温辅助激光冲击强化技术原理与应用研究*

赵吉宾[1,2]，陆　莹[1,2]，乔红超[1,2]，孙博宇[1,2]
（1. 中国科学院沈阳自动化研究所，沈阳 110016；
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院，沈阳 110169）

[摘要] 介绍了温辅助激光冲击强化技术原理与特征，针对目前工程应用存在的问题，通过总结国内外研究现状与学术成果，从高温交变载荷作用下残余应力释放和组织失稳两方面，分析激光冲击强化诱导组织应力失稳机制。分析了激光冲击强化基础上辅助热源（WLSP），可促进激光冲击强化（LSP）过程中发生动态应变时效和动态析出，在致密位错周围析出弥散分布的强化相，而强化相进一步钉扎位错形成气团，显著提高材料的高温组织稳定性和抗蠕变性能，并对温辅激光冲击强化未来的发展趋势进行了展望。

关键词： 温辅助激光冲击强化；残余应力释放；组织失稳；抗蠕变性能；强化相
DOI:10.16080/j.issn1671–833x.2019.21.034

赵吉宾

博士，研究员，博士生导师，研究方向为数控加工技术，增材制造与激光加工技术，数字化设计与制造、视觉测量、CAD/CAM等。发表学术论文160余篇，其中EI收录100余篇，SCI收录40余篇；申请和授予专利50余项和软件注册版权20项；获辽宁省技术发明二等奖和国防科技二等奖各一项，辽宁省科技进步和技术发明三等奖各一项。

激光冲击强化（Laser Shock Peening，LSP）是一种新近发展的表面强化技术，其通过激光诱导产生等离子体冲击波轰击金属表面，在极短时间内，使其表面产生超高应变率的塑性变形，改善材料微观结构，表面生成加工硬化层和残余压应力层，可有效抑制高周疲劳裂纹萌生和扩展，从而达到改善抗疲劳性能的目的[1–7]。与传统的表面强化手段相比，激光冲击强化具有可控性强、非接触、适用性好等优越性能，不仅可以在表面形成厚度超过1mm的残余应力层，提高疲劳寿命，还可在其表面引入致密的晶粒细化（甚至纳米晶）形变层，从而有效地提高零件的硬度、强度、耐磨性和耐腐蚀性[5–6]，且相比于喷丸强化，激光冲击强化对零件表面粗糙度的影响较小，可确保工件的几何精度和性能要求。鉴于上述诸多优点，激光冲击强化近20年来得到了快速发展，并已经进入了工业应用阶段[7–8]。20世纪70年代，美国首先开展了激光冲击强化试验研究，发现其可以有效提高材料硬度、强度和疲劳性能，具有良好的技术发展前景。1994年，针对航空发动机高周疲劳断裂问题，美国开始实施“高周疲劳科学和技术计划”，美国阿拉巴马大学、利弗莫尔实验室、美国激光冲击强化技术公司（LSPT）开发一体化激光冲击强化设备，实现了针对航空发动机叶片/叶盘、机翼等飞机结构件的激光冲击强化，并在GE、空客、波音、罗罗、普惠等公司实现了工业应用。由于遭遇国外相关技术的封锁，国内相关研究起步较晚，但经过江苏大学、中国航空制造技术研究院、西

* **基金项目：**国家自然科学基金（51875558）。

安空军工程大学、中国科学院沈阳自动化研究所等国内相关院所的不懈努力，基础研究领域取得了很大的进展[8–10]。其中，中国航空制造技术研究院2010年开始整体叶盘强化设备研发，并先后开发了12J和30J激光冲击强化设备；中国科学院沈阳自动化研究所开发了可用于航空发动机整体叶盘工业生产的自动化激光冲击强化装备，已投入生产。

随着航空工业的发展，对航空发动机核心零部件的寿命和耐久性等各项指标的要求也越来越高，特别是对于航空发动机热端部件。比如航空发动机涡轮叶片等关键零部件的结构和形状复杂，工作环境也更为恶劣。因此，围绕高温部件组织性能维稳等的深层次问题便日渐凸显出来，迫切需要找到一种有效抑制高温下应力/组织失效的激光冲击强化方法，经过大量的研究发现，温辅助下的激光冲击强化可显著提高高温环境下组织应力的稳定性。

