

汽轮发电机用钢 金相图谱

■ 安运涛 漫景达 符长璞 编著

机械工业出版社

PDG

序

材料、能源和信息被认为现代文明的三大支柱。电力是重要的能源,是到本世纪末、下世纪初我国国民经济持续发展的物质基础和决定性条件。我国电力工业从解放初期的年发电量 43 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 高速发展到 1995 年发电量 9200 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 与此同时, 我国大型电站成套设备制造技术也有了飞跃发展。在不断消化吸收工业发达国家先进技术的基础上, 已能够生产 600MW 级的大型火电及核电设备, 并且能向国外出口大型成套火电设备。我国汽轮发电机用钢的研究与应用, 已经历了 40 多年的历史, 初步建立了自己的汽轮发电机用钢系列。这些都标志着我国电站成套设备制造工业的技术发展水平及发展历程。

由于我国长期严重缺电, 必须提供更大的装机容量; 目前, 国外正向制造超临界参数, 大容量的火电机组发展, 要求汽轮发电机用钢能承受更高的温度和在腐蚀介质中运行, 这使汽轮发电机服役条件更加苛刻, 并将带来更大失效事故的风险。过去, 我国电站事故, 如汽轮发电机叶片断裂、叶轮飞裂、大锻件断裂等时有发生, 造成巨大的经济损失。因此要求正确选择、合理使用汽轮发电机用钢, 严格控制和检验钢的化学成分, 微量夹杂元素、热处理强化后的显微组织, 以及进行运行监督、失效分析和采取可靠的预防措施, 以求防范于未然。

西安理工大学与北京重型电机厂在长期生产、科研实践中, 对汽轮发电机用钢进行了深入研究, 积累了大量国内汽轮发电机主要零部件用钢的光学金相组织、电子金相组织图片等资料, 经总结和编选成《汽轮发电机用钢金相图谱》。该书基本上反映了我国 90 年代汽轮发电机主要用钢系列及发展水平, 并对各类钢的特点和性能予以了介绍, 便于读者选材时参考。

钢的组织是相变的产物, 某些汽轮发电机用合金钢的相变过程极为复杂, 致使有些金相组织难以辨认, 作者通过大量的分析研究工作, 在书中提供了汽轮发电机用钢的光学、电子金相显微组织图片, 电子衍射谱等分析图片及文字说明。这对辨认、鉴别钢的金相组织, 控制汽轮发电机运行质量将起一定作用。此外, 作者还精选编入了汽轮发电机主要零部件在各种服役条件下早期失效的断口形貌及扫描电镜照片, 有助于各使用单位及读者对汽轮发电机用钢进行组织研究和失效分析。

该书的出版是作者及其有关科研人员长期从事研究与工程实践的成果, 也是编写人员与图片制备人员集体智慧的结晶。它将对汽轮发电机选材、质量控制以及组织研究、分析起到应有的作用。

涂铭旌^①

1996. 1. 1 于成都

^① 涂铭旌教授为中国工程院院士, 现执教于四川联合大学

前 言

目前, 由于能源开发和电能生产的不断发展, 研制、生产大型发电设备是机械工业重大技术装备的首要工作。

发电设备的最关键部分是汽轮发电机。而汽轮发电机制造中难度最大、最难保证质量的是转子、叶轮等大型锻件。叶片和紧固件的材料、加工制造方法以及热处理也是关键的问题。过去, 汽轮发电机大锻件曾长期依赖进口。80年代以来大部分转向国产, 但在钢材的冶金质量、锻造及热处理方面一直存在问题, 难以保证高的成品率。由于叶片和紧固件材料质量和热处理不当而出现的事故时有发生。近些年来, 不少大专院校、科研院所、生产企业开展了科研和生产技术革新工作, 并使一些成果转变成为生产力, 改善了材料和产品质量, 提高了发电设备运行的可靠性。这是一个可喜的现象。

西安理工大学、北京重型电机厂针对汽轮发电机的关键零部件采用新材料和原有材料、并通过各种冶炼、锻造、热处理等加工方法, 进行了各项性能的系统检测, 不但用光学金相和电子金相显微镜进行了微观组织检验, 还对图片中的相组成、组织状态与特征, 各相中的精细结构, 微观缺陷以及正常与反常的组织、相变产物中的某些未知相运用了X射线和电子衍射等方法进行了相结构分析, 摸清了它们的本质。此外, 还对汽轮发电机用钢制造的零部件在各种服役状态下的断裂韧性、疲劳和腐蚀疲劳、高温蠕变等性能进行了测试, 对早期失效零件的断口进行了扫描电镜观察和分析, 并将结果用文字予以说明。

