

X80 管线钢埋弧焊接头冲击韧性及其断口形貌分析

Analysis of Impact Toughness and Fracture Morphologies of X80 Pipeline Steel Welded Joints with Submerged-arc Welding

孔德军, 龙 丹, 吴永忠, 叶存冬

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016)

KONG De-jun, LONG Dan, WU Yong-zhong, YE Cun-dong

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University,

Changzhou 213016, Jiangsu, China)

摘要: 对 X80 管线钢埋弧焊焊接接头进行了 $-80\sim 20^{\circ}\text{C}$ 温度范围的夏比冲击实验。测试了其冲击吸收功和脆性断面率, 用扫描电镜观察了其断口形貌, 分析了焊接接头断裂形式和断口形貌, 讨论了焊接接头的韧脆转变温度和冲击断裂的力学行为。结果表明, 室温时断口为韧窝状分布, 焊接接头的韧脆转变温度为 -28°C ; 断口形貌由韧性断裂向脆性断裂转变, 断口主要表现为解理断裂。

关键词: X80 管线钢; 焊接接头; 冲击韧性; 韧脆转变温度; 断口形貌

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.06.010

中图分类号: TG405 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)06-0050-05

Abstract: The Charpy impact test at temperature range of $-80\sim 20^{\circ}\text{C}$ was conducted for X80 pipeline steel welded joints fabricated with submerged-arc welding. The impact absorption energy and brittle section rates were tested, and the fracture morphologies were observed with Scanning Electron Microscopy (SEM). The fracture modes and fracture morphologies of X80 pipeline steel joints were analyzed, and the ductile-brittle transition temperature of the joints and mechanical behaviors of the impact fractures were studied. The results show that the fracture at room temperature occurred in dimple fracture mode, and the ductile-brittle transition temperature of the joint was -28°C . The fracture characteristics were changed from toughness to brittleness fracture, and the joint fractured mainly in cleavage mode.

Key words: X80 pipeline steel; welded joint; impact toughness; ductile-brittle transition temperature; fracture morphology

管线运输是长距离输送石油、天然气最经济合理的运输方式, 石油天然气需求量的增加, 使得管道的输送压力和管径不断增大, 推动了管线钢进一步向大口径、高强度、高韧性、优良焊接性发展^[1-3]。目前 X70 级管线钢已经在西气东输重大工程中得以广泛应用, X80 级管线钢在西气东输复线中也已经得到了应用, 但普及率较低^[4]。由于油气输送管线的建设实质上是一项大规模的焊接成形(制管)和长距离的焊接安装工程(现场环焊), 其焊接接头质量在很大程度上决定了工程质量^[5]。管线设计和安全评定主要使用平面应变韧性

的韧脆转变温度决定了材料低温韧性的优劣, 是衡量材料韧脆性转变倾向的重要指标^[6]。夏比冲击性能作为评价管线钢焊接接头韧性的重要依据, 反映了在剧烈冲击载荷下裂纹启裂及扩展过程, 是管道设计所必须考虑的重要因素^[7,8], 因此, 有关冲击韧性控制因素的研究一直是高强韧管线用钢研究的热点之一。由于焊接过程中常常在焊条中添加一定量的合金元素, 以提高焊接接头的强度, 而合金元素的固溶强化作用降低了其韧性, 对于 X80 管线钢的冲击韧性研究已有相关成果发表^[9,10], 但 X80 管线钢焊接接头的冲击韧性却尚未见报道。作者在 X80 管线钢焊接接头处制

备夏比 U 型缺口,在不同温度下对其进行冲击实验,确定其韧脆转变温度,利用扫描电镜对其断口形貌进行分析,探讨了 X80 管线钢焊接接头断裂机理。

1 实验方法

实验材料为 X80 卷板,其力学性能: $R_{10.5} = 555 \sim 675 \text{ MPa}$, $R_m \geq 625 \text{ MPa}$ 。焊接方法为双面埋弧自动焊,焊丝牌号: BHM-10,焊丝直径: 4mm,焊接电流: 680~920A,电弧电压 32~38V,焊后焊缝宽度 14~22mm。X80 管线钢焊接接头表面金相组织如图 1(a)所示,焊接接头宽度 21~22mm,是由焊缝区、熔合区、热影响区三个相区组成。熔合区、热影响区对称分布于焊缝区两侧,中间区域为焊缝区,组织比较粗大,成

