

· 组织和性能 ·

焊接参数对超细晶粒钢 SS400 焊接接头组织和硬度的影响

陆恒昌¹ 冯岩² 麻永林¹ 邢淑清¹ 陈重毅¹ 马魁¹

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 包钢钢联股份有限公司无缝钢管厂, 包头 014010)

摘要 分别采用 J442 (/% : ≤0.12C, 0.3~0.6Mn)、J506 (/% : ≤0.12C, ≤1.6Mn) 和 J507 (/% : ≤0.12C, ≤1.25Mn) 焊条对 7 mm SS400 钢板 (/% : 0.18C, 0.04Si, 0.43Mn, 0.022Al, 0.002Ca) 在热输入 6~14 kJ/cm 下进行手工电弧焊实验, 并通过光学显微镜和显微硬度计观察和测试焊接接头的组织和硬度。结果表明, 随焊条合金元素含量的增加, 焊缝组织中针状铁素体量增加, 当热输入 ≤10 kJ/cm 时, 焊接热影响区粗晶尺寸变化不大, 当热输入大于 10 kJ/cm 时, 粗晶尺寸明显增大; 不同焊接工艺焊接接头的显微硬度均高于母材的显微硬度, 没有接头软化现象。

关键词 超细晶粒钢 SS400 焊接接头 热输入 组织 硬度

Effect of Welding Parameters on Structure and Hardness of Welded Joint of Ultra-Fine-Grained Steel SS400

Lu Hengchang¹, Feng Yan², Ma Yonglin¹, Xing Shuqing¹, Chen Zhongyi¹ and Ma Kui¹

(1 School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010; 2 Seamless Pipe Plant, Steel Union Co Ltd, Baotou Steel, Baotou 014010)

Abstract The manual welding on 7 mm plate of ultra-fine-grained steel SS400 (/% : 0.18C, 0.04Si, 0.43Mn, 0.022Al, 0.002Ca) has been carried out by using J442 (/% : ≤0.12C, 0.3~0.6Mn), J506 (/% : ≤0.12C, 1.6Mn) and J507 (/% : ≤0.12C, ≤1.25Mn) welding rod with heat input 6~14 kJ/cm, and the structure and microhardness of welded joint are observed and measured by optical microscope and microhardness tester. Results show that with increasing alloy element content in welding rod, the amount of acicular ferrite in welded zone increases; as heat input ≤10 kJ/cm, the change of size of coarse grain in heat affected zone is minor, and as heat input is larger than 10 kJ/cm, the size of coarse grain in heat affected zone increases obviously; the microhardness of welded joint with different welding process is all higher than the microhardness of base metal, there is no soften zone in welded joint.

Material Index Ultra-fine-grained Steel, SS400, Welded Joint, Heat Input, Structure, Hardness

晶粒超细化因能同时实现强韧化、节约合金资源等优点而成为新一代钢铁材料的核心特征^[1]; 目前广泛应用的 400 MPa 级超细晶粒钢 SS400 是在 Q235 基础上进行细化晶粒和净化处理来提高强度的钢铁材料, 其强度和寿命比原同类钢种提高一倍。虽然因为晶粒细小而同时实现强韧化, 但由于不存在第 II 相粒子对晶粒长大钉扎作用, 其长大驱动力却随之变大, 热稳定性变差; 超细晶粒钢经过焊接后, 热影响区的晶粒长大趋势明显, 晶粒的粗化将损害热影响区 (HAZ) 的性能而易造成冷裂倾向增加和韧性损失, 从而使焊接接头不再具有母材的许多优异性能, 因此超细晶粒钢的焊接性成为最为关注的课题之一^[2,4]。针对 7 mm 厚度的 SS400 钢板采用手工电弧焊 (SMAW) 的方法在不同的焊接参数条件下进行焊接试验, 研究其焊接接头组织和硬度以及分布规律和特征, 以期作为基础数据对此类钢

