

X80 管线钢光纤激光-MAG 复合焊接打底层组织及性能

雷正龙¹ 檀财旺¹ 陈彦宾¹ 刘德健² 胡席远² 胡佩佩² 曾惠林³

¹ 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001
² 华中科技大学材料学院, 湖北 武汉 430074
³ 中国石油天然气管道科学研究院, 河北 廊坊 065000

摘要 采用光纤激光-熔化极活性气体保护焊(MAG)复合焊接进行 X80 管线钢 6 mm 厚根部的打底焊接, 以实现单面焊双面成形。对工艺规范参数优化后的焊接接头进行宏观成形分析和显微硬度、拉伸、冲击、弯曲等力学性能研究。在此基础上, 重点研究了激光-MAG 复合焊热循环对打底焊焊缝接头微观组织的影响。结果表明, 在优化的工艺参数范围内, 可获得成形良好、无缺陷的焊缝; 焊缝截面呈高脚杯状, 可分为电弧作用区和激光作用区; 电弧作用区的硬度高于激光作用区; 拉伸试样断裂于母材; 电弧作用区焊缝组织主要为针状铁素体和少量的先共析铁素体, 激光作用区焊缝组织主要为针状铁素体和贝氏体类型组织(上贝氏体+粒状贝氏体); 激光作用区和电弧作用区的热影响区组织差异不大, 但电弧作用区的过热区明显宽于激光作用区。

关键词 激光技术; 复合焊接; 微观组织; 针状铁素体; X80 管线钢

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0403002

Microstructure and Mechanical Properties of X80 Pipeline Steel Backing Welded Joint by Fiber Laser-MAG Hybrid Welding

Lei Zhenglong¹ Tan Caiwang¹ Chen Yanbin¹ Liu Dejian²
Hu Xiyuan² Hu Peipei² Zeng Huilin³

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

³ Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang, Hebei 065000, China

Abstract Fiber laser-metal active-gas welding (MAG) hybrid welding on 6-mm-thick root of X80 pipeline steel is carried out to attain one side welding both sides formation. Mechanical properties of welded joint in optimal parameters such as microhardness, tensile strength, impact toughness, and bending strength are studied. Based on this, the effect of thermal cycle caused by hybrid welding on welded joint is investigated. The results indicate that good appearance, defect free joint can be achieved in the optimized parameters, and the cross-section of welded joint exhibits feature of “goblet”, which can be divided into two parts: arc zone and laser zone. The microhardness in arc zone is higher than that in laser zone. Fracture of tensile test occurs in the base metal. The microstructures of weld in arc zone mainly consist of acicular ferrite and a small amount of proeutectoid ferrite. Whereas, The microstructures of weld in laser zone mainly compose of acicular ferrite and bainite-like (upper bainite and granular bainite). The difference in microstructure of heat affected zone (HAZ) between arc zone and laser zone is small, but the coarse zone in arc zone is obviously wider than that in laser zone.

Key words laser technique; hybrid welding; microstructure; acicular ferrite; X80 pipeline steel

OCIS codes 140.3390; 160.3900

收稿日期: 2012-10-22; 收到修改稿日期: 2012-12-02

作者简介: 雷正龙(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光复合加工基础与应用、特种材料激光加工以及激光焊接质量检测等方面的研究。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

1 引 言

为适应未来长输油气管线大口径、高压输送的发展需要, X80 高性能管线钢的研制和开发正日益受到重视, 并逐渐用于我国“西气东输”工程^[1]。在长输管道焊接施工中, 根焊工艺是制约施工效率的关键环节。现阶段国内管道焊接施工采用的根焊方法主要有焊条电弧焊根焊、表面张力熔滴过渡焊 (STT) 根焊、内焊机自动根焊、单面焊双面成形自动根焊以及背部衬垫强制成形自动根焊等^[2]。这些方法主要的缺点是弧焊熔深较浅, 焊接时根部钝边 (一般为 1~4 mm) 必须较小, 才能保证熔透, 这无形中增加了后续填充的工作量, 大大降低了焊接效率。

