维普资讯 http://www.cqvip.com

高钢级管线钢中有效晶粒尺寸及与CVN关系研究

Study on Effective Particle Size of High Grade Pipeline Steels and Relationship Between CVN

张小立[1,2]，冯耀荣[3]，庄传晶[3]，赵文轸[2]，霍春勇[3]
（1 中原工学院 材料与化工学院，郑州 450007；2 西安交通大学 材料科学与工程学院，西安 710049；3 中国石油天然气集团公司 管材研究所，西安 710065）
ZHANG Xiao-li[1,2]，FENG Yao-rong[3]，
ZHUANG Chuan-jing[3]，ZHAO Wen-zhen[2]，HUO Chun-yong[3]
（1 Materials and Chemical Engineering School of Zhongyuan University of Technology，Zhengzhou 450007，China；
2 School of Materials Science and Engineering，Xi'an Jiao Tong University，Xi'an 710049，China；3 CNPC Research Institute of Tubular Goods，Xi'an 710065，China）

摘要：利用EBSD对系列高钢级管线钢（如X65，X70，X80）影响其韧性的晶体学参数进行了研究，发现高钢级管线钢中对材料韧性起到积极作用的是晶界取向差大于15°的晶粒，而且研究大于35°取向差的晶粒对管线钢的参数研究是没有意义的；有效晶粒尺寸、晶界取向差频度分布、大角度晶界对小角度晶界比率是高钢级管线钢研究的重要参数；晶粒尺寸越细、有效晶粒越小、高角度（大于50°）晶粒频度越高，高钢级管线钢的韧性越好。

关键词：高钢级管线钢；有效晶粒度；冲击韧性
中图分类号：TG142　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4381(2008)07-0001-05

Abstract: The parameters which affect toughness of the high grade pipeline steels were studied by using EBSD. It was shown that the grains had higher grain boundary orientation than 15° would be helpful to toughness of materials, when grain boundary orientation higher than 35°, it was useless to the parameters study of pipeline steels. The effective particle size, the frequency distribution of grain boundary orientation and the ratio of higher grain boundary to low grain boundary were important parameters in high grade pipeline study; The finer the grain size, the smaller the effective particle size, and the higher the frequency of grains boundary of higher than 50°, would effectively lead to the excellent toughness of high grade pipeline steels.

Key words: high grade pipeline steel; effective particle size; impact toughness

对管线钢的研究表明，钢中重要的组织单元是有效晶粒尺寸。而且这种有效晶粒在不同的组织结构中的含义是不同的。图1表达的管线钢中常见的有效晶粒的大小对裂纹的作用。可以看出贝氏体中的有效晶粒是不同位相的贝氏体铁素体板条束。由于大角度束界的阻止作用，解理裂纹在板条束界偏斜（图1a）；另外，文献[1]认为针状铁素体所以具有较高的韧性，是因为裂纹在扩展中不断受到彼此咬合、互相交错分布的针状铁素体的阻碍（图1b）。

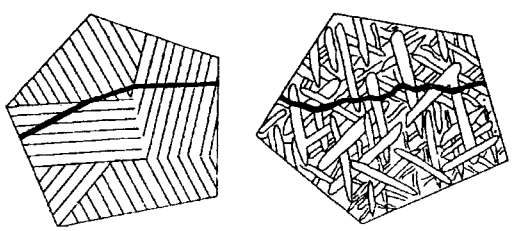


图1　不同组织的有效晶粒[1]

Fig. 1　The effective particle size of different microstructure

随着全世界对能源需求的不断增加，和油气田开发的重点已向边远地区或海洋中转移，输气条件逐渐变得恶劣，与此配套的管道也多在气候恶劣、人烟稀少、高寒、地质地貌复杂的地区服役，因而管线钢也向高钢级发展。目前管道的输送压力已从20世纪50年代的4.5MPa提高到现在的10～15MPa，相应的管道级别也已从X42发展到X80甚至X100，X120。