激光冲击强化应力失效原因分析

激光冲击强化技术是利用激光诱导的等离子体爆轰波对靶材冲击的表面改性处理工艺，等离子体冲击波作用下，在靶材表面发生高应变率的塑性变形以形成残余压应力场，其本质是金属表面晶格畸变程度增加、位错组态复杂化的结果[11–14]。塑性变形可以改变金属的组织结构，这种塑性变形主要以位错运动和位错孪晶两种方式形成[15–17]。激光诱导冲击波可以使材料发生超高应变率的塑性变形，强烈的塑性变形会引发材料微观组织、结构、晶界等剧烈变化，导致晶粒细化甚至纳米化，由于塑性变形后靶材的结构缺陷密度增加，晶格畸变能升高，其微观组织结构处于热力学亚稳定、高自由能状态，晶体本身具有自发恢复到变形前低自由能状态的趋势的特征，但是在高温状态下长时间工作，高温回火导致晶粒不断粗化，位错密度降低[18–22]。因此，激光冲击强化处理后形成的残余压应力和微观组织结构在热力循环作用下非常容易发生应力松弛和组织退化。

残余压应力与晶体缺陷密度的减小将导致激光冲击强化效能下降乃至完全失效[22–26]，这将严重限制激光冲击强化技术在高温端部件的推广应用，也成为了很多航空关键零部件加工制造工艺的瓶颈。因此，提高激光冲击强化高温稳定性是亟需解决的重要技术难题。为了解决上述难题，很多学者提出不同的辅助手段来稳固激光冲击强化效果，使其适用于高温高压端零部件，其中温辅助激光冲击强化成为一种公认的激光冲击强化高温组织应力维稳效果明显的新方法。

温辅激光冲击强化技术研究现状

2010年，美国普渡大学研究人员[27–28]报道了提高激光冲击强化稳定性的方法——温辅助激光冲击强化(WLSP)，即在激光冲击强化基础上辅助热源，促进激光冲击强化(LSP)过程中发生动态应变时效(DSA)和动态析出(DP)，在致密位错周围析出弥散分布的强化相，强化相进一步钉扎位错形成气团，位错与析出相交互作用，进而显著提高材料的高温组织稳定性和抗蠕变性能，其工作原理如图1所示。WLSP是一种新型的热力耦合表面强化方法，需要先将工件加热到一定温度后再进行激光冲击强化[29]。

温辅助激光冲击强化WLSP综合了LSP、动态应变时效(DSA)和动态析出(DP)的优点：LSP通过使材料发生超高应变率的塑性变形，得到较大、较深的残余压应力层和位错、亚晶等高密度晶体缺陷；应变时效DSA通过扩散溶质原子和移动位错之间的相互作用来促进位错的增殖，得到更加均匀位错组态和高密度的位错结构[30]；动态析出DP通过变形过程中析出物的形核，获得高密度的纳米级析出相，析出相与位错之间的弹性相互作用可以阻碍相邻位错的运动，诱发位错钉扎效应，这种独特的微观结构可以有效提高LSP的应力/组织的高温稳定性[28]。

1 温辅助激光冲击强化力学测试

Ye等[28]对Ti6Al4V钛合金分别进行了LSP和WLSP处理，并对比分析了两种工艺方法下，材料微观组织与力学性能的变化情况，主要包括残余应力松弛、微观结构变化，以及应力组织变化对其疲劳性能的影响规律。结果如图2和3所示，可以看出，与激光冲击强化试验样件相比，温辅助激光冲击强化样件具有更好的残余应力高温循环稳定性，而且其疲劳强度和疲劳寿命更高，说明该方法可以有效提高疲劳寿命，抑制疲劳裂纹的萌生和扩展[29]。

随后，Liao等[29]在20~410℃对镍基高温合金进行温辅冲击强化试验研究发现，温辅助激光冲击强化不仅能够提高残余应力的高温稳定性和高温疲劳强度，而且可以获得更加稳定的位错结构，高温循环屈服强度和抗拉强度提高，有效抑制高温疲劳裂纹的萌生，疲劳寿命的高温稳定性大幅提高。Zhao等[30]研究了温辅助激光冲击强化对镍合金疲劳寿命的影响，并验证了WLSP方法对提高高温高周疲劳寿命，抑制疲劳裂纹产生有显著的效果。陆莹等[31]利

