

将前端科学研究与实际工程问题融入教学 ——晶体缺陷的教学实践与探索

陶 杰 沈一洲 项俊贤

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106)

摘 要 晶体缺陷是影响材料性能的关键因素,位错理论是提高材料强度的重要基础,已成为当今晶体塑性理论和材料强化理论的基石。由于其概念复杂、理论抽象,学生在学习过程中往往无法建立完整的晶体缺陷和位错理论的认知体系,缺乏用位错理论解决复杂材料工程问题的能力。本文从晶体变形与位错运动的基本规律出发,抓住位错交互作用的难点开展教学过程设计,引领学生演绎点、线、面、体缺陷之间的相互转化过程,并结合前端科学研究与实际工程问题,深化学生对晶体缺陷知识和理论的掌握;围绕课程思政、答疑思辨、过程考核等教学环节,系统总结了晶体缺陷与位错理论的课程教学实践与创新教学方法。

关键词 教学设计;晶体缺陷;位错理论;前端科学研究;实际工程问题

INTEGRATING THE ADVANCED SCIENTIFIC RESEARCH AND PRACTICAL ENGINEERING ISSUES INTO THE TEACHING —TEACHING PRACTICE AND EXPLORATION OF CRYSTAL DEFECTS

TAO Jie SHEN Yizhou XIANG Junxian

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106)

Abstract Crystal defects are key factors that affect material properties. Dislocation theory is an important basis for improving material strength and has emerged as the cornerstone in today's doctrine of crystal plasticity and material strengthening. Due to the complex concepts and abstract theories, students often struggle to establish a complete understanding of crystal defects and dislocation theory during the learning process, leading to a lack of ability to solve complicated material engineering problems by means of dislocation theory. This paper starts from the fundamental laws of crystal deformation and dislocation movement, focusing on the challenging aspects of dislocation interactions in the teaching process. It guides students in deducing the transformation processes between point, line, plane, and volume defects. Advanced scientific research and practical engineering issues are integrated into the teaching, deepening the students' understanding of the knowledge and theory of crystal defects. Finally, a systematic summary of the teaching practice and innovative teaching methods of crystal defect and dislocation theory was conducted around the ideology education, critical thinking and process assessment.

Key words instructional design; crystal defects; dislocation theory; advanced scientific research; practical engineering issues

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 国家一流课程建设项目,南京航空航天大学英才计划(2019JG0680K)的资助。

作者简介: 沈一洲,南京航空航天大学材料科学与技术学院教授;项俊贤,南京航空航天大学材料科学与技术学院博士生。

通信作者: 陶杰,南京航空航天大学材料科学与技术学院教授,taojie@nuaa.edu.cn。

引文格式: 陶杰,沈一洲,项俊贤. 将前端科学研究与实际工程问题融入教学——晶体缺陷的教学实践与探索[J]. 物理与工程, 2024, 34(4): 17-24.

Cite this article: TAO J, SHEN Y Z, XIANG J X. Integrating the advanced scientific research and practical engineering issues into the teaching—Teaching practice and exploration of crystal defects[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(4): 17-24. (in Chinese)

晶体缺陷是“材料科学基础”课程里的重要内容,其中位错和位错运动是材料学、固体力学、凝聚态物理中的重要研究课题,位错运动对晶体的很多性能和行为有着重要的影响。学生们在接触本课程之前已学习了“大学物理”和“物理化学”等课程,但即使这样,由于晶体缺陷概念多、位错理论抽象、涉及知识面广等特点,所以不管是教师教学还是学生学习难度都很大^[1-3]。另一方面,一些学生对专业认可度不高,学习目标性不强,且对于自身发展比较盲目,自我要求低,内驱力不足。还有一些学生沉迷于网络游戏,没有追求和理想,缺乏社会责任感,缺失正确价值观引导^[4-6]。为了提高该课程的教学质量,使学生在具体的学习过程中提升学习兴趣,必须在“材料科学基础”课程的教学形式、教学内容及教学手段等方面进行改革和创新,积极探索适应材料科学与工程、凝聚态物理等专业学生素质教育需要的教学方法,从而培养学生掌握固体材料研究的科学原理、科学方法和基本的创新方法,针对复杂材料工程问题建立合理的数学模型,能够运用数学、自然科学和工程科学的基本原理分别描述位错的运动、位错的交互作用、材料强化方法、金属材料的变形等微观机制。最终,使学生能够达到利用晶体缺陷理论和知识分析并解决实际问题的教学目标要求。本文选取晶体缺陷的几个重要知识点,展示我们所尝试的课堂教学实践以及教学改革探索,期望与国内同行们交流,不断提升晶体缺陷课堂教学效果。