自 W. Steen 于 20 世纪 70 年代末提出激光电弧复合焊接技术以来, 因其更高的工艺稳定性, 易控制焊缝成形和接头性能, 更强的接头间隙桥接能力等优点受到广泛的关注^[3~8]。管道研究国际委员会 (PRCI) 认为管道焊接的下一代设备将是激光电弧复合焊系统, 未来的管道焊接主要利用复合激光焊接根部焊道, 然后采用传统的自动化气体保护焊进行填充和盖面焊^[9]。目前, 国内采用激光电弧复合焊接 X80 管线钢根部的研究尚未见报道。

本文对钝边 6 mm 厚的 X80 管道钢的根部进行

激光-MAG 复合焊接, 以实现打底焊的单面焊双面成形, 提高根部焊接效率, 并重点研究复合焊接打底焊接头的组织和力学性能。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

选择 X80 钢为实验材料, 试件尺寸为 300 mm × 80 mm × 18.4 mm, 开 Y 型坡口, 钝边 6 mm, 坡口角度 45°, 如图 1 所示, 其化学成分见表 1。填充焊丝采用 ϕ 1.2 mm 的 X80 钢专用焊丝, 牌号为 SC-91K2, 其化学成分见表 2。焊前用丙酮对试件进行清洗以除去坡口表面的油污和氧化层。

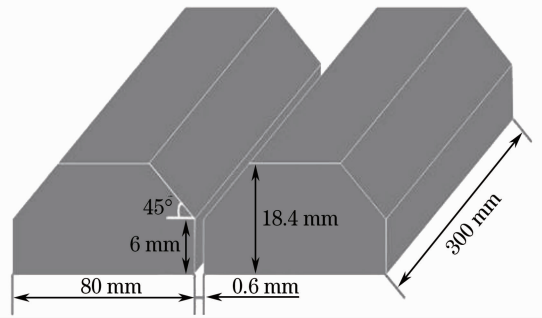


图 1 工件形状规格

Fig. 1 Dimension of experimental material

表 1 X80 管线钢化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical components of X80 pipeline steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cr	Nb	Cu
0.065	0.24	1.85	0.003	0.011	0.38	0.34	0.022	0.057	0.01

表 2 SC-91K2 焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical components of SC-91K2 filler wire (mass fraction, %)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo
0.04	0.35	1.25	0.013	0.012	1.55	0.09

2.2 实验过程

复合焊接实验系统包括 YLR-4000 型 4 kW 掺镱光纤激光器、福尼斯 TPS4000 型焊机、平面工作台及自制行走机构。复合焊接过程如图 2 所示, 只进行 X80 钢 6 mm 厚钝边的打底焊复合焊接。焊接过程中, 激光在前, 电弧在后, 焊接保护气体主要来自于 MAG 焊枪。对焊接工艺参数进行优化, 实验优化后的焊接参数为: 激光功率 3500~3800 W, 焊接电流 200~220 A, 混合气体 (Ar+18%CO₂) 流量 30 L/min, 激光束聚焦点位置距工件底部 5.0~6.0 mm, 光丝间距 2.0~3.0 mm, 焊枪倾角 60°, 焊接速度 1~1.4 m/min, 根部间隙 0.6~0.7 mm, 送丝速度与焊接电流相匹配。

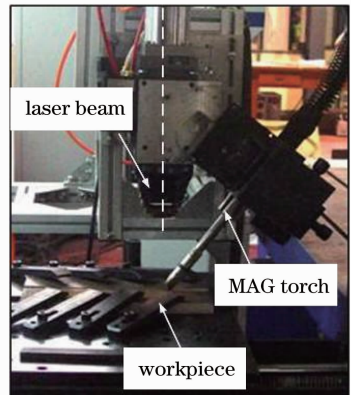


图 2 激光电弧复合焊接装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser-MAG hybrid process

2.3 组织及性能表征

焊后将根部以上母材铣去, 沿垂直于焊缝方向取样, 制备金相试样、以及拉伸、冲击和弯曲等组织和性能测试标准件。金相试样用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀, 使用金相显微镜 (OM) OLYMPUS 分析接头宏观和微观组织特征。在 INSTRON5500R 万能

