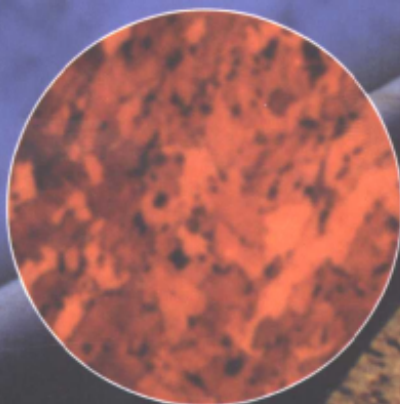
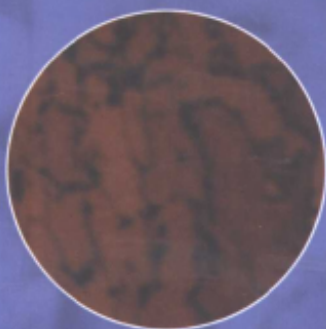


GAOQIANGDUWEIHEJINGUANXIANGANGXIANWEIZUZHI FENXI YU JIANBIETUPU

高强度微合金管线钢 显微组织分析与鉴别图谱

李鹤林 郭生武 冯耀荣 著
霍春勇 柴惠芬



石油工业出版社

高强度微合金管线钢显微 组织分析与鉴别图谱

李鹤林 郭生武 冯耀荣 霍春勇 柴惠芬 著

石油工业出版社

内 容 提 要

作者针对西气东输工程用高强度管线钢的显微组织开展了大量的试验研究,对针状铁素体型管线钢内部组织的判定、组织与性能的关系等进行了详细探讨。本图谱既保持了理论上的严密性,又从工程实践出发,提出了合理可行的检验方案,结合针状铁素体型管线钢组织中各种组织组成物的形成机理,描述了组织特征及鉴别方法。

可供从事高性能管线钢研究开发、组织分析鉴别和工程检验的科技人员参考。

* 本图谱由国家“973”重大基础研究项目“高强度管线钢的关键工艺基础研究(编号G1998061511)”和中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室项目“西气东输用X70管线钢组织性能与断裂控制研究(编号2001J3-01)”部分资助。

图书在版编目(CIP)数据

高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱/李鹤林等著.
北京:石油工业出版社,2001.9

ISBN 7-5021-3538-3

I. 高…

II. 李…

III. 管道-低合金钢-显微组织(金相学)-图谱

IV. TG 142.33-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第068134号

石油工业出版社

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 6印张 147千字 印1—1200

2001年10月北京第1版 2001年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3538-3/TE·2612

定价:66.00元

序

21 世纪是我国天然气大发展的时代。西气东输工程是西部大开发的序幕工程。随着西气东输工程的启动，一个天然气管道建设的新高潮已经到来。高压输送是当前天然气管道的重要发展趋势。采用高压输送可减小管径，通过高钢级管材的选用可减小壁厚，进而减轻钢管重量，并缩短焊接时间，从而大大减少钢材重量和管道建设成本。加拿大的实践表明，每提高一个钢级，大约节约管道建设成本 7%。目前，国际上新建大口径输气管线的设计压力已达 15MPa 左右，大约 70% 采用 X70 钢级，X80 管材也已开始选用。在国内，天然气管道的输送压力最大为 6.4MPa，最高钢级为 X60。X70 及 X70 以上高钢级管线钢还未大批量应用。以针状铁素体型管线钢取代传统的铁素体加珠光体型管线钢是高性能管线钢的发展趋势。经过反复论证，西气东输工程用管线钢拟采用针状铁素体型管线钢。随着国家经贸委“西气东输工程大口径输气钢管国产化”项目的实施，X70 针状铁素体型高性能管线钢及管线钢管已经开发成功，填补了国内空白，使我国管线钢和管线钢管的生产提高到一个新的水平，这种新型管线钢管将在西气东输管道工程上大批量应用。

针状铁素体型管线钢与传统的铁素体加珠光体型管线钢相比具有优良的强韧性、高的形变强化抗力、小的 Bauschinger 效应、良好的焊接性和抗腐蚀性等特点。然而，针状铁素体型管线钢毕竟是一种新型的高性能钢种，其显微组织十分复杂。如何判定钢中组织，进而根据组织特征的研究为合金设计及控轧控冷工艺的改进指出方向等等，对于从事管线钢和管线钢管开发、研究和检验的科技工作者都是新问题。加之国内外有关学者对针状铁素体有不同的理解，讨论组织时采用不同的术语，引起了概念上的一些混乱。以李鹤林院士为首的中国石油天然气集团公司管材研究所和西安交通大学材料科学与工程学院合作，在查阅国内外有关低碳、超低碳贝氏体钢显微组织文献的基础上，开展了大量的试验研究工作，对针状铁素体型管线钢的内部组织进行了多方探讨，在组织的判定、组织与性能的关系等方面取得了很好的成果，并且去粗取精，提炼成我国第一本《高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱》。综览全册，既保持了理论上的严密性，又从工程实践出发，提出了合理可行的检验方案，结合针状铁素体型管线钢组织中各种组织组成物的形成机理，描述了组织特征及鉴别方法。相信这本图谱的出版，必将对从事高性能管线钢研究开发、组织分析

