

激光冲击强化对焊缝组织性能影响的研究进展

舒坤¹, 乔红超^{2,3}, 赵吉宾^{2,3}, 陈燕¹, 孙博宇^{2,3}, 杨玉奇^{2,3,4}, 韩岳旺¹

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 中国科学院 沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

3. 中国科学院 机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 激光冲击强化 (LSP) 是一种典型的非弹丸撞击式表面强化技术, 可有效提高金属材料的抗疲劳能力、抗腐蚀能力、金属耐磨性能和使用寿命, 具有应变率高、效率高、强化效果好等优点。焊缝质量直接影响了焊接件的合格率, 而焊缝强化一直是一个比较难的挑战。首先, 介绍了激光冲击强化的加工原理, 总结了激光冲击强化的影响参数及条件, 包括激光功率密度、约束层和吸收层、激光冲击次数、光斑搭接率以及激光脉宽。控制强化工艺参数可以使焊缝显微硬度提升 50%、残余压应力提升 65% 以上, 大幅度提升抗拉强度, 降低疲劳裂纹扩展。其次, 综述了国内外研究人员运用激光冲击强化技术对不同材料焊缝强化的研究与应用, 重点论述了激光冲击强化对焊缝力学性能和显微组织的显著强化效果, 与未强化试样对比, 强化后试样的各项性能明显提升。其中针对力学性能, 详细分析了显微硬度、残余应力和疲劳裂纹扩展的变化情况, 结合残余应力的理论研究、仿真分析、试验论证以及显微组织变化情况, 认为激光冲击强化导致马氏体组织发生了碎化, 提高了硬度, 产生了残余压应力, 引起了晶粒细化, 进而有效控制了疲劳裂纹扩展, 阻止了裂纹产生, 提升了疲劳寿命。通过激光冲击强化不同工艺参数的协同作用, 可以获得较高的残余压应力和硬度, 引起动态再结晶、晶粒细化等微观组织演变以及位错运动, 使焊缝力学性能和显微组织产生相互影响。分析认为, 激光冲击强化技术是焊缝强化的有效焊接后处理工艺。最后, 展望了激光冲击强化技术在焊缝强化领域中的应用前景。

关键词: 激光冲击强化; 焊缝; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)07-0041-14

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.07.004

Research Progress on the Effect of Laser Shock Processing Technology on the Microstructure and Properties of Weld

SHU Kun¹, QIAO Hong-chao^{2,3}, ZHAO Ji-bin^{2,3}, CHEN Yan¹, SUN Bo-yu^{2,3},
YANG Yu-qi^{2,3,4}, HAN Yue-wang¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Liaoning Anshan

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-06-20

Received: 2022-02-24; Revised: 2022-06-20

作者简介: 舒坤 (1987—), 男, 硕士生, 主要研究方向为激光冲击强化。

Biography: SHU Kun (1987-), Male, Postgraduate, Research focus: laser shock processing.

通讯作者: 乔红超 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光冲击强化与水导激光加工。

Corresponding author: QIAO Hong-chao (1982-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: laser shock processing and water-jet guided laser processing.

引文格式: 舒坤, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对焊缝组织性能影响的研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 41-54.

SHU Kun, QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, et al. Research Progress on the Effect of Laser Shock Processing Technology on the Microstructure and Properties of Weld[J]. Surface Technology, 2023, 52(7): 41-54.

114051, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: Laser shock processing (LSP) is a typical non projectile impact surface strengthening technology, which can effectively improve the fatigue resistance, corrosion resistance, wear resistance and service life of metal materials. It has the advantages of high strain rate, high efficiency and good strengthening effect. In recent years, with the rapid development of aerospace and automobile manufacturing, the good property of weldments becomes more and more important. The excellent weld quality directly affects the qualification rate of weldments, and weld strengthening has always been a difficult challenge. Firstly, the principle of laser shock processing was introduced, and the parameters and conditions affecting laser shock processing were summarized, including laser power density, constraint layer and absorbing protective layer, laser shock times, spot overlap rate and laser pulse width. By controlling different strengthening process parameters, the microhardness of weld could be increased by 50%, the residual comprehensive stress could be increased by more than 65%, the tensile strength could be greatly improved and the fatigue crack propagation could be reduced. Then, the research and application of laser shock processing technology used by researchers in China and abroad were summarized to strengthen the welds of different materials, and the significant strengthening effect of laser shock processing on the mechanical properties and microstructure of the weld was discussed in particular. By controlling the combination of different shock strengthening process parameters, the process effect could be improved. Compared with the unstrengthened samples, the properties of strengthened samples were significantly improved. In terms of mechanical properties, the changes of microhardness, residual stress and fatigue crack propagation were analyzed in detail, and the reasons for different changes of microhardness of aluminum alloy were expounded. The experimental effects of strengthening in weld zone, heat affected zone and base metal zone were compared and introduced. It was found that the microhardness could be increased by 20%-80%. Combined with the theoretical research, simulation analysis and experimental synchronous demonstration of residual stress, it is considered that laser shock processing can effectively control the fatigue crack growth and improve the fatigue life by increasing the residual stress, but the coupling of many factors makes the crack growth uncertain, which can be discussed through orthogonal test to obtain the best parameter combination. By analyzing the microstructure changes after laser shock processing, it is considered that laser shock processing can transform the grains into equiaxed grains through twinning, resulting in dislocation substructure and a large amount of deformation as well as grain refinement. Grain refinement can slow down the crack propagation and prevent the occurrence of cracks. Therefore, the mechanism of laser shock strengthening grain refinement is obtained. Under the synergistic effect of different laser shock processing parameters, the microstructure evolution such as dynamic recrystallization and grain refinement and dislocation movement can increase the residual stress and hardness, resulting in the interaction between mechanical properties and microstructure. It is considered that laser shock processing technology is an effective post welding treatment process for weld strengthening. Finally, the application prospect of laser shock processing technology in the field of weld strengthening is prospected.

KEY WORDS: laser shock processing; weld; mechanical property; microstructure

近年来, 激光冲击强化技术已普遍应用在各种先进制造技术以及工业制造领域中, 其工程应用逐步拓展到汽车零部件、精密器械、医疗器械等领域, 受到了国内外研究人员的密切关注。在工业制造领域中, 一些重要的零部件在制造过程中存在很多焊接点, 当零件失效时, 维修补焊会导致材料本身具备的良好性能难以达到指标^[1]。对于处在燃烧室等高温环境中的零件, 要求其焊接接头能长时间使用, 这些零部件焊接位置存在的应力集中和裂纹会造成零件失效, 故对焊接接头质量提出了更高的要求。

因此, 使用表面改性技术增强焊缝的力学性能及稳定性日益迫切。

自激光冲击强化技术出现以来, 该技术已经成功实现了不同材料的强化应用, 并获得了良好的效果, 国内外不同领域的研究人员均开展了激光冲击强化的研究。常规的表面强化手段有表面机械强化、表面热处理强化、化学热处理、表面涂覆层强化等^[2-3], 在表面强化过程中, 零件的力学性能和微观组织性能在很大程度上受到残余应力的影响, 残余应力包含残余拉应力和残余压应力, 而残余拉应力是有害的。在

焊接过程中, 焊接接头及其周围容易出现残余拉应力, 这是因为在焊接的加热和冷却过程中焊接接头受到了膨胀和收缩的约束作用^[4], 激光冲击强化技术在提升残余压应力、表面硬度和可靠性等方面有明显优势。因此, 运用激光冲击强化技术将残余拉应力转变成残余压应力, 可以有效改善焊接接头的性能。本文通过对焊缝激光冲击强化后典型的力学性能及显微组织进行了综述和分析, 总结出了激光冲击强化技术在焊缝强化领域的优势, 并展望了激光冲击强化技术在焊缝强化领域中的应用前景。

1 激光冲击强化技术概述

1.1 激光冲击强化原理

激光冲击强化加工原理如图 1 所示^[5-7]。当高功率密度 (10^9 W/cm^2)、短脉冲 ($10\sim 30 \text{ ns}$) 的激光束穿过透明的约束层, 冲击到工件表面的吸收层上时, 吸收层吸收激光能量, 迅速加热和电离气化金属材料, 瞬间蒸发进而形成等离子团, 等离子团继续吸收激光能量, 发生膨胀, 产生高压, 由于受到约束层的约束, 形成高振幅冲击波。当冲击波的峰值压力远远超过材料的动态屈服强度时, 会引起晶格位错、晶粒细化等变化, 并在金属表面以下产生残余压应力, 引起疲劳裂纹闭合, 最终提高疲劳寿命, 实现零件的表面强化。

1.2 激光冲击强化的影响参数及条件

高功率密度激光束通过产生高压冲击波进而以

塑性变形的方式产生残余压应力, 而残余应力的产生则依赖多种参数, 包括金属材料本身的性质、环境条件、激光工艺参数、材料表面的吸收层、约束层等, 其中, 激光工艺参数、吸收层、约束层是主要的影响因素^[8]。