分偏析,组织不致密。靠近焊缝区为熔合区,化学成分不均匀,是粗大的过热或淬硬组织。靠近熔合区的区域为热影响区,此区晶粒大小均匀,力学性能好。焊接接头截面金相组织如图 1(b)所示,焊接坡口为 X 型,内外焊缝高约 1.4~1.7mm,焊缝表面过渡平缓,焊接金相组织成树枝状对称分布。冲击实验设备为 ZBC2752-B 冲击实验机,试样尺寸为 50mm×10mm×10mm,如图 1(c)所示。在接头焊缝中心处制备夏比 U 型缺口,对 X80 管线钢焊接接头进行 -80~20℃ 温度范围的冲击实验。用 JSM-6360LA 扫描电镜观察其断裂后断口形貌,测量计算脆性区面积,计算脆性断面率 $\phi_{\text{brittleness}} = \frac{S_{\text{brittleness}}}{S_{\text{fracture}}} \times 100\%$,结合断口测试温度与冲击功的关系,确定 X80 管线钢焊接接头韧脆转变温度。

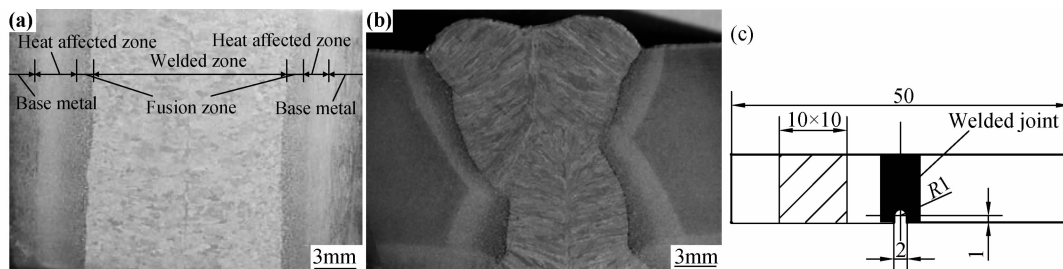


图 1 X80 管线钢焊接接头显微组织与冲击试样

(a)表面;(b)断面;(c)冲击试样

Fig. 1 Microstructures of X80 pipeline steel welded joint and impact specimen

(a)surface;(b)section;(c)impact sample

2 实验结果与分析

2.1 断裂形式

冲击实验温度为 20℃ 时,X80 管线钢焊接接头断口塑性变形明显,崎岖不平,呈现片状分布,出现撕裂棱,如图 2(a)所示。在实验温度为 0℃ 时,断口仍可见塑性变形,并呈现阶梯样的层状分布(见图 2(b))。当实验温度为 -20℃ 时,断口大部分区域比较平整,少数区域呈现高低不平的凹凸状(见图 2(c))。当实验温度为 -40℃ 时,断口整个区域都比较平整,并依然可见浅浅的缝隙(见图 2(d))。当实验温度降为 -60℃ 时,断口整个区域较为平坦,高低不平程度略轻(见图 2(e))。当实验温度为 -80℃ 时,整个断口平整,缝隙和空洞较为少见(见图 2(f))。上述实验结果表明,冲击实验温度越高,原子位移的能量增加,原子活动增加,位错越容易滑移,因此,断口越容易发生塑性变形。当实验温度在 20~-20℃ 之间,实验材料断口呈现塑性断裂形式,断口崎岖不平,出现不同程度的分层开裂。实验温度越高,断口崎岖不平程度也越为明显,塑性变

形也越明显。当实验温度在 -40~-80℃ 之间,实验材料断口呈现脆性断裂,随着实验温度的降低,断口也越为平整,缝隙和孔洞相应减少,脆性断裂现象也越为明显。

2.2 断口形貌

实验温度为 20℃ 时,断口形貌呈现出大量均匀分布的较大较深等轴样的韧窝,并伴有撕裂棱(见图 3(a))。当温度降低至 0℃ 时,断口形貌为尺寸大小不一的韧窝,并伴有少量撕裂棱(见图 3(b))。与图 3(a)相比,图 3(b)所呈现的韧窝尺寸较小,说明此温度下焊接接头的冲击韧性有所下降。实验温度为 -20℃ 时,断口表现为准解理断裂,断口由解理断口和小部分韧窝断口组成(见图 3(c))。当实验温度降为 -40℃ 时,断口主要呈现河流状的解理断裂,只有少量的韧窝,有些韧窝分布在河流状区域(见图 3(d))。实验温度为 -60℃ 时,断口全部呈现出河流状的解理断口,几乎观察不到韧窝(见图 3(e))。当实验温度降至 -80℃ 时,断口呈现出解理断裂(见图 3(f))。实验结果表明,随着实验温度升高,试样韧性增强,试样的内

