

保护气对微合金 C-Mn 钢激光焊接接头 组织和性能的影响

曾盼林¹, 王晓南¹, 章顺虎¹, 张 敏², 陈长军²

¹苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215201;

²苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 通过微合金 C-Mn 钢的焊接试验,研究了不同保护气对激光焊接接头组织和性能的影响。结果表明,在相同的激光焊接热输入条件下, N₂、Ar、空气三种保护气焊接均可获得全熔透焊缝,但 N₂ 气保护条件下焊缝区凹陷最为明显。焊缝区组织均以板条马氏体为主。空气环境下焊缝区形成少量针状铁素体,夹杂物数量明显多于 N₂ 和 Ar 气保护下焊缝的,且大尺寸的夹杂物比例较高。三种情况下,焊接接头的平均显微硬度和强度均高于母材的,但是空气环境下焊缝的平均硬度略小于 N₂ 或 Ar 气保护下焊缝的。

关键词 激光技术; 激光焊接; 力学性能; 保护气; 针状铁素体

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402004

Influence of Shielding Gas on Microstructure and Property of Laser Welded Joint of Microalloyed C-Mn Steel

Zeng Panlin¹, Wang Xiaonan¹, Zhang Shunhu¹, Zhang Min², Chen Changjun²

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

²School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The influence of different shielding gases on microstructure and property of laser welded joint is studied by the weld test of microalloyed C-Mn steel. The results show that, under the same condition of laser weld heat input, full-penetration weld seams can be obtained by three different shielding gases of N₂, Ar and air, but the sags in the weld zone shielded by N₂ are the most obvious. The microstructures of the weld zone are mainly lath martensite. In the weld seam formed in the air, there are a few acicular ferrites, the number of inclusions is more than that shielded by N₂ and Ar, and the ratio of large scale inclusion is relatively high. In all three cases, the mean microhardness and tensile strength of the welded joint are higher than that of the base metal, while the mean microhardness of the weld seam in the air is smaller than that when shielded by N₂ or Ar.

Key words laser technology; laser welding; mechanical property; shielding gas; acicular ferrite

OCIS codes 140.0140; 160.0160; 180.0180

1 引 言

微合金高强度钢具有优异的力学性能,被广泛应用于汽车、工程机械、桥梁、高层建筑等领域^[1-3]。微合金高强度钢是在传统的 C-Mn 钢的基础上,适当添加微合金元素,如 Nb、Ti、V、Mo,通过发挥微合金元素细化晶粒、沉淀强化和固溶强化等作用,获得精细的铁素体(F)、贝氏体(B)甚至马氏体组织,且基体上弥散分布着大量尺寸在 10 nm 以下的微合金碳化物^[4]。Nb-Ti 微合金化 C-Mn 钢是一种典型的微合金钢,主要用

收稿日期: 2016-07-21; 收到修改稿日期: 2016-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(51305285)、中国博士后基金面上项目(2016M601877)

作者简介: 曾盼林(1995—),男,本科生,主要从事高强钢激光焊接方面的研究。E-mail: 1813345945@qq.com

导师简介: 王晓南(1984—),男,博士,副教授,主要从事先进钢铁材料研制方面的研究。

E-mail: wxn@suda.edu.cn(通信联系人)

于汽车零部件的制造^[5],可满足汽车结构减重和节能减排的需求。

激光焊接具有热输入小、焊接速度快、焊缝深宽比大、焊接质量高等优点,逐渐成为 10 mm 以下薄钢板的重要连接技术之一^[6-7],同时也为微合金钢的连接提供了新的途径。在激光焊接过程中,为防止焊接区金属过度烧损和氧化,通常采用外加气体对焊接区加以保护,因此,保护气的选择及其对焊接接头组织性能的影响引起了国内外学者的广泛关注。李明星等^[8]研究了不同保护气对 1.4 mm 厚低碳钢镀锌板激光焊接性能的影响,发现 He 气或 Ar 气作保护气时,高功率激光焊接厚镀锌板的焊缝成形效果最好。尹丰等^[9]采用不锈钢附件实芯焊丝,在不同保护气下进行气体保护焊和焊条电弧焊,研究了保护气体对实心焊丝气体保护焊的焊缝金属化学成分、工艺性能和力学性能的影响。Paulraj 等^[10]采用 904L 奥氏体不锈钢,分别在纯 N₂ 气与体积比为 1:1 的 Ar、N₂ 混合气体保护下进行激光焊接,结果表明,纯 N₂ 保护下焊缝具有更大的渗透深度和更窄的熔宽,纯 N₂ 保护的等离子体屏蔽作用和更快的冷却速率使得焊缝金属具有更高的硬度。Kah 等^[11]研究发现,当采用 Ar 气和 CO₂ 的混合气体作为保护气时,在一定范围内增加 CO₂ 含量可以产生更大的焊接速度和熔深,并降低孔隙率和金属损失,但增加保护气体的氧化电势会降低焊缝的强度和韧性。这些研究均表明,保护气体对焊接接头组织和性能有一定的影响。关于保护气体对微合金化高强钢激光焊接组织性能的影响还有待更深入的研究。