鉴别和工程检验的科技人员有所帮助，也是为西气东输工程所做出的重要贡献。希望广大科技人员继续关心这项工作，并运用这些成果去解决实际工作中的问题。

李虞贞
2001. 8. 27

前 言

在西气东输工程中，我国拟采用针状铁素体型 X70 级别的管线钢，其强度级别较高，金相组织不同于传统的铁素体-珠光体型 (F-P)。由于此类管线钢在国内系首次采用，有关针状铁素体钢的组织特征，影响性能的组织要素等问题对我们来说是一个新课题。为了解决这一问题，中国石油天然气集团公司管材研究所和西安交通大学材料科学与工程学院合作开展了高强度级别微合金管线钢的组织研究，首先查阅了国内外有关低碳及超低碳微合金管线钢显微组织方面的研究文献，并在此基础上采用光学显微镜、扫描及透射电镜等手段对国内外生产的十余种管线钢的内部组织进行了分析、对比，通过工作我们对管线钢组织的判定、各类组织的基本特征有了比较深入的认识，同时对影响组织的因素以及组织与性能之间的联系有了一定的了解。作为工作总结，现将我们拍摄的代表性组织汇编成册。本图谱力求反映高强度管线钢内部组织的基本特征，同时也反映不同钢种组织的特殊性，并且尽可能对组织的差异以及与性能的相关性作一分析。为了便于读者深入了解有关低碳、超低碳钢的显微组织形貌，本书还介绍了近十余年来国外的研究现状，所用的组织术语以及组织分析中的不同见解。

国外从 20 世纪 90 年代以来对低碳及超低碳贝氏体钢的组织特征，曾召开过专题国际会议研讨，并发表过不少研究论文。国内在这方面的交流研讨相对较少，加上在含碳量很低的钢中，贝氏体概念的不确定性，因而在组织的判定方面常有不同见解。因此，我们汇编图谱的另一目的是抛砖引玉，促进同行间的交流，为我国今后发展更高强度级别的管线钢从内部组织的角度作好准备。

针状铁素体型管线钢显微组织的分析与鉴别同时也是由中国科学院金属研究所、中国石油天然气集团公司管材研究所和宝钢股份公司承担的国家“973”课题“高强度管线钢的关键工艺基础研究”中的重要内容。初稿完成后，我们与沈阳金属研究所和上海宝钢股份公司的课题参加人员进行了深入的讨论，同时也与国内从事贝氏体研究工作的相关专家进行了讨论。为了进一步统一认识和便于生产检验，在西安召开了有 16 个国内外研究单位和生产单位参加的研讨会。之后对图谱有关内容又进行了充实和完善。

本图谱主要服务于工程检验，鉴于光学显微镜是工程检验的主要手段，它不仅简便、快捷，而且由于倍数较低，更能从总体上反映组织特征，因此本图

谱提供的照片以光学金相为主。同时也配合扫描电镜和透射电镜的组织照片，以更清晰地显示组织细节，深入了解组织本质。

承西安石油学院高惠临教授惠赠热模拟部分的照片，在此谨致谢意。此外图谱的全部 TEM 照片由西安交通大学朱蕊花工程师拍摄，西安交通大学邓春枝高工和西安管材研究所徐瑛、刘迎来也提供了部分组织的照片，在此一并致谢。

本书由西北工业大学康沫狂教授主审。康教授数十年来致力于贝氏体钢的成分、组织、性能及工程应用的教学和研究工作，有很高的学术造诣，他对本图谱提出了有益的改进意见。此外，西安交通大学王笑天教授也对图谱提出了宝贵的意见，图谱出版工作受到国家“973”“新一代钢铁材料的重大基础研究”项目首席科学家翁宇庆教授的关注和指导，在此一并表示衷心的感谢。

目 录

概述	(1)
一、低碳贝氏体的研究现状	(1)
1. 低碳贝氏体的组织术语	(1)
2. 各种铁素体 (F) 的特征与性能	(3)
3. 低碳贝氏体组织分析的不同见解	(4)
二、高强度管线钢基本组织特征	(7)
1. 对组织检验的建议	(7)
2. 先共析铁素体 (F) 的基本特征	(8)
3. 贝氏体管线钢中的岛状组成物	(8)
4. 贝氏体的基本特征	(9)
5. 有效晶粒尺寸的确定	(10)
6. 管线钢中合金碳化物	(11)
三、高强度管线钢显微组织分析实例	(46)
四、高强度管线钢中的带状组织	(59)
1. 带状组织的起因	(59)
2. 高强度管线钢中带状组织的类型及检验	(59)
五、高强度管线钢焊接接头及热模拟状态的组织	(68)
1. 焊缝	(68)
2. 热影响区 (HAZ)	(69)
3. 焊接热模拟试样组织	(69)
参考文献	(84)

概 述

从 20 世纪 70 年代初控制轧制问世以来，控轧钢技术有了很快发展。在合金设计上采用微量元素 Nb、V、Ti 合金化，钢的含碳量不断下降；在炼钢工艺上采用了低碳、超低硫、真空脱气、夹杂物形状控制及连铸模式控制等新技术；热轧工艺上加大了非再结晶区的轧制量并在轧后采用加速冷却等技术。这些技术的成功应用使钢的质量上升到新的台阶，已成功开发出 API X70、X80 以及 X100 等高钢级钢种^①，同时具有优异的韧性和焊接性。随钢级的提高，钢的内部组织也逐渐由铁素体—珠光体（F-P）型转变为针状铁素体型（即贝氏体），这也是管线钢性能变化的内部原因之一。本图谱正是从这一角度阐述高强度管线钢的内部组织，以及成分、组织与性能的关系。