电子拉伸机上测试焊接接头抗拉强度和弯曲性能,并用扫描电镜(SEM)S-3400N对拉伸断口进行扫描分析,确定接头断裂状态,在INSTRON Dynatup 9250HV落锤冲击试验机测试接头冲击性能,在HVS-1000Z型数显显微硬度计上测量接头不同部位硬度值。

3 实验结果

3.1 焊缝成形

图3(a)为典型复合焊接接头表面成形,焊缝过

程连续稳定,正面和背面成形良好,没有明显缺陷。在光学显微镜下观察其截面形貌,接头内部无裂纹、气孔、夹渣等焊接缺陷,通过分析发现其具有激光电弧复合作用下的典型焊缝成形形貌^[10,11],即接头整体呈“高脚杯”状,接头上半部分主要受到电弧作用,通过熔化焊丝填充金属,下半部分主要受到激光深熔作用。在1.2 m/min的焊接速度下,其焊缝熔深可达到8.5 mm,如图3(b)所示。为方便讨论,定义上半部分为电弧作用区,下半部分为激光作用区。

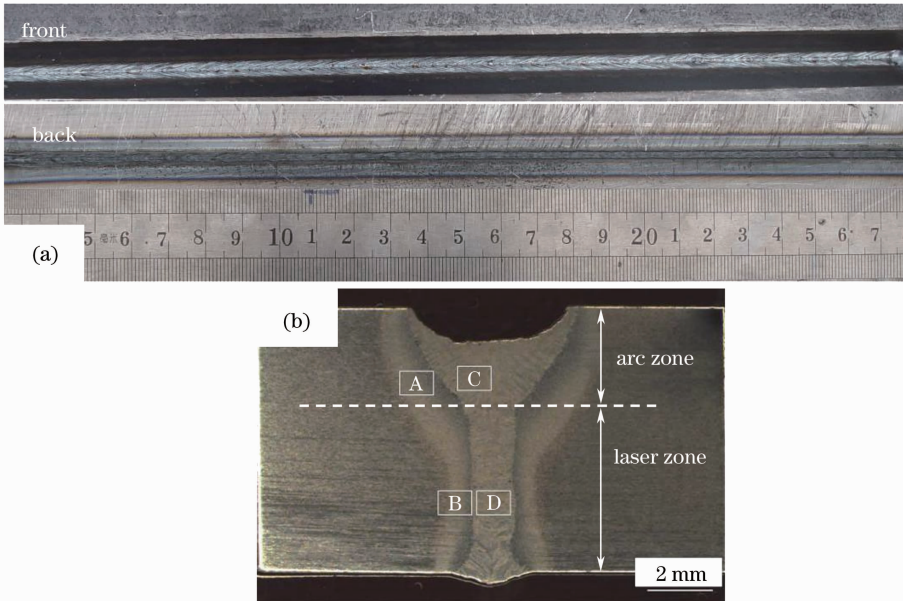


图3 激光-MAG复合焊宏观成形及截面。(a)宏观成形;(b)截面形貌

Fig. 3 Macro-appearance and cross-section of laser-MAG welded joint. (a) Macro forming; (b) cross-section view

3.2 抗拉强度

对复合焊接接头进行拉伸实验。拉伸实验结果表明,拉伸试件均断于母材[见图4(a)],表明在上述工艺参数条件下,焊缝抗拉强度高于母材。拉伸过程中,母材断裂处具有明显的“颈缩”现象。表3为

复合焊接接头的拉伸实验结果,可以看出,焊接接头的抗拉强度平均值为809.7 MPa。图4(b)为拉伸断口微观形貌,从图中可知,断口呈韧窝状特征,为典型的韧性断裂。因此,激光复合焊接X80管线钢打底层具有良好的焊接强度。

