

与鞍钢的取向硅钢科研合作对 北京科技大学材料科学基础 课程教学的促进作用

Promoting Effects of Collaborative Research of Grain Oriented Silicon Steels with Angang Steel on the Course Teaching of Fundamentals of Materials Science in USTB

供稿|杨平 / YANG Ping

内
容
导
读

鞍钢被称为共和国钢铁工业的长子，它为很多新中国成立后新建的钢铁企业输入了大量人才和技术，做出了重要贡献。鞍钢还产生了很多全国劳动模范，成为全国人民学习的榜样。作为北京科技大学（前北京钢铁工业学院）材料科学基础课程任课教师，有幸参与了十余年鞍钢的科研活动，在课程知识应用、钢铁企业人文历史传承方面都有很多感受；也融入并见证了我国取向硅钢由引进国外技术到自主开发并处于国际先进水平的过程。本文从任课教师的角度，讨论了笔者作为教师及科研人员参与鞍钢硅钢开发的一些感想，尝试通过自身感受讲授课程知识应用、寻找课程思政元素，以提升授课效果；讨论了作为教材经典内容的二次再结晶理论的变迁所导致的修改教材、开发新实验的可能性。

鞍钢有着“共和国钢铁工业的长子”和“中国钢铁工业的摇篮”的称号，这些称号映射着中国百年钢铁工业发展历程和为它的建设与发展做出了巨大贡献的鞍钢人，记载着鞍钢为我国后续新建的许多大型钢铁企业输送了大量的人才和技术。与此同时，鞍钢还涌现出众多的全国劳动模范，他们成为全国人民学习的榜样。鞍钢也是雷锋工作过的地方和其世

界观形成的主要地点。笔者从小就对雷锋故事、雷锋日记和雷锋精神耳闻目染。鞍钢也是笔者作为北京钢铁学院的毕业生从事金属学原理（现在称材料科学基础，简称材料科基）课程教学和钢铁研究时间最长的企业，所从事的取向硅钢研究合作时间长达15年以上，在笔者所培养的研究生中约有40位从事各类电工钢（硅钢）的研究，占所培养研究生人数

作者单位：北京科技大学材料学院，北京 100083

的一半，其中也包含为鞍钢培养的博士和工程硕士。作为高校教师，教学与科研并重，自我感觉较好地处理了两者相互促进的关系。笔者在文[1]中详细介绍过取向硅钢（被称为特殊钢中的工艺品）的二次再结晶理论与生产技术，主要介绍了相关国际领

域专家及教材中相关图的来源出处。以下从课程教学的角度分析与鞍钢的科研合作及鞍钢发展历史对笔者教学的促进作用和教育意义。为了简洁直观，图1给出本文计划分析的鞍钢与课程教学的促进作用的关系图。