一、低碳贝氏体的研究现状

“针状铁素体”的概念是由 Y.E.Smith 在 20 世纪 70 年代初期提出的，是指低合金高强度钢在连续冷却条件下获得的不同于铁素体加珠光体（F-P）的一种类贝氏体（Bainite-like）组织。它的转变温度略高于上贝氏体，以扩散和剪切的混合机制实现转变，因为相变只涉及到铁素体（F），不形成 Fe_3C ，其中的少量奥氏体只是残留相（部分奥氏体冷却时转变为马氏体），故称该转变产物为铁素体，而不称贝氏体。又由于铁素体呈板条形态，因此命名为针状 F，获得这类组织的钢种称为针状铁素体钢。从本质上看，针状铁素体属贝氏体，针状铁素体钢就是贝氏体钢。

贝氏体的转变机制及其产物远比高温铁素体加珠光体（F-P）及低温马氏体（M）复杂，从 1930 年 Bain 用光学显微镜发现贝氏体以来，人们对不同钢种的各种组织形态进行过研究，但大多集中于中、高碳钢和含碳量大于 0.15% 的低碳钢。对贝氏体的组织提出了各种分类方法，其中根据铁素体形貌及渗碳体分布特征，把贝氏体分为上贝、下贝可以作为经典的分类法。后来，又提出了把贝氏体分成 B_I 、 B_{II} 、 B_{III} 以及 B_1 、 B_2 、 B_3 ，这些分类法考虑了贝氏体中包括渗碳体在内的各种富碳组成物的分布特征。对贝氏体组织还有一些其他术语，如准上贝氏体、准下贝氏体等，对经典的分类法进行补充，迄今为止，尚无统一的分类和术语。

近年来低碳微合金钢的含碳量不断下降，含碳量小于 0.08% 已普遍使用，超低碳（含碳量小于 0.03%）也已开始大量研究并投入使用。对于这类含碳量很低的钢种，贝氏体的类型及形态又不同于含碳量大于 0.15% 的常用钢种，传统的贝氏体概念已不再适用，于是对低碳钢的贝氏体组织引起了关注。1992 年 ISIJ（日本钢铁学会）出版了贝氏体组织图谱，1994 年曾在东京召开过“现代低碳高强度钢显微组织新特点”的专题讨论会，这方面的研究文章也时有发表。但有关低碳贝氏体的分类及各种术语仍未能统一，这里将简述这方面的研究现状。

^① 国际通用的 API 标准以规定的最低屈服强度级别命名钢种，如 X52、X60、X70、X80 等，数字表示以规定的最低屈服强度的 ksi 单位制的值，如 X80 表示以规定的最低屈服强度为 80ksi（550MPa），X70 表示规定的最低屈服强度则为 483MPa。

1. 低碳贝氏体的组织术语

(1) 大森的贝氏体分类法及术语:

早期对贝氏体的认识局限于贝氏体是铁素体 (F) 和 Fe_3C 的两相混合物, 然而在低碳钢的贝氏体中, 并不一定存在 Fe_3C , 大森等在 20 世纪 70 年代初首先提出了包含奥氏体的贝氏体分类法, 见表 1-1。

表 1-1 大森的贝氏体分类法

组织组成物	准 则	
	F 形态	碳化物分布
铁素体	板条状	针状 F (无碳化物)
上贝	B_I 板条状	板条界面保留残余奥氏体
	B_{II} 板条状	碳化物在板条间析出
	B_{III} 板条状	碳化物分布于板条内部
下贝	片状	

他们还发现低碳钢的贝氏体总是板条状的, 因此认为低碳钢的贝氏体都是上贝氏体, 在上贝氏体的较高温度范围内, Fe_3C 的析出得到抑制, 板条间残留了奥氏体, 随转变温度的下降, Fe_3C 才能在板条间和板条内析出, 根据第二相的性质和析出位置, 把上贝氏体分成 B_I 、 B_{II} 、 B_{III} 。到目前为止, 这个分类方法在焊接用钢及低合金高强度钢中仍经常采用。

(2) ISIJ 和 G. Krauss 的分类和术语:

ISIJ (日本钢铁学会) 贝氏体研究小组比较系统地研究了含碳量很低的一些钢种在各种工艺条件 (包括控轧或重新加热状态) 的显微组织, 发现它们的组织形态虽与贝氏体有些相似, 但又不完全满足贝氏体的定义, 现有的贝氏体术语不能反映他们的特征, 提出了另一套组织术语来描述低碳贝氏体组织。表 1-2 为 ISIJ 提出的各种组织术语及符号。

从表 1-2 中看出: ①各种不同形态的显微组织均命名为 F, 尽管有些 F 本质已属贝氏体, 但不用贝氏体术语, 这点容易引起混淆, 其理由可能是奥氏体只转变为 F, 没有其它产物相, 残留的奥氏体在更低温度下才发生转变; ②连续冷却时, 低碳奥氏体不可能转变为上、下贝氏体, 在很快的冷却速度下直接过渡到马氏体; ③组织中除 F 外, 还有少量二次相, 它们都是残留的富碳奥氏体在冷却时的转变产物。

G. Krauss 等人在高强度低合金钢的显微组织研究中, 所采用的术语以及术语的含义与 ISIJ 接近。只是 ISIJ 所指的贝氏体铁素体在 Krauss 的分类中称为针状铁素体。表 1-2 中同时列出了他们的术语及用英语首字母缩略法表示的符号。