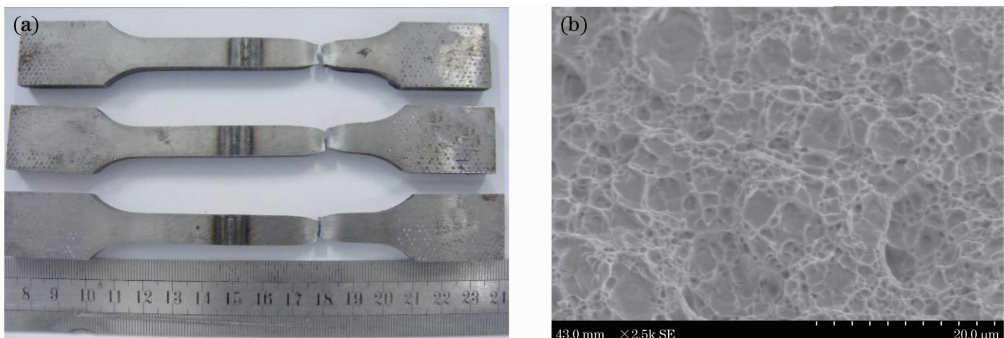


图4 试件断裂宏观及断口微观形貌。(a)断裂位置;(b)断口形貌

Fig. 4 Fracture appearance and morphology of samples. (a) Fracture location; (b) fracture morphology

表 3 拉伸实验结果

Table 3 Results of tensile test

No.	1	2	3	Av.
σ_b /MPa	805.0	815.0	809.1	809.7

3.3 冲击性能

表 4 为焊缝和熔合线附近室温冲击试验结果,由实验结果可以看出,焊缝和熔合线附近冲击功的平均值为 107.4 J 和 106.7 J,与传统焊接方法得到

的接头冲击性能相比有所下降。但从 SEM 形貌来看,断口仍为韧性断裂,如图 5(b)所示。

表 4 冲击试验结果

Table 4 Results of impact test

No.	1	2	3	Av.
Weld energy /J	100	112	110	107.4
Fusion line energy /J	110	90	120	106.7

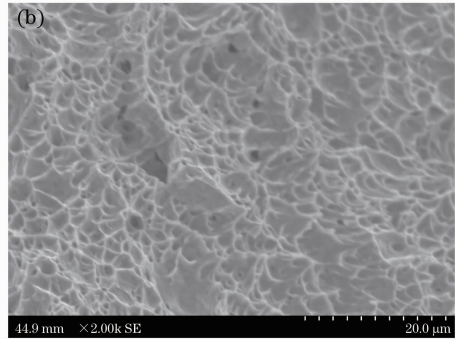
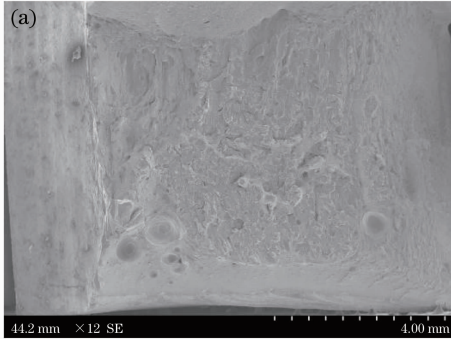


图 5 冲击断口表面和 SEM 形貌。(a)断口表面;(b) SEM 形貌

Fig. 5 Fracture and SEM morphology of impact test. (a) Fracture surface; (b) SEM of fracture morphology

3.4 显微硬度

图 6 为复合焊接接头显微硬度分布曲线。由图 6 可知,电弧作用区的硬度普遍高于激光作用区。电弧作用区中,热影响区(HAZ)硬度要略高于焊缝硬度,而激光作用区的焊缝硬度要高于 HAZ 硬度,这和两区域受到不同热循环后的组织有关。

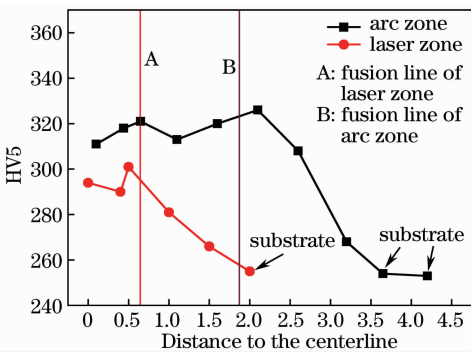


图 6 焊接接头显微硬度分布曲线

Fig. 6 Microhardness distribution curves of welded joint

3.5 弯曲性能

弯曲实验用来检验材料在弯曲负荷作用下板材表面裂纹程度,评定材料的弯曲强度和变形的大小。激光-MAG 复合焊接 6 mm 钝边 X80 管线钢弯曲实验结果如图 7 所示。研究表明,复合焊接打底层弯曲结果都表现良好,无任何裂纹产生。