本人借此机会热烈祝贺这本图谱的出版, 衷心感谢作者和图片制备人员的辛勤劳动, 高度评价他们为国家社会主义建设添砖添瓦的奉献精神。祝愿这本书出版后能在广大读者中引起很大的反响。

樊东黎[⊙]

1995. 6

⊙ 樊东黎高工为中国机械工程学会热处理专业学会理事长, 机械部北京机电研究院教授级高工。

作者的话

我国对汽轮发电机用钢的研究与应用迄今已有 40 余年的历史,并初步建立了自己的汽轮发电机用钢系列。汽轮发电机用钢的发展反映了我国在电站设备制造方面的技术进步与汽轮发电机发展的光辉历程。

作者及科研组其他有关人员与北京重型电机厂科技人员、生产第一线工人,长期密切合作,对汽轮发电机主要部件用钢进行了深入、系统的研究,制备了大量金相图片,经筛选后编写成《汽轮发电机用钢金相图谱》,全书共有 486 幅图片。该书主要包括:汽轮发电机叶片用钢、汽轮发电机大型锻件用钢、汽轮发电机高温紧固件用钢及汽轮发电机用耐热钢等四章。

本书的特点是:采用了近年来经消化吸收并已国产化的新钢种,因此基本反映了我国 90 年代汽轮发电机用钢的类型;系统地分析、研究了汽轮发电机用钢的相变理论,对其相变产物有了明确认识,使之确定了难以鉴别、判定的组织;对部分钢种的光学、电子金相显微组织及其组织中的精细结构进行了相对应的分析,对精细结构、碳化物成分在不同处理条件下的转变进行了分析;对材料的断裂韧性,大气与腐蚀疲劳、高温蠕变等状态下的早期失效断口及组织进行了分析。

本书可供汽轮发电机制造、研究单位、电厂监督运行部门的科技工作者、工人使用,也可供大专院校金属材料及热处理专业师生使用。

本书第一章由安运铮执笔,第二章由安运铮、赵文英执笔,第三章由符长璞执笔,第四章由潘景达、容锦明执笔,由安运铮担任主编,潘景达、符长璞、赵文英参加编写。

西安理工大学赵文英、李红梅同志对本书的图稿及文稿进行了整理工作;西安理工大学的王楠、李泓、杨勇、韦福高、李红梅、张金旺、马爱国、周少华、慈勇等部分研究生、本科生及北京重型电机厂的科技人员作了大量的实验工作及图片制备工作;中国船舶总公司第 12 研究所还提供了部分马氏体型沉淀硬化热强钢的光学显微组织图片;西北工业大学康沫狂教授为本书作了审稿工作,中国工程院涂铭旌院士为本书作了序;中国机械工程学会热处理专业学会理事长樊东黎为本书撰写了前言。作者在此对所有参与本书审、编、供稿等工作的人员及单位表示衷心的感谢!

作 者

1996 年 1 月

目 录

序
前言
作者的话

第一章 汽轮发电机叶片用钢	1
§ 1.1 汽轮发电机叶片用钢简介	1
1.1.1 钢的类别及成分	1
1.1.2 合金化特点	1
1.1.3 热处理及金相组织	4
1.1.4 疲劳断口特征	5
§ 1.2 Cr12 马氏体型不锈钢	6
1.2.1 缓冷组织	6
1.2.2 淬火及调质组织	16
1.2.3 疲劳断口	20
§ 1.3 2Cr11Mo1V、Cr12 马氏体型热强钢	24
1.3.1 锻坯退火及高温回火组织	24
1.3.2 淬火光学金相组织	28
1.3.3 调质组织	30
1.3.4 疲劳断口镀镍光学金相组织	32
1.3.5 疲劳断口 SEM 像	34
§ 1.4 15Cr12Ni2MoVN 钢 (Cobl-s)	36
1.4.1 原材料及淬火光学金相组织	36
1.4.2 调质处理光学金相组织及 TEM 显微组织	38
1.4.3 疲劳断口 SEM 像	42
§ 1.5 马氏体沉淀硬化型热强钢 (0Cr17Ni4Cu4Nb)	44
1.5.1 原材料光学金相组织	44
1.5.2 固溶处理光学金相及 TEM 显微组织	44
1.5.3 固溶和时效处理 TEM 显微组织及光学金相组织	48
第二章 汽轮发电机大型锻件用钢	50
§ 2.1 汽轮发电机大型锻件用钢简介	50
2.1.1 合金化特点	50
2.1.2 转子用钢的典型组织分析	51
2.1.3 热处理特点	52
2.1.4 转子用钢在长期时效及运行中的组织变化	53
§ 2.2 中、高压转子用钢及不同状态的组织	54
2.2.1 恒温转变组织	54
2.2.2 连续冷却转变组织	62