表 1-2 ISIJ (左) 及 Krauss (右) 等采用的低碳奥氏体转变产物之术语及符号

术 语	符 号	术 语	符 号
I. 主要基体相			
多边 F	α_P	多边 F	PF
准多边 F	α_Q	准多边 F 或块状 F	QF、MF
魏氏组织 F	α_W	魏氏组织 F	WF
粒状贝氏体 F	α_B	粒状贝氏体	GF 或 GBF

术 语	符 号	术 语	符 号
贝氏体 F	α_B	针状 F 或板条 F	AF 或 LF、LBF
位错立方马氏体	α'_m		
II. 少量二次相			
残余奥氏体	γ_r		
马氏体—奥氏体	MA		
上、下贝氏体	B_u 、 B_l		
退化珠光体及珠光体	P' 、 P		
渗碳体	θ		

2. 各种铁素体 (F) 的特征与性能

在细晶粒的控轧微合金钢板材中, 很少发现魏氏组织 F, 故这里只介绍多边 F、准多边 F、贝氏体 F 以及粒状贝氏体 F。

(1) 多边 F (Polygonal Ferrite—PF) 和准多边 F (Quasi—polygonal Ferrite—QF):

多边 F 是在很慢的冷却速度下形成的先共析 F, 具有规则的晶粒外形, 故称其为多边 F 或等轴 F。如果转变量很少, 转变又常常从晶界开始, 此时 F 的分布勾划出了母相奥氏体晶界的轮廓, 故常称它们为仿晶界型 F (Allotriomorphic Ferrite)。

准多边 F 也是先共析 F 的相变产物, 是在较低的温度下通过另一类相变方式——块状转变 (Massive Transformation) 而得到, 因此又称块状 F (或 MF)。块状转变的特点是新相与母相成分相同, 因此只要把合金过冷至新、母相自由能相同的温度 T_0 下, 就能发生这类转变。含碳很低的碳钢在快速冷却时有可能满足这个条件, 以块状转变方式实现先共析转变。

多边和准多边 F 都是先共析析出相, 它们的生长都由热激活过程所控制, 两种 F 晶粒生长均可越过奥氏体晶界, 使原晶界的轮廓被掩盖。但两者的转变温度不同, 导致不同的机制和组织形貌。多边 F 接近平衡相, 其成分与母相奥氏体不同, 所以多边 F 生长受控于置换原子的快速迁移及 C 原子的长程扩散。此外, 多边 F 与母相常有确定的位向关系, 其一部分界面与母相保持共格或半共格, 通常其生长速度较慢, 最终的晶粒呈规则的多边形。而准多边 F 是在较低的温度下块状转变而形成, 由于新、母相成分相同, 故不需要长程扩散, 只要母相原子越过界面即可生长, 且母相与新相的界面在所有方向都是非共格的大角度晶界, 所以转变速度很快, 最终的晶粒尺寸往往较大, 形状不同于多边 F, 呈高度的不规则, 边界粗糙, 凹凸不平, 犹如一块无特征的碎片。准多边 F 基体上偶尔也可见 MA 小岛, 照片 2-2 为准多边 F 的组织特征。准多边 F 内部有高的位错密度, 通常比平衡相高一个数量级。

从性能上看, 准多边 F 的显微组织有较高的强度水平及优异的延性, 此外, 内部较高的位错密度和 MA 小岛, 还使钢具有低的屈强比和高的应变硬化速率。

(2) 贝氏体 F (Bainitic Ferrite—BF):

这是低碳钢 (含碳量小于 0.15%) 典型的贝氏体组织, 由带有高位错密度的板条铁素体晶体组成, 若干 F 板条平行排列构成板条束, 一个奥氏体晶粒可形成很多板条束, 板条界为小角度晶界, 板条束界面则为大角度晶界, 鉴于其板条的特征, 故贝氏体 F 又称板条 F

(LF 或 LBF)。在 ISIJ 术语中的符号为 α_6 ，不少学者受“针状铁素体钢”术语的影响，则习惯于称其为针状 F (Acicular Ferrite—AF)。此外，板条间可能有条状分布的 MA 岛。针状 F 形态与低碳钢中的无碳贝氏体相似，只是由于形成温度稍高，板条特征不如无碳贝氏体发达，有些板条界在形成后还会发生回复，以至常能观察到板条界不连续的现象。针状 F 组织在大森贝氏体分类法中属 B_1 贝氏体。

从理论上说，板条 F 的鉴别要依靠 TEM，由于低角度晶界难以显示，光镜下板条 F 束常成为无特征的 F 晶粒。然而，经适当的深侵蚀，在光镜下仍能观察到依稀可见的板条轮廓，在扫描电镜下它的特征更为清晰。特别是当板条间有 MA 小岛分布时，平行排列的板条 F 特征显示得更为清晰可靠，所以，根据经验在光镜下鉴别针状 F 是可能的。

比之于珠光体，组织中形成贝氏体 F 对强度和韧性是有益的，强化归结为由转变温度降低引起的晶粒细化效应，以及亚晶界强化和位错亚结构强化。而韧化的原因除了细化晶粒外，还由于消除了大块珠光体，组织中硬质相 (MA) 的尺寸更小，分布更为均匀。但如果针状 F 中 MA 数量过多，尺寸较大，特别当 MA 的长宽比大于 4，并带有尖角形时，同样显示对韧性的有害作用。

