

# 《材料科学基础》课程的基本概念与 相关名人典故

## ——再结晶形核机制、立方织构及胡郁先生

### Basic Concepts and Their Related Materials Scientists in the Course of Fundamentals of Materials Science

#### ——Mechanism of Recrystallization Nucleation, Cube Texture and Mr Hsun Hu

供稿|杨平 / YANG Ping

#### 内容导读

高校专业课讲授的概念与历史上建立或研究相关概念的著名人物典故之间的融合能否有效促进高素质人才的培养是国家教育质量工程的不断深入对教师提出的一个课题。文章以《材料科学基础》课程再结晶形核和织构两个概念、相关的材料学大师胡郁先生及作者的教学、科研经历为主要线索,讨论分析了相关的教学经验、对学生以及教师的教育作用。认为两者的结合不但使学生更清晰了解专业概念及知识点的来源,也可以比较生动地促使学生了解相关材料名人的为人,历史环境;同时对任课教师的科学研究与教学有机结合起到深刻的触动作用,提高了教师将科研融化到教学中的水平。作者谨以此文表示对胡郁先生的敬意。

随着国家教育质量工程的不断深入,高校教师都在教学的第一线努力地探索各种有效培养高素质大学生的途径。我校从《金属学》课程演变过来的《材料科学基础》课程,经过几代教师的不断努力,在2006年成为国家级精品课程,相关教师也成为材料学国家级优秀教师团队的主要成员。为了使这门在国内有重要特色及影响的专业基础课程不断优化,我们任课教师肩负着探索新的教学方法、培养与我校材料专

业优势相适应的创新人材的重任。如何使北科大的《材料科学基础》课程更有特色,是我们任课教师长期思考,也在不断探索及尝试的内容。为此,我们于2003年开发了与授课讲台相平行的自学教学资源(称第二课堂)——材料专业学生自学平台<sup>[1-2]</sup>,该资源于2008年获北京市教学成果一等奖。该自学平台系统中一个重要组成部分就是将与《材料科学基础》课程中讲授的重要实验、定律、现象相关的材料名人的照片、资

料收集起来,在第一课堂,特别是第二课堂学习中用于从另一角度教育学生<sup>[3]</sup>。目前已收集了100余名相关人物的资料。其中少数材料名人在我们任课教师的科学研究中有过一些亲身的经历,思考起来对学生也会有一定的帮助,这里介绍如下。

#### 再结晶形核、立方织构及 两者间的关系

再结晶是《材料科学基础》课程中重要的一章,是金属材料

作者单位:北京科技大学,北京 100083

生产过程中重要的一个工艺环节,在这个环节中难以再加工的形变金属得到软化,同时组织、结构(包括织构)也得到有效的调整。再结晶由形核过程和长大过程组成,再结晶的形核过程涉及形核地点和形核机制,这是一些学生容易混淆的地方。两个主要的再结晶形核机制是:(1)应变诱发晶界迁移和(2)亚晶合并及亚晶长大;其中第二种机制涉及的亚晶旋转实现亚晶合并的模型是著名再结晶及织构专家,美籍华人胡郇(William Hsun Hu, 见图 1a)先生于上世纪 50~60 年代基于透射电镜下的原位观察而独树一帜提出的<sup>[4-5]</sup>,它明显区别于其它亚晶长大模型;而第一种机制应变诱发晶界迁移又是胡郇的导师美国 Notre Dame 大学的 P. A. Beck 教授(见图 1b)首先提出的<sup>[6]</sup>。胡郇以透射电镜下精细的组织、取向分析与宏观织构分析有效结合为研究特色开展再结晶研究。晶体学家 H.J.Bunge<sup>[7]</sup>评价到,正是他这种将显微组织与织构紧密结合的思想促进了取向成像显微术(Orientation Imaging Microscopy)的到来,从 90 年代以后基于电子背散射衍射(Electron Back Scatter Diffraction, 简称 EBSD)取向成像技术成为非常有效的同时揭示微区组织、相结构及取向关系的手段。同时,胡郇本人也倡导并促进了国际期刊'Microstructure and Texture'的诞生。

