

TWIP 钢激光和 TIG 焊接接头的组织和性能

闫彬,卫英慧,马丽莉

(太原理工大学材料学院,太原 030024)

摘要:采用激光焊和 TIG 焊分别对 TWIP 钢进行焊接,通过显微组织观察、拉伸试验及显微硬度测试对比研究了两种焊接接头的组织和性能。结果表明:激光焊的焊缝中心为细小的等轴晶,靠近熔合线的组织多为柱状晶,几乎看不到热影响区;TIG 焊的焊缝组织为取向基本一致的柱状晶且晶粒较大,热影响区为粗大的奥氏体组织;激光焊接头拉伸试样在远离焊缝的母材处断裂,抗拉强度为 560 MPa,伸长率为 67%,断口为典型的韧性断裂;TIG 焊接头断裂在热影响区,抗拉强度为 460 MPa,伸长率为 48%,断口表现为脆性断裂,塑性变形能力明显低于激光焊接头的;激光焊接头的平均显微硬度高于 TIG 焊接接头的。

关键词: TWIP 钢;激光焊;TIG 焊;组织;性能

中图分类号: TG457.11;V229

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2013)02-0078-04

Microstructure and Properties of Welded Joints of TWIP Steel Welded by Laser and TIG

YAN Bin, WEI Ying-hui, MA Li-li

(School of Materials, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Twinning induced plasticity (TWIP) steel was welded by laser welding and TIG welding. Microstructure and properties of welded joints were studied by microstructure observation, tensile test and microhardness test. The results show that grains in the welding line center by lasing welding were small and equiaxial, and microstructure near welding fusion line was columnar crystals, but the heat affected zone could hardly be recognized. The microstructure of TIG welding seam was columnar crystal with nearly consistent-oriented and the crystalline grains were large, and the heat affected zone displayed gross austenite structure. The lasing welding sample fractured in the matrix far from the welding line with tensile strength of 560 MPa and elongation of 67%, and showed typical ductile fracture. The TIG sample fractured in the heat affected zone with tensile strength of 460 MPa and elongation of 48%, and the fracture manifested as brittle fracture. The plastic deformation for TIG sample was clearly lower than lasing welding sample, and the average microhardness of welded joint by lasing welding was higher than TIG welded joint.

Key words: twinning induced plasticity (TWIP) steel; laser welding; TIG welding; microstructure; property

0 引言

20 世纪 90 年代 Grasse^[1-2]等在研究铁-锰-硅-铝系相变诱导塑性(TRIP)钢时发现了孪生诱发塑

性(TWIP)钢, TWIP 钢不但具有极高的伸长率(60%~80%)、较高的抗拉强度(约 600 MPa)以及高的应变硬化能力,而且还具有高的能量吸收能力,脆性转变温度很低;20℃时, TWIP 钢的冲击吸收功约为 $0.5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$, 比传统深冲钢高 2 倍多^[3]。因此,集高强度、高延展性及高应变硬化性于一身的 TWIP 钢如用在汽车上,可使汽车车身抗撞击能力明显增强。

焊接工艺是汽车制造技术中最有代表性的三大

收稿日期:2012-02-12;修订日期:2012-10-11

基金项目:国家“863”计划项目(2007AA03Z555);山西省科技攻关项目(20090321072);山西省高等学校科技项目

作者简介:闫彬(1986—),男,山东济宁人,硕士研究生。

导师:卫英慧教授

工艺(焊装、涂装、总装)之一,焊接接头的性能将直接影响到汽车的寿命及可靠性,故而,研究 TWIP 钢的焊接性能对汽车工业具有重要的实际意义。目前,研究人员^[4-6]已对 TWIP 钢的组织和性能进行大量的研究,但对其焊接性能的研究还鲜见报道。为此,作者采用激光焊和 TIG 焊对 TWIP 钢板进行了焊接,通过对不同焊接接头进行拉伸试验、断口分析、显微组织观察及硬度分析,对比研究了两种焊接接头的性能,期望为实际生产提供参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用钢的冶炼在 0.5 t 非真空中频感应炉中进行,浇铸的钢锭尺寸为 130 mm×160 mm×2 100 mm,然后用此铸锭作为电极进行电渣重熔,得到了尺寸为 150 mm×300 mm×1 200 mm 组织致密的铸锭;然后用热轧机开坯,加热温度为 1 200 ℃,保温时间 0.5 h,开坯结束温度为 950 ℃,得到了约 30 mm 厚的钢板;随后,将这些钢板切割成 600 mm×400 mm×30 mm,然后在 $\phi 750$ mm×550 mm 的高强度二辊试验轧机上进行热轧,加热温度为 1 150 ℃,保温时间为 0.5 h,开轧温度为 1 100 ℃,终轧温度为 900 ℃;冷却至室温后酸洗,再在直四式四辊可逆冷轧机上进行冷轧,目标变形量为 70%,最终板厚为 0.9 mm;最后进行退火处理,退火温度为 1 000 ℃,保温 15 min,出炉空冷至室温,其化学成分见表 1。

