

薄镀层热成形钢激光填丝焊的焊缝特征及性能

姜志公¹ 杨保锋¹ 李天¹ 王瑞² 徐虹²

(1. 鞍钢钢材加工配送(长春)有限公司, 长春 130103; 2. 吉林大学, 长春 130103)

摘要:为降低镀覆在钢板表面的铝硅镀层对激光接头的不良影响,采用薄镀层热成形钢材料配合激光填丝焊技术,获得了焊缝内铝质量分数小于1%的激光填丝焊接头。对该接头进行了宏观及微观组织分析,发现热成形后焊接接头组织被全马氏体组织取代,避免了软化现象。力学性能分析表明,热成形前后试样的抗拉强度从约570 MPa提高到约1500 MPa,接头的薄弱环节位于母材,高速拉伸对接头的抗拉强度没有不良影响,而断裂伸长率受影响较大。

关键词:热成形钢 激光填丝焊 马氏体 力学性能

中图分类号:U466

文献标志码:B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230026

Weld Characteristics and Properties of Laser Wire Filling Welding for Thin-Coated Hot-Formed Steel

Jiang Zhigong¹, Yang Baofeng¹, Li Tian¹, Wang Rui², Xu Hong²

(1. CCAS (Changchun) Steel Service Center Ltd., Changchun 130103; 2. Jilin University, Changchun 130103)

Abstract: To reduce the adverse effect of aluminum silicon coating layer on the surface of steel plate on laser joint, laser wire filler welding joint with aluminum mass fraction less than 1% in weld was obtained by using thin-coated hot-formed steel material and laser wire filler welding technology. The macro and microstructure of the welded joint were analyzed, it was found that the welded joint was replaced by the whole martensite structure after hot forming, which avoided the softening phenomenon. The mechanical property analysis shows that the tensile strength of the sample increases from about 570 MPa to about 1500 MPa after hot forming, and the weak link of the joint is located in the base material. High speed tensile has no adverse effect on the tensile strength of the joint, but the elongation at break is affected greatly.

Key words: Hot stamping steel, Laser wire filling welding, Martensite, Mechanical property

1 前言

当前汽车制造业对汽车轻量化和服役安全性的要求日益提高,以热成形钢为代表的先进高强度钢具有超高强度及良好的成形性能,在车身上的应用越来越广泛^[1-2]。热成形钢材料在热成形后可以获得全马氏体组织,抗拉强度高达1500 MPa,是当前车用钢的研究热点。为了避免热处理过程中发生表面氧化和局部脱碳,通常在钢材的表面镀

有耐高温Al-Si镀层。研究表明,热成形钢焊接过程中该镀层元素会进入熔池,降低焊接接头的力学性能^[3-4]。

激光焊接技术具有能量密度高、热影响区小、焊接效率高的优点,结合“先焊接后冲压”的工艺方法,近年来成为热成形钢焊接的主要方法之一。针对Al-Si镀层对热成形钢激光焊接的影响,当前主要通过焊前去除镀层,包括机械打磨、激光烧蚀、化学腐蚀等方法削弱影响,但成本偏高、

作者简介:姜志公(1972—),男,高级工程师,硕士学位,研究方向为汽车钢激光焊接技术。

参考文献引用格式:

姜志公,杨保锋,李天,等.薄镀层热成形钢激光填丝焊的焊缝特征及性能[J].汽车工艺与材料,2024(1):15-19.

JIANG Z G, YANG B F, LI T, et al. Weld Characteristics and Properties of Laser Wire Filling Welding for Thin-Coated Hot-Formed Steel[J]. Automobile Technology & Material, 2024(1): 15-19.

从熔合线附近向焊缝中心生长,在焊缝区中间形成了一条竖直的分界线。从焊缝中心开始,焊缝区、近焊缝热影响区、回火区和母材区分别由粗大板条马氏体组织、细小板条马氏体组织、回火马氏体组织和珠光体+铁素体的原始态组织组成,这是由接头不同位置的焊接热循环不同导致的^[11]。热成形过程中,拼焊板低于 920 °C 时全部转变成奥氏体,并在模冷后奥氏体发生切变型相变再次形成马氏体,因此,可以观察到热成形后组织不均匀性消失,整个接头组织被马氏体组织取代。