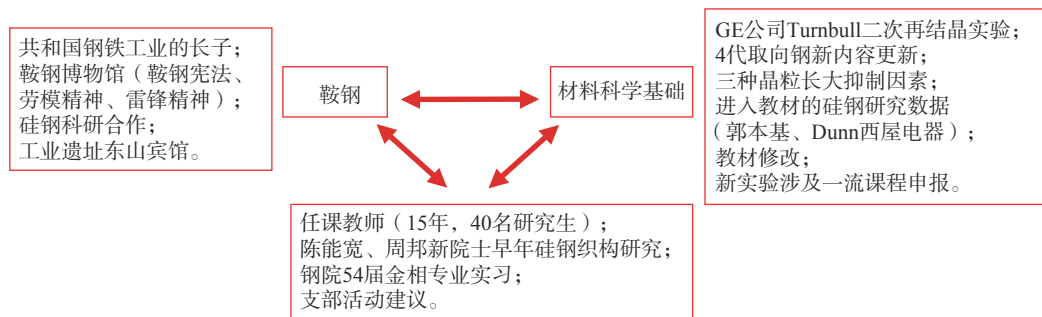


图1 材料科学基础课程知识点、课程思政、授课教师与鞍钢企业发展的关系

与鞍钢的取向硅钢科研合作对材料科学基础课程教学的促进作用

课程中“不变”的取向硅钢二次再结晶理论与现实中“不断更新”的取向硅钢开发进程

材料科学基础教材中介绍的取向硅钢二次再结晶的经典实验是1958年D. Turnbull教授在美国通用电气（GE）公司完成的研究数据^[2]，虽然在授课中早已介绍了现代取向硅钢的理论发展和产品控制水平，但从1980年这组经典实验数据编入教材直到现在的2024年，取向硅钢发生的巨大变化在教材中并未体现。教材中的实验数据实际是来自最早的第一代经两次轧法制备的普通取向硅钢（CGO钢），该制备方法1934年在美国发明，以MnS作为抑制剂，称Armco方法。在20世纪60年代末日本新日铁钢铁公司开发了采用高温加热一次轧法制备的高磁感取向硅钢（HiB钢），该制备方法主要以AlN为抑制剂，MnS抑制剂为辅。21世纪我国试验成功了称为俄罗斯法的两次轧法、可以用于生产含铜的改进型CGO普通取向硅钢，生产时可以省去常化工艺，同时可以省去二次冷轧后专门的一次再结晶退火过程，所以成本低，磁性高于第一代CGO钢，但低于高温加热的HiB钢；随后新日铁又开发了经低温加热制备的渗氮型取向硅钢，板坯加热温度从1380℃降至1150℃，显著降低能耗和加

热炉损耗，磁性稍低于高温加热HiB钢，制备难度大于前3种取向硅钢。

实际上，二次再结晶的顺利完成不仅仅是靠严格控制高温退火工艺，除了严格控制成分外，取向钢生产中的热轧、冷轧、一次再结晶退火中的组织、织构变化都很重要。北京科技大学材料科学基础教材中的多边化过程、退火温度与再结晶时间 t_{50} 的关系、亚晶聚合形核模型及过渡带组织、部分二次再结晶组织、完全二次再结晶组织和织构以及MnS粒子钉扎对晶粒尺寸影响的例题和习题等，都来自对硅钢的研究。早期通用电气（GE）公司、西屋电器公司、美国钢铁公司等都对Fe-3%Si取向硅钢的基础研究。例如，徐祖耀先生在纪念Cohon教授的文章^[3]中提到的Cohen教授的第一个中国弟子郭本基先生在西屋电器公司就与C. G. Dunn一起从事过硅钢研究^[4]，我校金相热处理系第一任主任章守华先生也曾任西屋电器工作过。胡郁先生在美国钢铁公司也研究过硅钢形变再结晶织构和微观组织。Lücke教授著名的CSL 27°<110>高迁移率模型也是针对取向硅钢得出的^[1]。

学业完成过程中取向硅钢知识储备与鞍钢取向硅钢研发平台上的实践

由于取向硅钢制备技术严格保密，收集具有较详细工艺参数的文献较难，笔者从德国亚琛工业大

学博士毕业后收集的 3 本该所 Lücke 教授指导的取向硅钢博士论文, 对笔者理解取向钢组织演变和组织控制的本质有很大帮助。第一本论文是 A. Böttcher 1990 年完成的博士论文^[5], 基于德国 Thyssen 公司 CGO 钢的生产。第二本是 L. Seidel 1990 年完成的博士论文^[6], 研究高磁感取向硅钢。第三本是 C. Därmann 1983 年完成的对 CGO 和 HiB 钢, 特别是对硅钢单晶轧制研究的博士论文^[7]。近 20 年德国马普钢铁所 D. Raabe 教授及 S. Zäfferer 教授指导的一系列对取向钢的研究都是以 Thyssen 公司生产的取向钢产品为背景。

