

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.05.007

激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响*

周 磊^{1,2}, 汪 诚¹, 周留成¹, 陈科庆²

(1.空军工程大学 工程学院, 西安 710038; 2.中国人民解放军 94534 部队, 济南 250023)

摘 要: 为提高焊接接头的力学性能, 利用波长为 532 nm, 脉宽为 10 ns, 能量为 6.25 J, 光斑尺寸为 3 mm 的 YAG 激光器对焊接接头进行了激光冲击强化处理。结果表明: 激光冲击强化使接头拉伸强度由 815 MPa 提高到 867 MPa, 焊缝硬度提高 51.4 %, 热影响区硬度提高 28.2 %, 焊接后残余应力由 134 MPa 转变为-237MPa。利用光学显微镜对焊缝进行了观察和分析, 并对力学性能提高的机制进行了讨论。

关键词: 激光冲击强化; 焊接接头; 抗拉强度; 疲劳寿命

中图分类号: TG17; TG47

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)05-0041-04

The Effect of Laser Shock Surface Processing on Mechanical Properties of Welded Joints

ZHOU Lei^{1,2}, WANG Cheng¹, ZHOU Liu-chen¹, CHEN Ke-qing¹

(1. Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710038; 2. Chinese People's Liberation Army 94534, Ji'nan 250023)

Abstract: In order to improve mechanical properties of welded joints, these joints specimens were processed by YAG laser with parameters of 532 nm—wavelength, 10 ns—pulse duration, and 6.25 J output energy, Φ 3mm. The results show that the tensile strength of welded joints after laser shock processing is effectively enhanced from 815 to 867 MPa, the welded line hardness has been improved by 51.4 %, the HAZ hardness has been improved by 28.2 % and the residual stress has been changed from 134 MPa to -237 MPa, The fractographs of specimen are analyzed, and the mechanism which caused the mechanical properties' improvement is discussed.

Key words: laser shock processing; welded joints; tensile strength; fatigue life

0 引 言

焊接过程中, 在形成焊缝的同时, 不可避免地在其附近的母材内, 经历了一次焊接热循环的特殊热处理, 因而形成了一个组织和性能均不同于母材的焊接热循环区。焊接热影响区本身是一个组织和性能极不均匀的区域; 其中一些组织和性能变坏了的部位往往成为整个焊接接头中最薄弱环节, 对焊接质量起着控制作用。很多焊接结构的破坏事故都与其焊接热影响区的性能恶化有关^[1]。国内常用的焊接后处理方法是热处理、过载处理、振动法调整残余应力处理、锤击处理、爆炸消除应力处理、温差拉伸法消除焊接残余应力^[2-3]。2001年美国利弗莫尔

国家重点实验室报道, 激光冲击强化用于核废料储存容器焊缝的处理, 可用改善核反应器的安全性与可靠性, 延长反应器零件的工作时间, 从而使沸水反应器和压力水反应器具具有更长的服役时间和更低的运行成本^[4-5]。

目前国内对焊接区域激光冲击强化的主要是单面处理, 在处理较薄的试样时冲击波容易使试样弯曲^[6]。文中采用了国内先进的双光路对冲技术。从激光器发出的激光采用半透半反镜将激光能量一分为二, 并设计到达试件的光路光程一致, 聚焦部位相同, 从而可以避免冲击时产生的宏观变形。在激光冲击强化双光路对冲光路设计中, 同时考虑聚焦作用面的漫反射光的返回激光器光路对激光系统的影响, 在分光后, 对每路光做了适当延长光路的处理, 增加了光学隔离器, 有效

收稿日期: 2010-05-16; 修回日期: 2010-08-27

基金项目: *国防预研基金 (5132701) 资助项目

作者简介: 周磊(1980—), 男(汉), 山东济南人, 讲师, 博士。

抑止零件表面由于反射而进入激光系统的返回光,避免对系统光学元件的损伤,同时保证系统输出参数的稳定度。

1 试验方法

1.1 试验设备及材料

试验母材为12Cr2Ni4A钢,该钢是一种优良的马氏体不锈钢,高淬透性,经渗碳并淬火加低温回火后,表面具有很高的硬度且心部强度好,韧、塑性好,在航天航空等领域有广阔的应用。试样尺寸如图1所示,坡口如图2所示。

