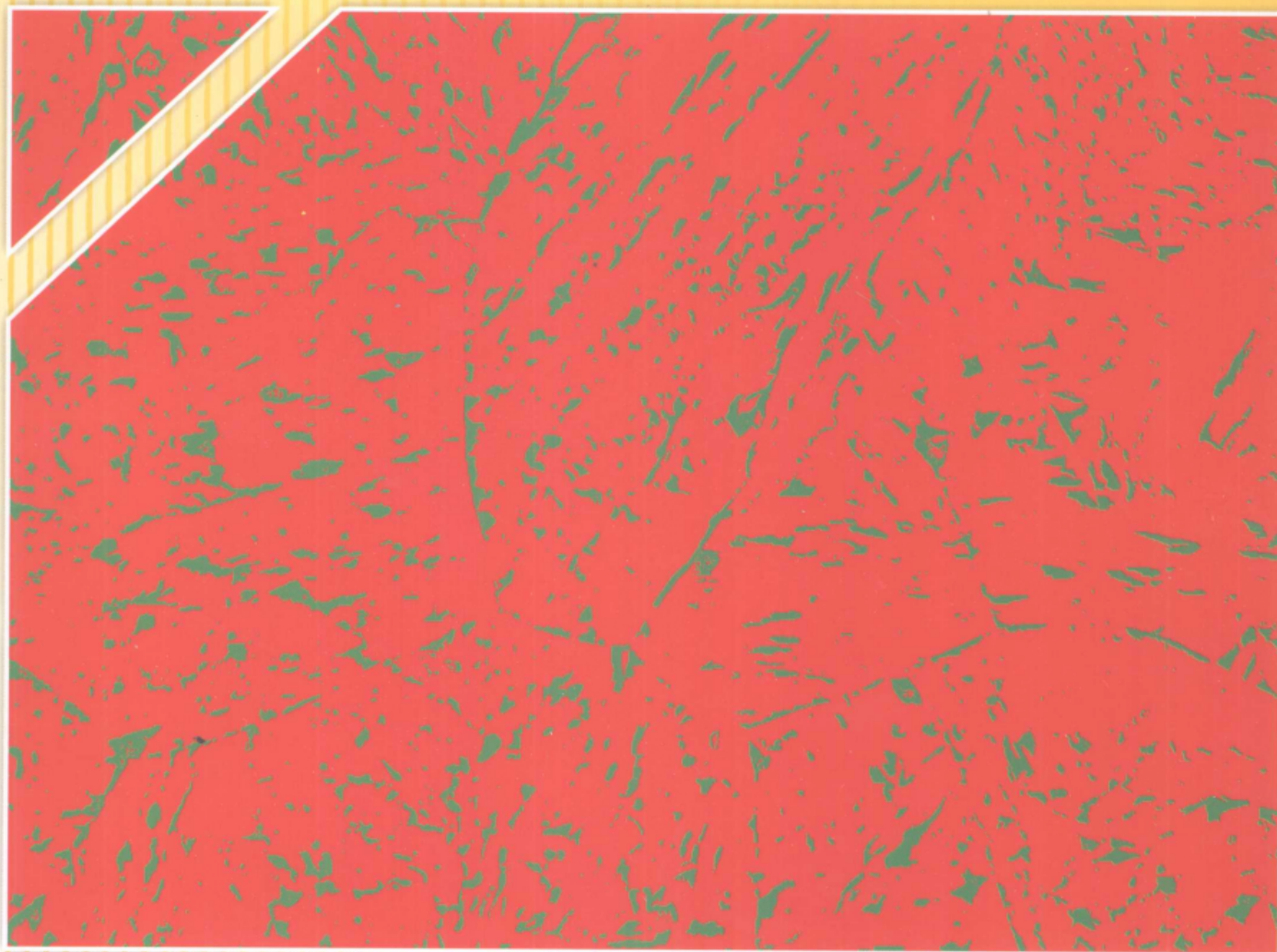




管线钢显微组织的分析与鉴别

冯耀荣 高惠临 霍春勇 吉玲康 李为卫 等著



陕西科学技术出版社

管线钢显微组织的 分析与鉴别

◎冯耀荣 高惠临 霍春勇
吉玲康 李为卫 等著

陕西科学技术出版社

内容提要

本书重点针对我国西气东输二线等重大管道工程用高强度管线钢的显微组织开展了大量系统的试验研究,结合管线钢组织中各种组成物的形成机理,阐述了组织特征及鉴别方法。对不同钢级、合金体系和含量、组织类型、不同壁厚和部位管线钢组织的判定,组织、性能及工艺的关系等进行了详细探讨,列举了大量实例,同时还包括了管线钢焊接组织、二次热加工组织、预应变及应变时效组织的分析。综览全册,既具有理论上的严密性,又具有很强的针对性。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及管理人员参考。

本书由国家科技支撑计划项目(2008BAB30B01)、国家自然科学基金项目(50874090)和中国石油“西气东输二线工程关键技术研究”重大科技专项(6990-HT-XEX-(2008)-0135)资助。

图书在版编目(CIP)数据

管线钢显微组织的分析与鉴别冯耀荣,高惠临,霍春勇,吉玲康,李为卫等著.