综上,光纤激光-MAG 复合焊接 X80 钢打底层,在提高焊接效率的同时,具有很好的综合性能,这保证了打底焊接的质量,为后续填充和盖面焊以

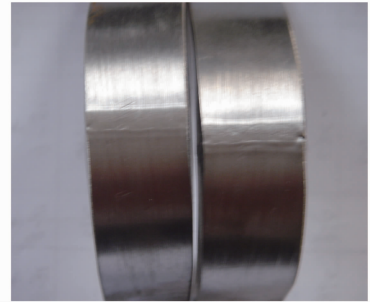


图 7 弯曲实验结果

Fig. 7 Results of bending test

及整个接头性能都奠定了很好的基础。

3.6 微观组织

对于 X80 钢而言,它的主要组成相为铁素体相,在光纤激光-MAG 复合焊接时,不同的位置经历不同的热循环,铁素体相与碳化物相以不同的方式和成分相结合,最终会形成不同的组织。复合焊接打底层具有上述良好的综合性能必定与其组织密切相关,因此,有必要对其组织进行研究。如图 3(b)所示,选取 A、B 区域考察电弧作用区和激光作用区的热影响区组织,选取 C、D 区域考察电弧作用区和激光作用区的焊缝组织。

3.6.1 母 材

图 8 为母材的金相组织形貌,母材组织主要为细小的针状铁素体,其特征为细小的非等轴铁素体基体上分布着碳化物微粒和 M-A 组元,铁素体片彼此咬合,交错分布^[12]。

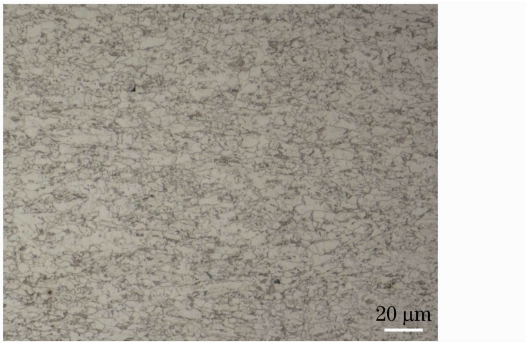


图 8 母材微观组织

Fig. 8 Microstructure of base metal

3.6.2 热影响区组织

图 9 为激光复合焊热影响区(HAZ)不同区域的微观形貌。电弧作用区的热影响区(A区)宽度要略大于激光作用区(B区)。分析认为,A区主要受到电弧加热,电弧加热后工件的冷却速度要比激光加热工件的冷却速度慢,同时由于焊接过程中激光在前,相当于对工件整体进行预热,这使得后面电弧加热的冷却时间更长;B区由于焊接时激光在前,单一热源作用在工件根部,较短时间内快速冷却,最终形成了图中热影响区形貌。

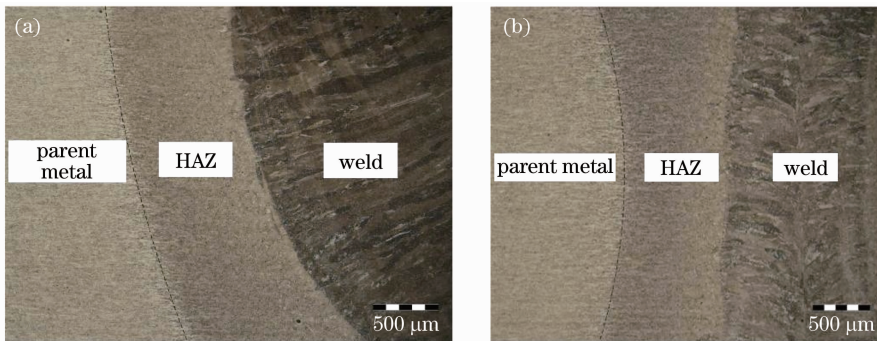


图 9 热影响区形貌。(a)电弧作用区(A区);(b)激光作用区(B区)

