

深冷激光喷丸对 TC6 钛合金阻尼特性及 振动疲劳寿命的影响

黄宇, 周建忠*, 李京, 田绪亮, 孟宪凯, 黄舒

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为了研究深冷激光喷丸(CLP)对 TC6 钛合金阻尼特性及振动疲劳寿命的影响,分别在室温(25 °C)和深冷温度(-130 °C)条件下进行激光喷丸实验,然后采用透射电子显微镜(TEM)对激光喷丸处理前后试样的微观组织进行观察,采用频率响应法对试样的阻尼比进行测试,并采用液压振动疲劳测试系统对强化后的试样进行振动疲劳测试,分析 CLP 处理对试样阻尼特性的影响机制及其与疲劳寿命的关系,最后采用扫描电子显微镜(SEM)对试样的振动疲劳断口进行观察。结果表明:CLP 处理在试样表层产生了大量的位错和形变孪晶,可以有效提高 TC6 钛合金试样的阻尼比及振动疲劳寿命。

关键词 激光技术; 深冷激光喷丸; TC6 钛合金; 阻尼比; 振动疲劳; 孪晶

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402011

Effects of Cryogenic Laser Peening on Damping Characteristics and Vibration Fatigue Life of TC6 Titanium Alloy

Huang Yu, Zhou Jianzhong*, Li Jing, Tian Xuliang, Meng Xiankai, Huang Shu

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract To study the effects of cryogenic laser peening (CLP) on the damping characteristics and vibration fatigue life of TC6 titanium alloy, laser peening experiments at room temperature (25 °C) and cryogenic temperature (-130 °C) are performed in this study. Then, the microstructures of the samples prior and subsequent to laser peening are observed using transmission electron microscopy (TEM). The damping ratios of the samples prior and subsequent to the experiment are tested using the frequency response method. The vibration fatigue test of laser-peened samples is performed using the hydraulic vibration fatigue test system. The influence mechanism of CLP treatment on damping characteristics of the samples and its relationship with fatigue life are analyzed. Finally, the vibration fatigue fractures of the samples are observed using scanning electron microscopy (SEM). Results show that the CLP treatment can produce a large number of dislocations and deformation twins on the surface of the samples, effectively improving the damping ratio and vibration fatigue life of TC6 titanium alloy.

Key words laser technique; cryogenic laser peening; TC6 titanium alloy; damping ratio; vibration fatigue; twin crystal

OCIS codes 140.3580; 160.3900; 120.6780; 220.4610

1 引言

TC6 钛合金是 $\alpha+\beta$ 型双相钛合金,可在 400~450 °C 下长时间工作,具有良好的热加工性能和综合力学性能^[1-2],主要用于制造航空发动机的压气机盘和叶片。但是该合金易在服役环境和外界激励下

发生振动疲劳断裂失效,大大降低了零部件的使用寿命及安全性^[3]。

室温激光喷丸(RT-LP)是一种利用激光冲击波强化工程材料表面的技术^[4],可以显著改善材料的疲劳性能并提高其疲劳寿命,已被广泛应用于航空关键结构件的强化处理^[5-8]。何卫锋等^[9]研究了

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-19; 录用日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(51575247)

* E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

RT-LP 对 TC6 钛合金振动疲劳性能的影响, 结果表明, RT-LP 可以在材料表层诱导残余压应力及大量的高密度位错, 使得材料的疲劳强度得以显著增加。深冷激光喷丸 (CLP) 技术作为 RT-LP 技术的延伸, 不仅具有 RT-LP 技术的优点, 还创新性地融入了超低温 ($-196 \sim -130 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 处理技术。Ye 等^[10] 和 Hu 等^[11] 研究了 CLP 对无氧高导电 OFHC 铜材料性能的影响后发现, 超高应变率只有和低温共同作用下才会在铜中产生形变孪晶, 这说明深冷诱导的高孪晶成核驱动力和 LP 诱导的高流动应力的综合作用是形变孪晶形成的关键, 同时形变诱导的位错在晶界槽中的湮灭过程被抑制, 有利于形成更高的位错密度。由此可见, CLP 可以充分利用深冷处理和超高应变率形变强化的叠加效应, 更好地诱导高密度位错和形变孪晶的形成, 有望获得具有一定阻尼性能的高强度抗振表层材料, 从而有效提高结构零件的振动疲劳性能。