西安:陕西科学技术出版社,2008.12

ISBN 978-7-5369-4525-8

I. 管… II. ①冯…②高… III. 钢管—显微组织(金相学)—研究 IV. TG142.33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第195456号

出版者 陕西科学技术出版社

西安北大街131号 邮编710003

电话(029)87211894 传真(029)87218236

http://www.snstp.com

发行者 陕西科学技术出版社

电话(029)87212206 87260001

印刷 陕西省乾兴印刷厂

规格 880mm×1230mm 16开本

印张 20

字数 413千字

版次 2008年12月第1版

2008年12月第1次印刷

定价 160.00元

版权所有 翻印必究

编辑委员会

顾问 李鹤林 康沫狂 黄志潜 潘家华

名誉主任 李鹤林

主任 杨 龙

副主任 方朝亮 冯耀荣 杨祖佩

委员 (按姓氏笔画排序)

丁晓军 王晓香 王茂棠 王国丽 马秋荣 乔 立 赵新伟
秦长毅 刘文成 高惠临 郑茂盛 赵文轸 霍春勇 杨 果
张冠军 高泽涛 张建勋 陈健峰

编辑组

主 编 冯耀荣 高惠临

副主编 霍春勇 吉玲康 李为卫

编辑组 赵新伟 张骁勇 刘迎来 熊庆人 庄传晶 陈宏达 朱丽霞
李金凤 徐 瑛 宫少涛 陈宏远 池 强 李 洋 瞿婷婷
张伟卫 王 鹏 张莉莉 朱蕊花 郭生武

序

二十一世纪是我国天然气大发展的时代。西气东输二线工程是继西气东输工程后的又一国家重大管道工程。随着西气东输二线工程的启动,一个天然气管道建设的新高潮已经到来。高压输送及选用高钢级管材是当前国际天然气管道的重要发展趋势。采用高压输送及选用高钢级管材,可大大减少钢材重量和管道建设成本。实践表明,每提高一个钢级,大约节约管道建设成本 7% - 10%。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 管材使用量超过 2000 km,X100 和 X120 处于试验阶段。在国内,西气东输管道的输送压力最大为 10.0 MPa,最高钢级为 X70。X70 针状铁素体型高性能管线钢及管线钢管在西气东输管道工程上的大批量应用,使我国管线钢和管线钢管的生产和管道建设提高到一个新的水平。

中国石油天然气集团公司与国内冶金企业合作,在进行 X80 管线钢的应用基础研究和技术开发工作的基础上,于 2004 年底到 2005 年初,敷设了 7.71km 的工程应用段。经过国内石油系统和冶金系统专家的反复论证,决定西气东输二线干线钢管选用 X80 管线钢管。国内石油系统和冶金系统密切配合,经过一年多的努力,西气东输二线工程用 X80 管线钢管已研制成功并批量生产和使用。然而,X80 管线钢管在世界范围内的用量毕竟有限,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高强度管线钢的组织有不同的理解,组织分析与表述时往往采用不同的术语,容易引起概念上的混乱。

中国石油天然气集团公司管材研究所和西安石油大学合作,在国内外有关低碳、超低碳微合金管线钢显微组织文献的基础上,开展了大量系统的试验研究工作,结合管线钢组织中各种组成物的形成机理,阐述了组织特征及鉴别方法。列举大量实例,对不同钢级、合金体系和含量、组织类型、不同壁厚和部位管线钢组织进行了系统的分析研究,在管线钢组织分析与鉴别、组织与性能相关性等方面取得了很好的研究成果,并去粗取精,提炼成管线钢显微组织分析和鉴别专著。书中既包括 X80 管线钢管、也包括经受焊接、热弯等二次热加工、预应变及应变时效后的组织分析和鉴别。为使著作更加完整,也涵盖了 X80 以下和以上钢级管线钢的组织分析和鉴别。综览全册,既具有理论上的严密性,又具有很强的针对性。相信这本著作的出版,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,也是为西气东输二线工程所做出的重要贡献。希望广大科技人员继续关心管线钢特别是高钢级管线钢的研发和应用工作,并运用这些成果去解决实际工作中的问题。

李醒林

前 言

在西气东输二线工程中,我国拟采用针状铁素体型 X80 级别的管线钢,其强度级别较高,金相组织不同于传统的(F-P)。由于 X80 管线钢在国内系首次大批量采用,有关 X80 级别管线钢的组织特征,影响性能的组织因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石油大学合作开展了高强度级别微合金管线钢的组织研究,在国内外有关低碳、超低碳微合金管线钢显微组织文献的基础上,开展了大量系统的试验研究工作,对不同钢级、合金体系和含量、组织类型、不同壁厚和部位管线钢组织,管线钢焊接组织、二次热加工组织、预应变及应变时效组织的分析与鉴别,组织、性能及工艺的关系等进行了详细探讨,在组织分析鉴别、组织与性能相关性等方面取得了重要的研究成果。作为工作总结,现将我们的研究成果汇编成册。本书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、不同工艺组织的特殊性,并且尽可能对组织的差异以及与性能的相关性进行分析。

国外从上世纪 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。2001 年,我们结合西气东输工程,研究汇编了高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱,对西气东输工程用管线钢的组织分析起到了重要作用。这本著作是在上述工作的基础之上结合西气东输二线管道工程进行的,希望其出版能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,能为西气东输二线工程做出贡献。