2.2.3 转子使用状态组织	72
2.2.4 不同温度下人工时效组织	78
§ 2.3 转子运行 4×10^4 h 早期失效宏观及微观组织	106
第三章 汽轮发电机高温紧固件用钢	130
§ 3.1 汽轮发电机高温紧固件用钢简介	130
3.1.1 对紧固件用钢的性能要求	130
3.1.2 紧固件用钢及合金化特点	130
3.1.3 紧固件用钢的热处理特点	133
3.1.4 对典型紧固件用钢的组织 and 相分析、蠕变断口形貌分析	134
§ 3.2 20Cr1Mo1VTiB 钢	138
3.2.1 淬火态光学及 TEM 显微组织	138
3.2.2 淬火、回火及时效后光学和 TEM 显微组织	140
3.2.3 不同时效状态下断口的 SEM 形貌	144
§ 3.3 20Cr11MoVNbNB 钢	146
3.3.1 淬火、回火态光学及 TEM 显微组织	146
3.3.2 无应力时效后的显微组织	164
3.3.3 持久、蠕变试验后的组织	168
3.3.4 蠕变试样断口形貌及蠕变孔洞	174
§ 3.4 C422 钢 (2Cr12WMoVNi)	186
3.4.1 淬火、回火光学及 TEM 显微组织	186
3.4.2 时效后析出相	190
3.4.3 时效后冲击断口 SEM 形貌	192
第四章 汽轮发电机用耐热铸钢	194
§ 4.1 汽轮发电机用耐热铸钢简介	194
§ 4.2 ZG20CrMo	196
4.2.1 铸态光学金相组织	196
4.2.2 铸态正火等热处理后光学金相组织	196
§ 4.3 ZG15Cr1Mo1V 铸态及热处理后光学金相组织	200
§ 4.4 ZG20CrMoV	202
4.4.1 铸态及热处理后光学金相组织	202
4.4.2 汽轮发电机零件运行中早期失效光学金相组织	206

第一章 汽轮发电机叶片用钢

§ 1.1 汽轮发电机叶片用钢简介

汽轮发电机动、静叶片是汽轮发电机上关键零部件之一，需要有良好的综合力学性能，耐蚀性及减振性（振动阻尼特性可用振动对数衰减率表示）。由于汽轮发电机工作条件不同，对叶片材料要求也有区别。工作温度高于 400℃ 的动叶片，需要有高的持久强度和蠕变抗力。低于 400℃ 的低温区工作的叶片则要求有良好的强度、抗腐蚀性、较高的腐蚀疲劳强度和良好的减振性能。随着汽轮发电机容量的增大，对材料的要求也更趋严格，汽轮发电机叶片常用下述几类钢。

1.1.1 钢的类别及成分

汽轮发电机叶片常用以下三类钢：

1.1.1.1 Cr13 马氏体型不锈钢

主要代表牌号为 1Cr13、2Cr13，这类钢用铬作为主要添加的合金化元素。

1.1.1.2 Cr12 马氏体型热强钢

这类钢是在 Cr13 马氏体型不锈钢的基础上，为适应更高强度和高温工作的要求而添加了 Mo、W、V、Ni 等合金元素。主要牌号为：1Cr11MoV、2Cr11Mo1V、1Cr12WMoV、2Cr11MoWV、2Cr12NiWMoV、15Cr12Ni2MoVN 等。

1.1.1.3 马氏体沉淀硬化型热强钢

为满足特大型汽轮发电机组更高要求，由美国 ARMC0 公司开发的用于汽轮发电机末级和次末级叶片用材，主要牌号是：0Cr17Ni4Cu4Nb（17-4PH）。

上述三类常用的汽轮发电机叶片钢成分及用途见表 1-1。这类钢用电弧炉、电渣重熔炉或真空重熔炉等冶炼方法冶炼，电渣重熔炉钢与真空重熔炉钢的质量接近。国外研究资料表明：采用电渣重熔炉钢其洁净度、横向与纵向的缺口冲击韧度优于真空重熔炉钢。对于马氏体沉淀硬化热强钢，由于对冶金质量要求更严，需采用电弧炉-电渣炉和双真空炉冶炼。

