

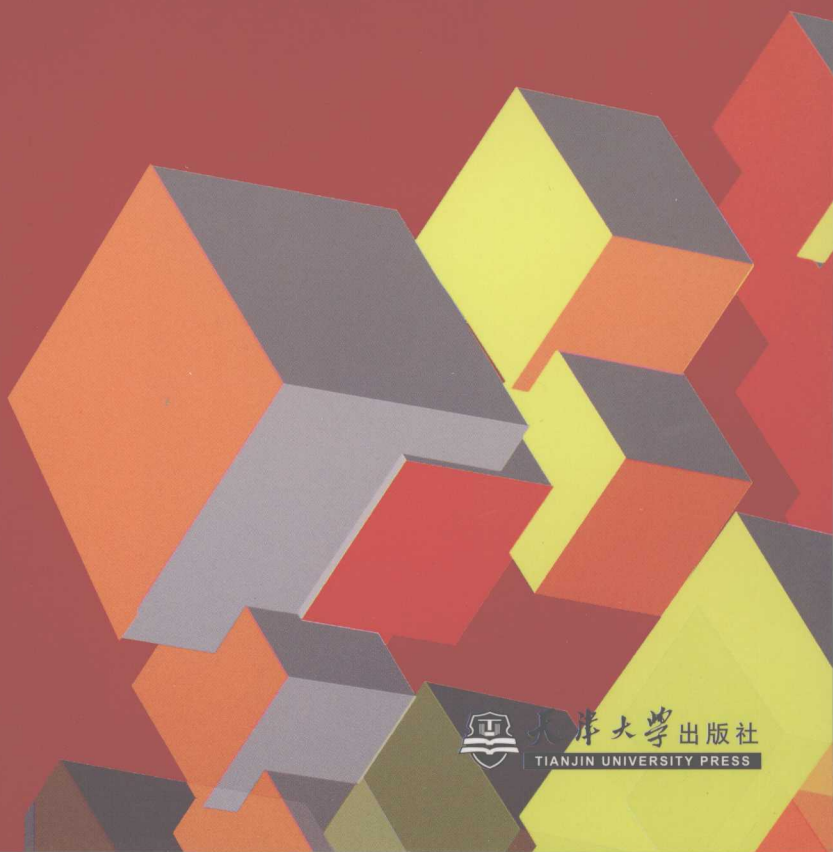


ang de Gaowen Jinxiangxue

钢的高温金相学

——钢的相变过程原位观察

苏德达 李家俊 著



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

组稿编辑 郭建国
责任编辑 郭建国
装帧设计 谷英卉
技术设计 郭 婷

钢的高温金相学

——钢的相变过程原位观察



ISBN 978-7-5618-2243-2



9 787561 822432 >

定价:22.00 元

钢的相变过程原位观察

苏德达 李家俊 著



图书在版编目(CIP)数据

钢的高温金相学:钢的相变过程原理观察/苏德达,李家俊著. —天津:天津大学出版社,2007.9

ISBN 978 - 7 - 5618 - 2243 - 2

I. 钢… II. ①苏…②李… III. 钢 - 高温金相 - 研究 IV. TG142 TG113

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 129076 号

著 苏德达 李家俊

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨欢

地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电话 发行部:022—27403647 邮购部:022—27402742

印刷 廊坊市长虹印刷有限公司

经销 全国各地新华书店

开本 169mm × 239mm

印张 13.75

字数 285 千

版次 2007 年 9 月第 1 版

印次 2007 年 9 月第 1 次

印数 1 - 3 000

定价 22.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

本书的素材来源于改革开放初期、恢复高考后 1981 ~ 1982 届本科毕业生为完成毕业论文所进行的实验——采用高温金相法来研究钢在加热和冷却时的组织转变。当时，学校虽有较大的人才优势，但缺少比较先进的高温金相显微镜设备。有些工厂、研究所已从奥地利购进了 MeF—I 型高温金相显微镜，却很少使用。天津手表厂引进了新型的 MeF—II 万能金相显微镜，因此，课题组经过联系选择了天津手表厂作为主要研究基地，结合该厂常用钢材制成标准试样，进行了比较系统的高温金相方面的原位观察及分析研究等工作。实验工作得到天津手表厂党、政领导，特别是该厂金相室负责人陆允庄工程师等的全力支持和精心协助，在此作者表示深深的敬意和感谢！