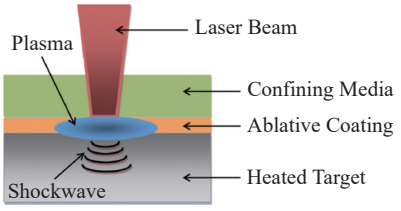


图1 温辅助激光冲击强化作用机制

Fig.1 Mechanism of warm laser shock peening

用 WLSP 对 TC17 钛合金激光冲击强化高温交变载荷下残余应力释放效果进行初步探索，发现 WLSP 试验件获得的残余压应力和疲劳寿命得到改善，位错密度显著提高，通过 600℃ 高温时效对比发现，高温条件下的残余应力和表面强度的稳定性显著提高 [32]。

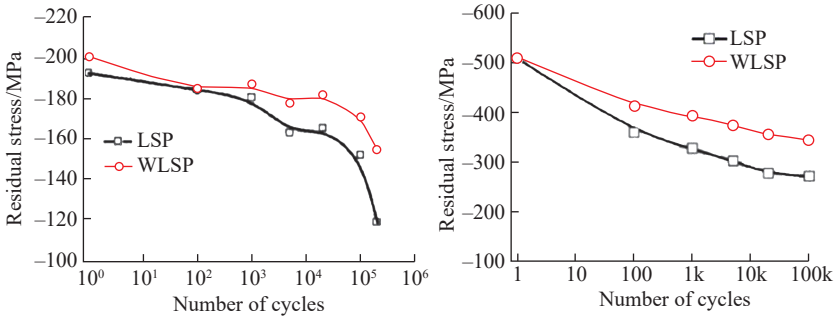
2 温辅助激光冲击强化微观组态分析

Wu[33] 比较了 LSP 和 WLSP 处理后 AISI 4140 钢的微观结构，如图 4 所示，可以看出 LSP 处理后 AISI 4140 钢材料内部产生了高密度位错，主要以位错堆积的形态存在，WLSP 处理后材料内部也产生了高密度位错，则主要以位错缠结的形态存在，其分布更加均匀。该团队在研究 6061–T6 铝合金温辅助激光冲击强化时发现，表面析出纳米沉淀相，并引入高密度的位错排列，大幅度提高了疲劳载荷条件下的使用寿命，并提出了高温激光冲击强化诱导纳米析出物形核理论 [29–30]。而后针对 AISI 4140 钢进行激光冲击温强化，发现该过程引入更为复杂的位错形态，高密度的位错密度和复杂的位错缠结，表面发生动态应变时效对强化过程中微观组织变化和残余应力维稳起到积极作用，极大提高了高温及交变载荷条件下的疲劳寿命。WLSP 增加了位错密度和起到钉扎作用的碳原子数，形成稳定的位错结构。WLSP 处理后材料内部还生成了大量的析出物，其尺寸大约为 10nm，纳米级析出物分布在高密度位错周围，可以有效阻碍位错运动，增强位错钉扎效应，提高其稳定性 [33]。

Wu 等 [33] 研究发现，镍基合金中的固溶原子在 173~473℃ 内的扩散行为将诱发动态时效效应，由于析出物对位错的钉扎效应以及位错增殖效应，在此温度进行强度会诱导产生更高的位错密度，同时强化导致的材料表面的塑性变形促使大量空位的出现，而温辅助保温过程中空位原子对向缺陷处扩散从而降低系统能量，引起 Nb 的非平衡偏聚，增加 γ″ 相的形核位置，从而提高强化层内的 γ″ 相的形核率 [34]。