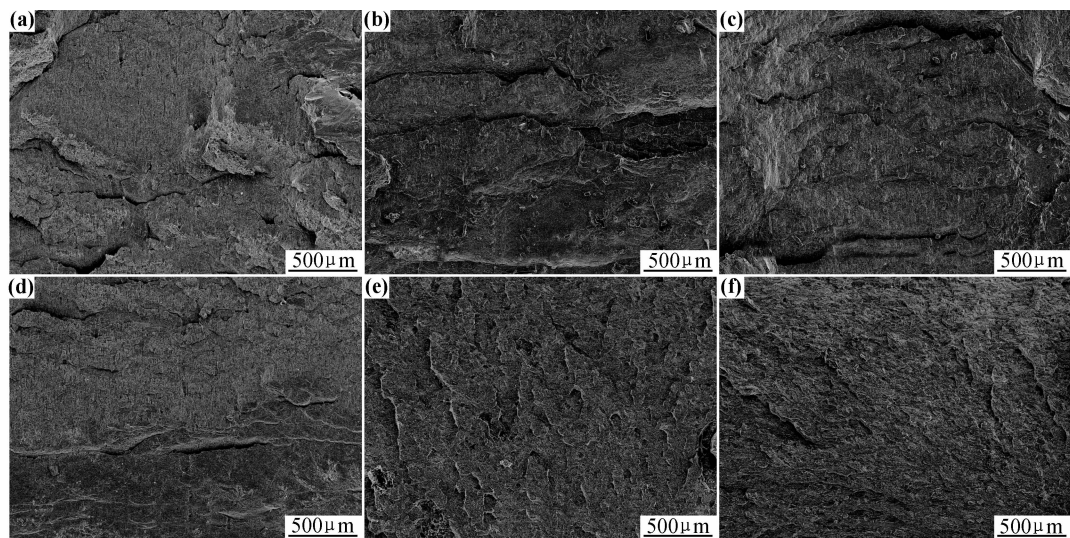


图 2 焊接接头低倍断口形貌及其断裂模式
(a)20℃;(b)0℃;(c)-20℃;(d)-40℃;(e)-60℃;(f)-80℃

Fig. 2 Fracture morphologies under low magnification and fracture modes of the welded joints
(a)20℃;(b)0℃;(c)-20℃;(d)-40℃;(e)-60℃;(f)-80℃

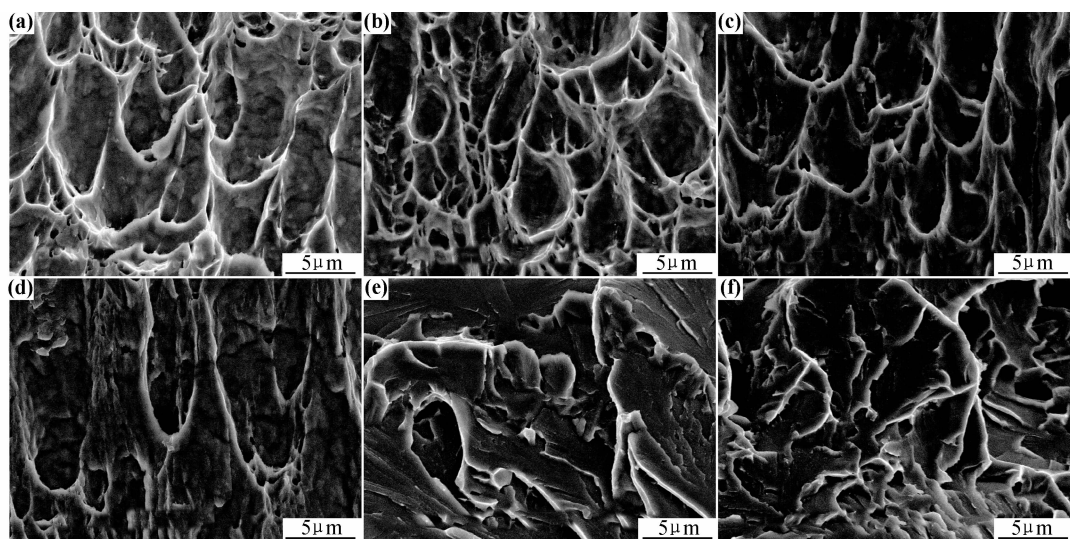


图 3 焊接接头断口形貌
(a)20℃;(b)0℃;(c)-20℃;(d)-40℃;(e)-60℃;(f)-80℃

Fig. 3 Fracture morphologies of the welded joints
(a)20℃;(b)0℃;(c)-20℃;(d)-40℃;(e)-60℃;(f)-80℃