在与鞍钢的合作研究中, 笔者从事过上述全部 4 种取向硅钢的研究。现在思考, 教材上介绍的还是 1980 年出版教材时最早一代 CGO 钢的二次再结晶内容, 该数据完成时间是上世纪 50 年代, 也应该更新了。笔者在参编李静媛教授主编的《塑性成形理论基础》教材中用比较简单的篇幅介绍了目前低温渗氮取向硅钢的组织、织构及抑制剂特征^[8]。4 种取向硅钢由于成分设计、工艺参数的不同, 特别是一次轧法与两次轧法的差异, 导致一次再结晶组织、平均晶粒尺寸、二次再结晶开始温度、最终高温退火组织都存在差异, 磁性能自然不同。一次轧法与两次轧法最显著的差异是传统两次轧法的一次

再结晶织构中存在高斯织构, 而一次轧法的一次再结晶组织中只有不到 1% 的高斯晶粒, 自然无法观察高斯织构。第二个明显差异是二次再结晶温度不同: 第一代 CGO 钢的二次再结晶温度约为 925 °C, 高温 HiB 钢约为 975 °C, 含铜 CGO 钢约为 1010 °C, 而低温渗氮钢约 1050 °C。这种差异造成二次再结晶后的晶粒尺寸、晶粒取向度、晶界平滑度和岛晶数目都存在差异。

取向硅钢教学科研并举的硕果对一流课程申报的支撑及对开发新实验的推动

由于笔者长时间从事取向硅钢的研究, 在申报材料科学基础国家级一流课程的 45 min 授课录制时, 笔者选取的内容为晶粒长大过程, 其中重点就是晶粒的异常长大。课程不仅介绍了课本上 Turnbull 教授的经典二次再结晶数据 (见图 2(a)), 还介绍了宝钢宣传片“世界上最薄的取向硅钢 0.18 mm” (见图 2(b)), 另外也介绍了笔者检测的鞍钢 0.20 mm 薄规格渗氮型取向钢二次再结晶时的组织、织构和抑制剂的数据 (见图 2(c)), 最后在总结中鼓励学生肩负起材料报国的重任 (见图 2(d))。此外, 在介绍二次再结晶的三种诱因 (晶粒正常长大受阻的三个因素) 时, 即抑制剂抑制、表面效应抑制、再结晶织构抑制, 所用的数据均为笔者与鞍钢合作时