(3) 粒状贝氏体 F (Granular Bainitic Ferrite—GBF):

在介于准多边 F 和板条贝氏体 F 的范围内形成的组织也属于中温转变产物，只是形成温度稍高，组织形态稍有不同，所以把它们列为独立的一类组织。与板条 F 相同的是基体上都带有板条的轮廓，说明铁素体的形成在一定程度上也是依靠切变机制，此外都有弥散的岛状组织分布于铁素体基体上。不同的是，粒状贝氏体中小岛更接近于粒状或等轴形状。如要仔细区分，可以发现在更高的温度下形成的粒状贝氏体组织中，铁素体亚结构不呈板条状，而是等轴亚晶，岛在其上的分布趋于无序排列，而在较低的温度下形成的粒状贝氏体，铁素体亚结构为板条状，粒状小岛分布于板条间，显得较为有序。研究贝氏体相变的不少学者认为两者的转变机理及产物性能是不同的，应该分作两类组织，前者的形成温度高，铁素体是通过块状转变而得，应称为“粒状组织”；后者的铁素体是通过切变机制而得，可称为粒状贝氏体。粒状组织往往较为粗大，对强度和韧性有不利影响，而粒状贝氏体则有较好的性能。然而，ISIJ 和研究 HSLA 钢的不少学者仍把这两种组织归作一类，认为粒状组织只是准多边贝氏体和粒状贝氏体之间的过渡组织。

3. 低碳贝氏体组织分析的不同见解

尽管对(很)低碳贝氏体组织形貌的研究已取得一些共识，ISIJ 等也提出了一些术语来描述组织，但是在实际组织判定中仍遇到不少困难，有不同的见解，主要原因有两个方面：

(1) 目前对组织的理解及术语的使用仍有很多混乱。以最常用的“针状铁素体”术语为例，有各种不同理解，有些知名学者，如剑桥大学的 Bhadeshia 教授认为用“针状 F”描述板材组织是不确切的，应该采用“板条 F”或板条贝氏体 F 的术语，而“针状 F”用于描述 HSLA 焊缝中以夹杂物为核心辐射长出的、具有明显针形的铁素体(照片 5-5)这一组织才是合适的。不过多数人还是接受了“针状 F”钢术语在 HSLA 钢领域中应用由来已久的事实，认同了“针状 F”术语的应用。然而，各自对针状铁素体的理解也是不同的，如：①美国 G. Krauss 等学者把中温转变产物分成粒状贝氏体和针状 F 两类，在较低温度下析出的称为针状 F，如图 1-1 中 C 曲线所示。②日本 ISIJ 大多数学者把“针状 F”作为奥氏体中温转变产物的代名词，在 C 曲线中用“ Z_w ”表示之(图 1-2)。然而“ Z_w ”所指的范围，各学者之间也没有统一，也有的把“ Z_w ”理解为高温 (F-P) 和贝氏体之间的过渡产物，

也包括一部分块状 F (图 1-3)。在具体分析贝氏体组织时, 他们还是采用粒状贝氏体和板条贝氏体 F。③加拿大 Alberta 大学及 Stelco 钢铁公司的研究中把针状 F 和板条 F 判为两类组织, 前者形成的冷却速度稍慢于板条贝氏体, 两者在 TEM 下均有平直的界面, 相邻界面

