

激光焊接热输入对微合金C-Mn钢全熔透焊接接头组织性能的影响

王海生^{1,2} 王晓南¹ 张敏³ 王卫^{1,2} 朱国辉^{1,2} 陈长军³

¹苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021

²安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002

³苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021

摘要 以抗拉强度700 MPa级Nb-Ti微合金化C-Mn钢为研究对象,采用高功率光纤激光器对4.6 mm厚钢板进行了拼焊实验,研究了热输入(162、175、187、226 J/mm²)对全熔透焊接接头显微组织、显微硬度、拉伸性能及冲击韧性的影响。研究表明,4种热输入条件下,焊缝区和粗晶区组织均以板条马氏体为主,存在不同含量的贝氏体和铁素体;随着热输入的增加,粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸逐渐增大;热输入对细晶区和混晶区的组织影响不明显。焊缝区和热影响区平均硬度均高于母材;随着热输入的提高,焊缝区硬度和焊接接头的峰值硬度逐渐降低,主要原因是热输入增大形成贝氏体和铁素体。4种热输入条件下焊接接头的抗拉强度高于母材。4种热输入条件下焊接接头冲击吸收功均高于母材,且均为韧性断裂,研究范围内的热输入对焊接接头冲击性能影响不明显。

关键词 激光技术; 激光焊接; 微观组织; 力学性能; 微合金钢

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0103003

Effect of Heat Input on Microstructure and Properties of Microalloyed C-Mn Steel Full Penetration Welded Joint Using Laser Welding

Wang Haisheng^{1,2} Wang Xiaonan¹ Zhang Min³ Wang Wei^{1,2} Zhu Guohui^{1,2}
Chen Changjun³

¹Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

²School of Metallurgy and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China

³Laser Processing Research Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Tensile strength 700 MPa Nb-Ti microalloyed C-Mn steel is welded using high power fiber laser. The effects of heat input (162, 175, 187, 226 J/mm²) on microstructure, tensile properties, microhardness, impact toughness are studied. The results show that the microstructure of welded seam (WS) and coarse grain heat affected zone (CG-HAZ) are mainly lath martensite, and a little of bainite and ferrite. The original austenite grain size of CG-HAZ increases with heat input increasing. The effects of heat input on microstructure of fine grain heat affected zone (FG-HAZ) and mixed grain heat affected zone (MG-HAZ) are not obvious. The average hardness of WS and HAZ are greater than that of base material (BM), and the hardness of WS and peak hardness of weld joint decrease with the heat input increase because of the formation of ferrite and bainite with the increase of heat input. The tensile strength of welded joint are higher than that of BM at four different heat inputs. The impact toughness of weld joint is better than that of BM at four different heat inputs, and both weld joint and BM fracture mode are ductile fracture.

收稿日期: 2015-08-12; 收到修改稿日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(51305285)、江苏省自然科学基金(BK20130315)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201304)

作者简介: 王海生(1989—),男,硕士研究生,主要从事高强钢激光焊接方面的研究。E-mail: 511213174@qq.com

导师简介: 王晓南(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事先进钢铁材料开发方面的研究。

E-mail: wxn@suda.edu.cn(通信联系人)

The effect of heat input on weld joint impact energy is not obvious.

Key words laser technique; laser welding; microstructure; mechanical properties; microalloyed steel

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.33

1 引 言

随着环境污染日趋恶化,能源枯竭逐步严重,汽车车身轻量化越来越受到关注^[1-2]。由于高强钢具有优异的焊接性和成型性,已成为汽车轻量化的主要材料之一。高强钢主要包括微合金 C-Mn 钢、双相钢、马氏体钢、贝氏体钢、相变诱发塑性钢、热冲压用钢等^[3]。微合金 C-Mn 钢是在传统低碳钢中加入少量的铌、钛、钼、钒等合金元素,通过析出强化、细晶强化、位错强化等机制提高钢材的强度^[4],替代汽车车身原有的低强度厚钢板实现汽车车身结构减重,同时也提高了汽车的载重能力。