本文研究了不同保护气对 Nb-Ti 微合金化 C-Mn 钢激光焊接接头显微组织、夹杂物及力学性能的影响,为微合金钢激光焊接时保护气的合理选配提供了参考。

2 试验材料及方法

采用真空冶炼炉冶炼获得的试验钢铸锭,试验钢的化学成分见表 1。将铸锭锻造加工成 40 mm 厚的锻坯,并在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的试验机机组上完成热轧试验。热轧的开轧温度为 950 °C,卷取温度为 600 °C,冷却速度约为 15 °C/s,轧后板材厚度为 5 mm。试验钢的显微组织为 F 和珠光体(P),如图 1 所示。试验钢具有良好的强韧性,其力学性能见表 2。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数,%)

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

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

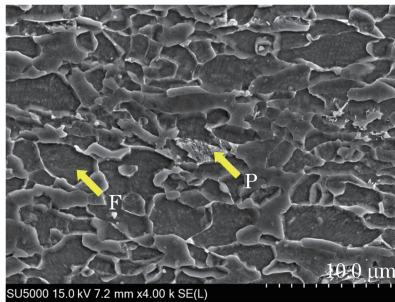


图 1 试验钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of test steel

表 2 试验钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test steel

Property	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
Value	650	745	21

钢板用线切割机按 90 mm×90 mm×5 mm 尺寸分割,用砂纸对 90 mm 长边面打磨后用酒精清洗并吹干,采用德国 IPG 公司生产的 YLS-6000 激光器对钢板打磨面进行对接拼焊。焊接过程中激光功率为 3 kW,离焦量为 +5 mm,焊接速度为 1.8 m/min,分别在 Ar、N₂ 作保护气或空气环境下焊接,保护气流量为 20 L/min,采用同轴吹保护气。

采用德国卡尔蔡司 AxioVert. Al 金相光学显微镜(OM)观察焊缝;显微组织分析试样用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀,在日本日立 SU5000 热场发射扫描电子显微镜(SEM)下观察;显微硬度在上海钜晶精密仪器公司生产的 HV-1000IS 型显微维氏硬度计上进行测试,施加载荷为 300 g,加载时间为 10 s;冲击试验在美特斯工业系统公司生产的 ZBC2302-B 摆锤式冲击试验机上完成,试样尺寸为 55 mm×10 mm×2.5 mm,开 V 型坡口,缺口位于焊缝中心处,并在 -40 °C 下完成试验钢焊接接头冲击韧性的测定;采用深圳瑞格尔公司生产的 RGM-4100 万能试验机对焊接试样进行拉伸试验,拉伸速度为 3 mm/min。采用 IPP 软件测量焊缝凹陷深度以及统计焊缝中夹杂物的尺寸、数量。

3 试验结果与分析

3.1 保护气对焊缝宏观形貌的影响

不同保护气下焊接接头的宏观形貌如图 2 所示,可见三种保护气体下均可获得全熔透焊缝。当高功率密度的激光束照射在焊件表面时,焊缝区金属在极短的时间内被加热、熔化以及电离,由金属离子、保护气离子、金属蒸气等组成的等离子体冲击熔化的金属进而实现深熔焊接^[8]。为了保证后续的力学性能测试,试验选用的激光功率较高,因此,三种保护气下并未见明显的熔深差异,但焊缝的凹陷程度有所区别。在空气环境、纯 N₂ 保护气及纯 Ar 保护气下进行焊接时,焊接接头凹陷深度分别约为 434.2, 802.6, 539.5 μm。