种焊接工艺进行优化。

1 实验材料与方法

实验材料为 7 mm 厚的 SS400 细晶粒钢, 其化学成分及性能见表 1。

将 6 块规格 (mm) 300 × 150 × 7 的实验试板加工成 60° 坡口, 坡口采用机械加工, 不留钝边, 焊前对坡口进行除锈除油处理; 3 组试板 (两两对接) 分别采用 J422 (Φ3.2), J506 (Φ3.2) 和 J507 (Φ4) 焊条进行手工平板双道次焊接, 焊机型号为 ZX5-630, 采用直流正接。焊条材料和焊接参数见表 2 和表 3 所示。

焊后沿试板横截面切割制备焊接接头金相试样, 经磨制抛光后采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀, 采用 ZEISS 光学显微镜观察金相组织; 采用 HX-1000TM/LCD 型显微硬度计分别测试第 1 层和第 2 层焊缝的显微硬度值, 实验载荷为 1.961 N, 加载时间 15 s。

表 1 SS400 钢化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Steel SS400

成分/%								强度/MPa	
C	Si	Mn	P	S	Als	Alt	Ca	屈服	抗拉
0.18	0.04	0.43	0.016	0.002	0.022	0.022	0.001 7	340	485

表 2 焊条材料成分及性能

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of welding rod

焊条牌号 (型号)	药皮 类型	成分/%					强度/MPa	
		C	Mn	Si	S	P	屈服	抗拉
J422(E4303)	钛钙型	≤0.12	0.3~0.6	≤0.25	≤0.035	≤0.040	≥330	≥420
J506(E5016)	低氢钾型	≤0.12	≤1.6	≤0.75	≤0.035	≤0.040	≥400	≥490
J507(E5015)	低氢钠型	≤0.12	≤1.25	≤0.75	≤0.035	≤0.040	≥400	≥490

表 3 焊接参数

Table 3 Welding parameters

试板 编号	焊条 牌号	道次	电流(I)/ A	电压(U)/ V	焊速(v)/ (mm·s ⁻¹)	热输入(Q)/ (kJ·cm ⁻¹)
1 [#]	J422	1 ^h	140~160	25~30	4	7~9
		2 ^h	140~160	30~35	4	8~10
2 [#]	J506	1 ^h	120~140	25~30	4	6~8
		2 ^h	140~160	25~30	4	7~9
3 [#]	J507	1 ^h	160~180	25~30	3	10~14
		2 ^h	160~180	25~30	3	10~14

注: $Q = UI\eta/v, \eta = 0.77$

2 结果与分析

2.1 焊缝区与熔合区显微组织特征

如图 1(a₁, b₁, c₁) 所示, 在双层焊接实验过程中, 第一层焊缝经受了两次热循环作用, 第二层对第一层具有热处理的作用, 原柱状晶重新结晶而受到破坏, 之后得到的组织形态因焊接条件不同而异。由图 1(a₁, b₁) 可以看出, 当第二层焊接热输入为 7~10 kJ/cm 时, 1[#] 和 2[#] 试板的第一层焊缝经再热循环作用后得到尺寸均匀细小的晶粒, 其组织为铁素体和少量珠光体, 这种细晶粒组织与原始母材组织较为接近; 而当 3[#] 试板的第二层热输入大于 10 kJ/cm 时, 熔深比较大, 第一层焊缝大部分又被重新加热到熔融/半熔融态, 得到的是细针状铁素体组织, 如图 1(c₁) 所示, 与 1[#] 和 2[#] 试板有明显的差别。

在不同焊接工艺条件下, 第一层焊道熔合区晶粒过渡也有一定差异: 其中 1[#] 试板熔合区的铁素体组织晶粒尺寸比焊缝区的稍大, 原粗晶区晶粒仍然较为粗大; 相比之下, 2[#] 试板熔合区与焊缝组织晶粒大小较为均匀, 与粗晶区晶粒过渡较好, 这将使得焊缝和热影响区的性能连续性更好, 从而将使整个焊接接头的力学性能加以改善。而 3[#] 试板所得到的焊接熔合线两侧的晶粒不均匀性更为明显, 其焊缝一侧得到的是细长针状铁素体组织, 热影响区一侧