表 1 试验用 TWIP 钢的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of the tested TWIP steel(mass)

C	Mn	Si	Al	P	S	Fe
0.052	24.26	0.9	1.85	0.008	0.001	余

清除待焊钢板焊接区的油污、水分和杂质后,采用激光焊和 TIG 焊两种方法进行无填丝焊接。TIG 焊采用直流反接,焊接电流为 50 A,小车移动速度 220 mm·min⁻¹;激光焊采用 500 W 脉冲 Nd:YAG 固体激光器,全程选用纯度为 99.99% 的氩气保护,保护方式为 3 面同时保护,同轴气流量为 10 L·min⁻¹,后保气流量为 13 L·min⁻¹,背保气流量为 15 L·min⁻¹,其他工艺参数如表 2 所示。

1.2 试验方法

取垂直于焊缝方向为拉伸轴方向,制备拉伸试

表 2 激光焊接的主要参数

Tab. 2 Main parameters of laser welding

脉宽 /ms	速度 /(mm·s ⁻¹)	频率 /Hz	功率 /W	电压 /V	离焦量 /mm
3.5	4	30	240	70	4

样,试样夹持端宽度为 24 mm,夹持端和标距段采用了半径 25 mm 的圆弧连接,平行部分宽度为 12 mm,标距为 60 mm。在 CMT5105A 型微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 1 mm·min⁻¹,最大试验力为 100 kN。

金相试样经打磨、抛光后,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,采用 MDS 型光学显微镜观察焊接接头的显微组织;断口形貌在 HITACHIS-4200 型冷场发射扫描电子显微镜上观察;采用 HV-50 型维氏硬度仪测焊缝区域的显微硬度,加载载荷 0.49 N,加载时间 15 s,硬度测量线垂直于焊缝中心线,从焊缝中心线与测量线的交点开始向基体方向打点,每两点间隔 0.15 mm,每个位置取 3 次的平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 1 可见,TWIP 冷轧钢板退火处理后的组织为单一奥氏体,与 Bouaziz^[7]等的结果一致,奥氏体晶粒中伴有大量退火孪晶产生,且其在基体中分布较为均匀,退火孪晶尺寸为 30~40 μ m。激光焊的焊缝中心为细小的等轴晶,靠近熔合线的组织多为柱状晶,这是由于激光焊的热输入量高、冷却时间短(0.1 s)以及冷却速率高(106~108 ℃·s⁻¹)^[8]所致;而 TIG 焊的焊缝组织为取向基本一致的柱状晶且晶粒较大;另外,激光焊的焊缝组织和 TIG 焊的焊缝组织均明显比母材的细小,并且前者的焊缝组织更为细小。

由图 1 还可见,TWIP 钢激光焊接熔合区内可以看到明显的熔合线,但靠近熔合线的热影响区组织几乎看不到,这种组织特征的形成是由薄片状材料激光焊接的特点和工艺参数决定的。Nd:YAG 固体激光器激光焊接的光斑直径小,焊接能量非常集中,焊接速度较快,焊接时只在焊缝局部区域加热,母材受到的热作用较小,基本没有升温,因此热影响区非常小。且在熔合线处形成很大的过冷度,由于垂直于熔合线方向的散热最快,所以与熔合线垂直的晶粒较易向液相生长,最先深入熔池从而形成与熔合线垂直的柱状晶;随着柱状晶的不断生长,

