

高钢级管线钢的组织特征和强韧性

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)

摘要 背散射(EBSD)和扫描(SEM)电子显微镜及力学性能试验表明,微合金化 X70、X80 和 X100 管线钢的组织由针状铁素体、粒状贝氏体和少量下贝氏体组成;随钢的有效晶粒尺寸降低、贝氏体含量增加以及组织均匀性提高,高钢级管线钢的强韧性明显增加。

关键词 高钢级管线钢 背散射电子显微镜 有效晶粒度 针状铁素体 贝氏体 强韧性

Structure Feature and Strength-Toughness of High Grade Pipeline Steels

Zhang Xiaoli^{1,2}, Zhuang Chuanjing¹, Ji Lingkan¹, Feng Yaorong¹, Zhao Wenzhen² and Huo Chunyong¹

(1 Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods, CNPC Research Institute of Tubular Goods, Xi'an 710065; 2 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The test results with electron backscattered diffraction (EBSD) and scanning electron microscope (SEM) study and mechanical properties examination show that the structure of microalloying X70, X80 and X100 pipeline steels consists of acicular ferrite, granular bainite and a little lower bainite, and with decreasing effective grain size, increasing bainite content and improve structural homogeneity the strength and toughness of high grade pipeline steels increase obviously.

Material Index High Grade Pipeline Steel, Electron Backscattered Diffraction Microscope, Effective Grain Size, Acicular Ferrite, Bainite, Strength and Toughness

根据高钢级管线钢铁素体-贝氏体分类法^[1],在 X80 钢组织和性能研究的基础上^[2],研究了 X70、X80 高钢级管线钢的组织对材料强韧性的影响。

1 试验材料和方法

试验用材料为国外生产厂家提供的 X70、X80、X100 管线钢(表 1)。其中 X70 为 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 21$

mm; X80 为 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 17.5\ \text{mm}$ 。

试样经抛光、腐蚀后进行金相显微镜分析、扫描电镜(SEM)分析;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。拉伸试样尺寸为 $\Phi 12.5\ \text{mm}$,夏氏 V 型缺口冲击试样尺寸为 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 55\ \text{mm}$ 。

表 1 高钢级管线钢化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of high grade pipeline steels / %

钢级	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Ti	Cu	B	Al	C _{eq}	P _{cm}
X70	0.066	0.15	1.59	0.013	0.003	0.027	0.19	0.08	0.04	0.04	0.01	0.08	0.000 8	0.023	0.391	0.177
X80	0.071	0.13	1.71	0.012	0.004	0.037	0.20	0.30	0.04	0.01	0.01	0.12	0.000 7	0.022	0.432	0.190
X100	0.076	0.26	1.95	0.011	0.003	0.026	0.24	0.36							0.492	0.221

2 结果与讨论

2.1 高钢级管线钢组织与相组成

X70、X80 管线钢的组织均为贝氏体(粒状为主)+多边铁素体+珠光体,X100 的组织为粒状贝氏体,晶粒度 12 级,平均晶粒尺寸为 $5.6\ \mu\text{m}$ 。

对管线钢组织用扫描电镜做进一步分析,SEM 组织分别见图 1(a)、(b)、(c)、(d)。在扫描电镜下,两种管线钢最大的区别在于铁素体基体上分布

的白色粒状物的数量不同,X80 钢的数量是 X70 钢的 2 倍,并且 X80-1 的粒状物的尺寸也较后者大,而 X80-2 的粒状物细小,而且这种白色粒状物分布于铁素体晶粒内部临晶界的位置。从数量上看,X70 并不是每个铁素体基体上存在粒状物,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,而 X100 中岛状物明显增多。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的