Fig. 9 Appearance of HAZ. (a) arc zone (A zone); (b) laser zone (B zone)

进一步对 A 区组织进行分析,发现不完全重结晶区约为 $100\sim 150\ \mu\text{m}$,组织主要为白色的块状铁素体,沿焊前母材轧制方向生长,如图 10(a)所示。由于焊接时加热到两相区,一部分铁素体完全熔入到奥氏体中,在随后的冷却过程中形成了珠光体,而剩下未熔的铁素体成为粗大的铁素体组织。图 10(b)为完全重结晶区的组织形貌,主要由细晶铁素体组

成,在铁素体晶界处存在少量的珠光体类型的组织。它在整个热影响区中所占区域最大,很好地改善了接头组织性能。过热区组织如图 10(c)所示,原奥氏体晶界清晰可见,主要由浅色的贝氏体类型组织和深色的板条状马氏体组织混合组成。贝氏体类型组织的存在改善了过热区单一马氏体的过硬性特点,提高了韧性。



图 10 热影响区组织形貌(A区)。(a)不完全重结晶区;(b)细晶区;(c)过热区

Fig. 10 Microstructure of HAZ (A zone). (a) Incomplete recrystallization zone; (b) fine-grained zone; (c) coarse-grained zone

已有的研究表明^[1],热影响区粗晶区是 X80 管线钢焊接热影响区中冲击韧性较差的区域。图 11 为激光电弧复合焊接接头 A 区和 B 区的过热区。B 区的过热区仅为 $80\ \mu\text{m}$ 左右,而 A 区最大也只有 $200\ \mu\text{m}$,且均由上述细小的板条马氏体和少量贝氏

体类型组织组成,这种特征大大削弱了粗晶区对接头性能存在的不利影响,改善了热影响区的综合性能,减少了裂纹的产生,这也是接头断裂于母材和弯曲性能良好的重要原因。

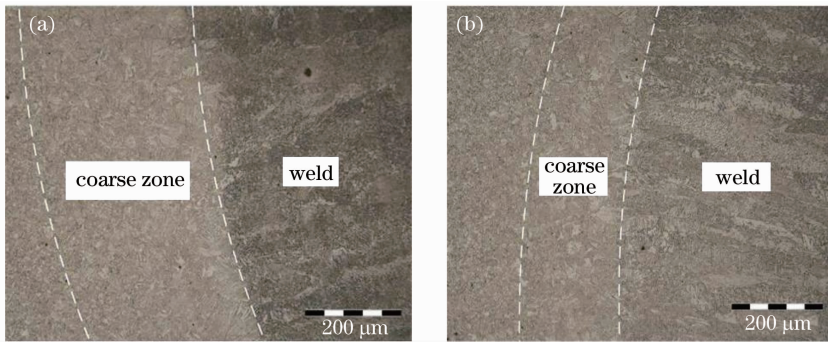


图 11 粗晶区形貌。(a)电弧区(A区);(b)激光区(B区)

Fig. 11 Appearance of coarse-grained zone. (a) Arc zone (A zone); (b) laser zone (B zone)

3.6.3 焊缝组织

图 12 分别为电弧作用区(C区)和激光作用区(D区)的焊缝形貌。图中清晰地显示了焊缝内枝晶形态,组织沿焊缝中心线垂直熔合线对称生长,呈树枝状结晶。从中可以看出,电弧作用区和激光作用区生长方向不同,电弧作用区向上,激光作用区向下。这种结晶形态和它的散热方向有很大关系,即熔池里的金属首先在母材上形核,晶核形成以后,就以这些新生的晶核为核心,不断向焊缝中生长,当晶体最易长大方向与散热最快方向相一致时,最有利于晶粒长大,即沿温度梯度最大的方向朝向焊缝中

心生长,形成粗大的柱状晶体。电弧作用区和激光作用区因散热最快方向的差异,导致生长方向不同。

电弧作用区由于同时受到激光和电弧的共同热作用,温度梯度明显降低^[11],这意味着更多的热量积聚在此区,在同等条件下,该区域熔池散热速度较慢,在高温区(AC_3 以上)的停留时间更长,从而在冷却过程中熔池壁上形成的晶核有足够的时间向中心生长并形成粗大枝晶。由于电弧作用区和激光作用区在热循环存在着差异,两者的焊缝组织存在明显的不同。

