

# 铌-钛复合微合金 CSP 流程生产 X60 管线钢的组织及性能

Microstructure and Properties of Nb-Ti Microalloyed X60 Pipeline Steel Produced by CSP

何小东, 韩新利, 杨红兵, 陈宏达, 张雪琴

(中国石油天然气集团公司 管材研究所, 西安 710065)

HE Xiaodong, HAN Xin-li, YANG Hong-bing, CHEN Hong-da, ZHANG Xue-qin

(Tubular Goods Research Center of China National Petroleum Corporation, Xi'an 710065, China)

**摘要:** 测试分析了 CSP(Compact Strip Production) 流程生产的 Nb-Ti 复合微合金 X60 管线钢组织和性能。结果表明: 与传统工艺的同类产品相比, CSP 生产的 Nb-Ti 复合微合金 X60 管线钢各向异性小, 横向和纵向的抗拉强度及屈服强度差值都小于 15MPa; CSP 流程生产的这种管线具有优良断裂韧性和抗氢致开裂及抗硫化物应力腐蚀开裂性能; 高频焊接制管后, 焊缝和热影响区的组织为 PF+P, 焊缝的冲击功平均值为 109J, 焊缝对沟状腐蚀不敏感。

**关键词:** CSP; X60; 管线钢; Nb-Ti 微合金

中图分类号: TG335.56 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)05-0020-04

**Abstract:** The microstructure and properties of Nb-Ti microalloyed X60 pipeline steel were measured and analyzed. The results showed that, compared with the same products yielded by traditional rolling process, the anisotropies of the Nb-Ti microalloyed X60 pipeline steel were small. And differences of the tensile strength and yield strength between transverse and longitudinal were less than 15MPa. The pipeline steel had excellent fracture toughness and resistance to sulfide stress corrosion cracking and hydrogen induced cracking. The microstructure of weld seam and heat affected zone of high-frequency-welded pipe was Polygonal Ferrite (PF) and Pearlite (P). The average values of Charpy impact energy reached to 109J at 20°C. And the weld seam was not sensitive to groove corrosion.

**Key words:** CSP; X60; pipeline steel; Nb-Ti microalloying

随着城市间区域管网和城市管网的建设, 需要大量的 X42~X65 的管线钢。与传统的厚板坯连铸连轧工艺相比, 薄板坯连铸连轧 CSP(Compact Strip Production) 工艺具有流程短、生产简便灵活、产品质量好、成本低等优点。采用 CSP 流程生产线制造 X42~X65 中低钢级的管线钢正好能够满足城市管网建设用钢需要。有专家预测<sup>[1]</sup>, 在未来几年内中国将成为世界上拥有薄板坯连铸连轧薄板生产线最多的国家。

CSP 流程生产的主要产品为低碳软钢和低合金高强度钢(High Strength Low Alloy, HSLA), 包括焊接用细晶粒结构钢、管线钢、成形性好的 HSLA 钢及耐候钢。采用 CSP 生产线, 结合真空精炼和热机械加工艺, 利用 V-N 微合金技术开发强度高、塑性优

良、抗裂纹扩展性和焊接性好的 X60~X80 级管线钢<sup>[1-3]</sup>。但是, V-N 微合金 CSP 工艺还不成熟, 存在 V(C, N) 析出不充分的现象<sup>[2]</sup>; 研制的屈服强度( $R_{0.2}$ , 延伸率为 0.2% 时规定非比例延伸强度) 550MPa 级的低碳贫珠光体高强度钢最大板厚只有 6.3mm<sup>[3]</sup>。V 和 Nb 都可作为生产管线钢的微合金元素, 利用 CSP 流程生产的 Nb 微合金管线钢存在难以控制组织均匀性, 易出现混晶现象, 但通过合理的冶金成分设计和严格控制轧制工艺可以成功开发性能优良的 X52~X60 钢级管线钢<sup>[4,5]</sup>。

本工作对铌-钛复合微合金 CSP 工艺生产的 X60 管线钢及其高频焊接(High-Frequency-Welded, HFW) 钢管的组织 and 性能进行了实验研究, 有助于促进 CSP 工艺在油气输送用管线钢开发上的应用。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