因而，随着钢级的发展，探讨高钢级管线钢的有效

维普资讯 http://www.cqvip.com

晶粒尺寸，从而对钢材处理规范提供参考和指导有着现实意义。

1 实验过程

实验所选用材料三个钢级：X65，X70 和 X80，拥有不同组织且分别购自国内外 4 个生产厂家，均为管线实际使用管材，或为管线研究开发的管线钢，化学成分见表 1。钢管规格为 X65 为 φ800mm × 12.5mm；X70 为 φ1016mm × 21mm；X80 为 φ1016mm × 17.5mm，均为 TMCP 技术生产产品。

金相样品直接从实验钢板上切取，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。

EBSD(背散射)在 QTS136XL 扫描电镜上进行，在上述试样电解抛光表面进行观察。EBSD 工作参数为：步长 0.3μm，扫描区域为 200×200 个点。

2 结果与讨论

2.1 有效的晶界夹角

金属材料通常以多晶状态存在，多晶体中不同取向的界面称为晶界。晶界对于金属材料的性能有重大的影响。在金属的冶炼及热处理过程中对晶粒的控制，是获得优质材料的一个重要因素。由此可以窥见晶界的研究在实践中的重要意义。一般的晶界是非共格的，即晶界两侧的点阵不存在明显的对应关系，晶界结构基本上是无序的。对于晶界取向差小于 2°的晶粒，称为亚晶粒。亚晶粒的间接即亚晶界上错排的区域，集中在位错行列所在处，因而是半共格的。小角度晶界可以还原为位错的平行排列，这意味着晶界的失配可以通过驰豫集中于位错芯区之内；当取向差增大时，位错的间距缩小，到 15°左右，相邻的位错芯区发生重叠；即使取向差超过 15°左右，位错行列的图像仍可能在一定程度上被保留。

在小角度的区域($\theta<15°$)，晶界能是随位相差增长的，即适合下列公式：$E=E_0\theta(A-\ln\theta)$ (1)

式(1)中，E_0 和 A 为两个常数。在大角度范围内，晶界能趋于一定值，和位相差无关[2]。

由图 2 可知，晶界能在 15°时取得最大值，当晶界取相差大于 15°以后，晶界能趋于一定值。关于该现象的解释，赛格与肖脱基认为，在大于 15°时晶界能的主要来源是由于屏蔽效应所引起的静电能。不管大角度位相差引起晶界能变化原因何在，都可以看到，当位相差接近 15°后，晶界能达到最大值，并且保持不变，因而在该晶界角度，晶界的阻力最大。也就是说，当裂纹扩展到晶界取向差为大于等于 15°的晶界时，需要克服和消耗的能量最大，从而起到止裂的作用。因而推论到高钢级管线钢，对材料韧性有贡献的晶界取向差应该是大于 15°的晶界。

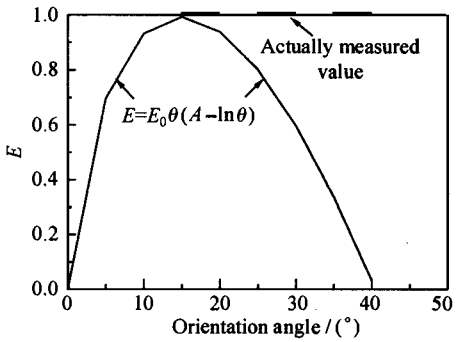


图 2 晶界能与位相角度差的关系

Fig. 2 The relationship between boundary energy and misorientation angle

图 3 为取向差分别从 2°～60°变化时，所测得大于其的平均晶粒尺寸数值。可以看到平均晶粒尺寸在取向差为 2°～35°间变化时，呈现略有增加的趋势。但是在 35°以后，平均晶粒尺寸变化规律性很差。考察原始数据，发现当晶粒取向差大于 35°后，平均晶粒计算所获样本数很小(<10)。