近年来，Nie 等 [35] 发现镍基合金在温辅激光冲击强化过程中会有一定数量的 γ″ 强化相的析出，析出相的数量和分布可反映高温软化抗性，以及高温蠕变抗性的大小，γ″ 相与基体相具有很大的晶格错配度，位错运动阻力增加，而且残余应力的高温释放行为主要归因于材料的高温软化，可证明 γ″ 相的多少与残余应力高温释放行为紧密相关。γ″ 相体积分数增加，意味着质点间距的减小。对镍基 NI718 合金的研究发现，γ″ 相的析出量与高温软化抗性和高温蠕变抗性大小存在对应关系，γ′ 相大量存在使激光冲击强化区在高温中具有高的软化抗性 [36–38]。

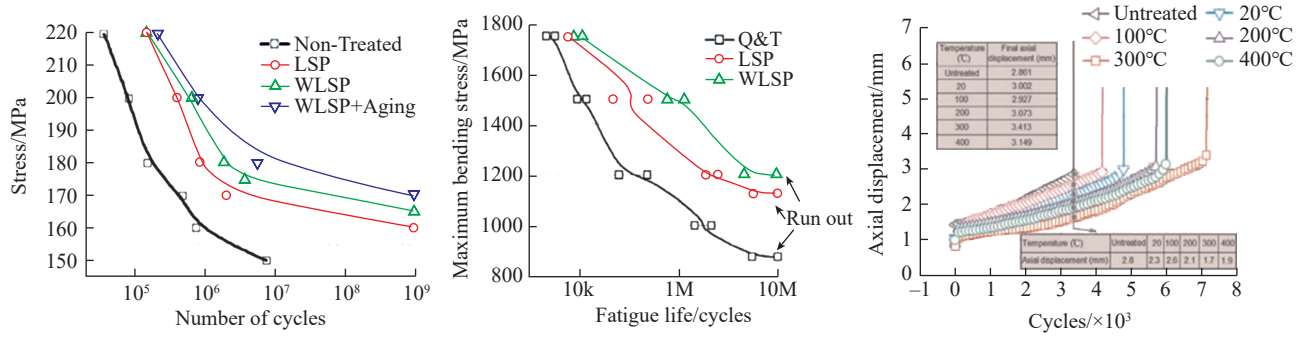
中国科学院沈阳自动化研究所激光冲击强化团队在研究镍基高温合金温辅助激光冲击强化的过程中，发现了一定数量的二次 γ″ 相析出，研究了析出相数量与形核激活能、位



（a）AA6061　　（b）AISI 4140

图2　WLSP提高压缩残余应力的循环稳定性

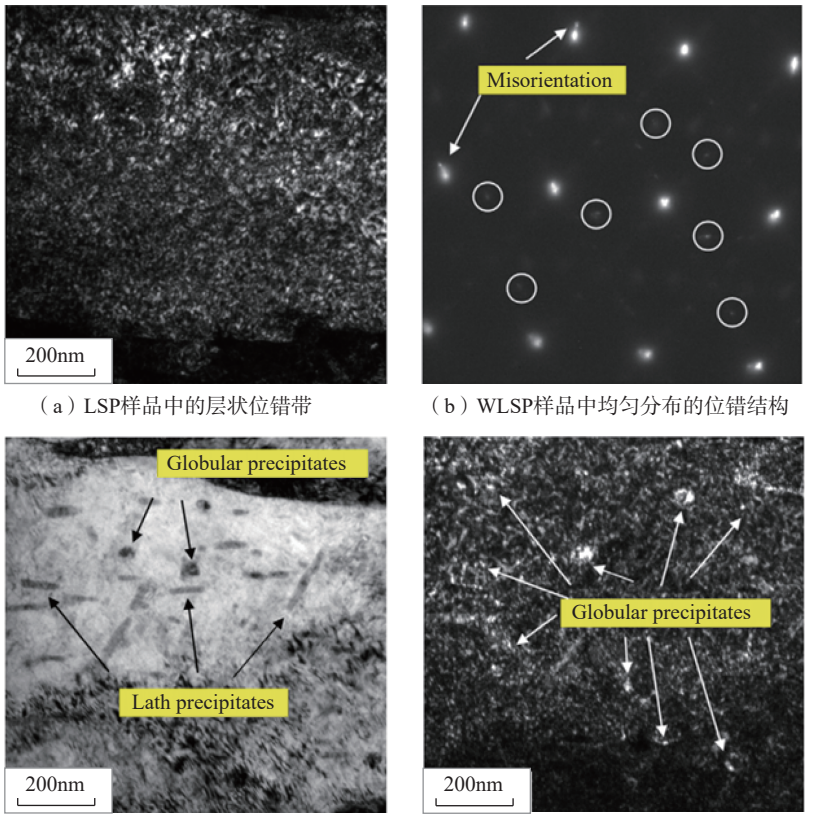
Fig.2　Improved cyclic stability of compressive residual stress by WLSP



