

元素 Nb 对 TiNbV 微合金钢 CGHAZ 组织与冲击韧性影响

闫涵^{1,3}, 赵迪¹, 祁同福¹, 冷雪松², 付魁军², 胡奉雅²

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山, 114009; 3. 谢菲尔德大学机械工程系, 谢菲尔德, S10 2TN UK, 英国)

摘要: 利用焊接热模拟研究 Nb 元素含量对 TiNbV 微合金钢焊接热影响粗晶区 (CGHAZ) 组织和性能的影响。低铌钢和高铌钢在经历焊接热循环后微观组织构成及晶粒尺寸有显著差异。Nb 元素含量为 0.005% 时焊接 CGHAZ 组织为铁素体和针状铁素体以及珠光体, 大角度晶界和小角度晶界的晶粒比例相当, 焊接 CGHAZ 晶粒尺寸粗大不均匀。随着 Nb 元素含量的增加, 大角度晶界的晶粒数量有所增加, 晶粒得到细化。但是, 针状铁素体形成受到抑制, CGHAZ 中贝氏体含量增加。微合金钢中贝氏体的形成对焊接 CGHAZ 冲击韧性的下降起主导作用, Nb 元素的含量控制在合适范围内 (~0.02%), 可以保证 CGHAZ 具有良好的冲击韧性。

关键词: TiNbV 微合金钢; 焊接热影响粗晶区; Nb 元素; 微观组织; 冲击韧性

中图分类号: TG 421

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200906001

0 序言

TiNbV 微合金钢具有较高强度和冲击韧性, 广泛应用于海洋工程、船舶、高层建筑等工程领域。随着国内海洋工程装备的快速发展, 海洋平台的建设也逐渐向大型化的方向发展, 焊接结构尺寸也随之增大, 为了提高生产效率, 大线能量焊接技术应运而生^[1-2]。在大线能量焊接条件下, 焊接热影响区粗晶区 (coarse grain heat-affected-zone, CGHAZ) 奥氏体晶粒粗大, 组织会急剧粗化, 对焊接接头的韧性有不利影响^[3-5]。通过微合金化向钢中添加 Ti, Nb, V 等合金元素是改善大线能量焊接性能的有效手段。

钛与氮、碳都有极强的亲和力, 是一种良好的固定氮和碳的有效元素。Ti (C,N) 化物与针状铁素体具有良好的晶格匹配, 能有效促进针状铁素体形核^[6]。钒与碳、氮等元素也有极强的亲和力, 与 Ti (C, N) 化合物相比, VN 化合物与针状铁素体晶格

失配要低得多, 因此 VN 作为针状铁素体的形核质点比 TiN 化合物更有潜力^[7]。在实际生产中, 钢中经常同时添加 Ti 元素和 V 元素, 由于富钛颗粒的钉扎效应及细小分散的富 V 元素颗粒产生的沉淀强化作用, 二者相互作用可实现晶粒尺寸的有效控制^[8-9]。

Nb 元素是微合金钢冶金成份中的重要组成部分, 其主要作用是形成碳氮化物, 促进沉淀强化。Nb 元素的沉淀强化作用是 V 元素的 2 倍, 是 Ti 元素的 10 倍。同时 Nb 元素也可以在一定程度上抑制奥氏体晶粒粗化, 阻止奥氏体再结晶^[10-13]。

在低合金高强钢中, Nb 的添加量一直是同行学者关注的核心问题, 并在 Nb 的添加量对低合金高强钢组织和性能的影响方面, 获得了一些有益结果。有人研究了在模拟焊接热循环过程中微合金钢 CGHAZ 中奥氏体晶粒尺寸变化, 发现含 Nb 元素 (0.015%) 微合金钢中奥氏体晶粒会突然长大, 而不含 Nb 元素钢却没有这个现象^[14]。在微合金钢中, 当 Nb 元素含量增至 0.026% 时, 会降低贝氏体转变的温度, 促进贝氏体形成, 导致 CGHAZ 冲击韧性降低^[15-17]。同时还发现 Nb 元素的添加将会影响微合金钢中第二相粒子析出行为, 在 0.02%Nb 元素含量的微合金钢中会形成 (Ti, Nb)(N, C) 复合粒子, 其稳定性弱于 TiN 粒子, 在高温下更易粗化,

收稿日期: 2020-09-06

基金项目: 国家科技支撑项目 (2006BAE03A15); 海洋装备用金属材料国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLMEA-K201702, SKLMEA-K201802)。

这会削弱钉扎奥氏体晶界的作用^[18]. 当 Nb 含量增至 0.06% 时, 体系中存在的细小弥散分布的 Nb (C, N) 颗粒, 能有效细化奥氏体晶粒^[19]. 通过进一步与低 Nb 钢 (0.05%) 对比分析, 发现含 Nb 钢 (0.1%) 的粗晶区范围更窄, 且粗晶区内的晶粒尺寸和 Nb (C, N) 析出尺寸都比较小^[20].

