维普资讯 http://www.cqvip.com

高钢级管线钢的特征参量及其与强韧性的关系

Characteristic Parameters of High Grade Pipeline Steels and Its Relationship with Toughness

张小立[1,2]，庄传晶[1]，吉玲康[1]，冯耀荣[1]，赵文轸[2]，霍春勇[1]
（1 中国石油天然气集团公司 管材研究所 石油管力学和环境行为重点实验室，西安 710065；2 西安交通大学 材料科学与工程学院，西安 710049）
ZHANG Xiao-li[1,2]，ZHUANG Chuan-jing[1]，
JI Ling-kang[1]，FENG Yao-rong[1]，ZHAO Wen-zhen[2]，
HUO Chun-yong[1]（1 Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods，CNPC Research Institute of Tubular Goods，Xi′an 710065，China；
2 School of Materials Science and Engineering，Xi′an Jiaotong University，Xi′an 710049，China）

摘要：利用力学实验及 EBSD 等微观分析手段，研究表征高钢级管线钢的特征参数，并探讨其对强韧性的影响。结果表明：在 X70，X80 高钢级管线钢中，C，Cu，Mn 对材料的强韧性有重要的影响；其组织特征为针状铁素体、粒状贝氏体和少量下贝氏体组成；有效晶粒尺寸、组织均匀性、贝氏体含量是表征高钢级管线钢组织特征的重要参数；随着有效晶粒尺寸的降低、贝氏体含量的增加及组织的均匀性的提高，高钢级管线钢表现出更加优异的强韧性匹配特征。

关键词：高钢级管线钢；EBSD；针状铁素体；贝氏体；有效晶粒度；强韧性
中图分类号：TG146.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4381(2006)08-0003-05

Abstract: The characteristic parameters of high grade pipeline steels were investigated, and their effects on toughness were explored by means of mechanical testing and microstructural analysis as EBSD (Electron Backscattered Diffraction) and SEM . The results showed that the content of C, Mn and Cu had important effect on obdurability of pipeline steels, and the microstructural characteristic of X70 and X80 pipeline steels were dominative acicular ferrite, some granular bainite and a little of lower bainite; effective grain size, structural homogeneity and the content of bainite were most important parameters to the microstructure; with the decreasing of effective grain size, increasing of bainite content and structural homogeneity, high grade pipeline steels would get the excellent combination of toughness and strength.

Key words: high grade pipeline steel; EBSD; acicular ferrite; bainite; effective grain size; toughness

在实际高钢级管线钢组织分析时，存在不少困难。因而在实际控轧钢的组织分析中，不少学者把组织简化为铁素体和贝氏体，而不是一一区分各种 F。这对于一般的工程研究和检验是合理而可行的。对于低碳和超低碳钢，在经受大变形量轧制条件下，即使在快速冷却下，形成先共析 F 的情况难以避免。其他的组织如粒状贝氏体和针状 F 等都可归为贝氏体。由以上共识，可以比较简便地确定 F 和贝氏体的相对量，从而进一步进行有效晶粒尺寸、MA 岛的数量、尺寸、形状、分布，以及带状组织特征等的分析，从而全面地建立低碳贝氏体组织与性能之间的关系[1]。

本研究基于以上观点，对高钢级管线钢的组织进行深入细致的观察研究，利用 EBSD 分析手段，结合金相显微镜和扫描电镜，对组织特征进行了探讨，从而讨论组织参数和材料强韧性间的影响规律。

1 实验过程

1.1 实验材料

选用材料为国外生产厂家提供的 X70 和两种 X80(X80-1，X80-2)管线钢。均为管线实际使用管材，或为管线研究开发的管线钢，化学成分及碳当量(C_{eq}，P_{cm})分别见表 1。由表 1 可知，对于 X80 管线钢，其扩大稳定 γ 区元素均略高于 X70。钢管规格 X70 为 ϕ1016mm×21mm；X80 为 ϕ1016mm×17.5mm。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 1 钢管母材化学分析结果（质量分数/%）

Table 1 Chemical compositions of base metal of pipeline steels(mass fraction/%)

Content	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Ti	Cu	B	Al	C_{eq}	P_{cm}
X70 base metal	0.066	0.15	1.59	0.013	0.0030	0.027	0.19	0.078	0.037	0.034	0.013	0.08	0.0008	0.023	0.391	0.177
X80 base metal	0.071	0.13	1.71	0.012	0.0040	0.037	0.20	0.30	0.034	0.005	0.013	0.12	0.0007	0.022	0.432	0.190