管线钢显微组织的分析与鉴别同时也是国家科技支撑计划项目、国家自然科学基金项目和中国石油天然气集团公司西气东输二线工程关键技术研究重大专项的研究内容,由中国石油管材研究所负责,与西安石油大学合作完成。初稿完成后,我们与有关院校和生产厂的技术人员进行了深入的讨论,同时也与国内从事贝氏体钢研究工作的相关专家进行了讨论。之后对本书有关内容又进行了充实和完善。

本书不但服务于高钢级管线钢的研发,也服务于工程检验。因此本书中提供了大量的光学金相照片,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。

本书由中国石油管材研究所总工程师冯耀荣教授级高工和西安石油大学高惠临教授担任主编,管材研究所副所长霍春勇教授级高工和吉玲康、李为卫高工担任副主编,编辑组成员还有管材研究所赵新伟、刘迎来、熊庆人、庄传晶、陈宏达、朱丽霞、李

金凤、徐瑛、宫少涛、陈宏远、池强、李洋、瞿婷婷、张伟卫、王鹏,西安石油大学张骁勇、张莉莉等。西安交通大学朱蕊花、郭生武老师在组织实验分析方面提供了帮助,在此一并致谢。

本书由西北工业大学资深教授康沫狂主审。康教授数十年来致力于贝氏体钢的成份、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,他对本书提出了有益的改进意见。此外,中国石油管材研究所李鹤林院士也对本书提出了宝贵的意见,本书出版工作得到中国石油天然气集团公司科技管理部方朝亮副主任、钟太贤副总工程师、张可刚高级主管的大力支持,得到中国石油管道建设项目经理部吴宏总经理、中国石油物资采购管理部刘文成副总经理的关心,在此一并表示衷心的感谢。

著者

2008 年 10 月

目 录

第一章 管线钢显微组织结构的演变和发展	1
1.1 铁素体 - 珠光体	1
1.2 针状铁素体	3
1.3 贝氏体 - 马氏体	8
1.4 低碳索氏体钢	9
第二章 管线钢典型显微组织结构的基本特征	11
2.1 多边形铁素体 (PF)	13
2.2 准多边形铁素体 (QF)	24
2.3 粒状贝氏体铁素体 (GB 或 GF)	35
2.4 贝氏体铁素体 (BF)	53
2.5 马氏体 - 奥氏体组元 (M - A)	66
2.6 其它组织	84
第三章 X80 管线钢显微组织结构分析实例	92
3.1 不同组织类型管线钢的显微组织结构	92
3.1.1 X80(1 [#])——针状铁素体钢 (AF)	93
3.1.2 X80(2 [#])——双相钢 (DP)	101
3.1.3 X80(3 [#])——铁素体 - 珠光体钢 (F - P)	111
3.2 不同合金含量管线钢的显微组织结构	117
3.2.1 X80(4 [#])——较低合金含量	119
3.2.2 X80(5 [#])——较高合金含量	125
3.3 不同 Mo、Nb 含量管线钢的显微组织结构	130
3.3.1 X80(1 [#])——以 Mo 为特征的合金设计	133
3.3.2 X80(6 [#])——以 Nb 为特征的合金设计	139
3.4 不同板厚的 X80 管线钢	146
3.4.1 X80(7 [#])——较薄板 (18.4mm)	148
3.4.2 X80(8 [#])——较厚板 (26.4mm)	152
3.5 不同部位管线钢的显微组织结构	159
3.5.1 X80(9 [#])——板卷中部	160

3.5.2 X80(9#)——板卷尾部	163
第四章 管线钢焊接显微组织结构分析与鉴别	167
4.1 概述	167
4.1.1 焊缝的一次组织特征	167
4.1.2 焊缝的二次组织特征	167
4.1.3 焊接热影响区的显微组织	170
4.2 焊接接头的显微组织结构	174
4.3 焊缝的显微组织结构	178
4.4 熔合区的显微组织结构	193
4.5 焊接粗晶热影响区的显微组织结构	205
4.6 焊接临界粗晶热影响区的显微组织结构	225
第五章 管线钢二次热加工的显微组织结构分析	236
5.1 概述	236
5.1.1 管件不同部位的的组织结构特征	236
5.1.2 管件在不同工艺条件下的组织结构特征	237
5.2 管件不同部位的显微组织结构	240
5.3 管件在不同工艺条件下的显微组织结构	250
5.3.1 不同加热温度下的显微组织结构	250
5.3.2 不同冷却方式下的显微组织结构	263
5.3.3 不同回火温度下的显微组织结构	276
第六章 管线钢预应变和应变时效的显微组织结构分析	287
6.1 预应变的显微组织结构	288
6.2 应变时效的显微组织结构	294
第七章 结 语	301
参考文献	305
附录 实验用管线钢及其化学成分	307

第一章 管线钢显微组织结构的演变和发展

进入 21 世纪的管线钢正出现一个蓬勃发展的趋势。管线钢发展的动力来自两个方面。其一是世界石油工业的发展。由于极地油气田、海上油气田和腐蚀环境油气田等恶劣环境油气田的开发,不仅要求管线钢具有高的强度,而且要求具有高的韧性、疲劳性能、抗断裂性能和耐腐蚀性能,同时还要求力学性能的改善不应当恶化钢的焊接性能和加工性能。其二是冶金技术的进步。自 1959 年微合金化钢开始在油气管道工程中应用以来,国际上对微合金管线钢已进行了近 50 年的研究与生产。目前,管线钢的设计和生产过程由于采用了冶金数学、清洁生产、过程智能控制等高科技,通过微合金化、超纯净冶炼和现代控轧、控冷技术,已能够提供超纯净度、超均匀性和超细晶粒的具有优良强韧特性的管道钢材。管线钢已成为低合金高强度钢和微合金化钢领域内最富有活力、最具研究成果的一个重要分支。

