

● 行业综述

管线钢显微组织的基本特征^{*}

彭 涛, 高惠临

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065)

摘要: 简要介绍了管线钢的概念和组织发展过程, 详细论述了管线钢主要组织形态——多边形铁素体(PF)、准多边形铁素体(QF)、粒状贝氏体(GB)、贝氏体铁素体(BF)和针状铁素体(AF)的主要特征。最后, 对管线钢的一些其他组织的基本特征进行了简要分析。

关键词: 管线钢; 多边形铁素体; 准多边形铁素体; 粒状贝氏体; 贝氏体铁素体; 针状铁素体

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3938(2010)07-0005-06

Microstructure Characteristics of Pipeline Steels

PENG Tao, GAO Hui-lin

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: This article briefly introduced concept and structure development procedure of pipeline steels, and detailedly expatiated main structure characteristics of pipeline steels such as polygonal ferrite (PF), quasi-polygonal ferrite (QF), granular bainite (GB), bainite ferrite (BF) and acicular ferrite (AF). Finally, it briefly analyzed basic characteristics of other structures.

Key words: pipeline steel; polygonal ferrite; quasi-polygonal ferrite; granular bainite; bainite ferrite; acicular ferrite

0 前言

现代管线钢是一种控轧控冷状态的低碳微合金化钢。由于低碳、超低碳和多元的微合金化设计, 以及在控轧控冷过程中温度、变形量、冷却速度等不同工艺参数的变化, 管线钢的显微组织形态呈现多样性和复杂性。虽然管线钢的相变过程大多在类似于中碳钢典型贝氏体形成的温度范围内进行, 然而由于管线钢碳含量较低, 在其非平衡的相变产物中通常不含有渗碳体, 从而表现出一些特殊的组织形态特征。几十年来, 国际上经过长期对管线钢显微组织结构的研究, 对管线钢在不同微合金化和不同TMCP条件下形成的显微组织有过不同的理解和描述。20世纪90年代, 日本钢铁学会(ISIJ)和欧美G.Krauss, B.L.Bramfitt等学者对微合金化钢在连续冷却条件下的显微组织进行了系统的研究, 其研究成果逐渐为人们所

广泛引用和接受。20世纪90年代之后, 在对X100和X120等超高强度管线钢的研究中, 对微合金化管线钢组织结构有了进一步的认识。笔者主要对管线钢显微组织的主要特征予以简要的分析和评述。

1 多边形铁素体(PF)

PF是在较高转变温度和较慢冷却速度下形成的先共析铁素体, 因其具有等轴或规则的晶粒外形而称为多边形铁素体或等轴铁素体。

PF优先在原奥氏体晶界形核, 图1为PF在原奥氏体晶粒的三叉晶界及晶界拐角处形核的情形。PF在原奥氏体晶界形核后, 其生长可越过原奥氏体晶界, 使原奥氏体晶界轮廓被掩盖。若发生部分PF转变, 则沿原奥氏体晶界形成网状或仿晶型PF, 可勾画出原奥氏体晶界的轮廓。PF

* 国家自然科学基金项目(50874090)

与母相有确定的位向关系,部分界面与母相保持共格或半共格,所形成的晶粒呈规则的多边形。图 2 和图 3 分别为 PF 的光学显微组织和电子显微镜(SEM)下的组织。可见 PF 具有规则的晶粒外形,晶界清晰、光滑、平直。在光学显微镜下基体呈亮白色,晶界呈灰黑色;在 SEM 下,基体呈灰黑色,晶界呈亮白色。

