

冷却速度对 X80 管线钢焊接热影响区组织性能的影响

郭林¹ 霍向东¹ 李烈军² 黎剑锋³ 董锋¹ 田振卓¹

(1. 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 3. 番禺珠江钢管有限公司, 广东 广州 511450)

摘要: 通过热模拟的方法研究了冷却速度对 X80 管线钢焊接热影响区组织性能的影响。采用光学显微镜和力学性能测试技术对 X80 管线钢热模拟后试样的组织和性能进行分析。结果表明: X80 管线钢经历热循环后的主要组织为贝氏体和铁素体。随着冷却速度的增大, 贝氏体为粒状贝氏体和板条贝氏体, 铁素体为多边形铁素体和针状铁素体。当冷却速度超过 50 °C/s 时, 组织中出现了针状马氏体; 与母材相比, 不同冷却速度下的 X80 管线钢焊接热影响区粗晶区的硬度没有出现明显的下降。

关键词: X80 管线钢; 冷却速度; 韧性; 焊接热影响区

中图分类号: TF76, TG335.7 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2013)06-0096-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2013.06.019

Effect of Cooling Rate on Microstructures and Properties of Welding Heat Affected Zones in X80 Pipeline Steel

Guo Lin¹, Huo Xiangdong¹, Li Liejun², Li Jianfeng³, Dong Feng¹, Tian Zhenzhuo¹

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 3. Panyu Chukong Steel Pipe Co., Ltd., Guangzhou 511450, Guangdong, China)

Abstract: The effects of cooling rate on microstructures and mechanical properties of welding heat affected zones in X80 pipeline steel were studied by thermal simulation test. After thermal simulation, the microstructures of X80 pipeline steel were observed by optical microscope, and the mechanical properties were tested with mechanical property testing technologies. The results show that the microstructures of X80 pipeline steel after thermal cycle are bainite and ferrite. With the increase of cooling rate, the bainite turns to granular and lath shape, and the ferrite to polygon and acicular shape. Acicular martensite appears as the cooling rate exceeds 50 °C/s. The hardness of coarse grain area on welding heat affected zone does not show any significant decrease under different cooling rate.

Key words: X80 pipeline steel, cooling rate, toughness, welding heat affected zone

0 引言

随着我国天然气工业的发展,对输气管道的要求也越来越高,因此推动了我国高性能管线钢的开发。我国西气东输二线工程主干线用钢为 X80 级

别管线钢^[1]。同支线用钢 X70 相比,采用 X80 管线钢输送管道的壁厚可以减小 12.5%,可节约成本 3%~12%^[2]。X80 管线钢采用微合金化控轧控冷技术,属于超低碳、超细晶粒低合金高强度钢,其强度母材性能已满足工程需要。焊接是钢管制造和管道

建设的关键环节之一,X80 管线钢经历焊接热循环后,热影响区粗晶区组织恶化和韧性损失使焊接热影响区成为整个焊接接头最薄弱的部分。笔者通过热模拟技术、金相显微技术以及夏比冲击试验和硬度试验对 X80 管线钢在不同冷却速度下的组织和性能进行分析,为实际焊接工艺提供理论依据。

1 试验材料和方法

本试验采用中石化新粤浙天然气输送管线项目拟采用的 API Spec5L X80 钢管,该钢管由番禺珠江

钢管有限公司生产,规格为 25.2 mm × 3 720 mm × 12 000 mm。X80 管线钢是由某钢厂提供,该钢是一种通过控制空冷工艺获得的超低碳、微合金高强钢,是一种性能优良的管线钢材料,其化学成分如表 1 所示。

将 X80 管线钢加工成热模拟冲击试样,试样表面光洁度达到 Ra 1.6。在 Gleeble - 1500 热模拟试验机上模拟焊接热影响区的粗晶区。试验中加热的峰值温度固定为 1 300 °C,加热速度为 100 °C/s,冷却速度分别为 0.2、0.5、1、3、5、10、30、50 °C/s,对应 $t_{8/5}$ 为:1 500、600、300、100、60、30、10、6、3、75 s。

表 1 X80 管线钢的化学成分
Table 1 Chemical compositions of X80 pipeline steel

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	V
0.04	0.27	1.77	0.008	0.0024	0.23	0.27	0.24	0.020	0.008
Mo	Nb	B	Al	N					
0.111	0.05	0.0002	0.034	0.006					