从某种意义上讲,管线钢的发展过程,实质上是管线钢显微组织结构的演变过程。管线钢能够以不同的方式进行分类。从材料显微组织学归类,有四种基本组织类型的管线钢,即铁素体-珠光体(Ferrite-Pearlite,简称为 F-P)管线钢、针状铁素体(Acicular Ferrite 简称为 AF)管线钢、贝氏体-马氏体(Bainite-Martensite,简称为 B-M)管线钢和回火索氏体(Tempered Sorbite,简称为 S)管线钢。前三类管线钢为微合金化控制轧制和控制冷却状态(Termomechanical Controlled Process, 简称为 TMCP)管线钢,是现代油气管线的主流钢种。第四类管线钢为淬火、回火状态(Quench and Tempered, 简称为 QT)管线钢,由于这类管线钢难以进行大规模生产,在使用上受到限制,然而在俄罗斯等国和在海洋管线等领域仍不失使用的实例。

在微合金化管线钢中,铁素体-珠光体是第一代微合金管线钢的主要组织形态,X70 及其以下级别的管线钢具有这种组织形态。针状铁素体管线钢是第二代微合金管线钢,强度级别可覆盖 X60~X100。近年来发展的超高强度管线钢 X100、X120 的显微组织形态为贝氏体-马氏体。

1.1 铁素体-珠光体

铁素体-珠光体是 20 世纪 60 年代以前的管线钢所具有的基本组织形态。当时应用的 X52 以及低于这种强度级别的管线钢均属于铁素体-珠光体钢。其基本成分是 C-Mn,通常含碳量为 0.10%~0.20%,含锰量为 1.30%~1.70%,一般采用热轧或正火热处理。当要求较高强度时,可取高限含碳量,或在 Mn 系的基础上加入微量 Nb、V。通常认为,铁素体-珠光体管线钢具有晶粒尺寸为 $7\mu\text{m}$ 左右的多边形铁

素体和约 30% 的珠光体。这种合金化和组织设计的制造成本最低。铁素体 - 珠光体管线钢典型的光学显微组织如图 1-1, 透射电子显微组织如图 1-2。

Pickering 和 Gladman 在低合金高强度钢的强韧性方面做了许多工作, 并通过回归分析的方法提出了估算铁素体 - 珠光体力学性能的关系式:

$$\sigma_s (\text{MPa}) = 15.4 [3.4 + 2.1\text{Mn} + 5.4\text{Si} + 23N_f + 1.13d^{-1/2}]$$

$$\sigma_b (\text{MPa}) = 15.4 [19.1 + 1.8\text{Mn} + 5.4\text{Si} + 0.25(\text{珠光体}) + 0.5d^{-1/2}]$$

$$\text{FATT} (^\circ\text{C}) = -19 + 44\text{Si} + 700 \sqrt{N_f} + 2.2(\text{珠光体}) - 11.5d^{-1/2}$$