$C_{eq}=C+Mn/6+(Ni+Cu)/15+(Cr+Mo+V)/5$; $P_{cm}=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Mo/15+Ni/60+V/10+5B$

1.2 实验方法

用于组织研究的样品取自管体横向垂直于轧制方向。样品经机械抛光、腐蚀后进行了金相显微镜分析、扫描电镜(SEM)分析。然后对相应试样经电解抛光后进行背散射电子显微镜(EBSD)图像和数据分析。

金相样品直接从实验钢管上切取，金相组织观察在 MEF4M 金相显微镜及图像分析系统上进行，观察面为平行轧向的样品正面，经粗磨、细磨、抛光和 3% 硝酸-酒精腐蚀而成。

采用 S360 型扫描电子显微镜(SEM)对实验钢的微观形貌进行观察与分析；采用 QTS136XL EBSD 扫描电镜进行管线钢相成分、分布、形态的确认。扫描区域为 200×200 个点，步长为 0.3μm；从实验钢板端部垂直于轧制方向切取冲击样坯，经机床加工成 10mm×10mm×55mm 的夏氏 V 型缺口冲击试样。在 10，0，−20，−40，−60，−80℃ 5 种温度条件下，分别按照 GB2975−82，GB/T 229294 的标准，在 JB2300B 机械式半自动冲击试验机上进行冲击实验；拉伸试样均采用 φ12.5mm 的试样，并按 ASTM A370−2002 标准，在 TS810-15 自动拉伸试验机上进行。

2 结果与讨论

2.1 元素的影响

在合金元素对奥氏体形成的影响下，随着碳含量的增加，亚共析钢中奥氏体的形成速度加快，而且 C 及 Mn，Cu 可改变奥氏体的形成温度，即扩大 γ 相区，使奥氏体相变点 A_{c1}，A_{c3} 降低[2]。对于 Mn，目前作为管线钢中的主要合金元素而被采用，这是因为 Mn 的加入引起固溶强化，另外，由于 Mn，Cu 使 γ-α 相变温度降低，从而对 α 的晶粒尺寸具有细化作用，同时可改变相变后的微观组织。研究表明[3]，添加 1.0%～1.5%的 Mn 使 γ-α 相变温度下降 50℃，其结果使铁素体晶粒尺寸细化，保持多边铁素体基体。当 Mn 含量提高至 1.5%～2.0%时，可进一步降低相变温度，奥氏体转变成针状铁素体。此外，较高的 Mn 含量可以延迟奥氏体中铌-碳氮化物的应变诱导析出[4]。因此，可以预计，对于相同的热机械轧制条件，较低的 Mn 含量对应于更加严格的奥氏体过程。对比不同 Mn 含量的实验数据，当 Mn 含量较高时，钢材拥有更高的强度，如图 1 所示。

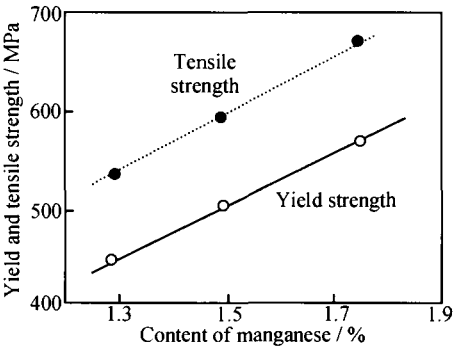


图 1 Mn 含量对钢材强度的影响

Fig. 1 Influence of content of manganese on the tensile properties of steel plates

因而，结合表 1 可知，X80 较 X70 管线钢，从组织上来说，更容易获得晶粒细小的铁素体，甚至针状铁素体；从力学性能上来说，更容易获得高的强度指标，从而获得优异的强韧性匹配。

2.2 高钢级管线钢组织与相组成

根据 500 倍金相显微镜分析表明，X70，X80 管线钢的金相组织均为 AF 型，具体为 B(以 B 粒为主)＋PF＋P，B-贝氏体；PF-多边铁素体；P-珠光体。晶粒度为 12 级，根据国标 GB/T 6394−2002，该级别显微晶粒度平均晶粒尺寸为 5.6μm，如图 2 所示。