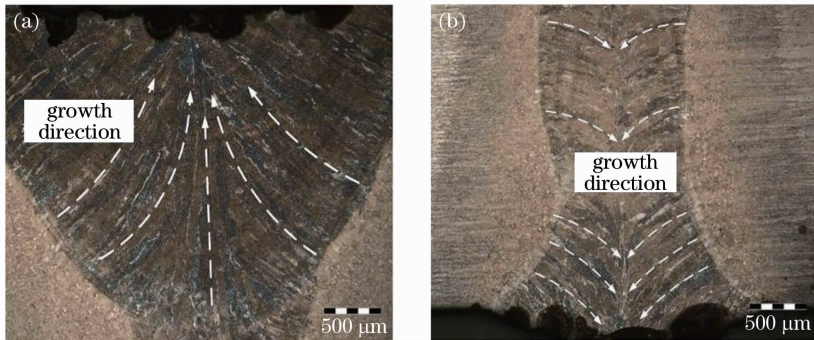


图 12 复合焊缝特征。(a)电弧区焊缝形貌;(b)激光区焊缝形貌

Fig. 12 Appearance of weld bead. (a) Appearance of arc zone; (b) appearance of laser zone

图 13 为电弧作用区和激光作用区的焊缝组织形貌。电弧作用区焊缝组织(C区)主要为针状铁素体(AF),在原奥氏体晶界内以针状分布,而在奥氏体晶界上主要是呈细条状分布的先共析铁素体(PF),它首先从奥氏体晶界中析出(转变温度 $770\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$),由于高温停留时间较长,冷却较慢,所以析出了一定量的先共析铁素体。焊缝中的针状铁素体可以使得该焊缝金属的强度、韧性、抗解离能力以及抗应力腐蚀和抗氢脆能力得到提高,使焊缝具有较好的综合性能。激光作用区焊缝组织(D区)比较复杂,主要为针状铁素体、沿奥氏体晶界析出呈羽毛状的上贝氏体和粒状贝氏体。其中粒状贝氏体的特征是在块状铁素

体(白色)上弥散分布着岛状和短杆状的 M-A 组元或者一些富碳奥氏体的分解物,这些弥散的物质无论是 M-A 组元还是富碳奥氏体的分解产物都可以起到复相强化作用,具有较好的强韧性。

虽然电弧作用区和激光作用区的焊缝中都存在针状铁素体,但激光作用区明显少于电弧作用区。分析认为,电弧作用区冷却较慢,在针状铁素体形成的温度($500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近)能停留更长时间,所以生成较多,而激光作用区更多的则是贝氏体类型组织,根据连续冷却转变曲线(CCT)图^[13],当冷却速度快到一定程度时,便生成了贝氏体组织,而抑制了先共析铁素体的形成。由于激光作用区冷却过程比较复杂,

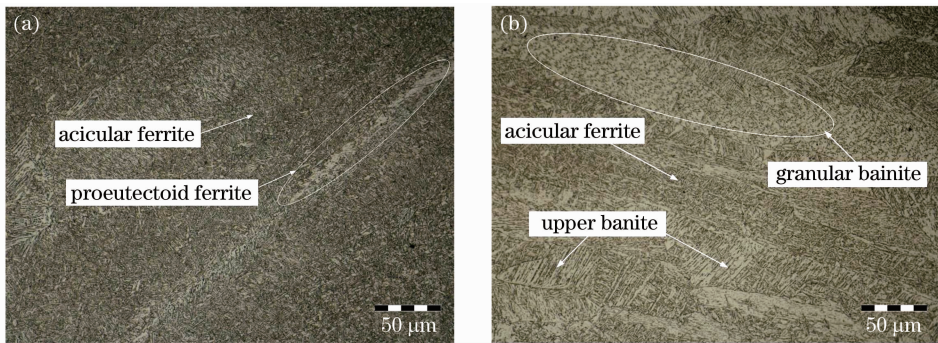


图 13 复合焊缝组织形貌。(a)电弧作用区焊缝组织(C区);(b)激光作用区焊缝组织(D区)