本书是天津大学金相热处理专业部分师生与厂、所技术人员密切合作的结晶。其中陆工程师自始至终进行了实验设备的功能、操作及使用时的注意事项的介绍、示范性指导；1981 届毕业生胡秉全、刘长瑛、曹阳和张小炎等 4 人以及 1982 届毕业生李家俊、梁英、王林春及范利祖等先后参加了试验工作，取得了较丰富的试验数据并绘制成曲线，摄取了大量金相照片。随后，留校的李家俊在天津大学筹建 MeF—I 型高温金相试验室，并将大量金相照片整理成相册（卡片），做了大量工作。另一方面，由于钢试样高温真空加热和冷却的过程需要较长时间，所以同学们经常加班加点才能完成任务，对于他们的辛勤劳动和尽职尽责的态度，作者向他们深表敬意和由衷的感谢。

由于我校金相热处理专业硕士研究生招生任务和与部属企业合作搞科研任务的加重，第一作者个人的研究方向又重新回到“弹簧（材料）强韧化技术的开发与应用”，“高温金相”这个研究课题难以为继，只好将这方面的资料和照片封存。这样一拖就是 15 年。1995 年 9 月第一作者在泰安参加学术讨论会时突发中风，经过抢救，转危为安，一切工作只好暂停。

经过几年的治疗、调养和拳功锻炼使我这个几乎半瘫之身得到了良好的康复，争取到人生第二个春天的机遇。在康复的十年间，为行业或专业学术会议和相关杂志撰写论文 30 篇以上，其中关于高温金相方面的论文约占半数。还撰写了《热处理手册（2）》（第 3 版，2001 年 7 月，北京）中的第 5 章——弹簧的热处理（159 ~ 225 页，约 10 万字）；并有专著：《弹簧（材料）应力松弛及预防》（40 万字）（天津大学出版社，2002 年 9 月）。本书于 2005 年底脱稿。2005 年 8 月初参加了太原理工大学主办的国际材料科学与工程学术讨论会，其论文集（下）中收入了作者主写的两篇钢的高温金相学方面的论文。

关于高温金相学方面的研究有关厂、所、校均投入了相当大的财力、人力，而且在试验过程中取得了高温金相学中某些进展或亮点，若完全抛弃这些资料实在可惜，令作者深感不安。在新世纪来临之际，受到“科学发展观”与“振兴中华”的感召，作者决心在 80 余岁的年龄来完成《钢的高温金相学》的著述，借此书纪念中国工农红军长征胜利 70 周年，并向母校北洋大学 110 周年校庆、作者亲自参加抗日救国（反法西斯战争）胜利 60 周年和哈尔滨工业大学金相热处理研究生毕业 50 周年献礼！

本书内容共 10 章：第 1 章是概论，扼要介绍了“高温金相学”的定义、发展概况及存在问题，重点介绍了 MeF—II 型高温显微镜的结构和附件，试验钢种和标准试样，试验原理和方法；第 2 章采用常规的金相—硬度法研究了各种工业用碳钢在变温条件下奥氏体的形成动力学过程、组织与性能相应变化的规律，用以对比或弥补高温金相显微镜下难以观察到奥氏体形成过程的严重缺点；其余 8 部分是本书的主要内容。其中，第 3~7 章是研究各类钢在加热转变时发生的几种相变现象，即高温金相——奥氏体晶粒的变温长大和恒温长大动力学、晶粒长大时晶界迁移的规律及其动态过程；奥氏体晶粒中的退火孪晶的类型及其形成机制、退火孪晶对过冷奥氏体转变的影响；钢中石墨析出与蒸发等。第 8~10 章研究典型钢种过冷奥氏体的转变（即低温时的马氏体转变、中温时的贝氏体转变和高温时的珠光体形成或先共析相的析出等），并进行了原位、动态观察与分析。

本书的特色是使“室温金相”（是从试样表面上看到的各种组织形态、大小和分布）改变为“高温金相”，即在加热或冷却过程中实现试样表面的原位（或定位）观察，直接看到该现场范围随时间、温度的改变所发生的金相组织的变化。使我们从普通金相显微镜所看到的——静止的、呆板的、不连续的和现场随意变化或彼此孤立的图像，发展成为动态的、连续的、原位的、现场彼此密切关联的，并从高温金相显微镜中可直接看到的相变时质和量的变化，使难以理解的抽象的相变变成看得见的、摸得着的活的东西。这种感受可从本书许多系列照片中看到。特别是高温奥氏体晶粒的长大和晶界迁移，其中退火孪晶的形成原因、种类和机制以及它对过冷奥氏体转变的影响是一些大学教材中很少涉及的内容，也是本书的特色和亮点。