的晶粒有相对粗大的铁素体片条, 这是由于在相对较大的热输入条件下, 高温停留时间长而使原子扩散能力增强, 原粗晶区的晶界铁素体和其晶粒内的针状铁素体同时得到了长大, 造成组织形貌和晶粒尺寸的不连续。

在 SS400 钢双层焊接过程中, 第二层焊缝熔融金属不仅以坡口处被加热到半融化状态的母材金属晶粒表面作为非自发形核的地点, 而且还依附于上一层焊缝表面晶粒形核, 在较大的成分过冷条件下, 在熔合区交

互结晶以柱状晶的形态向焊缝中心成长, 如图 1(a₂, b₂, c₂) 所示, 同时可以看出, 不同焊接条件下的 3 块试板得到的焊缝组织均为针状铁素体、晶界铁素体和侧板条铁素体, 区别在于针状铁素体数量的不同: 由于 J422 的合金含量比 J506 和 J507 的要低, 故而 1[#] 试板晶内生成针状铁素体的量明显较少, 如图 1(a₂) 所示; 随 J506 和 J507 合金含量的提高, 在焊缝熔融金属凝固结晶过程中, 得到数量较多的在原奥氏体晶粒内以非金属夹杂物为形核中心生成的针状铁素体^[5-6], 如图 1(b₂, c₂) 所示。

2.2 粗晶区显微组织特征

因 SS400 钢合金含量较低, 粗晶在长大的过程中将缺乏第二相粒子的钉扎作用, 由图 1(a₃, b₃, c₃) 可以看出, 在不同的焊接热输入下, 粗晶区晶粒均严重长大, 且晶粒尺寸随热输入的增加而增大, 当热输入低于 10 kJ/cm 时, 1[#] 和 2[#] 试板得到的粗晶尺寸基本相当, 如图 1(a₃, b₃) 所示; 当热输入大于 10 kJ/cm 时, 3[#] 试板的粗晶尺寸明显增大, 如图 1(c₃) 所示; 3 个不同工艺得到的热影响区组织均以珠光体、先共析铁素体为主, 先共析铁素体沿原奥氏体晶界析出呈条状析出, 也有呈块状分布; 同时因受过热影响, 晶界处的先共析铁素体向晶内一侧生长出长短不一的针状或条状铁素体, 铁素体间是珠光体, 这种组织形态即所谓的魏氏组织^[7-10]。

2.3 显微硬度分布规律

实验显微硬度测试结果如图 2 所示, 曲线编号对应表 3 中相应的焊接试板编号。

对于第一层焊接接头的硬度分布情况, 由图 2(a) 可以看出, 1[#] 和 2[#] 实验试板的焊缝区, 热影响区和母材显微硬度值在 150~185 HV 变化, 硬度分布曲线走势相对平缓, 体现出性能连续性, 而 3[#] 试板得到的显微硬度曲线波动幅度相对要大; 由于组