激光冲击过程中的主要工艺参数有激光功率密度、约束层和吸收层、激光冲击次数、光斑搭接率、激光脉宽。激光功率密度越大, 在金属表面持续作用的时间越长, 这会导致冲击压力越大, 冲击区域表面硬度越高, 疲劳裂纹扩展速率越低, 但是也存在一个最小的临界冲击压力, 疲劳寿命会出现先增大后减小再增大 (“N” 形) 的趋势。苏纯等^[9]在焊接接头的激光冲击强化研究中发现, 当激光能量由 4 J 上升到 5 J 时, 疲劳寿命上升, 当激光能量由 5 J 上升到 6 J 时, 疲劳寿命不仅不上升反而有所下降。约束层可以有效提高激光冲击产生的冲击波峰压和脉冲宽度, 国内外目前的研究主要以水和玻璃为约束层, 吸收层可以诱导零件表面产生高压残余压应力以提升材料的强化效果。温德平等^[10]分别测试了 K9 玻璃、水层、无约束层的强化效果, 发现复合约束层 (水膜和 K9 玻璃) 能延长等离子体作用时间, 残余压应力可提高 65% 以上, 强化效果最好, 其次是水层, 最后是 K9 玻璃。随着激光脉宽的增大, 残余压应力先增大后减小, 硬度增大, 但是过大的脉宽会导致 “残余应力洞” 出现, 甚至出现吸收层过度损耗以及材料表层烧蚀的现象。光斑搭接率的选择需要针对不同材料的具体形貌、材料参数和残余压应力, 在小光斑直径下, 表面会形成类似球形冲击波, 在大光斑直径下, 表面会形成平面冲击波。在

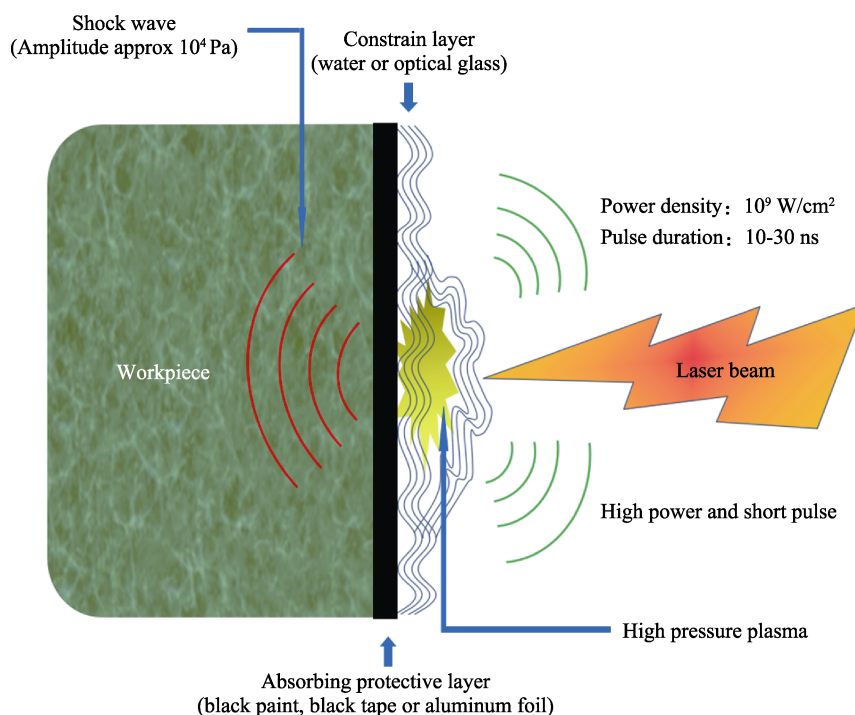


图 1 激光冲击强化加工原理^[5-7]

Fig.1 Principle of laser shock processing^[5-7]

低功率密度下选取小光斑能获得大光斑冲击相近似的冲击效果,选取合适的搭接率可有效抑制“残余应力洞”的产生。程秀全等^[11]定量分析了 1.0~3.0 J 的激光能量、1.0~3.0 mm 的光斑直径、1—5 的冲击次数、30%~70%的光斑搭接率等工艺参数对激光冲击诱导表面“残余应力洞”的影响规律,发现当应力损失比小于 3%时,相对洞宽和相对洞深则分别小于 20%和 70%,相对洞深是影响残余应力分布均匀性的主要因素。周留成等^[12]研究了不锈钢焊接接头激光冲击强化后的拉伸性能,结果表明,焊缝经过 2 次激光冲击强化后,显微硬度提高了 50%,抗拉强度由 818.5 MPa 提高到了 863.8 MPa。激光冲击次数对残余应力、粗糙度、硬度等的影响比较明显,次数越多,残余应力影响层的深度越大,硬度越大,但是同样增大了粗糙度,甚至可能出现层裂现象,因此,冲击次数的恰当选择可以使各项性能达到最优化。要想取得良好的冲击强化效果,使各项力学性能达到最佳,并不是某一个参数单独影响的结果,而是多种参数共同作用,只有通过优化不同参数组合形成最优参数,才能获得最明显的效果。

2 国内外激光冲击强化对焊缝的研究与应用

2.1 国外

国外关于激光冲击强化焊缝的研究应用可以追溯到 2007 年,日本使用了微激光强化技术对核电站压力容器的焊缝进行了冲击强化处理,使压力容器的抗腐蚀性能得到了很大程度的提高^[13];同年, Hatamleh 等^[14-15]从焊缝的显微组织和硬度、拉伸性能、裂纹扩展速率等方面研究了激光冲击强化对 AA2195 及 7075 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头疲劳裂纹的影响,并且在 2008 年和 2009 年,他们继续研究了激光冲击强化对搅拌摩擦焊焊接接头力学性能^[16]和残余应力^[17]的影响,结果表明,在焊接过程中,整个焊缝区域都发生了软化现象。在激光冲击强化后,焊接接头的疲劳裂纹扩展速率明显降低,甚至降低到接近基材的程度,并且明显提高了残余压应力和拉伸性能。之后,该技术逐步应用在部分航空零部件上。日本东芝公司将激光冲击强化技术应用到核工业的原子反应堆储存容器和管道焊缝的维修中,提升了焊缝的抗应力腐蚀裂纹能力^[18-19]。在 2011—2021 年,有关激光冲击强化对焊缝影响的研究逐渐发展了起来。Sakino 等^[20]研究了无涂层激光冲击强化在钢焊接接头上的应用,研究表明,焊接接头的疲劳强度提升了 1.5 倍,疲劳寿命在应力为 250 MPa 时提高了 5 倍,在应力为 350 MPa 时最大提高到 12 倍。Ramkumar 等^[21]研究了激光冲击强化对焊缝力学性能的影响,证明激光冲击强化技术显著提高了抗拉强度和冲击韧性。Iordachescu 等^[22-23]、Abhijit 等^[24]、Nasiłowska 等^[25]对铝合金、铜合金、

不锈钢等材料焊缝的力学性能和耐腐蚀性能开展了研究,分析认为,激光冲击强化能有效提升残余压应力,对所有焊接接头的腐蚀过程均有抑制作用,并且激光焊接与激光冲击强化复合处理后试样的耐腐蚀性能最好。从十几年的研究进程中可以看出,研究人员研究、讨论并证明了激光冲击强化技术在焊缝领域有良好的强化效果。关于焊缝激光冲击强化的研究领域在不断拓宽,且研究成果逐步完善。

2.2 国内

国内对焊缝的激光冲击强化技术也进行了深入研究。2001 年,邹世坤等^[26-27]研究了激光冲击强化处理后 GH30 和奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 板材焊缝的力学性能,研究表明, GH30 焊接接头强度提高了 12%, 1Cr18Ni9Ti 的疲劳寿命提升 300%以上。2006 年,彭薇薇^[28]研究了不锈钢激光冲击强化后焊接接头的抗应力腐蚀开裂性能。2011 年, Zhang 等^[29]研究了不同冲击路径下的激光冲击强化 304 不锈钢激光焊接接头,分析了其力学性能和断口形貌的变化,研究表明,与单面冲击相比,双面冲击的焊缝的屈服强度和抗拉强度更高。同年,许海鹰等^[30-32]使用激光冲击强化技术处理了 TC4 氩弧焊焊缝,结果表明,其抗拉强度增加了 5.6%,屈服强度增加了 8.2%,断后伸长率和疲劳寿命分别提高了 66%和 36.3%。在 2011—2021 年,国内多人分别针对不同材料、不同领域焊接结构件的焊接接头开展了激光冲击强化工作以及有限元模拟强化过程。王学德等^[33]选用不同的焊接材料和焊接方式分别对 12Cr2Ni4A 进行了激光冲击强化,研究表明,焊接产生的残余拉应力均能得到有效消除,焊接接头的力学分布得到改善。陈怡等^[34]对比了激光冲击强化与超声冲击 2 种处理方式对焊缝的影响,结果表明,激光冲击强化的效果明显优于超声振动冲击的效果,他们认为应加快国内激光冲击强化设备研发与加工的进程。之后聂祥樊等^[35]先后对发动机的焊接部件进行了强化,细化了粗大的晶粒,使导管的疲劳寿命提升了 1.66 倍,研究表明,作动筒在综合实验器上连续工作 300 h 未产生裂纹(超过 200 h 的工厂标准),并且风扇机匣的焊缝通过了 600 h 的测试要求。

研究结果显示,采用不同的激光工艺参数和焊接方法均能达到良好的强化效果,与未强化处理的试样相比,经激光冲击强化处理后,焊接接头的残余压应力、硬度、抗拉强度、疲劳强度、显微组织、疲劳寿命等各项性能指标都有一定程度的改善与提升,有效控制和降低了疲劳裂纹扩展速率,说明激光冲击强化处理在金属表面强化处理方面具有优越性。

3 激光冲击强化对焊缝力学性能的影响

在不同环境的影响下,零部件在承受各种外加载

荷时,用以评价其性能是否良好的力学性能指标有近 10 种,其中,硬度、残余应力、疲劳寿命、强度、表面粗糙度等性能指标在材料的各项形变过程中有明显变化,这些力学性能指标很好地揭示了材料的功能特性。