老同学侯增寿、戚正风两位老教授曾提出：是否将书名改为《钢的相变过程原位观察》，在此作者把它作为本书的副书名，不知上述处理是否妥当，还请指教，在此对他们表示深切的谢意！

苏德达
2007 年春节

目 录

1 概论	(1)
1.1 高温金相学的定义、内容和意义	(1)
1.2 高温金相学的进展及存在问题	(3)
1.3 主要研究设备 (MeF—II 型高温金相显微镜) 简介	(5)
1.4 试验材料和标准试样	(8)
1.5 试验设备操作规程和注意事项	(9)
1.6 试验原理及方法	(10)
参考文献	(13)
2 碳钢加热时奥氏体的形成——采用“金相—硬度法”进行研究	(14)
2.1 概述	(14)
2.2 共析钢 (80 或 T8A) 奥氏体的形成	(15)
2.3 亚共析钢奥氏体的形成	(18)
2.4 过共析钢奥氏体的形成	(35)
2.5 小结	(45)
参考文献	(47)
3 渗碳钢奥氏体晶粒长大时的原位观察与分析	(49)
3.1 试验钢种、化学成分、组织与性能	(49)
3.2 20 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(50)
3.3 15CrMo 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(52)
3.4 20CrMnMo 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(55)
3.5 18Cr2Ni4W 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(57)
3.6 奥氏体晶粒长大动力学曲线及其影响因素	(60)
参考文献	(69)
4 弹簧钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(71)
4.1 试验钢种、化学成分、原始组织及性能	(71)
4.2 65 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(71)
4.3 65Mn 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察与分析	(73)

4.4	60Si2MnA 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察与分析	(75)
4.5	50CrVA 钢奥氏体晶粒长大时的原位观察与分析	(76)
4.6	四种弹簧钢奥氏体晶粒长大动力学曲线及分析	(77)
	参考文献	(79)
5	工具钢奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(80)
5.1	试验钢种、化学成分、原始组织及性能	(80)
5.2	共析钢 (T8A) 奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(81)
5.3	过共析钢 (T10A) 奥氏体晶粒长大时的原位观察及分析	(83)
5.4	渗碳钢及基体钢试样在真空加热时形成的奥氏体晶粒长大的原位 观察与分析	(92)
5.5	奥氏体晶粒长大时的晶界迁移现象	(97)
	参考文献	(100)
6	奥氏体晶粒中的退火孪晶	(101)
6.1	概述	(101)
6.2	奥氏体晶粒中退火孪晶的原位观察及分析	(102)
6.3	退火孪晶的形成机制	(112)
6.4	孪晶界对过冷奥氏体转变的影响	(114)
6.5	形变孪晶与淬火孪晶	(119)
	参考文献	(126)
7	钢中石墨的析出与蒸发	(128)
7.1	概述	(128)
7.2	亚共析钢中的石墨析出与剥层分析	(129)
7.3	共析钢 (T8A) 中的石墨析出现象及分析	(131)
7.4	过共析钢 (T10A) 中的石墨析出及剥层分析	(136)
7.5	石墨析出与 Fe-C (石墨) 和 Fe-Fe ₃ C (渗碳体) 两种 相图的关系	(141)
	参考文献	(143)
8	马氏体转变过程的原位观察及分析	(144)
8.1	概述	(144)
8.2	低碳钢 (渗碳钢) 18Cr2Ni4W (18CrNiWA) 试样板条马氏体形成时 的原位观察与分析	(150)
8.3	18CrNiWA 钢渗碳后试样表面上的马氏体转变过程的原位 观察与分析	(162)
	参考文献	(169)

9 贝氏体转变过程的原位观察与分析	(171)
9.1 贝氏体转变的国内外研究工作概况	(171)
9.2 贝氏体转变过程的原位观察与分析	(175)
9.3 贝氏体在实际生产中的应用	(192)
参考文献.....	(200)
10 过冷奥氏体高温转变时的观察与分析.....	(202)
10.1 概述	(202)
10.2 珠光体形成时的原位观察与分析	(206)
10.3 亚共析钢魏氏组织铁素体 (WF) 的形成	(207)
参考文献.....	(210)
结束语.....	(211)