姚起杭等^[12] 在研究工程结构的振动疲劳问题时指出振动疲劳不仅与结构形式、材料有关, 还强烈地依赖于模态参数 (固有频率、振幅、相位、阻尼等), 其中阻尼是决定结构共振响应的重要因素。Damir 等^[13] 对疲劳寿命与模态参数之间的关系进行研究后发现, 疲劳寿命与阻尼比呈正相关, 并且模态测试可以作为一种无损伤的手段来量化表征材料的疲劳寿命。因此, 在不改变结构设计的前提下, 如何通过改善材料自身的阻尼特性来衰减振动能, 进而提高振动疲劳性能就显得尤为重要。Granato 等^[14] 于 1956 年提出了经典的位错钉扎阻尼理论, 该理论认为材料的阻尼性能与材料内部位错线在钉扎点之间的往复运动有着密切关系, 并且阻尼性能随着位错密度的增加而提高。Nishiyama 等^[15] 和 González-Martínez 等^[16] 研究了微观组织的变化对金属阻尼的影响, 结果发现, 材料的位错和形变孪晶等微观组织与材料的阻尼性能之间具有一定的关联性。Watanabe 等^[17] 研究了预先存在的孪晶对挤压纯镁

阻尼性能的影响, 结果表明, 预先存在的孪晶交替收缩和生长对阻尼有很大影响。Cui 等^[18] 研究了孪晶界对镁合金阻尼性能的影响, 结果表明, 孪晶界的往复运动对阻尼性能的提高起到了非常重要的作用。可见, 从孪晶界和位错角度研究阻尼和疲劳寿命的增益是非常有必要的。

本文以 TC6 钛合金为研究对象, 研究了 CLP 对材料微观组织、金属阻尼、振动疲劳寿命的影响规律, 进而探索了 CLP 处理的微观强化机制。

2 材料与实验

2.1 材料及试样

实验用材料为 TC6 钛合金, 其化学成分和力学性能如表 1~2 所示。使用线切割机将实验材料加工成振动疲劳试样, 如图 1 所示。用水砂纸打磨待喷丸处理的表面, 随后用粒度为 $1.5 \sim 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石研磨膏在金相磨抛机上对待喷丸表面进行抛光处理, 保证表面粗糙度保持在 $0.05 \text{ }\mu\text{m}$ 。最后, 用无水乙醇对试样进行清洗, 并用吹风机吹干备用。

表 1 TC6 钛合金的化学成分

Element	Mass fraction / %
Al	6.21
Cr	1.42
Fe	0.41
Mo	2.70
Si	0.32

表 2 TC6 钛合金的力学性能

Mechanical property	Value
Tensile strength / MPa	970
Yield strength / MPa	860
Elongation / %	23
Elasticity modulus / GPa	110
Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	4560

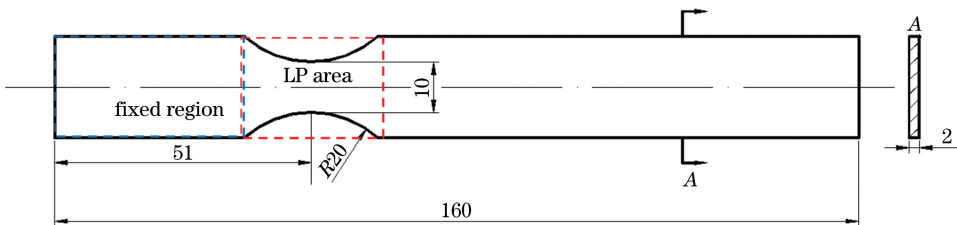
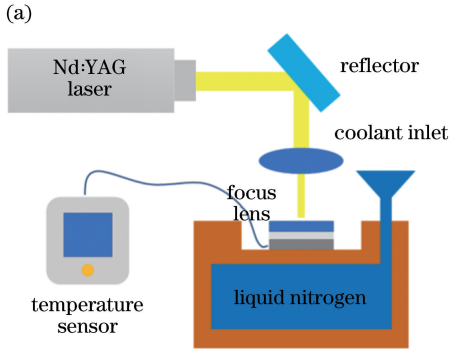


图 1 振动试样的尺寸及激光喷丸区域

Fig. 1 Vibration sample size and laser peening area

2.2 RT-LP 和 CLP 实验

在现有激光冲击系统上加入 CLP 专用夹具,并通入液氮,如图 2 所示,采用热传导的方式将试样温度控制在 $(-130 \pm 2)^\circ\text{C}$,并在此温度下对试样进行 CLP 实验。实验使用德国 INNOLAS 公司生产的