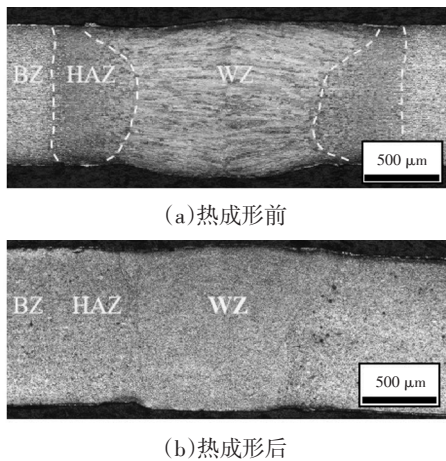


图2 热成形前后焊接接头的宏观组织

3.1.2 微观组织

图3为热成形后接头焊缝区、热影响区、母材区的微观组织以及对焊缝区不同区域进行的扫描电子显微镜观察以及元素分析,其中变量 σ 为标准偏差。可以发现接头各区域均为全马氏体组织,与上文相符。焊缝区不同位置均为全马氏体组织(M),没有组织不均匀或析出相的出现,元素分析显示,焊缝中铝含量(质量分数)均低于1%,平均为0.4%,这是由于焊丝的加入稀释了铝元素在熔池内的含量,同时材料表面铝硅镀层较薄,进入熔池的镀层量少,另外,焊丝在焊接过程中对熔池搅拌并促进铝元素均匀分布,综合作用下获得了没有高温 δ 铁素体析出且均匀的全马氏体焊缝。

3.2 力学性能

3.2.1 显微硬度

对热成形后接头上、中、下3个位置沿焊缝垂直方向测量接头显微维氏硬度结果,加载力保持为 100 g,加载时间 15 s,如图4所示。由图可见,接

头垂直于焊缝方向硬度分布一致性高,波动小,为 450~500 HV0.1 之间,与母材处于同一水平,在靠近母材的热影响区范围内未观察到明显的硬度下降,说明没有发生软化现象,证明了经过焊后热冲压,接头组织经历了完全奥氏体化,在快速冷却条件下均转变为了板条马氏体组织,消除了组织梯度。

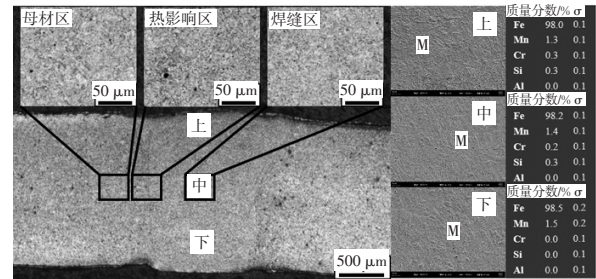


图3 热成形后焊接接头的微观组织及元素分析

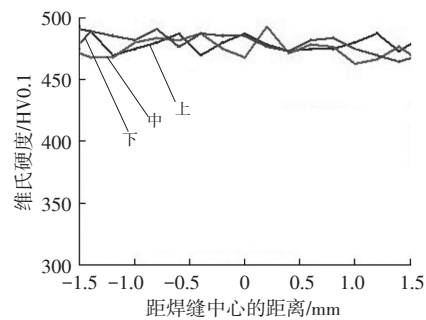


图4 热处理后拼焊板前中后3个位置焊接接头显微硬度

对比3条硬度曲线可以发现,硬度曲线相互交错,说明焊缝区不同位置的硬度没有明显区别,这与上文观察到的焊缝区均匀马氏体组织(M)相一致。

3.2.2 准静态拉伸试验

为了探究薄铝硅镀层热成形钢激光填丝焊接头的拉伸性能,分别对热成形前、热成形后以及热成形+烘烤状态下的 15 组试样进行了总计 45 组准静态拉伸试验测试,应力-应变曲线如图5所示。

图5a为热成形前焊件的应力-应变曲线,可以看出材料在拉伸过程中进行了弹性变形和充分的塑性变形,弹性变形速率很快,说明存在较大的弹性模量,并观测到了明显的应变强化现象,这是塑性变形过程中随着变形量增大,位错运动受钉扎作用阻力增大导致的。试样的屈服强度为 385~395 MPa,抗拉强度为 560~570 MPa,从曲线后段看出试样断裂前出现了颈缩现象,断裂伸长率为 19%

~23%，体现了良好的强度和塑性匹配。

图 5b 为热成形后焊件的应力-应变曲线，可以看出，材料在拉伸过程中存在弹性变形和小塑性变形，弹性模量减小并出现了应变强化现象和颈缩现象，此时试样的屈服强度为 1 000~1 030 MPa，抗拉强度为 1 470~1 500 MPa，断裂伸长率为 5%~6%，这与热成形后的组织变化是对应的。烘烤处理后，试样的应力-应变曲线几乎没有变化，说明烘烤处理对薄铝硅镀层热成形钢焊接接头没有不良影响。