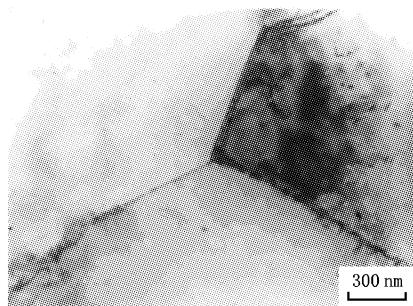


图 1 PF 在原奥氏体晶粒三叉晶界处形核

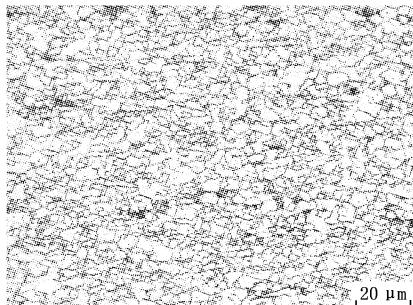


图 2 PF 光学显微镜下的组织

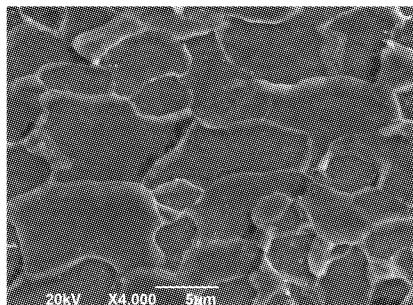


图 3 PF 电子显微镜下的组织

在转变机理上,多边形铁素体的生长表现为置换原子的快速迁移和碳原子的长程扩散。这种置换原子和碳原子的重新配分,使得 PF 的成分与原奥氏体不同。若碳含量超过 PF 的固溶度,在 PF 基体旁形成富碳区。富碳奥氏体较稳定,不形成

PF,在继续冷却过程中发生复杂的转变,在光学显微下呈现为黑色蚀刻区(见图 4)。此黑色蚀刻区为 M-A 的退化组态,通常为珠光体(P),退化珠光体(P')或典型贝氏体(UB 和 LB)。图 5 为 PF 与珠光体(P)共存的情形。

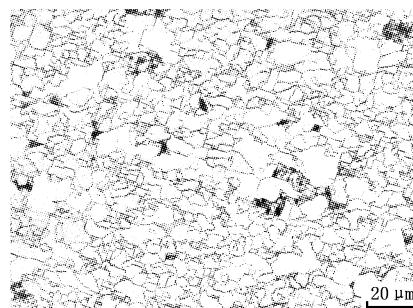


图 4 PF 及黑色蚀刻区

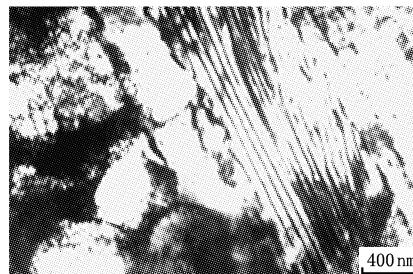


图 5 PF 与 P 共存情形

PF 在高的转变温度下形成,生长速度慢,因而 PF 接近平衡相,有低的位错密度,没有明显的亚结构。图 6 为 PF 中的低密度位错组态和亚结构。通常认为,PF 的位错密度为 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,位错强化的效果不明显。PF 有较低的强度和较高的塑性。



图 6 PF 中低密度的位错组态和亚结构

2 准多边形铁素体(QF)

在较 PF 低的转变温度和快的冷却速度下,

管线钢的显微组织为准多边形铁素体。由于 QF 通过块状转变形成,因而 QF 又称为块状铁素体(MF)。

在组织形态上,QF 与 PF 有较多相似之处。QF 在母相晶界或晶内形成,当优先在原奥氏体晶界形核时,其生长可越过原奥氏体晶界,使原奥氏体晶界轮廓被掩盖。

QF 是在较低的温度下以块状转变的机制形成的,其主要特征是:生成相 QF 与原奥氏体成分相同,相变过程不需要长程扩散。由于在相变过程中,间隙原子或置换原子在迁移界面上进行再分配,相变受界面上的短程扩散所控制,转变速度快,致使 QF 形态不规则,大小参差不齐,呈无特征的碎片。同时,QF 边界粗糙、模糊,凸凹不平,呈锯齿状或波浪状。某 X80 管线钢显微组织(含有 PF 和 QF)如图 7、图 8 所示。由图可以看出,在光学显微镜下,QF 与 PF 的主要差别是:①PF 为等轴晶或规则的多边形,QF 的形态非常不规则;②PF 呈明亮白色,QF 则相对较暗;③PF 的内部洁净,QF 则可见稀疏的黑色点状蚀刻区;④PF 晶界清晰、完整、光滑、平直,QF 晶界则相对模糊、