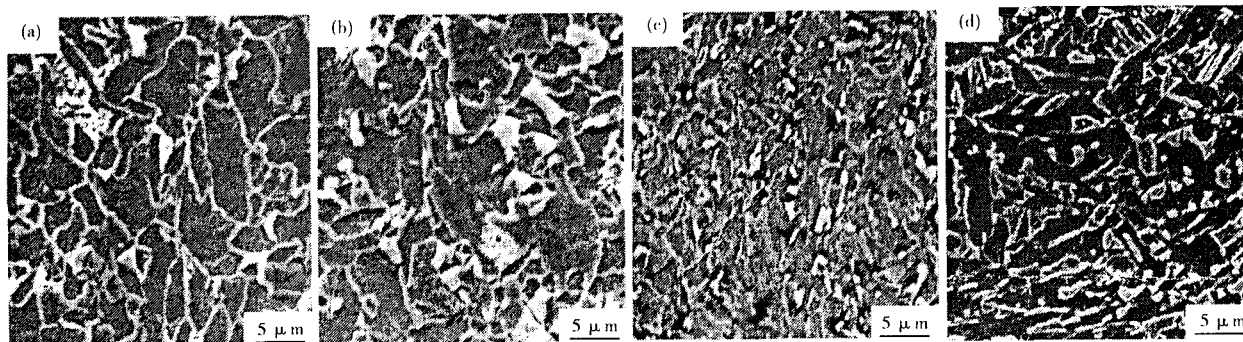


图 1 管线钢组织的形貌,SEM ×2 500: (a) X70; (b) X80-1; (c) X80-2; (d) X100

Fig. 1 Morphology of structure of pipeline steels, SEM, ×2 500: (a) X70; (b) X80-1; (c) X80-2; (d) X100

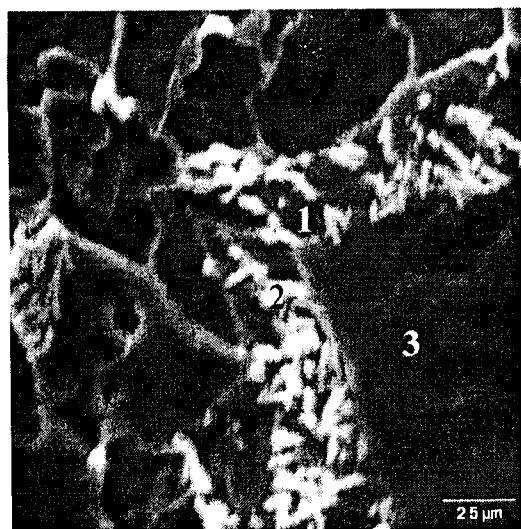


图 2 管线钢铁素体基体上的细微析出物

Fig. 2 Fine precipitates in ferrite base of pipeline steel

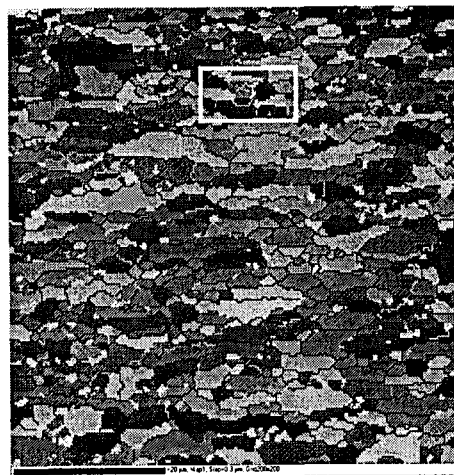


图 3 EBSD 显示针状铁素体和 Fe₃C 分布情况

Fig. 3 Distribution of acicular ferrite and Fe₃C analyzed by EBSD

产物相,该相与铁素体基体呈 55°~60°夹角(图 2)。能谱分析表明图 2 中标记 1、2 和 3 处的碳含量(%)分别为 1.54、4.12、3.57。

图 3 为 EBSD 分析结果,图中不同深浅的晶粒颜色代表不同的晶粒取向,即不同的欧拉角;其中根据 EBSD 菊池花样标定出靠近晶界析出的粒状物 Fe₃C。其中在该图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°。

图 3 所示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,此结论和金相组织观察及 EBSD 的结论是一致的。

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^[3]。由图 3 可知,X70、X80 管线钢的组织特征均满足该针状铁素体的定义。

2.2 高钢级管线钢的强韧性

X70、X80 高钢级管线钢强韧性能见表 2。条形试样和圆棒试样所做的管体横向及纵向力学性能显示,X80 有更高的抗拉强度和屈服强度,屈服比略高于 X70;甚至在圆棒横向试样中,屈服比还低于 X70 管线钢 6.8 个百分点。而在 X100 中,抗拉强度为 800 MPa 左右。

表 2 X70、X80 管线钢的机械性能

Table 2 Mechanical properties of X70 and X80 pipeline steels

形状	管体方向	钢级	R _m /MPa	R _{10.5} /MPa	A/%	R _{10.5} /R _m	C _{VN} /J	
							0 °C	-80 °C
条形	横向	X70	671	547	44.00	0.815	208	83
		X80-1	733	610	37.80	0.832	193	76
		X80-2	733	610	37.80	0.832	316	133
	纵向	X70	643	543	44.20	0.844		
		X80	710	613	39.40	0.863		
圆棒	横向	X70	613	565	25.00	0.922		
		X80	720	635	23.60	0.882		
	纵向	X70	609	499	30.20	0.819		
		X80	696	572	27.20	0.822		