目前在含 Nb 微合金钢的大线能量焊接 CGHAZ 的组织性能研究方面, 已经取得了一些成果. 但是对于高 Nb 钢的 CGHAZ 性能尚存争议, 这主要是因为关于 Nb 元素含量与微合金钢焊接 CGHAZ 晶粒尺寸、物相组成和冲击韧性之间的关系尚不清楚, 导致微合金钢冶炼成分设计缺乏依据. 为此文中采用电子背散射衍射 (EBSD), 分析了不同 Nb 含量微合金钢模拟焊接热循环后 CGHAZ 的相组成和晶粒尺寸变化规律. 在此基础上深入研究了不同 Nb 含量对模拟焊接热循环后 CGHAZ 冲击性能的影响.

表 1 微合金钢的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the micro-alloyed steels

试样	C	Si	Mn	Nb	V	Ti	Fe
A	0.088	0.23	1.52	0.005	0.005 0	0.014	余量
B	0.079	0.20	1.45	0.021	0.005 0	0.014	余量
C	0.093	0.23	1.53	0.036	0.005 0	0.014	余量

热模拟试样加工成尺寸为 55 mm × 10 mm × 10 mm 标准的 V 形缺口冲击试样, 按 GB/T 229—2007 标准在型号为 JBDW-300D 的冲击试验机进行 -40 ℃ 条件下的冲击试验, 每组试验重复三次^[21].

2 结果与讨论

2.1 CGHAZ 微观组织 EBSD 表征

图 1 为不同 Nb 含量微合金钢 CGHAZ 的 EBSD 晶粒图及对应的晶界分布图. 从图 1 可以看出, 在经历焊接热循环后 CGHAZ 微观组织及晶粒尺寸有显著差异. 当 Nb 元素含量为 0.005% 时, CGHAZ 的组织为铁素体和针状铁素体及珠光体, 晶粒尺寸有较大差异且不均匀 (图 1a); 当 Nb 含量为 0.021% 时, CGHAZ 的相组成并没有明显变化 (图 1c), 晶粒尺寸有减小趋势且差异变小; 当 Nb 含量增加到 0.036% 时, CGHAZ 的组织组成发生显著变化, 主要是一定含量贝氏体的出现, 且晶粒尺寸明显发生

1 试验材料与方法

文中研究所用的微合金钢是鞍钢集团提供的, 其化学成分如表 1 所示. 试样加工成尺寸为 105 mm × 10 mm × 10 mm, 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行模拟焊接热影响区试验, 所选取的大线能量焊接热输入约为 100 kJ/cm, 其 CGHAZ 的热循环参数大致为: 加热速度 500 ℃/s, 峰值温度为 1250 ℃, 高温停留时间 1 s, $t_{8/5}$ 为 200 s. 采用 Quanta 200FEG 场发射型扫描电镜对热模拟试验后的试样进行 EBSD 组织观察及分析. EBSD 试验数据采集及结果分析采用美国 EDAX 公司提供的 TSL/OIM V6.0 软件包. 利用相图和晶粒图共同判定组织中各物相种类, 利用 Image pro plus 软件统计各物相相对含量. 以相邻晶粒位相差 (θ) 大于 15° 定义为大角度晶界, $2^\circ < \theta < 15^\circ$ 定义为小角度晶界.

细化 (图 1e). 从晶界分布图图 1b, 1d, 1f 中可以看出随着 Nb 含量增加, 大角度晶界呈现先增加后降低趋势. 当 Nb 含量为 0.021% 时, 大角度晶界所占比例达到最大 80.6% (图 2). 大角度晶界对钢低温冲击韧性具有有益作用, 当裂纹穿过大角度晶界需要消耗更多能量, 阻止裂纹传播^[22-23].