1 位错的运动与晶体的变形

课堂上对位错理论的讲解通常都是先从简单立方开始,内容包括位错的分类、位错的运动方式、位错的运动规律和位错的弹性性质与交互作用等。位错运动的一般理论认为,刃型位错可以滑移也可以攀移,而螺型位错只能滑移不能攀移,混合型位错可以滑移,也可一面滑移(螺型分量滑移)一面攀移(刃型分量攀移)。由于滑移面是由柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 和位错线 ξ 决定的平面,即 $\xi \times \mathbf{b}$ 。因此刃型位错和混合型位错其滑移面是唯一的;而螺型位错的滑移面是不唯一的,几何学上包含位错线的任何平面都可以是滑移面。但实际晶体中由于派纳力的作用,位错总是优先在密排面的密排方向上运动。

在课堂上,带领学生们辨析螺型位错、刃型位错和混合型位错的运动特征,引导他(她)们认知位错运动的共性规律:不论何种位错,不论滑移、攀移或既滑移又攀移,位错线的运动方向 $\mathbf{v}$ 始终垂直于位错线 ξ 方向。在此基础上,继续引导学生们关注位错的运动方向 $\mathbf{v}$ 和晶体各部分的位移方向 $\mathbf{V}$ 之间有什么对应关系,从而比较自然地引出了 $\xi \times \mathbf{v}$ 规则。即当柏氏矢量为 $\mathbf{b}$ 的位错线 ξ 沿 $\mathbf{v}$ 方向运动时,以位错运动面为分界面, $\xi \times \mathbf{v}$ 所指向的那部分晶体必沿着 $\mathbf{b}$ 的方向运动,这个规则称为 $\xi \times \mathbf{v}$ 规则。

无论位错的滑移还是攀移,都会引起晶体的永久变形,即引起塑性变形。在学生们建立切应变和正应变概念的基础上,逐步讲解位错滑移运动引起切应变,而位错的攀移运动引起正应变。当一根位错线扫过整个滑移面时(也就是当位错从晶体的一端运动到另一端时),上下两部分晶体沿滑移面相对位移一个柏氏矢量 $|\mathbf{b}|$ 的距离。由于该柏氏矢量模值与晶体的晶格常数在一个量级上,因此位错一次滑移(指扫过整个滑移面)的结果所产生的宏观变形是非常微小的。只有成千上万次的位错滑移的累积效果,才能使晶体在宏观上产生明显的变形。正是由于位错的一次又一次滑移的微小量变过程,当累积到一定的程度达到晶体变形极限时,位错的微观运动将导致晶体的宏观变形发生质变——晶体材料断裂失效。

通过对位错运动的量变到晶体变形的质变的讲解,加深了学生们对这些概念的理解。在此基础上,课堂上又进一步解释了晶体宏观变形的量并不等同于位错运动的量,阐明了位错运动的距离与晶体运动的距离是两个不同的概念。

2 位错间的交互作用

在学习了位错应力场分布特点后,通过讲解位错应变能的计算求解过程以及位错运动的动力和阻力,使学生明白在实际晶体中存在的许多位错,由于它们之间的弹性应力场作用,必然影响到这些位错的运动和分布。在外加力场或电场的作用下,位错之间发生相对运动,直至发生位错的交割。在课堂上讲解这一部分内容的时候,可以把国际上最新研究的成果展示给大家,即在电场作用下也会驱动位错的运动。自 20 世纪 30 年代位

错理论被提出以来,普遍认为位错移动需要受到应力驱动,并且从理论和实验上对应力加载下的位错动力学进行了广泛和深入的研究。加拿大多伦多大学邹宇教授课题组与北京大学物理学院高鹏教授等课题组利用原位透射电镜在没有外力的情况下,直接观察到外加电场驱动位错移动,位错可以随着电场方向变化往复运动^[7]。让学生感受到,虽然位错理论从提出到完善已近百年,但随着科学研究的不断深入,位错理论还在不断发展中,而且对于新材料的开发还在发挥越来越重要的作用。课堂上通过最新科研成果的引入,对于激发学生们学习晶体缺陷知识的主动性,特别是克服学习位错间交割的畏难情绪发挥了积极的作用。

分析位错之间的交割,其基本依据是:(1)位错运动与晶体运动的关系,即 $\xi \times v$ 规则;(2)运动的相对性原理,即“运动的A位错切割静止的B位错”的效果=“运动的B位错切割静止的A位错”的效果。

由于这一部分内容相对较难,在讲解完书本内容后,通过课堂习题的深入剖析,帮助学生们提升实际解决问题的能力。

【范例1】在两个相互垂直的滑移面上各有一条刃型位错线AB和CD,如图1所示。设其中一条位错线AB在外加应力作用下发生如图1所示的运动,试问交割后两条位错线的形状有何变化?^[8]