1 概 论

1.1 高温金相学的定义、内容和意义

利用高真空技术,防止空气或其他气体与被加热试样表面发生作用的各种形式的金属学研究称为高温金相学。目前,已经有许多先进和可靠的研究方法来深入钻研金属学的相关问题,其中比较普遍的是采用光学显微镜(OM)(放大倍数一般小于2 000倍)来研究金属的各种显微组织,甚至用肉眼来分辨其宏观组织。电子显微分析技术也越来越被广泛应用(其放大倍数从几千倍到上百万倍),其中包括透射电镜(TEM)分析技术和扫描电镜(SEM)分析技术。在上世纪中叶开发出了场离子显微镜(FIM),用来研究金属的表面组织形态和结构,观察原子相,并用它能看到硬铝的时效过程。透射电镜不能分辨GP区、 θ 相等的结构。为了阐明金属及合金在加热和冷却过程中发生了何种相变及其动力学过程,还需开发新的研究方法。高温金相技术就是其中之一。20世纪以来,应用高温金相技术研究金属材料在真空加热和冷却时发生的组织转变、相变动力学、组织形态学及组织与性能之间的关系等方面进行了许多卓有成效的工作^[1~5]。高温金相技术在金属学方面的应用相当广泛。我们的科研组在天津手表厂领导的积极支持下,在陆允庄工程师的大力协助下,利用该厂新购进的MeF—II型卧式万能高温金相显微镜来观察研究工业用钢试样表面在加热和冷却时进行的各种相变过程,获得了组织转变的系列照片、试验数据和曲线,对许多有趣的现象进行了扼要分析和讨论。我们的工作集中在常用钢方面,在具体的工艺方案下对试样表面进行了原位(或定位)观察,力求捕捉到钢发生相变时的动态过程,使比较抽象的、陌生的、不连续的、呆板的“金属学及热处理”教科书中的相变知识变得更加具体、直观(感性)、连续和生动,这有利于提高人们学习这门科学的直观性、积极性和趣味性。

钢的高温金相学主要包括如下内容:

- (1) 奥氏体晶粒长大时的动力学研究;
- (2) 奥氏体晶粒边界的迁移现象;
- (3) 退火孪晶现象;
- (4) 石墨的析出与溶解;
- (5) 马氏体相变的研究;
- (6) 贝氏体转变的研究;

(7) 过冷奥氏体高温转变(珠光体与魏氏体的形成)的研究。

其他方面的工作:如临界点的测定,过冷奥氏体转变图(TTT图和CTT图)的绘制,脱碳过程、合金元素的富集与贫化以及钢的淬透性研究等。在这些内容中,相变点(M_s 、 M_f 、 B_s 及 B_f 等)的测定及脱碳现象等在相关部分中有所介绍和讨论,其余研究内容均未进行试验工作。

高温金相技术在金属学、热处理方面的理论研究和应用都有特殊的意义。我们的粗浅体会如下。

高温金相学是利用真空技术在防止加热试样表面与空气或其他气体发生作用的条件下观察、研究金属和合金各种相变过程的科学。金属学中已经介绍了许多可靠的研究方法。例如:普通金相—热处理法、物理性能和化学试验法、力学性能测试法等。为了阐明金属在加热和冷却过程中究竟发生了何种相变及其转变的动力学过程,就必须采用一些新的研究方法,高温金相技术就是其中的一种。实践表明在设定的工艺条件下,利用真空技术有可能对金属试样表面进行原位(或定位)观察(而其他方法难以实现),直接看到(或录像)各种固态相变的全过程。从而把不同温度、时间等参数下发生的组织转变时的形核、核长大的组织形态及其动力学过程等现象从非原位(即视场不固定)、不连续、比较呆板和抽象变为原位(视场不变)、连续、相当生动、可见又实际的对象。这种设备还可录像或拍成电影,这将显著提高初学者的兴趣和教学效果,而且对固态相变理论的理解和深入研究也将起着较大的推动作用。

首先,应指出,在大学教材中关于高温相“奥氏体”的介绍内容较少,特别是奥氏体晶粒长大与晶界迁移现象、奥氏体晶粒中的退火孪晶及对冷却转变的影响,很少受到重视和讨论。而高温金相技术可以发挥独特的作用,例如,它可清晰地看到奥氏体晶粒的变温长大和恒(等)温长大现象;明显地揭示钢中含碳量及合金元素对转变动力学的影响规律;借助热蚀沟形成与消失的现象可以更加生动地看到晶粒长大时晶界迁移与晶界平直化的过程。对于奥氏体的退火孪晶组织的形成规律、类型及其对马氏体转变、贝氏体转变与珠光体转变的影响等,通过高温金相技术也可进一步展示出来。

