

V含量对深海管线钢HAZ软化区的影响研究

余腾义¹ 周磊磊¹ 李拔² 杨萍³

(1. 攀钢集团研究院有限公司 攀枝花 617000; 2. 钢铁研究总院工程用钢所 北京 100081; 3. 安徽工业大学冶金工程学院 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 通过焊接热模拟试验研究了管线钢的焊接热循环过程, 结合扫描电镜、背散射电子衍射系统、透射电镜和硬度试验表征和分析了热影响区软化区的组织变化、晶体学特征和第二相析出行为。结果表明, 对于母材组织为多边形铁素体和针状铁素体的深海管线钢, 焊接热影响区的软化区出现在峰值温度为1 000~900℃的细晶区。采用V微合金化和低的焊接热输入量可以使组织有效晶粒尺寸减小、小角度晶界比例和位错密度增加, 从而有效地改善热影响区细晶区的软化问题。

关键词: 深海管线钢; HAZ软化区; 焊接热模拟; 热输入; 位错密度; 小角度晶界

中图分类号: TF841.3, TG44 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)05-0159-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.05.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Effect of V Content and Heat Input on HAZ Softening Zone of Deep-sea Pipeline Steel

Yu Tengyi¹ Zhou Leilei¹ Li Ba² Yang Ping³

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd. Panzhihua 617000 Sichuan, China; 2. Engineering Steel Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 3. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui, China)

Abstract: In this paper, the welding thermal cycle process of deep-sea pipeline steel was investigated using welding thermal simulation. The microstructure variation, crystallography characteristic and second-phase precipitation behaviors of the softening zone of heat affected zone (HAZ) were characterized and analyzed by combining with the scanning electron microscope, electron back-scattered diffraction, transmission electron microscopy and hardness testing. The results show that HAZ softening zone appears in the fine-grained zone with a peak temperature of 1 000~900℃ for deep-sea pipeline steel whose base metal microstructure is the polygonal ferrite and acicular ferrite. Using V microalloying and low welding heat input can reduce the grain size, increase the proportion of small-angle grain boundaries and the dislocation density effectively. Thus, the softening problem of the HAZ fine-grained region can be effectively improved.

Key words: deep-sea pipeline steel, HAZ softening zone, weld thermal simulation, heat input, dislocation density, low angle grain boundary

0 引言

深海管线钢是海洋油气运输的主要载体, 在复杂、恶劣的海洋环境下服役需要承受内、外压力以及

轴向力等静态载荷和海流、波浪等交变动载荷的多种形式载荷的共同作用, 对深海管线钢的性能要求不断提高^[1-2]。伴随着TMCP技术的飞速发展和进步, 管线钢的组织得到了精确的调控和显著的细化, 从而能

够生产出高强韧性和低屈强比的高钢级厚壁深海管线钢^[3-4]。然而,整体显微组织的细化、强度的提高以及大线能量焊接等焊接技术的发展和使用,使得深海管线钢的焊接热影响区软化问题日益凸显^[5-8]。热影响区软化是一个相对的概念,它是指焊接热影响区中某个区域的硬度显著低于母材的硬度,从而使焊接接头的硬度分布在该区域出现低谷。软化区的出现导致热影响区的性能与母材的性能不匹配,成为了整个焊接接头最薄弱的部分,严重影响焊接结构的服役安全和使用寿命。

大量研究表明,焊接热影响区软化区出现的位置通常有粗晶区^[9-11]、细晶区^[9,12-13]和亚临界区^[14-16]。软化区的形成与焊接热循环条件下母材组织的相变重结晶过程有关,因此其主要的影响因素为母材化学成分和相应的焊接参数^[5,17,18]。目

前,对于管线钢焊接热影响区的软化行为及改善措施的研究报道较少。因此,笔者采用焊接热模拟试验,借助扫描电镜、EBSD 和透射电镜等试验方法对深海管线钢热影响区的微观组织进行了表征和分析,考察了微合金元素 V 含量对软化区的影响,并阐明了软化区改善的原因。

1 试验材料与方法

本试验采用了热轧态管线钢钢板,试验钢的化学成分见表 1,在深海管线钢成分设计的基础上,添加微合金化元素 V,其中,1[#]钢含 V0.025%,2[#]钢含 V0.071%。两种试验钢的母材组织如图 1 所示,均由多边形铁素体(PF)和针状铁素体(AF)组成。1[#]钢和 2[#]钢的母材显微硬度(HV)分别为 252 和 259。