SpitLight 2000 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器,波长为 1064 nm,脉宽为 8 ns,选择激光能量为 1.8 J,光斑直径为 1 mm,搭接率为 50%。选用 0.12 mm 厚的铝箔作为吸收层,约束层采用 3 mm 厚的 K9 玻璃。

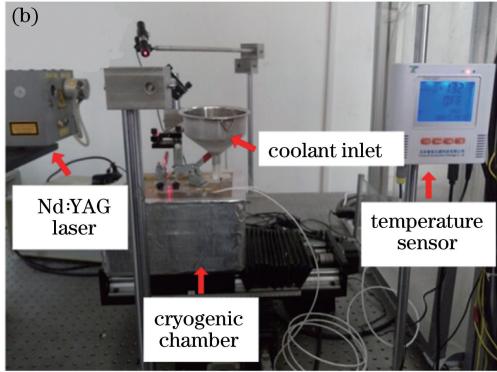


图 2 CLP 实验系统。(a)示意图;(b)实验装置图

Fig. 2 CLP test system. (a) Schematic; (b) experimental device

2.3 微观组织观察

为了分析 CLP 对 TC6 钛合金显微组织的影响,本文开展透射电镜(TEM)检测。TEM 试样的制备过程如下:首先将试样线切割成厚度约为 0.5 mm 的薄片,然后用金相砂纸将薄片抛光至约 80 μm 厚,最后采用离子抛光至产生大面积薄区后置于 TEM 下进行观察。

2.4 阻尼比及疲劳寿命检测实验

CLP 试样的振动阻尼比通过频率响应法测得,测试使用的仪器为 PCB-084A17 迷你力锤和 DH132 加速度传感器。每个试样测试 8 次,取平均值进行数据分析,以减小误差。使用 DC-300-3 电磁振动台测试试样的振动疲劳特性,频率范围为 5~5000 Hz,最大加速度为 9.8 m/s^2 。为了研究 CLP 前后试样在固有频率下的振动疲劳特性,使用振动系统的正弦扫描模式获得振动试样的一阶固有频率。在振动疲劳实验期间,每 10^5 个循环后测试试样的一阶固有频率,并将该值设定为下一阶段实验的激励频率,每个试样测试 5 次,取平均值进行数据分析,以减小误差。

3 结果与讨论

3.1 TEM 测试分析

图 3 为 RT-LP 和 CLP 试样表面的微观结构。对比图 3(a)与图 3(c)可以发现:CLP 试样的晶粒尺寸相对 RT-LP 试样进一步减小,产生了更为明显的晶粒细化效果;RT-LP 试样的表层主要以尺寸较大

的位错胞和亚晶为主,而 CLP 试样的表层明显以尺寸更小的位错胞、堆积聚集的网状位错及细化后的晶粒为主。对位错的局部进行放大,结果如图 3(b)和图 3(d)所示,可见:RT-LP 试样中的位错密度有了一定程度的提高,而 CLP 试样内部则产生了更高密度的位错结构,而且较高密度的位错相互聚集堆积,形成了复杂的位错网、位错墙、位错胞等结构。另外,相对于 RT-LP,CLP 试样表层还产生了形变孪晶,在形变孪晶内部及周围分布着一些网状位错结构,形变孪晶和位错相间分布于试样表面,如图 4 所示。

3.2 振动疲劳特性分析

3.2.1 阻尼比和振动疲劳寿命

未处理试样、RT-LP 试样及 CLP 试样的阻尼比如图 5 所示。RT-LP 和 CLP 试样的阻尼比分别为 1.917% 和 2.297%,与未处理试样(1.743%)相比,分别提升了 9.9% 和 31.7%,CLP 试样相对于 RT-LP 试样的阻尼比也有 19.7% 的增幅。

不同试样的疲劳寿命如图 6 所示:未处理试样、RT-LP 试样及 CLP 试样的振动疲劳寿命分别为 7.83×10^5 , 13.46×10^5 , 17.24×10^5 cycle,RT-LP 试样及 CLP 试样的振动疲劳寿命较未处理试样分别增加了 71.9% 和 120.2%,而 CLP 试样相对于 RT-LP 试样也增加了 28.1%。可以看出,无论是阻尼比还是振动疲劳寿命,CLP 相对于 RT-LP 处理都有一个更大幅度的提升,尤其是疲劳寿命,CLP 处理后试样疲劳寿命的增幅约为 RT-LP 处理后增幅的 2 倍。