CSP 生产流程为: 电炉冶炼→炉外精炼→连铸→控轧控冷。实验材料的化学成分见表 1。从表 1 中可以看出,CSP 流程生产的 X60 管线钢 C 含量较低,Mn 的含量也低于 1.5% (质量分数,下同)。一般来说,C 含量降低,需提高 Mn 含量来稳定组织、强度和  $A_{r3}$  (奥氏体冷却转变实际温度) 线, 以及降低脆性转变温度。但是, 提高 Mn 含量也使韧性降低、偏析加重。因此,

表 1 X60 管线钢的化学成分  
 Table 1 Chemical composition of X60 pipeline steel

Element	C	Mn	P	S	Si	Mo	Cr	Ni	Cu	V	Nb	Ti
Mass fraction / %	0.07	1.38	0.019	0.003	0.21	0.023	0.025	0.037	0.10	0.005	0.032	0.020

PF+ B+ P (如图 1 所示)。可以看出,Nb-Ti 复合微合金 X60 管线钢组织均匀,基本无混晶现象。

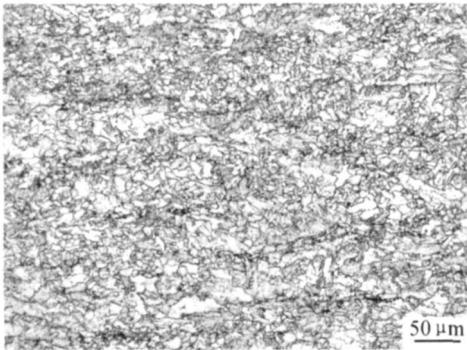


图 1 X60 管线钢的金相组织  
 Fig. 1 Microstructure of X60 pipeline steel

1.2 实验方法

对 Nb-Ti 复合微合金 CSP 工艺开发的厚度为 9.5mm 的 X60 管线钢板取样,测试了钢板的拉伸性能、冲击韧性、落锤撕裂剪切面积、裂纹尖端张开位移、维氏硬度,并对钢板进行了抗氢致裂纹和硫化物应力开裂实验。同时,为了考察钢板焊接制管后的性能,对高频焊接钢管也进行金相分析和力学性能及焊缝的沟状腐蚀实验。

2 结果与分析

2.1 钢板的力学性能及成形性能

图 2 是 X60 钢板和制管后的拉伸性能实验结果。从图 2 可以看出,X60 管线钢板横向和纵向的抗拉强度  $R_m$  和屈服强度  $R_{10.5}$  差值都小于 15MPa。其中,抗拉强度为 580~592MPa,屈服强度为 473~486MPa。

为了避免偏析和裂纹产生,且保证足够的强度,CSP 工艺选择 Mn 的含量应控制在合理的范围。虽然 Nb 含量小于 0.062% 容易出现混晶组织,但微合金元素 V 的含量极小(仅为 0.005%),通过降低奥氏体完全再结晶的临界变形量和避免部分再结晶区轧制,可以获得均匀的等轴奥氏体组织。同时,微合金元素 Ti 的加入可以抑制 Nb 的碳、氮化物的析出,改善铸坯的延塑性;而且微 Ti 处理可以改善焊接制管热影响区的冲击韧性。Nb-Ti 复合微合金 CSP 工艺开发的厚度为 9.5mm 的 X60 管线钢的晶粒度 10.6 级,金相组织为

说明 Nb-Ti 复合微合金 CSP 工艺开发的钢板具有均匀的拉伸性能,各向异性比传统工艺的同类产品小。焊接制管后,管体横向和纵向的抗拉强度损失很小,基本接近钢板强度;而管体横向和纵向的屈服强度并没有在制管成形过程中受到损失,反而均比钢板的屈服强度略高出 30~35MPa。