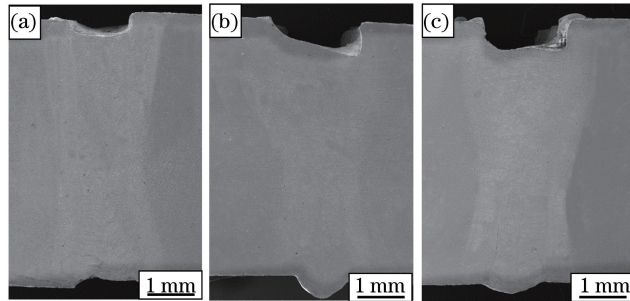


图 2 不同保护气下焊接接头横截面形貌。(a) 空气;(b) N₂;(c) Ar

Fig. 2 Cross section morphologies of welded joint by different shielding gases. (a) Air; (b) N₂; (c) Ar

出现上述现象的原因在于:保护气对焊缝凹陷的影响与焊接过程中焊缝熔池液态金属的流动有关。熔池中的液态金属在外部气流、等离子流、表面张力以及自身密度差异等因素的作用下,会发生有规律的对流和搅动^[12]。当采用 Ar 气或 N₂ 气作为保护气时,与焊接区垂直吹入的保护气对熔池产生一定的冲击力,导致熔池内金属向下部或两侧流动,最终形成较大尺寸的凹陷;无保护气焊接时,不存在这种外在的气流冲击力,焊缝的凹陷程度有所降低。此外,熔池顶部与底部温度差越大,液态金属对流形成凹陷的作用越显著,而熔池顶部的峰值温度一般是由热输入(激光功率)决定的。然而,保护气会影响到等离子体产生的难易程度、密度和分布,等离子体对激光的吸收和折射会降低激光功率的利用率,使熔池顶部与底部的温差减小。对比而言,N₂ 作保护气时,其等离子屏蔽效应比 Ar 的弱^[13],因此 N₂ 气保护焊时凹陷比 Ar 气时的大。

3.2 保护气对焊接接头显微组织和夹杂物的影响

3.2.1 保护气对焊缝区显微组织的影响

不同保护气下焊缝区的显微组织如图 3 所示。空气环境下焊接时,焊缝区域组织以板条马氏体(LM)、晶界铁素体(GBF)、B 为主,如图 3(a)所示;部分夹杂物诱发了针状铁素体(AF)形核,并呈放射状长大,如图 3(b)所示。在 Ar 气或 N₂ 气保护条件下,焊缝区组织为 LM,且无 AF 形成,如图 3(c)、(d)所示。

空气环境下焊接时,焊缝区的冷却速度较其他情况下的明显降低,高温停留时间延长,为 GBF 和 B 从奥氏体晶界析出提供了有利的热循环条件。因此,空气环境下焊接时,焊缝区出现了除 LM 以外的 GBF 和 B。相关研究已经表明,AF 的形成与其形核点夹杂物的尺寸、形状和成分等有关^[14-15]。利用能谱仪(EDS)分析了空气环境焊接时焊缝区形成的夹杂物的成分,如图 4 所示,其中图 4(b)、(c)、(d)分别为图 4(a)中 T1、T2、T3 三点的能谱图。能谱分析表明,夹杂物的主要化学成分为含钛的氧化物,初步认为是空气环境下焊接时母材金属中含有的钛元素与空气中的氧结合生成的,而适宜尺寸的含钛氧化物恰好能够成为 AF 的形核