其次,过冷奥氏体的转变现象仍存在不少不清楚或有争议的问题。例如,中碳钢马氏体转变时板条马氏体和孪晶马氏体混合存在,两者谁先形成?或同时形成?而且形成温度也很难测定;混合马氏体组织与钢中含碳量的关系等均尚未交代清楚;孪晶马氏体中是否存在中脊仍然存在争论。关于贝氏体转变尚未搞清楚而争论的问题更多。《钢的过冷奥氏体转变曲线》^[6]表明,每一种钢在既定的奥氏体化条件下都有自身的转变曲线图,根据转变温度不同,大致可区分为高温、中温和低温转变等三类。高温区的珠光体转变属于扩散型相变、低温区的马氏体转变属于非扩散型相变,这是本专业学术界的共同看法;但是中温区的贝氏体转变

却仍在争论中。争论主要分成三派：共格切变型学派认为贝氏体形成类似于马氏体转变；扩散型学派认为贝氏体形成类似于珠光体转变；两者兼备论者可归于第三派（中间派），即认为在中温区上限温度时发生的贝氏体转变属于扩散型相变，而在下限温度形成的贝氏体属于非扩散（切变共格）型相变。近 30 年来，国内从事新型贝氏体钢开发的人员，观察到各种不同形态的贝氏体组织，打破了上、下贝氏体的传统概念，取名繁多，如无碳贝氏体、粒状贝氏体、类马氏体、贝氏体等等，这样使贝氏体的定义、转变反应式、形核及长大机制、转变热力学和动力学等理论问题都成为争议的焦点。其中有些问题可能与研究者选用的试验方法、材料与试样不同有关，而高温金相技术在试样表面可选取有代表性的视场进行原位观察，也可在变温或等温条件下，直观连续地观察钢中的相变过程，或许可对上述种种争论问题的解决提供帮助。

从金属材料科学的发展观看，高真空技术不仅在金属物理方面值得推广应用，在粉末冶金、化学冶金和表面物理及技术工程方面也有广泛的应用前景，甚至在宇航事业的发展方面也同样有类似的高真空技术问题需要探索。

1.2 高温金相学的进展及存在问题

金属材料是材料学的重要组成部分，钢铁材料又是金属材料中非常重要的资源，它的生产量多少标志着一个国家国力的强弱。建国初期，我国曾提出过“以钢为纲”的方针，并确定了年产一千多万吨的奋斗目标。目前我国年钢产量超过了三亿吨，稳居世界前列。但从质量水平看，我国还不能称为钢铁强国。

金相学可以说是金属学的重要基础内容。钢的高温金相学又是普通金相学的一个分支。应当强调的是，金相学是紧随金属材料学的发展而逐步深入的，特别是金相显微技术不断创新、放大倍率不断提高（从光学显微镜的最大倍率为 2 000 倍到电子显微镜的 10 万到百万倍，直至纳米（nm）或埃（Å）的水平），因此可观察到金相组织中更加微小的质点。为了提高金属制品的内在品质或开发新型金属材料，相应的金属图谱在生产和教学中受到普遍关注及应用。

实践表明，欧美发达国家都经历了工农业现代化道路，加速了现代科学与教育的迅猛发展，反过来又将促进工农业等方面的更大发展。金相学特别是钢的金相学是现代金属材料科学与工程中的重要组成部分。我国最早从事金属材料研究的周志宏院士是从北洋大学矿冶系毕业后到美国留学的金属学和热处理技术的知名专家；柯俊院士是上世纪中期在英国从事金属物理方面研究的著名学者，也是采用高温金相开展研究工作的创始人之一；其他金相学研究的老前辈都有类似的经历，即走出国门向一些发达国家学习相关先进科学技术，然后回国效力，振兴祖国。本书第一作者是从新中国成立时从北洋大学毕业后分配到实验室进行教学与管理工作的，随后经选派到哈尔滨工业大学向苏联专家学习三年。从机械制造专

业改学金相、热处理,从此一辈子从事于金属材料科学与工程的研究及教学工作。同样也走的是这条求学道路。只不过前者是用“走出去”,我们晚辈是用“请进来”的方式来学习发达国家先进的科学技术。目前,我国的人才培养战略仍采取上述方针。实践证明,对于长期处于贫穷、落后的中国,为了民族的复兴,祖国的强盛,实施这一正确方针,已经取得了丰硕的成果。还应指出,关键问题还是狠抓全民族的教育和科学知识的普及。随着工农业的迅猛发展,我国也相应地重视了高级科技人才的培养。上世纪 50 年代初期,从哈工大金相热处理专业培养出来的研究生、进修教师和本科生几乎都成为新中国金相、热处理方面的院士、专家、教授。通过他们几十年的努力又培养了一大批新秀,其中不少学子已成为金属材料科学方面的学术带头人和科技领导干部。