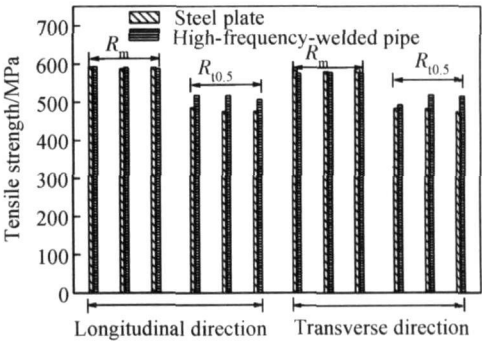


图 2 X60 管线钢拉伸性能  
 Fig. 2 Tensile strength of X60 pipeline steel

图 3~5 是 CSP 工艺开发的 Nb-Ti 微合金 X60 钢板的断裂韧性实验结果。图 3 表明,X60 钢板在 -20℃ 以上,纵向试样和横向试样的冲击功达到了 170~200J (冲击试样尺寸为 7.5mm × 10 mm × 55mm),而且纵向的冲击功略高于横向的冲击功。但是,在 -20℃ 以下时,纵向的冲击功比横向的冲击功低,而且每组纵向试样的单个冲击功值分散性较大,说明 X60 实验钢板横向低温冲击韧性比纵向好。虽然如此,实验钢板在 -40℃ 横向试样和纵向试样的冲击功平均值都大于 100J。因此,CSP 工艺开发的 Nb 微合金 X60 钢板具有优良的低温韧性。图 4 的落锤撕裂实验(Drop-

Weight Tear Test, DWT T) 的剪切面积温度转变曲线也表明了钢板具有较好的横向低温断裂韧性。裂纹尖端张开位移(CTOD)是新产品开发研究中用来评价冶金因素和工艺因素对金属材料断裂韧性影响的又一个重要指标。对 X60 钢板采用三点弯曲试样进行裂纹尖端张开位移实验,在  $-40^{\circ}\text{C}$  下试样没有发生脆性断裂,其特征值  $Q_{0.2}$ ,  $\sigma_m$  分别达到了  $Q 443\text{mm}$  和  $1.03\text{mm}$ ,说明 CSP 工艺开发的 Nb-Ti 微合金 X60 管线钢对裂纹的启裂和扩展具有很强的抗力。图 5 是实验钢板  $-40^{\circ}\text{C}$  下的裂纹扩展阻力曲线,其表达式为  $\text{CTOD} = 1.2187 \times (4.234 \times 10^{-4} + \Delta a)^{0.6286}$  (式中  $\Delta a$  为裂纹张开量)。研究表明, CSP 工艺开发的 Nb-Ti 微合金 X60 管线钢优良的断裂韧性与低硫和低钙处理工艺改变夹杂物形态密切相关。

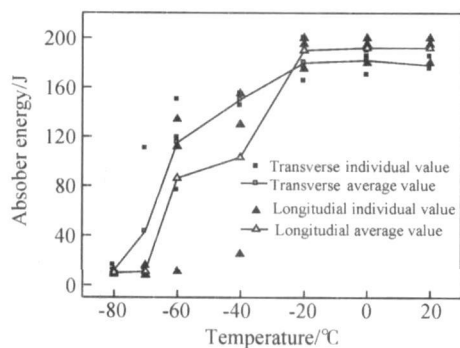


图 3 X60 管线钢钢板的冲击韧性

Fig. 3 Impact test result of X60 pipeline steel

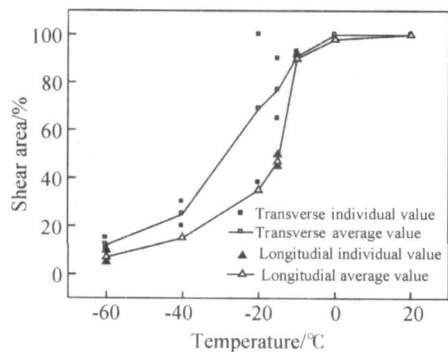


图 4 X60 管线钢落锤撕裂实验结果

Fig. 4 Drop-weight tear test of X60 pipeline steel

管线钢的硬度值对材料的抗氢致裂纹敏感性有较大影响,一般要求 X70 钢级以下的管线钢硬度  $HV_{10}$  小于 260。通过维氏硬度实验表明, X60 实验钢板的硬度  $HV_{10}$  为 179~194。

## 2.2 钢板抗腐蚀性能

管线在输送油气过程中,常常会因含有腐蚀性介

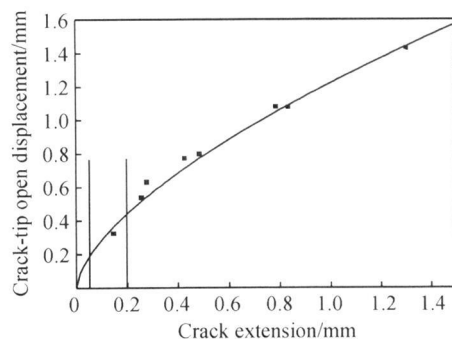


图 5 X60 在  $-40^{\circ}\text{C}$  的裂纹扩展阻力曲线

Fig. 5 Resistance curve for X60 at  $-40^{\circ}\text{C}$

质或者跨越地区的土壤酸碱度、潮湿度等原因造成管线早期失效,因而对管线钢的耐腐蚀性能提出了更为苛刻的要求,其中抗氢致开裂和抗硫化物应力开裂是管线钢重要的耐腐蚀性能指标。