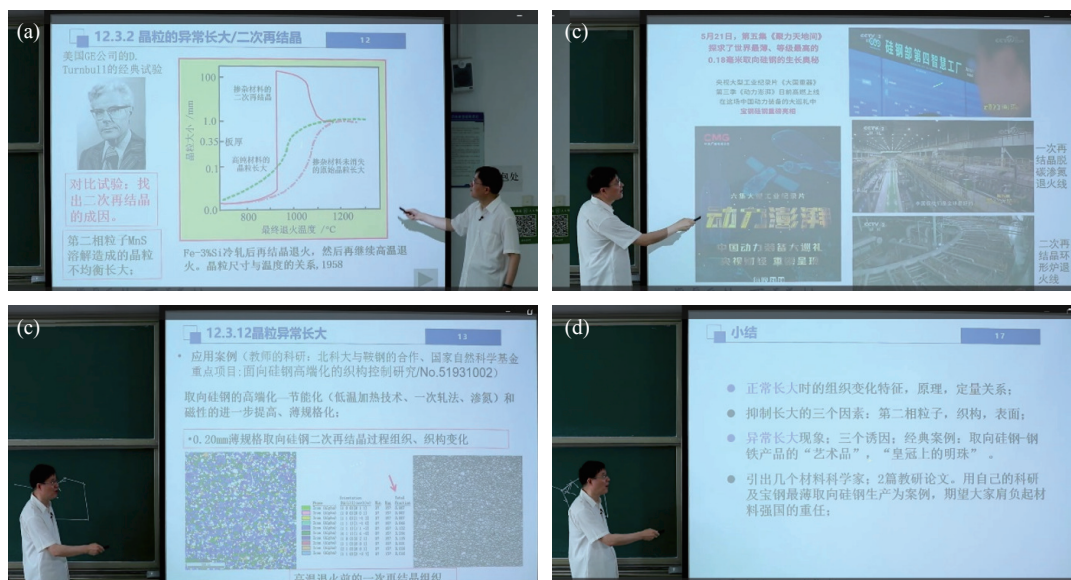


图2 申报材料科学基础国家级一流课程时选取取向硅钢的二次再结晶为主要课堂录制内容的部分截图: (a) Turnbull 教授的经典二次再结晶数据; (b) 宝钢宣传片“世界上最薄的取向硅钢 0.18 mm”; (c) 鞍钢 0.20 mm 薄规格渗氮型取向钢二次再结晶分析; (d) 鼓励学生肩负起材料报国的重任

所做的数据。因此，与鞍钢的科研合作作为理论知识的工业应用、将新成果融入教学及提升教学效果起到很大的促进作用。

图3(a)所示为2008年鞍钢技术人员送给笔者的一个用取向硅钢产品制作的小纪念品。2008年也是宝钢宣布生产出第一卷取向硅钢的时间。遗憾的是，鞍钢生产的是CGO两次轧法的普通取向钢，而宝钢生产的既有CGO钢，也有一次轧法高磁取向硅钢。生产工艺的差异伴随着设备上的差异，重新改造要花费巨额经费和时间，这一直是笔者和鞍钢的一个遗憾。随后几年，低温渗氮钢又逐渐在宝武、首钢开发成功。图3(b)为2022年首钢博士生利用特殊的技术在晶粒异常长大的高磁取向硅钢板上通过晶粒正常长大显示的“师恩泽厚”字样，作为教师节礼物送给笔者。图3(c)为放大的“恩”字照片，可见该字内为晶粒正常长大形成的组织，晶粒尺寸大约1 mm，周围是异常长大的晶粒。图3(a)~3(b)两图对比显示时代变化带来的质量提升。取向钢成品板无疑是最合适的课堂展示教具之一，这里凝聚着基本原理、科研应用、中国钢铁企业技术人员刻苦钻研的精神，以及企业发展史等一系列的内涵。笔者授课时，常将它们作为教具展示给学生，让学生亲手触摸这些工业产品，以便加深对二次再结晶理论的理解。



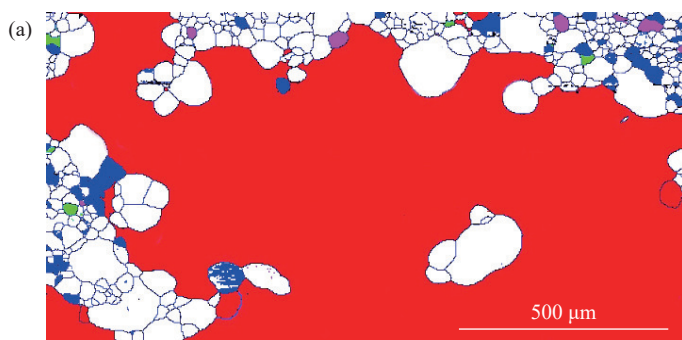
图3 (a) 鞍钢2008年生产的CGO取向钢; (b,c) 首钢博士生2022年在异常长大的取向硅钢板上通过特殊技术实现正常长大形成的“师恩泽厚”字样及其放大图片

笔者也曾设计了取向硅钢的二次再结晶实验。北京科技大学早期的材料科学基础实验指导书中曾设置了“用浸蚀坑法分析组织”的实验，早期的金相实验使用的是光学显微镜，只能观察组织，难以确定晶粒的取向（或位向），而浸蚀坑法是简易的确定晶粒取向的方法，因此老一辈教师设计了这项实