表 1 试验钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of experimental steel

编号	C	Mn	Si	Al	Ni	Mo	Cr	Cu	Nb	V	Ti	P	S
1 [#]	0.049	1.76	0.19	0.001 9	0.2	0.25	0.21	0.21	0.052	0.025	0.001 1	0.005 3	0.004 1
2 [#]	0.053	1.77	0.19	0.002	0.21	0.25	0.211	0.21	0.054	0.071	0.009 7	0.005 8	0.004 1

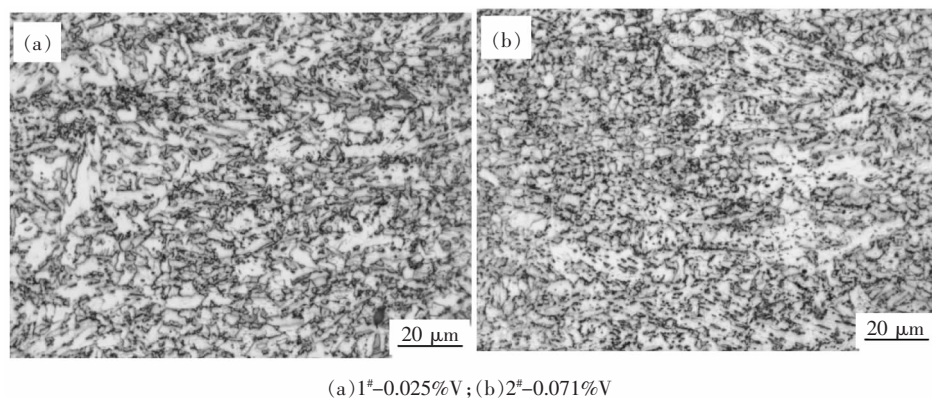


图 1 试验钢母材组织

Fig. 1 Microstructure of base metal of experimental steel

焊接热模拟试验在 Gleeble 3500 热模拟实验机上进行,热模拟的试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。热模拟工艺参数如图 2 所示,通过设定不同的峰值温度来模拟热影响区不同位置的热循环过程,其中,加热速度为 100 ℃/s,峰值停留时间为 1 s,峰值温度分别为 1 300、1 200、1 100、1 000、950、900、850、800、750、700、600、500 ℃。此外,采用了不同的焊接热输入,焊接热输入与 $t_{8/3}$ 时间的关系由表 2 给出。热模拟之后的试样经过不同型号的砂纸依次

打磨、抛光,然后使用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀。通过金相显微镜(Olympus 3100),热场发射扫描电镜(FEI Quanta 650FEG),透射电镜(HITACHI H-800)和扫描电镜配备的电子背散射衍射仪(Oxford Nordlys F+)对微观组织进行不同尺度的观察和表征。此外,采用高分辨透射电镜(Tecni G²F20)对组织中的析出相进行了观察和表征。最后利用显微硬度计(INSTRON TUKON 2100)测量各峰值温度下试验钢的显微硬度,载荷选用 200 g。