在 X60 实验钢板上取一组(三个)试样,按 NACE TM0284 标准在 A 溶液中进行 96h 的 HIC 实验。实验结果表明,试样三个截面的裂纹敏感率 CSR% (Crack Sensivity Ratio)、裂纹长度率 CLR% (Crack Length Ratio)、裂纹厚度率 CTR% (Crack Thickness Ratio) 三个指标的平均值均为 0。因此, Nb-Ti 微合金 X60 管线钢具有很好的抗氢致开裂性能。

同时,在 X60 实验钢板上取一组(三个)试样按 NACE TM0177 标准在 A 溶液中进行硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)实验,加载应力为 299MPa。图 6 是 SSCC 实验后的试样形貌。从图 6 可以看出,经过 720h 浸泡后试样表面均未出现裂纹。

元素 Mn 和 P 对管线钢抗 SSCC 具有显著的影响作用。一般而言, Mn 的含量增多,低温转变组织及 MnS 夹杂也相应增加。研究表明<sup>[6]</sup>,晶间共晶形式的 MnS 夹杂(II 型 MnS 夹杂)更容易形成氢的局部富集,导致氢压在夹杂物处形成微裂纹,并与裂纹尖端新鲜表面作用使尖端金属脆化,从而加速裂纹的扩展。P 元素可以引起钢的冷脆,不仅形成使塑性降低的易溶共晶夹杂物,还抑制 H 原子重新组合过程,使金属增 H 效应显著,从而降低钢在  $\text{H}_2\text{S}$  酸性介质中的稳定性。CSP 工艺使得 Mn, P 含量控制在较低水平,从而提高了抗腐蚀能力。

## 2.3 焊接接头的组织和性能

### 2.3.1 焊接接头的组织和力学性能

CSP 工艺开发的 Nb-Ti 微合金 X60 管线钢卷板厚度一般都在 12.5mm 以下,常用于高频焊接(HFW)制管。图7所示是高频焊接钢管焊缝和热影响区的金