部位错密度会随着韧性增强而增大。其中晶粒位错是晶体材料的一种内部微观缺陷,它与析出相和夹杂物一样,能形成微裂纹源,引起微裂纹集中,从而使断口表面呈现韧窝。因此,在较高的温度下,断口呈现韧窝型的韧性断裂。当实验温度为 20℃和 0℃时,断口形貌主要是韧窝,且大多数韧窝呈现一定的方向性,属于撕裂韧窝。在实验温度为-20~-40℃时,试样断口形貌有少量韧窝,大部分区域为解理断口。当温度降到-40℃以下时,断口处已经观察不到韧窝,主要是解理断裂。这

说明随着实验温度的降低,试样的塑性下降,发生了由塑性向脆性的转变。

2.3 韧脆性分析

图 4 为 X80 管线钢焊接接头温度与冲击吸收功和脆性断面率的关系。当温度从 20~-80℃转变过程中,冲击吸收功明显下降,同时脆性断面率也明显下降。当温度为-80℃时,冲击功为 42J,符合焊接接头标准试样吸收能量≥40J 的要求,其脆性断面率为 88%。当温度上升到 20℃时,冲击功变为 97J,脆性断

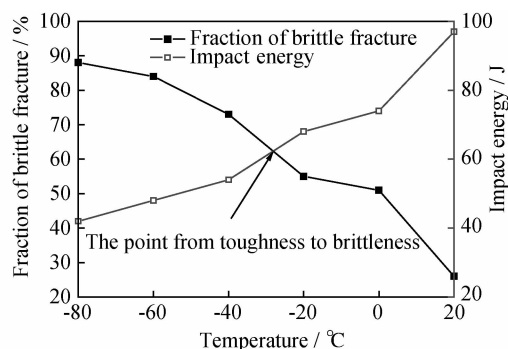


图4 冲击吸收功和脆性断面率与测试温度的关系

Fig. 4 Impact absorption energy and brittleness section rate vs testing temperatures

面率仅为 26%。在 $-40 \sim 20^\circ\text{C}$ 之间, 冲击功和断面率变化最为敏感, 是整个折线坡度最大的地方, 同时两曲线相交处, 即温度为 -28°C , 此温度亦为韧脆转变温度, 此时试样的冲击功为 58J。试样承受的冲击功越大, 表示试样的韧性越好, 同样的材料在不同的环境温度下, 其冲击吸收功不同, 这说明环境温度影响着材料的韧性, 温度越高, 冲击吸收功越大。

图 5 为韧脆性断口形貌与测试温度的变化关系图。由图 5(a)~(c) 可见, 断口呈现韧窝状, 这种断裂方式属于韧性断裂。温度从 20°C 下降到 -20°C 时, 韧窝的尺寸和深度也相应地减小, 韧性断裂现象明显下降。由图 5(d)~(f) 可见, 断裂后形成的撕裂

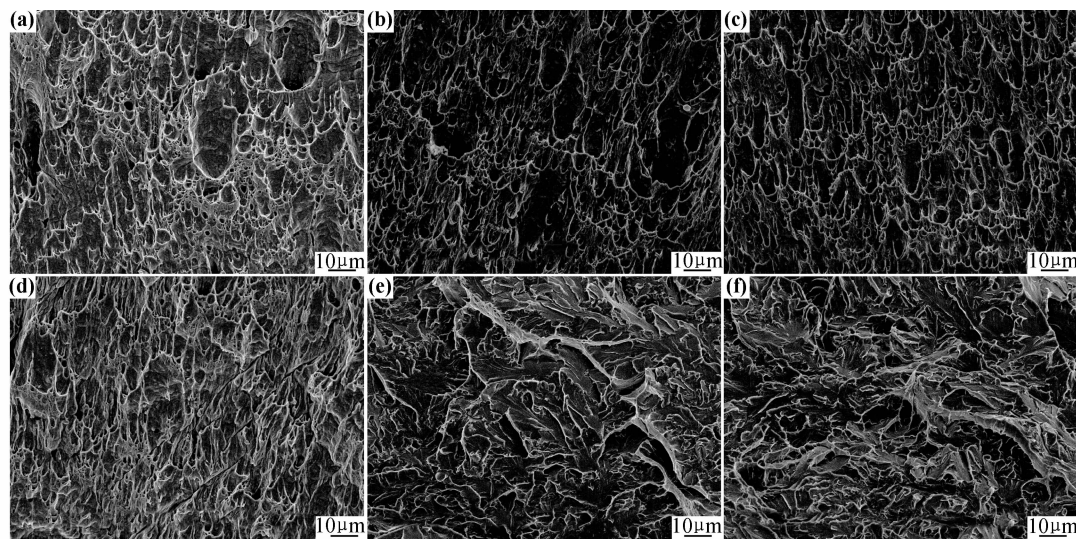
图5 不同测试温度下韧脆性断口特征 (a) 20°C ; (b) 0°C ; (c) -20°C ; (d) -40°C ; (e) -60°C ; (f) -80°C