焊接是实现钢材连接的重要方法,焊接接头质量的优劣对于钢材的实际应用有着重要影响。激光焊接因具有能量集中、焊接速度快、熔深大、热影响区小、焊接接头成型性好等优点,已逐渐应用于高强度钢的连接^[5]。为了推进激光焊接技术在高强钢连接方面的广泛应用,国内外学者开展了大量的研究工作。景财年等^[6]研究了激光焊接高强度高延性(TRIP)钢焊缝微观结构和形成机理,研究发现,焊缝以马氏体为主,热影响区组织主要为贝氏体和铁素体,热影响区离焊缝距离越近,马氏体的量越多。王文权等^[7]利用 CO₂激光器对抗拉强度 600 MPa 级热轧双相钢进行拼焊,结果表明,焊接接头的最高硬度出现在焊缝区或热影响区;由于焊缝区的组织主要为马氏体,导致接头的塑性和韧性降低。Miranda 等^[8]分别采用光纤激光焊和钨极氩弧焊(TIG)焊接了 X100 管线钢,发现激光焊接焊缝以细小的板条马氏体为主,而 TIG 焊的焊缝组织则为粗大贝氏体;激光焊接接头硬度高于 TIG 焊接接头硬度。

前期研究发现,采用 CO₂ 气体保护焊接进行抗拉强度 700 MPa 级 Nb-Ti 微合金化 C-Mn 钢焊接时,焊接接头的韧性出现了明显降低^[9]。在此,利用 4 kW 高功率光纤激光焊接技术,研究了不同焊接热输入对焊接接头组织演变规律以及力学性能变化规律的影响,旨在为该钢的后续研究及应用提供必要的基础数据和理论基础。

2 实验材料及方法

表 1 列出的是实验钢的化学成分。钢锭采用 150 kg 真空冶炼炉冶炼,并经过锻造成 150 mm×100 mm×40 mm 钢坯,在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的 φ450 mm 热轧试验机组上完成热轧,经过 7 道次轧制,钢板最终厚度为 4.6 mm。热轧开轧温度为 930 °C,终轧温度为 850 °C,卷取温度为 550 °C。表 2 给出的是实验钢的力学性能,包括屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 、延伸率 A 。

采用美国 IPG 公司生产的 YLS-4000 型光纤激光器对钢板进行对接拼焊。激光器光纤直径为 200 μm,焦距为 300 mm。保护气选用 Ar 气,气体流量为 10 L/min。选定 162、175、187、226 J/mm² 4 组焊接热输入进行焊接。采用蔡司光学显微镜(OM)和日立 SU5000 热场发射扫描电子显微镜(SEM)对焊接接头的显微组织进行观察;采用 HXD-1000TMC 维式硬度计测量焊接接头的显微硬度;采用 120 kV 的 Tecnai G²F20 透射电镜(TEM)对焊接接头精细组织进行观察;采用 RGM-4100 万能试验机对焊接试样进行拉伸试验。

表 1 实验钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of tested steel (mass fraction, %)

| C | Si | Mn | P | S | Al | Nb | Ti | N | Fe |
|------|------|------|--------|-------|------|------|------|-------|------|
| 0.09 | 0.15 | 1.75 | 0.0035 | 0.001 | 0.03 | 0.03 | 0.10 | 0.005 | Bal. |

表 2 实验钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of tested steel

| σ_s /MPa | σ_b /MPa | A /% |
|-----------------|-----------------|--------|
| 650 | 715 | 21 |

由于实验钢采用激光焊接时,焊缝及热影响区较窄(小于 2 mm),采用传统的开“V”型或“U”型坡口无法对焊接接头的冲击性能进行精确评价。为确保所开坡口完全在焊缝内,采用开“I”型非标准缺口评价焊缝的冲击吸收功。在试验初期经过大量试验探索,当所开“I”型坡口的深度为 1.5 mm、宽度为 0.5 mm 时获得母材

的冲击吸收功(24 J)与开“V”型标准缺口的吸收功(23 J)相近。冲击试样宏观形貌如图1所示。试样尺寸为55 mm×10 mm×2.5 mm(长×宽×厚),采用DK7732线切割机进行开机械缺口,缺口深度为1.5 mm,缺口宽度为0.5 mm。冲击试验在ZBC2302-B摆锤式冲击试验机上完成,试验温度为-40 ℃。为保证试验温度的准确性,采用温度补偿和保温30 min后再进行冲击试验。

