

HG70 钢的焊接性分析

盛光敏¹, 高长益²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 武汉钢铁公司, 武汉 430080)



盛光敏

摘 要: 从焊接结合性能和焊接使用性能两方面对 HG70 钢的焊接性进行了系统地研究。在拘束焊接条件下, 采用 E6015—D1 型焊条, 试验钢板的冷裂纹率为零, 说明焊接结合性能良好。焊接接头的拉伸、硬度和冲击韧性试验结果表明, 粗晶区的硬度高而韧性低, 回火区的强度低, 细晶区具有良好的综合力学性能。微观组织分析结果表明, 焊接接头形成了马氏体、粒状贝氏体、粒状组织等多种形态的组织。结合组织特点及其分布, 对焊接接头的力学性能进行了讨论。

关键词: 贝氏体钢; 焊接性; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG406 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2004)03—117—04

0 序 言

非调质钢具有优良的使用性能和较低的生产成本, 已受到了普遍地重视^[1]。低碳空冷贝氏体钢作为非调质钢的一个重要组成部分, 通过在钢中加入微量的 Mo、B、Nb、V 等元素, 大大推迟了在高温区的珠光体相变, 最后得到以粒状组织和粒状贝氏体为主的组织, 其力学性能明显优于珠光体钢^[2,3]。

HG70 钢是中国自主开发的抗拉强度为 700 MPa 级的低碳空冷贝氏体钢, 主要用于制造露天矿的重大工程机械设备。其力学性能要求为 $\sigma_s \geq 500$ MPa; σ_b : 685 ~ 830 MPa; $\delta_5 \geq 17\%$; $A_{KV} \geq 17$ J。作为工程机械用钢, 不可避免地要进行焊接, 因此焊接性是该钢重要的工艺性能之一。目前, 关于贝氏体钢的研究主要集中在相变机理方面, 包括动力学、热力学、形态学和晶体学等, 关于焊接性的研究报道还不多。根据 GB/T3375—94, 所谓焊接性, 是指材料在限定的施工条件下焊接成按规定设计要求的构件, 并满足预定服役要求的能力。焊接性主要包括两方

面的内容: 其一是接合性能, 即一定的金属在给定焊接工艺下对形成焊接缺陷(裂纹)的敏感性; 其二是使用性能, 即一定的金属在给定的焊接工艺下所形成的焊接接头适应服役要求的程度。金属材料的焊接性是一个相对的概念, 它既与材料本身的材质有关, 也与焊接工艺参数密切相关。研究焊接性的目的在于查明材料在给定焊接工艺条件下可能产生的问题及其原因, 以确定焊接工艺的合理性和材质的改进方向。文中对 HG70 钢的焊接性进行了系统地研究, 通过焊接裂纹敏感性试验和焊接接头组织和性能的研究, 对该钢的焊接性做出客观的评价, 为其推广应用提供依据。

1 试验材料和试验方法

试验材料为 HG70 钢提供, 其化学成分及力学性能见表 1。试验钢为热轧加 580 °C 回火态。其组织为粒状组织和粒状贝氏体的混合物。

根据 GB4675.1—84《斜型坡口焊接裂纹试验

表 1 试验钢的化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of steel tested

化学成分(质量分数, %)									力学性能			
C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Nb	V	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 (%)	A_{KV} /J
0.06	0.29	1.56	0.014	0.008	0.33	0.61	0.04	0.04	570	725	26	69

注: 取样方向为钢板的轧制方向。

方法》, 对试验钢的焊接裂纹敏感性进行评定。试验钢板的尺寸和焊接工艺参数见表 2。焊接时, 先

焊拘束焊缝,再焊试验焊缝。焊后放置 48 h 后对焊板进行解剖,分别检查其表面裂纹率 C_f 、端面裂纹率 C_s 和根部裂纹率 C_r 。

用于检测焊缝和热影响区力学性能的试样采用焊条电弧焊接方法焊接,焊接钢板的尺寸为 265 mm×158 mm×18 mm,焊接道次为 6,其它焊接工艺参数与表 2 相同。拉伸、冲击和硬度试样用铣床从该板上截取。在进行冲击试验时,为了测得各部分的

冲击韧度,缺口分别开在焊缝、粗晶区、细晶区、回火区和母材。为了保证缺口位置的准确性,先用 3% 的硝酸酒精溶液对毛坯试样进行腐蚀,在金相显微镜下逐根观察,并作标记,以确保缺口开在所要求的区域内。