制取金相试样,磨平、抛光以及经 3% 硝酸乙醇浸蚀后置于 LEICA DM 2500M 光学显微镜 JSM - 7001F 场发射扫描电镜下观察显微组织。冲击韧性试验按照 ASTM A370 - 2011 标准进行,试验设备为 PTM2200 - B1 型摆锤冲击试验机,试验规格为 10 mm × 10 mm × 55 mm,缺口类型为 V 型缺口,槽深为 2 mm。试验温度为 -20 °C。冲击断口置于 JSM - 7001F 场发射扫描电镜下观察。测量热模拟试样的

维氏硬度,在显微硬度计下每个试样打五个点,并计算出硬度的平均值。

2 试验结果与分析

2.1 不同冷却速度下焊接热影响区组织分析

图 1 为 X80 管线钢的原始组织,以针状铁素体为主,还有少量多边形铁素体、粒状贝氏体以及少量夹杂物。

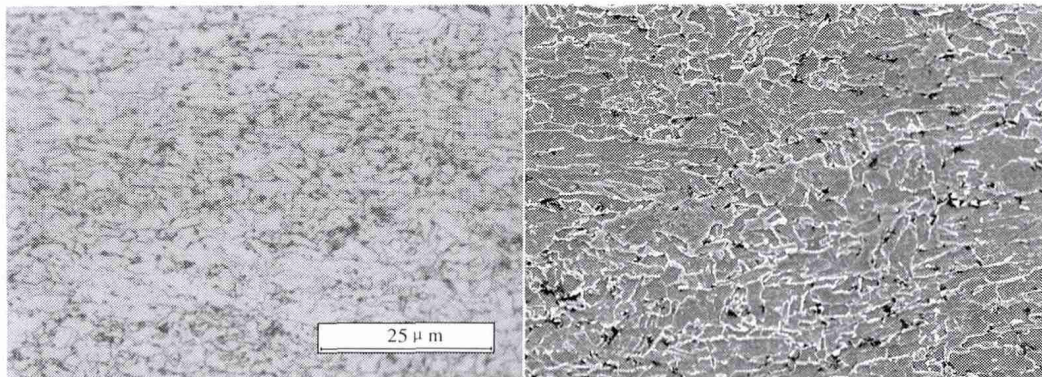


图 1 X80 管线钢母材组织
Fig. 1 Microstructure of X80 pipeline

图 2 为经历不同热循环条件下焊接热影响区的组织。二次组织主要为板条状贝氏体、粒状贝氏体以及针状铁素体。冷却速度为 0.2 °C/s 的试

样的组织为多边形铁素体加珠光体,冷却速度为 50 °C/s 的试样中出现了马氏体。当冷却速度为 0.2 °C/s 时,由于冷却速度过小,形成了多边形铁

素体加伪珠光体;当冷却速度增加到 0.5 °C/s 时,组织中出现了少量的粒状贝氏体。当冷却速度继续增加到 5 °C/s 时,组织主要为粒状贝氏体,同时组织中出现了大量的岛状物。粒状贝氏体的含量随着冷却速度的增加而增加,岛状物粗大,由块状变为长条状,呈半连续或连续形态分布在铁素体基体上,且在每个原奥氏体晶粒内具有一定的位向分布。当冷却速度达到 10、30 °C/s 时,组织

以粒状贝氏体为主,同时含有少量的板条状贝氏体和针状铁素体,组织细小。粒状贝氏体以原奥氏体晶界为界,在原奥氏体内按照不同位相分布,第二相岛状物成半连续点状或条状近似平行的充满整个原奥氏体晶粒,且以半连续状岛状物为主。当冷却速度达到 50 °C/s 时,相变产物以板条贝氏体加粒状贝氏体为主,同时出现了少量的马氏体组织,第二相岛状物更加细小。