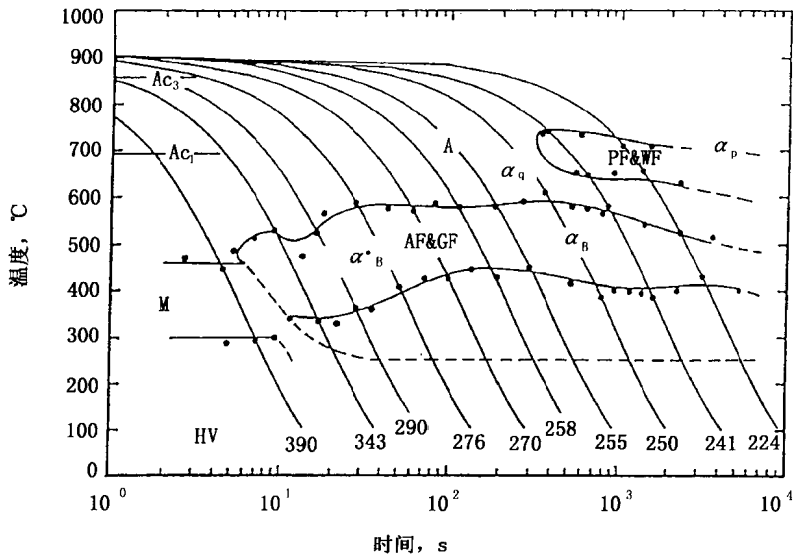


图 1-1 Fe-0.06C-1.45Mn-1.25Cu-0.97Ni-0.72Cr-0.42Mo 的 C 曲线

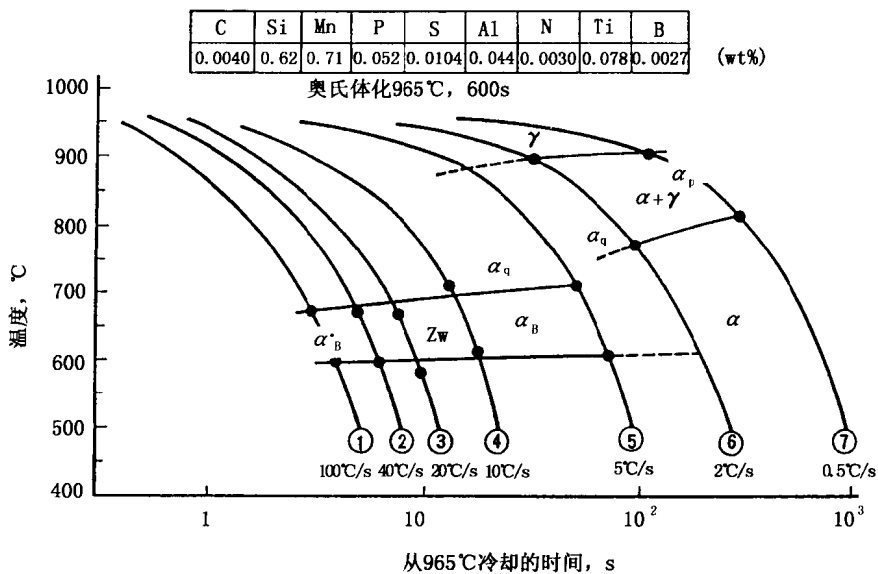


图 1-2 低碳钢 (成分如表) 经 965°C、600s 奥氏体化后的 C 曲线
(术语符号的意义见表 1-2)

的位向差都为小角度，但贝氏体的板条更长，位错密度更高，而“针状F”的板条更宽。在研究论文中还可以发现其他的分类及术语，如用大森分类法 B_I 、 B_{II} 、 B_{III} 或 Bramfitt-Speer 分类法 (B_1 、 B_2 、 B_3) 等。总之，人们对贝氏体术语的理解还远远没有统一。

同样，术语使用的不统一在国内也有反映，也产生了一定程度的混乱。

(2) 组织判定的困难或不同见解，还起源于组织本身的复杂性，这是由于：①在未再结晶区控制轧制和加速冷却形成了细小的晶粒和高的位错密度，同时变形也引起了组织的变态，使组织难以分辨；②很低的含碳量使贝氏体转变温度上升，在相变同时还伴随着明显的回复过程，所得的组织与经典的贝氏体有很大的偏差，使低碳贝氏体概念有很多不确定性；③连续冷却形成的组织是渐变的，在各种典型组织之间有很多过渡形态。上面介绍的粒状组织就是准多边F和粒贝之间的过渡；同样，从粒贝到板条F之间的变化也是连续的，有学者曾采用退化板条F的术语描述这一过渡形态。

由于上述一些原因，不同的研究者对同一组织往往得出不同的结论，即使同一个研究小组，在不同的钢种或不同的研究时间也会有不同的判定，图1-4为同一个研究小组发表的两篇论文中的C曲线，内有若干虚线将C曲线分成若干区域，在图1-4(a)的曲线中将PF、WF和MF(即QF)划为一类，而在图1-4(b)的曲线中却将QF和粒贝划为一类，由此可见实际判定组织的难度。

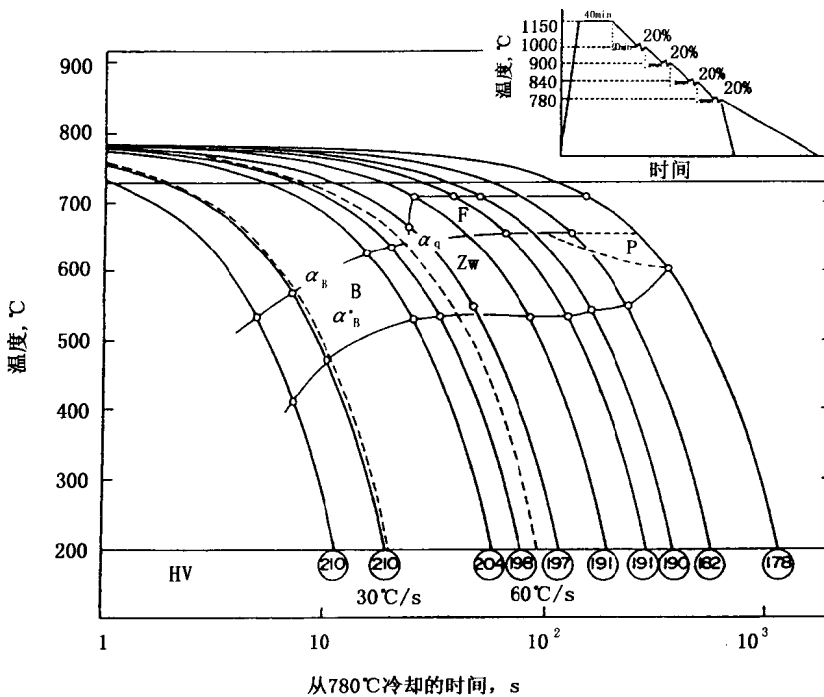
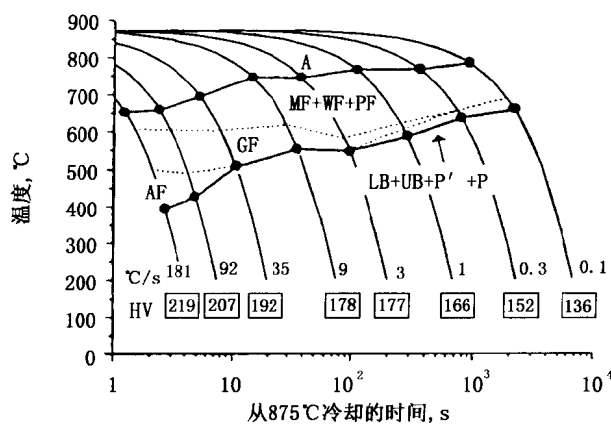
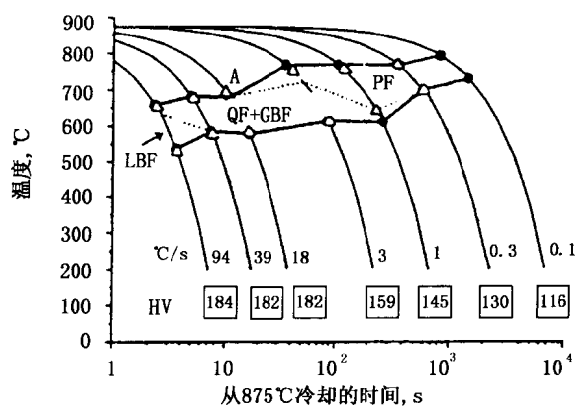