2.2 CGHAZ 微观组织物相及晶粒尺寸统计

图 3 为经过热循环后不同 Nb 元素含量微合金钢 CGHAZ 物相组成及晶粒尺寸数据统计结果. 从图 3 中可以看出, 在添加不同 Nb 元素含量微合金钢中, CGHAZ 组织中铁素体含量变化不明显, 但是针状铁素体和贝氏体含量变化较大. 当 Nb 元素含量为 0.005% 时, 针状铁素体含量为 17.3%, 随着 Nb 元素含量的增加, 针状铁素体呈现先增加后减小趋势. 当 Nb 元素含量为 0.021% 时, 针状铁素体含量达到最大值 (23.47%). 而贝氏体呈明显增加趋势, 当 Nb 元素含量为 0.005% 时, 贝氏体含量比较少 (0.14%), 随着 Nb 元素含量由 0.021% 增加到

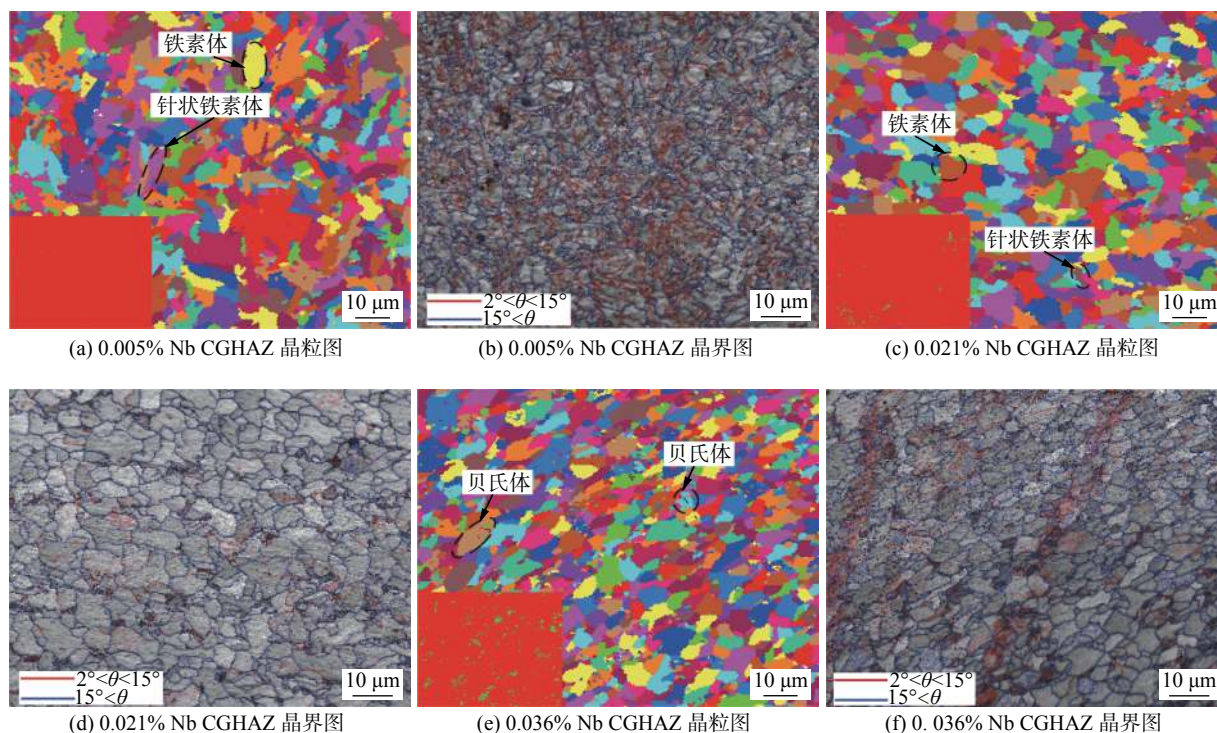


图 1 不同 Nb 元素含量 CGHAZ 的 EBSD 晶粒图及晶界分布图

Fig. 1 EBSD grain image and grain boundary of CGHAZ with Nb content. (a) grain image of CGHAZ with 0.005% content; (b) grain boundary of CGHAZ with 0.005% content; (c) grain image of CGHAZ with 0.021% content; (d) grain boundary of CGHAZ with 0.021% content; (e) grain image of CGHAZ with 0.036% content; (f) grain boundary of CGHAZ with 0.036% content