1.1.2 合金化特点

1.1.2.1 Cr13 马氏体型不锈钢合金化特点

这类钢中主要成分是碳和铬，从提高钢的力学性能考虑，这类钢在调质状态下使用时，主要靠合金铁素体基体上大量析出 $Cr_{23}C_6$ 产生弥散硬化作用，从而使钢强化，钢中含碳量越高，强度、硬度越高。而作为不锈钢耐蚀合金，铬以 $n/8$ 定律添加，其铬质量分数应最低为 11.7%，但考虑到部分铬将与碳形成合金碳化物（ Cr_7C_3 或 $Cr_{23}C_6$ ）而脱离固溶体，为保证足够的耐蚀性铬质量分数应提高到 13%。作为汽轮发电机叶片用钢，既要保证有良好的综合力学性能（足够的强度、韧性），又要有良好的耐蚀性及减振性能，故在叶片钢中碳质量分数一般应在 0.10%~0.24% 之间。当钢中含碳量高时，则更多的合金元素会在碳化物中富集，从而使钢的耐蚀性下降。叶片使用的这类不锈钢又称为马氏体型热强钢。由于该钢组织稳定性差，热

表 1-1 常用汽轮

类 别	牌 号	国外对应 钢 号	化 学 元 素 的				
			C	Si	Mn	P	S
Cr13 马氏 体型不锈 钢	1Cr13	AISI410 SUS410 DINX10Cr13	0.10~ 0.15	≤0.60	≤0.60	≤0.035	≤0.03
	2Cr13	AISI420 SUS420 DINX20Cr13	0.16~ 0.24	≤0.60	≤0.80	"	"
Cr12 马氏 体型热强 钢	1Cr11MoV	DIN20CrMoV12/1 X23CrMoV10	0.11~ 0.18	≤0.50	≤0.60	≤0.035	≤0.03
	2Cr11MoV		0.17~ 0.23	≤0.50	0.50 1.00	≤0.03	≤0.03
	1Cr12WMoV	AISI422	0.12~ 0.18	≤0.50	0.50~ 0.90	≤0.035	≤0.03
	2Cr11WMoV		0.20~ 0.25	≤0.50	0.50~ 1.00	≤0.025	≤0.025
	2Cr12NiWMoV	Co6L-S	0.14~ 0.20	0.20~ 0.40	0.50~ 0.90	≤0.03	≤0.03
	15Cr12Ni2MoVN		0.12~ 0.13	0.25~ 0.30	0.60~ 0.70	≤0.02	≤0.02
马氏体沉 淀硬化型 热强钢	0Cr17Ni4Cu4Nb	AISI 17-4PH	≤0.055	≤1.00	≤0.04	≤0.04	≤0.03

发电机叶片材料

质 量 分 数 (%)						用途
Cr	W	Mo	Ni	V	N	
12.5~ 14.0						<450°C 工作的 动、静叶片
12.0~ 14.0						
10.0~ 11.5 11.0~ 11.5		0.50~ 0.70 0.90~ 1.10	≤ 0.60 ≤ 0.50	0.25~ 0.40 0.15 0.25		<540°C 工作的 叶片及 200MW 末级叶片 (851 叶 片)
					Al ≤ 0.05	
11.0 13.0 11.0~ 12.5	0.70~ 1.10 0.90~ 1.25	0.50~ 0.70 0.90~ 1.25	≤ 0.60 0.5~ 1.00	0.15~ 0.30 0.15~ 0.30		高温(反叶片及围 带) 300, 600MW 高温级叶片
11.0~ 13.0 11.70~ 11.80	0.70~ 1.10	0.70~ 1.10 1.65~ 1.75	0.80 1.20 2.50~ 2.60	0.15 0.30 0.30~ 0.35	0.035	200, 300MW 汽轮 发电机末级叶片 300MW 汽轮发 电机末级叶片
15.0~ 16.0			3.70~ 3.80		≤ 0.05	600MW 汽轮发 电机次末级及 末级叶片

强性较低，一般用于小于 500°C 的汽轮发电机叶片及中小型机组的末级叶片。

1.1.2.2 12Cr 马氏体型热强钢合金化特点

为满足大容量、在更高温度工作的汽轮发电机的技术要求，在 Cr13 型不锈钢基础上添加提高热强性及淬透性的元素钼、钨、钒、铌、钛等。加入钼、钨，可使 Cr13 型钢中形成单一的 $(Cr \cdot Mo \cdot W \cdot Fe)_{23}C_6$ ，这类碳化物在小于 650°C 时不容易聚集长大，产生了更稳定的弥散强化作用。同时钼、钨在固溶体中也增加了固溶强化的效果，提高了淬火后形成马氏体-铁素体板条再结晶的温度。因之整体的回火稳定性大大提高。加入钒或铌、钛可形成更稳定的碳化物： $(V, Nb)C$ 或 $(V, Nb, Ti)C$ ，使 $M_{23}C_6$ 型碳化物不易形成。由于在这些相中钼、钨溶解量极少，从而使更多的钼、钨溶于 α 相基体中，这样使钢的热强性进一步提高。含钒和铌的钢具有更好的回火稳定性、更高的蠕变极限，因而可在更高温度 (570°C~600°C) 下长期使用。此外，当钨质量分数提高到 2%~4% 时，还可在钢中形成更稳定的 Fe_2W 金属间化合物相，进一步提高其高温强度。