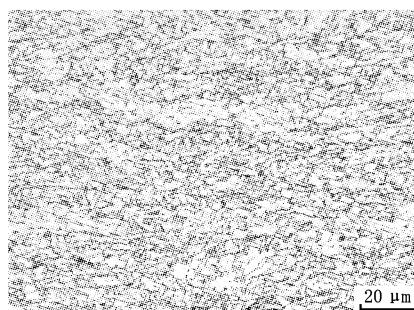


图 7 QF 光学显微镜下的组织

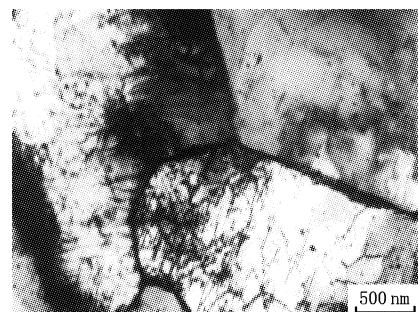


图 8 QF 透射电子显微镜下的组织

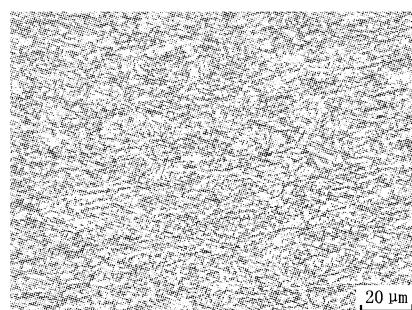
不连续且呈锯齿状。

QF 透射电子显微镜(TEM)显微组织如图 8 所示,可见 QF 以不同的形状交错分布。QF 内有较 PF 高的位错密度和亚结构;在 QF 之间还偶尔可发现 M-A 岛状组织。这些组织特征使得 QF 有较好的强度、塑性、低的屈强比和高的应变硬化能力。

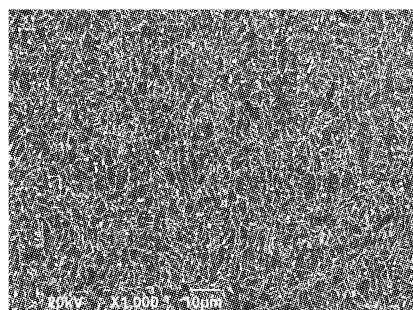
3 粒状贝氏体(GB)

在较 QF 低的转变温度和快的冷却速度下,形成粒状铁素体或粒状贝氏体铁素体(GF 或 GBF),在管线钢中通常称其为粒状贝氏体(GB)。

GB 属中温转变产物。GB 以切变和扩散混合型相变机制而形成,因而 GB 呈伸长的条状,具板条的轮廓并排列成束。由于同一板条束中的板条具有相同的晶体学位向,板条之间为小角度晶界,对侵蚀不敏感,因而在光学显微镜(图 9(a))和 SEM(图 9(b))下,GB 通常表现为不规则的块状,在块状的内部和边界可见粒状 M-A 岛状组织,原奥氏体晶界部分存在。



(a) 光学显微镜下的组织



(b) 电子显微镜下的组织

图 9 GB 光学显微镜和电子显微镜下的组织

GB 在光学显微镜和 SEM 下呈现的不规则块状, 实际上由板条组成, 其板条的形态可借助 TEM 分辨。图 10 为 GB 在 TEM 下的典型形态, GB 以条状分布, 在条间分布有块状或条状的 M - A 组织, 条内为高密度的位错。GB 板条之间为小角度晶界, 板条束之间为大角度晶界。GB 板条束以不同的位向交错分布, 有效地细化了晶粒。这些组织特征赋予 GB 较好的强韧特性。