用线切割方法截取金属薄膜试样,对其进行机械加双喷减薄后,在 H-600 型透射电镜下观察其微观组织,观察电压为 100 kV。

表 2 裂纹敏感性试验焊接工艺参数
Table 2 Welding parameter for sensitivity test of cracks

钢板尺寸 Z/mm	预热	电源	道次	电流 I/A	电压 U/V	焊速 v/(mm·s ⁻¹)	热输入 E/(kJ·mm ⁻¹)	焊条型号
200×150×18	不预热	直流	1	110	24	1.6	1.4	E6015-D1

2 试验结果及讨论

2.1 裂纹敏感性试验

根据日本钢结构协会(JSSC)对结构用钢焊接裂纹事故的统计结果,焊接冷裂纹引起的事故占整个焊接事故的 90%。因此,材料对焊接冷裂纹的敏感性是反映材料焊接接合性能的一个至关重要的指标。目前,常用拘束焊接试验方法来测定材料的冷裂纹敏感性。试验结果表明,试验钢的表面裂纹率、端面裂纹率和根部裂纹率都为零,说明试验钢的冷裂纹敏感性极低,因而具有良好的焊接接合性能。

在拘束焊接试验中,拘束焊缝对试验焊缝的拘束应力 σ_w 为^[4]: $\sigma_w = 0.05 R_F$ (MPa), R_F 为拘束度,可表示为 $R_F = 700 h$ (MPa), h 为试板厚度 (mm)。由此可得试验钢板的拘束应力为 $\sigma_w = 630$ MPa,已超过了钢的屈服强度 (570 MPa),因而在焊接接头产生了宏观的塑性变形,而焊接接头并没有产生焊接冷裂纹。这说明试验钢具有较高的塑性变形能力,局部产生的应力集中,可以通过塑性变形来得以释放。试验钢在苛刻的拘束焊中没有产生裂纹,就可以保证在自由焊接时也不会产生裂纹。

2.2 焊接接头力学性能测试

2.2.1 硬化特征

试验钢焊缝和热影响区的显微硬度分布曲线见图 1。为了将热影响区的显微硬度值与组织联系起来,在金相显微镜下测定了热影响区的组织分布状态。测定结果表明,热影响区由粗晶区、细晶区(包括完全正火区和不完全正火区)和回火区三部分组成,这三部分的长度分别为 1.5 mm、1.6 mm 和 2.1 mm,热影响区的总长度为 5.2 mm。从图 1 可知,焊缝、粗晶区和细晶区为硬化区(硬度高于母材),回火区为软化区(硬度低于母材);热影响区的最高硬度出现在粗晶区,最低硬度出现在回火区。

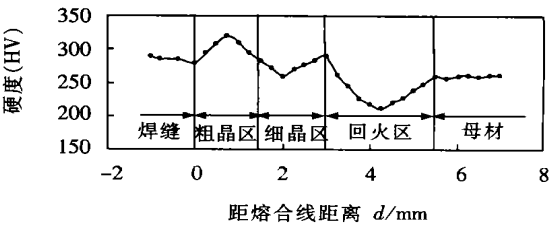


图 1 硬化特征曲线
Fig. 1 Curve of hardening characteristic

2.2.2 焊接接头的拉伸试验

试验钢焊接接头的拉伸试验结果见表 3。

表 3 拉伸试验结果
Table 3 Test results of tensile

试样编号	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ (%)	断口位置
701	540	697	20.5	59.7	回火区
702	538	701	21.6	61.3	回火区

由表 3 可知,焊接接头的断口位置均位于回火区,且其强度和塑性均低于母材(见表 1)。这表明,回火区是焊接接头的薄弱环节,这与显微硬度测试

结果是一致的。
2.2.3 焊接接头的冲击韧度试验
为了评定焊接接头的脆化趋势,进行了冲击韧

度试验,结果见图 2。

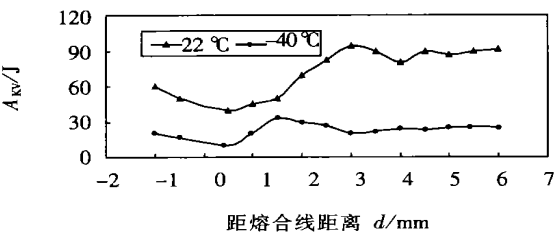


图 2 冲击韧性试验结果

Fig. 2 Result of impact toughness test

由图 2 可以看出,试验钢焊接接头的冲击韧性值有以下特点。

- (1)无论是在常温(22 °C)还是一 40 °C 下,粗晶区的韧性值都是最低的。
- (2)常温下,回火区的韧性值最高;一 40 °C 下,细晶区的韧性值最高。
- (3)常温下,距熔合线 2.5 mm 范围内的韧性值都低于母材的韧性,为脆化区;在低温(一 40 °C)下,不存在明显的脆化区。
- (4)随着试验温度从 22 °C 降低到一 40 °C,细晶区的韧性值降低的幅度最小,说明细晶区的冷脆趋势最小。

