

文章编号: 0258-7025(2009)08-2182-05

超高强度 30CrMnSiNi2A 钢的激光焊接 组织及性能

刘其斌^{1,2} 白丽锋¹

(¹ 贵州大学蔡家关校区材料学院, 贵州 贵阳 550003; ² 贵州省材料结构与强度重点实验室, 贵州 贵阳 550003)

摘要 采用 5 kWCO₂ 激光焊接超高强度 30CrMnSiNi2A 钢, 以获得性能优良的焊接接头。利用光学显微镜 (OM)、X 射线衍射 (XRD)、电子扫描显微镜 (SEM)、显微硬度仪、电子万能试验机和 X 射线应力测定仪对激光焊接接头的显微组织、硬度、抗拉强度、拉伸断口和残余应力进行了研究。结果表明, 焊缝中心区组织为等轴晶, 近中心区组织为枝状晶, 边缘区组织为粗大的柱状晶, 熔合区组织为细长柱状晶和细小等轴晶。热影响区 (HAZ) 组织主要为板条马氏体、贝氏体和少量残余奥氏体; 焊缝区主要由 α -Fe, NiCrFe, Fe-Ni 以及 MnSi₂ 等相组成; 焊缝区的硬度最高值约为 518 HV, HAZ 硬度最高值约为 560 HV, 从 HAZ 到基材硬度明显下降; 焊接接头的抗拉强度平均值为 802 MPa, 断口均出现在靠近焊缝的母材区; 焊接接头的冲击韧性为 75.7 J/cm²; 焊接接头的残余应力为压应力, 焊缝区的残余应力平均值为 -17 MPa, 热影响区的残余应力平均值为 -59 MPa。

关键词 激光技术; 激光焊接; 超高强度钢; 30CrMnSiNi2A; 组织; 性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2182

Microstructure and Properties of Ultra-High Strength Steel 30CrMnSiNi2A by Laser Welding

Liu Qibin^{1,2} Bai Lifeng¹

¹ Materials School, Caijiaguan Branch of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China
² Guizhou Key Laboratory for Mechanical Behavior and Microstructure of Materials,
Guiyang, Guizhou 550003, China

Abstract To obtain excellent welding joint, ultra-high strength steel 30CrMnSiNi2A was welded by laser. Microstructure, properties, tensile strength, tensile fracture and residual stress were investigated by means of optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), microhardness testing machine, electronic universal testing machine and X-ray stress analyzer. The experimental results indicate that microstructure of central welding zone, near central zone and edge zone is equiaxed crystal, dendrite crystal and rough cylindrical crystal, respectively. Microstructure of fusion zone is fine cylindrical and equiaxed crystal. Microstructure of heat-affect zone (HAZ) is mainly lath martensite, bainite and residual austenite. The phases of welding zone is mainly comprised of α -Fe, NiCrFe, Fe-Ni and MnSi₂. The highest hardness value of welding zone is 518 HV, the highest value hardness of HAZ is 560 HV. The hardness decreases significantly from HAZ to substrate. The average tensile strength of welding joints is approximately 802 MPa. The fracture appears in substrate near welding zone. The impact toughness of weld joints is 75.7 J/cm². The residual stress of welded joints is the compressive stress. The average residual stress of weld zone is -17 MPa, and average residual stress of HAZ is -59 MPa.

Key words laser technique; laser welding; ultra-high strength steel; 30CrMnSiNi2A; microstructure; properties

收稿日期: 2008-07-11; 收到修改稿日期: 2008-12-05

基金项目: 贵州省优秀科技教育人才省长专项资金项目(黔科教办[2008]04号)资助课题。

作者简介: 刘其斌(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail: qbliu2@263.net

1 引言

激光束焊接(LBW)是一种高能密度熔焊焊接方法。它是用激光束将被焊金属加热至熔化温度以上熔合而成的焊接接头^[1,2]。超高强度 30CrMnSiNi2A 钢是一种综合性能优良的航空用结构钢材料,因其高比强度和高硬度,具备承受较大静载荷和很大的弯曲、冲击载荷的能力,因而该钢成为飞机起落架制造中的重要结构材料。飞机起落架系统作为飞机起降的主要部件(不包括机轮、轮胎和刹车装置),其质量约占飞机自重的 2%~3.5%,几乎所有的零件采用焊接结构^[3]。目前,国内飞机起落架焊接技术多采用真空电子束焊接、惰性气体保护钨极电弧焊接(GTAW)或惰性气体保护金属极电