（a）AA6061　　（b）AISI 4140　　（c）Ti6Al4V 钛合金

图3　WLSP延长疲劳寿命图示

Fig.3　Extended fatigue life after WLSP



（a）LSP样品中的层状位错带　（b）WLSP样品中均匀分布的位错结构

（c）WLSP样品中的位错和析出物的缠结（取自主衍射点的暗视野图像）　（d）由WLSP产生的球状析出物（从与析出相关的衍射斑点获得的暗视野图像）

图4　碳钢AISI 4140 WLSP后显微组织的TEM图像（功率密度4GW/cm^2，温度250℃）

Fig.4　Microstructure of AISI 4140 WLSP sample (laser intensity 4GW/cm^2 at 250℃)

错钉扎作用的关系，初步探索了析出相对原子偏聚与位错缠结与温度的关系，以及弥散分布的析出相对表面形貌的影响规律，利用强化相析出理论解释了温辅强化特殊的波纹形貌形成机制[39–40]。

温辅助激光强化属于一个热力耦合瞬时动态过程，中国科学院沈阳自动化研究所利用三维有限元可对强化后应力应变行为进行模拟分析，并形成强化后的残余应力分布状态云图。通过 Abaqus 软件分析激光诱导冲击波与温度场的动态响应，发现增大阻尼使动态应变趋于稳定，结合试验结果发现温辅助激光强化后得到的残余应力与显微硬度更大，建立了激光功率密度和温度对表面残余应力分布的影响规律，得到一个稳定的残余应力场分布特征曲线，并发现模拟结果与试验结果基本一致，只是应力幅值略微降低，其主要原因是在实际测试过程中能量会发生必要的衰减。

温辅助激光冲击强化工艺试验

（1）强化装置。温辅助激光冲击强化试验系统需要在常温试验基础上增加控温装置，主要包括加热底座、温度传感器、温度控制器、继电器、专用高温夹具。在试样表面施加吸收保护层即牺牲层，用专用高温夹具将试样和牺牲层固定在六轴机器人端部，作为运动执行机构。

（2）温度选择。温辅助激光冲击强化温度的选择主要基于动态应变时效理论，动态应变时效是在一定的温度范围和极高应变速率的条件下产生的，一般认为温辅助激光冲击强化发生动态应变时效的温度范围约为 0.2~0.5T_m（T_m 为合金熔点温度）。

（3）牺牲层。温辅助激光冲击强化的牺牲层除了要保证等离子体持续稳定聚集以产生高压力冲击波，还要能够在高温环境下保持状态的稳定。激光冲击强化常用牺牲层（黑漆和黑胶带）在高温环境下会熔化，而铝箔的熔点远高于试验温度，因此温辅助激光冲击强化试验一般会采用铝箔作为牺牲层材料，但是试验发现温辅助强化过程也会造成铝箔不同程度的破损和烧伤，试验质量很难保证。

（4）约束层：水在超过 100℃ 会直接气化，而光学玻璃透光性好，在 300℃ 左右时不会发生软化，但是不适合加工非平面类零件，因此光学玻璃作为约束层零件适应性较差。

目前存在的问题

温辅助激光冲击强化在抑制高温交变应力条件下残余应力与微观组织失效方面具有非常显著的效果，但这项研究还是一个比较新的课题，同时，在实际工程化应用推广过程中，仍然存在一些技术问题需要解决。