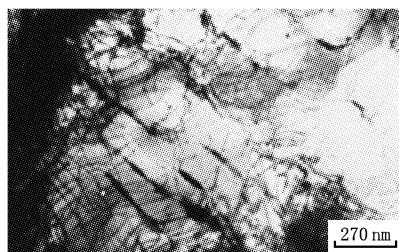


图 10 GB 透射电子显微镜下的组织

在中温相变区的较高温度下, 可形成另一种形态的 GB(图 11)。这种 GB 不呈板条状, 而表现为不规则、无特征的外形。这种不规则外形

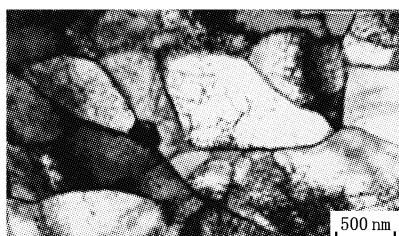


图 11 另一种形态 GB 透射电子显微镜下的组织

可能是在较高温度下片状恢复或熔合的结果。这种 GB 在形态上与 QF 颇为相似, 也被称为粒状组织。

4 贝氏体铁素体(BF)

BF 在较 GB 低的转变温度, 快的冷却速度下形成。

BF 和 GB 同属中温转变, 具有相同的相变机理。然而, BF 相变是在较低的相变温度下完成, 因而 BF 的板条化倾向更为明显。如图 12 所示, BF 板条在光学显微镜下依稀可见, BF 由原奥氏体晶界以相互平行的板条向晶内生长, 不同位向的 BF 束将原奥氏体晶粒分割成不同区域, 勾勒出原奥氏体晶界, 使原奥氏体晶界被保留。BF 的这种板条特征在 TEM 下可得到更清晰的显示。图 13 为 BF 在 TEM 选区衍射下的明场、暗场。BF 板条成束分布, 板条间分别有针状或薄膜状的 M - A 组元, 板条内有缠结的位错。



图 12 BF 光学显微镜下的组织



(a) 明场



(b) 暗场

图 13 BF 透射电子显微镜下的组织

BF 和 GB 有相近的形态特征, 辨识这两类组织十分重要。对比图 14(a)与图 14(b)可以看出, BF 和 GF 的形态特征的主要差别为:①BF 板

条更为细长、平直、清晰;②BF 板条内有更高的位错密度;③BF 板条间的第二相呈针状或薄膜状, GF 板条间的第二相呈块状或条状。

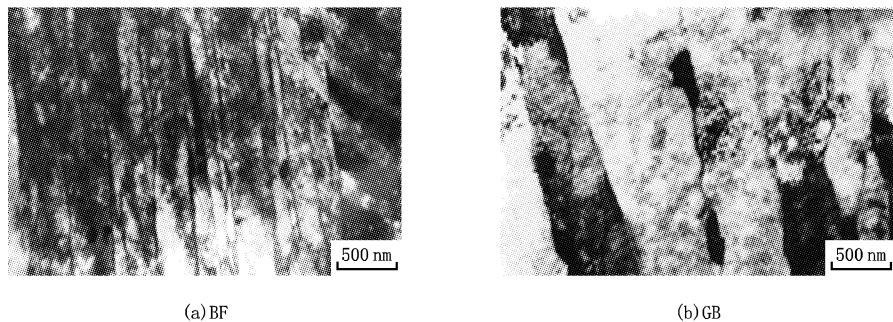


图 14 BF 与 GB 的形态特征比较

5 针状铁素体(AF)

针状铁素体是现代管线钢中广泛使用的显微组织专用术语。1971年,Y E Smith最早对针状铁素体进行了定义:“针状铁素体是在稍高于上贝氏体的温度范围,通过切变相变和扩散相变而形成的具有高密度位错的非等轴铁素体。”结合Y E Smith对针状铁素体的定义和日本钢铁学会(ISIJ)以及G Krauss等学者的研究成果,从相变机理、相变动力学和相变产物的形态特征等方面综合分析,可以认为,针状铁素体并不是一个独立的组织形态。在管线钢中的所谓针状铁素体,其实质是粒状贝氏体、贝氏体铁素体或是粒状贝氏体与贝氏体铁素体组成的复相组织。图15为AF的典型形态。对针状铁素体形态的具体描述应该是:针状铁素体具有不规则的非等轴形貌,在非等轴铁素体之间存在M-A组元,在铁素体内具有高密度位错。