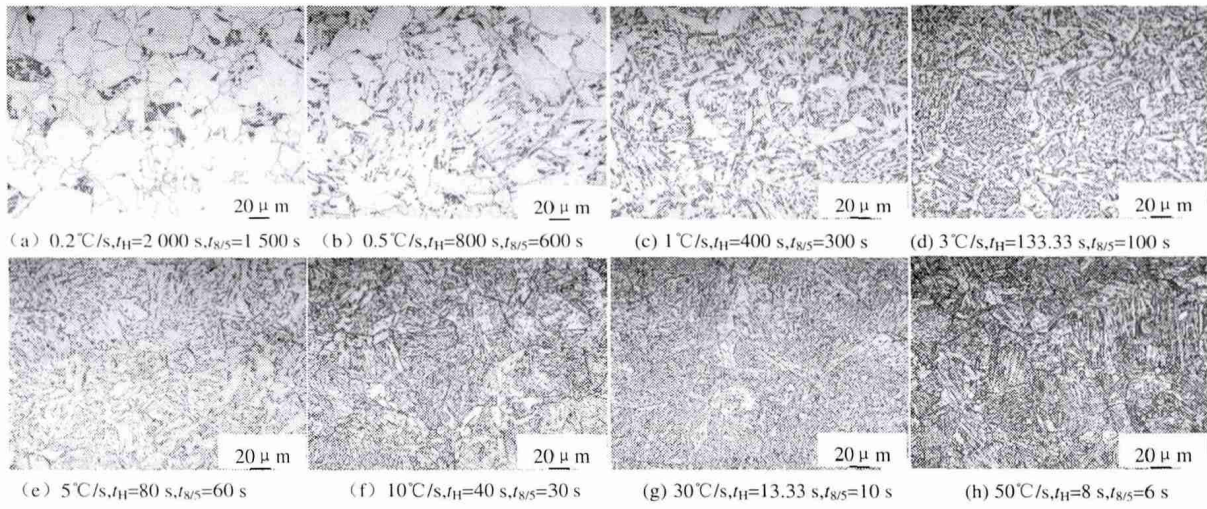


图 2 不同热循环条件下焊接热影响区组织

Fig. 2 Microstructures of welding heat affected zone under different thermal cycle conditions

2.2 不同冷却速度下焊接热影响区的硬度分析

X80 管线钢焊接热影响区粗晶区的显微硬度如表 2 所示。由表 2 可以看出, X80 管线钢焊接热影响区粗晶区的硬度随着冷却速度的增加, $t_{8/5}$ 减小, 总体上热影响区粗晶区的硬度呈逐渐增大的趋势。这是因为在连续快速冷却的条件下, 高温时奥氏体中的碳来不及扩散析出, 从而以过饱和的形式存在于原奥氏体中, 并随之在低温区发生相变, 增大相变产物的淬硬性。尤其当冷却速度增大到 50 °C/s 时, 组织中出现了马氏体。因此随着冷却速度的增大, 硬度增加。X80 管线钢的低温转变产物主要为贝氏体, 与铁素体组织相比, 贝氏体不仅富碳, 而且里面含有大量的晶格缺陷, 因为随着冷却速度的增大和贝氏体含量的增高, 热影响区的硬度逐渐升高。在冷却速度为 5 °C/s 时, 硬度出现低谷, 在 10 °C/s 时, 硬度值回升, 但是仍然低于 3 °C/s 时的硬度。这可能是因为在当冷却速度在 0.2 ~ 3 °C/s 时, 组织中生成了 M/A 组织, 随着冷却速度的增

加, 其含量增加, 形状粗大, 分布越来越均匀, 而 M/A 组织是淬硬组织, 硬度很高。冷却速度在 5 ~ 10 °C/s 时组织中 铁素体含量增加, 铁素体的硬度值低于贝氏体硬度, 使得在此冷却范围内出现了硬度低谷。当冷却速度大于 10 °C/s 时, 组织中生成了板条贝氏体, 其含量随着冷却速度的增加而增加; 当冷却速度达到 50 °C/s 时, 组织中出现了马氏体, 因此硬度随着冷却速度的增大逐渐增高。同时由表 2 试验数据可以看出, X80 管线钢焊接热影响区粗晶区的软化现象不明显, 与母材硬度 (HV) 235 相比, 在冷却速度小于 30 °C/s 时热影响区粗晶区的硬度与母材接近, 冷却速度 ≤ 0.5 °C/s 时, 焊接热影响区粗晶区的硬度值略低于母材硬度; 冷却速度在 1 ~ 3 °C/s 时, 其硬度值和母材硬度值相当。当冷却速度增大到 50 °C/s 时, 焊接热影响区粗晶区的硬度大于母材硬度, 且有上升的趋势。因此可以判断出, X80 管线钢焊接热影响区粗晶区没有出现软化现象。