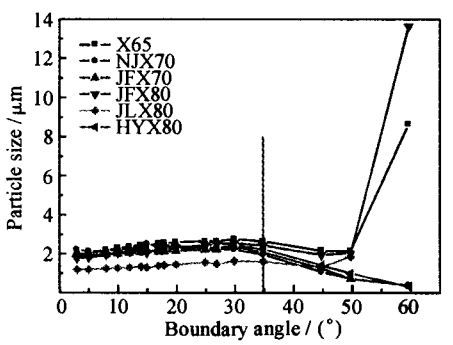


图 3 不同晶粒取向差与其平均晶粒尺寸的关系

Fig. 3 The relationship between boundary angle and average particle size of different linepipe

从图 4 不同晶粒取向差下所获得的晶粒界面彩色图可以看出，当取向差选择小于 35°时，所获得晶界都能够包络一个完整的晶粒，所以能够获得准确的平均晶粒尺寸；当取向差选择大于 35°后，所获得的晶界不能包络一个完整的晶粒，因而选择晶界夹角大于 35°进行有效晶粒的讨论是无效的。

其中，图 4 中黑线是不同晶粒取向差下的晶界线，

维普资讯 http://www.cqvip.com

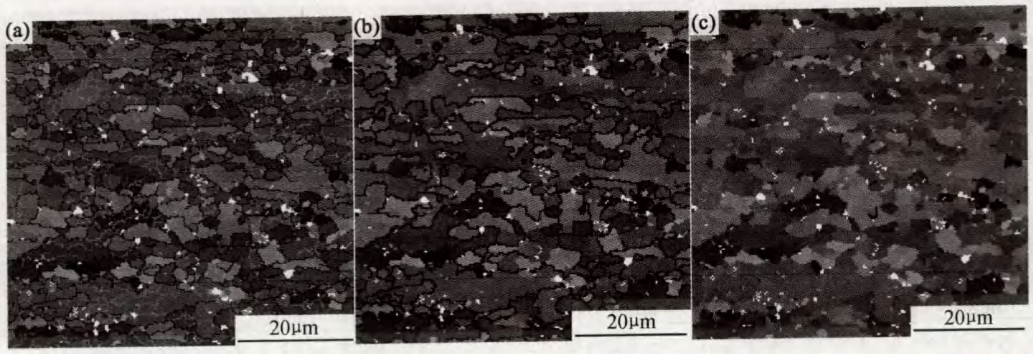


图4 不同晶粒取向差所得到晶界彩色图 (a) 晶粒取向差为15°;(b) 晶粒取向差为35°;(c) 晶粒取向差为45°

Fig. 4 The orientation map of different grain boundary (a) 15°;(b) 35°;(c) 45°

彩色图中不同的颜色代表不同欧拉角的晶粒。

2.2 有效晶粒尺寸的确定及晶体学参数

M. Diaz-Fuentes[3] 等人利用EBSD(Electron Backsattered Diffraction)研究了低碳钢针状铁素体组织的韧性行为。他们利用EBSD分析了和-60℃夏比冲击试样相对应的最小裂纹反射角,发现脆性裂纹只有在晶界取向差最小为15°及以上时才发生较显著的反射。因而,在针状铁素体组织中起控制作用的是那些晶界取向差为15°以上的组织单元。由此,在高钢级管线钢中,由于管线钢组织为以针状铁素体为主,只有那些晶界取向差大于15°的组织单元,即晶粒才是控制高钢级管线钢组织性能的有效晶粒。

在本研究中,由此可以得到,对于X65,X70和X80,大于15°晶界晶界取向差的管线钢有效晶粒尺寸见表1。

由表1可知,系列管线钢的有效晶粒是不同的,国产和进口管线钢的有效晶粒尺寸并没有按照钢级的高低进行有序的分布。其中JLX80管线钢有效晶粒尺寸明显细化,其它X65,X70,X80管线钢有效晶粒尺寸相差不明显。

表1 系列高钢级管线钢的有效晶粒尺寸

Table 1 The effective particle size of series linepipe

Steel grade	X65	JFX70	JFX80	JLX80	HYX80
Effective grain size /μm	2.3932	2.1776	2.0422	1.2867	2.2829