2.3 微观组织分析

母材的金相组织见图 3。其特征是大小、形状各异的岛状相无规则地分布在铁素体基体上。透射电镜观察结果表明,基体相主要为块状铁素体(图 4a),同时也可看到少量的板条状铁素体(图 4b)。其中的岛状相在回火时大部分发生了分解,分解产物为短杆状的渗碳体和铁素体(图 4b),少量未分解的岛状相主要由孪晶马氏体和残余奥氏体组成,其中可见平行分布的孪晶线条(图 4a)。按照贝氏体

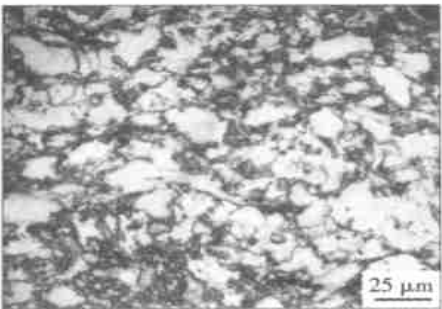


图 3 母材的金相组织

Fig. 3 Optical metallograph of parent material
形貌学分类^[5],对于块状铁素体加 M/A 岛的组织,

铁素体与母相奥氏体之间不存在严格的位向关系,且无表面浮凸效应,称之为粒状组织(Grain Structure, 简称为 GS);相应地,若铁素体呈板条状,M/A 岛分布与条间或条内所形成的组织称之为粒状贝氏体(Granular Bainite, 简称为 GB)。由此可见,母材为 GS 和 GB 的混合组织,以 GS 为主,其中的 M/A 岛大部分在回火过程中发生了分解。

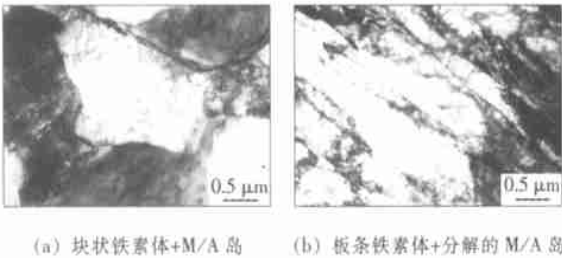


图 4 母材的透射电镜组织

Fig. 4 TEM microstructures of parent material

焊接接头热影响区的金相组织见图 5。在粗晶区,焊接热循环时的峰值温度超过了 HG70 钢的奥氏体粗化温度 T_{KS} (1 100 °C),且冷却速度快,得到了粗大的马氏体和粒状贝氏体组织,见图 5a;当峰值温度在 $T_{KS} \sim A_{C3}$ 之间时,母材被加热至单相奥氏体区而快速冷却,由于奥氏体晶粒细小,所得到的组织为细小的 GS,形成完全正火区,见图 5b;当峰值温度在 $A_{C3} \sim A_{C1}$ 之间时,母材只发生部分重结晶,在加热状态下有未溶的铁素体存在,冷却后得到铁素体加细小的 GS 组织,形成不完全正火区,见图 5c;在回火区内,峰值温度未超过 A_{C1} ,加热时不发生重结晶,因此其金相组织与母材相似,但由于峰值温度超过了母材的回火温度(580 °C),相当于又对母材进行了一次高温回火,故其颜色较母材深,见图 5d。

焊接接头的力学性能与其微观组织是密切相关的。粗晶区由于马氏体和粒状贝氏体的形成,而具有高的强度和硬度,但是韧性较低。在回火区,由于在 HG 70 钢中起主要强化作用的 M/A 岛状相的分解,使得钢的强度和硬度降低,韧性升高。比较图 3 和图 5b 可知,在焊接热循环作用下,细晶区的晶粒经反复的重结晶而充分地细化,这是细晶区具有较高的韧性,特别是高的低温韧性的主要原因。在空冷贝氏体钢中,GB 的形成温度较 GS 低,而强韧性较 GS 高^[5]。因此,该钢在焊接时,可采用加大焊后冷却速度的措施,增加 GB 的相对量,进一步提高焊接接头的力学性能。