当加入钼、钨、钒、铌等元素时，钢中将由于缩小 γ 相区，从而出现使钢强度、热强性下降的 δ 铁素体，为了改善钢的组织，抑制 δ 铁素体的形成，适当降低铬质量分数（达到 Cr11%~12%）或加入 1%~2% 的镍，可以得到单相的奥氏体组织，以保持在淬火后获得更优良的性能。钢中加入 0.035%~0.05% 的氮，可以使钢中含碳量适当降低。钼还可以提高这类钢的点蚀电位。

1.1.2.3 马氏体沉淀硬化型热强钢合金化特点

这类钢是在高铬 (Cr17%) 的基础上添加形成金属间化合物的镍、钛、铜、铌、钼等元素，经过固溶和时效处理，在马氏体基体上析出与基体共格的金属间化合物 $Ni(Ti, Cu, Nb)$ 相，发生沉淀强化效应。由于钢中碳质量分数极低（小于等于 0.05%），钢中不出现碳化物，使得合金元素大部固溶于合金固溶体中，从而具有优良的耐蚀性，经过热处理以后，这种钢的腐蚀疲劳强度高，综合力学性能好，由于沉淀相富铜，其减振性能也很优良。

1.1.3 热处理及金相组织

马氏体型不锈钢或沉淀硬化型热强钢在锻后需进行退火或高温回火以利于加工，同时，还为以后调质处理奠定良好的基础。研究表明：采用锻后空冷+高温回火 (680°C~720°C) 热处理更有利于改善调质后的性能。

钢的调质处理要求淬火加热时使自由碳化物充分溶解，同时，又使奥氏体晶粒不致大于 4 级~5 级。淬火加热温度可用 1000°C~1080°C 油冷，然后再于 600°C~650°C 进行高温回火，经调质处理后获得回火索氏体组织。由于合金铁素体基体没有进行充分的再结晶，金相组织上继承了马氏体板条的亚结构及形貌。并随着回火温度升高，碳化物不断自 α 板条界面、板条内及原奥氏体晶界析出，依次发生 $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ 的转变。 $M_{23}C_6$ 是主要的沉淀强化相，多分布于原始奥氏体晶界及原马氏体板条界面。过多的碳化物在原奥氏体晶界面聚集，将显著降低该钢的断裂韧度及冲击韧性。为了获得碳化物更均匀的分布，使奥氏体原始晶粒尺寸尽量细化，国内还采用了双重处理工艺，即在锻后空冷→450°C 中间回火→较低温度下固溶 (2Cr13 可在 960°C~980°C 固溶) 油淬→650°C 回火的工艺。经这样处理后其综合力学性能显著提高，特别是韧性提高较大。

调质处理时出现的主要缺陷组织是：由于偏析、锻造加热温度过高、淬火加热温度过高将出现高温铁素体 (δ -铁素体相多沿原奥氏体晶界分布，呈串状及多边形形貌)。它的出现将

降低钢的强度和冲击韧性，一般要求 δ 铁素体体积分数小于等于 5%。

在退火后缓冷或大截面工件加热缓冷条件下（冷速小于 $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ），Cr13 不锈钢中会出现团状、网状分布的“类屈氏体”组织，这种组织沿原奥氏体晶界析出，碳化物萃取复型 TEM 像及薄膜透射 TEM 像观察后表明：这种组织实际是由铁素体及定向生长的合金碳化物组成的复相组织。合金碳化物可由 M_7C_3 、 Mo_2C 、VC 等组成，其形态可呈纤维状（纤维直径为 $20\text{nm} \sim 25\text{nm}$ ）、冷杉树叶状、层状。它们过冷至 $650^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 时析出，随过冷度不同，其析出的形态及量也各有不同，这种组织的出现将使钢强度、冲击韧性下降，耐蚀性恶化。

由于终锻温度过高或淬火加热温度过高使奥氏体晶粒粗大，淬火后形成粗大的板条马氏体组织，在高温回火后碳化物沿原粗大奥氏体晶界析出，使钢冲击韧性下降，50%FATT 升高。

对于马氏体沉淀硬化型热强钢，采用固溶+时效处理，汽轮发电机次末级叶片是采用 $1038^{\circ}\text{C} \pm 13^{\circ}\text{C}$ 保温 1h 空冷，于 649°C 时效 4h~5h 的工艺。其末级叶片采用 $1038^{\circ}\text{C} \pm 13^{\circ}\text{C}$ 保温 1.5h 空冷+ 820°C 中间时效 1h+ 587°C 最终时效 5h 的工艺。得到的是在马氏体基体上析出沉淀相 Cu_3Ni 等金属间化物，并有少量 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ 在原奥氏体晶界分布。