弧焊接(GMAW)等。这些焊接技术在施焊过程中出现咬边、熔合不良、夹钨、气孔、夹渣和裂纹等缺陷,降低了产品的合格率。目前国内外对激光焊接该高强钢的研究报道甚少,作者对 30CrMnSiNi2A 钢进行了高功率激光焊接处理,重点分析了该超高强度钢激光焊接接头的组织和力学性能。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料的化学成分

激光焊接用 30CrMnSiNi2A 钢,入库状态为“正火+高温回火”,其显微组织为回火索氏体。化学成分^[4]见表 1。

表 1 30CrMnSiNi2A 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of steel 30CrMnSiNi2A (mass fraction, %)

C	Cr	Mn	Si	Ni	S	P	Fe
0.27~0.34	0.90~1.20	1.00~1.30	0.90~1.20	1.40~1.80	≤0.030	≤0.030	Remains

2.2 试样制备

采用线切割制备 30CrMnSiNi2A 钢焊接试样,试样尺寸为 45 mm×15 mm×1 mm。激光焊接前用金相砂纸对试样待焊端口打磨除锈去毛刺,最后用丙酮清洗。焊接后的试样线切割成尺寸 80 mm×8 mm×1 mm 的拉伸试样;非标准的 V 型缺口冲击试样,尺寸为 55 mm×10 mm×1 mm。

2.3 激光焊接工艺参数

通过正交实验及对焊接接头的宏观质量观察对比,最佳工艺参数为:激光功率 $P=2.8$ kW,扫描速度 $v=180$ mm/min,光斑直径 $d=1$ mm,激光焦距 $f=315$ mm 焊接过程中采用氩气保护,焊缝无过热,背面成形良好,无裂纹出现。

2.4 组织表征

利用 GX51 型 OM 金相显微镜进行显微组织观察, BX41M 型 OM 金相显微镜测定焊缝各结晶形态区的宽度; D/Max-2200 型全自动 X 射线衍射(XRD)仪进行焊缝接头物相分析; KYKY-2800 扫描电子显微镜(SEM)进行拉伸断口形貌分析。

2.5 性能表征

利用 HV-1000 显微硬度仪进行焊接接头显微硬度测定,载荷砝码 200 g,加载时间 20 s;用 WDW3100 型电子万能试验机测定激光焊接区的抗拉强度;用 JB-30A 冲击试验机测定焊接接头的冲击韧性;用 X350A 型 X 射线应力测定仪测量焊接接头的残余应力。

3 实验结果与分析

3.1 焊缝区显微组织

图 1 为焊缝区组织形貌,由图 1(a)可知,焊缝区由焊缝中心区、近中心区、边缘区、熔合区组成。焊缝中心区的宽度为 162 μm ,近中心区为 243 μm ,边缘区为 405 μm ,熔合区为 245 μm 。由图 1(b~e)可以看出,焊缝中心区组织为均匀等轴晶,近中心区为枝状晶,边缘区为粗大的柱状晶,熔合区为细长柱状晶和细小等轴晶组织^[5,6]。通过对焊缝区进一步观察,焊缝区组织沿着热扩散方向生长,具有定向快速凝固特征。由凝固理论可知,温度梯度与凝固速率的比值 G/R (结晶参数)决定着凝固组织的形貌。在激光焊接过程中,由于熔池与大块的冷金属接触,冷速很快,凝固开始时,在液相的一侧存在着极大的正温度梯度,不会出现成分过冷现象,因此固/液界面向前推进速度很慢,使得 G/R 很大。凝固首先以无晶核的方式直接在熔池边缘区域通过晶体外延附生的方式生长出一层细长的柱状晶并且夹有细小等轴晶(如图 1(e))。随着结晶过程的进行, G/R 逐渐减小,成分过冷区的存在破坏了熔池的稳定性,这时宏观界面偶然扰动产生的任何凸起都将面临较大的过冷而以更快速度进一步长大,而新晶核的形成比较困难,因此细长的柱状晶长成了粗大的柱状晶(如图 1(d))。当熔池中晶粒长大时,熔池前方排出的溶质就被推到固液界面, G/R 进一步减小,成分过冷区变宽,柱状晶就以树枝状方式生长,晶粒就转变