3.1 显微硬度

硬度是材料通过永久塑性变形抵抗外加载荷的强度性能,能衡量金属材料的软硬程度,可通过产生的压痕来测量,是材料弹性、强度和韧性等力学性能的综合指标,反映了材料性能经表面处理后的有效性。金属材料的硬度越高,其抵抗塑性变形的能力越强,塑性变形越困难。通过激光冲击强化技术对焊缝进行冲击,能有效提高焊缝的表面硬度,提升材料的力学性能。李杰^[36]研究了经激光冲击强化处理的 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头,结果发现,经过常规强化、激光冲击强化、组合强化后,焊接接头的显微硬度分布规律基本一致,3 种处理方式对焊接接头显微硬度的影响没有太大差别。王江涛等^[37]研究了激光冲击强化 7075 铝合金的应力腐蚀行为以及不同焊后处理工艺的影响,研究表明,激光冲击强化对焊缝区和热影响区表面的显微硬度有很明显的积极影响,焊缝的显微硬度由 140HV 提高到 165HV,并且激光冲击次数对显微硬度的影响也较为显著,尤其是在 2 次激光冲击后,焊缝区和热影响区的显微硬度分别提高了 23.3%和 44.4%,硬度提高到 180HV。王连庆等^[38]对 7075 铝合金熔焊接头进行了激光冲击,研究了焊接工艺与激光冲击强化复合作用的影响,激光冲击强化前后焊接接头的显微硬度分布如图 2 所示。研究发现,焊缝中心的硬度值由强化前的 152HV 增加到 175HV,并且在距强化表面 0~100 μm 的区域内硬度较高。

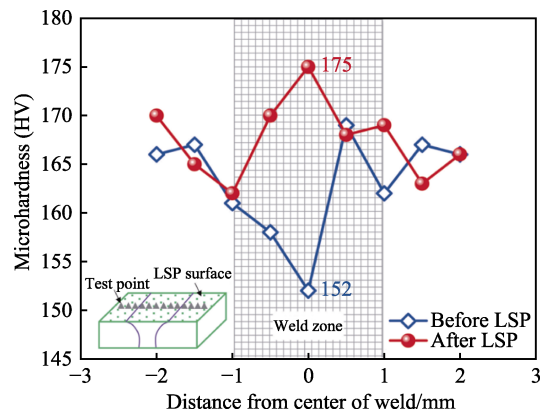


图 2 激光冲击强化前后焊接接头的显微硬度分布^[38]
Fig.2 Microhardness distribution of welded joints before and after laser shock processing^[38]

激光冲击强化可以提高材料的表面硬度,有效提升零件的抗塑性变形能力,增强性能。经过激光冲击强化处理后,金属表面硬度增大,但是也存在硬度变化几乎没有太大差别或者提升程度不一致的现象,笔者分析认为原因如下:(1)直接简单地比较硬度的增

加是不太合适的,因为在激光冲击强化过程中,激光工艺参数对硬度有一定影响,但功率密度的大小、冲击次数、约束层和吸收层的选择等因素都会导致硬度增加程度不一致;(2)虽然同为 7075 铝合金,但是铝合金的成分不尽相同,或多或少存在差别,成分含量的不同会导致微观变化不一致,进而体现为宏观上的硬度值不一致;(3)焊缝的成形方法不同,不同的焊接方法(搅拌摩擦焊、激光焊接、等离子弧焊、TIG 焊等)以及焊接过程中不同的热处理方式,会导致焊缝的成分以及性质有区别,致使冲击强化之后硬度的变化趋势和程度不一致。

在各项研究中,硬度的分析主要集中在 3 个区域:焊缝区、热影响区和母材区。在不同金属的焊接件中,不同焊缝区域的显微硬度不同,一般规律为“母材区硬度<热影响区硬度<焊缝区硬度”。在焊缝的激光冲击强化过程中,焊缝硬度与强化的激光参数(包括光斑大小、功率密度、冲击次数以及残余应力导致的晶格变化等)有关系。鲁金忠等^[39]、黄潇等^[40]研究了 TC4 钛合金激光冲击强化前后焊缝表面的显微硬度分布情况,结果显示,3 个区域的硬度变化各不相同,在激光冲击强化后,原始 TC4 钛合金焊缝咬边处的针状马氏体得到细化,表面显微硬度降低,而塑性变形区细小晶粒增多,导致热影响区硬度提高。说明显微硬度的提高主要是由激光诱导的晶粒细化和剧烈变形导致的。张超等^[41]对 EH36 钢进行了激光冲击强化,冲击前后试样不同区域的显微硬度如表 1 所示。结果显示,经过 4 次激光冲击强化处理后,焊缝区硬度值达到 288.5HV,热影响区的硬度则为 270.2HV,显微硬度分别增加了 24%和 17.5%。激光诱导冲击波作用于焊缝表面,与未强化相比,强化后焊缝的显微硬度有较大幅度提升,随着深度的增加,其显微硬度逐渐降低,激光冲击强化能在焊接接头处产生较深的硬化层,有利于改善焊接接头表层材料的综合性能。

表 1 不同冲击参数下的 EH36 焊接结构显微硬度^[41]
Tab.1 Microhardness of EH36 welded structure under different impact parameters^[41]

| Loading force/N | Impact times | Laser energy/J | Average microhardness(HV) | | |
|-----------------|--------------|----------------|---------------------------|--------------------|------------|
| | | | Weld bead | Heat affected zone | Base metal |
| 1.96 | 1 | 6 | 243.3 | 237.2 | 193.8 |
| | 1 | 9 | 250.5 | 241.7 | 198.1 |
| | 1 | 12 | 256.1 | 246.0 | 200.0 |
| | 2 | 6 | 260.3 | 247.7 | 197.9 |
| | 2 | 9 | 268.2 | 254.1 | 202.4 |
| | 2 | 12 | 273.9 | 260.1 | 207.5 |
| | 4 | 6 | 271.6 | 253.9 | 199.1 |
| | 4 | 9 | 275.3 | 261.7 | 204.4 |
| | 4 | 12 | 288.5 | 270.2 | 209.2 |
| | 0 | 0 | 232.2 | 230.0 | 187.1 |

从以上研究成果可以看出,在激光冲击强化后,焊缝不同区域硬度的提高程度并不相同,激光冲击次数对显微硬度有一定影响,晶格变形和晶粒细化引起的微观组织变化对材料的影响会通过宏观硬度值显示出来,不同的热处理方式会导致焊缝强化前后硬度变化有很大的区别,不能单一评价硬度的变化情况,应综合分析变化的原因。

3.2 残余应力

残余应力是金属材料的内应力,是导致机械零件过早失效的原因之一。在焊接过程中,会因为不均匀的热胀冷缩而产生残余应力,其中有害的是残余拉应力。材料中的残余应力与外加载荷共同作用,可以使零件发生翘曲或扭曲变形,甚至开裂,但同样也可以提高零件的疲劳强度和耐磨性能。想彻底消除残余应力是不可能的,可以通过激光冲击强化来降低残余应力,将残余拉应力转变成有用的残余压应力,从而提高材料的力学性能。激光冲击强化技术能在材料沿深度方向几十甚至几百微米处产生残余压应力,使材料性能向有利方向提升。

影响焊缝残余应力的因素很多,例如激光能量、光斑搭接率、光斑尺寸和形状、冲击次数、波长、吸收层和约束层等,不同的参数设置会导致残余应力产生很大的差别,因此,选用合适的激光冲击强化参数,可以很好控制残余应力的大小。殷苏民等^[42-43]使用ABAQUS仿真模拟了2A11铝焊接结构以及不锈钢焊接结构的激光冲击强化处理过程,分析了激光功率密度、冲击次数、激光能量和光斑搭接率的影响,研究发现,焊接后焊缝处存在较大的横向、纵向残余拉应力,当搭接率为50%时,得到了较理想的应力分布,并且功率密度和冲击次数的增加使横、纵向应力分布更加均匀。罗密等^[44]模拟了7075-T6铝合金焊缝的残余应力,重点分析了激光冲击强化前后光斑尺寸、激光能量、光斑搭接率的影响,结果显示,过大或者过小的光斑尺寸会导致焊缝区至热影响区的横

向残余应力变化很大。因此,针对不同的材料性质和残余应力等因素,选取合理的光斑搭接率、光斑尺寸,可以使不同方向的应力分布更均匀,有效抑制“残余应力洞”的产生,获得更佳的激光冲击效果。

合适的激光脉冲能量可以增加材料的强化层和钝化膜,产生横向残余压应力,进而更加稳固钝化膜,从而提升材料的疲劳寿命和耐腐蚀性能。卢海飞等^[45]利用有限元模拟了激光冲击强化316L不锈钢焊接件的焊缝,采用不同的激光能量对焊缝进行了强化,分析了焊接残余应力的变化情况,并进行了试验验证,不同脉冲能量激光冲击强化焊缝区的残余应力分布模拟如图3所示。当脉冲能量由0 J变成3、6、9 J时,焊缝区由残余拉应力173 MPa分别转变为残余压应力-117、-217、-285 MPa,热影响区(HAZ)则由残余拉应力91 MPa转变为残余压应力-82、-107、-207 MPa,最终材料的内部达到应力平衡,基材区的拉应力分别转变成57、83、133 MPa。说明激光冲击强化在焊缝区域表面诱导产生残余压应力层,随着脉冲能量的提高,焊接件表面焊接区、HAZ以及基材区域的残余压应力都与脉冲能量成正比关系增加,增加幅度成反比关系降低。因此,激光脉冲能量的提高,会导致金属材料产生更大的塑性变形量,其附加应力和残余应力会随着变形速度的加快而减小。