Fig. 13 Microstructure of hybrid weld. (a) Microstructure of weld in arc zone (C zone); (b) microstructure of weld in laser zone (D zone)

焊缝内各区域冷却速度不尽相同,最终形成了多种贝氏体类型组织。

综上,光纤-MAG 复合焊接 X80 管线钢打底层,由于热输入小,加热冷却时间短,得到了上述组织,为打底层的性能提供了保障,也为后续填充和盖面层的焊接奠定了基础。

4 结 论

1) 在优化的工艺参数下,激光-MAG 复合焊接 X80 钢能够得到外观和内部成形均良好的焊接接头,接头综合性能良好,拉伸断裂于母材,获得了可靠的根部打底焊连接。

2) 复合接头细晶区域在 HAZ 中所占比例最大,粗晶区域比例最小,从电弧作用区至激光作用区其范围为 80~200 μm,这两区域相互结合,成为提高接头综合性能的关键因素。

3) 复合焊中激光和电弧作用区的焊缝组织差异较大。电弧作用区主要为针状铁素体和少量的先共析铁素体;激光作用区主要为针状铁素体和贝氏体类型组织(上贝氏体+粒状贝氏体),电弧作用区的针状铁素体明显多于激光作用区。

参 考 文 献

- Chen Yanqing, Du Zeyu, Xu Lianghong. Organization and performance analysis of the heat-affected zone of X80 pipeline steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(5): 101~104
陈延清, 杜则裕, 许良红. X80 管线钢焊接热影响区组织和性能分析[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(5): 101~104
- Qian Bainian, Guo Xuming, Li Jingli. Welding test of X80 high strength pipeline steel[J]. *Welding and Joining*, 2002, (8): 14~17
钱百年, 国旭明, 李晶丽. 高强度管线钢 X80 的焊接研究[J]. *焊接*, 2002, (8): 14~17

- W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. *Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- Hu Lianhai, Huang Jian, Ni Huiheng. CO₂ laser hybrid welding processes and microstructures of 10Ni3CrMoV steel in T joint form[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0303003
胡连海, 黄 坚, 倪慧峰. 10Ni3CrMoV 钢 T 型接头 CO₂ 激光复合焊工艺与组织[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0303003
- Hu Lianhai, Huang Jian, Li Zhuguo. Microstructure and properties of high power CO₂ laser welded pipeline steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3174~3178
胡连海, 黄 坚, 李铸国. 高功率 CO₂ 激光焊接管线钢接头的组织与性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3174~3178
- Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Song Guoxiang. Weld appearance of CO₂ laser-gas metal arc hybrid welding for ultra-low carbon bainitic steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3068~3073
雷正龙, 陈彦宾, 宋国祥. 超低碳贝氏体钢 CO₂ 激光-气体金属弧焊复合焊接成形特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3068~3073
- S. Webster, J. K. Kristensen, D. Petring. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2008, **35**(7): 496~504
- Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1680~1685
- Li Xiaona. Practical applications for hybrid laser welding[J]. *Modern Welding Technology*, 2008, (8): 28~31
李晓娜. 复合激光焊的实际应用[J]. *现代焊接*, 2008, (8): 28~31
- Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu *et al.*. Effects of heat sources arrangement on weld shape of laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 279~283
高 明, 曾晓雁, 胡乾午 等. 热源空间位置对激光-电弧复合焊接焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 279~283
- Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Yan Jun *et al.*. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel[J]. *Applied Surface Science*, 2008, **254**(18): 5715~5721
- Zhao Mingchun, Xiao Furen, Shan Yiyin. Microstructural characteristic and toughening of an ultralow carbon acicular ferrite pipeline steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, **38**(3): 283~287
赵明纯, 肖福仁, 单以银. 超低碳针状铁素体管线钢的显微特征及强韧性行为[J]. *金属学报*, 2002, **38**(3): 283~287
- Zhang Wenyue. *Welding Metallurgy* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 134~200
张文钺. *焊接冶金学原理* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 134~200