图1-3 Fe-0.03C-1.74Mn-0.039Nb-0.011Ti-0.001B控轧后的C曲线
(轧制工艺见右上图)



(a)



(b)

图 1-4 同一研究小组在不同钢种中采用不同的组织判定方法

二、高强度管线钢基本组织特征

1. 对组织检验的建议

(1) 对术语含义理解的不一致, 会给检验工作带来一定的麻烦。根据目前情况要在国际或国内取得术语的统一尚不可能, 然而, 为了避免混乱, 在行业中应该对某些术语有统一的认识。在本图谱中, “针状 F” 是泛指具有贝氏体特征的组织, 即包括粒状贝氏体、板条贝氏体铁素体等。理由是, 由 Y. E. Smith 最先提出的针状铁素体是指金相组织有别于 (F-P) 的一类组织, 由于转变温度偏高, 组织组成及形貌不同于经典的上贝氏体, 然而其转变机理又带有切变的性质 (为扩散和切变混合机制), 故当时称其为类贝氏体。根据这一点, 粒状贝氏体和板条贝氏体 F 转变时都有切变的特征, 都符合这个条件, 因此都是“针状 F 钢”中的贝氏体组织。建议在板材组织检验中, 直接采用“贝氏体”术语, 若要详细描述贝氏体细节, 则用粒贝和板条贝氏体 F。此外为了避免与焊缝组织中的针状铁素体术语重复而不采用“针状 F”。

(2) 组织的分类宜粗不宜细, 检验时应分清主次。由于低碳钢连续冷却时所得的是多相

混合组织，包含了从多边 F 到板条贝氏体 F 的各种组织，判定时为了全面反映组织，往往同时标上了所有可能出现的组织，如多边 F、块状 F、粒贝、板条贝氏体 F、珠光体、MA……。这样的判定没有分清主次，也难以反映材料真实的组织特征。为了克服这一弊病，首先作为工程检验，组织的分类不宜过细，实际上贝氏体中各类组织是连续的，难以截然分开，建议根据奥氏体连续冷却转变曲线的特征，把组织分成铁素体 (F) 和贝氏体 (B) 两类。其次，要分清主次，在组织定量有困难时，至少要说明何者是主要的，如有可能，给出大致的估计量。此外应注明富碳奥氏体转变产物的性质，是大块的高温共析转变产物珠光体 (P)，还是岛状 MA 或退化珠光体 (P')、上贝氏体 (B_u)，这是区分 F-P 钢或针状 F 钢的重要标志。

(3) 除组织类型外，晶粒大小、均匀度 (或混晶特征)、岛状物的特征、带状组织等对性能有重要影响，有些情况下，这些组织要素对性能的影响可能超过了组织类型的作用，所以检验时要全面关注这些组织要素。

2. 先共析铁素体 (F) 的基本特征

对于 X70 级别的管线钢，低的含碳量加上在未再结晶区大的轧制变形量，C 曲线位置肯定偏左，即使在轧后加速冷却的条件下，也得不到全贝氏体 (即全针状 F) 组织，先共析 F 的析出难以避免。根据析出机理，先共析 F 可以分为较高温度下析出的多边 F 和在较低温度下按块状转变机制析出的准多边 F (又称块状 F)。两者的形貌是不同的，前者具有规则的外形，后者的边界极不规则，内部偶尔可见小岛。检验者应了解两种先共析 F 的差异，但实际鉴别时要把两种 F 截然分开也很困难，因为它们形成是逐渐过渡的。为了方便操作，可将两种 F 合并为一类，简称铁素体 F 或先共析 F。由于目前大多数控轧钢轧后采用加速冷却，所得的 F 往往以准多边 F 即块状 F 为主，故也可把先共析 F 称为块状铁素体。铁素体不论是多边的还是块状的，在光镜下常常表现为有清晰的边界，由于亚结构不发达，呈亮白色，与周围的贝氏体相比，有一定的衬度差，因此在光镜下仔细观察是能够鉴别的。如果采用热染法，将抛光侵蚀好的试样在空气炉内 (250℃) 放置一定时间后，再在显微镜下观察，铁素体显示更为明显。照片 2-1~照片 2-6 为铁素体在光镜下的形态，在 TEM 下先共析 F 的特征是：相对于周围的贝氏体 F，位错密度较低，尺寸较大，大多数情况下有不规则的外形，如任意弯曲状或锯齿状，偶而也可见其上的小岛。照片 2-7 为铁素体在 TEM 下的形态。