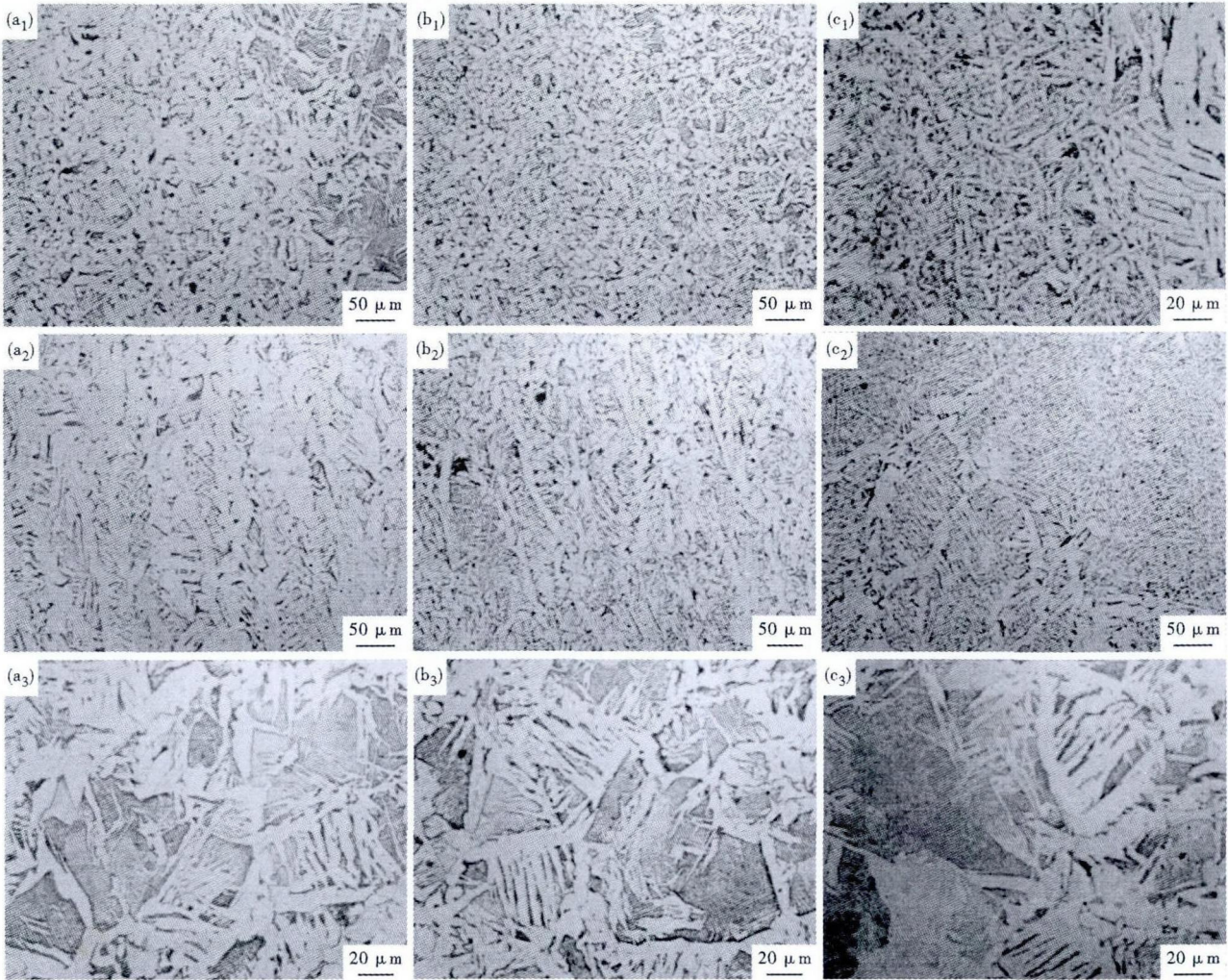


图1 第一层焊缝及熔合区(a₁, b₁, c₁), 一二层焊缝交界区(a₂, b₂, c₂)和粗晶区(a₃, b₃, c₃)的组织形貌:(a₁)(a₂)(a₃)1# J422, 7~10 kJ/cm; (b₁)(b₂)(b₃)2# J506, 6~9 kJ/cm; (c₁)(c₂)(c₃)3# J507, 10~14 kJ/cm

Fig. 1 Morphology of structure in first welded layer welding zone and fusion line (a₁, b₁, c₁), juncture area between first welded layer and second welded layer (a₂, b₂, c₂) and coarse-grained heat affected zone (a₃, b₃, c₃); (a₁)(a₂)(a₃) 1# J422, 7~10 kJ/cm; (b₁)(b₂)(b₃) 2# J506, 6~9 kJ/cm; (c₁)(c₂)(c₃) 3# J507, 10~14 kJ/cm