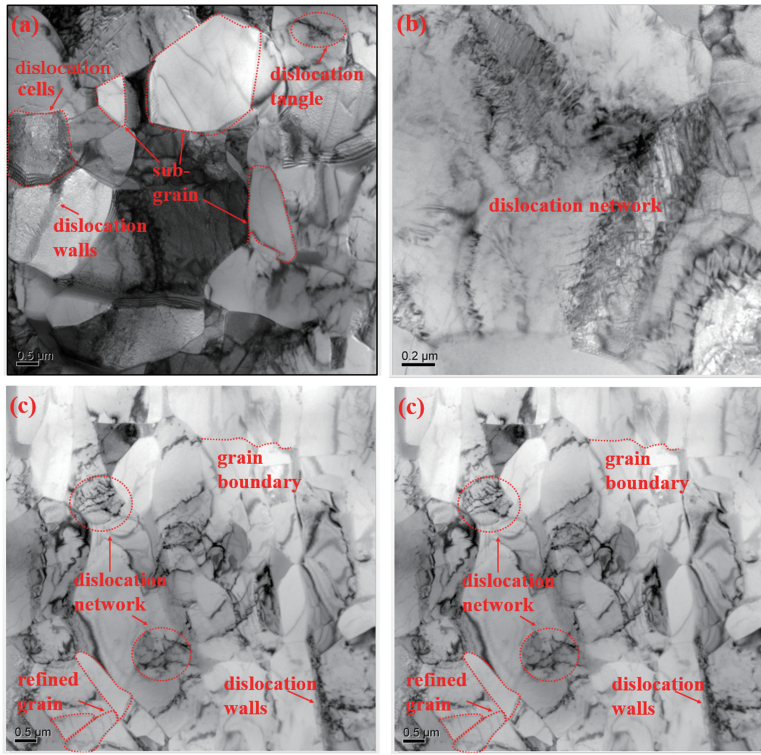


图 3 不同处理方式下试样的微观结构。(a)(b) RT-LP; (c)(d) CLP

Fig. 3 Microstructures of specimen at different treatment methods. (a)(b) RT-LP; (c)(d) CLP

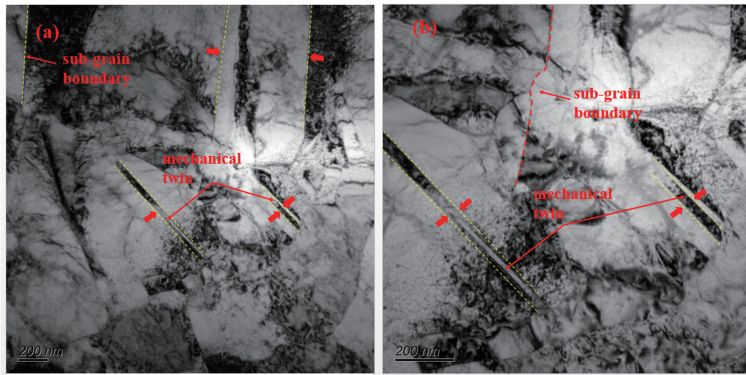


图 4 CLP 试样表面的 TEM 照片

Fig. 4 TEM photos of specimen surface treated by CLP

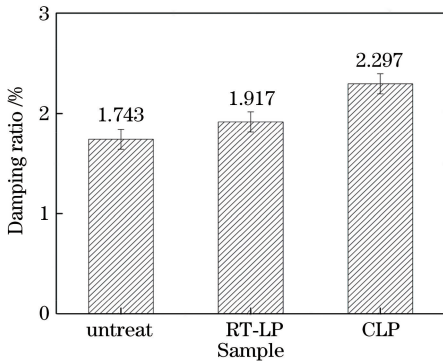


图 5 不同试样的一阶阻尼比

Fig. 5 First-order damping ratio of specimens treated by different modes

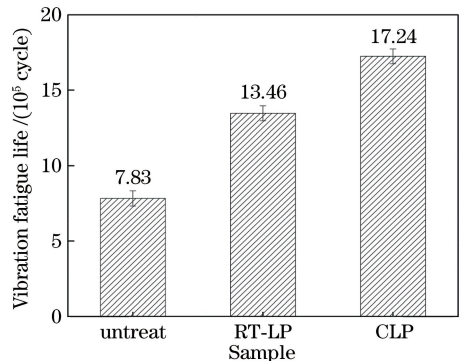


图 6 不同试样的振动疲劳寿命

Fig. 6 Fatigue life of vibration specimens treated by different modes

3.2.2 疲劳断口

为了更好地分析疲劳寿命变化的原因,采用扫描电子显微镜(SEM)观察了振动疲劳断口的形貌。图7给出了不同试样的振动疲劳裂纹扩展区的断裂形态(其中FCG path表示疲劳裂纹扩展路径),可以清楚地发现试样疲劳裂纹的扩展方向,并且在所有试样的疲劳断裂扩展区域上也发现了明显的疲劳条纹。疲劳条纹可以用于表征断裂过程中疲劳裂纹的扩展速率,理想的断裂疲劳条纹对应于裂纹萌生