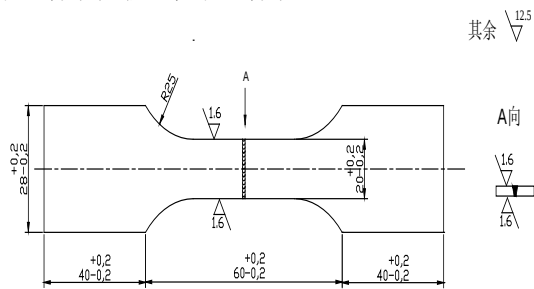


图 1 试样尺寸

Fig.1 The sketch of the sample

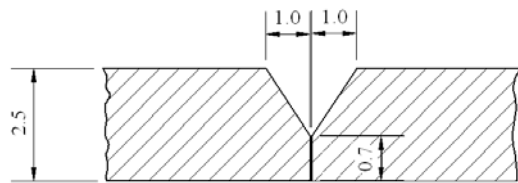


图 2 坡口形貌

Fig.2 Groove of welding process

焊接材料选择日本进口牌号为NAK80合金材料。焊接设备为LHM-50逆变式精密微束等离子焊机。焊接工艺参数: 维弧电流为28 A, 保护气流量为1.5 L/min, 脉冲频率2 Hz, 焊接速度1.5 cm/s。焊接时采用堆焊, 喷嘴根据修复区域形状作相应运动。

焊接前试样都用丙酮进行除油清理。焊接后对试样进行了激光冲击强化处理, 工艺参数为: 约束层为水, 涂层为黑漆, 激光波长532 nm, 激光能量6.25 J, 光斑直径3 mm, 圆形光斑, 半圆形搭接。

1.2 试验方法

拉伸试验在WDW-100万能试验机上进行, 拉伸速度0.5 mm/min。采用 HVS-1000型显微硬度计测

试焊接头硬度, 加载时间20 s, 所加载荷1.96 N。焊接试样室温在同一应力水平下进行一阶弯曲振动疲劳试验。试验按“HB5277-84发动机叶片及材料振动疲劳试验方法”和“HB/Z112-86材料疲劳试验统计分析方法”进行, 弯曲疲劳应力为640 MPa。采用X-350A型X射线应力分析仪测试焊接头残余应力。采用NEOPHOT21金相显微镜对接头组织进行了观察以及分析。

2 试验结果及分析

2.1 接头的拉伸性能

从表1中可以看出, 焊接后进行激光冲击强化处理的焊接头抗拉强度比未经激光冲击强化处理的焊接头有所提高, 而且经过双面激光冲击强化后焊接头强度提高更多。

表 1 两种工艺的接头力学性能对比

Table 1 Comparison of mechanical properties of welded joints by two different welding processes

	抗拉强度Rm/MPa	断裂位置
焊 接	825	热影响区
	810	焊缝
	805	焊缝
	819	热影响区
	820	热影响区
焊接后单面激光冲击强化	845	热影响区
	850	母材
	834	热影响区
	846	热影响区
	838	热影响区
焊接后双面激光冲击强化	860	母材
	873	母材
	872	母材
	870	母材
	860	母材

母材的抗拉强度为860.7 MPa, 焊接接头的平均抗拉强度达到母材的94.7 %, 为815.8 MPa, 激光单面冲击处理过的焊接接头的平均抗拉强度达到母材的97.9 %, 为842.6 MPa, 激光双面冲击处理过的焊接接头的抗拉强度已经超过母材, 试样断裂处位于母材, 且是激光冲击强化区与未强化区交界处。

2.2 接头的疲劳性能

从表 2 中可以看出,焊接后进行激光冲击强化处理的焊接头疲劳寿命比未经激光冲击强化处理的焊接头有大幅度提高,而且经过双面激光冲击强化后焊接头寿命提高更多。

表 2 两种工艺的接头疲劳寿命对比
Table 2 Comparison of fatigue life of welded joints by two different welding processes