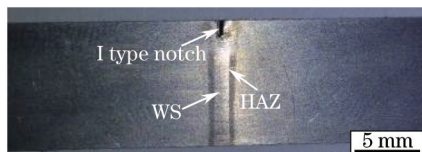


图1 冲击试样宏观形貌

Fig.1 Macro morphology of impact sample

3 实验结果与分析

3.1 全熔透焊缝显微组织

由于所研究的4种热输入条件下,焊接接头均为全熔透焊缝,因此,以焊接热输入为162 J/mm²时焊接接头为例,说明焊接接头的宏观及微区形貌(图2)。如图2(a)所示,焊接接头分为焊缝(WS)和热影响区(HAZ)。而HAZ又可细致划分为粗晶区(CG-HAZ)、细晶区(FG-HAZ)和混晶区(MG-HAZ)。图2(b)为母材的显微组织,主要以铁素体为主(铁素体晶粒尺寸在3~6 μm),并且在铁素体晶界分布着一定量的碳化物(C)。由图2(c)可见,焊缝区的组织以板条马氏体(LM)为主,并且在原始奥氏体晶界处有少量铁素体(F)和贝氏体(B)。由于粗晶区离焊缝(熔化区)很近,在焊接热循环的作用下峰值温度可达到1350 ℃,原始奥氏体晶粒发生粗化,在快速冷却的条件下,形成的几乎全为马氏体,如图2(d)所示。图2(e)为细晶区显微组织,由于距离焊缝相对较远,峰值温度相对较低,介于A_{c3}和奥氏体晶粒粗化温度之间,组织发生完全奥氏体化但奥氏体晶粒未发生粗化,在随后的快速冷却过程中形成细小的铁素体组织^[10]和M/A岛,铁素体晶粒尺寸约为1.5~2.5 μm。如图2(f)所示,混晶区靠近母材一侧,为不完全相变区,只有部分高碳组织发生了奥氏体化,最终组织以铁素体为主(晶粒尺寸约3~5 μm),并有少量的M/A岛形成。

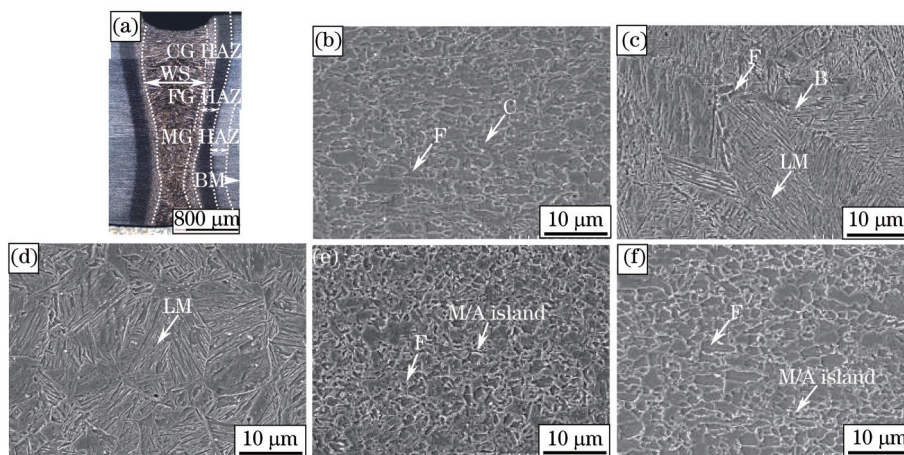


图2 热输入为162 J/mm²时接头宏观形貌和显微组织。(a)宏观形貌;(b)母材;(c)焊缝;(d)热影响区粗晶区;

(e)热影响区细晶区;(f)热影响区混晶区

Fig.2 Macro morphology and microstructure of welded joint at heat input 162 J/mm². (a) Macro morphology; (b) BM; (c) WS;