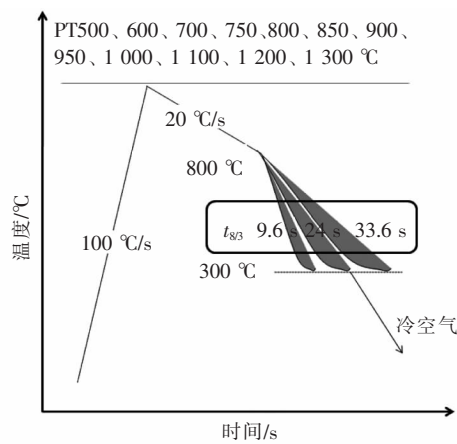


图 2 焊接热模拟工艺

Fig. 2 Process diagram of welding hot simulation

2 试验结果与分析

2.1 V 含量对海底管线钢 HAZ 软化区的影响

图 3(a) 为深海管线钢焊接接头热影响区的硬

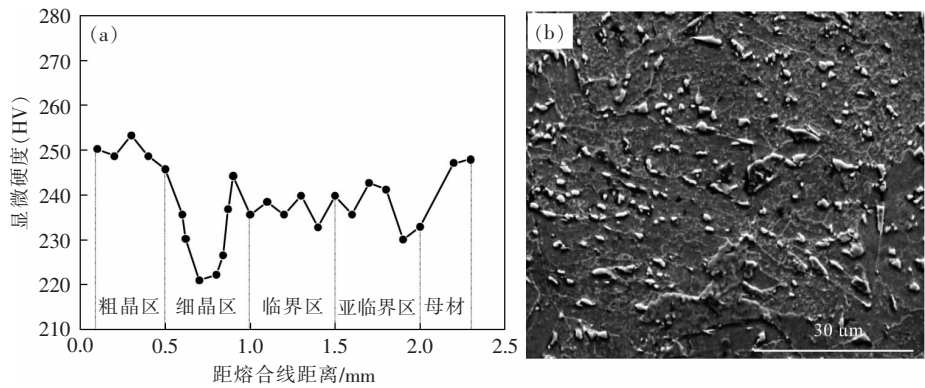


图 3 (a) 实际焊接接头 HAZ 的硬度分布; (b) 热影响区细晶区组织的 SEM 照片

Fig. 3 (a) Hardness distribution of HAZ in actual welded joint; (b) SEM of microstructure in fine-grain area of HAZ

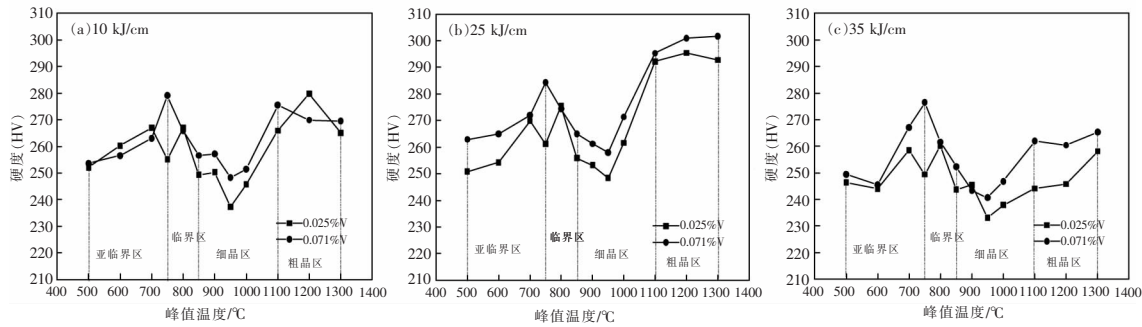


图 4 不同热输入下峰值温度与显微硬度的关系

Fig. 4 Relationship between peak temperature and micro-hardness under different heat inputs

峰值温度 1 300 °C 是模拟临近融合线位置的热影响区粗晶区,如图 5(a) 所示,显微组织以贝氏体铁

度分布,可以看到,在细晶区对应的位置出现了明显的软化区。图 3(b) 为细晶区的显微组织,由图 3(b) 可知,该区域的组织发生了明显的粗化,形成了粗大的粒状贝氏体(GB)和 PF,导致该区域的强度和硬度显著降低,形成了软化区。当采用了 V 微合金化后,如图 4(a~c) 所示,含 V 试验钢热影响区细晶区的软化坑明显变浅,并且随着 V 含量的增加,软化区的改善效果更明显;当热输入增加到 35 kJ 时,V 元素还能够有效抑制粗晶区硬度进一步升高。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