残余应力属于材料的微观内应力,其影响因素并不单一。由上文可知,激光冲击强化的工艺参数对残余应力的影响是直接、明显的,而残余应力分布以及大小还受焊接类型的影响,例如激光焊、电子束焊、熔焊等,传统的熔焊方法比激光焊接产生的残余拉应力值更高。激光冲击强化的过程是零件表面受压过程,残余应力对受压构件的影响可用应力和长细比来表示,如图4和图5所示^[46]。可以明显看出,在未考虑残余应力影响的情况下,当结构达到 $2/3F_y$ 时(F_y 为屈服应力),对应的长细比右侧区域全为弹性行为,左侧区域全为非弹性行为;在考虑残余应力影响的情况下,当结构达到 $1/2F_y$ 时,对应的长细比右侧区域

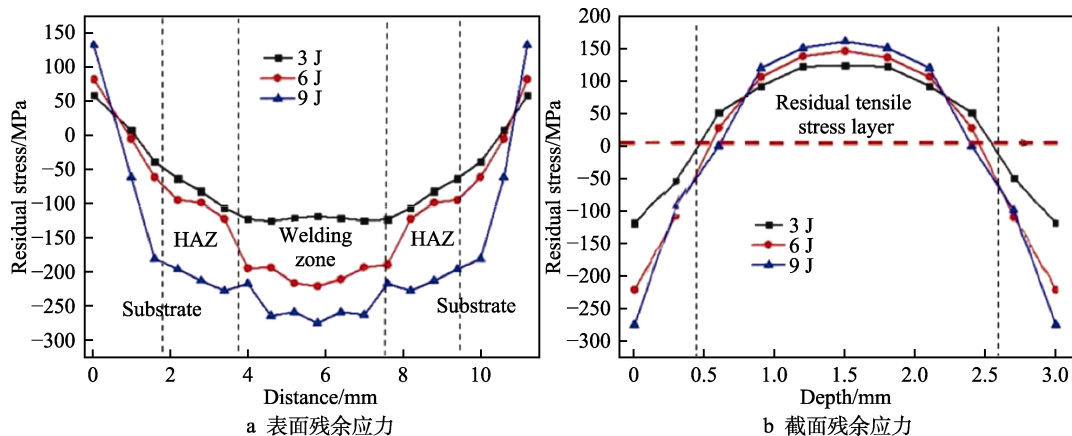
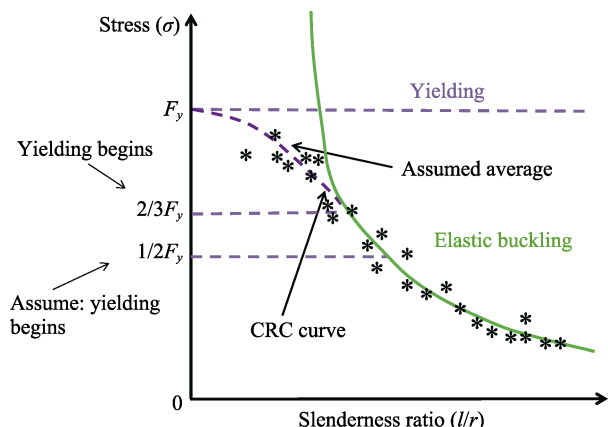
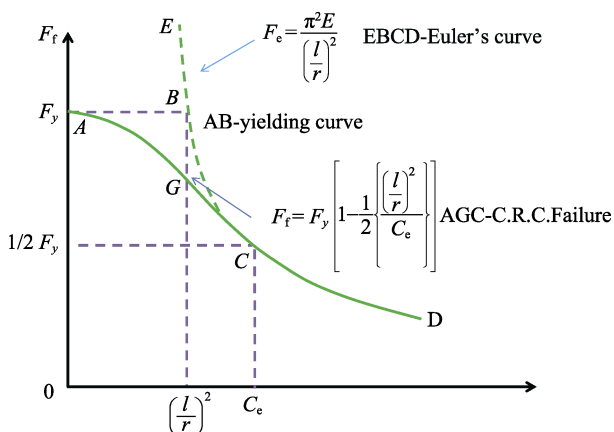


图3 不同脉冲能量激光冲击强化焊缝区的残余应力分布模拟^[45]

Fig.3 Simulated residual stress distribution in weld zone shocked by lasers with different pulse energies^[45]: a) surface residual stress distribution; b) cross-sectional residual stress distribution

图 4 不考虑残余应力时应力和长细比的关系^[46]Fig.4 Relationship between stress and slenderness ratio case of residual stress^[46]图 5 考虑残余应力时应力和长细比的关系^[46]Fig.5 Relationship between stress and slenderness in ratio in case of no residual stress^[46]

全为弹性行为, 左侧区域全为非弹性行为, 因此, 残余应力对结构非弹性行为发生的区间产生了影响。

由弹性力学和 X 射线衍射理论得出残余应力公式如式 (1) 所示。

$$\sigma = \frac{-E}{2(1+\gamma)} \frac{1}{\tan \theta_0} \frac{\pi}{180} \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \varphi)} - K \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \varphi)} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; γ 为泊松比; θ_0 为材料无应力状态时特定晶面衍射角; φ 为试样表面法线与衍射晶面法线夹角; θ 为与入射线呈 φ 角的晶面衍射角; K 为 $\sin 2\varphi$ 法中 X 射线应力常数。由式 (1) 可知, 弹性模量、衍射角等因素的变化都能导致残余应力的数值发生改变。陆金花等^[47]研究了激光冲击强化对 45#钢-40Cr 钢焊接接头组织与性能的影响, 研究表明, 焊缝区、热影响区、母材区的残余拉应力都变成了残余压应力, 沿 45#钢母材到 40Cr 钢母材方向, 冲击前 45#钢母材区、45#钢热影响区、焊缝区、40Cr 热影响区、40Cr 钢母材区的平均残余拉应力分别为 50、100、130、110、70 MPa, 冲击后对应区域内的平均残余压应力分别为 -278、-367、-395、-351、-252 MPa。他们认为, 残余应力的产生主要是因为

焊缝区和热影响区的马氏体组织在激光冲击过程中发生了碎化, 引起了其尺寸减小和晶粒细化, 在一定程度上释放了由原来较大马氏体组织引起的体积膨胀, 消除或者削弱了残余拉应力的存在。孔德军等^[48]研究了 304 不锈钢激光冲击处理后在 0°、45°、90° 方向的残余应力, 结果表明, 残余应力均明显下降, 证明强化处理可以有效消除焊后产生的残余应力。Inamke 等^[49]、Sun 等^[50]分析了激光冲击强化对铝合金激光焊接的影响, 分析认为气孔是导致焊缝力学强度降低的主要原因之一, 在球形孔隙内部, 存在部分或全部熔化的材料, 被周围的气泡 (大多数为氢) 困在焊缝池中, 气孔越小, 残余应力越小, 激光冲击强化处理则有效降低了孔隙率和孔隙大小。结果显示, 晶粒细化以及气孔的存在对残余应力产生明显的影响, 而激光冲击强化能通过高能冲击促进晶粒细化, 减少孔隙, 从而控制残余应力的产生和变化, 甚至引导残余应力向有利的方向发展。通过激光冲击强化技术可以消除残余拉应力, 产生残余压应力, 引起残余应力的重新分布, 实现应力分布重构。在构建出零件的残余应力场后, 在仿真环境下对重构的残余应力场进行验证, 以实现激光冲击强化残余应力的无损检测, 无损检测强化后的应力分布是判断强化效果的重要依据。

分析可知, 影响残余应力的因素有很多, 包括机械加工方法和强化工艺, 而不均匀的塑性变形和微观组织的相变也有重要影响。常用的机械加工方法有车、铣、刨、磨、齿面加工、复杂曲面加工以及特种加工等, 不同的材料所适用的工种也不同, 要综合考虑热处理方式的影响, 才能更好地引导和控制残余应力的产生。在焊接件中, 针对不同的焊接类型和材质, 选择合适的激光冲击强化工艺参数, 使残余拉应力转变成残余压应力, 在金属表面更深层的位置产生残余压应力, 可有效控制裂纹扩展, 提升疲劳寿命。

3.3 疲劳裂纹扩展

疲劳在工程和制造领域普遍存在, 金属构件在长期使用之后, 常常因为疲劳断裂而失效。疲劳寿命是材料的重要性能之一, 在运行过程中, 零件所承受的各种外在附加循环载荷的作用会引起应力集中, 长时间使用会引起疲劳强度降低, 导致零件产生裂纹, 最终造成零件的永久损坏或者失效。疲劳裂纹从形成、逐步扩展一直到失效, 可分为以下阶段: 萌生阶段、生长阶段、疲劳断裂阶段。孙元等^[51-52]研究了镍基单晶高温合金钎焊接头的疲劳特性, 研究表明, 焊缝中的硬脆性硼化物相加速了裂纹扩展, 当焊缝间隙为 10 μm 时, 焊缝与母材界面处产生了微小裂纹并不断扩展, 当焊缝间隙为 100 μm 时, 裂纹在晶界处萌生并沿晶界扩展, 当焊缝间隙大于 200 μm 时, 裂纹在脆性化合物集中分布的位置萌生, 并沿着晶界扩展,