另一个重要问题是建设实验基地。没有金相显微镜就不可能有现代金相学的产生,没有高真空度的、大型的万能高温金相显微镜的研制成功,也就不会有高温金相学的诞生。应当指出,我国长期不能自行设计、制造这类大型、成套、先进的金相显微镜等仪器设备、更谈不上技术含量很高的高温金相显微镜了!各高等院校和科研所、实验室几乎全靠从国外引进该类设备。上世纪已经看到了英、美、德、奥、俄(前苏联)与日本等发达国家都有自己特色的产品。例如,奥地利在 60 年代生产的 MeF—II 型高温金相显微镜就是在 I 型的基础上改进的新型的、万能的、质量更高的精密光学仪器。

利用高温金相显微镜技术可以观察试样在加热和冷却过程中的金相组织,因而可用来研究钢的高温金相组织及其相变。前苏联金相学家在其著作《高温金相学》^[1]中有详细介绍。常温金相技术(例如用化学试剂来显露钢铁组织的方法)在高温时不便使用。由于高温金相观察的是试样在真空或保护气氛中加热时发生的组织转变,例如,在奥氏体形成、珠光体转变的过程中体积变化很小,又没有适当的化学浸蚀方法,因而在高温下没能看到它们的形成过程。为了弥补这个不足,作者在本书第 2 部分中增添了采用经典的“金相硬度法”来阐明钢在加热和冷却过程中奥氏体的形成和珠光体的转变过程。但是,在专业教材中一般介绍的是等温转变动力学曲线及金相组织转变的形貌特征,而不是变温(加热及冷却)时的转变。希望用高温金相显微镜在加热时观察到奥氏体($P \rightarrow A$)连续形成的过程或者过冷奥氏体发生珠光体转变的动态过程,实际上这在试验时很难实现,用普通的金相硬度法也只是间接地说明上述转变的结果。

关于奥氏体晶粒测定在普通金相中有几种方法,如渗碳法、网状分布的先共析相的析出法及马氏体回火法等等;高温金相法测定奥氏体晶粒度仍是一个争论的问题。有人认为,这种测定法只能是定性的,不能测定既定温度和保温时间下的晶粒度^[4]。主要原因是需要在一定温度下、保温足够时间才能靠热蚀沟而显露出奥氏体晶界。作者认为,如在相同的条件下进行对比性试验,高温金相法测量

奥氏体晶粒长大动力学是一种更为直观而生动的方法。天津钢厂中心试验室用高温金相法测定的 40CrNiMo 钢的晶粒度和传统法的测定结果几乎相同,他们认为,高温金相法测定的结果是可靠的。

要求形成明显的奥氏体晶界热蚀沟必须有足够高的加热温度和保温时间,因而限制了高温金相法对任意温度及保温时间下的奥氏体晶粒度的测定。作者在实践中体会到,上述缺点表明,不同温度下形成的热蚀沟也需要足够的时间才能填平,因而有可能出现新、旧奥氏体晶界(热蚀沟)共存的现象,从而可用来研究晶界迁移的过程和二维表面物理中晶界平直化及晶界交角为 120° 的必然现象。这是其他金相法难以实现的。

其次,真空加热时钢件表面成分将发生改变,这里主要有三个问题。一是表层脱碳现象。二是渗碳体(Fe_3C)石墨化现象。这两种现象将使表层含碳量降低。三是真空高温、长时间加热时会影响钢中合金元素的分布,例如铬元素有向表面浓聚的趋势,含硼钢往往在试样表面形成针状硼化物。显然,上述成分的改变将对高温金相组织的观察有重大影响。

高温金相法另一个重要优点是便于连续观察的组织是在转变过程中,其新相和母相之间有较大的体积变化,使试样表面出现“浮凸”。例如:钢中的魏氏组织(W_α)、贝氏体转变和马氏体转变等。由于转变是不可逆的,当其再次加热时,试样表面已形成的浮凸并不消失,所以,马氏体在回火过程中的转变也不能观察到。

总之,高温金相技术和普通金相法都有自身的优缺点和局限性,应取长补短。尤其是大型卧式高温金相显微镜的开发也是在普通立式或卧式金相显微镜的基础上,增加了一些必不可少的装置,例如试样的加热和冷却设备、抽真空设备(如机械泵和扩散泵)及测温设备等。为了直接观察试样表面在加热和冷却时过冷奥氏体发生相变所产生的浮凸形貌特征,可进行定性与定量(通过系列拍照)测定其转变动力学图,而普通金相法或其他物理分析法却没能看到这些组织的形貌及其转变动力学过程,也无法实现试样的原位观察。