成明显的枝状晶(如图 1(c))。随着枝状晶向前生长,液相中温度梯度 G 很小,成分过冷越来越大,成分过冷区增大到液相能均匀形核时,则在剩余金属

溶液内形成大量的新晶核,并沿各个方向自由生长而形成等轴晶,最终形成均匀中心等轴晶区^[6][如图 1(b)所示]。

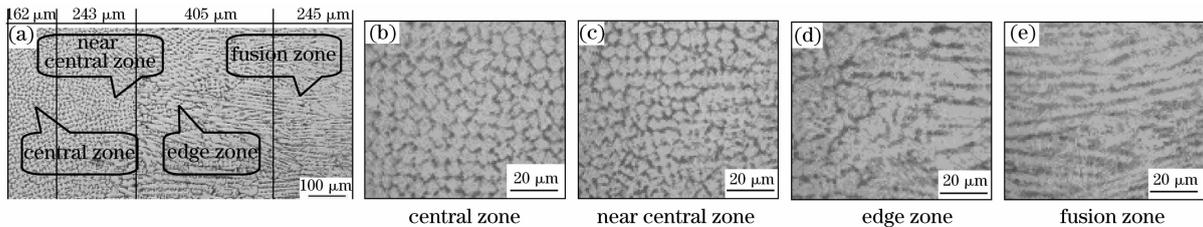


图 1 焊缝区组织形貌

Fig. 1 Configuration of welding zone

3.2 热影响区组织

在激光束扫过焊缝时,焊缝周围处于固态的基材就会发生明显的固态相变过程,这一区域称为焊接接头的热影响区(HAZ)。HAZ 的完全淬火区温度范围约为 $A_{c3} \sim 1450^\circ\text{C}$,该区域的金属处于过热状态,距离焊缝越近,奥氏体化的晶粒长大就越严重。当热源离开时,焊缝快速冷却,严重长大的奥氏体晶粒就转变为粗大的马氏体和少量贝氏体组织即形成完全淬火粗晶区。完全淬火细晶区的奥氏体化的晶粒长大不明显,快冷后的组织变为细小而均匀的马氏体和少量贝氏体^[7,8]。这两个区域的组织特征均为马氏体和贝氏体组织,只是晶粒的粗细不同,同属于完全淬火区,如图 2 所示。

缝中除了基体组织 $\alpha\text{-Fe}$ 相外,还有 NiCrFe , Fe-Ni , MnSi_2 等相。

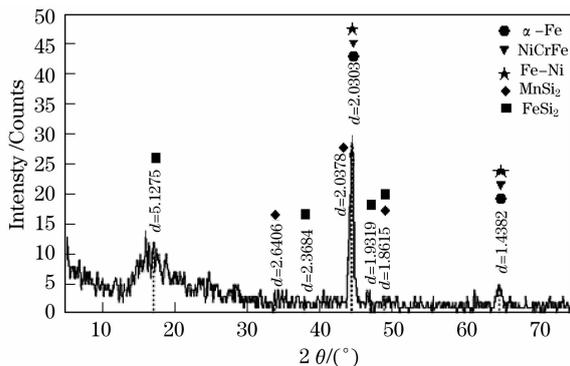


图 3 焊接接头的 X 射线衍射谱

Fig. 3 XRD spectrum of welding joint

焊缝中的 Ni 元素主要以 NiCrFe , Fe-Ni 等金属间化合物的形式存在。 NiCrFe , Fe-Ni 金属间化合物相的生成使焊缝具有高的硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能。另外,由于焊缝区含 Ni 量较高,对提高焊缝的塑性、改善焊接性能、降低开裂敏感性有利。