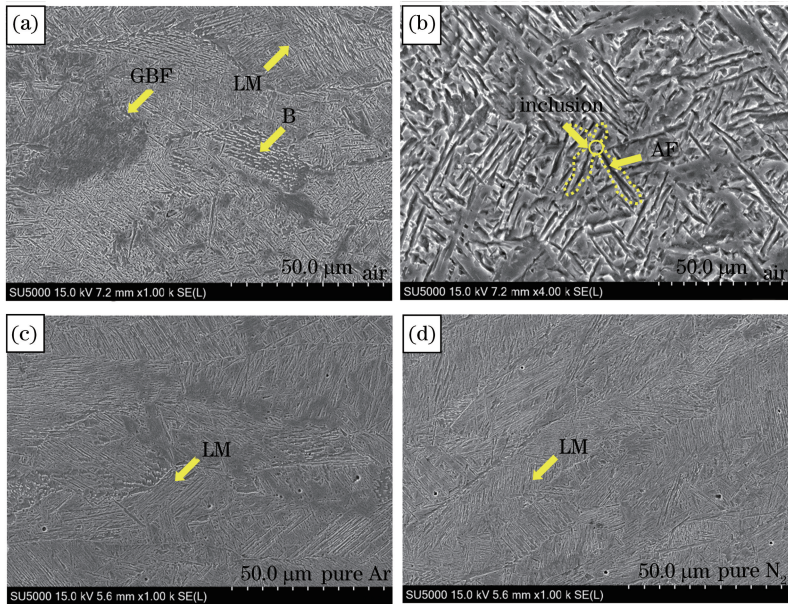


图 3 不同保护气下焊缝区的显微组织

Fig. 3 Microstructures of weld zone by different shielding gases

点^[16-18]。此外,空气环境焊接过程中,无保护气吹到焊接样品表面,导致焊缝的冷却速度低于 Ar 气或 N₂ 气保护焊接时的,高温奥氏体有一定时间发生扩散型相变,AF 得以长大,如图 4(a)所示,以含钛夹杂物为核心的 AF 已长大成细长状。

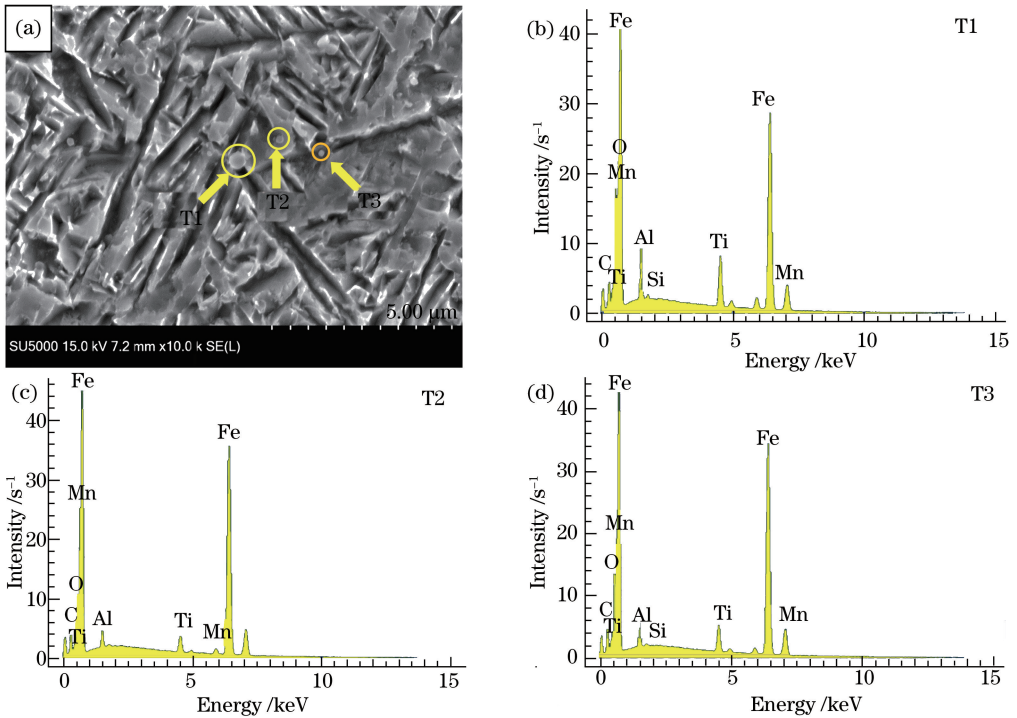


图 4 空气环境焊接下焊缝区的(a) AF 的形核点和(b)(c)(d)夹杂物能谱分析

Fig. 4 (a) Nucleation points of AF and (b)(c)(d) energy spectrum analysis of inclusions in weld zone in air condition

3.2.2 保护气对焊缝区夹杂物的影响

为进一步明确保护气对焊缝中夹杂物尺寸及数量的影响,利用 SEM 随机选取视场拍摄夹杂物照片,并结合 IPP 图像分析软件统计不同保护气下焊缝区夹杂物的尺寸分布,每个焊缝至少统计 20 张照片。不同保护气焊接时,焊缝区和母材区的夹杂物析出情况如图 5 所示,其中亮白色的点为夹杂物,灰色区域为基体。