对以上两种管线钢组织做进一步扫描电镜分析，其 SEM 组织如图 3 所示。扫描组织和金相组织颜色衬度刚好相反，这主要是两种设备成像方式不同所致。在扫描电镜下，两种管线钢最大的区别在于铁素体机体上分布的白色粒状物的数量不同，X80 钢上的数量是 X70 钢的 2 倍，并且 X80-1 的粒状物的尺寸也较 X70 大，而 X80-2 的粒状物细小，且这种白色粒状物分布于铁素体的晶粒内部晶界位置。从数量上看，X70 并非每个铁素体基体上都存在粒状物，而 X80 中多数铁素体基体上存在粒状物，并且数量为 2−3 个铁素体。此外，在扫描电镜组织中还可以观察到基体上分布有细微沉淀相的产物相，该相铁素体基体成 55～60°夹角，如图 4 所示。能谱分析表明，图 4 中 1，2，3

维普资讯 http://www.cqvip.com

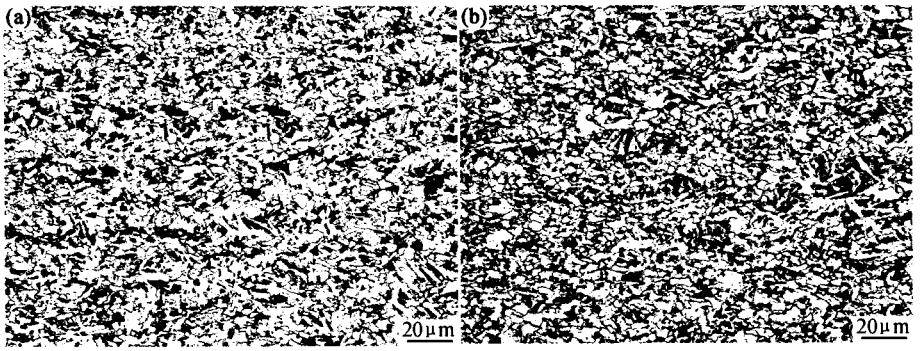


图 2 高钢级管线钢金相组织 (a) X70; (b) X80

Fig. 2 Metallurgical structure of high grade pipeline steels (a) X70; (b) X80

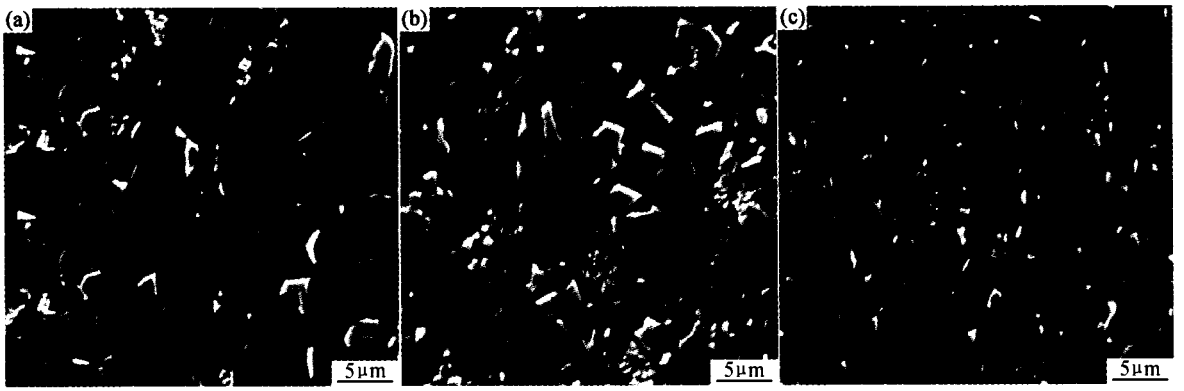


图 3 高钢级管线钢 SEM 组织 (a) X70; (b) X80-1; (c) X80-2

Fig. 3 SEM microstructure of high grade pipeline steels (a) X70; (b) X80-1; (c) X80-2

处的碳含量(质量分数/%)分别为 1.54,4.12,3.57。

图 5 为 EBSD 分析结果。由图 5 可知,晶粒的不同灰度代表每个晶粒不同的取向,即不同的欧拉角,其中根据 EBSD 菊池花样标定出的靠近晶界析出的粒状物为 Fe_3C。图 5 中有白色框线标示的析出碳化物明确显示其分布于晶粒内部,并且和晶粒边界的夹角为 55～60°。根据图 5 所示碳化物的分布情况,可以断定铁素体基体上分布的岛状物是由富碳奥氏体和少量碳化物组成的。在此问题上,金相组织的观察及 EBSD 的结论是一致的。