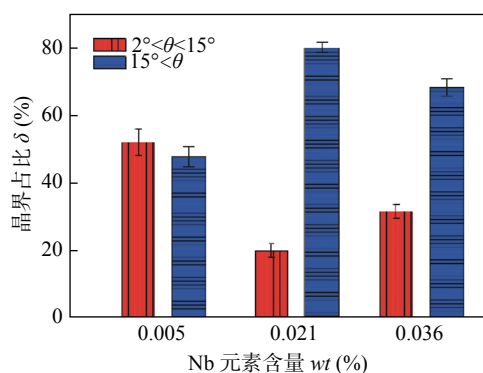


图 2 不同 Nb 含量 CGHAZ 的晶界分布规律

Fig. 2 Relative content of grain boundary in the microalloyed steels with different Nb content

0.036%, 贝氏体含量显著增加, 由 3.67% 增加到 8.75%。此外从图 3 中还可以看出, 晶粒发生一定程度的细化, 随着 Nb 元素含量的增加平均晶粒尺寸从 9.4 μm 减小到 5.3 μm 。

2.3 CGHAZ 冲击韧性测试结果

图 4 为不同 Nb 含量的微合金钢经过相同的大线能量焊接热循环后, 在试验温度为 -40°C 的条件下的冲击吸收能量。从图 4 中可以看出, 元素 Nb 含量较低或较高时, 焊接 CGHAZ 冲击韧性均较低, 较低元素 Nb 含量 (0.005%Nb) 比较高 (0.036%

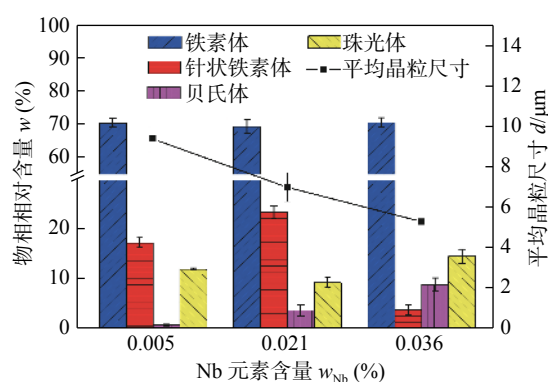


图 3 不同 Nb 含量微合金钢物相组成及晶粒尺寸

Fig. 3 Average grain size and microconstituents content of CGHAZ with different Nb content

Nb) 的冲击韧性略高; 当元素 Nb 含量适中时 (0.021% Nb), 焊接 CGHAZ 冲击吸收能量最大 (248 J)。

2.4 晶粒尺寸、相组成和冲击韧性之间的关系

在微合金钢中添加 Nb 元素, 由于 Nb 在 Fe 中的固溶度低, 多余的 Nb 元素可以与钢中的钛、碳和氮元素形成 (Ti, Nb)CN 化合物, 提高钢的强度并能有效细化晶粒。其机制为元素 Nb 在钢中主要以固溶态和析出态两种形式存在, 固溶态的 Nb 产生拖拽作用能够阻碍奥氏体与铁素体界面的迁移, 抑

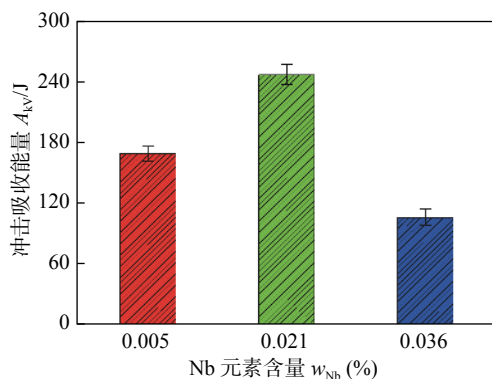


图 4 不同 Nb 元素含量的微合金钢焊接 CGHAZ 冲击韧性
Fig. 4 Impact toughness of micro-alloyed steel with different Nb content

制铁素体形核和长大,析出的 (Ti, Nb)CN 化合物钉扎晶界能够有效细化奥氏体晶粒。

在微合金钢中, Nb 元素含量过低, (Ti, Nb)CN 化合物的析出量少,只是固溶态的 Nb 对一定量的奥氏体晶粒的长大产生抑制作用,呈现出大角度晶界和小角度晶界的晶粒比例相当,部分晶粒得到细化,晶粒尺度较大而且表现出不均匀特征。虽然奥氏体相变中出现了贝氏体,但是贝氏体的数量较少,对 CGHAZ 冲击韧性的影响也较小,不均匀的粗晶组织是影响焊接 CGHAZ 冲击韧性下降的主要因素。