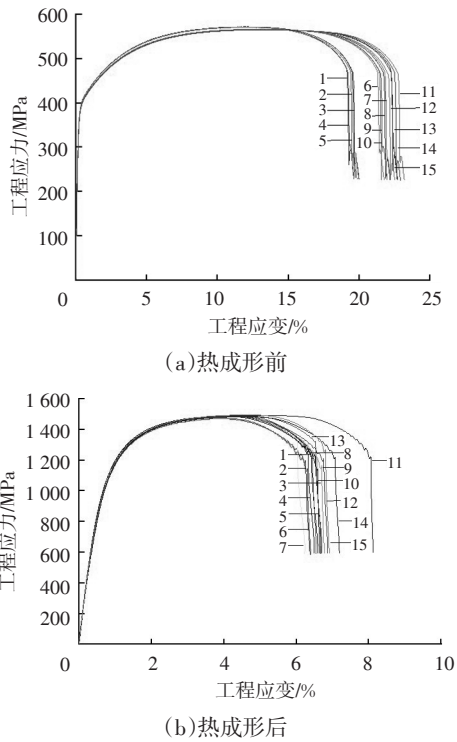


图 5 准静态拉伸试验的应力-应变曲线

热成形前后焊接接头的力学性能变化实际上反映了组织的变化。热成形前，焊缝区为硬度高、强度高的马氏体组织，母材区则为更软的珠光体+铁素体组织，当施加外加载荷时，母材区往往先发生屈服，并在到达马氏体屈服强度之前断裂，由于马氏体组织很难发生塑性变形，在拉伸过程中产生的塑性形变几乎都在母材区，此时接头的应力-应变曲线实际上反映了母材的性能。在热成形后，接头组织全部被转变为马氏体组织，消除了因不同部位的组织不均匀而产生的性能差异，此时的应力-应变曲线所反映的正是焊接接头全马氏体组织的力学性能，由于马氏体内部的高密度位错，断裂伸长率显著下降。

值得注意的是，无论是热成形前还是热成形后，拉伸试样的断裂位置几乎都集中在母材区，尤其是接头组织全被马氏体组织取代后，接头的薄弱区仍位于母材区，原因分析如下：

a. 焊缝处较大的形变强化了力学性能。研究表明^[12]，较大的变形有利于碎化奥氏体晶粒，促进相变，提高力学性能。激光填丝焊接过程中，往往会获得具有较大余高及下塌的焊缝，这种余高及下塌处在焊后热成形过程中会发生较大形变，从而在焊缝区晶粒内部产生更多的位错、亚晶界和滑移带，有利于获得更加细小且致密的晶粒组织。

b. 焊缝区和母材区不同的原生奥氏体形貌。热成形钢材料在拉伸过程中，颈缩后先在原生奥氏体晶界处破坏，产生微裂纹，进而导致破坏^[13]。热成形后，焊缝区的原生奥氏体形貌从柱状晶转变为等轴晶，晶粒数量增多，起到细晶强化的作用。

3.2.3 高速拉伸试验

图 6a 和图 6b 分别为室温和低温(-40℃)条件下焊接接头的高速拉伸应力-应变曲线。

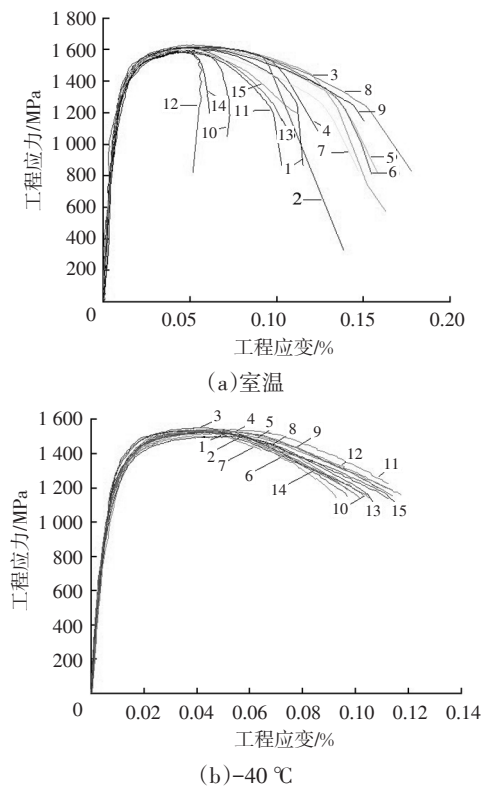


图 6 高速拉伸试验的应力-应变曲线

可以看出，高速拉伸条件下(应变速率为 $1 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$)，拉伸试样很快断裂，断裂延长率仅为 0.05%~0.15%，这是因为随外加载荷速率增加，晶