3. 贝氏体管线钢中的岛状组成物

低碳微合金钢连续冷却转变为贝氏体时，在形成板条 F 的过程中，碳在剩余奥氏体内逐渐富集。由于相变温度高，相变驱动力小，转变不能进行到底，少量奥氏体残留下来，以岛的形式分布于板条间，同时在大角度晶界上也常有小岛存在，这可能是碳沿晶界扩散较快的原因 (图 2-1)。岛内的成分主要是碳的富集，合金元素含量与基体相近。岛内的碳量富集程度尚不够达到析出碳化物的水平，故成为富碳奥氏体岛，在冷却过程中，富碳奥氏体可能发生转变，最终的组织取决于钢的成分、碳的富集程度以及冷却速度。对于管线钢成分而言，富碳奥氏体难以保留至室温，大部分奥氏体冷却时将转变为马氏体，称 MA。当碳的富集程度不足或冷却速度不够快时，也可能转变为珠光体，但其中 Fe₃C 片往往很不完整，常呈破碎状，故称其为退化珠光体 (P')，有时也可能转变为上贝氏体。值得注意的是，各个奥氏体岛的碳富集程度是不一致的，即使在一个岛内碳量的分布也是不均匀的，岛的各部位、心部和边缘等碳量往往不同，因此常出现各个岛或者同一个岛的各部分转变产物的不一致。

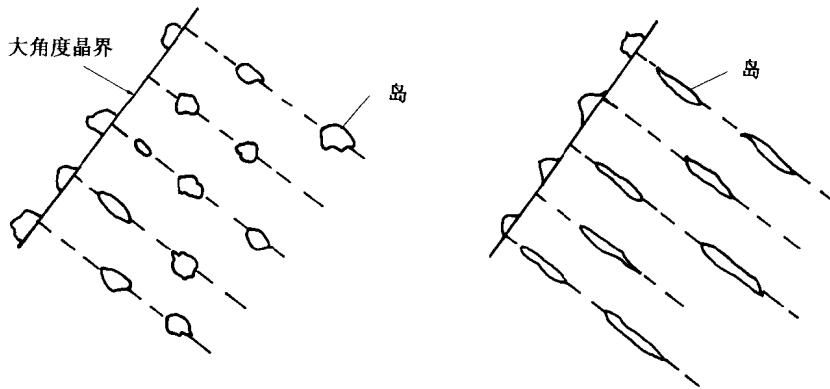


图 2-1 贝氏体中小岛分布示意图

岛状组织与 F-P 钢中的珠光体不同，后者是高温共析转变产物，尺寸较大，分布于铁素体晶粒的交会点，而贝氏体钢中富碳组成物的分布更为均匀，尺寸更为细小，这可能也是贝氏体钢在保持高强度水平的同时仍具有良好的韧性的原因之一。然而，MA 毕竟是脆性组成物，它对管线钢的韧性可能有不利的作用，因此岛状物也是低碳贝氏体钢的一个组织特征，小岛的数量、大小、形态及分布对管线钢的韧性及 HIC 抗力有一定的影响。理想的情况应该是数量少、尺寸小、分布均匀，形态应趋于球状，那些长条状的，或带有尖角的 MA 对性能不利。

岛状组织在光镜下的特征为：尺寸较大的 MA 呈亮白色，其色彩较基体稍黄或带灰，有微微凸起的感觉；尺寸很小时呈黑点或黑色线状，光镜下难以分辨细节。如岛状物为 F+Fe₃C，一般尺寸较大，呈黑色，但黑度不均匀，内部形态难以在光镜下鉴别，照片 2-8 给出了光镜下常见的岛的形态及分布特征。照片 2-9 给出了 MA 岛在光镜下的分辨。SEM 的较高分辨率足以鉴别岛状物的内部组织，如为 MA，呈均匀亮白色，有凸起感，如为珠光体，可分辨 Fe₃C 片或点。照片 2-10 给出了 SEM 下观察到的各种岛状物的形态及内部组成物的一组照片。利用透射电镜能可靠地确定岛内细节，照片 2-11 与照片 2-12 分别给出了 MA 型小岛和非 MA 型岛的组织。

目前，关于小岛特征影响因素的研究报导较少，从理论上分析主要还是成分和冷却速度。钢的含碳量直接影响到岛状物的相对量，降低碳量可以减少岛状组织。合金元素在增加奥氏体稳定性的同时，使 F 板条分布的倾向更明显，导致 MA 分布于板条间呈长条状，照片 2-13 说明了钢中铌含量对 MA 形态的影响，固溶铌改善奥氏体稳定性的倾向十分强烈，随 Nb 含量增加，岛的形态及分解产物都有明显变化。冷却速度对 MA 的影响表现为：适当的快冷可以减少岛状物的相对量，并使其细而分散地分布于 F 中，随冷却速度减缓，MA 相对量增加，且尺寸增大，呈棒状或块状。当冷却速度更慢时，奥氏体岛则分解为 F+Fe₃C 两相产物，如退化珠光体或上贝氏体等。

4. 贝氏体的基本特征

如前所述，(很)低碳贝氏体的形态主要可分为粒状贝氏体和板条贝氏体 F，它们在光镜下常具有以下特点：

- (1) 隐约可见的板条轮廓；
- (2) 基体上有富碳的岛状组织，岛的排列有一定规律；