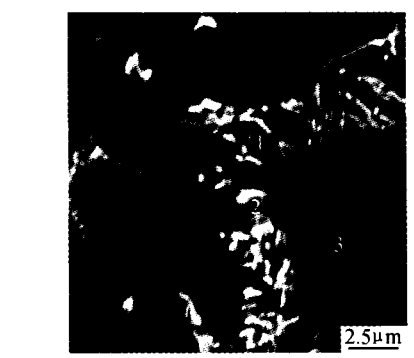


图 4 铁素体基体上的细微析出物

Fig. 4 Fine educts on ferrite matrix

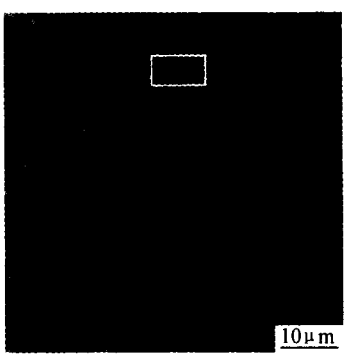


图 5 EBSD 显示针状铁素体和 Fe_3C 分布情况

Fig. 5 Distribution of acicular ferrite and Fe_3C in EBSD image

根据 Smith[5] 关于管线钢中针状铁素体的概念,即针状铁素体显示为独特的不规则形状,晶粒大小不等,相互之间的位相关系不定,呈混杂分布状态。由图 5 可知,X70,X80 管线钢的组织特征均满足该针状铁素体的定义。

在钢的冶金学中,将具有共析成分的铁碳合金自奥氏体相区冷却到相变温度 A_1 至 A_1 以下约 200℃温度范围时,得到的由片层相间的铁素体和渗碳体组织称为珠光体,其特征是片层排列整齐。下贝氏体也是由铁素体和碳化物构成的复相组织,其特点是在铁素

维普资讯 http://www.cqvip.com

体板条上沉淀着许多细微的碳化物，有时可能还有残余奥氏体，它与铁素体的长轴呈 55～60°的方向排列。下贝氏体的形成是碳的短程扩散所致。由于在温度较低时，碳在奥氏体中扩散极困难，在铁素体中扩散也受到相当限制，因而短程扩散后在一定的晶面上偏聚，进而以碳化物形式析出，从而得到在片状铁素体上分布着同铁素体长轴呈一定交角、排列成行的碳化物的复相组织。该形成过程造成了贝氏体铁素体、碳化物及针状铁素体中碳化物的不同，该定义显示上述能谱所测得的碳含量的分布与下贝氏体是一致的。

在高钢级管线钢中，强韧性是其追求的目标。贝氏体钢之所以获得广泛应用，与贝氏体的良好强韧性是不可分的。因而，采用控轧控冷技术制备高钢级管线钢材时，在珠光体转变温度以下，为了制备晶粒更加细小的管线钢材，将采用更高的过冷度，即在贝氏体形成温度停留，导致材料中以粒状贝氏体为主而以少量下贝氏体存在的针状铁素体型的组织特征。

2.3 高钢级管线钢强韧性

X70，X80 高钢级管线钢强韧性能见表 2 和图 6。表 2 中 R_m 和 $R_{t0.5}$ 分别为抗拉强度和屈服强度；A 为断面收缩率；UEL 为延伸率；n 为硬化指数。条形试样和圆棒试样管体横向（垂直于轧制方向）及纵向（平行于轧制方向）力学性能显示：X80 拥有更高的抗拉强度和屈服强度，其屈强比略高于 X70；甚至在圆棒横向试样中，屈强比还低于 X70 管线钢 6.8%。这说明 X80 管线钢拥有极好的强韧性。

表 2 X70，X80 高钢级管线钢的拉伸性能

Table 2 Tensile strength of X70 and X80 high grade pipeline steels

Sample	Shape	Direction	Grade	R_m/MPa	$R_{t0.5}$/MPa	A/%	$R_{t0.5}$/Rm	UEL/%	n
Base metal	Strip	Cross direction	X70	671	547	44.00	0.815	9.19	0.090
			X80	733	610	37.80	0.832	6.69	0.091
		Longitudinal direction	X70	643	543	44.20	0.844	9.05	0.081
			X80	710	613	39.40	0.863	7.30	0.079
	Round	Cross direction	X70	613	565	25.00	0.922	7.80	0.071
			X80	720	635	23.60	0.882	8.84	0.087
		Longitudinal direction	X70	609	499	30.20	0.819	11.38	0.106
			X80	696	572	27.20	0.822	8.74	0.105
Q/SY XQ 15－2003			X70	≥570	485～620	≥22	≤0.9	NR	NR
Q/CNPC 108－2004			X80	≥625	555～690	≥21	≤0.92	NR	NR