体中位错运动所需的加速度也随之增加,相对应的位错运动的阻力更大^[4],考虑到热成形后接头为全马氏体组织,其亚结构为高密度的位错缠结,因此在高速拉伸条件下,难以发生塑性变形的马氏体组织的变形能力更差。

另一方面,高速拉伸除了导致更大的位错运动阻力,还会使位错运动时间缩短。塑性变形通常依靠位错运动完成,当位错遇到缠结、塞积等阻碍时往往需要以位错攀移的方式继续运动,这种运动方式所需要的运动时间比滑移更长,因此在高速拉伸条件下,马氏体晶粒内部的位错运动往往与应变速率不匹配,从而迅速发生断裂。需要注意的是,在高速拉伸条件下,大部分拉伸试样仍然经历了弹性变形、塑性变形、应变强化和颈缩阶段,除去2组试样在焊缝区断裂,其余试样均在母材处断裂。

观察图6b中各曲线,可知低温下高速拉伸试样的力学性能与室温下高速拉伸试样的力学性能几乎没有区别,抗拉强度仍为1 500~1 600 MPa,15组低温高速拉伸试样均在母材处断裂,可见北方寒冷天气对接头强度没有不良影响。

4 结束语

针对薄铝硅镀层热成形钢的激光填丝焊接接头的焊缝特征及力学性能进行了研究,结论如下:

a. 薄镀层热成形钢结合激光填丝焊技术可以获得铝含量(质量分数)低于1%的均匀全马氏体焊缝。热成形前后,接头组织被板条马氏体取代,组织不均匀性消失。

b. 热成形后,薄镀层热成形钢激光填丝焊接接头沿垂直焊缝方向硬度一致性强,均达到母材水平,未观察到软化现象。

c. 热成形前后接头的拉伸性能与组织变化有关,且接头薄弱区域始终为母材,这可能与焊缝变形程度大和原生奥氏体晶界差异有关。

d. 准静态拉伸和高速拉伸条件下,接头的力学性能有差异。与准静态拉伸相比,在高速拉伸条件下,接头的强度几乎不变,但断裂伸长率明显减小,这是因为高速拉伸增大了位错运动阻力并缩短了位错运动时间。

参考文献:

- [1] 马鸣图,张宜生,宋磊峰,等. 超高强度钢热冲压成形研究进展(上)[J]. 新材料产业, 2015(9): 61-67.
- [2] 黄大鹏,杨国庆,张梅,等. 热冲压成形技术及其新进展[J]. 上海金属, 2017, 39(5): 83-89.
- [3] LIN W H, LI F, WU D S, et al. Effect of Al-Si Coating on Weld Microstructure and Properties of 22MnB5 Steel Joints for Hot Stamping[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(4): 1825-1836.
- [4] 张帆,李芳,华学明,等. Al-Si 镀层在激光拼焊板焊缝中分布及性能影响研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 104-111.
- [5] LIN W H, LI F, HUA X M, et al. Effect of Filler Wire on Laser Welded Blanks of Al-Si-Coated 22MnB5 Steel[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2017, 259: 195-205.
- [6] 陈晓莹,李芳,林文虎,等. 硼钢镀层对热成形激光拼焊板组织及性能的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 115-124.
- [7] LI F, CHEN X G, LIN W H, et al. Nanosecond Laser Ablation of Al-Si Coating on Boron Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 319: 129-135.
- [8] 王丽娜,杨平,毛卫民. 高锰TRIP钢高速拉伸时的马氏体转变行为分析[J]. 金属学报, 2016, 52(9): 1045-1052.
- [9] 梁江涛,赵征志,尹鸿祥,等. 超高强热成形钢的应变速率敏感性[J]. 工程科学学报, 2018, 40(9): 1083-1090.
- [10] 董丹阳,刘杨,王磊,等. 应变速率对DP780钢激光焊接接头动态变形行为的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(12): 1493-1500.
- [11] JIA J, YANG S L, NI W Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Fiber Laser Welded Joints of Ultrahigh-Strength Steel 22MnB5 and Dual-Phase Steels[J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(21): 2565-2575.
- [12] 姜超,单忠德,庄百亮,等. 热冲压成形22MnB5钢板的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(3): 78-81.
- [13] 袁昌望,黄加进,钟辉隆,等. 热冲压成形后22MnB5钢的组织与拉伸性能以及拉伸时的微观形貌演变[J]. 机械工程材料, 2021, 45(5): 45-49.
- [14] 董丹阳,刘杨,王磊,等. 应变速率对DP780钢动态拉伸变形行为的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(2): 159-166.