最终发生脆性断裂。余磊等^[53]综述了镍基高温合金焊接裂纹的产生原因和裂纹扩展的影响因素,研究表明,在镍基高温合金熔化焊接过程中,焊缝会存在结晶裂纹、液化裂纹、失塑裂纹和应变时效裂纹4种情况,杂质元素和添加元素对焊接裂纹的敏感性有重要影响。综合分析得出,裂纹产生的原因有很多,如微观组织的变化、环境温度的影响、杂质元素和添加元素的作用等都是重要的影响因素。

在焊接件的不同焊接区域中,焊缝区和热影响区是很容易发生疲劳裂纹失效和断裂的区域,疲劳裂纹的产生与扩展会直接导致焊缝的开裂以及焊接件的脱落。以铁、镍、钴等为基体的高温合金具有良好的抗氧化性、抗疲劳性等综合性能,在一些重要工业制造中,某些关键的热端承力部件全部为高温合金材料,例如燃烧室、低压涡轮、高压压缩器等,其焊接技术本身就具有较高的难度,技术要求高,其中焊缝的强度直接影响零件的寿命和安全性,裂纹的产生会直接导致焊缝疲劳寿命的降低,进而会产生不可估量的损失。

在工业制造领域及一些重要的生产领域中,焊接结构件的疲劳裂纹扩展导致零部件失效断裂是普遍存在的问题,但是,疲劳裂纹如何扩展、有什么样的扩展规律,对于这些行为的分析存在难点,分析的难点在于疲劳裂纹扩展行为的影响因素并不是单一的,是残余应力和微观组织共同作用的结果,通过表面强化技术抑制裂纹的扩展行为是提高焊接件使用寿命的有效措施。激光冲击强化技术是一种无污染、效率高的强化手段,对疲劳裂纹的产生与扩展具有显著的抑制作用,可降低扩展速率,提高使用寿命。Hatamleh等^[14]研究了7075铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳裂纹扩展行为,分析了激光冲击强化和普通强化的不同效果,对比发现,经激光冲击强化后,焊接过程中的残余拉应力变成了残余压应力,并且随着冲击次数的增加,疲劳裂纹扩展速率呈现反比降低的趋势,激光冲击强化处理产生的残余压应力更高、更深,疲劳裂纹扩展速率降低更明显。搅拌摩擦焊7075-T7351产生25 mm裂纹的循环次数、裂纹长度与循环次分别如图6和图7所示。孔德军等^[54-55]对X70、X80管线钢焊接接头进行了激光冲击强化处理,研究表明,激光冲击强化技术增加了裂纹扩展的阻力,降低了分层开裂程度,提高了心部的拉伸强度和焊接接头的断裂伸长率。李玉琴等^[56]分析了不锈钢焊接接头在激光冲击强化处理后的微观组织变化情况和疲劳裂纹扩展速率,认为强化后试样裂纹扩展速率降低的可能原因主要有晶粒细化、表面滑移带的形成、残余压应力及表面纳米晶层阻碍位错滑移等,激光冲击强化技术细化了基体晶粒,形成了大量的滑移带和变形孪晶组织,在残余压应力和外加拉应力相互作用、相互平衡的情况下,降低了裂纹扩展驱动

力,从而阻止了裂纹的增长。

疲劳裂纹的分析是比较复杂的过程,目前有关激光冲击强化对裂纹抑制作用的研究主要集中在残余应力和微观组织上,分析认为:(1)疲劳裂纹的萌生与扩展是多项因素相互作用的结果,激光冲击强化工艺参数本身就存在多种,多种因素的耦合使裂纹扩展存在不确定性,可以采用正交试验法来分析,对比之后,选择最合适的一组参数;(2)热处理、焊接方法、外部环境因素的作用是影响裂纹的重要外部因素,在激光冲击强化的过程中,应根据不同材质选择合适的焊接方法,同时可以采用温度辅助激光冲击强化技术以减缓疲劳裂纹扩展速率,提高疲劳强度,提升焊缝的使用寿命和抗失效性能,将激光冲击强化技术与焊接类型、温度等外部因素相结合,形成复合强化处理的方法,强化效果会更优良。

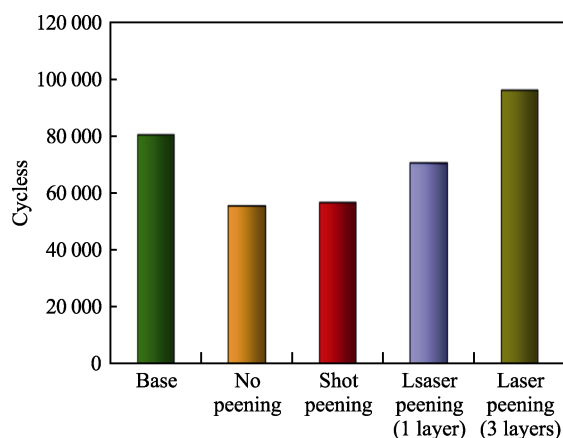


图6 搅拌摩擦焊7075-T7351产生25 mm裂纹的循环次数^[14]

Fig. 6 Number of cycles to grow a 25 mm crack in FSW 7075-T7351^[14]

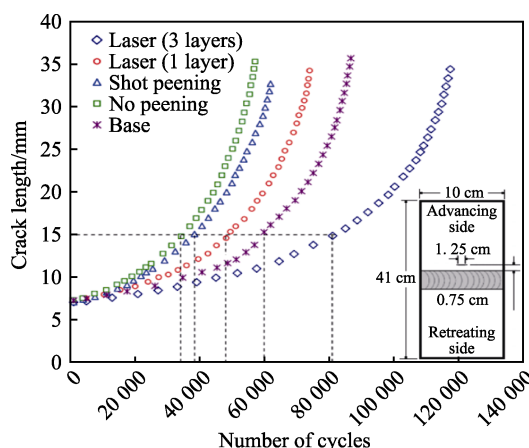


图7 搅拌摩擦焊7075-T7351的裂纹长度与循环次数^[14]

Fig. 7 Crack length and number of cycles for FSW 7075-T7351^[14]

3.4 激光冲击强化对焊缝显微组织的影响

在材料受力、受热后,其力学性能和微观组织都

存在复杂的变化, 并且这些变化是相互影响的, 不同的焊接工艺和表面处理方法会导致析出相、晶粒尺寸等微观组织发生不同的演变。焊缝不同区域显微组织的变化原因并不相同, 在焊接时, 焊缝区和热影响区的温度变化不一样, 焊接完毕后的冷却速度也不同, 导致该区的组织变得复杂。显微组织的变化主要是由于母材在焊接过程中发生了熔合, 熔合区附近的温度升高和热量的循环交替导致焊缝和热影响区的晶粒结构和晶粒尺寸发生较大的改变, 晶粒细化可以减缓裂纹扩展, 阻止裂纹产生, 利于提升材料的疲劳寿命。因此, 要想提高焊缝的整体性能, 最优的方法是控制组织的变化, 使其发生塑性变形并形成高密度位错。柴艳等^[57]对 K4030 合金叶片进行了激光冲击强化, 认为粗大晶粒在强化后沿垂直冲击方向被压扁、拉长, 产生了晶粒细化现象, 由于材料晶粒尺寸变小, 材料表层产生残余压应力, 导致冲击后试样的 X 射线衍射峰变宽。Ge 等^[58]和张青来等^[59]对镁合金进行了激光冲击强化, 诱导了晶粒细化, 结果表明, 采用优化后的激光参数, 在表层产生了平均晶粒尺寸为 20 nm 的纳米晶粒, 纳米层厚度超过 20 μm , 表面纳米晶层限制了位错滑移, 促使了晶粒细化, 降低了裂纹扩展速率。Lu 等^[60]对高温合金 GH4169 进行了激光冲击强化, 发现位错的累积为析出相提供了更多的形核位点, 细小分散的 γ'' 相被大量的位错镶嵌在 δ 相中, 导致晶界产生挠度。以上研究都是集中于激光冲击强化后的不同材料微观组织的影响, 普遍的结论

是激光冲击强化能诱导晶粒细化, 产生位错滑移, 但是以上研究未涉及焊缝强化的微观组织, 焊缝微观组织的强化演变思路可以借鉴未焊接基材的强化思路。

焊缝凝固后的组织会形成柱状晶, 在高应变率的塑性变形中, 柱状晶会沿着垂直于熔合线的方向生长, 并向焊缝中心发展, 引起位错的萌生和扩展, 使晶粒细分, 形成亚晶界, 同时, 激光冲击强化通过孪晶作用, 使晶粒转变为等轴晶。Wang 等^[61]研究了 7075 铝合金激光焊接接头在激光冲击强化前后的应力腐蚀行为, 研究表明, 强化前的焊接接头存在气孔和粗柱状晶粒等缺陷, 经过 LSP 处理后, 微观组织更细化、更均匀, 减少了柱状晶体的数量, 并加速了等轴晶的形成, 铝合金焊接接头的 SEM 微观结构如图 8 所示。7075 铝合金容易发生位错交叉滑移, 激光冲击强化后, 严重的塑性变形和高应变将导致晶界破裂和位错运动, 使位错积累, 形成亚晶界, 导致晶粒细化, 他们总结了晶粒细化的转变机制, LSP 晶粒细化机理示意图如图 9 所示。LSP 辅助 DSA 和未处理试样上表面的典型观察结果如图 10 所示。在动态应变时效下, 激光冲击强化使铝合金焊接接头表面形成致密强化层, 热影响区颗粒均匀、细小^[62], 粒径约为 20 μm (见图 10a), 未经过激光冲击强化处理的热影响区域晶粒粗大, 并且镶嵌不均匀 (见图 10b), 激光冲击强化处理后的焊缝上部区域有大量均匀分布的析出相, 而下方的热影响区则有 2 种均匀分布的晶粒 (见图 10c), 而在未经激光冲击强化处