在微合金钢中, Nb 元素含量过高,作为第二相粒子的 (Ti, Nb)CN 化合物析出量多,弥散分布,对奥氏体晶粒粗化产生强烈的抑制作用,表现出大角度晶界的晶粒数量有所增加,呈现出均匀细小的晶粒分布特点。但是析出的 (Ti, Nb)CN 化合物数量偏大,抑制针状铁素体形成,促进珠光体形成,诱发更多的贝氏体形成,造成 CGHAZ 冲击韧性下降。因此,过多贝氏体的形成是影响焊接 CGHAZ 冲击韧性下降的主要因素。

综上所述,在微合金钢中 Nb 元素的含量对于焊接 CGHAZ 的冲击韧性有着至关重要的作用。Nb 元素的含量控制在合适范围内 ($\sim 0.02\%$),大角度晶界的晶粒占比大,晶粒得到一定程度的细化,有充足的针状铁素体形成,少量的贝氏体形成,才可以有效地提高焊接 CGHAZ 的冲击韧性。

3 结论

(1) Nb 元素含量为 0.005% 微合金钢经焊接热循环后,焊接 CGHAZ 组织主要为铁素体和针状

铁素体以及珠光体,随着 Nb 元素含量的增加到 0.021% 时,组织中出现了少量的贝氏体,当 Nb 含量继续增加至 0.036% 时,其组织主要为铁素体、珠光体和贝氏体。

(2) 微合金钢中的 (Ti, Nb)CN 第二相粒子对焊接 CGHAZ 晶粒尺寸影响较大。随着 Nb 元素含量增加, (Ti, Nb)CN 第二相粒子的数量增加,焊接 CGHAZ 晶粒得到细化,平均晶粒尺寸由 $9.4\ \mu\text{m}$ 减小到 $5.3\ \mu\text{m}$ 。

(3) 微合金钢中贝氏体的形成对焊接 CGHAZ 冲击韧性的下降起主导作用,元素 Nb 的含量控制在合适范围内 ($\sim 0.02\%$),才可以保证良好的焊接 CGHAZ 的冲击韧性。

参考文献

- [1] 李静, 王华, 曲圣昱, 等. 焊接热循环参数对大线能量焊接用钢 EH40 热影响区组织和性能的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(7): 788 – 792.
Li Jing, Wang Hua, Qu Shengyu, *et al.* Effect of welding thermal cycle parameters on the microstructure and properties in the heat affected zone of steel EH40 for high heat input welding[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(7): 788 – 792.
- [2] Bonnevie E, Ferriere G, Ikhlef A, *et al.* Morphological aspects of martensite-austenite constituents in intercritical and coarse grain heat affected zones of structural steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 385(1–2): 352 – 358.
- [3] 佟倩, 崔京玉, 柳洋波, 等. Nb 含量对 20CrMnTiH 钢奥氏体晶粒长大行为的影响 [J]. 金属热处理, 2014, 39(7): 9 – 42.
Tong Qian, Cui Jingyu, Liu Yangbo, *et al.* Effect of Nb content on growth law of austenite grain in 20CrMnTiH steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(7): 9 – 42.
- [4] 卢峰. V-N-Ti、Nb-V-Ti 钢焊接粗晶区组织演变及对韧性的影响 [D]. 安徽: 安徽工业大学, 2016.
Lu Feng. Study on the microstructure evolution and toughness property of coarse grained heat affected zone in the V-N-Ti and Nb-V-Ti[D]. An Hui: Anhui University of Technology steels, 2016.
- [5] 付魁军, 赵靖玮, 高铭泽, 等. TiNbV 微合金钢焊接接头 HAZ 晶粒长大及相变原位观察 [J]. 焊接学报, 2020, 41(3): 17 – 22.
Fu Kuijun, Zhao Jingwei, Gao Mingze, *et al.* Grain growth and phase transformation in the welded joint HAZ of TiNbV microalloyed steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(3): 17 – 22.
- [6] Zhang D, Terasaki H, Komizo Y I. In situ observation of the formation of intragranular acicular ferrite at non-metallic inclu-