1.3 主要研究设备(MeF—II型高温金相显微镜)简介

奥地利生产的 MeF—II 型带真空、高温加热装置的大型金相显微镜专门用来研究各种材料的行为与环境相互关系的理论和实践问题,特别是在高温金相学方面的研究中存在着不少技术上的困难,它比在室温条件下的研究与试验要复杂得多。目前,人类已进入太空时代(例如航天器的运行),在太空中会遇到高、低温与不同真空度等复杂环境,这必然对材料、工具,甚至对人体的承受能力提出十分严峻的考验,这已经成为人类面临的科学技术问题,必将引起材料科学工作者的关注。

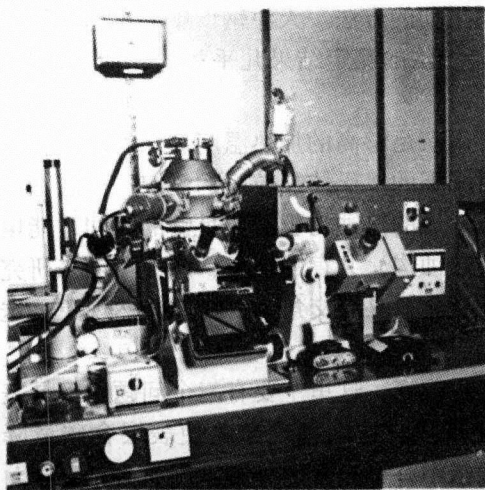


图 1-1 MeF—II 型金相显微镜

MeF—II 型金相显微镜的外形如图 1-1 所示，其结构大致由如下四部分组成：

- (1) 主体；
- (2) 试样的加热装置；
- (3) 冷却装置；
- (4) 抽真空系统。

1.3.1 主体

该套试验设备的主体是卧式金相显微镜，它由光学系统、照明系统及照相系统等组成。光学系统包括长焦距物镜、不同放大倍数的目镜及转换方向的三棱镜等。因为物镜与观察试样表面（载物台）之间有一定的距离（其间还有观察窗口——石英玻璃片），焦距不可能太小，故物镜的放大倍数不可能太高。它可以分别观察明、暗场，偏光、萤光和相衬。显微镜的照明系统安装在其左方，它配有两个光源：一个是 150 W 栅灯；另一个是 100 W 白炽灯。一般观察用白炽灯，照相用栅灯。照像系统有两套，一为正前下方的照相盒，一为右方的可移动的暗箱。连续拍照时可用 120、135 两套暗盒，曝光时间由光敏电阻自动控制。其中 135 胶片曝光后自动过卷。此外还可以安装投影屏或 16 mm 电影摄影机。机械系统包括调节焦距、暗箱距离的螺栓等零部件。

1.3.2 试样的加热装置

微型高温加热炉和载物台紧密相连（密封），炉底开有石英窗，在石英窗上覆盖着石英盖，观察试样放在石英盖上部，其观察表面朝下。由于试样表面金属蒸发等原因，石英盖会被污染，从而影响观察或照相时的清晰度，因此，被污染的石英盖应及时更换。

试样的加热是在微型加热炉内完成的，加热炉是由耐热钢制成的炉套和电极支柱组成，它安放在显微镜主体上方，采用热辐射法加热试样，试样放置在两个半圆柱形钼片或钽片电极之间，在电极两端施加低压大电流，进行辐射加热，改变电极两端的电压和电流的大小就可以调节其加热速度。

用钼片电极时其最高加热温度可达 1 600℃；用钽片作为电极时，其最高加热温度可达 1 800℃。把铂—铑热电偶放入试样观察表面附近的盲孔中，接上电位仪

表就可读出温度数。

1.3.3 冷却装置

该套设备可分为两部分：其中一部分用于显微镜周围环境的冷却，即微型加热炉的炉套、电极支柱等做成内空形，通循环水来冷却；另一部分是试样的冷却。试样的冷却有三种方式：一是调节电极两端的电压和电流减小加热功率，借助炉壁通过的冷却水循环使试样温度降低；二是切断加热电源，可加快试样冷却；三是切断电源后，向试样表面吹高纯氩气等惰性气体，可进一步提高冷速，实现急冷的要求。