后的疲劳循环。因此,疲劳条纹的数量可以反映疲劳寿命,同时疲劳条纹间距可以有效地反映疲劳载荷下裂纹的扩展速率。计算后可知,未处理试样疲劳条纹的平均间距为 $0.35\ \mu\text{m}$,RT-LP试样和CLP试样疲劳条纹的平均间距分别为 $0.27\ \mu\text{m}$ 和 $0.21\ \mu\text{m}$ 。可以看出,这三种试样振动疲劳条纹的平均间距依次减小,这表示它们的裂纹扩展速率依次降低,也意味着RT-LP处理和CLP处理后试样的疲劳寿命得以增加。

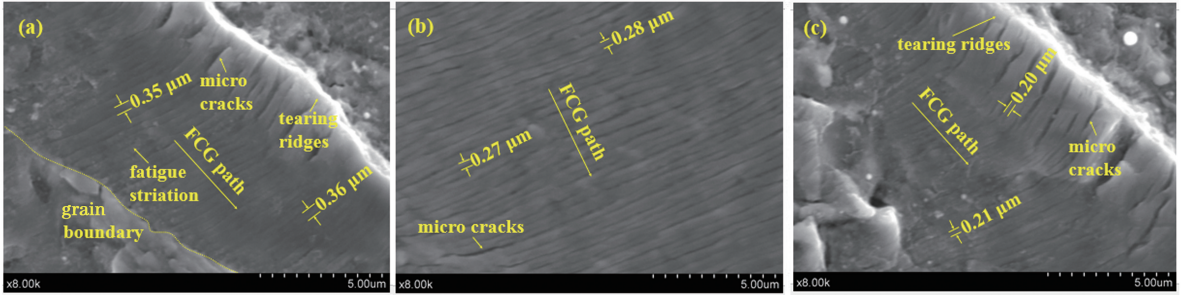


图7 振动疲劳裂纹扩展区的断裂形态。(a)未处理试样;(b)RT-LP试样;(c)CLP试样

Fig. 7 Fracture morphology of vibration fatigue crack propagation zone.

(a) Untreated specimen; (b) RT-LP specimen; (c) CLP specimen

另外,图8显示了未处理试样、RT-LP试样和CLP试样的瞬断区形貌,可以看出:瞬断区主要表现为韧窝形貌,呈现微孔聚集型特点;未喷丸处理的TC6钛合金试样中的韧窝主要呈等轴状,尺寸也比较均匀,RT-LP试样断口上的韧窝尺寸较大,CLP试样断口上的韧窝尺寸则更大。另外,在部分大韧窝中发现有少量夹杂颗粒,这说明夹杂颗粒是TC6钛合金试样疲劳裂纹扩展的原因之一。分析认为,

TC6钛合金在经过RT-LP和CLP处理后,试样内部的某些区域会受到复杂的应力作用,从而使得振动试样的瞬断区表现出不同的形状以及尺寸不一致的韧窝,这说明激光喷丸试样在经受了较大的塑性变形后才最终发生断裂,且CLP试样在断裂前的塑性变形更大。在相同的载荷条件下,更大的塑性变形代表着更长的加载时间,也意味着更长的疲劳寿命。

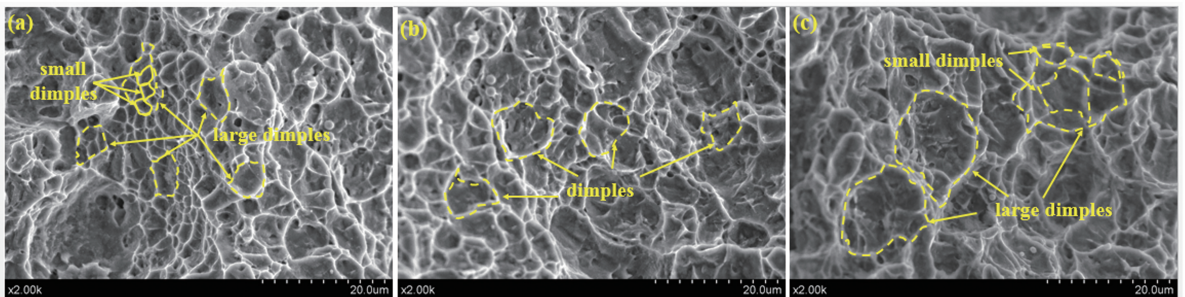


图8 不同试样的瞬断区形貌。(a)未处理试样;(b)RT-LP试样;(c)CLP试样

Fig. 8 Instantaneous zone morphology of different specimens. (a) Untreated sample;