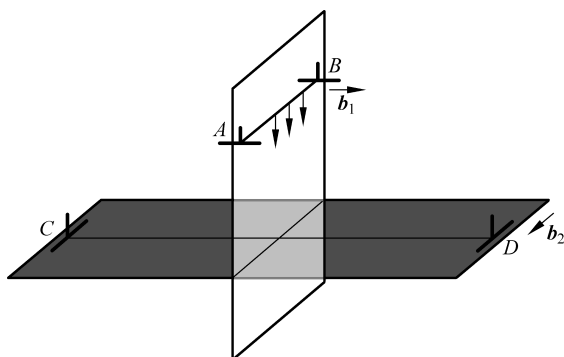


图1 刃型位错交割

解:首先,通过刃型位错AB的滑移面(方向朝上)和柏氏矢量方向(b_1 ,方向朝右),根据右手法则,可以确定其位错线 ξ 的方向由B指向A(见图2)

然后,根据 $\xi \times v$ 法则,可以判别AB右侧晶体沿 b_1 向右侧运动,即位错线CD被拉长 $|b_1|$ (见图3)

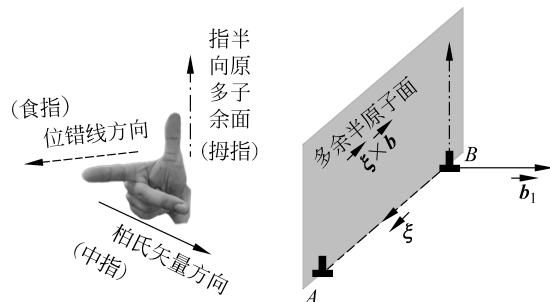


图2 根据柏氏矢量与半原子面关系判断AB位错线方向为由B指向A

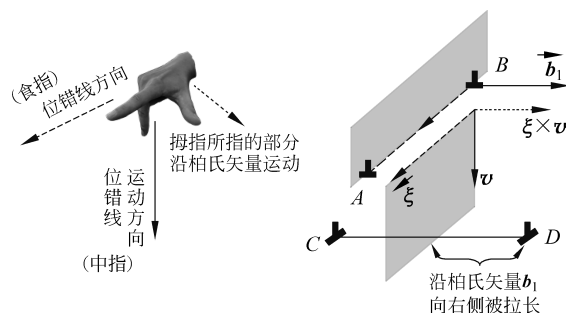


图3 根据 $\xi \times v$ 法则判断CD位错线被拉长

再来分析位错线CD的情况。已知刃型位错CD的半原子面朝上,柏氏矢量为 b_2 ,根据右手法则,可以判断其位错线 ξ 的方向是由D指向C(见图4)。

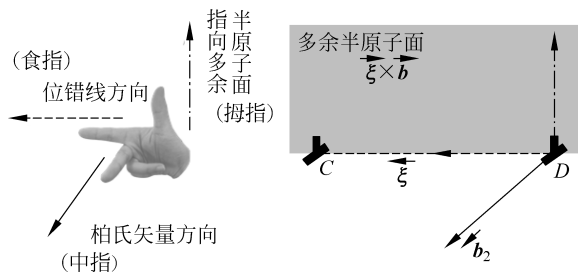


图4 根据柏氏矢量与半原子面关系判断CD位错线方向为由D指向C

因为位错AB的运动方向朝下,根据运动相对性原理,则位错CD的运动方向朝上。又根据 $\xi \times v$ 法则,位错CD后侧晶体沿 b_2 向前侧运动,即位错线AB被缩短 $|b_2|$ (见图5)。

3 点缺陷与线缺陷的相互转化与交互作用

空位、间隙原子或空位与间隙原子对都可由热激活而形成。这种缺陷受热的控制,它的浓度

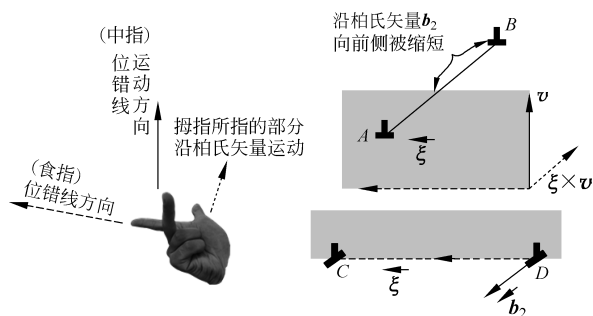


图5 根据 $\xi \times v$ 法则判断 AB 位错线被缩短

依赖于温度,随温度升高,其平衡态的浓度亦增高。当通过高温淬火将高温下的平衡空位浓度部分保留到室温,就获得了过饱和空位。也可以通过高能粒子(中子、粒子、高速电子等)轰击金属晶体,从而使点阵中的原子由于粒子轰击而离开原来位置,产生过饱和的空位或间隙原子。这些过饱和的空位或间隙原子在一定的条件下通过扩散,在密排面上偏聚,从而形成弗兰克不全位错。这一过程实现了点缺陷向线缺陷的完美转变。当课堂上讲解完汤普森四面体后,我们进一步演绎由弗兰克不全位错分解成层错四面体的过程。通过深入分析,让学生们知晓,晶体中经由高温淬火、辐照或形变引入的过饱和点缺陷,造成的空位沉积会引起疏松或孔洞等体缺陷,而由空位沉积成的弗兰克不全位错分解得到的层错四面体也是最典型的体缺陷之一^[9]。这样设计的教学环节使学生们真正理解了点缺陷、线缺陷、面缺陷和体缺陷的内涵以及相互转化的路径。