NR：no requirement

20～100℃夏比冲击韧性实验表明：X70 管线钢的韧脆转变温度在－60℃左右；结合冲击功曲线和剪切率曲线，X80 管线钢的韧脆转变温度在－80℃左右。这也进一步证明 X80 管线钢拥有更佳的强韧性匹配。高钢级管线钢 X70，X80 之所以拥有较好的强韧性，这和它们具有的组织特性是不可分的。由图 6 可知，X80-1 的冲击韧性略低于 X70，而 X80-2 的冲击韧性高于 X70。根据相关资料[6,7]，由于粒状贝氏体中的奥氏体岛可有不同的转变产物或分解，在冷却过程中当岛内某一部分转变为马氏体（M-A 岛）时，韧性下降，因而粒状贝氏体会降低钢的韧性。但 X80-1 低温冲击韧性和 X70 相当，低温剪切率高于 X70。综合韧脆转变温度、剪切率、低温韧性、强度和屈强比指标可知，X80 管线钢具有很好的强韧性匹配。

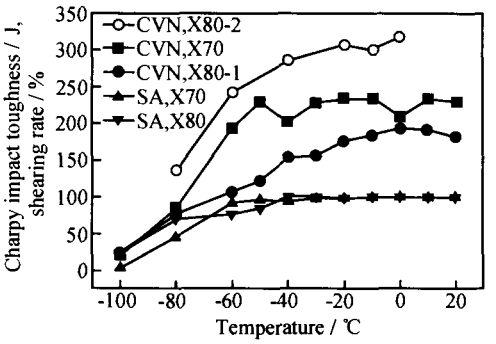


图 6 X70，X80 管线钢的夏比冲击韧性及剪切率

Fig. 6 Charpy impact toughness and shearing rate of X70 and X80 pipeline steels

2.4 相参量与力学性能的相关性

文献[8]表明，针状铁素体组织拥有极好匹配的力学性能，而这种匹配的力学性能一方面来自于晶粒的细化，包括奥氏体相组织的细化；另一方面来自于有效晶粒度。而在组织中控制韧性组织单元的是晶粒取向大于 15°的晶界。EBSD 结果表明：在所研究的高钢级管线钢中，大于 15°的晶界晶粒的平均尺寸和金相显微镜的结果不同，X80 管线钢的有效晶粒尺寸为

维普资讯 http://www.cqvip.com

2.0422μm，小于 X70 管线钢的 2.1776μm。可见，随着钢级的增加，管线钢的有效晶粒尺寸是递减的。这一方面说明常规金相晶粒度级别分析并不能准确表征高钢级材料晶粒尺寸参数；另一方面，高钢级管线钢的强韧性是和有效晶粒尺寸相关，同时晶粒的细化也促使韧脆转变温度的降低。

图 7 为 X70，X80 管线钢的有效晶粒分布曲线。由图 7 可知，X80 管线钢拥有较 X70 更窄的粒度分布，这充分说明 X80 管线钢的粒度分布更均匀。

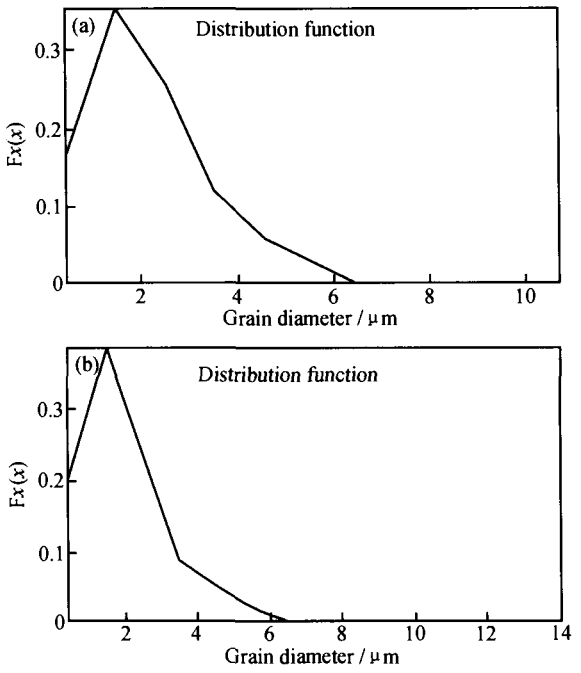


图 7 X70，X80 高钢级管线钢中有效晶粒尺寸分布函数 (a) X70；(b) X80

Fig. 7 The distribution function of effective particle size in X70(a) and X80 (b) high grade pipeline steels