由图 6 不同保护气下的夹杂物尺寸分布统计图可见,三种焊接情况下焊缝中的夹杂物均以 50~100 nm 的小尺寸夹杂物为主;空气环境下焊缝中夹杂物总量比 Ar 气或 N₂ 气保护时的大,而尺寸在 50~100 nm 的夹杂物含量小于 Ar 气或 N₂ 气保护时的,尺寸在 100 nm 以上的夹杂物含量均大于 Ar 气或 N₂ 气保护时的。

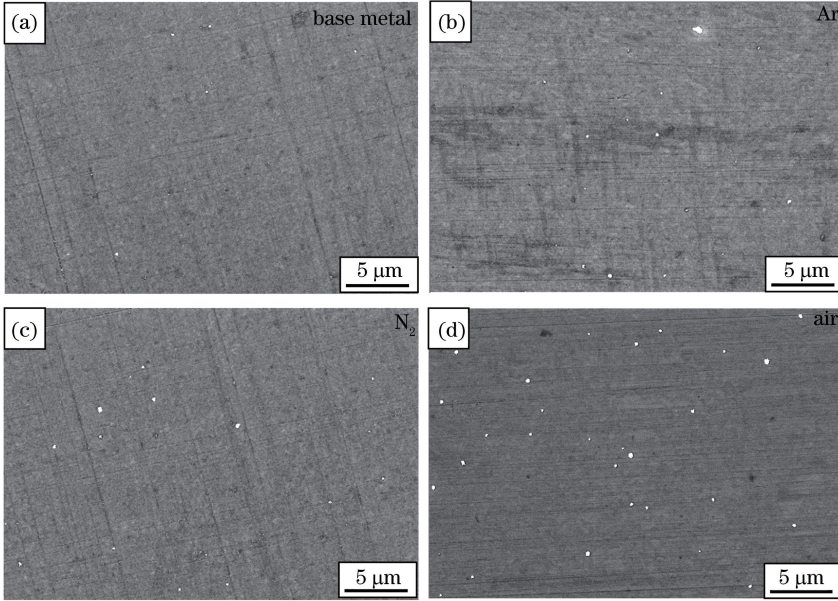


图 5 (a)母材和(b)(c)(d)不同保护气下焊缝区夹杂物分布

Fig. 5 Inclusion distributions in (a) base metal and (b)(c)(d) weld zone by different shielding gases

在焊接过程中,熔池中的金属原子 Me 与 O₂ 反应形成金属氧化物的方程式为



式中 x 为参与反应的金属原子的数量。平衡常数计算式为 $K = p^0 / p_{\text{O}_2}$, 其中 p^0 为标准大气压, p_{O_2} 为熔池中氧气分压。

空气环境下焊接时,空气中的氧气溶入熔池使氧分压增大,随着氧分压的增加,形成了更多尺寸更大的含钛氧化物夹杂,这些夹杂物恰好是 AF 的形核点。结合上述现象可以推断出,只有尺寸大于 100 nm 的夹杂物才能促进焊缝区 AF 形核^[14-15]。

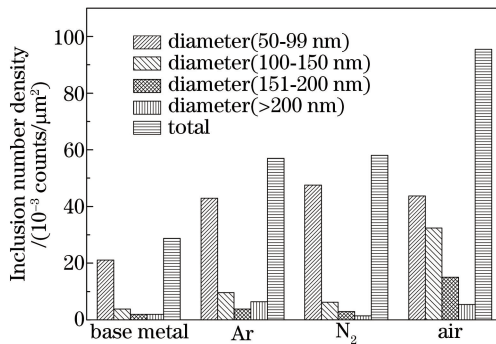


图 6 不同保护气下焊缝区夹杂物的尺寸分布

Fig. 6 Size distributions of inclusions in weld zone by different shielding gases

3.3 保护气对焊接接头硬度和力学性能的影响

3.3.1 保护气对焊接接头显微硬度的影响

不同保护气下焊接接头的显微硬度分布如图 7 所示。由图可见,三种焊接情况下,从焊缝区(Ws)到热影响区(HAZ)再到母材(BM),显微硬度分布不均匀,Ar 气保护、N₂ 气保护和空气环境下焊缝区的平均硬度分别为 384,369,320 HV,均大于母材的硬度;Ar 气和 N₂ 气保护时硬度变化趋势相同且硬度值相差不明显,从焊缝中心到母材区显微硬度均逐渐降低;空气环境下焊接时,峰值硬度出现在热影响区粗晶区附近,且