3.4 硬度结果

图 4 为激光焊缝的显微硬度分布曲线。

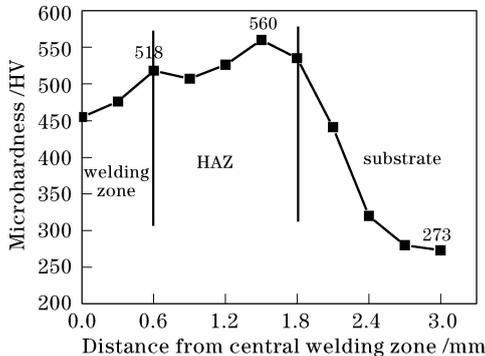


图 4 焊接接头显微硬度分布曲线

Fig. 4 Microhardness distribution of welding joint

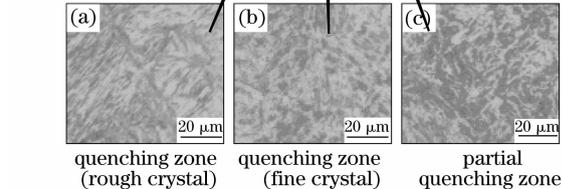


图 2 HAZ 的组织特征

Fig. 2 Microstructure characteristics in HAZ

由图 2(c)可知,不完全淬火区组织为细小板条马氏体、贝氏体和少量的残余奥氏体。这是因为在 A_{c1} 以上时间很短,只有部分贝氏体、索氏体等组织被加热到奥氏体化,在随后的快冷过程中,奥氏体就转变为细小板条马氏体、贝氏体和少量的残余奥氏体组织^[8]。

3.3 XRD 结果

图 3 为焊缝接头的 X 射线衍射谱,由图可知焊

由图 4 可见,焊缝中心区最高硬度约为 518 HV,热影响区的最高硬度约为 560 HV,基材

硬度约为 273 HV, 硬度峰分别出现在熔合区和 HAZ 的完全淬火细晶区。熔合区为结晶前沿形成了大量的细小的等轴晶, 故硬度较大; HAZ 完全淬火细晶区相变后的组织为细小而均匀的马氏体和贝氏体组织, 因而硬度最高^[9]。焊缝冷却速度较 HAZ 小, 因此在焊缝中有较多的残余奥氏体相, 残余奥氏体会分布在马氏体基体上, 保证材料具有高强度、高硬度, 还不同程度地提高了焊接接头的塑性和韧性, 降低焊接接头的开裂倾向。

3.5 抗拉强度结果

表 2 为焊接接头的拉伸实验结果, 由表 2 可以看出, 焊接接头的抗拉强度平均值为 802 MPa。

表 2 拉伸实验结果

Table 2 Results of tensile test

No.	1	2	3	4	Av.
σ_b /MPa	784.1	806.6	819.9	797.5	802

通过观察, 试样断裂部位不是发生在焊缝中心区, 而是发生在靠近焊缝的母材区^[10]。图 5 为断口扫描电镜形貌, 拉伸断口出现了大量的韧窝和少量二次微裂纹, 韧窝是韧性断裂的重要特征。因此激光焊接高强度 30CrMnSiNi2A 钢具有良好的焊接质量。

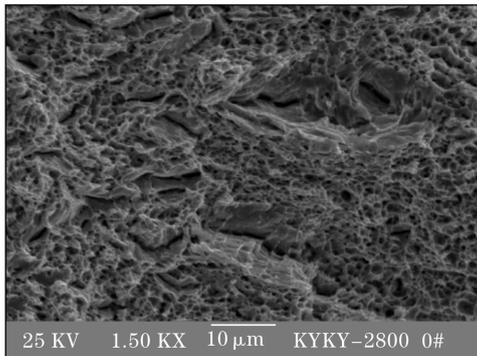


图 5 断口的扫描电镜分析

Fig. 5 Fracture analysis by SEM

3.6 冲击实验结果

表 3 为冲击实验结果, 由实验结果可以看出焊接接头的冲击韧性值较基材略高。由于激光的净化效应, 使得焊缝区获得细小而均匀的组织, 焊缝中软质相残余奥氏体分布在硬的马氏体基体上, 材料具有高强度的同时, 有效地提高塑性和韧性。

表 3 冲击实验结果

Table 3 Results of impact test

Zone of notch	Weld zone	Substrate
a_K /(J · cm ⁻²)	75.7	74.4

3.7 残余应力测定

表 4 为焊接接头的残余应力值, 由表 4 可以看

出, 焊缝和热影响区的残余应力均为负值, 即为压应力。接头的残余应力值较小, 焊缝区的残余应力平均值为 -17 MPa, 热影响区的残余应力平均值为 -59 MPa。