1.3.4 抽真空系统

为了防止试样表面氧化，保证观察表面的清晰度，必须使加热室内的残余压力足够低。一般碳钢要求真空度在 10^{-3} Torr ($1 \text{ Torr} = \frac{1}{760} \text{ atm} = 133.322 \text{ Pa}$ ，下同) 以上，若钢中含有铬元素时，其真空度要求更高。例如，含 $1\% \sim 2\% \text{ Cr}$ 的钢，其真空度要求达 10^{-5} Torr。MeF—II型高温金相显微镜的微型加热炉内真空度由两级抽真空泵控制。低真空度用机械泵来实施，它可抽到 10^{-3} Torr，再用扩散泵实现高真空度，两级联合使用时可使炉内真空度达到 2×10^{-6} Torr，这样可满足常用金属材料试样对真空度的要求。真空度的高低用两个压力表直接测量。

总之，该套设备的优点是机械（力学）和光学性能可靠；积木（板块）式设计和组合装配，可满足不同规格、价格水平的用户要求；最后，它是一种万能研究工具。其研究方法如下：

(1) 明场照相；	—	—	—	—	0.3	0.12	0.5	20	1
(2) 暗场照相；	—	—	—	—	0.6	0.25	0.12	12CrMo	2
(3) 偏振光；	—	—	—	—	0.9	0.3	0.5	30CrMnMo	3
(4) 相衬（对比度）；	—	—	—	—	1.1	0.4	—	—	—
(5) 萤光；	—	8.0	—	4	1.32	0.3	0.18	18CrNi7A	4
(6) 显微硬度测定；	—	—	—	—	0.8	0.17	0.25	20	5
(7) 干涉对比度；	—	—	—	—	0.9	0.3	0.70	—	—
(8) 干涉仪分析研究；	—	—	—	—	0.9	0.17	0.3	—	—
(9) 晶粒度（尺寸）测定；	—	—	—	—	0.8	0.3	0.70	—	—
(10) 高温金相显微镜观察与分析；	—	—	—	—	0.8	0.3	0.70	—	—
(11) 显微照相；	—	—	—	—	0.8	0.3	0.70	—	—
(12) 低温照相；	—	—	—	—	0.8	0.3	0.70	—	—

- (13) 显微光谱研究;
- (14) 电影摄像;
- (15) 显微电视;
- (16) 显微投影。

本研究是利用企业的设备进行的,还受到客观条件与研究时间的限制,只能采用上述研究方法中的几种来研究常用工业钢在高温加热时奥氏体晶粒的长大过程、晶界迁移现象、孪晶的形成与形态类型、石墨的析出现象以及过冷奥氏体在冷却过程中发生的各种转变,例如马氏体转变、贝氏体转变等的动态过程、形核与核长大等。而上述最后几种研究方法并没有开展工作,实为憾事!

1.4 试验材料及标准试样

1.4.1 试验材料

为了研究和生产的实际需要,选用常用工业钢作为试验材料,有代表性的渗碳钢(低碳钢)有 20 钢、15CrMo 钢、20CrMnMo 钢及 18CrNiWA 钢等四种;弹簧钢有 65 钢、65Mn 钢、60Si2MnA 钢及 50CrVA 钢等四种;工具钢有 T7A、T8A、T9、T10A、T12A、GCr15 及高速钢(6-5-4-2 型)等七种,还有 20CrMnMo 和 18CrNiWA 渗碳后的试样两种。它们的化学成分、组织及性能如表 1-1 所示。

表 1-1 试验用钢的化学成分、组织和力学性能^[7]

分类	No	钢号	主要化学成分(%)								原始组织、 夹杂物级别	力学性能
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	其他	
渗碳钢	1	20	0.2	0.17 0.37	0.35 0.65	—	—	—	—	—	铁素体(F)75% + 珠光体(P)	180 HV
	2	15CrMo	0.15		0.6 0.85	0.9 1.2	—	0.15 0.32	—	—	F+细 P 2 级	183 HV
	3	20CrMnMo	0.2		0.9 1.2	1.1 1.4	—	0.2 0.3	—	—	回火索氏体(C) 2 级	162 HV
	4	18CrNiWA	0.18		0.3 0.6	1.35 1.65	4 4.5	—	0.8 1.2	—	回火索氏体(C) 2~3 级	190 HV
弹簧钢	5	65	0.62 0.70	0.17 0.37	0.50 0.70	—	—	—	—	—	片、粒状 P+少 量 F 2~3 级	76 HRB
	6	65Mn	0.62 0.70	0.17 0.37	0.9 1.2	—	—	—	—	—	细片状 P+少 量 F 1~2 级	93 HRB
	7	60Si2MnA	0.56 0.64	1.60 2.00	0.60 0.90	—	—	—	—	—	同上 2 级	100 HRB
	8	50CrVA	0.46 0.54	0.17 0.37	0.50 0.80	0.80 1.10	0.35	—	—	0.10 0.20	细粒状 P 2 级	96 HRB