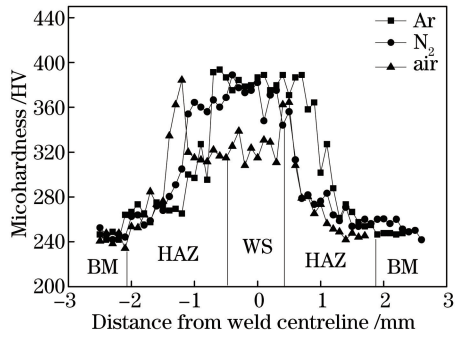


图 7 焊接接头显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distributions of welded joint

明显高于焊缝区的。

一般而言,材料的硬度取决于材料内部的显微组织。由图 3 可见,空气环境下焊缝中出现 F 和 B 等软化相,而 Ar 气和 N₂ 气保护的焊缝主要是硬度较高的 LM,从而使得空气环境下焊缝硬度较其他两种情况的低,同时也使得空气环境下焊接接头焊缝区显微硬度较以 LM 为主的粗晶区的低。此外,在焊接过程中,母材中原有的大量弥散析出的碳化铌钛粒子在焊缝区发生回溶,Ar 气和 N₂ 气保护的焊缝中析出相对较少的含钛氧化物夹杂,大部分的钛元素固溶在焊缝中起到固溶强化的作用,在一定程度上提升了焊缝的硬度。

3.3.2 保护气对焊接接头拉伸和冲击性能的影响

利用拉伸试验机对焊接接头的拉伸性能进行了评价,为保证试验的精确性,每种焊接接头取三个试样进行拉伸试验。试验结果发现,三种接头试样均在母材处断裂,如图 8 所示。N₂、Ar 和空气环境下焊接的各试样在拉伸过程中的平均抗拉强度分别为 730,740,730 MPa,与表 2 中母材的抗拉强度接近。试验结果表明,三种情况下焊接接头的强度均高于母材的。根据强度与硬度的关系准则^[19],这与上述三种焊接接头焊缝的显微硬度均高于母材的结果是一致的。

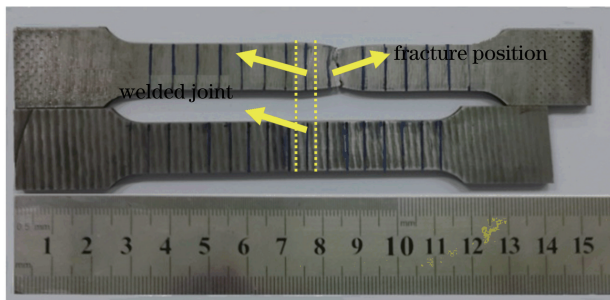


图 8 拉伸试样的宏观照片

Fig. 8 Macro photograph of tensile sample

对三种焊接接头和母材分别取样进行低温冲击试验,N₂、Ar、空气环境下焊接接头以及母材的冲击功分别为 25,23,27,26 J。结果表明,三种情况下焊缝的冲击韧性和母材的冲击韧性基本相同,断口形貌如图 9 所示。图 9(a)为 N₂ 气保护下焊缝冲击断口的低倍放大形貌,断口呈现出明显的纤维区、放射区和剪切唇分区形貌,属于典型的微孔聚集型韧性断裂。在高倍 SEM 下观察三种保护焊缝和母材的冲击断口形貌,如图 9(b)~(e)所示,断裂过程中形成了大韧窝周围密布小韧窝的特征,并在韧窝的底部发现了第二相颗粒,如图中黄色圆圈所示;能谱分析表明,夹杂物为含钛和铝的氧化物。由图 9 可见,三种保护下焊缝断口中形成的韧窝明显比母材断口的韧窝更多且更小,这与三种焊缝中形成了更多的夹杂物有关,这些夹杂物为韧窝提供了更多的形核点,从而提高了韧窝的形核率,使形成的韧窝数量变多、尺寸变小。同时,空气环境下焊缝断口中形成了更多的夹杂物,形成的韧窝比其他两种保护气下焊缝的更细小密集。空气环境下焊接的焊缝冲击韧性比其他情况下的略好,这可能与其焊接过程中形成的 AF 组织有关,而 AF 具有很好的抗裂纹扩展能力使其韧性增强^[20-21]。