织及晶粒尺寸的不均匀性,3#试板焊缝区密集细小的针状铁素体组织产生较高的硬度值,最高硬度值达205 HV,熔合区长大的粒界铁素体组织造成硬度的下降,而粗晶区的珠光体组织又使硬度值增加,热影响区最高硬度值为194 HV;1#和2#试板热影响区最高硬度分别为172 HV和162 HV。

对第二层焊缝而言,每个焊接工艺条件的显微硬度曲线呈类似的规律性变化,如图2(b)可以看出,其焊缝区硬度分布较一致,粗晶区达到硬度最高峰,其中1#试板热影响区最高硬度为189 HV,2#试板可达到211 HV,3#试板为207 HV;熔合线处出现较低的硬度值,越靠近母材,硬度曲线呈下降趋势并逐渐平缓。另外由于1#试板所使用的J422焊条合金成分比2#和3#使用的J506和J507要低,且强度

级别略低于母材强度,而J506和J507强度要高于母材强度,因此1#试板的焊缝硬度分布处于相对低的水平,但由于焊接过程中有药皮参与的复杂冶金反应,使得1#试板接头硬度并不低于母材硬度。

比较第一层的硬度曲线可以看出,焊接再热作用程度的不同对硬度的影响起到不同的效果;当第二层热输入为7~9 kJ/cm时,2#试板热影响区最高硬度从211 HV降到162 HV,下降幅度最大,第二层热输入为8~10 kJ/cm时,热影响区最高硬度值也有一定下降,而当第二层热输入超过10 kJ/cm时,3#试板热影响区最高硬度值几乎没有变化;同时对于3#试板,由于使用的J507焊条合金含量较多,且第一层在较高的再热作用下,焊缝区形成的针状铁素体依然大量存在,因此硬度值处在较高水平,甚至超过

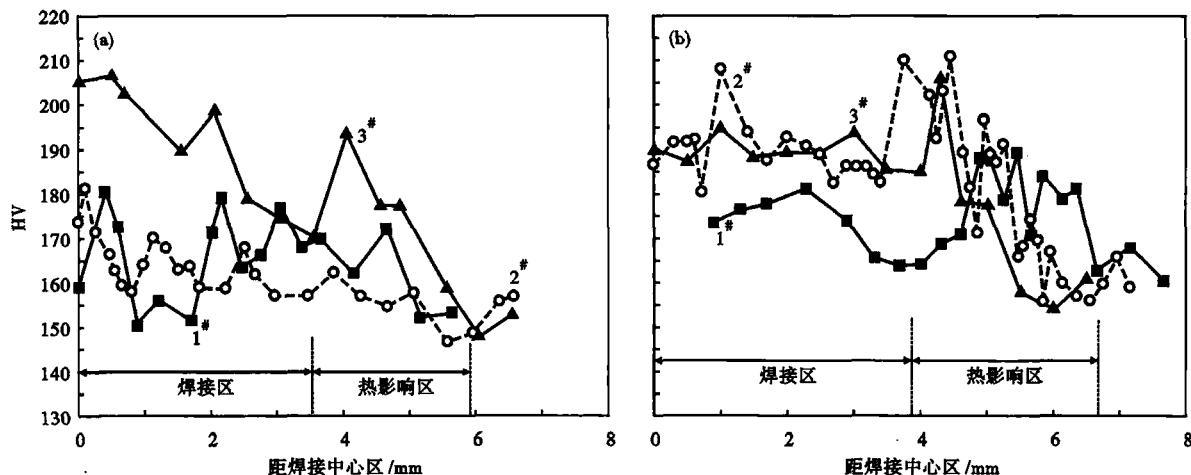


图 2 不同焊接参数的焊接接头显微硬度分布(a)第一层;(b)第二层

Fig. 2 Distribution of microhardness on first layer (a) and second layer (b) in welded joint with different welding parameters