1.1.4 疲劳断口特征

叶片在大气疲劳的条件下，疲劳裂纹萌生及扩展途径可用断口镀镍金相观察。研究表明，在调质后试样疲劳裂纹沿原奥氏体晶界及原马氏体板条界碳化物析出的内界面扩展，后者在疲劳断口上呈现韧窝状及准解理断裂的特征。

在质量分数为 3% 的 NaCl 水溶液，温度为 80°C 的介质中进行喷淋腐蚀疲劳试验，试样的旋转弯曲腐蚀疲劳裂纹萌生于点蚀坑及驻留滑移带。粗大碳化物分布及夹杂是造成点蚀的主要策源地，因之细化碳化物对提高钢的腐蚀疲劳强度很有益处。在腐蚀疲劳裂纹扩展过程中，随着裂尖应力强度因子 ΔK 的升高，准解理断裂份数减少，沿晶断裂份数增加。这是由于裂尖的析氢反应及氢脆现象的影响造成的。

§ 1.2 Cr12 马氏体型不锈钢

1.2.1 缓冷组织

图 号	材料名称	热处理条件及状态	组织及说明
1.2.1-1	2Cr13	1050°C, 1h 加热, 炉冷至 700°C 保温 3h 后空冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 索氏体, 类屈氏体团 ^①
1.2.1-2	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 5°C/min 冷至 600°C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体、沿原奥氏体晶界析出的类屈氏体网
1.2.1-3	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 5°C/min 冷至 500°C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体、沿原奥氏体晶界析出的类屈氏体网
1.2.1-4	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 10°C/min 冷至 600°C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体、沿原奥氏体晶界析出的类屈氏体网
1.2.1-5	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 10°C/min 冷至 500°C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体、沿原奥氏体晶界析出的类屈氏体网
1.2.1-6	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 20°C/min 冷至 600°C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体, 少量沿原奥氏体晶界析出的类屈氏体网