（1）强化机理等基础研究相对薄弱。

金属材料在高速塑性变形过程中发生的动态应变时效和动态析出过程非常复杂，而且不是所有材料都可以利用温辅助激光冲击强化实现高温组织与应力的维稳，这与金属材料本身固溶状态、析出相、晶体结构、相组成、元素原子偏析等有关，因此，整个温辅助激光冲击强化机理的研究非常复杂，影响因素颇多，位错组态和晶界动态演变机制尚不明确，很难对温辅助激光冲击强化与后时效过程变化特征定量描述，因此，到目前为止没有一个完备的数学模型可

以分析整个过程。

（2）工艺开发及应用还存在较多难点。

温辅助激光冲击强化加工操作过程中约束层热量散失较快，因此牺牲层的耐热性要较好，必须适合400℃的高温。目前常用的牺牲层主要是黑胶带和铝箔，但黑胶带耐高温性能差高温融化，铝箔背胶属于有机介质，高温下粘结性能不好，直接影响温辅助强化效果。常用的激光冲击强化约束层为水和有机玻璃，高温下水会蒸发无法起到约束作用，有机玻璃零件适应性差，仅仅可以完成部分平面强化试验，无法完成复杂曲面的激光冲击强化。

总体来说，由于温辅助激光冲击强化机理研究相对薄弱，工艺开发过程中很多技术难题尚未解决，造成了温辅助激光冲击强化结果的离散性非常大，导致力学测试结果偏差很大，强化效果不稳定，试验结论仅停留在研究阶段，对实际零部件的加工适应性不强，距离工程化应用还有一定距离。

结论

激光冲击强化可有效抑制高周疲劳裂纹萌生和扩展，改善抗疲劳性能，但是在向高温端零件推广应用过程中发现，高温交变载荷状态下，激光冲击强化引入的残余压应力会逐渐松弛，最终完全释放；同时高温导致晶粒长大，位错恢复湮灭，导致组织强化失效。

为了解决上述问题，利用温辅助激光冲击强化来实现高温端组织应力维稳，这是一种辅助热源的激光冲击强化新方法，在激光诱导高应变速率下发生动态应变时效和动态析出，使位错周围析出弥散分布的强化相，同时强化相反过来钉扎位错，在抑制高温交变应力条件下残余应力与微观组织失效方面具有非常显著的效果，有利于提高高温极端工作状态下零部件的使用寿命。

但是，由于温辅助激光冲击强化的影响因素很多，到现在为止，还没有找到一个完备的数学模型可以描述整个强化和维稳过程；而且受到牺牲层和约束层的限制，在工艺试验和工程化应用推广过程中还存在一些问题亟待解决。

参 考 文 献

[1] 邹世坤，巩水利，郭恩明，等．发动机整体叶盘的激光冲击强化技术[J]．中国激光，2011, 38(6): 601009—1–7.

ZOU Shikun, GONG Shuili, GUO Enming, et al. Laser peening of turbine engine integrally blade rotor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 601009—1–7.

[2] 梁春华．航空发动机风扇/压气机叶片激光冲击强化技术的发展与应用[J]．航空制造技术，2012, 55(23/24): 45–49.

LIANG Chunhua. Development and application of laser shock peening technology in aeroengine fan and compressor blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(23/24): 45–49.

[3] 孙明霞，梁春华，张世福．激光技术在风扇/压气机整体叶盘结构修理中的应用[J]．航空制造技术，2013, 56(9): 62–65.

SUN Mingxia, LIANG Chunhua, ZHANG Shifu. Application of laser repairing technology for fan/compressor blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(9): 62–65.

[4] TIAN Q, ZHOU J Z, HUANG S, et al. Relaxation of residual stress on laser-peened surface during cyclic loading[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 1–6.

[5] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behavior[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 210(1–2): 102–113.

[6] 乔红超，赵奕翔，赵吉宾，等．激光冲击强化对TiAl合金组织和性能的影响[J]．光学精密工程，2014, 22(7): 1766–1773.

QIAO Hongchao, ZHAO Yixiang, ZHAO Jibin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1766–1773.

[7] 陆莹，乔红超，赵吉宾．TiAl合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]．中国激光，2014, 41(10): 119–124.

LU Ying, QIAO Hongchao, ZHAO Jibin. Investigation of technical and strengthening mechanism research of TiAl alloy by laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 119–124.

[8] 陆莹，赵吉宾，乔红超．6082铝合金激光冲击强化显微硬度正交试验[J]．激光与光电子学进展，2015, 52(8): 174–182.