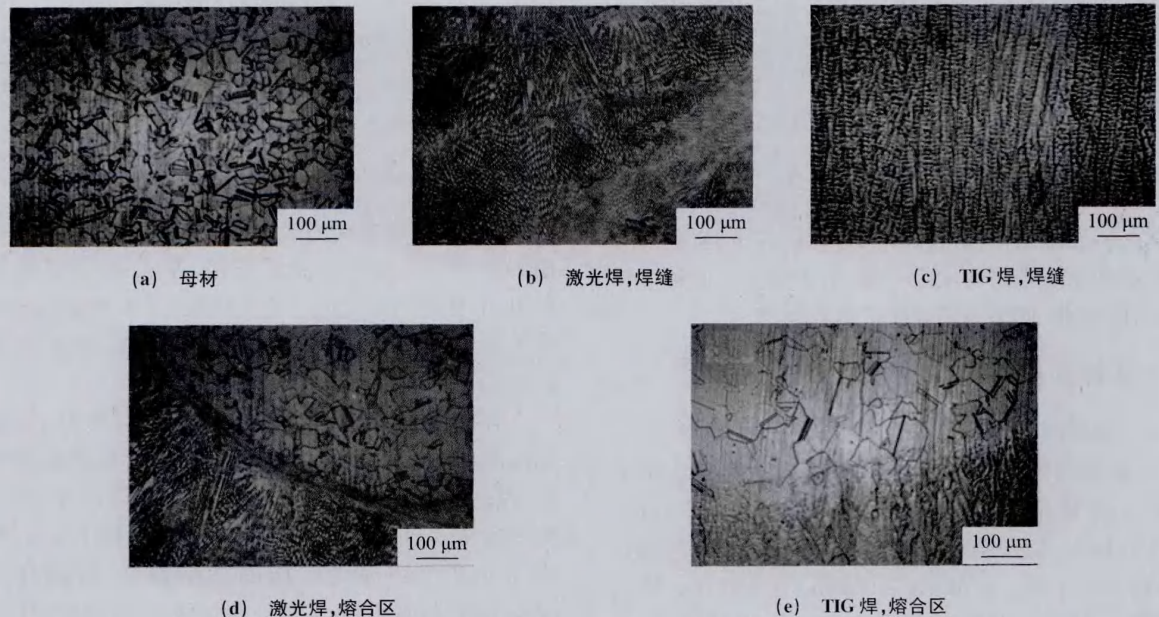


图1 TIG 焊和激光焊接接头的显微组织

Fig. 1 Microstructure of welded joints by TIG and laser: (a) base metal; (b) laser welding, welding seam; (c) TIG welding, welding seam; (d) laser welding, fusion zone and (e) TIG welding, fusion zone

温度梯度慢慢变小,从而在焊缝中心处形成了等轴晶区。另外,激光焊接接头区域不存在未融合、未焊透、气孔、夹杂和裂纹等缺陷。TWIP 钢 TIG 焊熔合区内的熔合线没有激光焊的明显,焊缝一侧的奥氏体组织也呈柱状排列,且垂直于熔合线生长,靠近熔合线的热影响区与激光焊相比变宽,并且组织中出现了尺寸较大的奥氏体晶粒,这将使热影响区的塑性和韧性均降低。

2.2 力学性能

由表 3 可见,激光焊接接头的平均抗拉强度达到 560 MPa,断后伸长率为 67%,与 TWIP 钢母材的抗拉强度和伸长率基本符合,断裂位置与文献[9]的相同,均断裂在远离焊缝的母材上,说明激光焊接接头性能良好,可以满足使用性能要求;TIG 焊接拉伸试样的平均抗拉强度为 460 MPa,较激光焊的低 100 MPa,断后伸长率仅为 48%,远比激光焊的

低得多,其断裂位置位于热影响区,这与前面分析的 TIG 焊热影响区出现尺寸较大的奥氏体晶粒使其塑性降低、性能变差相吻合。

2.3 断口形貌

由图 3 可见,两种接头的拉伸断面与拉伸轴均成 45°,TIG 焊的断口平齐、光亮,脆性断裂比例大,

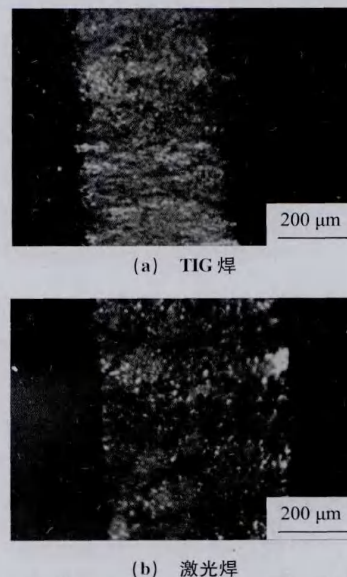


图3 TIG 焊和激光焊接接头拉伸断口的宏观形貌

Fig. 3 Macrograph of tensile fractures on welding joints by TIG welding (a) and laser welding (b)

表 3 试验钢不同方法焊接接头的拉伸性能

Tab. 3 Tensile properties of the tested steels joints by different weldings

焊接方法	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	断裂位置
TIG 焊	460	48	热影响区
激光焊	560	67	母材