表 2 X80 管线钢焊接热影响区粗晶区硬度值
Table 2 Hardness of welding heat affected zone on X80 pipeline steel

冷却速度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	$t_{8/5}/\text{s}$	硬度值(HV)	冷却速度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	$t_{8/5}/\text{s}$	硬度值(HV)
0.2	1500	223	5	60	225
0.5	600	227	10	30	237
1	300	234	30	10	254
3	100	240	50	6	268

2.3 不同冷却速度下焊接热影响区的韧性分析

X80 管线钢焊接热影响区粗晶区冲击吸收功如表 3 所示。由此可以看出,冷却速度在 $0.2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 区间,热影响区的冲击吸收功在 20 J 左右。而当冷

却速度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,冲击吸收功则显著增大,为 199 J,在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时达到最大值 300 J。但在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,冲击吸收功却显著下降为 92 J,但仍比冷却速度 $0.2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 区间时大得多。

表 3 X80 管线钢焊接热影响区粗晶区冲击吸收功
Table 3 Result of impact test of welding heat affected zone on X80 pipeline steel

冷却速度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	$t_{8/5}/\text{s}$	冲击吸收功/J	冷却速度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	$t_{8/5}/\text{s}$	冲击吸收功/J
0.2	1500	29	5	60	20
0.5	600	13	10	30	199
1	300	17	30	10	300
3	100	14	50	6	92

2.3.1 显微组织对冲击韧性的影响

由 2.1 的分析可知,X80 管线钢焊接热影响区粗晶区的主要组织类型为粒状贝氏体、板条贝氏体以及针状铁素体。决定贝氏体组织韧性的因素是贝氏体铁素体的片条大小及岛状物的形态和分布。当贝氏体片条粗大、条间连续分布着岛状物时,韧性较差。连续粗大的岛状物容易诱发微裂纹,一旦诱发微裂纹,裂纹扩展难以被小角度的片条界面所阻止,裂纹将迅速传播扩展;当铁素体片条细小时,岛状物分布在铁素体内部则有较高的韧性。首先岛状物细小,不容易产生微裂纹,即使产生微裂纹,其传播会被很多碳化物阻止,或较高密度的位错阻止,裂纹扩展困难。

如图 2 所示,冷却速度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的试样组织为多边形铁素体和珠光体,裂纹容易在珠光体处形成,而铁素体片条粗大,裂纹扩展难以被小角度的片条界面所阻止,导致裂纹传播迅速,具有较差的韧性。冷却速度为 $0.5、1、3、5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的试样组织为粒状贝氏体,但是由于岛状物粗大且呈连续或半连续形态分布,容易诱发裂纹,形成裂纹源,导致材料的韧性很差。而当冷却速度为 $10、30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,组织中的岛状物细小,铁素体片条细小,韧性好,尤其是 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的试样,其组织最细小,岛状物细小且分布无方向性,材料的韧性最好。冷却速度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的试样中,由于出现了马氏体组织,导致了材料的韧性下降。

2.3.2 M/A 组元对冲击韧性的影响

M/A 组元的形态、大小、数量以及分布都会对韧性产生不同程度的影响。M/A 组元尺寸越大,越容易诱发裂纹,形成裂纹源,降低韧性。而 M/A 组元尺寸越小,则越对韧性有利。构成 Griffith 裂纹临界尺寸^[3]平均弦长 $2\text{ }\mu\text{m}$,当 M/A 组元的平均弦长小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,不足以形成裂纹源。并且 M/A 组元中的残留奥氏体是一种有利的韧性相,可降低裂纹尖端应力,消耗部分裂纹扩展功。当裂纹遇到 M/A 组元时,将发生弯折,对裂纹的扩展具有阻滞作用^[4]。其次,长条状的 M/A 组元比块状的 M/A 组元更容易诱发裂纹^[5],形成裂纹源,降低材料的韧性。粗大和长条状以及半连续链状的 M/A 组元数量越多,对韧性的不利越明显。