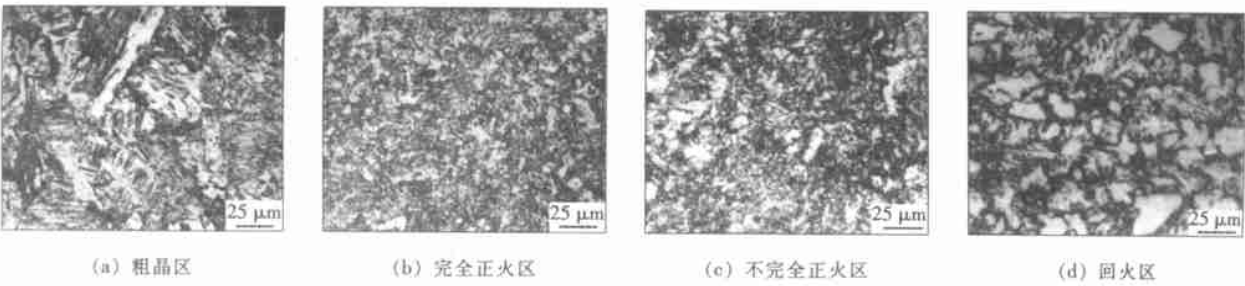


图 5 热影响区的金相组织
Fig. 5 Optical metallograph of HAZ

在整个热影响区, 均未见珠光体组织存在。

从图 2 可知, 尽管粗晶区为脆化区, 但是室温下其冲击韧度仍然达到了 40 J 以上。对该试样的冲击断口进行扫描电镜观察, 在一次纤维区和二次纤维区仍可见细小等轴的韧窝, 见图 6。说明在冲击载荷作用下, 粗晶区仍然发生了较大的塑性变形。从图 5a 可知, 粗晶区的组织主要为板条马氏体加粒状贝氏体, 二者相互穿插, 有效地阻碍了裂纹的扩展, 体现出较高的韧性。这也是在拘束焊接时没有焊接冷裂纹产生的主要原因。

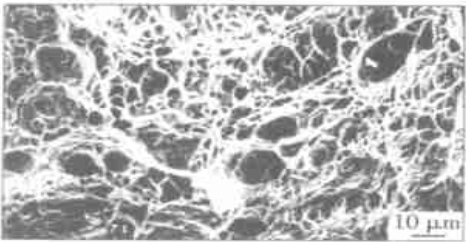


图 6 粗晶区冲击断口
Fig. 6 Fracture appearance at coarse crystalline zone

3 结 论

- (1) HG70 钢的拘束焊接试验结果表明, 其焊接接头的表面、端面 and 根部裂纹率都为零, 证明 HG70 钢具有优良的焊接结合性能。
- (2) 硬度测试结果表明, 焊缝、粗晶区和细晶区为硬化区, 回火区为软化区; 热影响区的最高硬度出现在粗晶区, 最低硬度出现在回火区。拉伸试验结

果表明, 焊接接头的断口位置均位于回火区, 且其强度和塑性均低于母材。这表明回火区是焊接接头的薄弱环节; 冲击韧度试验结果表明, 常温下, 距熔合线 2.5 mm 范围内的韧度都低于母材的韧度, 为脆化区, 在韧度最低的粗晶区, A_{KV} 仍然达到了 40 J 以上; 在低温 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 不存在明显的脆化区。

(3) 粗晶区的组织为板条马氏体和粒状贝氏体, 细晶区、回火区的组织与母材类似, 均为贝氏体类型组织。这是 HG70 钢具有较好的焊接使用性能 (强度、塑性和韧性) 的主要原因。

(4) 加大焊后的冷却速度, 可以进一步改善 HG70 钢焊接接头的力学性能。

参考文献:

- [1] 周鹿宾. 非调质钢和贝氏体钢的研究开发和应用[J]. 金属热处理, 1993, 23(11): 3~9.
- [2] 盛光敏, 彭 侃, 高长益. 非调质状态下 HG80 钢的组织 and 性能研究[J], 钢铁, 1999, 34(3): 53~57.
- [3] 康沫狂, 杨思品. 钢中贝氏体[M]. 上海: 上海科学出版社, 1990.
- [4] 斯道特 R D, 多提 W D. 钢的焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [5] 康沫狂, 杨思品. 关于贝氏体形态及其分类问题[J]. 西北工业大学学报, 1990, (增刊): 84~92.

作者简介: 盛光敏, 男 1958 年 8 月出生。工学博士、教授。主要从事金属材料强化、固态相变和新材料的研究、开发等方面的研究工作。发表论文 50 余篇。
Email: gmsheg@cqu.edu.cn