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。

由表2可以看出,X80-1的冲击韧性略低于X70,而X80-2的冲击韧性高于X70。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,并随粒状贝氏体尺寸的增加下降明显,因而粒状贝氏体会降低钢的韧性^[4,5]。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,X80 管线钢具有很好的强韧性匹配。

2.3 组织参量与力学性能的相关性

针状铁素体有极好的力学性能匹配^[6],根据EBSD结果表明,在所研究的高钢级管线钢中,≥15°晶界的晶粒平均尺寸和金相显微镜的结果不同,结果见表3和图4,X80 管线钢的有效晶粒尺寸要小于X70 管线钢,并且是金相所得结果的1/2。另外还可看出随着钢级的增加,管线钢的有效晶粒尺寸是递减的。这说明常规的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,实际上,高钢级管线钢的强韧性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。

表3 管线钢中Fe₃C的含量、平均粒度及EBSD分析所得有效晶粒尺寸

Table 3 Average Fe₃C size and content in pipeline steels, and effective grain size measured by EBSD

钢级	Fe ₃ C 平均尺寸/μm	所占比例/%	平均有效晶粒尺寸/μm
X65	0.625 7	1.532 0	2.393 2
X70	0.618 2	1.555 0	2.177 6
X80-1	0.665 8	2.125 0	2.042 2
X80-2	0.478 8	2.125 0	-

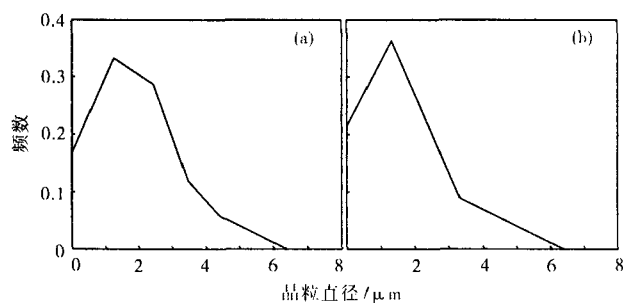


图4 2种管线钢中有效晶粒尺寸分布:(a) X70;(b) X80
Fig.4 Distribution of effective grain size of two pipeline steels: (a) X70; (b) X80

从图4中X70、X80 管线钢的有效晶粒分布曲线可以看到,X80 管线钢有较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。

不同钢级管线钢中Fe₃C的含量及其平均粒度见表3。贝氏体的形成是由转变温度所决定的碳的脱溶和碳化物的析出行为结果,虽然Fe₃C的析出量并不能准确表征碳化物析出的多少,但从中可见,随着钢级的提高,Fe₃C的含量是增加的;另外,随着钢级的提高,在X80-1 管线钢中Fe₃C的尺寸也增加,而X80-2中Fe₃C的尺寸较小,与文献[7]结果一致。

因实验X80-1中Fe₃C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Sharp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 管线钢有极好的低温冲击韧性。

3 结论

(1)在X70、X80 高钢级管线钢组织为针状铁素体、粒状贝氏体和少量下贝氏体;X100 高钢级管线钢的组织为粒状贝氏体。

(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,贝氏体含量的增加和它的尺寸的减小,以及组织均匀性的提高,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

- 冯耀荣,李鹤林. 管线钢及管线钢管的研究进展与发展方向. 石油专用管,2005(1):1
- 张小立,冯耀荣,赵文珍,等. X80 级管线钢的组织 and 力学性能. 特殊钢,2006,27(3):11
- Smith Y E, Coldren A P, Cryderman R L. Toward Improved Ductility and Toughness, Tokyo: Climax Molybdenum Company Ltd. 1972:119
- Glover A G, Mcgrath J T, Weatherly G C, et al. The Influence of Cooling Rate and Composition on Weld Metal Microstructures in a C/Mn and HSLA Steel. Welding Journal, 1977, 56(9):225
- 方鸿生. 贝氏体相变. 北京:科学出版社,1999
- Diaz-fuentes M, Iza-mendia A, Gutierrez I. Analysis of Different Acicular Ferrite Microstructures in Low-carbon Steels by Electron Back-scattered Diffraction. Study of Their Toughness Behavior. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34:1043
- 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. 钢铁研究学报,2005,17(1):42

张小立(1969-),女,博士后,高级工程师,2004年西安交通大学毕业,高温结构材料和高钢级管线钢研究。

收稿日期:2006-05-13