表 2 不同热输入与 $t_{8/3}$ 的关系

Table 2 Relationship between $t_{8/3}$ and different heat inputs

焊接热输入 / (kJ · cm ⁻¹)	$t_{8/3}$ / s
10	9.6
25	24.95
35	33.6

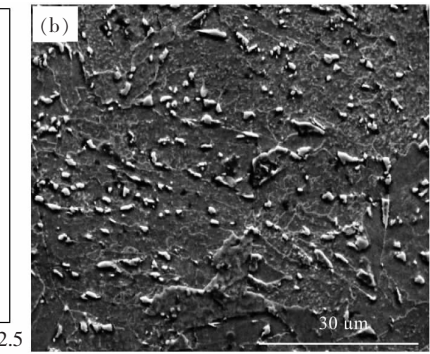


图 5 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片

Fig. 5 SEM of microstructure in fine-grain area of HAZ

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

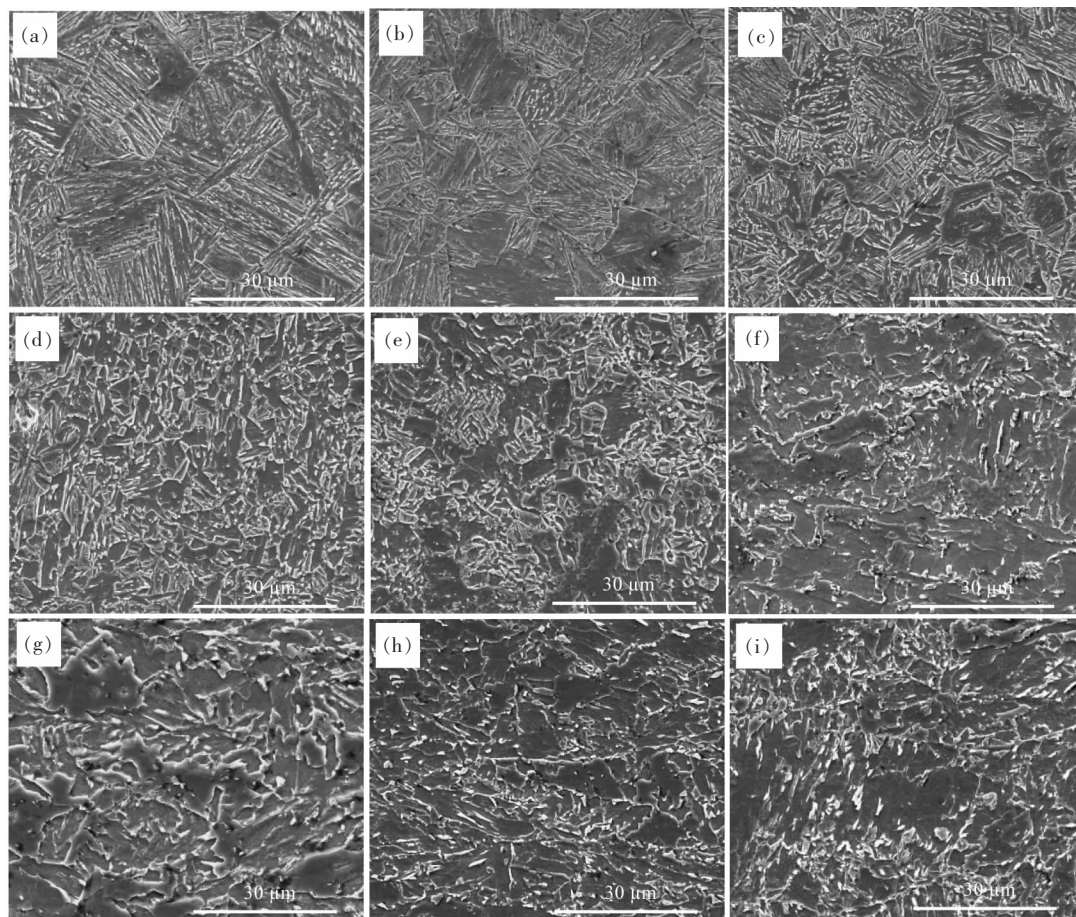
图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

图 5 为 1[#] 试验钢不同峰值温度下显微组织的 SEM 照片。

晶粒粗化,奥氏体稳定性高,因此经过快速冷却后的组织以BF为主,原奥氏体晶界清晰可见,并且BF晶粒也较为粗大。随着粗晶区峰值温度降低,即奥氏体化温度降低,冷却后组织中的GB增加,但仍然以BF为主,同时,组织的粗化程度减小,如图5(b)、(c)所示。由于粗晶区的显微组织主要为BF,因此硬度较高。当峰值温度降低到1 000~850℃时,对应焊接热影响区的细晶区,如图5(d),此时的奥氏体化温度较低,组织没有发生明显粗化,并且奥氏体稳定性低,快速冷却后形成了细小的PF、AF和GB混合组织,与焊缝热影响区中的细晶区相比,硬度显著增加。随着细

晶区峰值温度降低,组织没有得到充分的奥氏体化,导致最终组织局部分布不均匀,见图5(e)。随着峰值温度继续降低到800℃临界区,此时原始组织中的PF先发生奥氏体化,其余的AF发生一定程度的回复,冷却后发生奥氏体化的部分转变成了GB,最终使得显微硬度升高。峰值温度700~500℃为亚临界区,也称为回火区,该温度下组织没有发生奥氏体化过程,而是发生了一定程度的组织回复,所以硬度没有明显的降低。由此可知,母材成分中加入0.025%V,使得热影响区细晶区的组织发生了显著的细化,从而使硬度增加,使软化坑变浅。