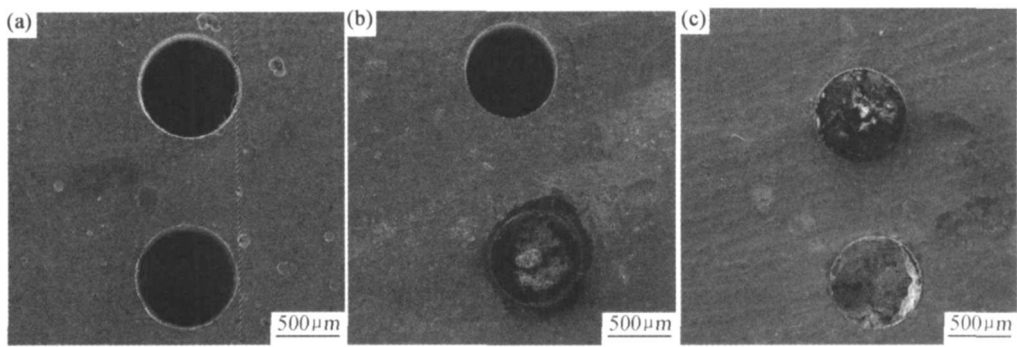


图 6 X60 管线钢硫化物应力腐蚀开裂实验结果 (a) 试样 A; (a) 试样 B; (a) 试样 C

Fig. 6 Result of sulfide stress corrosion cracking test for X60 pipeline steel

(a) specimen A; (b) specimen B; (c) specimen C

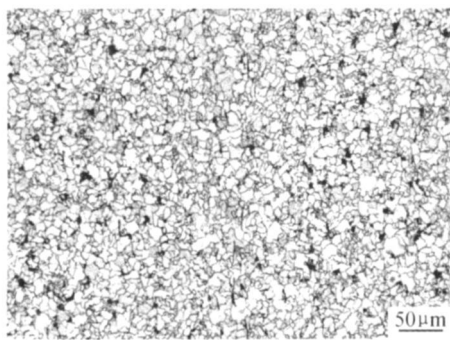


图 7 X60 高频焊接钢管焊缝金相组织

Fig. 7 Microstructure of weld seam of X60

high-frequency-welded pipe

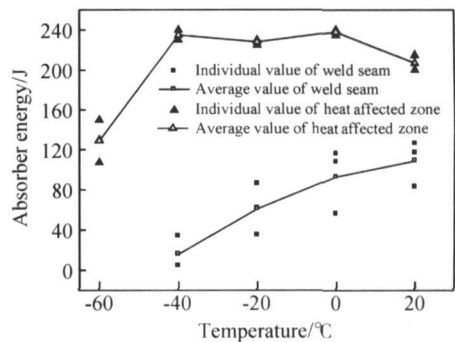


图 8 X60 高频电阻焊缝和热影响区的冲击韧性

Fig. 8 Results of Charpy impact test of weld seam

and heat affected zone of X60

相照片,其组织为 PF+ P,晶粒度达到 9 0 级。

对焊接接头取样进行拉伸实验,结果表明焊接接头的抗拉强度略高于管体的抗拉强度,其值为 595MPa,断于母材位置。图 8 是焊缝和影响区的冲击韧性实验结果。Nb-Ti 微合金 X60 管线钢高频焊接制管后焊缝的冲击韧性平均值为 109J(20℃,试样尺寸为 7.5mm×10mm×55mm),单个值大于 83J。而热影响区的韧性很好,冲击功平均值达到了 207J,比母材还略高。这也说明微量 Ti 的加入对于改善焊接热影响区冲击韧性的作用很大。同时,从图 8 中也可以看到高频焊接钢管焊缝的每组试样的冲击功值相对分散,这主要是由于高频焊接的焊缝很窄,焊缝冲击试样的缺口根部位置对实验结果影响很大。

2. 3. 2 焊缝的抗沟状腐蚀性能

虽然高频焊接钢管用途很广,但沟状腐蚀(Groove Corrosion)是高频焊接钢管焊缝中一种特殊的腐蚀现象。因此,对高频焊接钢管焊缝进行沟状腐蚀实验也是评价 Nb-Ti 微合金 X60 管线钢的性能指标之一。

状腐蚀实验。图 9 是焊缝沟状腐蚀实验后的形貌,从试样测得焊缝沟状腐蚀敏感系数平均为 1.93。有研究认为<sup>[7]</sup>,沟状腐蚀敏感系数小于 2 时,高频焊接钢管对沟状腐蚀不敏感。这主要取决于焊接区域 MnS 夹杂物的含量,也与钢板中的硫含量有关。钢板中含合金元素 Cu, Nb, Ti 等对改善抗沟状腐蚀能力也有一定的作用<sup>[6]</sup>。添加适量的 Cu, Ti, 焊缝中碳化物由 MnS 向 CuS 转变。在腐蚀介质中, MnS 溶解而 CuS 不溶解,因此可以降低沟状腐蚀程度。

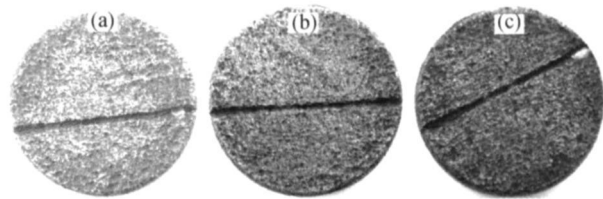


图 9 X60 高频焊接焊缝抗沟腐蚀实验结果

(a) 试样 A; (b) 试样 B; (c) 试样 C

Fig. 9 Result of groove corrosion of high-frequency weld seam

for X60 (a) specimen A; (b) specimen B; (c) specimen C

屈氏体疲劳寿命最高,在低应力水平下,回火索氏体的疲劳寿命高于回火屈氏体。

(2) 三种不同微观组织的 40CrNiMoA 钢的超声疲劳 S-N 曲线具有两种类型:持续下降型和阶梯下降型,并不存在传统的疲劳极限,在  $10^7$  以上仍会发生疲劳断裂。

(3) 超声疲劳载荷下,裂纹在试样表面缺陷处萌生,然后向里扩展,最后断裂区所占比例较小。因为在微观尺度范围内,各晶粒的变形是不均匀的,表面部分承受应力集中的晶粒会产生塑性应变,这样每一循环造成的不可逆应变,经过足够长的周次后会萌生疲劳裂纹而导致工件疲劳失效。