式中(珠光体)为组织中珠光体的体积分量, N_f 为自由氮的含量, d 为等轴状或多边形铁素体晶粒尺寸(mm), 其它字母表示钢中相应的元素重量百分比含量。

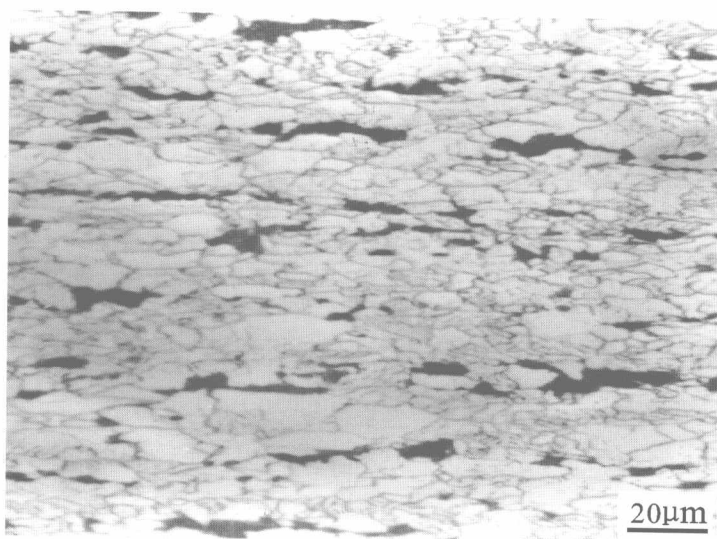


图 1-1 铁素体 - 珠光体的光学显微组织

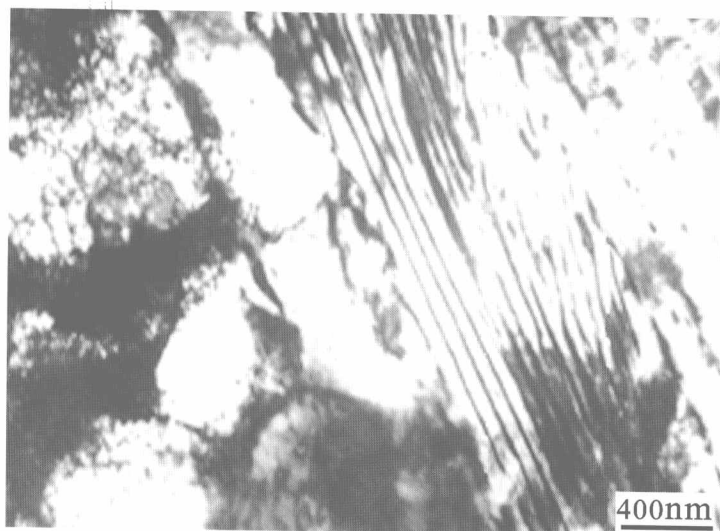


图 1-2 铁素体 - 珠光体的 TEM 电子显微组织

铁素体-珠光体组织设计的目标是提高强度。由上式可知,铁素体-珠光体管线钢中的珠光体是改变强度的主要因素,但每增加 10% 的珠光体,使韧脆转变温度 FATT 升高 22℃。而要增加珠光体含量,必然要提高钢中含碳量,这样势必影响到管线钢的焊接性。因此,不能期望通过采用增加珠光体的方法来提高管线钢的强度,而应在降低含碳量的同时,通过一定的手段,充分发挥钢中微合金元素晶粒细化和沉淀强化的潜在能力。这就是少珠光体钢产生的背景。

少珠光体管线钢的典型化学成分有 Mn-Nb, Mn-V, Mn-Nb-V 等。一般含碳量小于 0.10%, Nb、V、Ti 的总含量小于 0.10%, 代表钢种是 20 世纪 60 年代末的 X56、X60 和 X65。这类钢突破了传统铁素体-珠光体钢热轧、正火的生产工艺,进入了微合金化钢控轧的生产阶段。20 世纪 60 年代中期英国的钢铁研究人员对控制轧制进行了系统的研究,70 年代以后在管线钢上得到大规模的应用。实践表明,现代控轧工艺可生产出高强度的细晶粒钢。对于 C-Mn 钢,晶粒尺寸最小为 6~7μm;对于少珠光体钢,晶粒尺寸可细化至 4~5μm。由上式可知,由于晶粒细化使屈服强度每增加 15MPa,可同时导致韧脆转变温度下降 10℃,所以少珠光体可以获得较好的强韧配合。通常认为,少珠光体管线钢具有晶粒直径约为 5μm 的多边形铁素体和约 10% 的珠光体。

除了晶粒细化以外,少珠光体钢在控轧过程中还产生 Nb、V 第二相的沉淀强化。这种在铁素体基体上析出的弥散分布的不可变形碳氮化物质点,可引起强度增量达 100MPa。由于沉淀强化所导致的韧脆转变温度的升高小于固溶强化和位错强化所产生的韧脆转变温度的升高(如每提高 15MPa 的屈服强度,沉淀强化使韧脆转变温度升高 4℃,位错强化则使韧脆转变温度升高 6℃。),因而由 Nb、V、Ti 等微合金元素引起的沉淀强化在管线钢中具有重要作用。特别是掌握了 Nb、V、Ti 等碳、氮化物在高温变形过程中的沉淀动力学与基体再结晶之间的关系后,少珠光体钢的强韧水平取得了许多新的进展。目前已经生产出具有较高强韧性水平的 X70 级少珠光体管线钢。

常见的铁素体-珠光体和少珠光体管线钢的合金设计见表 1-1。可以看出, X70 及以下强度级别的管线钢可通过 C-Mn-Nb-V 的合金设计,以铁素体-珠光体的组织形态进行生产。

1.2 针状铁素体

具有铁素体-珠光体组织形态的管线钢,通过采用微合金化和控轧、控冷等强化手段,在保证高韧性和良好焊接性的条件下,可将厚度 20mm 的宽厚板的屈服强度提高到 500~550MPa 的极限水平。为进一步提高管线钢的强韧性,需要研究开发针状铁素体管线钢。针状铁素体管线钢通过微合金化和控轧、控冷,综合利用晶粒细化、微合金元素的析出相和位错亚结构的强化效应,可使管线钢达到 X100 的强韧水平。

表 1-1 F-P 管线钢的合金设计

API 钢级	合金化
5LB	$W(C) \leq 0.20\%$, $W(Mn) \leq 1.00\%$, $W(Si) < 0.40\%$, $W(Pcm) \leq 0.16\%$
X42	$W(C) \leq 0.10\%$, $W(Mn) \leq 1.00\%$, $W(Si) < 0.40\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.050\%$, $W(Pcm) \leq 0.16\%$
X52 酸性气体	$W(C) \leq 0.05\%$, $W(Mn) \leq 1.10\%$, $W(S) \leq 0.003\%$, $W(Si) < 0.30\%$, $W(Cu) + W(Ni) + W(Cr) \leq 0.60\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.050\%$, 或 $W(Nb) + W(V) \leq 0.10\%$, $W(Pcm) \leq 0.13\%$
X52	$W(C) \leq 0.10\%$, $W(Mn) \leq 1.20\%$, $W(Si) < 0.40\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.050\%$, $W(Pcm) \leq 0.17\%$
X60 酸性气体	$W(C) \leq 0.05\%$, $W(Mn) \leq 1.20\%$, $W(S) \leq 0.003\%$, $W(Si) < 0.30\%$, $W(Cu) + W(Ni) + W(Cr) \leq 0.70\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.065\%$, 或 $W(Nb) + W(V) \leq 0.12\%$, $W(Pcm) \leq 0.15\%$
X60	$W(C) \leq 0.10\%$, $W(Mn) \leq 1.50\%$, $W(Si) < 0.40\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.06\%$, 或 $W(Nb) + W(V) \leq 0.12\%$, $W(Pcm) \leq 0.23\%$
X65 酸性气体	$W(C) \leq 0.05\%$, $W(Mn) \leq 1.35\%$, $W(S) \leq 0.003\%$, $W(Si) < 0.30\%$, $W(Cu) + W(Ni) + W(Cr) \leq 0.70\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.065\%$, 或 $W(Nb) + W(V) \leq 0.15\%$, $W(Pcm) \leq 0.15\%$
X65	$W(C) \leq 0.10\%$, $W(Mn) \leq 1.65\%$, $W(Si) < 0.40\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.065\%$, 或 $W(Nb) + W(V) \leq 0.15\%$, $W(Pcm) \leq 0.23\%$
X70	$D/t > 50$, $W(C) \leq 0.10\%$, $W(Mn) \leq 1.65\%$, $W(Si) < 0.40\%$, 单一微合金化 $W(Nb) \leq 0.065\%$, 或 $W(Nb) + W(V) \leq 0.15\%$, $W(Pcm) \leq 0.20\%$