为了进一步区分这些管线钢晶体学参量,将EBSD系统所得铁素体晶粒取向差分布图(图5)作进一步的研究,在该图上,经过对晶粒取向差大于15°和小于15°的晶粒数量作统计后求比值获得了表2,可以看到不同管线钢其大角度晶界和小角度晶界数量的比率有着较明显的差别。

另外,对图5作进一步的数据处理,获得晶粒取向

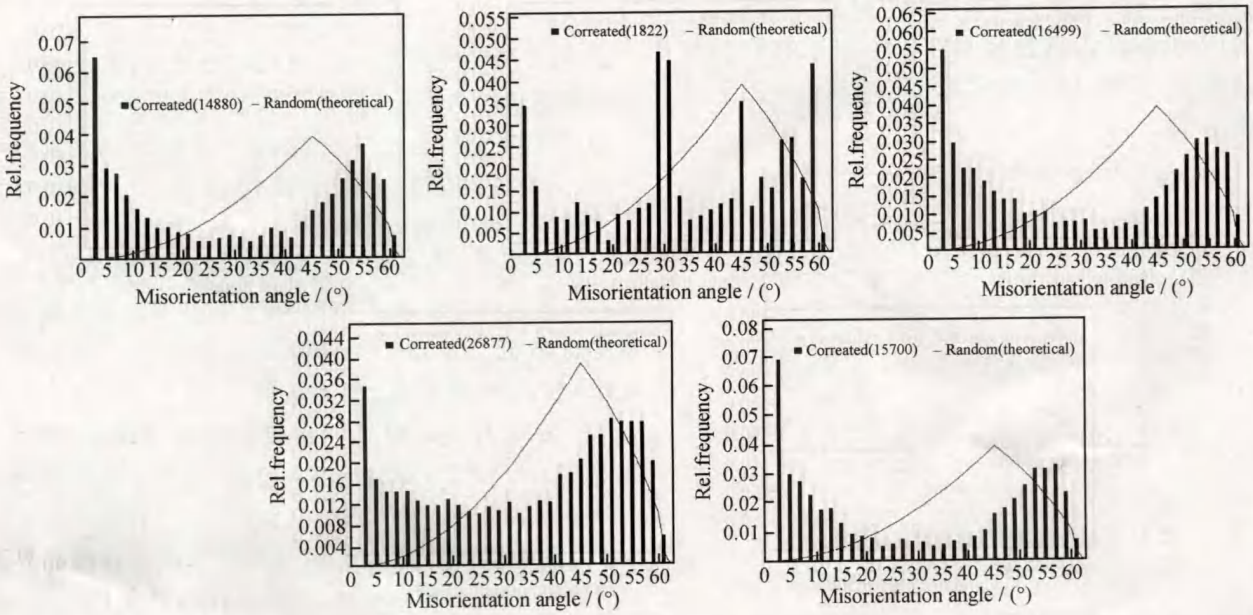


图5 铁素体晶界取向差分布图 (a) X65;(b) JFX70;(c) JFX80;(d) JLX80;(e) HYX80

Fig. 5 Misorientation distribution of ferrite (a) X65;(b) JFX70;(c) JFX80;(d) JLX80;(e) HYX80

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 2 系列高钢级管线钢大角度晶界数量与小角度晶界数量比率

Table 2 The ratio between high angle boundary and small angle boundary of series line pipe

Steel grade	X65	JFX70	JFX80	JLX80	HYX80
The ratio between large angle and small angle(15° is the bound)	1.8957	4.7314	2.0427	3.4517	0.5815

差归一化曲线(见图 6)。对比不同管线钢大角度晶粒取向差的归一化分布图,可以看到除 JFX70 外,其它管线钢的晶粒取向差频度分布曲线相似,只是取向的均匀化程度略有不同。