(d) CG-HAZ; (e) FG-HAZ; (f) MG-HAZ

3.2 热输入对焊缝和粗晶区组织影响

通过对比分析不同热输入条件下焊接接头各个区域的显微组织,发现热输入对焊缝区和粗晶区组织有一定程度的影响,而对细晶区和混晶区组织无明显影响。图3给出的是不同热输入下焊缝组织[图3(a)~(d)]和粗晶区[图3(e)~(h)]的组织形貌。由图3可见,随着热输入的增加,焊缝区的显微组织中晶界铁素体和贝氏体含量有所增加,粗晶区的显微组织由全马氏体组织逐渐演变为马氏体+贝氏体+铁素体的混合组织。

焊接热输入的不同,焊缝区和粗晶区的峰值温度、高温停留时间和随后的冷却速度将会发生一定程度的变化,尤其是冷却速度的变化将会对最终的组织状态产生明显的影响。当焊接热输入较小时,冷却时间 $t_{8/5}$ (从 800 °C 降到 500 °C 的时间) 缩短,即冷却速度提高,形成了较大的过冷度,奥氏体中的碳原子无法发生扩散而直接发生切变型相变转变为马氏体组织^[11-12]。随着焊接热输入的提高,焊后的冷却速度逐渐降低,奥氏体中的碳原子有一定的时间向外扩散,因此产生了少量的扩散型铁素体相变和贝氏体相变,最终冷却至室温获得以马氏体为主,少量贝氏体和铁素体的混合组织。

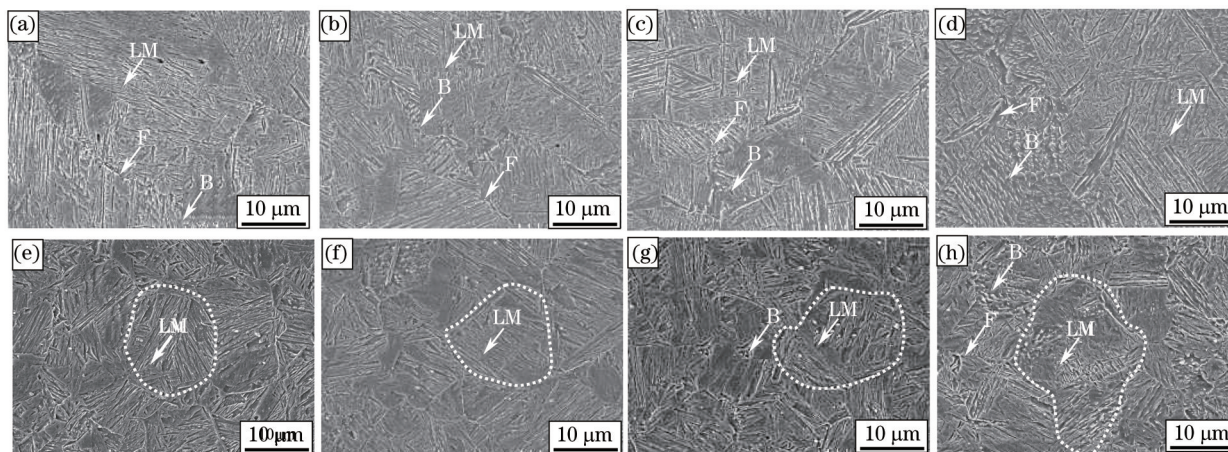


图3 不同焊接热输入下焊缝组织和热影响区粗晶区组织及晶粒尺寸。不同热输入下焊缝组织: (a) 162 J/mm²; (b) 175 J/mm²; (c) 187 J/mm²; (d) 226 J/mm²; 不同焊接热输入粗晶区组织: (e) 162J/mm²; (f) 175 J/mm²; (g) 187 J/mm²; (h) 226 J/mm²

Fig.3 Microstructure of WS and CG-HAZ and grain size of CG-HAZ at different heat inputs. Microstructure of WS at different heat inputs: (a) 162 J/mm²; (b) 175 J/mm²; (c) 187 J/mm²; (d) 226 J/mm²; Microstructure and of CG-HAZ at different heat inputs: (e) 162 J/mm²; (f) 175 J/mm²; (g) 187 J/mm²; (h) 226 J/mm²