Fig. 5 Toughness-brittleness fracture morphology characteristics of the welded joints under different testing temperatures

(a) 20°C ; (b) 0°C ; (c) -20°C ; (d) -40°C ; (e) -60°C ; (f) -80°C

棱将河样区域分离, 断口主要呈现河样状的解理断裂形貌, 属于脆性断裂。当实验温度从 -40°C 下降到 -80°C 时, 断口的解理断裂形貌也随之越明显。实验温度为 -20°C 时 (见图 5(c)), 断口的脆性部分将近 50%, 说明此温度已经接近实验材料的韧脆转变温度。随着温度降低, 冲击断口的韧窝尺寸由深及浅, 进而转变为河流状脆性断口。X80 管线钢焊接接头的韧脆转变温度在 $-20 \sim -40^\circ\text{C}$ 之间, 这与图 4 中分析结果一致。

2.4 分析与讨论

韧脆转变温度主要是由冲击功和断口形貌来确定的。从冲击功来说, 当冲击值降低至正常冲击功的 50%~60%, 此温度作为实验材料的韧脆转变温度。由冲击断口观察, 可以将试样的结晶状脆性断口占 50% 时的冲击实验温度, 作为焊接接头的韧脆转变温度。由图 4 中冲击实验结果可知, 室温 20°C 时, X80

管线钢焊接接头的冲击韧性较好, 其冲击功可达 97J, 当温度低于韧脆转变温度 -28°C 时, 试样由韧性断裂变为脆性断裂, 其冲击功为 58J。根据 Kozasu 提出的表达式^[11], 可以确定韧脆性转化温度

$$F_{\text{ATT}} = A + B\sigma_{\text{ss}} + C\sigma_{\text{p}} + D\sigma_{\text{d}} - (Ed^{-1/2} + Fd_s^{-1/2}) + \Phi \quad (1)$$

式中: σ_{ss} 为固溶强化增量; σ_{p} 为沉淀强化增量; σ_{d} 为位错及亚结构强化增量; d 为铁素体晶粒尺寸; d_s 为亚晶尺寸; A, B, C, D, E, F 为材料常数。

焊接 X80 管线钢时, 为了提高焊接接头的强度和韧性, 常常在焊条中添加适量的合金元素, 而加入的合金元素亦产生固溶强化作用, 固溶强化会降低材料的韧性, 由式(1)可知, 固溶强化提高了材料的韧脆转变温度, 只有减小晶粒尺寸, 才能降低韧脆转化温度。获得细针状的铁素体是提高 X80 管线钢埋弧焊接头一种主要的提高韧性的方式, 单位体积内可以拥有更多

的细小晶粒。当外力作用于试样时,其变形分散在更多的细小晶粒内进行,导致应力集中程度降低。同时,晶粒内部和晶界附近的应变度相差也小,从而材料受力均匀,应力集中小,不易产生裂纹。即使产生了微裂纹,微裂纹由一个晶粒穿越到另一个晶粒时,细小晶粒之间产生较多的晶界阻止微裂纹,微裂纹穿过越多的晶界,消耗越多的能量。由 Naylor J P 公式可知,此时裂纹扩展抗力^[12]

$$\sigma = [1.4Ea_c W/Dd]^{1/2} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; a_c 为裂纹临界尺寸; W 为板条界上偏斜塑性功; D 为板条束宽度; d 为板条宽度。

由式(2)可见,裂纹扩展抗力 σ 与 $D^{-1/2}$ 存在线性关系,对应到韧脆转变温度曲线上,就是晶粒的尺寸越小,韧脆转变温度越低。裂纹一般最先产生于夹杂物界面处,夹杂物对钢材的冲击韧性影响很大,由于其破坏金属的连续性,造成应力集中,微裂纹会首先在夹杂物上形成,而后聚合、长大、扩展导致材料断裂。夹杂物或大尺寸第二相粒子在材料断裂中起着重要的作用,其数量越多,尺寸越大,裂纹萌生的几率越高,则焊接接头的冲击韧性就越低。