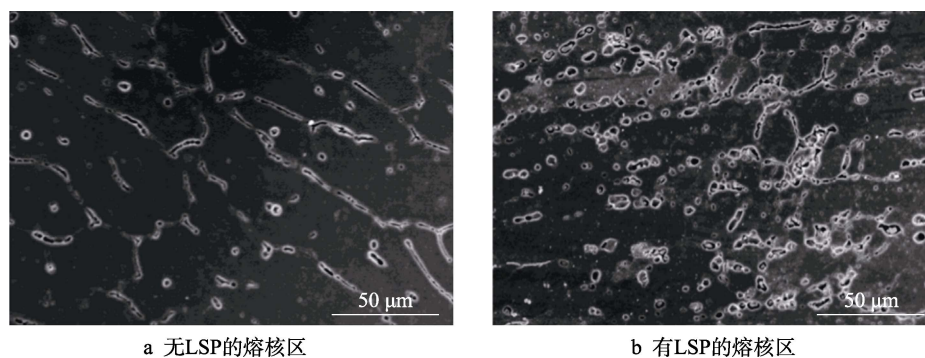


图 8 铝合金焊接接头的 SEM 微观结构^[61]

Fig.8 SEM microstructure of aluminum alloy welded joints^[61]: a) nugget zone not subject to LSP; b) nugget zone subject to LSP

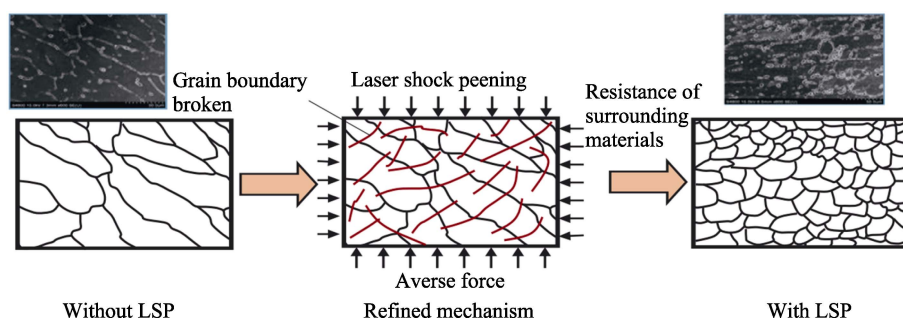


图 9 LSP 晶粒细化机理示意图^[61]

Fig.9 Schematic diagram of the grain refinement mechanism of LSP^[61]

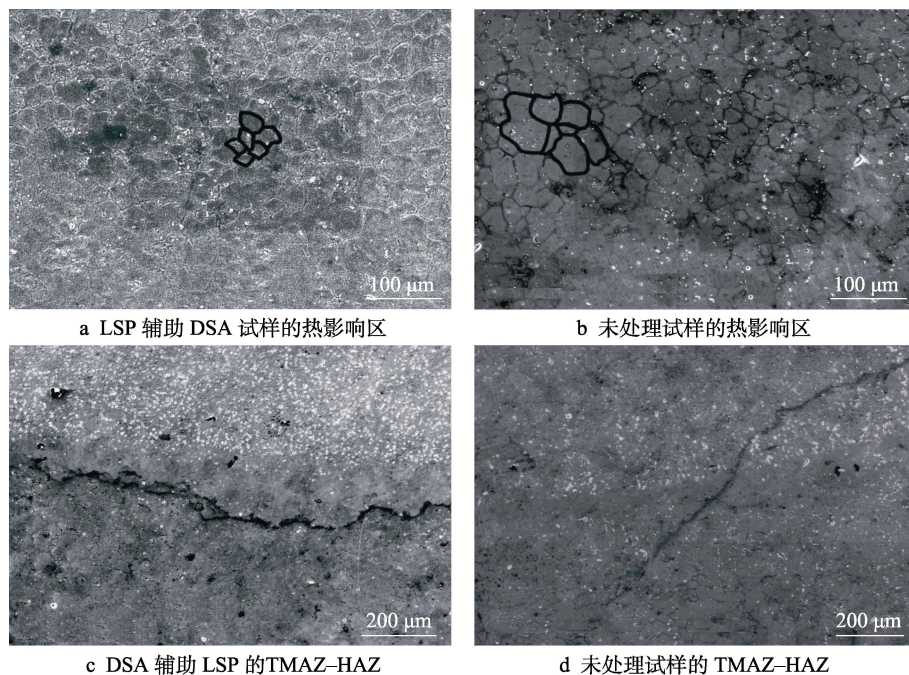


图 10 LSP 辅助 DSA 和未处理试样的上表面的典型观察结果^[62]

Fig.10 Typical observation results in the top surfaces of the samples with LSP assisted by DSA and the untreated samples^[62]: a) HAZ of the samples subject to LSP assisted by DSA; b) HAZ of the untreated samples; c) TMAZ-HAZ of the samples subject to LSP assisted by DSA; d) TMAZ-HAZ of the untreated samples

理的焊缝上方区域析出相则比较少,且分布不均匀,下方焊缝区析出相颗粒大小差异比较明显(见图10d),经过激光冲击强化处理后,合金的力学性能得到了显著的改善。材料力学性能的变化与微观组织的演变作用密切相关,动态再结晶和晶粒细化等微观组织以及位错运动可促使残余压应力增加,硬度也会随之变化,在焊接和制造过程中,微观组织的演变与众多因素有关,包括相变、析出相的形成、高应变、晶粒尺寸和取向偏差以及对温度、热处理的影响等。为了提高焊缝的完整性和强度,要避免焊接过程中的不利热效应(例如金属熔化和再凝固形成的脆性金属化合物),研究时需要将性能与微观组织的改变结合起来,以获得最佳性能的强化参数,提升产品的整体特性。

4 存在的问题

1) 激光冲击强化技术于20世纪90年代在美国获得了大规模的工程应用,但是焊缝的激光冲击强化处理技术至今尚未获得大规模工程应用,这与零部件的适应性和激光冲击强化设备有关,发动机叶片等多数焊接件的不规则曲面导致焊缝的位置存在不确定性,激光对焦点的位置比较敏感,不规则曲面会导致激光焦距变动,强化效果难以控制,当前的激光冲击强化设备很难适用于复杂曲面的焊缝强化。

2) 当前激光冲击强化技术的研究成果主要以标准试样件为主,实际零件的焊缝与标准试样的存在较

大区别,焊接方式的选择和焊接工艺决定了焊缝质量的好坏,凹凸不平、气孔等问题导致激光冲击强化的工艺参数和实验数据不一定适用于工程应用。

3) 在工艺、装备的研发上,移动式现场激光处理设备的研发存在难点,小型化装置、输出能量稳定的高性能激光冲击设备的研发不够成熟。

5 展望

激光冲击强化技术因具备强化效果好、适用性佳的特点,在焊缝领域的应用不断被拓展,特别是在高温合金焊缝领域。该技术可以为工业领域和高科技制造领域的发展提供高效率、无污染、低成本的工艺技术方案。介绍了激光冲击强化技术对焊缝性能及组织结构强化的影响,分别从硬度、残余应力、疲劳裂纹扩展等焊缝典型力学性能以及显微组织等方面进行了重点分析与总结,并对其发展前景进行了展望。

1) 在激光冲击强化理论研究与实际应用中,学术研究占有很大比例,在工业化应用思想上,“焊接+复合强化”的理论研究以及实际应用在焊缝强化领域具有更好的前景。激光冲击强化后的实时残余应力重构是无损判别激光冲击强化的重要依据,但目前的检测方法不成熟,此难题不解决,就很难实现工程应用,这也是今后的研究方向。