(4) 对于表面萌生裂纹的试样而言,导致 S-N 曲线出现阶梯下降型和连续下降型的原因是由于不同的微观组织形变能力不同。在循环载荷作用下,能产生形变强化的组织, S-N 曲线会出现水平台阶,即呈现阶梯下降型特征,否则 S-N 曲线为连续下降型。

#### 参考文献

- [1] 周承恩,洪友士. GCr15 钢高周疲劳行为的实验研究[J]. 机械强度, 2004, 26(5): 157- 160.
- [2] 闫桂玲,王弘,高庆. 超声疲劳试验方法及其应用[J]. 力学与实践, 2004, 26: 25- 29.

- [3] 陶华. 超声疲劳研究[J]. 航空学报, 1998, 19(2): 228- 231.
- [4] 邵红红,陈光. 合金钢超声工具头超声疲劳寿命研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(16): 185- 188.
- [5] 王清远. 超声加速疲劳实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(3): 6- 11.
- [6] BATHIAS C. There is no infinite life in metallic materials[J]. Fatigue Fract& Enging& Mater& Struct, 1999, 22: 559- 565.
- [7] 周承恩,谢季佳,洪友士. 超高周疲劳研究现状及展望[J]. 机械强度, 2004, 26(5): 526- 533.
- [8] NISHIJIMA S, KANAZAWA K. Stepwise S-N curve and fish-eye failure in gigacycle fatigue[J]. Fatigue Fract& Enging& Mater& Struct, 1999, 22: 601- 607.
- [9] 方进河. 电渣重熔的冶金质量[J]. 湖南冶金, 2002, (5): 35- 39.
- [10] MURAKAMI Y, NOMOTO T, UEDA T. On the mechanism of fatigue in the superlong life regime(  $N > 10^7$  cycles) [J]. Fatigue Fract& Enging& Mater& Struct, 2000, 23: 893- 910.
- [11] MURAKAMI Y, NOMOTO T, UEDA T. Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels[J]. Fatigue Fract& Enging& Mater& Struct, 1999, 22: 581- 590.

收稿日期: 2007-03-30; 修订日期: 2007-08-27

作者简介: 邵红红(1959—), 女, 教授, 博士生, 主要从事材料表面改性和金属材料强韧化研究, 联系地址: 江苏省镇江市江苏大学材料学院。E-mail: canny588. student@ sina. com

(上接第 23 页)

### 3 结论

(1) 铌-钛复合微合金 CSP 工艺生产的 X60 管线钢无混晶组织, 具有均匀的拉伸性能和优良的断裂韧性; 较低含量的 Mn, P 提高了抗腐蚀性能。

(2) 高频焊控制管后, 焊缝组织为多边形铁素体和珠光体, 适量的 Cu, Ti 元素添加降低了高频电阻焊缝的沟状腐蚀程度。

#### 参考文献

- [1] 王祖滨,付俊岩. HSLA 钢冶金工艺技术的进展[J]. 特殊钢, 2006, 27(2): 1- 5.
- [2] 苏世怀,何宜柱,胡学文,等. CSP 流程钒氮微合金化 X60 钢的强化机理[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 73- 77.

- [3] 刘清友,毛新平,林振源,等. CSP 流程 V-N 微合金钢冶金学特征研究[J]. 钢铁, 2005, 40(12): 64- 68.
- [4] 闫波,孙丽钢,董瑞峰,等. 包钢 CSP 生产 X60 管线用热轧钢带的组织性能研究[J]. 轧钢, 2006, 23(5): 5- 7.
- [5] 苏东,庄汉洲,高吉祥,等. EAF-CSP 流程铌微合金化管线钢的连铸工艺[J]. 连铸, 2006, (4): 8- 10.
- [6] 周琦,季根顺,张建斌,等. 管线钢中的硫化夹杂物与氢致开裂[J]. 材料工程, 2002, (9): 37- 46.
- [7] 高惠临. 管线钢——组织性能 焊接行为[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995. 151- 153.

收稿日期: 2007-07-27; 修订日期: 2008-01-29

作者简介: 何小东(1970—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油管材焊接工艺研究及质量监督检验, 联系地址: 西安市电子二路 32 号中国石油天然气集团公司管材研究所(710065)。E-mail: hexd@ tgrc. org