(a) 1 300 °C; (b) 1 200 °C; (c) 1 100 °C; (d) 1 000 °C; (e) 900 °C; (f) 800 °C; (g) 700 °C; (h) 600 °C; (i) 500 °C

图5 1#钢不同峰值温度下的SEM照片

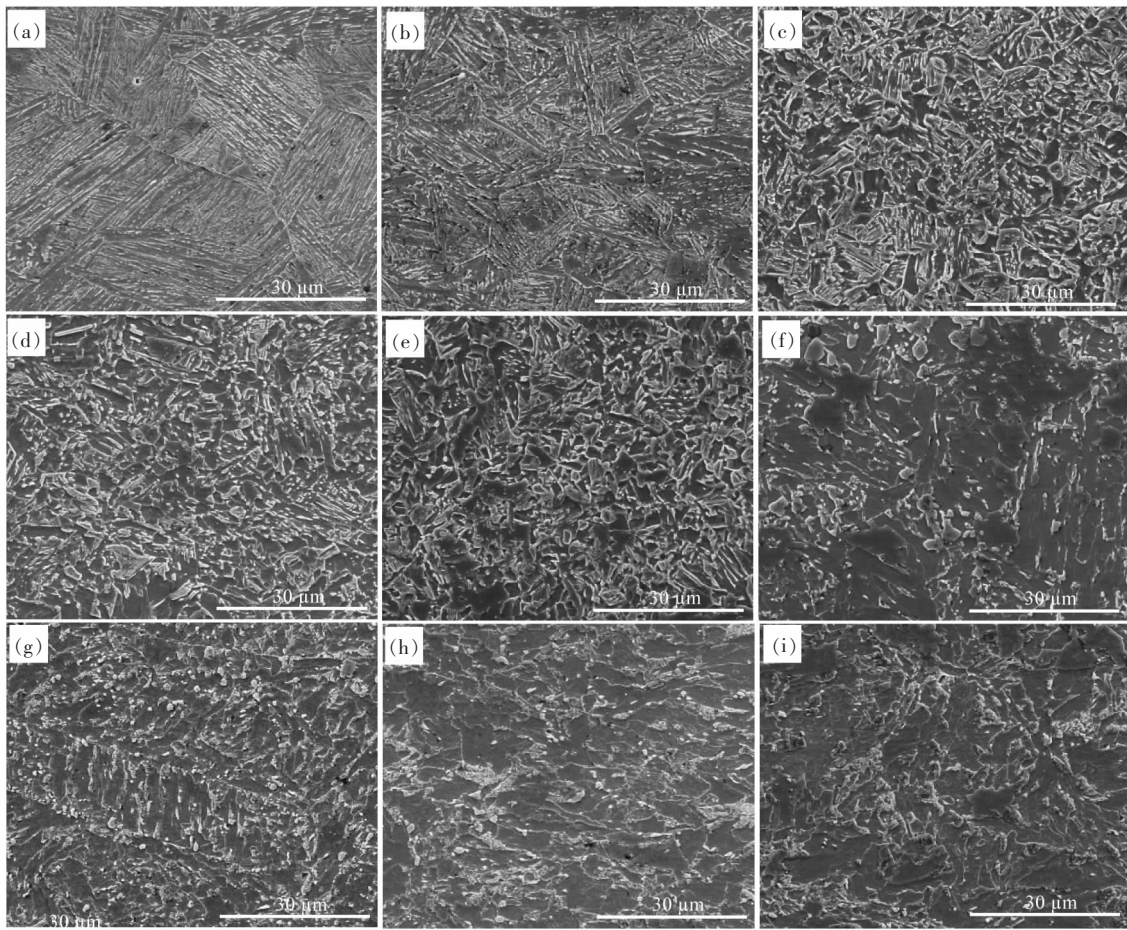
Fig. 5 SEM of 1# steel at different peak temperatures

图6为2#试验钢不同峰值温度下显微组织的SEM照片。与图5对比可知,峰值温度1 300~1 100℃的粗晶区和峰值温度800~500℃的亚临界区显微组织的变化规律与1#试验钢相近。其中,细晶区1 000℃的组织中除了细小的PF、GB和AF,还能观察到少量BF组织;2#钢细晶区900