此外,我们在讲解位错交互作用时,还进一步分析了所产生的割阶和扭折对位错随后的运动会产生什么影响。通常,在外加力的作用下,实际晶体中的位错在各自的滑移面上运动,在晶体空间中两位错相遇即可能发生交互作用而在原位错线上产生割阶。在外力的持续作用下,较小尺寸的割阶随着原来位错的滑移而被拖拽,发生了攀移运动,在割阶运动的身后留下了一串的点缺陷。通过这样的讲解与剖析,让学生们认知点缺陷在一定的条件下可以生成线缺陷(甚至是体缺陷),线缺陷在一定的条件下发生交互作用也会产生点缺陷,对点缺陷与线缺陷相互转化的理解会促进学生们对晶体缺陷知识的掌握。

在教授了位错弹性性质和位错交互作用之后,就很自然地引出了溶质原子和位错之间的交

互作用。因为溶质原子都会引起点阵畸变,形成弹性应力场,因而这种应力场势必就会与其周围位错的应力场发生弹性交互作用,为降低系统的应变能,溶质原子偏聚到位错的周围,形成了柯氏气团。同理,由于化学交互作用的结果,溶质原子在密排面层错区局部偏聚,形成铃木气团。在学生们掌握了这两个气团形成的热力学条件后,通过低碳钢屈服现象的解释以及固溶强化机理的分析,进一步加深了学生们对这两个气团的物理本质和对位错运动强烈阻碍作用的理解。

4 缺陷对晶体材料物理和力学性能的影响

在晶体缺陷开讲的第一堂课上,就明确告知学生们这一部分内容的学习目标要求,随后设问提出为什么要学习晶体缺陷知识?因为晶体缺陷的分布与运动,对晶体材料的屈服强度、固体半导体材料的电阻率、金属材料的加工性、固体物质中的扩散等性能起着主要甚至是决定性的作用。因此,提醒学生们学习晶体缺陷的基础知识和基本理论,具有重要的理论意义和工程应用价值。

以工程用退火态金属材料为例,提高其屈服强度的途径通常有两条:一条是增大材料中的位错密度,另一条就是降低其位错密度,如图6(a)所示。前者是工业上常用强化方法的工作原理,图7示出了常用四大强化方法的强化机制,主要是通过阻碍位错运动,提升位错密度。后者虽然成本高昂,但近年来也逐渐被一些应用领域所青睐,例如(见图6(b))通过降低位错密度提升铝铜合金在高应变速率条件下的屈服强度^[10]。

然而,随着位错密度的增加,金属材料的强度、硬度提升,但物理性能如导电性和导热性会下降。实际上,晶体缺陷(包括点缺陷、位错、晶界和体缺陷等)对晶体材料的导电性、导磁性、导热性等都会产生较大的影响。以半导体为例,晶体缺陷会影响半导体的导电性、电阻率、载流子寿命和载流子迁移率等,导致半导体器件性能下降或失效。此外,晶体缺陷还会影响半导体器件的电磁场和光学特性,限制其在不同领域的应用。因此,在半导体器件制造过程中,需要尽可能地控制和减少晶体缺陷的浓度,以提高半导体器件的性能和可靠性。