现在由与取向相关联的再结晶形核过程进入到立方织构概念。胡郇先生的主要贡献是将再结晶

形核与再结晶后的立方织构的关系(当然也包括长大)有机地联系起来。再结晶过程虽不像形变过程那样在外力的作用下发生,但也会象形变过程那样出现织构,即所谓的再结晶织构。在《材料科学基础》课程中织构与倒易点阵的概念是学生最难理解的两个概念,学生不理解和“惧怕”这两个概念的原因主要是掌握该概念需要对 3 维空间内非常抽象的晶体取向有很好的理解;另一方面,表达织构的 3 维空间内晶面、晶向的所谓“极射”2 维赤道投影法也非常抽象,因而引起学生“恐惧”。在不同类型的再结晶织构中,最重要、最典型、最容易看懂的就是立方织构,它用一组面及一组方向表示  $\{100\}\langle 001\rangle$ ;在一定的工艺条件下,多晶体中大多数晶粒的晶体学坐标轴

( $[100]-[010]-[001]$ )与轧板宏观坐标轴(ND 法向 -RD 轧向 -TD 侧向)重合,见图 2。我们在教学中感觉到,学生接受再结晶时的组织变化知识比较容易,而接受再结晶过程时取向变化乃至形成再结晶织构的知识却很难;但请同学们仔细思考,没有取向变化信息的组织变化规律”是否可能不那么可靠,至少是不全面的?学生学习时,大概很少将再结晶形核机制与再结晶完成后形成的立方织构联系起来。其实两者之间的关系就像“一个种子和一棵树”,立方织构产生的原因之一是再结晶形核时形成了立方取向的“种子”(这本质就是择优形核理论),以及这个立方取向的“种子”在与周围形变组织存在有利取向关系(即著名的  $40^\circ\langle 111\rangle$  关系,最经典的实验是作者的第二导师



图1(a) 胡郇先生照片

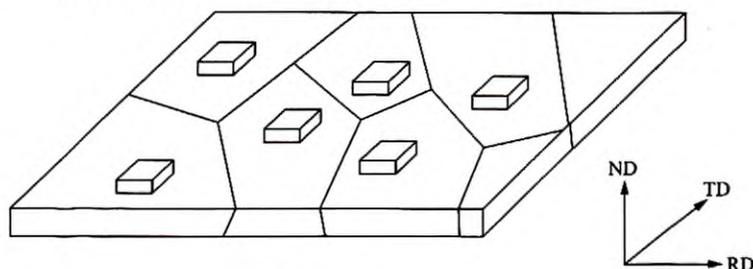
(b) P. A. Beck照片<sup>[9]</sup>

图2 立方织构示意图

K.Lücke 1956年完成并发表的<sup>[6]</sup> ) 下成长完成的, 这就是择优长大理论。

然而, 关于金属中立方织物的形成机制却争论了几十年, 即是“择优形核”作用下导致的立方织物还是“择优长大”作用下导致的立方织物。其中择优长大理论便是由胡郇的博士生导师 P.A. Beck 提出的, 而择优形核理论是柏格斯矢量提出者 J M Burgers 的兄弟, 晶体学家 W. G. Burgers 提出。自然, 胡郇先生也是择优长大的拥护者。胡郇先生不但对 FCC 金属中的立方始织有深入的研究, 对 BCC 金属(如钢)中的立方织物也有深入的研究, 在美国钢铁公司的贝茵(E.C.Bain)实验室工作的胡郇, 为了搞清立方织物的成因, 使用立方取向单晶, 进行形变、再结晶退火, 从而清晰地跟踪了立方取向晶粒的形变再结晶变化过程, 并用相关结果分析多晶中立方织物的成因, 这种研究方式也是我们学生应当引起注意的。胡郇先生因对立方织物广泛而深入的研究而被称为“立方织物先生”<sup>[7]</sup>。立方织物之所以这么重要, 不但因其重要的理论价值, 还有其非常重要的应用价值。在 FCC 金属中, 如铝, 立方织物用于高压电解电容器铝箔的内在质量控制, 因其特殊的立方腐蚀坑带来的高电容值而有重要用途; 同样是 FCC 的镍基带中的立方织物用于促进超导体的外延生长。BCC 金属中的立方织物控制技术不如 FCC 成熟, 在电工钢中如果得到强立方织物, 则成为双取向硅钢, 即轧板表面上存在