验，但因学时数的限制，在笔者教学阶段并未上过这个实验课。随着电子背散射衍射（EBSD）技术的普及，取向数据可快速检测，并进一步完成取向成像（见图4(a)），同时拓展了不同的二次再结晶分数（图4(b)），EBSD技术同时可检测出异常长大的晶粒是否是高斯取向晶粒。通过EBSD取向成像得到周围的小晶粒取向，用极图表示各种晶粒取向，训练极射投影表示晶体取向的方法。实际生产中都是在升温的变温条件下完成二次再结晶，这种情况下回归动力学方程较为复杂。该实验可以通过等温退火制备出的一系列不同二次再结晶百分量的样品^[9]，回归出J-M-A方程中的长大指数 n 和截距 B 值。EBSD技术与浸蚀坑法进行对比，作为拓展内容，或放在课程网站上。与此同时采用英文编写实验指导书，为国际班学生所准备，见图4(c)。

鞍钢的发展历程对教师及课程教学的促进作用

鞍钢被称为共和国钢铁工业的长子，作为“长子”，鞍钢人具有强烈的奉献和担当精神，为许多后续新建的钢铁企业进行了无私的人力、物力支持，这些数字都记录在鞍钢博物馆内的各个展板上。鞍钢培养出了一个又一个的全国劳模，如孟泰、王崇伦、郭明义等等。笔者在鞍钢集团钢铁研究院硅钢研究所罗理所长的带领下参观鞍钢博物馆，见图5。听他细致讲解鞍钢发展的每一个阶段，心灵受到很大的触动，特别是“艰苦奋斗、爱厂如家、为国分忧、无私奉献”的孟泰精神，见图5(a)。鞍钢是雷锋早期工作、形成“雷锋精神”的地方，虽然后来雷锋参军了，在部队得到进一步的锻炼，品德得到进一步的升华，但鞍钢的优良传统熏陶了雷锋。在鞍钢期间，雷锋3次被评为先进生产者，5次被评为标兵，18次被评为红旗手，见图5(b)。笔者从小就多次看过有关雷锋的小人书、电影，多次被感动；想不到在后来的职业生涯中能同样在雷锋工作过的鞍钢一同参加鞍钢的生产建设，为鞍钢出把力。雷锋“做永不生锈的螺丝钉”，“干一行爱一行，爱一行钻一行”的精神一直影响着笔者。笔者将这种感受多次介绍给课程学生，分享给系里教师，以及中学的同学们。仔细想想与鞍钢的科研合作，除了连续4次



An abnormally grown grain with Goss orientation (red color)
Fig.4 Orientation map of abnormally grown Goss grain in Fe-3%Si

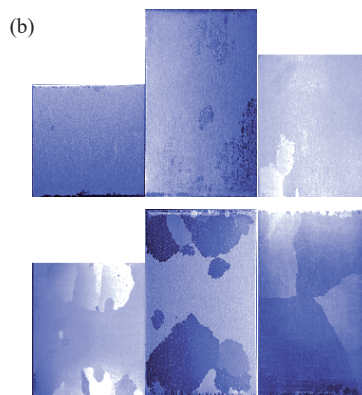


Fig.3 Macro structure showing secondary recrystallization in process

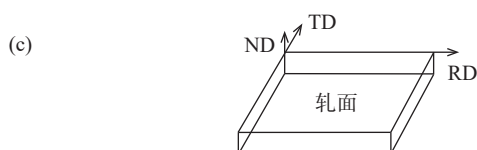


Fig.1 Rolling geometry of grain-oriented silicon steel sheet
(ND: normal direction; RD: rolling direction; TD: transversal direction)

BCC metals show their characteristic etch-pit shapes in HF solution as shown in Fig.2.

