 GH4133 镍基高温合金的稳定性影响, 设计了 3 种不同表面状态, 分别是: 第 1 组: 未处理试样; 第 2 组: 将试样进行激光冲击强化处理; 第 3 组: 将试样进行激光冲击强化处理后在 500 °C 下保温 1 h。

为了保证激光诱导等离子体冲击波对材料的作用效果, 首先对 GH4133 镍基高温合金所需的激光功率密

表 1 GH4133 镍基高温合金的化学成分

Table 1 Chemical ingredient of GH4133 nickel-based superalloy

| C | Cr | Ni | Al | Ti | Fe | Nb | Si | P | Cu | Ce | Mn | B | Pb |
|-------------|-------------|------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|------|------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| ≤ 0.07 | 19.00~22.00 | Bal. | 0.70~1.20 | 2.50~3.00 | ≤ 1.50 | 1.15~1.65 | ≤ 0.65 | 0.15 | 0.07 | ≤ 0.01 | ≤ 0.35 | ≤ 0.01 | ≤ 0.001 |

收稿日期: 2014-06-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51305456)

作者简介: 李玉琴, 女, 1982 年生, 硕士, 讲师, 空军工程大学航空航天工程学院等离子体动力学实验室, 陕西 西安 710038, 电话: 029-84787527 (610), E-mail: yuqin511@163.com

度进行估算。其方法是：根据 GH4133 镍基高温合金的 Hugoniot 弹性极限 (HEL)，利用 Fabbro 等人^[20]提出冲击波峰值压力与激光功率密度的关系经验公式估算引起材料动态塑性变形所需的功率密度；然后根据激光功率密度和能量关系公式换算出激光能量范围。

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + 3}} \sqrt{ZAI} \quad (1)$$

式中， P 为冲击波峰值压力(GPa)， α 是效率系数， A 为吸收率，约束层为水、吸收层为胶带的情况下 $\alpha=0.24$ ， $A=0.87$ ； Z 为水和胶带折合阻抗，即 $2/Z=1/Z_{\text{胶带}}+1/Z_{\text{约束层}}$ ，可得 $Z=0.908 \times 10^6 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ； I 为激光的输出功率密度 (GW/cm^2)。

$$I = E/\tau S \quad (2)$$

式中， E 为激光器输出能量 (J)， τ 为激光脉冲 (ns)， S 为光斑面积 (cm^2)。

GH4133 镍基高温合金材料室温性能： $\sigma_Y=878 \text{ MPa}$ ， $\sigma_b=1221 \text{ MPa}$ 。计算采用的激光功率密度范围为 4.29 GW cm^{-2} ，本 GH4133 镍基高温合金激光冲击强化采用 Nd:YAG 固体激光器，其工艺参数为：激光波长 1064 nm ，激光能量 10.8 J ，脉宽 20 ns ，光斑直径 4 mm ，搭接率 66% 。约束层为水，吸收保护层采用铝箔。

保温试验采用真空保温炉，将试件放入箱式炉中，在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下保温 1 h 。

金相组织测试采用 NEOPHOT-21 型金相显微镜；利用 Quanta200 扫描电镜观察强化前、强化后保温试样横截面的形貌；显微硬度测试设备为 MVS-1000JMT2 显微硬度计，载荷为 200 g 、加载时间为 15 s 。残余应力测试采用 X-350A 型 X 射线应力仪对试样的表面和截面应力分布进行测试。疲劳试验采用高温疲劳试验装置，试验温度为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 结果及分析

2.1 高温疲劳性能

对未强化、强化 2 种状态试样在相同条件下进行疲劳试验，按威布尔概率分布模型进行拟合，对实验数据进行分析和处理，其结果如表 2 所示。

表 2 不同状态的 GH4133 试样的疲劳寿命

Table 2 Fatigue lives of GH4133 samples in different states

| State | Fatigue life/ $\times 10^5$ | Dispersity of fatigue |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Unsettled sample | 1.12 | 10.5 |
| LSP before thermal retardation | 2.62 | 12.1 |
| Percentage ratio to state | 2.34 | 1.15 |

从表 2 中可知。GH4133 镍基高温合金试样不同状态的疲劳寿命分别为：原始试样为 1.12×10^5 ；激光冲击强化后在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下的疲劳寿命为 2.62×10^5 ，是未处理试样的 2.34 倍。

实验结果表明，激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在温度作用下仍能显著提高其安全寿命，激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 仍具有很好的热稳定性。