(b) RT-LP specimen; (c) CLP specimen

3.3 强化机制

3.3.1 CLP对微观组织的影响

材料塑性变形引起的位错扩散可以表示为两个部分^[19],即

$$\frac{d_{\rho}}{d_{\epsilon}} = \frac{d_{\rho}}{d_{\epsilon}} \Big|_{pr} + \frac{d_{\rho}}{d_{\epsilon}} \Big|_{re}, \quad (1)$$

式中: $\frac{d_{\rho}}{d_{\epsilon}} \Big|_{pr}$ 表示由加工硬化引起的位错扩散; $\frac{d_{\rho}}{d_{\epsilon}} \Big|_{re}$ 表示由热激活过程引起的位错湮灭。从(1)式可以看出,位错密度是位错扩散和动态回复之间平衡的结果。在RT-LP过程中,激光冲击波产生的高强度压力使材料表面发生严重的塑性变形,并且在表层

上形成了高密度位错,当温度达到热激活阈值时,一些原本固定在一起的位错结构将发生移动,并在位错滑移过程中,异号位错相遇发生湮灭,同号位错发生重排,导致位错密度降低。而在 CLP 过程中,深冷温度除了可以引发体积收缩效应使材料内部产生更大的流动应力提高位错密度以外,还可以提高位错的激活能,抑制动态回复过程,从而保留下大量的位错,因此 CLP 处理后的试样主要以尺寸更小的位错胞、堆积聚集的网状位错为主。另外,由于深冷温度的抑制效应,位错不容易聚集成团,大的位错胞不易形成,因此 CLP 试样中局部位错密度非常高的区域经过动态回复后所形成的晶粒也较小。此外,超低温还可以导致金属材料的变形储能以及塑性变形后动态再结晶过程中的晶核数量增加,这对晶粒的细化也有重要影响^[10]。

另外,对于主要为密排六方结构的 TC6 钛合金,其位错滑移时的流动应力可以表示为^[20]

$$\sigma = \sigma_g + k_H d^{-1/2} + B \exp[-(\beta_0 - \beta_1 \ln \dot{\epsilon}) T] + B_0 \epsilon^{1/2} \exp[-(\alpha_0 - \alpha_1 \ln \dot{\epsilon}) T], \quad (2)$$

式中: σ_g 代表溶质和初始位错密度的贡献(MPa); k_H 代表微结构应力强度; d 代表平均晶粒尺寸(μm); ϵ 代表塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 代表应变率; T 代表热力学温度(K); B 、 B_0 、 β_0 、 β_1 、 α_0 和 α_1 均为材料常数。从(2)式可以明显看出低温和超高应变率能够在材料内部形成更高的流动应力,而形成形变孪晶所需要的临界应力随着温度保持不变^[21],因此深冷温度和超高应变的耦合更有利于 TC6 钛合金这种层错能较高的合金中形成形变孪晶,这也是在 CLP 试样中更容易发现大量形变孪晶的原因。

3.3.2 阻尼比增益机制

Granato^[14]等建立和完善了钉扎位错弦理论模型(G-L)理论,该理论从位错的角度系统性地解释了阻尼产生的原因。根据其观点,在可动位错段脱钉与收缩过程中,位错形态会发生变化,从而产生内部摩擦,导致很多振动的机械能在这一过程被消耗,并且材料的阻尼随着可动位错密度的增加而增大。结合微观组织分析可知,CLP 处理和 RT-LP 处理都提高了材料的位错密度,与此同时,可动位错密度也在这一过程中得以提高,因此,材料内部的点缺陷对位错的钉扎效应增强,形成了弱钉点与强钉点等交互作用的复杂阵列结构,正是这些可动位错在弱钉点和强钉点之间的往复运动,消耗了机械能,抑制和削弱了振幅,进而提高了金属阻尼。相对于 RT-LP 试样,CLP 试样中的可动位错密度更高,可动位