2) 需要对焊缝强化的智能化发展进行更多研究,特别是有关焊缝质量检测技术的研究以及检测设备的研发,在焊接的同时对焊缝质量进行检测并实现激

光冲击强化作用,是焊缝强化以及整体设备质量提升的新思路。

3) 对激光冲击强化技术的研究逐步从理论研究转向对精准工艺参数的控制以及机动灵活的加工方式的应用等,因此,未来对重要零部件激光冲击强化的研究重点需要从对残余应力的研究转向对微观组织演变的观察与分析的研究,由单一研究方式转向复合研究方式是激光冲击强化的强化机理和强化工艺的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 卓义民, 陈远航, 杨春利. 航空发动机叶片焊接修复技术的研究现状及展望[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 22-28.
ZHUO Yi-min, CHEN Yuan-hang, YANG Chun-li. Research Status and Prospect of Welding Repair Technology for Aero-Engine Blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 22-28.
- [2] 贺竞雄. 表面强化技术在改善化工机械使用寿命中的应用[J]. 化工管理, 2016(16): 187-188.
HE Jing-xiong. Application of Surface Strengthening Technology in Improving the Service Life of Chemical Machinery[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(16): 187-188.
- [3] 肖建华. 探讨表面强化技术在机械零件中的运用[J]. 山东工业技术, 2017(5): 22.
XIAO Jian-hua. Discussion on the Application of Surface Strengthening Technology in Mechanical Parts[J]. Shandong Industrial Technology, 2017(5): 22.
- [4] 刘全胜, ASWIN D, MAHDAVIAN S. Nd: YAG 激光焊接中装夹预紧力对焊缝的影响[J]. 焊接技术, 2009, 38(12): 46-48.
LIU Quan-sheng, ASWIN D, MAHDAVIAN S. Effects of Preset Clamping Force on Strength of Butt Nd: YAG Laser Welding Joint[J]. Welding Technology, 2009, 38(12): 46-48.
- [5] 何兆儒, 沈一洲, 周晋, 等. 激光冲击强化的微观组织演变与性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(19): 48-58.
HE Zhao-ru, SHEN Yi-zhou, ZHOU Jin, et al. Microstructure Evolution and Performance Enhancement of Laser Shock Peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(19): 48-58.
- [6] 乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 激光诱导冲击波应用技术研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 1-6.
QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, LU Ying. Current Status of Laser-Induced Shock Wave Application Technology[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 1-6.
- [7] 高玉魁, 蒋聪盈. 激光冲击强化研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 16-20.
GAO Yu-kui, JIANG Cong-ying. Review and Prospect on Laser Shock Peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 16-20.
- [8] 乔红超, 胡宪亮, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化的影响参数与发展应用[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 1-9.
QIAO Hong-chao, HU Xian-liang, ZHAO Ji-bin, et al. Influence Parameters and Development Application of Laser Shock Processing[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 1-9.
- [9] 苏纯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光冲击强化对 6061-T6 铝合金 TIG 焊接接头疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 159-165.
SU Chun, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Effect of Laser Shock Strengthening on Fatigue Properties of TIG Welded Joints of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 159-165.
- [10] 温德平, 丁玎, 叶陈锋, 等. 不同约束层材料对激光冲击强化表面完整性的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 150-153.
WEN De-ping, DING Ding, YE Chen-feng, et al. Influence of Different Confining Layer Materials on Surface Integrity of Laser Shock Strengthening[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(24): 150-153.
- [11] 程秀全, 晏畅, 程思竹, 等. 工艺参数对激光冲击诱导表面残余应力洞的影响规律[J]. 机械工程材料, 2019, 43(11): 53-56.
CHENG Xiu-quan, YAN Chang, CHENG Si-zhu, et al. Influence Rule of Process Parameters on Residual Stress Cave Induced by Laser Shock[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(11): 53-56.
- [12] 周留成, 周磊, 李应红, 等. 激光冲击强化对不锈钢焊接接头拉伸性能的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 52-54.
ZHOU Liu-cheng, ZHOU Lei, LI Ying-hong, et al. Effect of Laser Shock Processing on Tensile Strength of Welded Joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 52-54.
- [13] 吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 激光冲击强化技术的应用现状与发展[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 6-12.
WU Jia-jun, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, et al. The Application Status and Development of Laser Shock Processing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(2): 6-12.
- [14] HATAMLEH O, LYONS J, FORMAN R. Laser and Shot Peening Effects on Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded 7075-T7351 Aluminum Alloy Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(3): 421-434.
- [15] HATAMLEH O. A Comprehensive Investigation on the Effects of Laser and Shot Peening on Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded AA 2195 Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(5): 974-988.
- [16] HATAMLEH O. Effects of Peening on Mechanical Properties in Friction Stir Welded 2195 Aluminum Alloy Joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 492(1/2): 168-176.

- [17] HATAMLEH O, DEWALD A. An Investigation of the Peening Effects on the Residual Stresses in Friction Stir Welded 2195 and 7075 Aluminum Alloy Joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4822-4829.
- [18] 宋巍, 邹世坤, 曹子文. 激光冲击处理在核工业焊接结构上的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(14): 89-91.
SONG Wei, ZOU Shi-kun, CAO Zi-wen. Application of Laser Peening on Weld Structure Nuclear Industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(14): 89-91.
- [19] 邹世坤, 曹子文, 费群星, 等. 激光冲击处理焊接区在核反应堆上的应用[J]. 焊接, 2009(10): 37-41.
ZOU Shi-kun, CAO Zi-wen, FEI Qun-xing, et al. Laser Shock Processing of Weld Zones and Its Application on Nuclear Reactor[J]. Welding & Joining, 2009(10): 37-41.
- [20] SAKINO Y, SANO Y, KIM Y C. Application of Laser Peening without Coating on Steel Welded Joints[J]. International Journal of Structural Integrity, 2011, 2(3): 332-344.
- [21] DEVENDRANATH R K, NARENTHIRAN A, KONJENTI A, et al. Effect of Low Energy Laser Shock Peening on the Mechanical Integrity of Hastelloy C-276 Welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 274: 116296.
- [22] IORDACHESCU M, VALIENTE A, CABALLERO L, et al. Laser Shock Processing Influence on Local Properties and Overall Tensile Behavior of Friction Stir Welded Joints[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2422-2429.
- [23] IORDACHESCU M, VALIENTE A, SCUTELNICU E, et al. Laser Shock Processing Influence on Constitutive Behaviour of Graded Structures Produced by Laser Welding of Ferritic to Austenitic Stainless Steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(4): 302-309.
- [24] SADHU A, SARKAR S, CHATTOPADHYAY A, et al. Effect of Laser Shock Peening on Micro-Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded CuCrZr Sheets[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831: 142238.
- [25] NASIŁOWSKA B, BOGDANOWICZ Z, WOJUCKI M. Shot Peening Effect on 904L Welds Corrosion Resistance[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 115: 276-282.
- [26] 邹世坤, 王健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响(I) [J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 79-81.
ZOU Shi-kun, WANG Jian, WANG Hua-ming. Effects of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties of Welded Joints(I) [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 79-81.
- [27] 邹世坤, 王健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响(II) [J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 66-68.
ZOU Shi-kun, WANG Jian, WANG Hua-ming. Effects of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties of Welded Joints(II) [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(4): 66-68.
- [28] 彭薇薇. 激光喷丸强化不锈钢焊接接头抗应力腐蚀研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006: 76-84.
PENG Wei-wei. Study on Stress Corrosion Resistance of Welded Joints of Laser Peening Strengthened Stainless Steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006: 76-84.
- [29] ZHANG L, LUO K Y, LU J Z, et al. Effects of Laser Shock Processing with Different Shocked Paths on Mechanical Properties of Laser Welded ANSI 304 Stainless Steel Joint[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(13/14): 4652-4657.
- [30] 许海鹰, 曹子文, 邹世坤, 等. 激光冲击处理对 TC4 氩弧焊缝力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(4): 672-676.
XU Hai-ying, CAO Zi-wen, ZOU Shi-kun, et al. Influence of Laser Shock Processing on Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy TIG Welding Bead[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(4): 672-676.
- [31] 许海鹰, 邹世坤, 车志刚, 等. 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊缝微结构及性能的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 97-101.
XU Hai-ying, ZOU Shi-kun, CHE Zhi-gang, et al. Effect of Laser Shock Frequency on Microstructure and Properties of TC4 Argon Arc Welding Seam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 97-101.
- [32] XU H Y, CHE Z G, ZOU S K, et al. The Influence of Laser Shock Processing to TC4 Titanium Alloy TIG Welding Bead Microstructure and Properties[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S4): 206-210.
- [33] 王学德, 胡雅骥, 王路成, 等. 激光冲击消除焊接残余应力[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 126-129.
WANG Xue-de, HU Ya-ji, WANG Lu-cheng, et al. Eliminating Welding Residual Stress by Laser Shock[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(6): 126-129.
- [34] 陈怡, 尹传震, 王娟. 激光与超声波冲击焊缝对比研究[J]. 机械工程师, 2014(11): 55-57.
CHEN Yi, YIN Chuan-zhen, WANG Juan. Comparison between Laser Shock Processing and Ultrasonic Impact Treatment Used in Welding Seam[J]. Mechanical Engineer, 2014(11): 55-57.
- [35] 聂祥樊, 李应红, 何卫锋, 等. 航空发动机部件激光冲击强化研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 293-305.
NIE Xiang-fan, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Research Progress and Prospect of Laser Shock Strengthening of Aero-Engine Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 293-305.
- [36] 李杰. 激光喷丸对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(1): 60-63.
LI Jie. Effects of Laser Peen on 7075 Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joints[J]. Aerospace Materials &