因此,课堂讲授过程中,引导学生们积极思

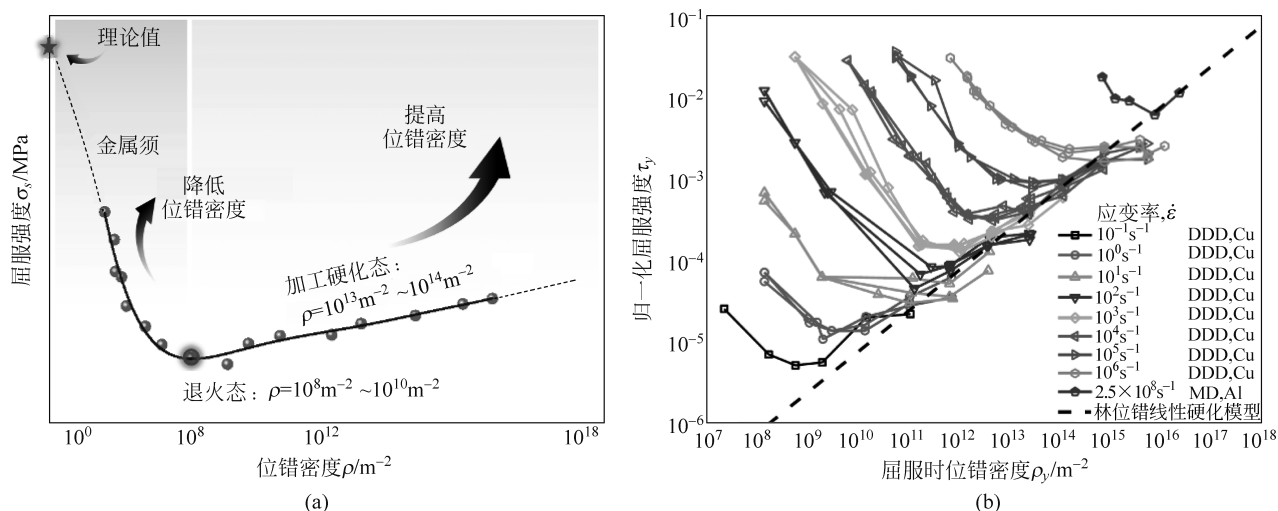


图6 金属屈服强度与位错密度的关系

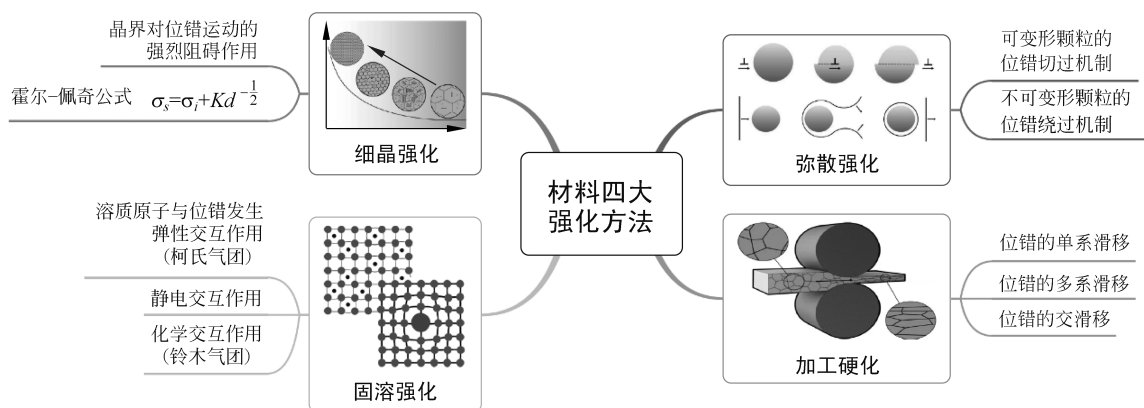
(a) 退火态金属提升屈服强度途径; (b) 铝铜合金不同应变率下的屈服强度与位错密度关系^[10]

图7 常见四大强化方法的主要强化机制

考,针对不同应用需求的工程材料,需要兼顾材料的综合性能,而不能一味追求提高某一种性能。如前面所述,要提高晶体材料的强度,往往就要牺牲其导电性,而实际工程应用就需要找到它们的平衡点。课堂上,通过例题(见范例2)进一步阐明这样的材料设计原则。

【范例2】中国高铁运营里程已超过4万公里,排名世界第一位。实际上,中国高铁的每一步跨越,都离不开大量的自主研发和技术创新。高速电气化铁道用铜锡合金接触线悬挂于铁路上方,通过与受电弓滑板接触摩擦直接向电力列车送电。该铜锡合金(Sn 0.15%~0.45%, Zr 0.01%~0.05%, Ni 0.02%~0.03%, Ti 0.005%~0.01%, 余为Cu)接触线是在张应力状态下工作,要求具有高强度和高导电率,且要控制其中的氧

含量(一般需低于0.003%)。日本和法国等国家主要采用连铸连轧(热轧)工艺生产该合金接触线,而国内某企业采用“上引提拉铸造+连续冷挤压+冷拉”工艺生产。

(1) 该铜锡合金其添加的合金元素总含量控制在 $\leq 0.2\% \sim 0.5\%$ 是出于何种考虑?

(2) 试分析该国内企业的生产工艺有哪些优点?为什么?