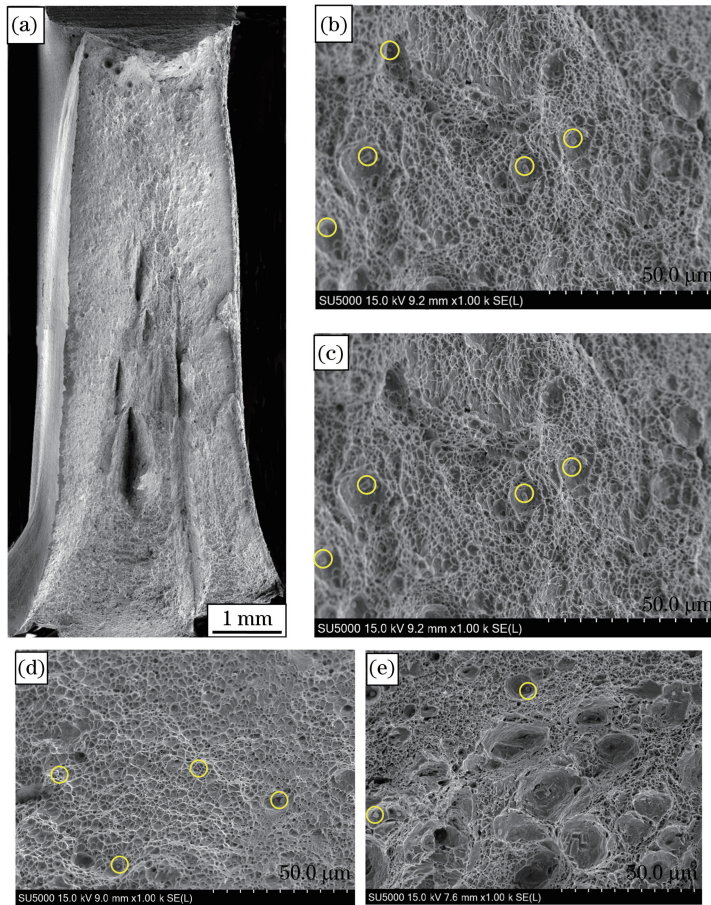


图 9 不同保护气下断口的形貌。(a) N_2 气保护焊缝宏观形貌;(b) N_2 气保护焊缝微观形貌;

(c) Ar 气保护焊缝微观形貌;(d) 空气环境焊缝微观形貌;(e) 母材微观形貌

Fig. 9 Morphologies of fracture surface by different shielding gases. (a) Macrostructure of weld seam shielded by N_2 ; (b) microstructure of weld seam shielded by N_2 ; (c) microstructure of weld seam shielded by Ar; (d) microstructure of weld seam in air condition; (e) microstructure of base metal

4 结 论

当激光功率为 3 kW、离焦量为 +5 mm、焊接速度为 1.8 m/min、保护气流量为 20 L/min 时,在 N_2 、Ar 气或者空气环境下焊接,均得到全熔透焊缝; N_2 保护气时焊缝上表面凹陷程度最高,凹陷深度达 802.6 μm 。

采用 Ar 气、 N_2 或者空气环境下焊接时,焊缝区组织均以 LM 为主,但是空气环境下焊接时,焊缝中还形成了 B、AF 组织,且含有较其他两种情况更多数量的大尺寸含钛氧化物夹杂。三种焊接情况下焊缝区和热影响区的硬度均大于母材的,空气环境下焊接的焊缝区显微硬度较 N_2 或 Ar 气保护下的低, N_2 和 Ar 气保护下焊缝区显微硬度基本一致;三种情况下焊接接头的强度均高于母材的,冲击韧性相差不大且与母材的接近,且均为韧性断裂。

参 考 文 献

- [1] Zhu Hongyi. Development of Nb microalloying high strength ship plate at Anyang steel[J]. Special Steel, 2009, 30(3): 50-51.
朱红一. 安钢 Nb 微合金化高强度船体结构钢板的开发[J]. 特殊钢, 2009, 30(3): 50-51.
- [2] Li Hongmei, Cao Jianchun, Sun Lijun, *et al.* Current situation and development of Nb microalloyed steel carbonitride precipitation behavior[J]. Materials Review, 2010, 24(9): 84-87.
李鸿美, 曹建春, 孙力军, 等. 含铌微合金钢碳氮化物析出行为研究的现状及发展[J]. 材料导报, 2010, 24(9): 84-87.