	疲劳寿命/N	断裂位置
焊 接	1.8592×10^5	热影响区
	8.8953×10^4	焊缝
	9.8953×10^4	焊缝
	2.8592×10^5	热影响区
	1.6592×10^5	热影响区
焊接后单面激光冲击强化	6.8716×10^5	母材
	7.0414×10^5	母材
	6.7160×10^5	母材
	7.2162×10^5	母材
	6.0714×10^5	热影响区
焊接后双面激光冲击强化	3.98×10^6	未断
	3.98×10^6	未断
	3.98×10^6	未断
	3.98×10^6	未断

2.3 接头的硬度和残余应力

对无激光处理的焊接接头、激光冲击处理的焊接接头基体、焊缝和热影响区进行了显微维氏硬度和残余应力的检测。维氏硬度测试数据见表 3。焊接热影响区的硬度主要决定于被焊钢材的化学成分和冷却条件,其实质反映了不同的金相组织和性能。焊缝的显微硬度平均值为 391 HV,热影响区为 380 HV;激光冲击强化后焊缝显微硬度平均值为 592 HV,热影响区为 487 HV,均较冲击强化前有大幅度提高。

残余应力测试数据见表 4。焊接接头残余应力的测定表明,焊接后,在焊接头处残留着最大值约为 134 MPa 的拉应力,且分布很不均匀。激光冲击强化处理后,焊接残余拉应力完全消失,转变为 -237 MPa 的压应力。纯疲劳时,由于疲劳损伤的局部性及材料微观组织和残余应力分布的不均匀性,机械载荷与残余应力叠加可能大大加速疲劳在某些局部的损伤。Shuter-Geary^[7]观察到过载残余塑性

导入引起的裂纹扩展闭合的机制,冲击产生的瞬间有向(轴向)残余塑性在裂尖或缺陷前沿形成一个过塑性区,大小与缺陷尺寸相关,缺陷尺寸越大过塑性区越大,克服该塑性区。需要的时间或载荷也越大。一方面在裂尖或缺陷前沿导入压应力从而减缓后续疲劳损伤。另一方面,有向残余塑性导入使材料损伤沿轴向的扩展受到扼制,使材料微观组织和应力分布有序化,从而使疲劳寿命分散性降低。同时,拉应力是钝化膜破坏的起因,又阻止裂尖钝化膜的修复,并在裂尖造成应力集中。拉应力还会加速金属从特定的介质中吸附所谓破坏性组分,如 Cl^- 和 OH^- ,使材料的应力腐蚀敏感性提高。相反,压应力是不产生应力腐蚀断裂的。

表 3 两种工艺焊接接头的硬度
Table 3 Comparison of hardness of welded joints by two different welding processes

	测试位置	HV
焊接	母材	277
	焊缝	391
	热影响区	380
焊接后激光冲击强化	母材	320
	焊缝	592
	热影响区	487

表 4 两种工艺焊接接头的残余应力
Table 4 Comparison of residual stresses of welded joints by two different welding processes

	测试位置	MPa
焊接	母材	-173
	焊缝	134
	热影响区	126
焊接后激光冲击强化	母材	-421
	焊缝	-215
	热影响区	-237

2.4 接头的显微组织

为了研究激光冲击强化对焊接接头微观组织的影响,取激光二次冲击过的焊接接头试件和未冲击处理试件,分别在焊缝图3(a) (c)和热影响区图3(b) (d)取样,经镶嵌、粗磨、细磨和抛光、 FeCl_3 浸蚀,金相观察用 NEOPHOT21 型显微镜进行,未激光冲击焊缝区域的金相照片如图3(a) (c)所示。