而激光焊断口的中心纤维区塑性变形较大,断面粗糙不平,断口形貌呈暗灰色纤维状,该区域占整个断口的比例较大,整个断口表现为韧性断裂。

由图 4 可见,激光焊的断裂区为塑性韧窝状断口,韧窝密度较大,中间出现了火山口式的大且深的韧窝;TIG 焊断口中含有一定量较浅且细碎的韧窝,以及大量的人字形花样,呈现的是脆性断口形貌。在上述两种断口的韧窝底部均发现了尺寸细小的夹杂物,如图 4(a)和图 4(c)中 A、B 所示。这些夹杂物为锰的非金属化合物^[10],在拉应力作用下,位错堆积在滑移面使局部产生许多微小孔洞,或因锰的非金属化合物与基体金属界面脱离而形成微小

孔洞,然后这些微孔形核、长大、聚集成微裂纹。因在裂纹尖端附近存在三向拉应力和集中塑性变形区,在该区又形成新的微孔,新微孔借内缩颈与裂纹连通,使裂纹向前推进一定长度,如此不断进行下去直至最终断裂,在断口上就显示出韧窝结构。必须指出,微孔聚集断裂一定有韧窝存在,但是在微观形态上出现韧窝,并不一定就是韧性断裂,正如图 4(b)和图 4(c)中 TIG 焊断口形貌,宏观上为脆性断裂,但在局部区域出现了塑性变形,从而显示出了韧窝形态。结合断口的宏观和微观形貌特征可以看出,激光焊接头的塑性变形能力明显优于 TIG 焊的。

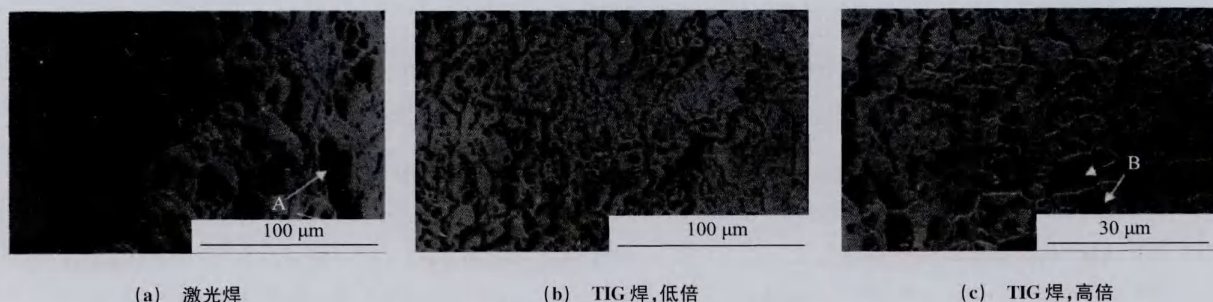


图 4 TIG 焊和激光焊接接头拉伸断口的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology of tensile fractures on welding joints by laser welding (a) and TIG welding at low magnification (b) and high magnification (c)

2.4 显微硬度

从图 5 可见,接头母材的硬度约为 157 HV,激光焊焊缝中心平均硬度达到了 304 HV;由于激光焊热影响区极窄,其硬度与母材相似而未出现明显的变化,但从熔合线到焊缝中心的硬度差距较大,激光焊焊缝区的硬度明显高于母材的,这是因为大的热输入量加之极快的冷却速度使得激光焊焊缝区晶

粒明显细化,致使此区域硬度升高;TIG 焊焊缝的硬度和母材的相差不大,并且均高于热影响区的,因为 TIG 焊的热影响区组织粗大,导致其塑性、韧性和硬度均降低。激光焊接头的平均硬度高于 TIG 焊接接头的。

3 结 论

(1) 激光焊的焊缝中心为细小的等轴晶,而靠近熔合线的组织多为柱状晶,几乎看不到热影响区;而 TIG 焊的焊缝组织为取向基本一致的柱状晶且晶粒较大,热影响区为粗大的奥氏体组织,塑性、韧性均较差。

(2) 激光焊接头在远离焊缝的基体处断裂,其抗拉强度为 560 MPa,伸长率为 67%,断口为典型的韧性断裂;TIG 焊接头的抗拉强度为 460 MPa,伸长率为 48%,断口表现为脆性断裂,塑性变形能力远低于激光焊接头的。

(3) 激光焊接头的平均显微硬度比 TIG 焊接接头的度高,并高于母材的。

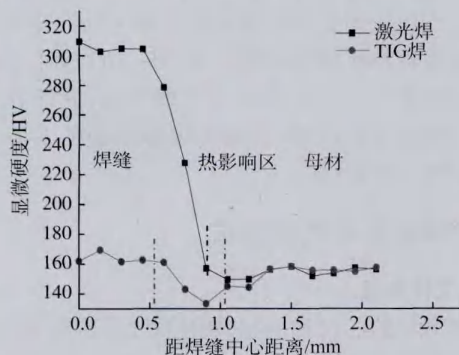


图 5 激光焊和 TIG 焊接头的显微硬度分布
Fig. 5 Microhardness distribution of laser welded and TIG welded joints