表 4 残余应力测试结果

Table 4 Results of residual stress examination

No.	1	2	3	4	Av.
Weld zone /MPa	-8	-18	-25	-17	-17
HAZ /MPa	-59	-67	-53	-57	-59

激光焊接在焊缝出现压应力, 归结于激光焊接加热区域窄, 加热时间短, 基材的压缩应变效应可能相当低^[11]。同常规熔焊方法相比, 可以看出, 激光焊接的构件比传统焊接方法的残余应力小得多, 焊接接头的开裂倾向降低, 充分体现了激光焊接的优越性。

4 结 论

1) 超高强度 30CrMnSiNi2A 钢经激光焊接后, 焊缝中心区组织为均匀等轴晶, 近中心区为枝状晶, 边缘区为粗大的柱状晶, 熔合区为细长柱状晶和细小等轴晶组织。热影响区主要由板条马氏体、贝氏体和极少量的残余奥氏体组织组成; 焊缝区由基体相 α -Fe 以及 NiCrFe, Fe-Ni, MnSi₂ 等相组成。

2) 焊缝中心区最高硬度约为 518 HV, 热影响区的最高硬度约为 560 HV, 从热影响区到基材硬度明显下降。焊接接头的抗拉强度平均值为 802 MPa; 焊接接头的冲击韧性为 75.7 J/cm²。

3) 试样断裂部位发生在靠近焊缝的母材区, 为韧性断裂。激光焊接高强度 30CrMnSiNi2A 钢焊缝质量优良。

4) 激光焊接 30CrMnSiNi2A 钢的残余应力为压应力, 焊缝区的残余应力平均值为 -17 MPa, 热影响区的残余应力平均值为 -59 MPa, 体现了激光焊接的优越性能。

参 考 文 献

- Liu Qibin. Laser Processing Technology and Its Applications [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
刘其斌. 激光加工技术及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007
- Chen Yanbin. Modern Laser Welding Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005
陈彦宾. 现代激光焊接技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- Li Yajiang, Wang Juan, Liu Peng. Low Alloy Steel Welding and Engineering Applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003
李亚江, 王娟, 刘鹏. 低合金钢焊接及工程应用 [M]. 北京:

- 化学工业出版社, 2003
- 4 Edition group of photographic spectrum for structural steel used commonly. *Photographical Spectrum for Structural Steel Used Commonly*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982
《常用结构钢金相图谱》编写组. 常用结构钢金相图谱[M]. 北京:国防工业出版社,1982
 - 5 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd : YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(11):1773~1777
吴东江,尹 波,张维哲 等. Nd : YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1773~1777
 - 6 Zhang Wenyue. *Welding Metallurgy (Basic Principles)* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003
张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京:机械工业出版社, 2003
 - 7 Zhang Li, Zhang Yufeng, Huo Lixing *et al.*. Effect on microstructure and properties of welded joints 30CrMnSiNi2A steel after heat treatment[J]. *Welding Journal*, 2002, **23**(1): 73~75
张 莉,张玉凤,霍立兴 等. 30CrMnSiNi2A 钢焊接接头热处理后的组织与性能[J]. 焊接学报, 2002, **23**(1):73~75
 - 8 Lei Huadong, Huang Wenrong, Guo Peng *et al.*. Study on metallographic structure and property of welded joint for laser beam welding of the quenched and tempered 30CrMnSiA [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(6): 322~326
雷华东,黄文荣,郭 鹏 等. 调质状态下 30CrMnSiA 钢的激光焊接接头性能与组织[J]. 应用激光, 2003, **23**(6): 322~326
 - 9 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
伍 强,陈根余,王 贵 等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1133~1138
 - 10 Li Yaling, Huang Jian, Gao Zhiguo *et al.*. Structure and properties of high power laser welding of high strength steel B450LAD for vehicles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2047~2051
李亚玲,黄 坚,高志国 等. 高功率激光焊接汽车用高强度钢 B450LAD 组织与性能 [J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 2047~2051
 - 11 You Min, Zheng Xiaoling, Wang Fude *et al.*. Residual stress measurement and analysis of CO₂ laser welding [J]. *Welding Technology*, 2002, **31**(3):17~18
游 敏,郑小玲,王福德 等. CO₂ 激光焊残余应力测试与分析 [J]. 焊接技术, 2002, **31**(3):17~18