针状铁素体管线钢的研究始于 20 世纪 60 年代末,并于 20 世纪 70 年代初投入实际工业生产。当时,在 Mn-Nb 系基础上发展起来的低碳 Mn-Mo-Nb 系微合金管线钢曾受到好评。这种新型管线钢通过 Mo 的加入,降低相变温度,抑制块状铁素体的形成,促进针状铁素体的转变,并能提高 Nb(C、N)的沉淀强化效果,因而在提高钢的强度的同时,降低韧脆转变温度。这种 Mo 合金化技术已有近 40 年的生产实践。近年来,另一种获取针状铁素体的高温工艺技术(High Temperature Process,简称为 HTP)正在兴起,它通过高 Nb 合金化技术的应用,可在较高的轧制温度条件下获取针状铁素体。

针状铁素体是微合金化管线钢在控轧、控冷过程中,在稍高于上贝氏体温度范围,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。针状铁素体这一定义是 Y. E. Smith 在 1971 年提出的。之后,日本钢铁学会(Iron and Steel Institute of Japan,简称为 ISIJ)以及 G. Krauss 和 B. L. Bramfitt 等学者系统地研究了低

碳、超低碳微合金化钢在不同工艺条件下的显微组织结构,提出了多边形铁素体(PF),准多边形铁素体(QF),粒状贝氏体铁素体(GB或GF)和贝氏体铁素体(BF)的组织分类。按照 Y. E. Smith 对针状铁素体的定义,结合 ISIJ 和 G. Krauss 等学者对现代低碳、超低碳微合金化钢中奥氏体连续冷却过程中组织转变的分类和描述,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。由于针状铁素体概念的引入,曾一度使管线钢的组织描述发生混淆。近年来,随着高强度管线钢的深入研究,针状铁素体的概念渐被淡化。由于粒状贝氏体和贝氏体铁素体被认为是上贝氏体的非典型形态,因而近年来在有关管道工程的文献中,针状铁素体常被称为退化上贝氏体。同时,针状铁素体管线钢中的主体组织一般为粒状贝氏体,因而针状铁素体也被简称为粒状贝氏体。

针状铁素体管线钢典型的光学显微组织如图 1-3,可区别其中的多边形铁素体(PF)和针状铁素体(AF)。然而,要辨别针状铁素体的细节,需要依靠电子显微分析。针状铁素体典型的透射电子显微形态(TEM)如图 1-4。可以看出,针状铁素体的主要显微特征表现在:

- (1)板条是针状铁素体最显著的形态特征。若干板条平行排列构成板条束,板条界为小角度晶界,板条束界为大角度晶界。一般认为针状铁素体板条宽度为 $0.6\mu\text{m} - 1\mu\text{m}$ 左右;
- (2)相邻板条铁素体间为粒状或薄膜状 M-A 组元;
- (3)板条内有高密度的位错。