℃的显微组织同样细小均匀,并未出现1#中的局部大块铁素体。

2.2 V增加使热影响区细晶区软化坑变浅的原因

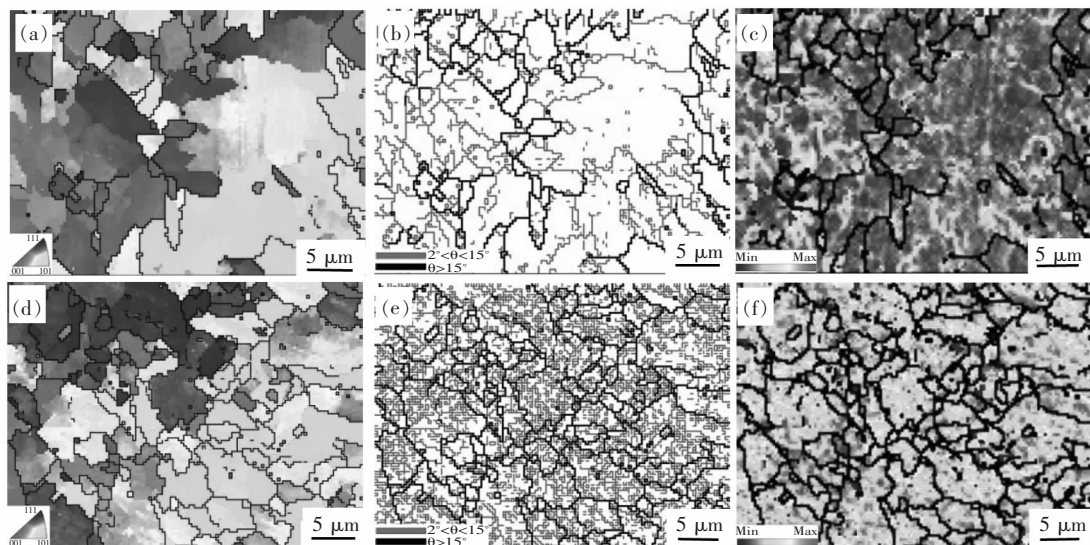
为了进一步探究V含量增加使热影响区细晶区软化坑变浅的原因,对细晶区的显微组织进行了EBSD表征,如图7所示。



(a) 1300 °C; (b) 1200 °C; (c) 1100 °C; (d) 1000 °C; (e) 900 °C; (f) 800 °C; (g) 700 °C; (h) 600 °C; (i) 500 °C

图 6 2# 钢不同峰值温度下的 SEM 照片

Fig. 6 SEM of 2# steel at different peak temperatures



(a) 1#-反极图; (b) 1#-晶界图; (c) 1#-局部取向差分布图; (d) 2#-反极图; (e) 2#-晶界图; (f) 2#-局部取向差分布图

图 7 不同 V 含量试验钢细晶区组织的 EBSD 照片

Fig. 7 EBSD maps of microstructure in fine-grain of HAZ for experimental steel with different V contents

图 7(a) 和图 7(d) 为两种试验钢的反极图, 可以清楚地看到 1[#] 钢细晶区中的大块铁素体以及 2[#] 钢中的细小铁素体。从相对应的大、小角度晶界图可以看出 2[#] 钢(图 7(b)) 组织中的小角度晶界比例显著高于 1[#] 钢(图 7(e))。图 7(c)、(f) 是两种试验钢热影响区细晶区组织的局部取向差分布, EBSD 的这一功能是通过颜色的变化来表征晶粒内部小于 5° 的取向差含量与分布的变化, 能够反映组织中局部应力集中的程度^[19]。此外, 还可以用来间接表征位错密度的变化^[14]。根据图中给出的标尺, 以及颜色的变化, 表明组织中应力集中的程度不断增加, 也即位错密度不断增加。由此可知, 与 1[#] 钢相比 2[#] 钢的整体组织均具有较高的位错密度, 高的位错密度使硬度增加。因

此, 随着母材中 V 含量提高, 位错密度的显著增加是改善热影响区软化的原因之一。

3 结 论

1) 深海管线钢的母材组织为多边形铁素体和针状铁素体, 在焊接热影响区的细晶区(900 ~ 1 000 °C) 出现了软化区。

2) 在母材成分中加入适量 V 元素可以有效地改善焊接热影响区细晶区的软化问题。

3) 随着 V 含量的增加, 改善焊接热影响区细晶区软化的效果更明显。通过 V 微合金化, 使得细晶区组织细化、亚结构增加和位错密度增加, 共同作用最终改善了软化区。