- sions in C-Mn steel[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(4): 1369 – 1378.
- [7] Zhang L, Thomas, Kannengiesser. Austenite grain growth and microstructure control in simulated heat affected zones of microalloyed HSLA steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 613: 326 – 335.
- [8] Hu J, Du L X, Wang J J. Effect of V on intragranular ferrite nucleation of high Ti bearing steel[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(12): 953 – 956.
- [9] Li Y, Crowther D N, Green M J W, *et al.* The effect of vanadium and niobium on the properties and microstructure of the intercritically reheated coarse grained heat affected zone in low carbon microalloyed steels[J]. *Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan*, 2001, 41(1): 46 – 55.
- [10] 吴斯, 李秀程, 张娟, 等. Nb 对中碳钢相变和组织化的影响 [J]. *金属学报*, 2014, 50(4): 16 – 24.
- Wu Si, Li Xiucheng, Zhang Juan, *et al.* Effect of Nb on transformation and microstructure refinement in medium carbon steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(4): 16 – 24.
- [11] Chen X W, Liao B, Qiao G Y, *et al.* Effect of Nb on mechanical properties of HAZ for high-Nb X80 pipeline steels[J]. *Journal of Iron & Steel Research International*, 2013, 20(12): 53 – 60.
- [12] 尹桂全, 高甲生, 洪永昌, 等. 微量 Nb 对微 Ti 钢焊接 HAZ 奥氏体晶粒长大的影响 [J]. *焊接学报*, 1998, 19(1): 13 – 18.
- Yin Guiquan, Gao Jiasheng, Hong Yongchang, *et al.* Effect of Nb addition on austenite grain growth in HAZ of minor Ti bearing steels[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1998, 19(1): 13 – 18.
- [13] 尹桂全, 高甲生, 洪永昌, 等. 低碳 Ti-Nb 系列钢焊后显微组织和性能 [J]. *焊接学报*, 2001, 22(2): 71 – 74.
- Yin Guiquan, Gao Jiasheng, Hong Yongchang, *et al.* The microstructure and toughness of HAZ in low carbon Ti-Nb seriessteels after welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(2): 71 – 74.
- [14] 于庆波, 张仲波, 李子林, 等. Nb 对低碳钢奥氏体晶粒大的影响 [J]. *钢铁*, 2006, 41(12): 70 – 74.
- Yu Qingbo, Zhang Zhongbo, Li Zilin, *et al.* Effect of Nb on austenite grain growth of low carbon steel[J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(12): 70 – 74.
- [15] 张英乔, 张汉谦, 赵四新, 等. 铌对高强结构钢大热输入接热影响区组织和性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2008, 29(9): 96 – 100.
- Zhang Yingqiao, Zhang Hanqian, Zhao Sixin, *et al.* Effects of Nb on microstructure and toughness of high-strength structural steels heat affected zone at high heat input[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(9): 96 – 100.
- [16] 张英乔, 薛飞飞, 丁玲芳, 等. 610 MPa 级高强度大热输入焊接热影响区的组织与性能 [J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(10): 72 – 76.
- Zhang Yingqiao, Xue Feifei, Ding Lingfang, *et al.* Microstructure and properties of heat affected zone at high heat input for 610 MPa class high strength steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(10): 72 – 76.
- [17] Wang, G R, North, T H, Leewis K G. Microalloying additions and HAZ fracture toughness in HSLA steels[J]. *Welding Journal*, 1990, 69(1): 14 – 22.
- [18] Moon, J, Kim, S, Jeong, H, *et al.* Influence of Nb addition on the particle coarsening and microstructure evolution in a Ti-containing steel weld HAZ[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 454: 648 – 653.
- [19] DeArdo A J, Gray J M, Meyer L. *Fundamental metallurgy of niobium in steel*[M]. San Francisco, CA: TMS-AIME, 2001.
- [20] 缪成亮, 刘振伟, 郭晖, 等. Nb 含量和热输入量对 X80 管线钢焊接粗晶区的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2012, 33: 99 – 105.
- Miao Chengliang, Liu Zhenwei, Guo Hui, *et al.* Effect of Nb content and heat input on coarse-grained welding heat affected zone of X80 pipeline steels[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012, 33: 99 – 105.
- [21] 付魁军, 高铭泽, 冷雪松, 等. TiNb 钢焊接热影响区微观组织与冲击性能演变规律 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(5): 42 – 47.
- Fu Kuijun, Gao Mingze, Leng Xuesong, *et al.* Evolution of microstructure and impact property in welding HAZ of TiNb steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(5): 42 – 47.
- [22] Zhou P S, Wang B, Wang L, *et al.* Effect of welding heat input on grain boundary evolution and toughness properties in CGHAZ of X90 pipeline steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 722: 112 – 121.
- [23] Wang C, Wang M, Shi J, *et al.* Effect of microstructural refinement on the toughness of low carbon martensitic steel[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58: 492 – 495.

第一作者简介: 闫涵, 1996 年出生, 硕士; 主要从事增材制造研究; Email: dzhaophd@163.com.

通信作者简介: 付魁军, 教授级高级工程师; Email: agfkj63@163.com.

(编辑: 朱艳)