热影响区的最高硬度。

总体而言,由于组织和晶粒尺寸的差异和焊接熔池凝固过程中溶质分配的不均匀,使焊接接头显微硬度曲线呈现出一定的波动性,但在不同的焊接工艺条件下,由于采用强度与母材相当甚至高于母材的焊接材料,加之焊接过程中有药皮参与的复杂冶金过程,使所得到的接头硬度值均不小于母材的硬度,没有出现相对于母材的软化区,该结果与田志凌^[3]等对该强度级别的钢进行 MAG 焊接实验结果相符,即焊接热影响区晶粒严重粗化,但不存在软化现象。

3 结论

(1)在使用 J422、J506 和 J507 焊条焊接及不同的热输入条件下所得到的焊缝均呈树枝状晶沿焊缝中心长大,焊缝组织为粒界铁素体、针状铁素体及少量的珠光体组织,针状铁素体量随焊条合金量增加而增多;焊缝第一层受第二层再热作用而使得柱状晶受到破坏。

(2)在不同工艺条件下,焊接热影响区组织主要为先共析铁素体和珠光体,而且均出现魏氏组织;晶粒均严重长大,当热输入小于 10 kJ/cm 时,粗晶尺寸变化不大;当热输入大于 10 kJ/cm 时,粗晶尺寸明显增大。

(3)在不同焊接工艺条件下,第二层焊道热影响区及焊缝硬度处在相对较高水平,熔合区硬度相对较低;第一层焊缝受再热作用的程度对硬度变化有重要影响,当第二层热输入小于 10 kJ/cm 时,第一层的硬度分布曲线较为均匀,且热影响区最高硬度值有所下降,而当第二层热输入大于 10 kJ/cm 时,热影响区最高硬度值变化很小,且硬度分布梯度仍然较大;所有焊接接头的整体硬度值均不低于母材,未出现软化现象。

国家“高档数控机床与基础制造装备”重大专项 05 子课题资助(2009ZX04014-064-05)

参考文献

- [1] 雷毅,余圣甫,许晓峰.我国微米级超细晶粒钢焊接技术的研究现状[J].兵器材料科学与工程,2005,2(3):44-47.
- [2] 屈朝霞,田志凌,何长红,等.超细晶粒钢及其焊接性[J].钢铁,2000,35(2):70-73.
- [3] 田志凌,何长红,张晓牧.400 MPa 级超细晶粒钢的焊接[J].焊接学报,2001,22(6):1-3.
- [4] 张贵锋,苗慧霞,张建勋.焊后多次正火对超细晶粒钢热影响区组织与硬度的影响[J].西安交通大学学报,2008,42(1):90-93.
- [5] 赵玉珍,李璧,史耀武.超级钢焊接接头粗晶区的精细结构[J].金属学报,2003,39(5):505-509.
- [6] 张德勤,雷毅,刘志毅.微合金钢焊缝金属中的针状铁素体[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(4):141-145.
- [7] Régis Blondeau. Metallurgy and Mechanics of Welding (Processes and Industrial Applications) [M]. John Wiley & Sons Inc, 2008: 102-107.
- [8] Lambert-Perlade A, Gourgues A F, Pineau A. Austenite to Bainite Phase Transformation in the Heat-affected Zone of a High Strength Low Alloy Steel [J]. Acta Materialia, 2004, 52(8): 2337-2348.
- [9] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理) [M]. 北京:机械工业出版社, 1996:134-138.
- [10] 崔忠圻. 金属学与热处理(第2版) [M]. 北京:机械工业出版社, 2007:260-263.

陆恒昌(1986-),男,硕士研究生(内蒙古科技大学),低合金钢焊接工艺及焊接数值模拟研究。

收稿日期:2013-04-03