错段在材料内部发生脱钉和运动的概率也更高,因此 CLP 试样的阻尼比要明显高于 RT-LP 试样。

除此之外,孪晶也是影响材料阻尼的重要因素。Cui^[22]等提出了公式

$$Q_{\text{tot}}^{-1} = Q_{\text{dis}}^{-1}(\mu_1, \epsilon, f) + Q_{\text{twin}}^{-1}(\mu_2, \epsilon, f), \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{dis}}^{-1}(\mu_1, \epsilon, f)$ 表示由位错运动产生的阻尼增益; $Q_{\text{twin}}^{-1}(\mu_2, \epsilon, f)$ 表示由孪晶界运动所产生的阻尼增益; μ_1 、 μ_2 分别对应的是位错运动和孪晶运动的 Schmid 因子; f 为振动频率(Hz)。可以看出,材料阻尼性能的增益不仅与位错有关,还与孪晶界运动有关。在周期性往复载荷作用下运动的不仅有强钉点和弱钉点之间的可动位错段,而且当材料内部应力达到孪晶生长阈值时,孪晶也会随着周期性地生长和收缩,而伴随孪晶生长和收缩的孪晶界就会在这一过程中周期性地往复运动^[18]。孪晶界的往复运动使得材料的内部发生摩擦,进而产生内耗,最终增加了阻尼性能^[17]。与此同时,更多的可移动位错从孪晶边界发散,也有效地吸收了振动能量并增强了阻尼^[23-25]。结合本研究可知,相对于 RT-LP, CLP 处理除了会大幅增加材料内部可动位错的密度外,还会使 TC6 钛合金内部产生大量的形变孪晶,正是这些形变孪晶与高密度可动位错的综合作用消耗了外界传递来的机械能,从而提升了 CLP 强化试样的阻尼比。

3.3.3 疲劳寿命增益机制

一方面,位错密度的提升增加了可动位错的密度,提高了材料的阻尼性能;另一方面,交织缠绕在一起的高密度位错与亚晶界的交互作用也在很大程度上提升 TC6 钛合金的强度及塑性。理论上,合金的塑性变形抗力与晶粒尺寸、位错密度之间的关系为^[26]

$$\sigma_s = \sigma_0 + k (d_f)^{-1/2} + \alpha G |\mathbf{b}| \rho^{1/2}, \quad (4)$$

式中: σ_s 为塑性变形抗力(MPa); σ_0 为摩擦力(MPa); k 为 Hall-Petch 常数; d_f 为位错的平均自由程(μm),可以等效于晶粒的平均尺寸; α 为常数; G 为剪切模量(MPa); \mathbf{b} 是柏氏矢量; ρ 为位错密度。从(4)式可以看出,合金的变形抗力随着晶粒尺寸的降低和位错密度的增加而增大。另外,孪晶界不仅可以阻碍位错运动,还可以为位错成核提供位置,从而提高了材料的强度和塑性^[10,17]。从图 3 中可以看到大量位错积聚在孪晶两侧。正是这些存在于材料表层的孪晶和位错以及 CLP 所产生的晶粒细化效果,提升了 TC6 钛合金的综合力学性能,进而提升了它的疲劳寿命。另外,材料阻尼的增加也

能改善材料的疲劳行为,这是因为高阻尼使外部能量在内部耗散,从而降低了部件的共振效应,与此同时也消耗了机械能,从而使能量不易积聚,因此系统内部的应力能够维持在一个相对较低的区间,从而延缓了疲劳破坏,增加了疲劳寿命。

4 结 论

相对于 RT-LP 处理,CLP 处理诱导的更高的流动应力产生了更高密度的位错,进一步细化了 TC6 钛合金材料的晶粒,同时在材料内部产生了大量的形变孪晶。

RT-LP 及 CLP 试样的疲劳寿命较未处理试样分别增加了 71.9% 和 120.2%。CLP 强化使试样断口处的疲劳条纹间距进一步减小,韧窝进一步加深。

RT-LP 及 CLP 处理试样的阻尼比较未处理试样分别提升了 9.9% 和 31.7%。CLP 处理产生的更高密度的可动位错以及孪晶界随着外部振动的往复运动消耗了机械能,产生了内耗,提升了试样的阻尼性能。

CLP 对 TC6 钛合金具有更好的晶粒细化效果,有利于提升材料的综合力学性能。另外,阻尼性能的提升使得试样内部的能量不易积聚形成高幅值的内部应力,最终使得 TC6 钛合金振动试样的疲劳寿命得以提升。