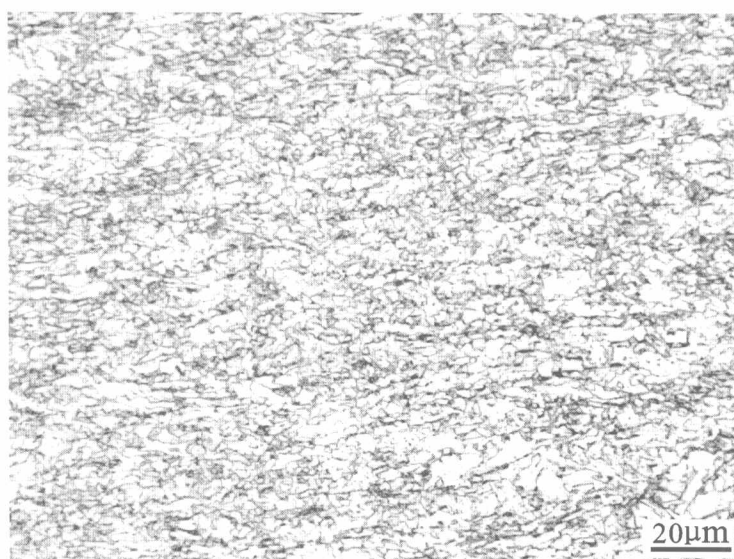


图 1-3 针状铁素体的光学显微组织

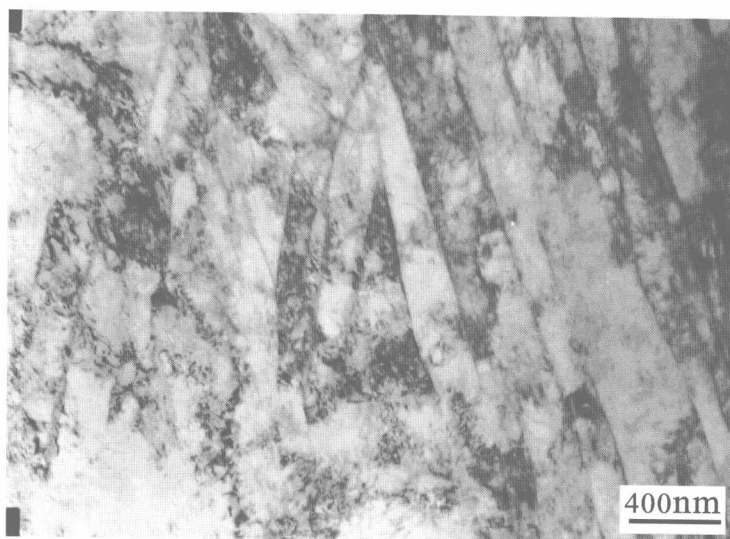


图 1-4 针状铁素体的 TEM 电子显微组织

由于针状铁素体的复杂性,以致于不能以充分定量的方式来描述显微组织和力学性能之间的确切关系。目前所获得的关系式有

$$\sigma_s (\text{MPa}) = 88 + 27\text{Mn} + 83\text{Si} + 2900N_f + 15.1d_L^{-1/2} + \sigma_{ph} + \sigma_{dh}$$

$$\text{FATT} (^\circ\text{C}) = -19 + 44\text{Si} + 700 \sqrt{N_f} + 0.26(\sigma_{ph} + \sigma_{dh}) - 11.5d^{-1/2}$$

式中 d_L ——铁素体板条尺寸(mm);

σ_{ph} ——铁素体板条内碳氮化物的析出强化;

σ_{dh} ——位错强化;

d ——铁素体板条束尺寸(mm);

其它符号含义同前。

上述关系式表明,与铁素体-珠光体和少珠光体管线钢相比,针状铁素体钢具有不同的强韧化方式。对断裂过程的观察表明,针状铁素体的解理断裂小裂面(断裂的组织单元)与针状铁素体束的大小相对应。可见,控制针状铁素体强韧性的“有效晶粒”是针状铁素体板条束。在控轧、控冷针状铁素体钢中,针状铁素体板条束的大小不但可以借助降低再加热温度、形变量和终轧温度等控轧参数来控制,而且还可以通过改变冷却速度、终冷温度等控冷参数来进行控制,因而针状铁素体钢的“有效晶粒”尺寸将大大细化。通过严格控制轧制和冷却条件,目前可获得这种“有效晶粒”尺寸达 $1 \sim 3\mu\text{m}$,因而赋予了针状铁素体钢优良的强韧特性。同时,从奥氏体向针状铁素体的转变过程是一种共格切变过程。转变过程中局部地区位错缠结而形成亚晶,其中有较高的位错密度($10^8 \sim 10^9 \text{cm}^{-2}$)。由于体心立方结构层错能高,不易分解成扩散位错而发生交滑移,亚晶的位错具有很大的可动性,因而赋予材料良好的强韧性。同时,针状铁素体中的岛状组织或碳化物弥散细小,不易激发裂纹,并经常成为裂纹扩展的障碍。管线钢的生产过程表明,针状铁素体管线钢通过微合金化和控轧、控冷技术,综合利用钢的固溶强化、晶粒细化、微合金化元素的析出强化与亚结构的

强化效应,可使钢的屈服强度达 700 ~ 800MPa, -10℃ 的 CVN 达 400J 以上。

除了高的强度和良好的韧性外,由于针状铁素体板条中存在着高密度的可移动位错,易于实现多滑移,因而针状铁素体钢具有连续的屈服行为和高的形变强化能力。这种特性可补偿和抵消因包申格效应所引起的强度损失,保证钢管的强度在成形过程中进一步得到提高。

如图 1-3 所示,在针状铁素体管线钢中,总伴有一定量的多边形铁素体。因而,针状铁素体管线钢也被称为针状铁素体-铁素体(AF-F)管线钢。其中的多边形铁素体体积分数的控制对材料的强韧特性有重要影响,图 1-5 的研究结果表明,大约含有 15% 的多边形铁素体能得到强度和韧性的最佳组合。