根据有效晶粒尺寸、大角度与小角度比率、晶粒取向差归一化曲线进行以下这些晶体学参量与材料韧性的关系分析。

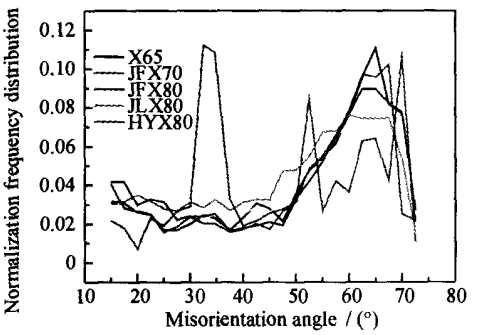


图 6 系列高钢级管线钢晶粒取向差归一化分布比较

Fig. 6 Normalization distribution of misorientation angle of series linepipe

2.3 晶体学参量与韧性行为

对比图 7 中系列高钢级管线钢的夏比冲击韧性,可以看到 JLX80 韧性明显高于其它试样,HYX80,JFX80,JFX70 的冲击韧性分布在一个相近的范围内。X65 虽然在 −40℃以上韧性较高,但在该温度以下,韧性急剧降低。

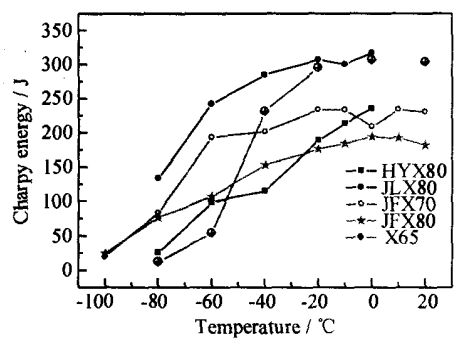


图 7 系列高钢级管线钢的冲击韧性曲线

Fig. 7 Charpy toughness of series linepipe

比较这几种牌号管线钢,可以看到,最主要的区别是有效晶粒度。在以上管线钢中,JLX80 有效晶粒参量明显小于其他管线钢,由此决定了该管线钢拥有优异的韧性。

晶粒细化是钢中最主要的强化方式之一,同时,也是目前所知的唯一既提高强度,又提高韧性的强韧化方式。N. J. Petch 研究了晶粒大小对韧脆转变温度的作用,提出了下列计算式

$$T_k = A + B\ln D^{-1/2} \tag{2}$$

式中:T_k 为韧脆转变温度(℃);D 为晶粒直径(mm);A,B 为常数。

韧性代表了材料抵抗变形和断裂的能力。晶粒细小时,外力可以由更多细小的晶粒所承受,晶粒内部和晶界附近的应变度相差小,因而材料受力均匀,应力集中较小,裂纹不易产生。即使产生了微裂纹,由于晶粒细小,晶界较多,而且相邻晶粒具有不同的位相,于是当塑性变形或微裂纹由一个晶粒穿越晶界进入另一晶粒时,塑性变形或微裂纹将在晶界受阻。同时,一旦塑性变形或微裂纹穿过晶界后,滑移方向或裂纹扩展方向发生改变,必然消耗更多的能量。

J. P. Naylor 在对有效晶粒的分析中,用数学式描述了裂纹通过这种有效晶粒的晶界时所需要的裂纹扩展抗力 σ,即

$$\sigma = \left[\frac{1.4Ea_cW}{Dd}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

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。可见,裂纹扩展抗力 σ 与有效晶粒尺寸 $D^{-1/2}$ 具有线性关系,反映在韧脆转变温度曲线上,就是随着有效晶粒尺寸的减小,韧脆转变温度降低。

观察图 7 中各管线钢的韧脆转变温度,可以知道,系列高钢级管线钢的韧脆转变温度正是随着有效晶粒度的降低,即 X65 > HYX80 > JFX70 > JFX80 > JLX80,韧脆转变温度依次降低。

对于有效晶粒尺寸相差不大的管线钢 JFX80,JFX70,HYX80,X65,由图 6 可知,它们的晶粒取相差分布 JFX80,HYX80,X65 比较接近,而 JFX70 表现出较强的织构。在 JFX70 中,这种形变织构导致管线钢的织构强化,同样也使韧性发生变化,一般认为织构的存在使得管线钢的上阶能降低,但是考虑到表 2 中所得该管线钢大角度晶界和小角度晶界的比值很高,所