3 结论

(1)随着实验温度升高,X80 管线钢焊接接头冲击吸收功增大,同时脆性断面率将减小,结合冲击吸收功、脆性断面率和端口形貌,可确定 X80 管线钢焊接接头韧脆转变温度为 -28°C 。

(2)当实验温度为 $-20\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时,试样断口表现为韧窝断裂,温度越高,断口韧窝尺寸越大,塑性断裂特征越明显;当实验温度为 $-80\sim -40^{\circ}\text{C}$ 时,试样断口为解理断裂,温度越低,脆性断裂特征越明显。

参考文献

- [1] HWANG B, LEE S, KIM Y M, et al. Analysis of abnormal fracture occur ring during drop-weight tear test of high-toughness line-pipeline steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 368 (1): 18—27.
- [2] YANG X B, ZHUANG Z, YOU X C, et al. Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75 (18): 5018—5028.
- [3] KIM Y M, LIM S K, KIM N J. Effect of microstructure on the yield ratio and low temperature toughness of line pipe steels [J]. ISIJ International, 2002, 42 (12): 1571—1577.

- [4] SANG Y S, BYOUNGCHUL H, SUNGBAK L, et al. Correlation of microstructure and charpy impact properties in API X70 and X80 pipeline steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 458 (1): 281—289.
- [5] 胥聪敏. X80 钢在霍尔果斯水饱和土壤中的短期腐蚀行为研究 [J]. 材料工程, 2011, (3): 78—81.
XU Cong-min. Study on short-term corrosion behavior of X80 pipeline steel in Huo'erguosi soil with saturated water [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (3): 78—81.
- [6] SUNG H K, SHIN S Y, CHA W, et al. Effects of acicular ferrite on charpy impact properties in heat affected zones of oxide-containing API X80 line pipe steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (9): 3350—3357.
- [7] 周民, 杜林秀, 刘相华, 等. 不同温度下 X100 管线钢的冲击韧性 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (5): 108—113.
ZHOU Min, DU Lin-xiu, LIU Xiang-hua, et al. Impact toughness of X100 pipeline steels at different temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17 (5): 108—113.
- [8] 张小立, 庄传晶, 吉玲康, 等. 高钢级管线钢的特征参量及其与强韧性的关系 [J]. 材料工程, 2006, (8): 3—7.
ZHANG Xiao-li, ZHUANG Chuan-jing, JI Ling-kang, et al. Characteristic parameters of high grade pipeline steels and its relationship with toughness [J]. Journal of Materials Engineering, 2006, (8): 3—7.
- [9] SANTOS T F A, HERMENEGILDO T F C, AFONSO C R M, et al. Fracture toughness of ISO 3183 X80M (API 5L X80) steel friction stir welds [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77 (15): 2937—2945.
- [10] 李红英, 魏冬冬, 林武, 等. X80 管线钢冲击韧性研究 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31 (11): 73—78.
LI Hong-ying, WEI Dong-dong, LIN Wu, et al. Research on impact toughness of X80 pipeline steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31 (11): 73—78.
- [11] 张莉莉, 张骁勇, 高惠临, 等. 一种高铌 X80 管线钢的组织性能分析 [J]. 材料工程, 2009, (5): 1—5.
ZHANG Li-li, ZHANG Xiao-yong, GAO Hui-lin, et al. Microstructure and mechanical properties of a high Nb-microalloyed X80 pipeline steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (5): 1—5.
- [12] 衣海龙, 杜林秀, 王国栋, 等. X80 管线钢的组织与性能研究 [J]. 东北大学学报:自然科学版, 2008, 29 (2): 213—216.
YI Hai-long, DU Lin-xiu, WANG Guo-dong, et al. Microstructure and mechanical properties of pipeline steel X80 [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2008, 29 (2): 213—216.

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2009104);江苏省普通高校毕业生科研创新计划项目(CXLX11-0388, CXZZ12-731)

收稿日期:2012-03-13;修订日期:2012-11-20

作者简介:孔德军(1966—),男,博士,副教授,主要从事激光改性处理和管线钢焊接研究,联系地址:江苏省常州市常州大学机械工程学院(213016),E-mail: kong-dejun@163.com