Lu Ying, Zhao Jibin, Qiao Hongchao. Orthogonal test of laser shocked 6082 aluminum alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 174–182.

[9] ZHOU J Z, MENG X K, HUANG S, et al. Effect of warm laser peening at elevated temperature on the low-cycle fatigue behavior of Ti6Al4V alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2015, 643: 86–95.

[10] 陆莹，赵吉宾，乔红超，等．激光冲击强化对TiAl合金显微硬度的影响[J]．光学学报，2014, 34(S1): 1–6.

LU Ying, ZHAO Jibin, QIAO Hongchao, et al. Effects of laser peening on micro-structure distributions and deformation microstructure of TiAl[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(S1): 1–6.

[11] 陆莹，李松夏，乔红超，等．TiAl合金激光冲击强化表面微观形貌演变分析[J]．稀有金属材料与工程，2019, 48(3): 841–846.

LU Ying, LI Songxia, QIAO Hongchao, et al. Surface microstructure evolution analysis of TIAL alloy by laser shock peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(3): 841–846.

[12] LI L, LUO J J, YAN M Q, et al. Dynamic globularization and restoration mechanism of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy during thermal compression[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 622: 174–183.

[13] CELLARD C, RETRAINT D, FRANCOIS M, et al. Laser shock peening of Ti17 titanium alloy influence of process parameters[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 532: 362–372.

[14] TANAKA S, KAWAHARA T, OKADA H. Study on crack propagation

simulation of surface crack in welded joint structure[J]. Marine Structures, 2014, 39: 315–334.

[15] MURUGARATNAM K, UTILI S, PETRINIC N. A combined DEM-FEM numerical method for shot peening parameter optimisation[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 79: 13–26.

[16] PERENDA J, TRAJKOVSKI J, ŽEROVNIK A, et al. Residual stresses after deep rolling of a torsion bar made from high strength steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 218: 89–98.

[17] BALLAND P, TABOUROT L, DEGRE F, et al. An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 65: 29–36.

[18] PREVÉY P, CAMMETT J T. The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(9): 975–982.

[19] VASU A, GOBAL K, GRANDHI R V. A computational methodology for determining the optimum repeening schedule to increase the fatigue life of laser peened aircraft components[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 395–405.

[20] LIU Y G, LI H M, LI M Q. Characterization of surface layer in TC17 alloy treated by air blast shot peening[J]. Materials and Design, 2015, 65: 120–126.

[21] TRDAN U, SKARBA M, GRUM J. Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al-Mg-Si alloy[J]. Materials Characterization, 2014, 97: 57–68.

[22] GAO Y K, ZHONG Z, LEI L M, et al. Influence of laser peening and shot peening on fatigue properties of FGH97 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(5): 1230–1234.

[23] QIAO H C, ZHAO J B, GAO Y. Experiment investigation of laser peening on TiAl alloy microstructure and properties[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 609–616.

[24] QIAO H C, ZHAO J B, ZHANG G X, et al. Effects of laser peening on microstructure and residual stress evolution in Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 276: 145–151.

[25] SATHYAJITH S, KALAINATHAN S, SWAROOP S. Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd: YAG laser[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 45: 389–394.

[26] KUMAR S A, SUNDAR R, RAMAN S G S, et al. Influence of laser peening on microstructure and fatigue lives of Ti-6Al-4V[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3111–3117.

[27] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435–436: 12–18.

[28] YE C, SUSLOV S, KIM B J, et al. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 1014–1025.

[29] LIAO Y L, CHANG Y, CHENG G J. A review: warm laser shock peening and related laser processing technique[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 78: 291–297.

[30] ZHAO Z L, GUO H Z, YAO Z K. The deformation instability and stability analysis of Ti17 power compact during thermo-mechanical processing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 549: 193–199.

[31] 陆莹, 赵吉宾, 乔红超, 等. TC17钛合金激光冲击温强化机制的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 1–7.

LU Ying, ZHAO Jibin, QIAO Hongchao, et al. Strengthening mechanism of TC17 titanium alloy warm laser shock peening[J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 1–7.