2.2 微观组织热稳定性分析

不同状态激光冲击 GH4133 镍基高温合金的截面微观组织如图 1 所示，从图中可以看出，GH4133 合金基体组织由等轴晶组成 (图 1a)，晶粒较大，在 $100\sim 400 \mu\text{m}$ 。激光冲击 GH4133 镍基高温合金其微观组织是在 γ 奥氏体基体上分布着许多细小而均匀的 γ' 沉淀强化相，以及变形和强化过程产生的大量细化的晶粒和孪晶组织 (图 1b)。相比于激光冲击强化试样，在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 1 h 后的 GH4133 镍基高温合金的微观组织如图 1c、1d、1e 所示，由于温度的作用，激光冲击强化引起的塑性变形形成了大量孪晶组织和细小晶粒未发生长大，晶界更加清晰，组织更加均匀的分布，并在 10000 倍下 (图 1e)，在晶界上析出大量细小，均匀分布的析出相，因为 GH4133 变形高温合金的 γ' 在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始析出， M_{23}C_6 需要在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 析出^[1]，因此可以知道析出相为 γ' 。

2.3 残余应力热松弛分析

GH4133 镍基高温合金激光冲击保温前后的残余应力如图 2 所示。

从图中可以看出，GH4133 镍基高温合金基体的残余压应力在 -59 MPa ，而经过激光冲击强化后的残余最大值为 -381 MPa ，影响深度大于 0.8 mm ，而经过 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 1 h 处理后，表层的残余压应力为 302 MPa ，下降了 20% ，但保温后 GH4133 镍基高温合金的残余压应力仍高于基体的值，影响深度大于 0.8 mm ，且随着距表面深度的增加，残余压应力梯度减缓，深度影响较小。

2.4 显微硬度分析

GH4133 镍基高温合金不同状态的截面显微硬度如图 3 所示。从图中可以看出，未处理试样的显微硬度在 4500 MPa 左右，而经过激光冲击强化后显微硬度达到 5700 MPa ，明显高于基体的显微硬度值，影响深度达到 2 mm 。激光冲击 GH4133 镍基高温合金经过保温处理后，表面硬度值高于激光冲击后试样的硬度值，达到 5900 MPa ，影响深度仍能达到 2 mm 。

3 激光冲击强化 GH4133 合金机理

3.1 组织细化的影响

由图 1 可知，激光冲击强化过程产生的等离子体

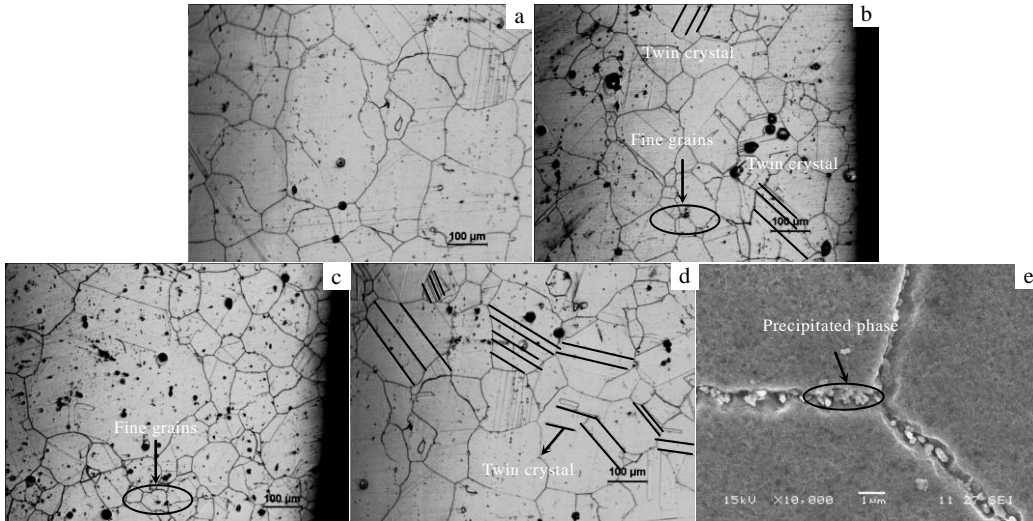


图 1 GH4133 合金不同状态微观组织图

Fig.1 SEM images of GH4133 alloy with LSP and LSP before thermal retardation: (a) unsettled sample, (b) LSP, (c, d) LSP before thermal retardation, and (e) precipitated phase

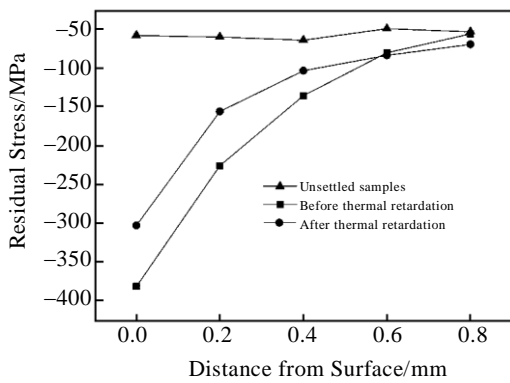


图 2 不同状态 GH4133 合金残余应力随深度变化曲线

Fig.2 Residual stress distribution on cross section of GH4133 alloy samples in different sates