图4为热输入对粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸的影响规律。由图4可见,粗晶区的原始奥氏体晶粒尺寸随着焊接热输入的增大而增大,当焊接热输入为 162 J/mm²时,粗晶区原始奥氏体平均晶粒尺寸约为 8 μm,而当焊接热输入达到 226 J/mm²时,平均晶粒尺寸约为 18 μm。Sellars 等^[13]通过研究建立了 C-Mn 钢晶粒长大的模型

$$d^n = d_0^n + At \exp(-Q/RT), \quad (1)$$

式中 d, d_0 分别为最终及原始晶粒尺寸, t 为等温时间, T 为温度, R 为气体常数, A, n 为实验常数, Q 为晶粒长大激活能。

由(1)式可知,最终得到奥氏体晶粒尺寸与等温时间成正比关系,即保温时间越长,最终的晶粒尺寸越大。尽管激光焊接不是一个等温过程,但在高温段内可近似看作是多个连续等温的过程。焊接热输入越大,高温停留时间越长,奥氏体晶粒长大时间越多^[14],得到的奥氏体晶粒尺寸越大。

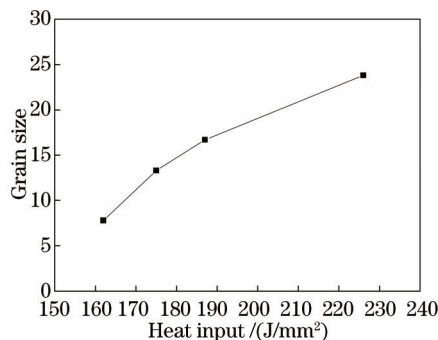


图4 热输入对粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸的影响

Fig.4 Effect of heat input on original austenite grain size of CG-HAZ

3.3 热输入对焊缝显微硬度和接头峰值硬度的影响

显微硬度的大小和钢中组织密切相关,钢中马氏体具有较高的硬度和强度^[15-16]。以焊接热输入 162 J/mm² 为

例,说明激光焊接接头硬度的变化规律。图 5(a)为焊接热输入为 162 J/mm²时焊缝截面的硬度分布。硬度分布呈“马鞍”型,焊缝平均硬度(377 HV)大于热影响区平均硬度(289 HV)大于母材硬度(252 HV)。焊接接头硬度变化的原因为:一方面,由于焊缝的组织主要以马氏体为主,热影响区随着距离焊缝距离的增加马氏体的含量减少,硬度也逐渐降低,但是仍然高于以铁素体为主的母材;另一方面,由于激光焊接的冷却速度很快,使得焊缝中已回溶的析出物无法再次析出,以固溶的状态存在基体当中,形成固溶强化而提高了焊缝的硬度^[17]。

图 5(b),(c)分别为焊缝中心硬度和峰值硬度与热输入的关系。随着焊接热输入的增大,焊缝中心硬度和峰值硬度均呈下降的趋势。当焊接热输入为 162 J/mm²时焊缝中心平均硬度约为 377 HV,而焊接热输入增大到 226 J/mm²时,焊缝中心硬度平均值约为 298 HV,焊缝中心的硬度下降了 20.8%。峰值硬度则对应的由 400 HV 下降到了 340 HV。上述现象的出现主要归因于热输入增大导致较软的组织(贝氏体和铁素体)的出现。

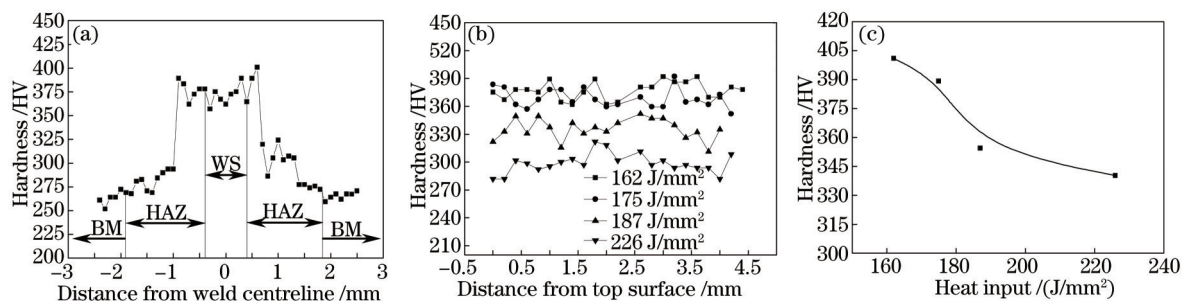


图 5 焊接接头硬度及热输入对硬度的影响规律。(a) 热输入为 162 J/mm²时焊接接头显微硬度; (b) 热输入对焊缝中心硬度的影响; (c) 热输入对焊接接头峰值硬度的影响