参 考 文 献

- [1] Xu Y, Xiang W L, Yang H B, et al. Dynamic fracture mechanism of TC6 titanium alloy with binary morphologies [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(8): 1924-1927.
徐媛, 向文丽, 杨红斌, 等. TC6 钛合金动态断裂机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(8): 1924-1927.
- [2] Li X X, Xia C Q, Qi Y L, et al. Tensile creep behavior at high temperature of TC6 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(9): 1901-1904.
李学雄, 夏长清, 戚延龄, 等. TC6 钛合金的高温拉伸蠕变行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(9): 1901-1904.
- [3] Lalanne C. Mechanical vibration and shock analysis: volume 3: random vibration [J]. *Caries Research*, 2003, 37(2): 125-129.
- [4] Zhou J Z, Li J, Huang S, et al. Influence of cryogenic treatment prior to laser peening on mechanical properties and microstructural characteristics of TC6 titanium alloy [J]. *Materials*

- Science and Engineering: A*, 2018, 718: 207-215.
- [5] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- [6] Chu J P, Rigsbee J M, Banaś G, et al. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 260(1/2): 260-268.
- [7] Montross C. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [8] Tian X L, Zhou J Z, Li J, et al. Effect of cryogenic laser peening on microstructure of 2024-T351 aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902004.
田绪亮, 周建忠, 李京, 等. 深冷激光喷丸强化对 2024-T351 铝合金微观组织的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902004.
- [9] He W F, Li Y H, Li Q P, et al. Vibration fatigue performance and strengthening mechanism of TC6 titanium alloy by laser shock peening [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(8): 1643-1648.
何卫锋, 李应红, 李启鹏, 等. LSP 提高 TC6 钛合金振动疲劳性能及强化机理研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(8): 1643-1648.
- [10] Ye C, Suslov S, Lin D, et al. Cryogenic ultrahigh strain rate deformation induced hybrid nanotwinned microstructure for high strength and high ductility [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(21): 213519.
- [11] Hu J, Shi Y N, Sauvage X, et al. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals [J]. *Science*, 2017, 355(6331): 1292-1296.
- [12] Yao Q H, Yao J. Vibration fatigue in engineering structures [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2006, 23(1): 12-15.
姚起航, 姚军. 工程结构的振动疲劳问题 [J]. *应用力学学报*, 2006, 23(1): 12-15.
- [13] Damir A, Elkhatib A, Nassef G. Prediction of fatigue life using modal analysis for grey and ductile cast iron [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(3): 499-507.
- [14] Granato A, Lücke K. Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(6): 583-593.
- [15] Nishiyama K, Matsui R, Ikeda Y, et al. Damping properties of a sintered Mg-Cu-Mn alloy [J]. *Journal*

- of Alloys and Compounds, 2003, 355(1/2): 22-25.
- [16] González-Martínez R, Göken J, Letzig D, et al. Influence of aging on damping of the magnesium-aluminium-zinc series [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 437(1/2): 127-132.
- [17] Watanabe H, Sasakura Y, Ikeo N, et al. Effect of deformation twins on damping capacity in extruded pure magnesium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 626: 60-64.
- [18] Cui Y J, Li Y P, Sun S H, et al. Enhanced damping capacity of magnesium alloys by tensile twin boundaries[J]. Scripta Materialia, 2015, 101: 8-11.
- [19] Picu R C, Majorell A. Mechanical behavior of Ti-6Al-4V at high and moderate temperatures: Part II: constitutive modeling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 326(2): 306-316.
- [20] Zerilli F J. Dislocation mechanics-based constitutive equations [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(9): 2547-2555.
- [21] Ye C, Suslov S, Lin D, et al. Microstructure and mechanical properties of copper subjected to cryogenic laser shock peening[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(8): 083504.
- [22] Cui Y J, Li J X, Li Y P, et al. Damping capacity of pre-compressed magnesium alloys after annealing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 708: 104-109.
- [23] Somekawa H, Watanabe H, Basha D A, et al. Effect of twin boundary segregation on damping properties in magnesium alloy [J]. Scripta Materialia, 2017, 129: 35-38.
- [24] Lu J Z, Wu L J, Sun G F, et al. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts [J]. Acta Materialia, 2017, 127: 252-266.
- [25] Saren A, Ullakko K. Dynamic twinning stress and viscous-like damping of twin boundary motion in magnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga[J]. Scripta Materialia, 2017, 139: 126-129.
- [26] Li J, Zhou J Z, Feng A X, et al. Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 734: 291-298.