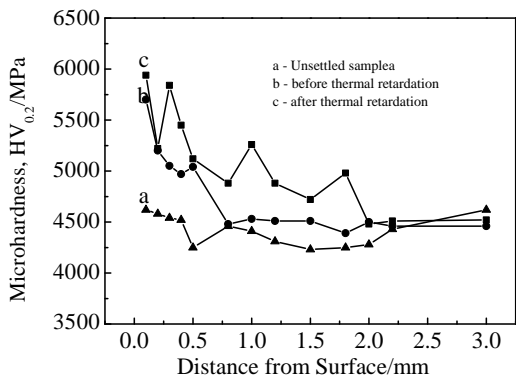


图 3 GH4133 合金不同状态的截面显微硬度

Fig.3 Micro-hardness distribution on cross section of GH4133 alloy samples in different states

冲击波使 GH4133 镍基高温合金的表面组织细化, 形成大量的孪晶, 对提升材料的抗疲劳具有重要作用。

GH4133 镍基高温合金有等轴晶构成, 晶内有退火孪晶贯穿整个晶粒, 激光冲击强化后保温处理, 相当于低温形变热处理^[21], 使得激光冲击强化冷变形过程形成的晶粒被拉长, 形成细条状, 产生形变孪晶, 晶粒细化, 形成加工硬化, 提高材料表层的显微硬度; 由于变形的不均匀而产生内应力; 当变形量很大时, 这些组织结构的变化使高温合金强度增加, 塑性下降, 这种不稳定状态不能直接使用, 在 500 °C 保温处理后, 除机械孪晶外, 通过原子扩散发生回复, 使晶格扭曲减轻, 减小内应力, 通常析出主要强化相或其他析出相 (γ' 相 Ni₃X)。这些相优先在冷加工变形的各种缺陷或高能位置形核, 所以析出相更加细小均匀 (图 1e), 强化效果更好, 同时钉扎在晶界及亚晶界上块状析出, 使得激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在低温处理后, 合金保持组织稳定性。因此, 激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在 500 °C 以下可以长期使用。

另一方面材料的疲劳性能与材料的组织结构有关, 主要包括晶粒尺寸、亚晶粒尺寸、晶体晶格畸变 (微观应力) 等。激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金使得晶粒尺寸减小, 数量增多, 晶界增多可以提高滑移变形抗力, 增加裂纹扩展的晶界阻力, 同时抑制裂纹的萌生, 有效阻止疲劳裂纹的扩展。

3.2 残余应力场的影响

由图 2 可知, 经过激光冲击强化后 GH4133 镍基高温合金材料表层产生了深度大于 0.8 mm 的残余压应力

场, 表面残余压应力可达 381 MPa, 经过保温处理后, 激光冲击强化过程在材料表层形成的残余压应力部分释放, 但仍有较高的残余压应力残留在材料表层, 而且在温度的作用下残余压应力沿深度方向的梯度减缓, 使得残余压应力分布更加的均匀, 且分布深度大于 0.8 mm。这一点在显微硬度沿深度的分布中得到同样的结果, GH4133 镍基高温合金激光冲击强化后保温的显微硬度值增加的深度大于 0.8 mm。

由于材料的疲劳性能与残余应力有关, 残余应力在疲劳载荷中起着平均应力的等效作用, 残余压应力相当于负的平均残余应力, 它能提高工件的抗疲劳强度; 残余拉应力相当于正平均应力, 它降低了工件的抗疲劳强度。残余压应力增大, 可显著提高材料的疲劳性能, 抑制裂纹的萌生, 延长疲劳寿命^[22]。

因此, 激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在温度作用下, 残余压应力部分释放, 沿深度方向的梯度减缓, 与细化晶粒、变形孪晶、析出相共同作用, 强化效果仍发挥作用, 具有很好的热稳定性, 有利于提高 GH4133 材料的疲劳性能。

4 结 论

1) 在 500 °C 温度作用下, 激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金产生的细化晶粒未发生长大, 析出相细小均匀, 强化效果更好, 钉扎在晶界及亚晶界上, 使得激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金在低温处理后, 合金保持组织稳定性。

2) 在 500 °C 温度作用下, 激光冲击强化后 GH4133 合金产生的表层残余压应力有部分释放, 下降了 20%, 但分布的深度大于 0.8 mm。而显微硬度值比保温前增加, 且影响深度仍超过 0.8 mm。