^① 详见《Materials Transaction》1976. Vol 7-A No7

P. 915~936 (R. W. Honeycombe)

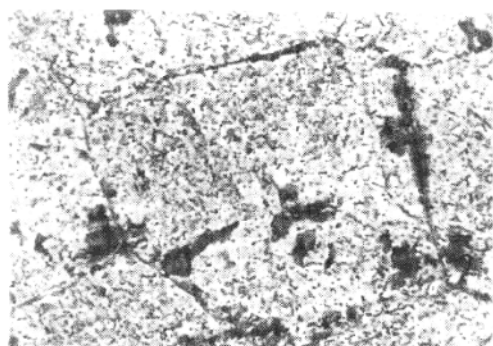


图 1.2.1-1

800×

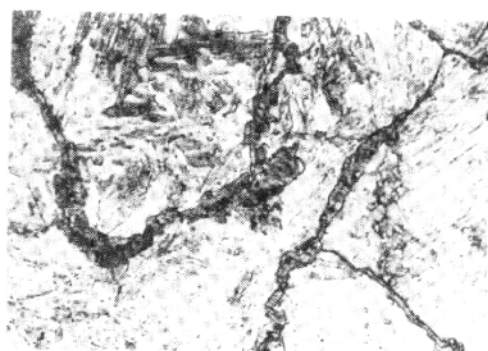


图 1.2.1-2

900×

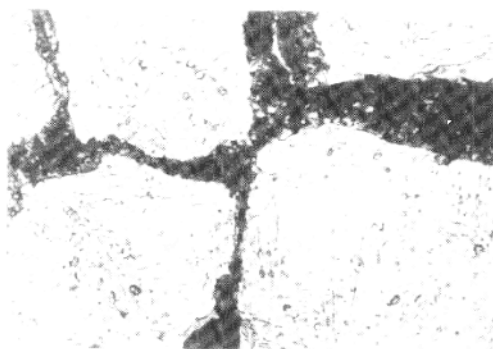


图 1.2.1-3

900×

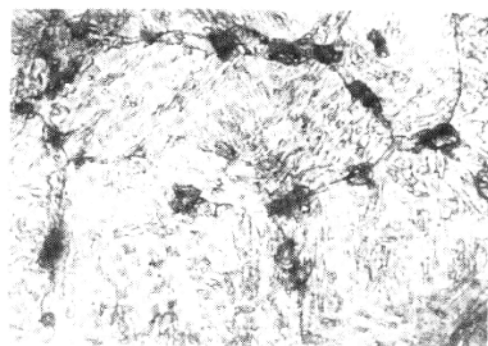


图 1.2.1-4

900×

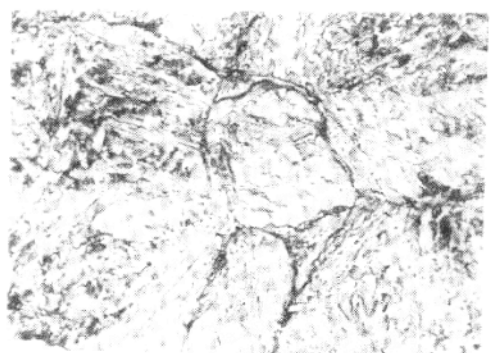


图 1.2.1-5

900×

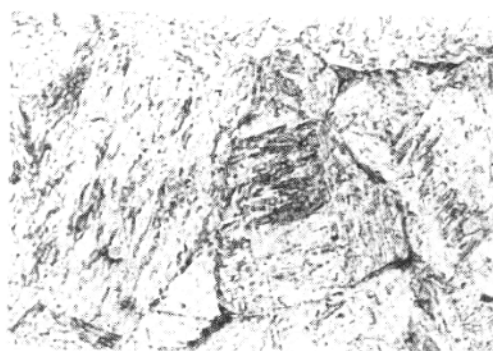


图 1.2.1-6

900×

图 号	材料名称	热处理条件及状态	组织及说明
1.2.1-7	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 20°C/min 冷至 700° C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体, 少量沿原奥氏体晶 界析出的类屈氏体网
1.2.1-8	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 35°C/min 冷至 600° C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体, 少量沿原奥氏体晶 界析出的网状类屈氏体
1.2.1-9	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 35°C/min 冷至 700° C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体, 少量沿原奥氏体晶 界析出的网状类屈氏体
1.2.1-10	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 50°C/min 冷至 700° C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体, 少量沿原奥氏体晶 界析出的网状类屈氏体
1.2.1-11	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 50°C/min 冷至 550° C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体, 极少量沿原奥氏体 晶界析出的网状类屈氏体
1.2.1-12	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 60°C/min 冷至 700° C 后水冷	FeCl ₃ +HCl 酒精溶液浸蚀 马氏体