参考文献

- [1] Niu Aijun, Bi Zongyue, Zhang Gaolan *et al.* Research and development of high grade heavy wall thickness longitudinal submerged arc welded pipe used for deep-sea pipeline[J]. Welded Pipe and Tube 2019, 42 (6): 1-6.
(牛爱军, 毕宗岳, 张高兰, 等. 海底管线用管线钢及钢管的研发与应用[J]. 焊管 2019, 42 (6): 1-6.)
- [2] Wei Weirong, Liang Yu, Hou Jing *et al.* Localization of steel pipe used for natural gas transportation in South China Sea[J]. Welded Pipe and Tube 2015, 38 (3): 26-30.
(魏伟荣, 梁羽, 侯静, 等. 南海深水天然气输送海底管线钢管的国产化[J]. 焊管 2015, 38 (3): 26-30.)
- [3] Niu Aijun, Bi Zongyue, Niu Hui *et al.* Research and development of high grade heavy wall thickness longitudinal Submerged arc welded pipe used for deep-sea pipeline[J]. Welded Pipe and Tube 2015, 38 (7): 17-22.
(牛爱军, 毕宗岳, 牛辉, 等. 深海管线用高钢级厚壁直缝埋弧焊管研制[J]. 焊管 2015, 38 (7): 17-22.)
- [4] Niu Hui, Niu Aijun, Liu Haizhang *et al.* Development of X70 high strength thick wall pipeline steel and welded pipe for deep sea[J]. Welded Pipe and Tube 2018, 41 (2): 1-6.
(牛辉, 牛爱军, 刘海璋, 等. 深海用 X70 高强度厚壁管线钢及焊管的开发[J]. 焊管 2018, 41 (2): 1-6.)
- [5] Chen Xiaowei, Wang Xu, Wang Lizhu *et al.* X80 pipeline steel welding heat affected zone softening research[J]. Welded Pipe and Tube 2017, 40 (6): 1-8.
(陈小伟, 王旭, 王立柱, 等. X80 管线钢焊接热影响区软化问题研究[J]. 焊管 2017, 40 (6): 1-8.)
- [6] Zheng Jiangpeng, Chen Fu, Huang Zhijun *et al.* Researching process in the softening of HAZ in high grade pipeline steels[J]. Wisco Technolog 2014, 52 (2): 59-62.
(郑江鹏, 陈浮, 黄治军, 等. 高等级管线钢焊接热影响区软化研究现状[J]. 武钢技术 2014, 52 (2): 59-62.)
- [7] Bang K S, Kim W Y. Estimation and prediction of HAZ softening in thermos-mechanically controlled-rolled and accelerated-cooled steel[J]. Welding Journal 2002, 81 (8): 174-179.
- [8] Koo J Y, Luton M J, Bangaru N V *et al.* Metallurgical design of ultra-high strength steels for gas pipelines[J]. International Journal of Offshore & Polar Engineering 2004, 14 (1): 2-10.
- [9] Dong Xianchun, Zhang Nan, Chen Yanqing *et al.* Analysis of joints strength of high Ti and Nb precipitation strengthened high-strength steel and softening behavior of welding heat affected zone[J]. Transactions of the China Welding Institution 2012, 33 (11): 72-76.
(董现春, 张楠, 陈延清, 等. 高 Ti、Nb 析出强化高强钢接头强度及焊接热影响区软化行为分析[J]. 焊接学报 2012, 33 (11): 72-76.)
- [10] Hu Meijuan, Wang Peng, Han Xinli *et al.* The microstructure and properties of coarse grained heat affected zone for X80 high deformability pipeline steel[J]. Transactions of the China Welding Institution 2012, 33 (9): 93-96.
(胡美娟, 王鹏, 韩新利, 等. X80 级海底管线钢焊接粗晶区的组织和性能[J]. 焊接学报 2012, 33 (9): 93-96.)
- [11] Niu Jing, Chen Hongyuan, Liu Jia *et al.* Study on softening in HAZ and its influence on welded joints of X70 pipeline steel[J]. Hot Working Technology 2016, 45 (21): 176-179.