贝氏体的形成是转变温度所决定的碳的脱溶和碳化物析出行为的结果。虽然 Fe_3C 的析出量并不能准确表征碳化物析出的多少，但实验证实：随着钢级的提高，Fe_3C 含量是增加的（X70 为 1.555%，X80 为 2.125%）；另外，随着钢级的提高，在 X80-1 管线钢中 Fe_3C 的尺寸也增加，为 0.66583μm，而 X80-2 中 Fe_3C 的尺寸较小，为 0.47876μm。有结果表明[9]：粒状贝氏体中 M-A 岛的含量和尺寸对超低碳含铜时效钢 CGHAZ 的冲击韧性有显著影响。当 M-A 岛的数量少、尺寸小（体积分数小于 3%，尺寸小于 1μm）时，粒状贝氏体对 CGHAZ 的冲击韧性影响不大；当 M-A 岛的数量多、尺寸大（体积分数大于 3%，尺寸大于 1μm）时，CGHAZ 的冲击韧性显著下降。这就从另一个方面说明了，在高钢级管线钢中，随钢级的提高，贝氏体的含量都将会提高。但贝氏体尺寸减小，其韧性将会提高。正是由于这种强韧相的含量多寡的不同，导致了高钢级管线钢，尤其是 X80 优异的强韧性特性。

在本研究中，X80-1 中 Fe_3C 含量略高于 X70，可推测其中粒状贝氏体含量高于 X70，因而使得其夏比冲击功在韧脆转变点以上略低于 X70；而在韧脆转变温度附近及以下和 X70 相当。这也充分说明 X80 管线钢拥有极好的低温冲击韧性。

3 结论

(1)在 X70，X80 高钢级管线钢中，其组织特征为针状铁素体、粒状贝氏体和少量下贝氏体组成。

(2)有效晶粒尺寸、组织均匀性、贝氏体含量是表征高钢级管线钢组织特征的重要参数。

(3)随着有效晶粒尺寸的降低、贝氏体含量的增加、尺寸的减小及组织的均匀性的提高，高钢级管线钢表现出更加优异的强韧性匹配特征。

参考文献

[1] 冯耀荣，李鹤林. 管线钢及管线钢管的研究进展与发展方向[J]. 石油专用管，2005，11 (1)：1－23.

[2] 胡光立，谢希文. 钢的热处理(原理和工艺)[M]. 西安：西北工业大学出版社，1993. 26－30.

[3] 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. 14－20.

[4] KLAUS HULKA, PASCOAL BORDIGNON, MALCOLM GRAY. Experience with low carbon HSLA steel containing 0.06 to 0.10 percent niobium[R]. German: Niobium Products Company GmbH, 2003.

[5] SMITH Y E, COLDREN A P, CRYDERMAN R. Toward improved ductility and toughness[M]. Tokyo: Climax Molybdenum Company Ltd, 1972. 119－120.

[6] GLOVER A G, MCGRAT H J T, WEAT HERLY G C, et al. The influence of cooling rate and composition on weld metal microstructures in a C/Mn and HSLA steel [J]. Welding Journal, 1977, 56 (9)：225－231.

[7] 方鸿生. 贝氏体相变[M]. 北京：科学出版社，1999. 71－79.

[8] DIAZ-FUENTES M, IZA-MENDIA A, GUTIERREZ I. Analysis of different acicular ferrite microstructures in low-carbon steels by electron backscattered diffraction[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34：1043－1067.

[9] 柴锋，杨才福，张永权，等. 粒状贝氏体对超低碳含铜时效钢粗晶热影响区冲击韧性的影响[J]. 钢铁研究学报，2005，17(1)：42－46.

收稿日期：2005-12-12；**修订日期**：2006-04-20

作者简介：张小立(1969－)，女，博士后，主要从事高钢级管线钢的应用基础研究，联系地址：陕西省西安市电子二路 32 号中石油管材研究所，输送管与安全评价中心(710065)。