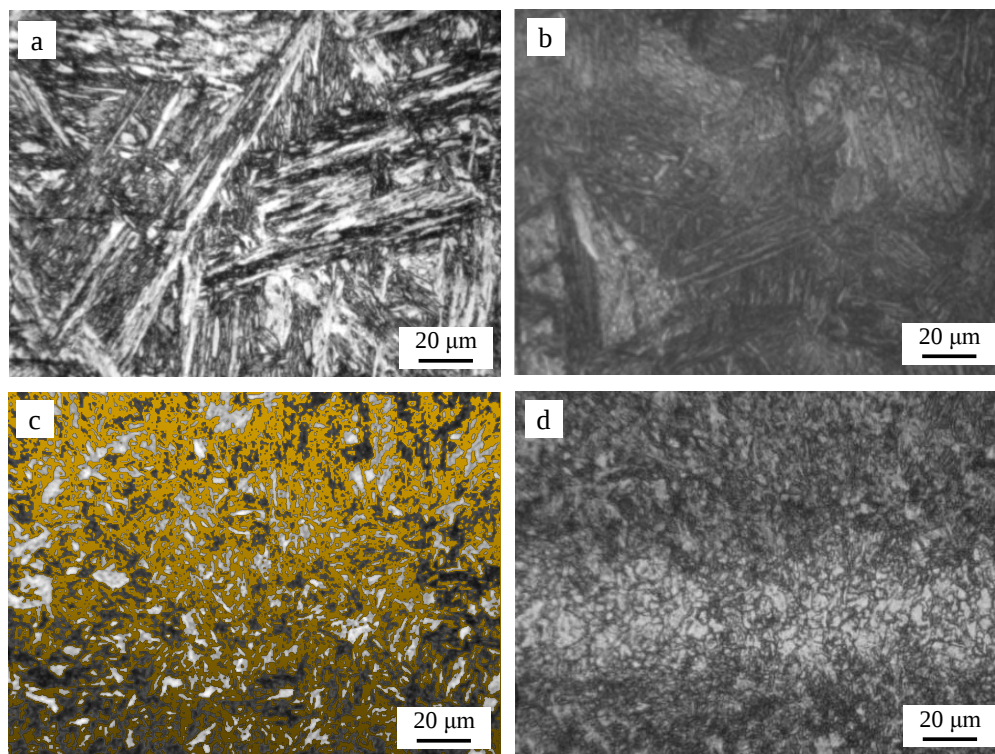


图 3 激光冲击强化前 (a, b) 后 (c, d) 焊接头表层金相组织

Fig.3 The microstructure of welded joints before and after laser shock processing

激光焊接时,热影响区内各点距焊缝的远近不同,因此各点所经历的焊接热循环不同,这就会出现不同的组织,因而也就具有不同的性能。由此看来,整个焊接热影响区的组织和性能是不均匀的。图 3(a)为焊缝部位的微观组织照片。图中可以看出,这个区的微观行为十分复杂,焊缝与母材的不规则结合,形成了参差不齐的分界面。此区的范围虽然很窄,但由于在化学成分上和组织性能上都有很大的不均匀性,所以对焊接接头的强度、韧性都有很大的影响。在许多情况下熔合区是产生裂纹、脆性破坏的发源地。图 3(c)是激光冲击强化处理后焊缝的微观组织照片。激光冲击强化处理后焊缝的金相组织细小,粗大的马氏体组织在激光冲击波的作用下碎化为细小的马氏体组织,这对提高拼焊板焊接接头的强度有利。图 3(b)是未激光冲击热影响区金相照片。焊接后热影响区组织转变为粗大的板状马氏体,形成了对裂纹敏感的淬硬组织。此区的韧性很低,通常要降低 20 %~30 %。因此,焊接刚度较大的结构时,常在过热粗晶区产生脆化或裂纹。过热区和熔合区一样,都是焊接接头的薄弱环节。焊接热影响区与焊缝不同之处在于,焊缝可以通过化

学成分的调整制定合适的焊接工艺来保证焊接性能的要求,而焊接热影响区的性能不可能进行成分调整,它是在焊接热循环作用下产生的不均匀性问题。图 3(d)是激光冲击强化处理后热影响区照片。经过激光冲击处理后,热影响区晶粒明显细化,粗大马氏体分解,消除了粗晶组织,从而提高其抗疲劳强度,使裂纹难于萌生,疲劳寿命延长,使焊缝区也更难于发生应力腐蚀开裂。

3 结 论

激光冲击强化处理可以改善焊接接头出金属的力学性能和微观组织,大幅度提高焊缝和热影响区的硬度,消除残余拉应力,提高焊接接头疲劳寿命。对焊接头双面激光冲击强化处理效果优于单面处理。

参考文献:

- [1] 王建华, 陆 皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论 [J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 75-79.
- [2] 游 敏, 郑小玲, 余海洲. 关于焊接残余应力形成机制的探讨 [J]. 2003, 24(2): 115-118.

(下转第 48 页)