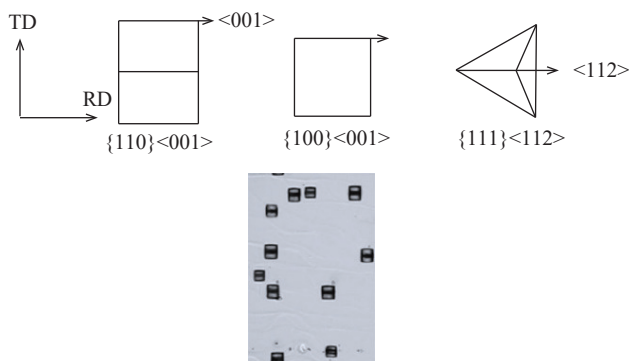


Fig.2 Morphologies of etch-pits for orientation determination in silicon steel sheet

图4 课程改革设计的取向硅钢组织观察实验: (a) 部分二次再结晶时的 EBSD 取向成像图, 红色为高斯取向晶粒; (b) 不同二次再结晶程度的低倍照片; (c) 用英文撰写的实验指导书



图5 参观鞍钢博物馆照片: (a) 在孟泰精神展板下的留影; (b) 雷锋事迹展板

来自鞍钢的科研项目支持外, 还通过 3 个国家自然科学基金的支持, 为鞍钢的电工钢生产的基本规律

Observation of abnormally grown grains and determination of their orientations

I. The purposes of experiment

1. Observation of abnormally grown grains during secondary recrystallization of grain-oriented silicon steels;
2. Obtaining grain orientations by etch-pit shapes and electron back scatter diffraction technique;

II. Experimental Materials

1. Grain-oriented silicon steel Fe-3%Si;
2. Optical microscope; Scanning electron microscope equipped with EBSD system.

III. Experimental procedures

1. Get a set of samples extracted at different temperatures during secondary recrystallization and observe the macrostructures by bare eyes, analyzing the macrostructure features.
2. Shearing a small portion of each sample maintaining the sample along the rolling direction of sheets; then etching the samples in HF for some times until etch-pits occur. Observe the etch-pits of different grains under optical microscope and compare them with standard maps so as to determine their orientations.
3. Teacher shows an EBSD results to present orientation maps and compare them with etch-pits. Discuss the two methods for orientation determination.

V. The Questions

1. The reason of formation of etch-pit when etching the samples?
2. How to determine the orientation of grains by observing etch-pit shapes? What is plane texture?
3. How is a Goss grain abnormally grown?

VI. The principle of experiment

Fe-3%Si grain-oriented silicon steel is produced by making use of secondary recrystallization where Goss oriented grains can grow abnormally due to Zener pinning. Finally very sharp Goss texture {110} <001> is developed. Because <001> crystallographic direction is the easiest magnetization direction, the grain-oriented silicon steel demonstrates perfect magnetic properties.

In a pure metal or uniform solid solution, reflection of etched surface is frequently used to determine grain orientation, but the etch-pit shapes can also reflect the orientation of grains. The effect of etchant at some point (the presence of a large number of dislocations) is particularly significant, since etching effect is defect sensitive, the erosion rate in dislocation-containing sites is much faster than other planes, then pits can form at {hkl} plane. And by referring the shape of etch-pits orientation can be determined.

In this experimental, we observe the etch-pits at rolling plane (Figure 1) to determine the orientation of grains.

性研究、产品缺陷检测分析、新技术的开发以及人才培养, 包括博士生和工程硕士的培养均做出了贡献。

鞍山的东山宾馆同样凝聚着厚厚的鞍钢发展历程, 东山宾馆建筑群是我国第一批国家工业遗产。东山宾馆的多个楼宇中都展示着鞍钢发展的历史事件, 见图 6(a)。许多国家领导人, 如朱德委员长、董必武主席、李鹏总理、朱镕基总理等, 来鞍钢视察时都住在这里, 见图 6。笔者早期的科研十分忙碌, 来不及细细品味这些图片, 随着临近退休, 每



图6 被列为第一批国家工业遗产的鞍山东山宾馆内介绍宾馆历史的图片: (a) 4号楼墙壁上的图片整体; (b) 鞍钢劳模及毛主席提出的鞍钢还要出人才的要求; (c) 朱镕基总理与李鹏总理与东山宾馆工作人员的合影; (d) 5号楼前朱德委员长和董必武副主席等领导的合影