5 课程教学改革与探索

本课程摒弃了传统的先建设课程体系再判断学生培养情况的教学理念,以最终目标为起点,反向进行课程设计,开展教学活动。在晶体缺陷教学实践中,首先从课堂出发,调整教师定位,使教

师从知识的传授者、灌输者,转变成为学生学习的组织者、思维的引导者。在具体措施上,以课程内容改革与教学形式改革两条主线为抓手,改进教学方法,提升教学效果。

1) 探索课程思政新途径

为培养新时代有理想有担当、德才兼备的青年科技人才,教学团队始终坚持推进“课程思政”建设,不断挖掘课程知识点蕴含的思政元素,帮助学生塑造正确的价值观。教学团队精心挑选国内优秀材料科学家艰苦奋斗的科研事迹与重要的科研成果融入课堂教学活动中。

南京理工大学陈光院士团队经过十多年的持续攻关,打破了国际权威学者的预言,于2016年成功制备了TiAl合金单晶,将其使用温度大大提高,又同时获得了几乎所有力学性能(强度、塑性以及蠕变)的极大提升。研究发现,TiAl单晶在塑性变形过程中又可以形成纳米孪晶,其厚度大约在10nm之间。纳米孪晶的形核是由肖克莱分位错环促成的,会阻止位错的运动,但又无加工硬化效应。所以在极大提升材料强度的同时,又能提高塑性。进一步研究发现,该单晶在900℃时仍然能够维持与室温几乎相同的强度,同时塑性提高到了8.1%^[11]。将中国科学家取得的最新研究成果融入到课堂教学中,润物细无声地引入了课程思政元素,激发学生的学习热情,提升学生勇于创新、不断进取的精神追求。

教学团队创新构筑了多元化混合式思政教学平台,课堂上在历史性事件发生的当天带领学生进行纪念活动,精心挑选国内优秀材料科学家艰苦奋斗的科研事迹与重要的科研成果融入课堂教学中,还在课堂练习、课后作业和考试题中,创新性地把国家在相关行业中所取得的突出成就、中国企业攻坚克难打破垄断的事例融入到题目中(如范例2),激发学生民族自豪感与责任感,鼓励学生保持初心,勇于追梦,把立德树人的根本任务落在实处。

同时,通过位错运动规律的一般性与特殊性、点缺陷与线缺陷的相互转化、从位错微观运动到晶体宏观变形的量变质变等知识的阐述,强化了同学们对位错基本理论的理解,拓展了他们的哲学思维能力。

2) 习题答疑和总结课

除课堂上采用深入浅出的讲解方法、辅以具

有一定拓展性的作业题、加深同学对基本概念和基本理论的理解以外,为了解决同学们学习中遇到的问题和困难,定期进行每章的梳理和总结,并进行集体答疑和习题讲解。晶体缺陷的主要内容如图8所示,针对位错理论抽象,相关知识掌握较困难的情况,我们把相关内容主要归纳为:一个位错理论,二个气团(柯氏气团和铃木气团),三类位错作用,四种不全位错(肖克莱、弗兰克、压杆位错和扩展位错)和五个规则,在总结课上逐一深入剖析,使同学们记忆深刻,便于同学复习总结,取得了较好的教学效果。

在答疑过程中,更注重抓住问题的核心,拓展其解决问题的思路,进而培养学生分析问题和解决问题的能力。特别注意,对于存在争议的问题,不轻易地否定学生,重视学生的思考和分析过程,借此培养学生多角度考虑问题的科学思维方法、工程分析能力和创新能力。

3) 改进教学方法,强化过程考核

虽然授课形式及引导方式是灵活多样的,但是由于晶体缺陷部分涉及知识点特别多,加之相关理论或模型比较抽象,必须改进教学方法,采用各种手段强化知识点的记忆、理解和运用。

我们在教学实践中,通常本次课结束前都会留下1~2个思考题,下一次课上课的前一阶段,一面复习已学习的内容,一面就思考题进行课堂提问。这样的教学模式,既能带领学生们一起回顾已学习的重要知识点,同时还可以督促学生们的课后自主学习和讨论,拓展同学们的思维深度,加深对相关知识和理论的理解。

为提高学生的课堂参与度,实时掌握学生学习情况,教学团队深度使用了雨课堂等多媒体教学系统,通过总结课程重、难点问题形成阶段习题,并使用雨课堂适时检测学生对知识点的掌握情况,以便及时调整教学节奏与内容。将实际生产和科研工作中提炼出的创新性问题与学生共同讨论,采用“翻转课堂”的教学形式,鼓励学生充分发挥学习主动性,自主收集资料,剖析问题核心、提出分析与解决问题的方法,使得学生在自主思考过程中,加深对课程知识点的理解与运用,逐步形成自主分析问题和解决问题的能力。他们的课堂参与度和答题正确率将作为学生们的平时成绩的一部分。