- Technology, 2010, 40(1): 60-63.
- [37] 王江涛, 张永康, 周金宇, 等. 两种焊后处理工艺对铝合金焊接接头力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1): 40-50.
WANG Jiang-tao, ZHANG Yong-kang, ZHOU Jin-yu, et al. Effects of Two Post-Weld Treatments on Mechanical Properties of Aluminum Alloy Welded Joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 40-50.
- [38] 王连庆, 胡雅楠, 车志刚, 等. 激光冲击强化 7075 铝合金熔焊接头的疲劳性能[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 267-274.
WANG Lian-qing, HU Ya-nan, CHE Zhi-gang, et al. Fatigue Performance of Laser Shock Processed Fusion Welded 7075 Al Alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 267-274.
- [39] 鲁金忠, 张永康, 孔德军, 等. 激光冲击强化对 TC4 电子束焊缝机械性能的影响[J]. 江苏大学学报, 2006, 27(3): 207-210.
LU Jin-zhong, ZHANG Yong-kang, KONG De-jun, et al. Effects on Mechanical Properties of TC4 Welding Line by Laser Shock Processing[J]. Journal of Jiangsu University, 2006, 27(3): 207-210.
- [40] 黄潇, 曹子文, 常明, 等. 激光冲击强化对 TC4 钛合金单面修饰激光焊接接头疲劳性能的影响[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 104-109.
HUANG Xiao, CAO Zi-wen, CHANG Ming, et al. Effects of Laser Shock Processing on Fatigue Performances of TC4 Titanium Alloy Single-Side Laser Modification Welding Joints[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(1): 104-109.
- [41] 张超, 王匀. 大面积激光冲击对高强度钢 EH36 焊接结构力学性能的影响[J]. 焦作大学学报, 2019, 33(2): 76-79.
ZHANG Chao, WANG Yun. Effect of Large Area Laser Shock on Mechanical Properties of Welded Structure of High Strength Steel EH36[J]. Journal of Jiaozuo University, 2019, 33(2): 76-79.
- [42] 殷苏民, 汪伟力, 钱绍祥, 等. 基于 ABAQUS 的 2A11 铝焊接结构激光冲击处理数值模拟[J]. 金属热处理, 2015, 40(9): 198-202.
YIN Su-min, WANG Wei-li, QIAN Shao-xiang, et al. Numerical Simulation of Laser Shock Processing of 2A11 Aluminum Alloy Welded Structure Based on ABAQUS[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(9): 198-202.
- [43] 殷苏民, 张超, 王匀, 等. 激光冲击对不锈钢焊接结构影响的数值分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 79-84.
YIN Su-min, ZHANG Chao, WANG Yun, et al. Numerical Analysis for the Structure Effect on Stainless Steel Welding Treated by Laser Shock Processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 79-84.
- [44] 罗密, 罗开玉, 王庆伟, 等. 激光冲击 7075-T6 铝合金焊缝的残余应力场数值模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 149-155.
LUO Mi, LUO Kai-yu, WANG Qing-wei, et al. Numerical Simulation of Laser Shock Peening on Residual Stress Field of 7075-T6 Aluminum Alloy Welding[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 149-155.
- [45] 卢海飞, 鲁金忠, 张文泉, 等. 激光冲击 316L 不锈钢焊接件的模拟分析与试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 336-343.
LU Hai-fei, LU Jin-zhong, ZHANG Wen-quan, et al. Simulation Analysis and Experimental Study of 316L Stainless Steel Weldments Processed by Laser Shock Peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 336-343.
- [46] Type Transient: 残余应力是什么[EB/OL]. 知乎. [2012-06-19]. <https://www.zhihu.com/question/28986673>.
Type Transient: What is the Residual Stress[EB/OL]. ZHI Hu. [2012-06-19]. <https://www.zhihu.com/question/28986673>.
- [47] 陆金花, 冯爱新, 陈凤国. 激光冲击对 45 钢-40Cr 钢焊接接头组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(6): 101-104.
LU Jin-hua, FENG Ai-xin, CHEN Feng-guo. Effect of Laser Shocking on Microstructure and Properties of 45 Steel-40Cr Steel Welded Joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(6): 101-104.
- [48] 孔德军, 朱伟, 孙波. 激光冲击处理对 AISI304 钨极氩弧焊接接头残余应力的影响[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(6): 761-764.
KONG De-jun, ZHU Wei, SUN Bo. Effects of Laser Shock Processing on Residual Stress of AISI304 TIG Welding Joint[J]. Materials Science and Technology, 2009, 17(6): 761-764.
- [49] INAMKE G V, PELLONE L, NING Jie, et al. Enhancement of Weld Strength of Laser-Welded Joints of AA6061-T6 and TZM Alloys via Novel Dual-Laser Warm Laser Shock Peening[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1/2/3/4): 907-919.
- [50] SUN G, FANG X, TONG Z, et al. Effect of Laser Shock Peening on Aluminium Alloy Laser-Welds[J]. Surface Engineering, 2016, 32(12): 943-948.
- [51] 孙元, 侯星宇, 金涛, 等. DD5 单晶高温合金钎焊接头的微观组织和力学性能分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(1): 117-120.
SUN Yuan, HOU Xing-yu, JIN Tao, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Brazed Joints of DD5 Single Crystal Superalloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(1): 117-120.
- [52] 孙元, 赵旭, 苏瑾, 等. 镍基单晶高温合金钎焊接头的微观组织与性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 32-38.
SUN Yuan, ZHAO Xu, SU Jin, et al. Microstructure and Properties of Brazed Joints of Nickel-Based Single Crystal Superalloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 32-38.
- [53] 余磊, 曹睿. 镍基合金焊接裂纹研究现状[J]. 金属学报, 2021, 57(1): 16-28.

- YU Lei, CAO Rui. Welding Crack of Ni-Based Alloys: A Review[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(1): 16-28.
- [54] 孔德军, 龙丹, 吴永忠. 激光冲击处理对 X80 管线钢焊接接头拉伸性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 123-128.
- KONG De-jun, LONG Dan, WU Yong-zhong. Effects of Laser Shock Processing on Tensile Properties of X80 Pipeline Steel Welded Joints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 123-128.
- [55] 孔德军, 周朝政, 胡爱萍. 激光冲击处理对 X70 管线钢焊接接头力学性能的影响[J]. *吉林大学学报*, 2011, 41(5): 1507-1512.
- KONG De-jun, ZHOU Chao-zheng, HU Ai-ping. Effect of Laser Shock Treatment on Mechanical Properties of X70 Pipeline Steel Welded Joint[J]. *Journal of Jilin University*, 2011, 41(5): 1507-1512.
- [56] 李玉琴, 孟长军, 王学德, 等. 激光冲击强化 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 165-169.
- LI Yu-qin, MENG Chang-jun, WANG Xue-de, et al. Corrosion Resistance Property of 316L Stainless Steel Welding Joints Treated by Laser Shock Peening[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 165-169.
- [57] 柴艳, 任军, 何卫锋, 等. 激光冲击强化对 K4030 合金叶片疲劳性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 141-146.
- CHAI Yan, REN Jun, HE Wei-feng, et al. Effect of Laser Shock Processing on the Fatigue Property of K4030 Alloy Blade[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 141-146.
- [58] GE Mao-zhong, XIANG Jian-yun. Effect of Laser Shock Peening on Microstructure and Fatigue Crack Growth Rate of AZ31B Magnesium Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 544-552.
- [59] 张青来, 吴铁丹, 钱阳, 等. AZ91D-T6 铸造镁合金激光冲击强化和高周疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 93-99.
- ZHANG Qing-lai, WU Tie-dan, QIAN Yang, et al. Study on High Cycle Fatigue Properties and Laser Shock Processing of AZ91D-T6 Cast Magnesium Alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 93-99.
- [60] LU Ying, YANG Yu-ling, ZHAO Ji-bin, et al. Impact on Mechanical Properties and Microstructural Response of Nickel-Based Superalloy GH4169 Subjected to Warm Laser Shock Peening[J]. *Materials*, 2020, 13(22): 5172.
- [61] WANG J T, ZHANG Y K, CHEN J F, et al. Effects of Laser Shock Peening on Stress Corrosion Behavior of 7075 Aluminum Alloy Laser Welded Joints[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 647: 7-14.
- [62] SU Chun, ZHOU Jian-zhong, MENG Xian-kai, et al. Improvement in Fatigue Performance of Aluminium Alloy Welded Joints by Laser Shock Peening in a Dynamic Strain Aging Temperature Regime[J]. *Materials*, 2016, 9(10): 799.

责任编辑: 蒋红晨

(上接第 10 页)

- [58] CHENG A, HUMAYUN A, COHEN D J, et al. Additively Manufactured 3D Porous Ti-6Al-4V Constructs Mimic Trabecular Bone Structure and Regulate Osteoblast Proliferation, Differentiation and Local Factor Production in a Porosity and Surface Roughness Dependent Manner[J]. *Biofabrication*, 2014, 6(4): 045007.
- [59] TAKAHASHI Y, TABATA Y. Effect of the Fiber Diameter and Porosity of Non-Woven PET Fabrics on the Osteogenic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells[J]. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2004, 15(1): 41-57.
- [60] AHMADI S, YAVARI S, WAUTHLE R, et al. Additively Manufactured Open-Cell Porous Biomaterials Made from Six Different Space-Filling Unit Cells: The Mechanical and Morphological Properties[J]. *Materials*, 2015, 8(4): 1871-1896.
- [61] POLTUE T, KARUNA C, KHRUEADUANGKHAM S, et al. Design Exploration of 3D-Printed Triply Periodic Minimal Surface Scaffolds for Bone Implants[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 211: 106762.
- [62] CHARBONNIER B, MANASSERO M, BOURGUIGNON M, et al. Custom-Made Macroporous Bioceramic Implants Based on Triply-Periodic Minimal Surfaces for Bone Defects in Load-Bearing Sites[J]. *Acta Biomaterialia*, 2020, 109: 254-266.
- [63] DEERING J, GRANDFIELD K. Current Interpretations on the *in Vivo* Response of Bone to Additively Manufactured Metallic Porous Scaffolds: A Review[J]. *Biomaterials and Biosystems*, 2021, 2: 100013.
- [64] DAVOODI E, MONTAZERIAN H, MIRHAKIMI A S, et al. Additively Manufactured Metallic Biomaterials[J]. *Bioactive Materials*, 2021, 15: 214-249.
- [65] CHEN Wen-liang, YANG Jing-zhou, KONG Hui, et al. Fatigue Behaviour and Biocompatibility of Additively Manufactured Bioactive Tantalum Graded Lattice Structures for Load-Bearing Orthopaedic Applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, 130: 112461.