次来鞍钢交流,都驻足在这些图片前,将这里的重大事件与儿时的记忆联想起来,分享给学生、同事、发小、同学。最自豪的是自己也能有机会参与鞍钢建设,与这些历史事件关联起来。

笔者在阅读北京科技大学金相热处理系的历史时,看到第一届(54届)金相专业学生由于学校的教室楼没有盖好,转而在鞍钢进行实习的记录,这又一次拉近了北京钢铁学院金相专业与鞍钢的距离。从葛庭燧传^[10]中见到的一张葛庭燧先生在沈阳金属所工作时与鞍钢技术人员交流的照片,很是感慨,希望能在鞍钢博物馆找到相应的痕迹,遗憾的是没有找到相关信息,同样,笔者与鞍钢硅钢人交流场景也进行了记录,作为美好时光的留念,见图7。查阅文献得知,20世纪50、60年代我国两弹一星功勋陈能宽院士以及我校56届金相毕业生周邦新院士都发表过取向硅钢相关的基础研究论文^[11-14],特别是周邦新院士的一篇文章还发表在鞍钢技术期刊上^[13]。



图7 (a) 一九七五年葛庭燧(右二)与鞍钢工人一起公关^[10]; (b) 笔者与鞍钢技术人员交流

图8(a)为同研究室的毛卫民教授与笔者基于长期对电工钢的研究所编著的《电工钢的材料学原理》一书的封面^[15]。它的出版既是与鞍钢硅钢合作的成果,也是对课程教学的促进;反之,扎实的材料学基础也促进了对电工钢系统研究的深入。算是对中国的电工钢技术发展尽了微薄之力。虽然取向硅钢制备技术严格保密,在中国金属学会电工钢分会陈卓秘书长主持下,电工钢学会的技术交流很是丰富,笔者作为电工钢学会理事,积极参加学术交流活动,也从各企业学到不少电工钢相关理论知识及生产情况,与很多行业内人士结下友谊。最后想

提及的是,笔者也曾受到学会授予的电工钢生产先进个人的表彰,见图8(b),它是笔者参与我国电工钢生产技术活动的见证。

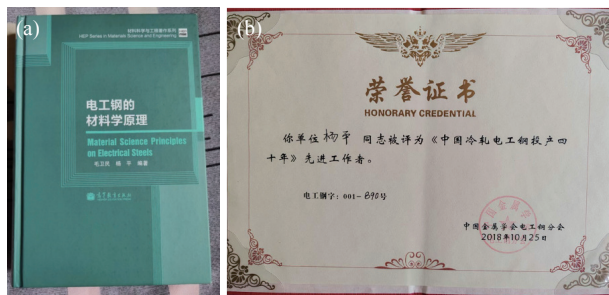


图8 (a) 北京科技大学毛卫民教授与笔者共同编著的电工钢书籍封面^[15]; (b) 电工钢学会表彰证书

结束语

1) 与鞍钢的科研合作和材料科学基础课程教学最直接的联系是取向硅钢二次再结晶原理及应用。15年的合作科研清楚展示了4种取向硅钢的发展历程,以及教材内容更新的需要。任课教师申报国家一流课程的课程录制也是选取二次再结晶内容,它很好地展示了教师的教学与科研的紧密结合。此外,取向硅钢成品板是非常好的教具,还适合作为一项新的二次再结晶实验内容。

2) 通过参观鞍钢博物馆及鞍钢技术人员细致地介绍,更深刻体会了鞍钢宪法、鞍钢的劳模精神、鞍钢被称为共和国钢铁工业的长子对我国钢铁工业发展的贡献;雷锋事迹及雷锋精神,对授课教师科研人生成长的促进作用。结合现实中的长期合作相处,也亲身体会了鞍钢人吃苦耐劳、朴实真诚的精神。通过对多次住宿的第一批国家工业遗产—东山宾馆建筑群墙壁上的宾馆介绍,了解、感受鞍钢的建设过程与国家发展同频共振。