两个相互垂直的高磁感、高磁导率、低铁损的 <100> 方向。胡郇先生在研究 BCC 金属(即钢)后, 又研究六方金属钛。主要贡献是研究了层错能的变化使铜型轧制织物变为黄铜型轧制织物, 其机制是由全位错到不全位错的滑移所致, 有时称为胡氏模型 [7]。胡郇对织物的基础研究很好地应用在电工钢及深冲钢板上。

### 我的教学、科研与胡郇先生

在从事《材料科学基础》课程(以前称《金属学》)教学及科研的二十年中, 亲身经历了再结晶形核机制、立方织物两个基本概念或现象的认识、掌握、应用过程; 回忆起来又与胡郇先生, 一个对我国材料科学研究有重要贡献的美籍华人, 有千丝万缕的联系, 借此机会重温一下。由于与胡郇先生不是同一时代的, 更谈不上有资格对其科学生涯进行评价, 这里仅从接触过他及他身边的人, 以授课教师的角度, 帮助学生了解他, 从而更扎实地掌握相关概念; 这是我们在国家精品课程建设中, 收集一系列与课程相关的材料大师(名人典故)并介绍给学生的过程之一, 也希望对材料专业学生有一定的促进作用。

应该说在学生时代上《金属学》课时已朦胧地听说过胡郇及再结晶亚晶合并机制, 到了硕士毕业后留校助教时、甚至作为讲师讲授“再结晶”一章时, 也是机械地将这两个现象“转教”给同学。真正有亲身体验的则是在

1993年10月在德国克劳斯塔尔(Clausthal)参加第10届国际材料织构会议见到了胡郇, 对其有更好印象则是听说他全力支持第11届国际织构会议1996年在中国召开, 听说当时的国际学术委员会以5:4的投票勉强通过(又有听说作为学术委员会委员的我的两个导师竟都投了韩国的赞成票)。遗憾的是, 1995年在德国哥廷根(Göttingen)大学参加德国材料学会年会时, 得知胡郇先生于1995年2月1日去世的不幸消息, 当时在会上全体与会者集体起立向胡郇先生默哀, 向这位对金属中的织构及再结晶理论有重要贡献的知名学者致意。随后我依然通过当时还算是先进的电子背散射衍射(EBSD)技术研究铝合金中的立方织物形成规律, 同时也像胡郇先生那样坐在透射电镜旁, 测定及寻找铝合金中立方取向亚晶的形貌特征及取向。回国后便以形变、再结晶、相变及织构作为研究方向(这竟然也是晶体学家兼织构理论家 H J Bunge 总结出的胡郇先生的研究方向<sup>[7]</sup>)。20多年在再结晶问题的研究中, 更深刻体会了金属的形核机制、立方织物以及其它织物的形成规律。表面上, 从1995年到回国的头几年, 虽然再结晶机制及织物的研究不断深入, 但对胡郇先生的怀念似乎在淡化。直到2008年到美国钢城匹兹堡(也是胡郇先生工作的大学), 意外见到大学的同学同时又是胡郇先生学生的华明建博士, 才重新燃起进一步了解胡郇先生的愿望。那时正是《材料科学基础》国家精品课程建设



图3 胡郇先生的毕业证书



时,收集、整理与《材料科学基础》课程相关的名人典故的高峰时期。那时意外得到了胡郇先生在1944年于唐山矿业学院的大学毕业证书,并有校长茅以升的签字,见图3。更巧的是,在匹兹堡城的卡涅基梅隆(Carnegie-Mellon)大学的校园里也恰好见到在该校获得博士学位的茅以升的雕像及温家宝总理的题词,见图4。后来经老同学华明建博士的介绍与胡郇先生的夫人Diana及儿子(胡京生Mason Hu)建立了联系并得到一些有关胡郇先生的珍贵照片,见图5,应是胡郇先生1981年来中国讲学时所照。胡郇先生去世时的纪念文章是著名的晶体学家及织构专家H.J.Bunge完成的,见文献[7]。Bunge先生是另一位对中国十分友好的材料织构大师,1996年决定在中国还是韩国开织构会议投票时的5张赞成票中也有他一票。