[32] CHENG G J, SHEHADEH M A. Multiscale dislocation dynamics analyses of laser shock peening in silicon single crystals[J]. International Journal of plasticity, 2006, 22(12): 2171–2194.

[33] WU J J, ZHAO J B, QIAO H C, et al. Acoustic wave detection of laser shock peening[J]. Opto-Electronic Advances, 2018, 1(9) :180016.

[34] LI P, HUANG S, XU H F, et al. Numerical simulation and experiments of titanium alloy engine blades based on laser shock processing[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 40: 164–170.

[35] NIE X F, HE W, ZHOU L C, et al. Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 594: 161–167.

[36] JIA W J, HONG Q, ZHAO Z H, et al. Effect of laser shock peening on the mechanical properties of a near-α titanium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 606: 354–359.

[37] MUSINSKI W D, MCDOWELL D L. On the eigenstrain application of shot-peened residual stresses within a crystal plasticity framework: application to Ni-base superalloy specimens[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 100: 195–208.

[38] KLOSTERNAM E L, BYRON S R. Measurement of subsonic laser absorpation wave propagtion characteristics at 1064nm[J]. Journal of Applied Physics, 1947, 45(11): 4751–4759.

[39] URSU I, APOSTOL I, DINESCU M, et al. Plasma-target coupling in the case of TEA-CO_2 laser produced breakdown in front of a solid target[J]. Optics Communications, 1980, 35(1): 96–106.

[40] 吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 温度辅助激光冲击强化对GH4169合金力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(01): 199–205.

WU Jiajun, ZHAO Jibin, QIAO Hongchao, et al. Effect of temperature-assisted laser shock peening on mechanical properties of GH4169 alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(1): 199–205.

通讯作者: 赵吉宾, E–mail: jbzhao@sia.cn。

（下转第51页）

Study on Adhesive Bonding Surface Treatment Process of TC4 Titanium Alloy Leading Edge Protection of Blade

LI Wen, ZHU Yanhai, SUN Gang, ZHANG Yanling
(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In this study, the adhesion properties of titanium alloy after three different surface treatments, i.e., acid wash, sulfuric acid anodizing and micro-arc oxidation, were investigated by tensile shear tests based on plate-plate specimens. The control sample (without any surface treatment) exhibits a shear strength of 30.1MPa and features an adhesion failure. The acid wash sample shows a shear strength of 45.3MPa, half adhesion failure and half cohesive failure. The anodized sample possesses the optimal shear strength of 61.6MPa, and shows cohesive failure. But the micro-arc oxidation sample only has a shear strength of 9MPa and fails in intermediate tear of the oxide film layer. The results indicate that both acid wash and sulfuric acid anodizing can improve the adhesion properties, whereas micro-arc oxidation treatment cannot. In the case of anodizing in sulfuric acid, abundant micro rough structures are formed and generating higher bonding area, which leads to improved adsorption force of the surface. The bonding performance is optimal when the anodizing voltage was 25V.

Keywords: Titanium alloy; Adhesive bonding; Surface treatment; Shear strength; Roughness

（责编　知舟）

（上接第39页）

Research on Principle and Application of Warm Laser Shock Processing Technology

ZHAO Jibin[1,2], LU Ying[1,2], QIAO Hongchao[1,2], SUN Boyu[1,2]
(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

[ABSTRACT] This paper introduced the principle and application of warm laser shock peening, aiming at the existing problems in engineering application, and summarized the research status and academic achievements of domestic and foreign. From residual stress failure and tissue instability under high-temperature and alternating load, the mechanism of residual stress release induced by laser shock peening was analyzed. The auxiliary heat source based on laser shock peening is analyzed (WLSP), which can promote dynamic strain aging and dynamic precipitation in the process of laser impact reinforcement (LSP), and the dispersion distribution reinforcement phase is precipitated around the dense dislocation, and the strengthening phase is further nailed and positioned. Fault forms air mass. The stability of high temperature tissue and creep resistance of the material are significantly improved. At last, the future development of warm laser shock peening was looked forward.

Keywords: Warm laser shock peening ; Residual stress release ; Organizational instability; Creep resistance; Strengthening phase

（责编　知舟）