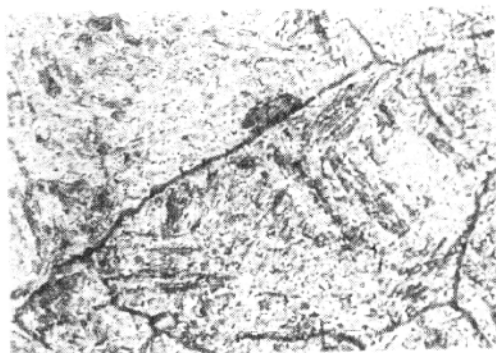


图 1.2.1-7

900×



图 1.2.1-8

900×



图 1.2.1-9

900×

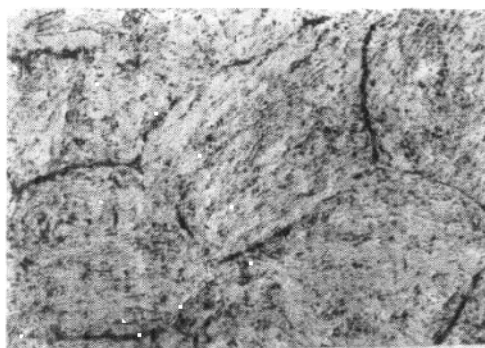


图 1.2.1-10

900×

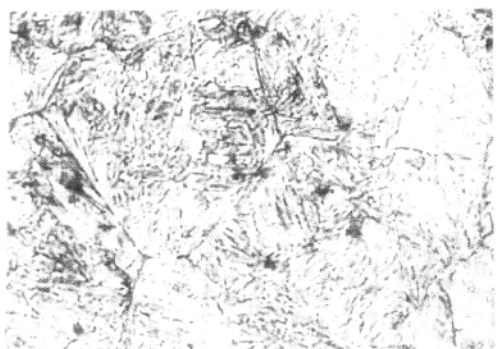


图 1.2.1-11

900×

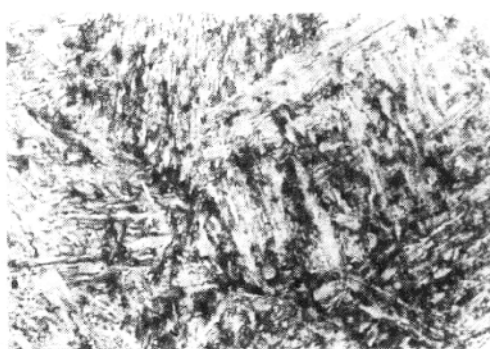


图 1.2.1-12

900×

图 号	材料名称	热处理条件及状态	组织及说明
1.2.1-13	2Cr13	1050°C, 30min 加热, 以 6°C/min 冷至 600°C 后水冷	萃取复型电镜组织 沿原奥氏体晶界析出的多 种形态类屈氏体组织 黑块为未溶的 $M_{23}C_6$
1.2.1-14	2Cr13	同图 1.2.1-13	萃取复型电镜组织 层状类屈氏体, 黑色块状 为加热时未溶的 $M_{23}C_6$
1.2.1-15	2Cr13	同图 1.2.1-13	萃取复型电镜组织 层状类屈氏体, 黑色块状 为未溶解的 $M_{23}C_6$
1.2.1-16	2Cr13	同图 1.2.1-13	萃取复型电镜组织 骨架状 $M_7C_3 + \alpha$, 黑色块 状为加热时未溶的 $M_{23}C_6$
1.2.1-17	2Cr13	同图 1.2.1-13	萃取复型电镜组织 纤维状分布的碳化物从原 奥氏体晶界上向晶内伸展
1.2.1-18	2Cr13	同图 1.2.1-13	萃取复型电镜组织 纤维状碳化物 + α

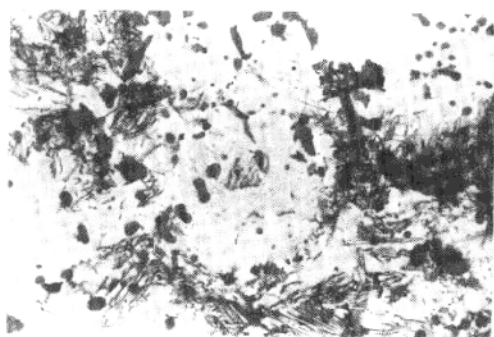


图 1.2.1-13

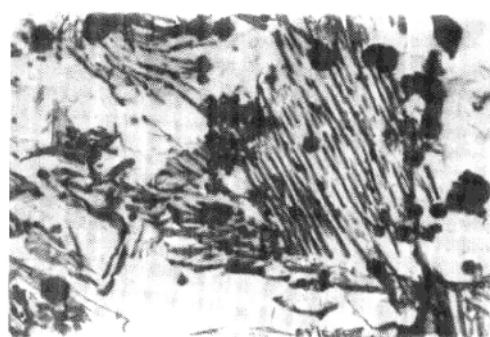
2000 $\times$ 

图 1.2.1-14

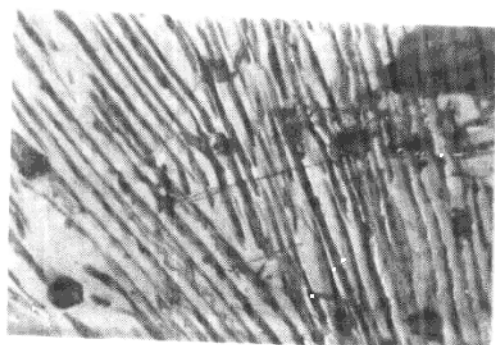
5000 $\times$ 

图 1.2.1-15

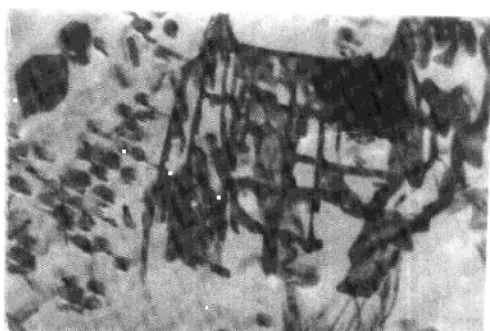
10000 $\times$ 

图 1.2.1-16

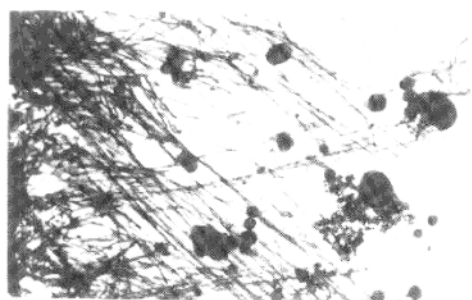
2000 $\times$ 

图 1.2.1-17

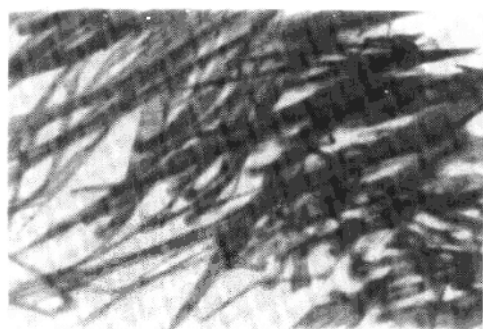
5000 $\times$ 

图 1.2.1-18

15000 $\times$