- (牛靖,陈宏远,刘甲等. X70 大变形钢焊接接头热影响区软化及其影响研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (21): 176-179.)
- [12] Chen Yanqing, Du Zeyu, Xu Lianghong. Microstructure and mechanical properties of heat affected zone for 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.)
- [13] Zhao Bo, Li Guopeng, Wang Xu *et al.* Thermal simulation experiments research on heat-affected zone embrittlement and softening of X80 pipeline steel [J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39 (3): 16-19.
(赵波, 李国鹏, 王旭等. X80 钢焊接热影响区脆化软化现象热模拟试验研究[J]. 焊管, 2016, 39 (3): 16-19.)
- [14] Jia Lu, Liu Yichun, Jia Shujun *et al.* Softening of heat affected zone of high-strain pipeline steel [J]. Materials Science and Technology, 2018, 26 (3): 37-44.
(贾璐, 刘意春, 贾书君等. 抗大变形管线钢热影响区软化问题的研究[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26 (3): 37-44.)
- [15] Jia Lu, Liu Yichun, Jia Shujun *et al.* Effect of heat input on microstructure and properties of welding heat affected zone of high-deformability pipeline steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (1): 126-131.
(贾璐, 刘意春, 贾书君等. 热输入对抗大变形管线钢焊接热影响区组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43 (1): 126-131.)
- [16] Hu Jun, Du Linxiu, Xie Hui *et al.* Effect of weld peak temperature on the microstructure, hardness and transformation kinetics of simulated heat affected zone of hot rolled ultra-low carbon high strength Ti-Mo ferritic steel [J]. Materials & Design, 2014, 60: 302-309.
- [17] Maurer W, Ernst W, Rauch R *et al.* Evaluation of the factors influencing the strength of HSLA steel weld joint with softened HAZ [J]. Welding in the World, 2015, 59 (6): 809-822.
- [18] Hamada M, Hirata H, Okaguchi S *et al.* Material design for line pipe steel to minimize HAZ softening and obtain good HAZ toughness [J]. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008, 18 (3): 204-210.
- [19] Mohtadi-Bonab M A, Eskandari M, Szpunar J A. Texture, local misorientation, grain boundary and recrystallization fraction in pipeline steels related to hydrogen induced cracking [J]. Materials Science & Engineering A, 2015(620): 97-106.

编辑 张继东

(上接第158页)

- [6] Yu Hongwei, Yang Bo, Li De *et al.* Tempering process control of low yield and tensile strength ratio quenched and tempered steel plate 12MnNiVR for oil storage tank [J]. Wide and Heavy Plate, 2014, 20 (2): 9-12.
(余宏伟, 杨波, 李德等. 低屈强比调质大罐钢板 12MnNiVR 的回火工艺控制[J]. 宽厚板, 2014, 20 (2): 9-12.)
- [7] Qi Qige, Yu Wei, Wu Huibin *et al.* Effect of tempering process on microstructure and mechanical properties of 12MnNiVR steel plate by direct quenching [J]. Hot Working Technology, 2008, 37 (24): 100-103.
(其其格, 余伟, 武会宾等. 回火工艺对在线淬火 12MnNiVR 钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2008, 37 (24): 100-103.)
- [8] Zhang Pengyan, Zhu Shuxun, Zhang Huiyun *et al.* Effects of DQ-T process on microstructure and mechanical properties of 12MnNiVR steel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33 (12): 1726-1730.
(张朋彦, 朱澍勋, 张慧云等. DQ-T 工艺对 12MnNiVR 钢组织和力学性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33 (12): 1726-1730.)
- [9] Li Xinling, Qiao Xin, Gao Qiang. Online cooling technology of oil tanker steel 12MnNiVR [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23 (Supplement 1): 152-158.
(李新玲, 乔馨, 高强. 石油储罐用钢 12MnNiVR 在线冷却工艺研究[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (增刊1): 152-158.)
- [10] Zheng Dongsheng. Industrialized production of direct quenching steel 12MnNiVR in NISCO [J]. Wide and Heavy Plate, 2016, 22 (5): 10-13.
(郑东升. 在线淬火 12MnNiVR 钢在南钢的工业化生产[J]. 宽厚板, 2016, 22 (5): 10-13.)
- [11] Vinay Kumar Yadav, Vidit Gaur, Singh I V. Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and fatigue crack growth rate in welded AA-2024 [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 779: 1-10.
- [12] Yang Han, Zhao Wengui, Hua Yanping *et al.* Weldability of 610 MPa grade high strength plate steel 12MnNiVR for oil storage tanks [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18 (Supplement 1-2): 769-772.

编辑 杨冬梅