图4 卡涅基梅隆(Carnegie-Mellon)大学校园里茅以升的雕像及温家宝总理的题词

### 结语

现在每当在《材料科学基础》课堂上讲授再结晶和立方织构这两个基本概念时,许多往事会涌到眼前。我觉得胡郇先生的经历(扩大乃至材料名人典故)对学生的教育意义在于:1)能加深对两个概念的理解;2)了解经典文献的出处;3)了解材料大师的为人处世,为人友善。4)中国人不论在哪儿从事科学研究,都不会也不应忘记祖国,也总会以不同方式报效祖国;胡郇先生对中国材料领域做出过贡献,其夫人及儿

子对中国也十分友好,慷慨地提供给我胡郇的照片。我仍保留着与她们的电子信件。在希望激励学生从事材料科学研究的同时,对我这个既常年讲授再结晶的内容,又一直从事再结晶机制及织构分析的教师来讲,也激励着我见科研成果与教学融为一体,深入浅出地给学生讲懂相关知识。谨以此文纪念胡郇先生,也希望自己能以对织构更精确的控制表示对胡郇先生的敬意。



图5 胡郁先生1986年在中国讲学；胡郁先生一家照片

致谢：感谢北京市教学名师教学教改项目、国家精品课程建设项目、材料学国家级教学团队建设项目的支持。感谢美国匹兹堡大学华明建博士、胡郁先生的夫人 (Dianne Hu) 及儿子 (Mason Hu) 提供的照片。感谢毛卫民教授对本文撰写时提出的建议。

#### 参考文献

- [1] 杨平, 陈冷, 强文江. 《材料科学基础》课程学生自学平台的建立. 北京科技大学学报 (社科版), 2004, 增刊: 135-138, 150
- [2] 杨平, 李长荣, 陈冷; 材料科学与工程基础《学生自学平台》软件的应用分析. 《现代教育研究》, 2007, 74: 13-14, 16
- [3] 杨平. 课程的基础知识传授、名人典故、人才培养与课堂文化. 北京科技大学学报 (社科版), 2008, 增刊: 24, 156-159
- [4] H. Hu. Annealing of Silicon-Iron single crystals. Recovery and recrystallization of metals, ed. L. Himmel. New York: 1962: 311-362
- [5] H. Hu., Trans. Metall. Soc. A.I.M.E. 1962, 224: 75
- [6] P. A. Beck and P. R. Sperry. Strain induced grain boundary migration in high purity aluminum. J. Appl. Phys. 1950, 21: 150
- [7] H. J. Bunge. In memoriam William Hsun Hu. Textures and Microstructures, 1996: 26-27, 1-2
- [8] B. Liebmann, K. Lücke, G. Masing. Orientation dependency of the rate of growth during primary recrystallization of Al single crystals. Z. Metallkd. 1956, 47: 57-63
- [9] P. A. Beck. Some Recent Results on Magnetism in Alloys. Metall Trans. 1971, 2: 2015-2024

#### 作者简介

杨平,男,北京科技大学材料专业教授,博士生导师。在北京科技大学获学士和硕士学位;在德国亚琛工业大学获博士学位。2007年获北京市教学名师,2009年获宝钢优秀教师奖。2009年获北京市教学成果一等奖(为第一获奖者)。讲授材料专业“材料科学基础”课程(国家精品课程);编写过《材料科学基础》教材(高等教育出版社,2006年,国家十五规划教材)及《金相实验技术》(冶金出版社,2010年)等。

参加过“973”(超级钢)、“863”(铝箔、镁合金)项目多项,负责过国家自然科学基金多项(镁合金、高锰TRIP、TWIP钢)。获教育部一等奖、三等奖各一项。发表160余篇文章;编写过《超细晶

钢的组织细化理论和控制技术》(冶金出版社,2003年)、《材料中的织构及其检测技术》(冶金出版社,2008年)。独自编著了《背散射电子衍射技术及其应用》(冶金出版社,2007年)。曾任中国体视学学会材料科学分会秘书长,组织过全国第一、第二届EBSD学术会议及论文集,在《中国体视学及图像分析》期刊上组织出版《EBSD技术及其应用专刊》第一、第二辑。现任中国电子显微镜学会电子背散射专业委员会副主任。研究方向为晶体材料动、静态下的形变、再结晶、相变的晶体学行为及织构形成和控制技术;侧重基于SEM+EBSD的微织构分析技术。