(下转第 85 页)

板发生破坏时,上面板有明显断裂趋势但并未断裂,而下面板则发生明显屈曲。可见蜂窝板的弯曲破坏形式为下面板与蜂窝芯的失稳。

目前对于钎焊的铝蜂窝板和普碳钢蜂窝板性能研究只集中于压缩性能,只有文献[7]报道了镁芯蜂窝板和铝芯胶结蜂窝板的抗弯性能。石琳^[7]通过研究镁芯蜂窝板的抗弯强度发现,当镁合金蜂窝面板厚度为 0.5 mm,蜂窝芯边长为 4 mm,厚度为 0.12 mm,高度为 7 mm 时,蜂窝板的抗弯强度为 30.6~38.8 MPa;铝芯蜂窝板的蜂窝芯边长为 4 mm,厚度为 0.04 mm,高度为 9 mm 时,蜂窝板的抗弯强度仅为 17.7 MPa。而作者所制备的高温合金蜂窝板的抗弯强度却高达 179 MPa,是胶结镁芯蜂窝板抗弯强度的 5~6 倍。可见,制备蜂窝板的材料及其蜂窝芯和面板的连接方式对其力学性能有较大影响。

3 结 论

(1) 通过钎焊工艺,使用 BNi2 钎料可以制备性能优良的 GH99 高温合金蜂窝板,其制备工艺为先将真空炉由室温升温到 950 °C 并保温 0.5 h,然后再 0.5 h 内升温到 1 080 °C 继续保温 0.5 h,之后将其

随炉冷却。

(2) 钎焊的 GH99 高温合金蜂窝板具有良好的平面压缩和弯曲特性,蜂窝胞壁厚度为 0.08 mm,芯格边长 4 mm,面板厚度为 0.13 mm 的高温金属蜂窝板的平面抗压强度为 13.68 MPa,抗弯强度为 179 MPa,蜂窝芯的抗剪强度为 1.75 MPa,高于其他金属蜂窝板的性能。

参考文献:

- [1] 李勇. 直九机用 Nomex 蜂窝研究[J]. 航空材料学报, 1996, 3(1): 47-54.
- [2] 伊藤泰永. 铝合金钎焊蜂窝板及其应用[J]. 国外机车车辆工艺, 2000(9): 21-25.
- [3] 石丸靖男, 张耀宏, 张芳. 高速铁路车辆用钎焊铝蜂窝板及其加工[J]. 国外机车车辆工艺, 2001(3): 11-17.
- [4] 赵剑, 谢宗蕙, 张磊. 高温合金热防护系统设计与分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 1677-1678.
- [5] 梁伟, 张立春, 吴大方, 等. 金属蜂窝夹芯板瞬态热性能的计算与试验分析[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 672-673.
- [6] 张跃飞. 钢蜂窝夹芯板的制备及其压缩性能[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2007.
- [7] 石琳. 镁合金蜂窝板和镁-铝蜂窝板的制备与性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2010.

(上接第 81 页)

参考文献:

- [1] GRÄSSEL O, FROMMEYER G, DERDER C, *et al.* Phase transformation and mechanical properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-steel[J]. J phys Iv France, 1997, C5(3): 383-388.
- [2] GRÄSSEL O, KRUGER L, FROMMEYER G, *et al.* High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application[J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16(10/11): 1391-1409.
- [3] 李大赵, 卫英慧, 刘春月. 汽车用 TWIP 钢的基础研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(2): 1-5.
- [4] MUJICA L. Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of TWIP and TRIP steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 2071-2078.
- [5] DING H, TANG Z Y, LI W. Microstructures and mechanical properties of Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 13(6): 66-70.
- [6] FROMMEYER G, BRUX U, NEUMANN P. Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 438-446.
- [7] BOUSZIZ O, GUELTON N. Modelling of twip effect on work-hardening[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319: 246-247.
- [8] SUN X Q, HONG Y C, ZHANG W. Research on pulse laser welding technology of DC04 thin steel sheet[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(5): 130-134.
- [9] MUJICA L. Microstructure and mechanical properties of laser welded austenitic high manganese steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 6(14): 517-522.
- [10] 严玲, 唐获, 米振莉. 汽车用 TWIP 钢的力学性能与微观组织[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(8): 739-741.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告