Fig.5 Hardness of weld joint and effects of heat input on hardness. (a) Hardness of welded joint at heat input 162 J/mm²; (b) effect of heat input on hardness of welded seam; (c) effect of heat input on peak hardness of welded joint

3.4 热输入对焊接接头拉伸和冲击性能影响

一般而言,抗拉强度和硬度存在正相关关系,即材料的硬度越大对应的抗拉强度越大^[18]。上述显微硬度测试表明,热输入为 226 J/mm²时焊缝中心的硬度最低,即在该热输入条件下所得焊缝的强度最低。因此在焊接接头的拉伸性能测试时选取该组参数进行试验。图 6 为拉伸试验前后样品宏观形貌对比图。拉伸试验断裂的位置出现在母材位置,即激光焊接得到的焊接接头抗拉强度高于母材。

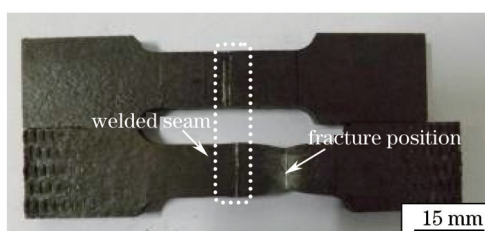


图 6 拉伸试验样品的宏观照片

Fig.6 Morphology of sample of tensile testing

“I”型缺口低温冲击试验(试验温度为-40 ℃)表明,热输入为 162、175、187、226 J/mm²和母材的平均冲击功分别为 37、38、41、43 和 26 J。图 7(a)中,左侧为母材冲击断口宏观形貌,右侧为热输入为 226 J/mm²时的冲击断口形貌。宏观断口中存在明显的剪切唇结构,表明母材和焊接接头的断裂方式均为韧性断裂。利用体视显微镜对焊接接头冲击断口侧面进行了观察,如图 7(b)所示。缺口位于焊缝中心位置,当受到冲击载荷时,裂纹并未沿着焊缝中心向前扩展,而是绕过焊缝穿过热影响区沿着母材发生扩展。上述现象表明,与母材相比,焊缝和 HAZ 具有相对优异的抗裂纹扩展能力。对于该钢而言,采用传统 CO₂ 气体保护焊得到的焊接接头的冲击功小于母材^[9]。因此,采用高功率激光焊接解决了该钢 CO₂ 气体保护焊焊接接头韧性降低的问题。

通常情况下,由于在焊接接头会形成大量硬质相如马氏体组织等,会使得焊接接头冲击韧性低于母材^[19]。而本实验所获得的激光焊接接头冲击韧性优于母材,主要原因可归纳为 3 个方面:1) 由于激光焊接快速加热和快速冷却的特点,使得焊接接头的晶粒在加热过程中晶粒还未来得及长大粗化就被迅速地冷却,焊接接头晶粒尺寸细小。以热输入为 226 J/mm²为例,焊接接头中板条马氏体的板条宽度仅为 0.3~0.6 μm,如图 7(d)

所示,相对于母材晶粒尺寸(3~4 μm)大大减小。晶粒越细小,单位体积内的板条边界越多,有阻止裂纹扩展的作用,使材料的韧性提高^[20]。2)如图7(c)所示,母材断口的韧窝中存在大量较大尺寸的夹杂物,这大大降低了母材的冲击韧性;而焊缝中这些粗大的夹杂物在加热过程发生了回溶^[21],显著地降低了其对韧性的影响;3)文献[22]研究指出,当板条马氏体内部产生大量的位错[如图7(d)所示],在外力的作用下易于沿着滑移面运动,提高了焊接接头的冲击韧性。