3) 通过北京科技大学金相热处理专业第一届(54届)学生来鞍钢实习的历史事件,结合笔者15年在鞍钢支持下的硅钢科研,拉近了高校与我国重大钢铁企业历史上的联系,寻找鞍钢与北京科技大学的情结。从某种意义上来说,笔者也是鞍钢的建设者。

参考文献

- [1] 杨平. 特殊钢中的“工艺品”——取向硅钢: 材料科学基础知识和经典人物. *金属世界*, 2015(1): 6
- [2] May J E, Turnbull D. Secondary recrystallization in silicon iron. *Trans Metall Soc AIME*, 1958(212): 769
- [3] 徐祖耀. 悼念 Morris Cohen 教授. *热处理*, 2005, 20(3): 2
- [4] Koh P K, Dunn C G. Cold-rolled textures of silicon-iron crystals. *JOM*, 1955, 7: 401
- [5] Böttcher A. *Formation of Goss Texture in RGO-electrical Steel Sheet (Fe-3%Si) and the Condition of Their Optimization* [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen University, 1990
(Böttcher A. *Zur Bildung der Goss-Textur in RGO-Elektroblech (Fe-3%Si) und Voraussetzung zu ihrer Optimierung* [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen University, 1990)
- [6] Seidel L. *Influence of Texture and Microstructure Inhomogeneities on the Formation of Goss Texture in High Permeable Fe-3%Si* [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen University, 1990
(Seidel L. *Einfluß der Textur- und Mikrostrukturinhomogenitäten auf die Entstehung von Goss in hochpermeablen Fe-3%Si* [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen University, 1990)
- [7] Därmann C. *Development of Texture and Microstructure during Deformation and Recrystallization of Iron-3% Silicon* [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen University, 1983
(Därmann C. *Entwicklung der Textur und Mikrostruktur bei der Verformung und Rekristallisation von Eisen-3% Silizium* [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen University, 1983)
- [8] 李静媛. 材料成形理论基础. 北京: 冶金工业出版社, 2022
- [9] 文倩, 李洋, 姜伟宁, 等. 等温退火温度对薄规格取向硅钢二次再结晶行为的影响. *电工钢*, 2023, 5(6): 1
- [10] 刘深. 葛庭燧传. 北京: 科学出版社, 2010
- [11] 陈能宽, 刘长禄. 矽钢片的加工织构及再结晶织构. *金属学报*, 1958, 3(1): 30
- [12] 王维敏, 周邦新, 陈能宽. 铁硅合金 (110)[001] 单晶体的形变和再结晶. *物理学报*, 1960, 16(5): 263
- [13] 周邦新. 铁硅合金中 (110)[001] 和 (100)[001] 织构的形成. *鞍钢技术*, 1964(3): 1
- [14] 周邦新. 铁硅单晶体的冷轧及再结晶织构. *金属学报*, 1964, 7(4): 423
- [15] 毛卫民, 杨平. *电工钢的材料学原理*. 北京: 高等教育出版社, 2013

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51931002)。

作者简介: 杨平(1959—), 博士, 北京科技大学材料科学与工程学院终身教授, 博士生导师, 《金属世界》杂志编委、特邀撰稿人。主要研究方向为金属材料形变、再结晶、相变过程的晶体学行为及织构控制技术; 背散射电子衍射(EBSD)技术的应用; 电工钢、高锰钢、钛合金等材料的组织结构表征及性能改善。负责国家自然科学基金6项, 参加国家863计划3项, 国家973计划项目1项, 配套项目1项, 国家自然科学基金重点项目1项。负责企业横向课题10余项等。在国内外刊物上发表论文460余篇, 获发明专利4项, 获省部级一等奖、三等奖各1项, 编著《电子背散射衍射技术及其应用》《材料科学名人典故与经典文献》《工程材料结构原理》, 参编《材料科学基础》《材料织构分析原理与检测技术》《电工钢的材料学原理》《材料科学与工程基础》《金相实验基础》等。