课程每周布置一次作业,以帮助学生及时巩

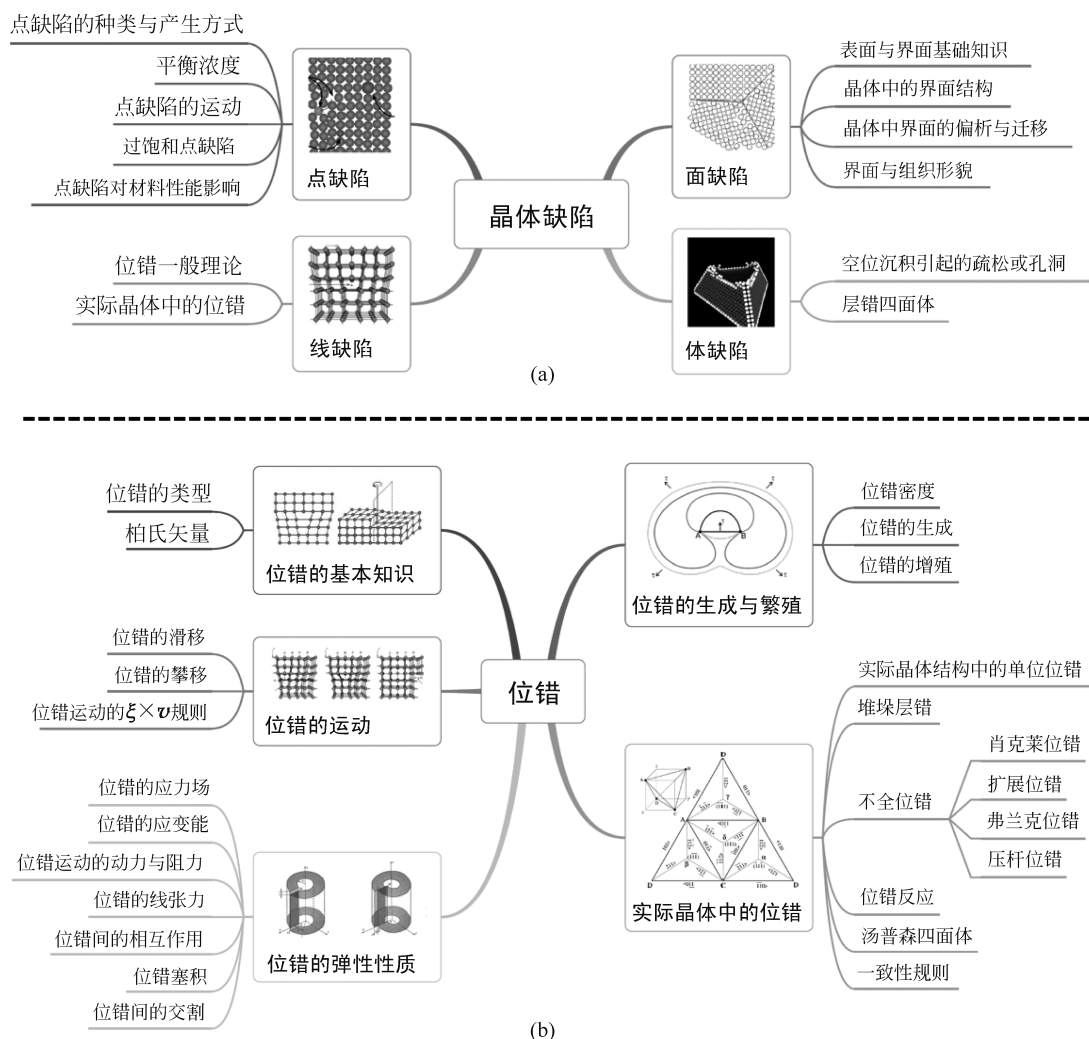


图 8 晶体缺陷的主要内容及思维导图

(a) 晶体缺陷; (b) 位错

固课堂所学。作业题目均立足于理论知识,但题目形式上规避“死记硬背”,而是紧密结合工程实践,锻炼学生的发散性思维。学生在解题时首先需要剖析问题,分析实际问题与理论要点间的联系,独立思考后才能提出自己的解决方案。对于深入思考问题并提出缜密解题思路的作业,将给予其“优秀”并在课堂表彰。作业“优、良、中、差”等级通过换算后列入学生课程平时成绩,作为学生课程最终成绩的重要组成部分。

我们坚持期中测验,着重考查学生们对晶体缺陷相关知识的掌握程度,并将期中测验的成绩列入最终成绩的一部分,以引起学生的重视。实践证明,合理穿插期中测验对于学生们学习本课程具有重要作用。我们在开卷考试方式的期中测验试题里,及时融入我国科学家最

新的研究成果(见范例 3),旨在拓宽学生的学习视野,提高学生融会贯通和分析解决问题的能力。

【范例 3】通常工程材料要达到高强度就要求位错不容易动,而高韧性又要求位错容易动,绝大部分材料没法做到强度与韧性兼得。最近我国科学家在 CrFeCoNiPd 高熵合金(由五种或五种以上等量或大约等量金属元素形成的合金)的研究中^[12],发现在较大的内部应力作用下材料中发生了位错塞积,许多个位错在某处“停滞不前”,从而进一步导致高密度的交滑移、二次交滑移,由此赋予了该材料强韧双增的特性。该成果发表在国际顶尖期刊上,得到了国际知名专家的高度评价。试用所学的位错理论分析该材料强韧双增的机制。