维普资讯 http://www.cqvip.com

以该管线钢表现出较好的韧性。

对于X65和HYX80，前者的大角度晶界和小角度晶界比率大于后者，可以看到，前者在韧脆转变温度以上表现出较高的冲击功，但是，大角度和小角度频度比率对冲击韧性的影响不像有效晶粒参量那么规律性强。只作为在相同金相组织下韧性比较的一个参考。因为对高钢级管线钢来说，影响其韧性的因素还跟组织中贝氏体含量、尺寸等有关。

另外，对上平台能和图6晶粒取向差的频度分布来说，有一定的对应性。当有效晶粒度接近时，在图中50°以上晶粒的频度越高，其上平台能也越高。在图6中，大角度晶粒频度分布从低到高的顺序是JFX80＜HYX80＜X65，对应在图7中上平台能由低到高的顺序相同。这可能是高角度晶粒去相差，在裂纹扩展中起到更加重要的作用，裂纹在这样的晶界上扩展时，要耗费更大的功，而且是裂纹在扩展中能够更大的改变方向，从而增加扩展路径。

3 结论

（1）高钢级管线钢中对材料韧性起到积极作用的是晶界取向差大于15°的晶粒，而且研究大于35°取向差的晶粒对管线钢的参数研究是没有意义的。

（2）有效晶粒尺寸、晶界取向差频度分布、大角度晶界对小角度晶界比率是高钢级管线钢研究的重要参数。

（3）晶粒尺寸越细、有效晶粒越小、高角度（大于50°）晶粒频度越高，高钢级管线钢的韧性越好。

参考文献

[1] 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. 89－96.

[2] 冯端. 金属物理学-第一卷[M]. 北京：科学出版社，2000. 416－445.

[3] 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, 34:2505－2516.

收稿日期：2006-12-08；**修订日期**：2007-09-20

作者简介：张小立（1969—），女，博士后，高级工程师，主要从事输送管领域应用基础研究，联系地址：中原工学院材料与化工学院（450007）。E-mail：zhangxiaoli2004@sohu.com

* *

美研制超级新材料 可实现噪音消失

近日美国杜克大学的科学家和西班牙科学家发明了一种可以“隐藏”声音、实现噪音消失和隐形功能的新材料，这种材料可以产生神奇的隐藏“声音”和隐形功能，甚至在声纳、雷达和X光的检查下也发现不了。

据报道，来自美国北卡罗莱纳州杜克大学的科研人员在去年年初的时候与西班牙巴伦西亚理工大学的科学家一起，对材料构造和晶体声波展开研究。他们以电子工程学为基础，对晶体和材料构造进行计算机模拟，同时对固态气体列阵和声波散射的结构进行对比和研究。在他们研究的过程上，科学家们发现，声波与固体材料列阵的数目结构具有特殊的关系，当物质的晶体结构列阵达到一个最佳的数目和级别，那么声波将在物质周围实现“完全围绕”，从而使得声音可以实现完全的隐藏物体。这一发现非常振奋人心，西班牙科学家在这一发现的基础上，开发出了这种新材料，并且在西班牙进行了多次的模拟实验，完全证实了这一发现以及新材料所表现出的神奇效果。就像现实版的哈里波特的“隐身斗篷”一样，声音可以从材料的周围围绕穿过，使材料在雷达和声纳的监测中无法发现，甚至连X光设备也无法查看到，科学家对此非常激动。

西班牙科学家何塞·桑切斯称，他们研制出的超级新材料大约有200层，但是这种材料的厚度超乎想象非常的薄。科学家表示，这种新材料将首先用于军舰和潜艇，将能实现在雷达和声纳的监测下完全的声音静默和隐形功能，新材料也可以用于音乐厅的噪音控制和城市噪音治理。同时，科学家希望这种新材料能够激励未来的声音材料科学研究，完全使噪音无处可藏。