3) 激光冲击强化后在 500 °C 温度下的疲劳寿命为 2.62×10^5 , 是原始试样的 2.34 倍。

4) 激光冲击强化 GH4133 镍基高温合金热稳定性由两部分组成: 一方面, 在温度作用下, 激光冲击强化的微观组织的晶粒细化、大量变形孪晶及晶界析出相, 使得微观组织具有良好的稳定性; 另一方面, 残余压应力等在温度作用下部分释放, 梯度减缓, 稳定性好。这两者共同作用提高了 GH4133 的疲劳性能。

参考文献 References

- [1] Editor Committee of China Aeronautical Materials Handbook. *China Aeronautical Materials Handbook*[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 1988: 293
- [2] Zhao Rongguo, Luo Xiyan, Jiang Yongzhou et al. *Journal of Mechanical Engineering*[J], 2011, 47(6): 92
- [3] Zhao Heyang(赵合阳), Bai Guangchen(白广忱), Wang Ke(王科). *Aeroengine*(航空发动机)[J], 2009, 35(1): 52
- [4] Wang Donglin(王东林), Li Jiabao(李家宝), Jin Tao(金涛) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(8): 1254
- [5] He Weifeng, Li Yuqin, Nie Xiangfan et al. *Applied Mechanics and Materials*[J], 2011, 84-85: 471
- [6] Nie Xiangfan, Long Nidong, He Weifeng et al. *Materials Science Forum*[J], 2011, 694: 946
- [7] Li Yuqin, He Weifeng, Li Yinghong et al. *Materials Science Forum*[J], 2012, 697-698: 466
- [8] Zhou Lei(周磊), He Weifeng(何卫锋), Wang Xuede(王学德). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S4): 174
- [9] Roslyn Melookaran, Ammar Melaibari. *Materials and Design* [J], 2012, 35: 235
- [10] Huang Shu(黄舒), Zhou Jianzhong(周建忠), Jiang Suqin(蒋素琴) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2011, 38(08): 76
- [11] Zhou Lei(周磊), Li Yinghong(李应红), Zhai Xusheng(翟旭升) et al. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*(南京航空航天大学)[J], 2010, 42(3): 379
- [12] Li Wei(李伟), Li Yinghong(李应红), He Weifeng(何卫锋) et al. *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2008, 45(12): 15
- [13] Li Wei(李伟), He Weifeng(何卫锋), Li Yinghong(李应红) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2009, 36(8): 2197
- [14] Zhou Lei(周磊), Li Yinghong(李应红), Wang Chen(汪诚) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(6): 1093
- [15] He Weifeng(何卫锋), Li Yinghong(李应红), Nie Xiangfan(聂祥樊) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 40(6): 1093
- [16] Yan Hong(颜红), Hua Yinqun(花银群), Chen Ruifang(陈瑞芳) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2010, 37(S1): 364
- [17] Amar H, Vignal V, Krawiec H et al. *Corrosion Science*[J], 2011, 53: 3215
- [18] Hyuntaeck Lim, Pilkyu Kim. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212: 1347
- [19] Sano Y, Obata M. *Materials Science and Engineering*[J], 2006, 417(1-2): 334
- [20] Peyre P, Fabbro R. *Opt Quant Electron*[J], 1995, 27(12): 1213

- [21] Guo Jianting(郭建亭). *Materials Science and Engineering for Superalloys*(高温合金材料学)[M]. Beijing: Science Press, 232
- [22] Zhang Dingquan(张定铨), He Jiawen(何家文). *Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction and Its Functions*(材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999

Laser Shock Peening of GH4133 Nickel-based Superalloy

Li Yuqin, He Weifeng, Nie Xiangfan, Li jing, Chai Yan

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of laser shock peening (LSP) on the components suffering high temperature in work, the thermal stability of LSP effects on GH4133 nickel-based superalloy were studied. GH4133 nickel-based superalloy samples were treated by laser shock peening and laser shock peening+annealing separately. The thermal stability was examined by scanning electron microscopy (SEM), microhardness and residual stress tests. High-temperature fatigue of turbine blades was tested and the mechanism of fatigue life improvement was also discussed. Results show that high-amplitude residual compressive stress and grain refinement are generated, and precipitated phase of GH4133 alloy treated by LSP has a great impact on thermal stability for the refined grains. On the other hand, stress concentration slows up and distributes uniformly. Both of microstructure and residual compressive stress are propitious to fatigue life.

Key words: GH4133 nickel-based superalloy; laser shock peening; microstructure; residual stress; thermal stability

Corresponding author: Li Yuqin, Master, Lecturer, Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, P. R. China, Tel: 0086-29-84787527(610), E-mail: yuqin511@163.com