6 结语

本文对材料科学基础晶体缺陷的教学过程开展了系统性的课程与教学设计,在讲解完毕晶体运动与位错理论基本概念后,通过带领学生分析位错交割范例,将 $\xi \times b$ 、 $\xi \times v$ 等抽象的位错运动法则,图文并茂式地转化为具象化的应用方法,启迪学生们解决位错运动问题。结合弗兰克不全位错的特点,针对缺陷转化这一具体问题,清晰地演绎了点、线、面、体缺陷的相互转变过程,擘肌分理式地将各类型缺陷实现有机串联。这些教学实践将工程问题与晶体缺陷知识相结合,以辩证的思维分析晶体缺陷对材料性能影响的两面性,指出实际工程就是要找到材料各项性能的平衡点。

利用习题答疑与总结课等丰富的课堂教学形式,将晶体缺陷知识聚焦为五个核心,带领学生探索位错理论的普遍性与特殊性,培养了学生的哲学思辨能力;在教学范例、作业习题、考试试题中,悄然融入中国前端研究与重大工程创举,激发学生自信心的同时深化本课程的价值引领,实现了课程思政的润物无声。

参 考 文 献

- [1] 徐香,刘清芝,代辉,等.《材料科学基础》教学中的晶体缺陷[J]. 教育教学论坛, 2015(40): 223-224.
XU X, LIU Q Z, DAI H, et al. Crystal defects in the teaching of Fundamentals of Materials Science[J]. Education Teaching Forum, 2015(40): 223-224. (in Chinese)
- [2] 刘晶晶,高吉成,李大玉,等.基于微课视角的本科专业基础课教学模式改革与创新——以材料科学基础“晶体位错”微课设计为例[J]. 教育教学论坛, 2020(30): 200-201.
LIU J J, GAO J C, LI D Y, et al. Teaching model reform and innovation of college basic courses in specialty from the perspective of micro-lectures: taking the design of “crystal dislocation” micro-lecture of materials science foundations as an example[J]. Education Teaching Forum, 2020(30): 200-201. (in Chinese)
- [3] 沈一洲,陶杰.航空工程背景下材料科学基础课程的教学改革与探索[J]. 教育现代化, 2020, 7(26): 50-52.
SHEN Y Z, TAO J. Teaching reform and exploration of materials science foundation under the background of aviation engineering[J]. Education Modernization, 2020, 7(26): 50-52. (in Chinese)
- [4] 施冰心,刘成.当前大学生学习源动力现状及其提升策略探究——基于上海市8所高校实证调研分析[J]. 上海理工大学学报(社会科学版), 2022, 44(3): 305-310.
SHI B X, LIU C. College Students' Learning Motivation and Its Promotion Strategies—Based on the Empirical Research and Analysis of 8 Universities in Shanghai[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology (Social Science edition), 2022, 44(3): 305-310. (in Chinese)
- [5] 高庆飞,张坤,李钧.大学生学习积极性影响因素与对策研究[J]. 教育现代化, 2020, 7(50): 174-177.
GAO Q F, ZHANG K, LI J. Research on the Influencing Factors and Countermeasures of College Students' Learning Enthusiasm[J]. Education Modernization, 2020, 7(50): 174-177. (in Chinese)
- [6] 黄炯,叶伟巍,谢孟泽,等.互联网技术环境下理工科大学学生学习行为影响因素实证研究[J]. 高等工程教育研究, 2018(5): 161-165.
HUANG J, YE W W, XIE M Z, et al. The Influencing Factors of Learning Behavior of Science College Students in the Context of Internet Technology[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2018(5): 161-165. (in Chinese)
- [7] LI M Q, SHEN Y D, LUO K, et al. Harnessing dislocation motion using an electric field[J]. Nature Materials, 2023, 22: 958-963.
- [8] 范群成,田民波.材料科学基础学习辅导[M]. 北京:机械工业出版社, 2020: 89-90.
- [9] 余永宁.材料科学基础[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2012: 187-190.
- [10] FAN H D, WANG Q Y A. El-Awady Jaafar, et al. Strain rate dependency of dislocation plasticity[J]. Nature Communications, 2021(12): 1845.
- [11] CHEN G, PENG Y B, ZHENG G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature Materials, 2016(15): 876-881.
- [12] DING Q Q, ZHANG Y, CHEN X, et al. Tuning element distribution, structure and properties by composition in high-entropy alloys[J]. Nature, 2019(574): 223-227.