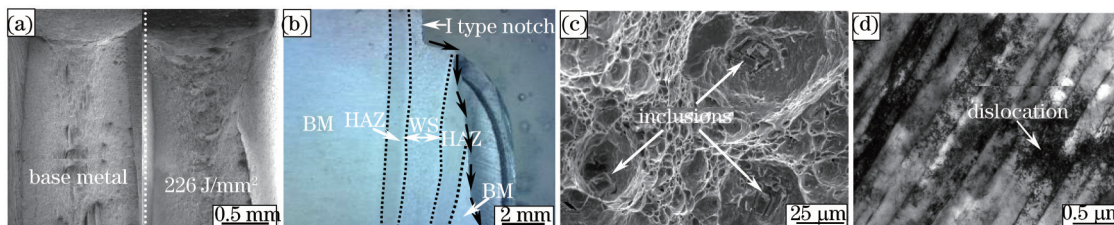


图7 冲击断口宏观、微观形貌和焊缝的TEM。(a)冲击断口宏观形貌;(b)焊接接头冲击断口侧面形貌;
(c)母材断口微观形貌;(d)焊缝的TEM形貌

Fig.7 Macro and micro morphology of fracture surface and TEM of WS. (a) Macro morphology of fracture surface;
(b) side morphology of impact fracture surface of welded joint; (c) micro morphology of BM; (d) TEM morphology of WS

4 结 论

以抗拉强度700 MPa级Nb-Ti微合金高强钢的全熔透激光焊接接头为研究对象,研究了焊接热输入(162~226 J/mm²)对焊接接头显微组织、显微硬度、拉伸性能及冲击韧性的影响规律,主要结论如下:

1)热输入对焊缝区和粗晶区的显微组织影响较为明显。焊缝组织以板条马氏体为主,随着热输入增加,贝氏体和铁素体的含量有所增加;粗晶区组织为板条马氏体,当热输入 ≥ 187 J/mm²时开始出现贝氏体甚至铁素体;随着热输入的增加,粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸逐渐增大。

2)焊缝和热影响区硬度均高于母材;随着焊接热输入增大,焊缝中心的硬度和峰值硬度均呈下降趋势,其主要原因是焊接热输入增加导致贝氏体和铁素体的含量增加。

3)焊接接头冲击韧性优于母材,均呈现韧性断裂,激光焊接解决了实验钢采用传统CO₂气体保护焊接接头韧性降低的问题。焊接接头韧性得以改善归功于显微组织细化、粗大夹杂物回溶和高位错密度。

参 考 文 献

- 1 Liang Guoli, Yang Shanwu, Wu Huibin. Microstructure and mechanical performances of CGHAZ for oil tank steel during high heat input welding[J]. Rare Metals, 2013, 32(2): 129-133.
- 2 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钢B450LAD组织与性能[J].中国激光,2008,35(12):2047-2051.
- 3 Li Yang, Liu Hanwu, Du Yunhui, *et al.*. Applications and developments of AHSS in automobile industry[J]. Materials Review, 2011, 25(7): 101-109.
李扬,刘汉武,杜云慧,等.汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向[J].材料导报,2011,25(7):101-109.
- 4 Li Xiaofeng, Song Haoyuan, Zhang Youwei, *et al.*. Discussion on microstructure and properties of laser welding for high strength low alloy steel[J]. Physics Examination and Testing, 2015, 33(1): 1-5.
李晓峰,宋浩源,张有为,等.低合金高强钢激光焊接组织性能探讨[J].物理测试,2015,33(1):1-5.
- 5 S Katayama, Y Kawahito. Interpretation of laser weld penetration and welding phenomena[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3160-3166.
- 6 Jing Cainian, Fan Jichao, Wang Conglei, *et al.*. Characterization and formation mechanism of the weld interface of TRIP 590 steel laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403004.
景财年,范吉超,王从雷,等.激光焊接TRIP钢焊缝微观结构及形成机理研究[J].中国激光,2015,42(4):0403004.
- 7 Wang Wenquan, Ma Kai, Sun Daqian, *et al.*. The microstructure and properties of weld joint of 600 MPa DP steel by laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 25-28.
王文权,马凯,孙大千,等.CO₂激光焊接600 Mpa DP钢接头组织与性能[J].焊接学报,2010,31(9):25-28.
- 8 R Miranda, A Costa, L Quintino, *et al.*. Characterization of fiber laser welds in X100 pipeline steel[J]. Materials and Design, 2009, 30