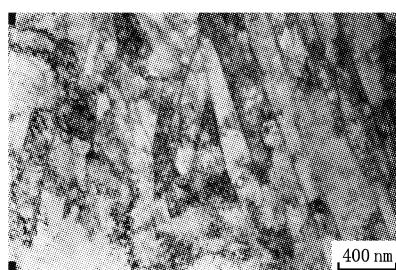


图 15 AF 透射电子显微镜下的组织

针状铁素体是管线钢焊缝组织中常见的组织形态,这不仅是因为焊缝具有形成中温转变产物的冷却条件,而且还因为焊缝中难以避免的夹杂物对针状铁素体的形成有着重要的促进作用。研究表明,焊缝金属中的 TiO , TiN , BN , $Al_2O_3 \cdot MnO$, MnS 和 SiO_2 等都可诱发针状铁素体的形核和成长,形

成所谓的晶内形核针状铁素体(*intragranular nucleated acicular ferrite, IAF*)。在焊缝金属组织中,当使用针状铁素体这一术语时,人们更倾向于强调它的非平行的、伸长的、多位向析出的针片状形态。在光学显微镜下,这种针状铁素体表现为具有一定长宽比(一般认为,长宽比小于1/4)的铁素体片相互交错结构。管线钢焊缝针状铁素体的光学显微组织和透射电子显微组织如图16、图17所示。

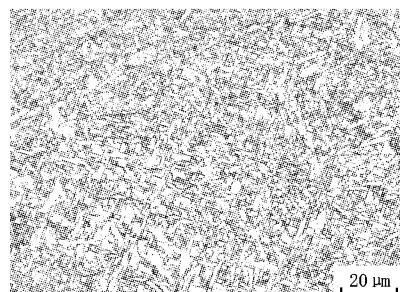


图 16 焊缝 AF 光学显微镜下的组织

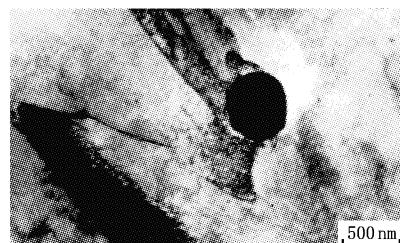


图 17 焊缝 AF 透射电子显微镜下的组织

6 其他组织

管线钢及其在随后的焊接和管件的二次加热过程中,因不同工艺参数的作用,有可能形成马氏体、上贝氏体、下贝氏体和珠光体等。管线钢的这些显微组织与其他低碳钢没有本质区别,其组织特征见表1。

表 1 管线钢不同组织结构的基本特征

名称	符号	转变机理	基体组织形态	第二相	位错密度
多边形铁素体	PF	扩散型	等轴或规则的多边形; 晶界光滑、清晰、平直		低
魏氏铁素体 ^①	WF	扩散和切变混合型	从晶界向晶内生长; 呈侧板条		低
准多边形 铁素体	QF 或 MF	块状转变	形态不规则, 呈无特征的碎片, 大小参差不齐; 边界粗糙、模糊, 凸凹不平, 呈锯齿状或波浪状	偶尔见 M - A	高
粒状 贝氏体 ^②	GB 或 GF	扩散和切变混合型	条状(形成温度高时可呈不规则、无特征外形)	条间分布有粒状或条状 M - A	高
贝氏体 铁素体 ^③	BF	扩散和切变混合型	板条状	板条间分布有薄膜状或针状 M - A	很高
珠光体	P	扩散型	层片状 F 与 Fe ₃ C(若 Fe ₃ C 不连续, 则称为退化 P)		
上贝氏体	UB	扩散和切变混合型	板条状	板条之间为片状或杆状碳化物(若板条之间为 M - A, 则称为退化 UB)	很高
下贝氏体	LB	扩散和切变混合型	板条状	板条内碳化物沿板条轴线呈 55° ~ 65° 分布	很高
板条马氏体	LM	切变型	板条状	板条间为薄膜状残余奥氏体, 板条内存在呈魏氏组态分布的碳化物	位错缠结, 局部微孪晶