- [3] Picon C A, Fernandes F A P, Rodrigues C A D, *et al.* Study of pitting corrosion mechanisms in sea water of supermartensitic stainless steels microalloyed with Nb and Ti[J]. *Heat Treatment*, 2010, 25(1): 25-29.
- [4] Wang Xiaonan, Du Linxiu, Di Hongshuang. Study on fatigue property of new type hot-rolled nano precipitation strengthening ultra-high strength automobile strip[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(22): 27-33.
王晓南, 杜林秀, 邸洪双. 新型热轧纳米析出强化超高强汽车板的疲劳性能研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(22): 27-33.
- [5] Wu Huachun, Li Mingyao, Jiang Qi, *et al.* Survey study on development of automobile body sheet domestic and overseas[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(7): 254-256.
吴华春, 李名尧, 蒋 启, 等. 国内外汽车钢板的发展概况研究[J]. *机械设计与制造*, 2011(7): 254-256.
- [6] Dawes C T. *Laser welding: A practical guide*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 1992.
- [7] Sun Z, Ion J C. Laser-welding of dissimilar metal combinations[J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 30(17): 4205-4214.
- [8] Li Mingxing, Hu Zhihua, Chen Kai. The effect of shielding gas type on laser weldability of galvanized steel[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(6): 72-73.
李明星, 胡治华, 陈 凯. 保护气种类对镀锌板激光焊接性的影响[J]. *激光杂志*, 2006, 27(6): 72-73.
- [9] Yin Feng, Liu Hongwei, Tao Yongshun. The influence of shielding gas composition on GMAW in performance[J]. *Welding Digest of Machinery Manufacturing*, 2011(6): 37-40.
尹 丰, 刘洪伟, 陶永顺. 保护气体对实心焊丝气体保护焊性能的影响[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2011(6): 37-40.
- [10] Sathiya P, Jaleel M Y A. Influence of shielding gas mixtures on bead profile and microstructural characteristics of super austenitic stainless steel weldments by laser welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 54(5): 525-535.
- [11] Kah P, Martikainen J. Influence of shielding gases in the welding of metals[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(9): 1411-1421.
- [12] 刘会杰. *焊接冶金与焊接性*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 46-47.
- [13] Xiao Rongshi, Mei Hanhua, Zuo Tiechuan. Influence of assistant gases on the shielding thresholds of laser induced plasma during high power CO₂ laser penetration welding[J]. *Chinese J Lasers*, 1998, 25(11): 1045-1050.
肖荣诗, 梅汉华, 左铁钊. 辅助气体对 CO₂ 激光焊接光致等离子体屏蔽的影响[J]. *中国激光*, 1998, 25(11): 1045-1050.
- [14] Lee J L, Pan Y T. The formation of intragranular acicular ferrite in simulated heat-affected zone[J]. *ISIJ International*, 1995, 35(8): 1027-1031.
- [15] 郑超超, 王学敏, 李书瑞, 等. 夹杂物对低碳钢焊接热影响区组织性能的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(6): 662-671.
- [16] Mills A R, Thewlis G, Whiteman J A. Nature of inclusions in steel weld metals and their influence on formation of acicular ferrite[J]. *Materials Science and Technology*, 1987, 3(12): 1051-1061.
- [17] Yamamoto K, Hasegawa T, Takamura J. Effect of boron on intragranular ferrite formation in Ti-oxide bearing steels [J]. *ISIJ International*, 1996, 36(1): 80-86.
- [18] Yamada T, Terasak H, Komizo Y. Relation between inclusion surface and acicular ferrite in low carbon alloy steel weld [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(7): 1059-1062.
- [19] Pavlina E J, van Tyne C J. Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(6): 888-893.
- [20] 邹增大, 李亚江, 尹士科. *低合金调质高强度钢焊接及工程应用*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [21] Cong Dazhi, Zhang Xiaoning. Research on effect of acicular ferrite on properties of SA738Gr.B steel with submerged arc welding[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(21): 31-35.
丛大志, 张效宁. 针状铁素体对 SA738Gr.B 钢埋弧焊焊缝金属性能影响的研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(21): 31-35.