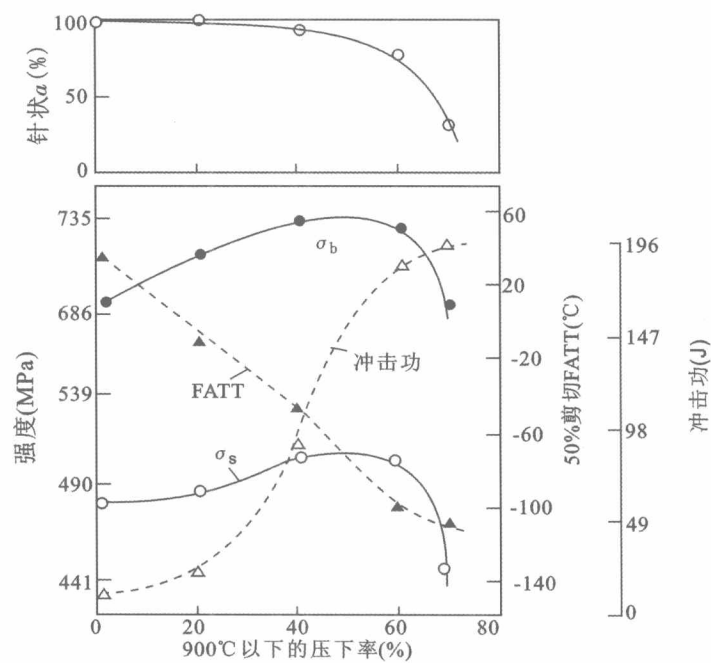


图 1-5 AF 含量与强韧性的关系

常见的针状铁素体管线钢的化学成分见表 1-2。可以看出,X100 以下强度级别的管线钢可通过 C-Mn-Mo-Nb 的合金设计,以针状铁素体的组织形态进行生产。

表 1-2 AF 管线钢的合金设计

API 钢级	合金化
X70	D/t < 50, W(C) ≤ 0.06%, W(Mn) ≤ 1.65%, W(Si) < 0.40%, 单一微合金化 W(Nb) ≤ 0.10%, 或 W(Nb) + W(Mo) ≤ 0.15%, W(Pcm) ≤ 0.18% 或 0.21%
X80	W(C) ≤ 0.06%, W(Mn) < 1.70%, W(Si) < 0.40%, W(Nb) ≤ 0.10%, Cu, Ni, Cr, W(Pcm) ≤ 0.18% W(C) ≤ 0.06%, W(Mn) < 1.70%, W(Si) < 0.40%, W(Nb) ≤ 0.10%, Cu, Ni, Mo, W(Pcm) ≤ 0.21%

1.3 贝氏体 - 马氏体

随着高压、大流量天然气管线钢的发展和对降低管线建设成本的追求,针状铁素体的组织形态已不能满足要求。20 世纪后期,一种超高强度管线钢应运而生,其典型钢种为 X100 和 X120。1988 年日本 SMI 公司首先报导了 X100 的研究成果。历经多年的研究和开发,X100 钢管于 2002 年首次投入工程敷设。美国 Exxon 公司于 1993 年着手 X120 管线钢的研究,并于 1996 年分别与日本 SMI 公司和 NSC 公司联手,推进了 X120 的研究进程。2004 年 X120 钢管首次试应用于工程。

通过低 C, Mn - Cu - Ni - Mo - Nb - Ti 的多元合金设计和先进的 TMCP 技术,X100 管线钢可获得全部针状铁素体组织。虽然在对 X100 显微组织的定量分析中,仍有可能存在少量其它组织,但人们习惯称其为全针状铁素体钢,或称为全粒状贝氏体钢、退化上贝氏体钢。X100 的显微组织如图 1-6 所示。

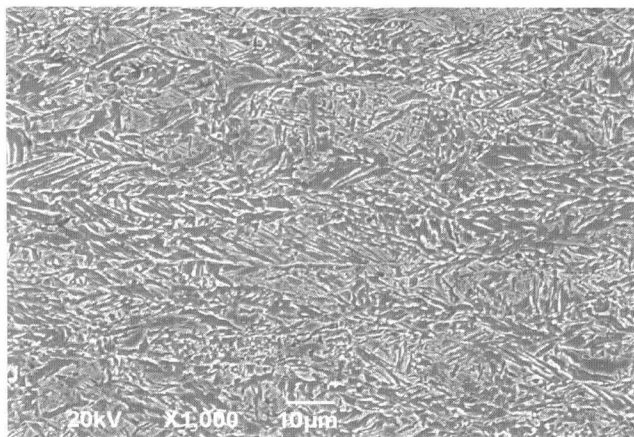


图 1-6 X100 的 SEM 电子显微组织

从组织形态学上分析,如果说 X100 与 X80 等针状铁素体管线钢有较大的相似性,X120 则有完全不同的组织形态,其典型显微组织为下贝氏体 - 板条马氏体。X120 管线钢的显微组织如图 1-7 所示。下贝氏体(LB)和马氏体(M)均以板条的形态分布。在 LB 的板条内分布着微细的具有六方点阵的 ϵ -碳化物,这些碳化物平行排列并与板条长轴呈 $55^\circ \sim 65^\circ$ 取向。在 M 板条内的碳化物呈魏氏体组态分布,板条间存在残余奥氏体薄膜。LB 和 M 板条内有高密度的位错。X120 管线钢的这种组织结构赋予材料高的强韧特性,其屈服强度大于 827MPa, -30°C 时的冲击韧性超过 230J。

LB - M 管线钢在成分设计上,选择了 C - Mn - Cu - Ni - Mo - Nb - V - Ti - B 的最佳配合。这种合金设计思想充分利用了 B 在相变动力学上的重要特征。由图 1-8 可知,加入微量的 B(如 0.002% ~ 0.005%)可明显抑制铁素体在奥氏体晶界上形核,使铁素体转变曲线明显右移。同时使贝氏体转变曲线变得扁平,从而即使在超低