注:①在微合金化管线钢中,除焊缝金属外,较少涉及到魏氏铁素体;

②所谓针状铁素体,其实质是粒状贝氏体、贝氏体铁素体或是粒状贝氏体与贝氏体铁素体组成的复相组织。

4 结语

在管线钢的连续冷却过程中,根据转变温度的不同,所形成的主要组织形态有多边形铁素体(PF)、准多边形铁素体(QF)、粒状铁素体或粒状贝氏体(GF 或 GB)和贝氏体铁素体(BF)。在 C - Mn - Cu - Ni - Mo - Nb - V - Ti - B 的合金设计和先进的 TMCP 条件下,管线钢还会形成下贝氏体(LB)和板条马氏体(LM)组织。

管线钢的显微组织呈现出了多样性和复杂性,不同组织形态具有各自特征,通过管线钢显微组织基本特征的研究,对进一步探讨管线钢的组织、性能、焊接行为有重要意义。

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.
- [2] 冯耀荣, 高惠临, 霍春勇, 等. 管线钢显微组织分析与鉴别 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- [3] 李鹤林, 郭生武, 冯耀荣, 等. 高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [4] 翁宇庆. 超细晶钢 - 钢的组织细化理论与控制技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [5] ARAKI T. Atlas for Bainitic Microstructures [J]. ISIJ In-

ter. , 1992(1): 4 - 5.

- [6] CIZEK P, WYNNE B P, DAVIES C H J, et al. Effect of Composition and Austenite Deformation on the Transformation Characteristics of Low-Carbon and Ultralow-Carbon Microalloyed Steels [J]. Metal. Trans. A, 2002, 33A(5): 1331 - 1349.
- [7] BRAMFITT B L, SPEER J G. A Perspective on the Morphology of Bainite [J]. Metal. Trans. A, 1990, 21A(3): 817 - 829.
- [8] KRAUSS G, THOMPSON S W. Ferrite Microstructure in Continuously Cooled Low and Ultralow Carbon Steels [J]. ISIJ Inter. , 1995, 35(8): 937 - 945.
- [9] THOMPSON S W, COLVIN D J, KRAUSS G. Continuous Cooling Transformations and Microstructures in a Low-Carbon, High-Strength Low-Alloy Plate Steel [J]. Metal. Trans. A, 1990, 21A(6): 1493 - 1507.
- [10] ARAKI T. Microstructure Aspects of Bainite and Bainite-Like Ferrite Structure of Continuously Cooled Low Carbon Steels [J]. Materials Trans. JIM, 1991, 32(8): 729 - 736.
- [11] WILSON E A. The $\gamma \rightarrow \alpha$ Transformation in Low Carbon Irons [J]. ISIJ Inter. , 1994, 34(8): 615 - 630.
- [12] OHMORI Y. Bainite Transformations in Extremly Low Carbon Steels [J]. ISIJ Inter. , 1995, 35(8): 962 - 968.
- [13] BHADESHIA H K D H, CHRISTIAN J W. Bainite in Steels [J]. Metal. Trans. A, 1990, 21A(3): 767 - 797.
- [14] THOMPSON S W, COLVIN D J, KRAUSS G. On the Bainitic Structure Formed in Modified A710 Steel [J]. Scripta Metallurgica, 1988, 22(7): 1069 - 1074.
- [15] XIAO Fu-ren, LIAO Bo, REN De-liang, et al. Acicular Ferritic Mirostructure of a Low-Carbon Mn-Mo-Nb Microalloyed Pipeline Steel [J]. Materials Characterization, 2005, 54(4): 305 - 314.