- (7): 2701-2707.
- 9 Zhang Xudong, Chen Wuzhu, Wang Cheng, *et al.*. Microstructures and toughness of weld metal of ultrafine grained ferritic steel by laser welding[J]. Journal of Materials Science, 2004, 20(6): 755-759.
- 10 Lan Liangyun, Qiu Chunlin, Zhao Dewen, *et al.*. Microstructural characters and toughness of different sub-regions in the welding heat affected zone of low carbon bainitic steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(8): 1046-1054.
兰亮云, 邱春林, 赵德文, 等. 低碳贝氏体钢焊接热影响区中不同亚区的组织特征与韧性[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1046-1054.
- 11 Liu Huijie. Welding Metallurgy and Welding[M]. Haerbin: Machinery Industry Press, 2007: 105-126.
刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 哈尔滨: 机械工业出版社, 2007: 105-126.
- 12 Wang Haisheng, Wang Wei, Wang Xiaonan, *et al.*. Effect of heat input on weld joints microstructure and nano mechanical properties of nano precipitation hardening steel[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703004.
王海生, 王 卫, 王晓南, 等. 热输入对纳米析出强化钢激光焊接接头组织及纳米力学性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703004.
- 13 C Devadas, I V Samarasekera, E B Hawbolt. The thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling: Part 1, Characterization of heat transfer[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 21(2): 307-319.
- 14 Zheng Lei, Yuan Zexi, Song Shenhua, *et al.*. Austenite grain growth in heat affected zone of Zr-Ti bearing microalloyed steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(2): 73-78.
- 15 Zhang Xiaoning, Jing Yi, Yu Yan, *et al.*. Study on microstructure evolution and properties of SA738Gr.B steel with different austenitizing holding time and peak temperature[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(7): 22-29.
张效宁, 景 益, 余 燕, 等. SA738Gr.B 钢奥氏体化高温停留时间及峰值温度对组织演变及性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(7): 22-29.
- 16 Ye Hong, Wu Haidong, Zhang Xiaobin. Principle and Process of Metal Heat Treatment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 56-72.
叶 宏, 仵海东, 张小彬. 金属热处理原理与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 56-72.
- 17 Zhang Min, Wang Xiaonan, Zhu Guangjiang, *et al.*. Effect of laser welding process parameters on microstructure and mechanical properties on butt joint of new hot-rolled nano-scale precipitation-strengthened steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 27(3): 521-529.
- 18 Shen Baoluo, Li Li, Yue Changlin. Summarization of relationship between tensile strength and hardness of iron-steel materials[J]. Modern Cast Iron, 2012, 32(1): 93-96.
沈保罗, 李 莉, 岳昌林. 钢铁材料抗拉强度与硬度关系综述[J]. 现代铸铁, 2012, 32(1): 93-96.
- 19 Wang Xiaonan. Precipitation Behavior Study and Control on Microstructure and Properties of Hot-Rolled Ultra-High Strength Automobile Strip[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 108-129.
王晓南. 热轧超高强汽车板析出行为研究及组织性能控制[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 108-129.
- 20 Zhang Xiaoli, Zhuang Chuanjing, Ji Lingkang, *et al.*. Effective particle size of high grade pipeline steels[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2007, 31(3): 4-8.
张小立, 庄传晶, 吉玲康, 等. 高钢级管线钢的有效晶粒尺寸[J]. 机械工程材料, 2007, 31(3): 4-8.
- 21 Wang Xiaonan, Chen Changjun, Wang Haisheng, *et al.*. Microstructure formation and precipitation in laser welding of microalloyed C-Mn steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226(5): 106-114.
- 22 Wu Wei, Gao Hongming, Cheng Guangfu, *et al.*. Effect of high temperature residence time on microstructure of fine grained titanium alloy [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2009, 30(9): 5-9.
吴 魏, 高洪明, 程广福, 等. 高温停留时间对细晶粒钛合金粗晶区组织的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 5-9.

栏目编辑: 宋梅梅