由图 2 可以看出,X80 管线钢经历不同的热循环后,组织中的 M/A 的数量、大小、形态以及分布都发生了明显的变化。冷却速度小的试样($0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$)其组织中所含的 M/A 组元数量少,呈颗粒状,没有明显的方向性,对冲击韧性影响不明显。 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的试样组织中,由于 M/A 组元数量多,粗大,呈连续或半连续平行分布,容易诱发裂纹源,对韧性不利,具有较低的韧性。冷却速度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的试样,由于其 M/A 组元呈细小颗粒分布在铁素体基体上,尺寸较小,不足以形成裂纹源,表现出对韧性有利的一面,因此冲击吸收功最高。

3 结论

1) X80 管线钢经历热循环后的主要组织为贝氏体和铁素体。随着冷却速度的调高,贝氏体为粒状贝氏体和板条贝氏体,铁素体为多边形铁素体和针状铁素体。当冷却速度达到 50 °C/s 时,组织中出现了针状马氏体。

2) 热影响区粗晶区中 M/A 组元具有粒状和条状,成点状、连续、半连续形态分布在铁素体基体上。当冷却速度较慢时,M/A 组元为粒状,呈点状分布;

随着冷却速度的增大,长条状的 M/A 组元所占比例越来越大,由半连续形态变为连续形态分布,并逐渐趋于平行排列。M/A 组元的数量、大小、形态以及分布对 X80 管线钢的冲击韧性有显著影响。

3) 与母材相比,不同冷却速度下的 X80 管线钢焊接热影响区粗晶区的硬度没有出现明显的下降,即 X80 管线钢的焊接热影响区粗晶区不会出现明显的软化现象。

参考文献

- [1] Wang Maotang, He Ying, Wang Li *et al.* Development and application of X80 alloy steel pipe for line two of West - East natural gas transmission project [J]. *Electric Welding Machine*, 2009, 39(5): 6 - 14.
(汪茂堂,何莹,王丽,等.西气东输二线 X80 级管线钢的开发和应用[J].电焊机,2009,39(5):6-14.)
- [2] Sui Yongli. Welding technology research for girth of domestic X80 grade line pipe [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
(隋永莉.国产 X80 管线钢焊接技术研究[D].天津:天津大学,2008.)
- [3] Gao Huilin, Dong Yuhua, Wang Rong. Study on local brittle zone phenomena of intercritically reheated coarse - grained heat - affected zone in pipeline steels [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2001, 22(2): 60 - 65.
(高惠临,董玉华,王荣.管线钢焊接临界粗晶区局部脆化现象的研究[J].材料热处理学报,2001,22(2):60-65.)
- [4] Gao Huilin. Pipeline steel - microstructures, properties and welding behavior [M]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology Press, 1995: 54 - 59.
(高惠临.管线钢—组织、性能、焊接行为[M].西安:陕西科技大学技术出版社,1995:54-59.)
- [5] Fukuhisa Matsuda, Kenji Ikeuchi, Hitoshi Okda. Effect of M - A constituent on fracture behavior of 780 and 980MPa class HS-LA steel subject to weld HAZ thermal cycle [J]. *Trans. JWRI*, 1994, 23(2): 231 - 238.

编辑 余文华

“氧化钒的清洁生产方法”获纽伦堡国际发明展览会金奖

2013 年 11 月 18 日获悉,“氧化钒的清洁生产方法”获得 2013 年纽伦堡国际发明展览会金奖。

纽伦堡国际发明展是世界上最具影响力的国际发明展之一,至今已有 60 多年的历史。本次展会有来自 32 个国家和地区的 700 余个项目参加,中国发明协会和国务院国资委组织国内企业参展,共获得绿色环保贡献奖 2 项、金奖 3 项、银奖 11 项。在此次纽伦堡国际发明展上,鞍钢集团是我国唯一参赛的钢铁企业,攀钢作为鞍钢集团的重要一极,共选派了“氧化钒的清洁生产方法”等 5 项发明成果参展。这些发明成果充分展示了攀钢的科技创新驱动发展理念,以其广泛适用性、可推广性和良好的市场前景,引起各方的广泛关注,获得好评。最终,“氧化钒的清洁生产方法”获得展览会金奖。

(攀钢研究院综合管理部供稿)