

# 弗里德尔家族的科学贡献

## ——从《材料科学基础》的若干概念谈起

Scientific Contribution of Friedel's Family  
——From Some Concepts in *Fundamentals of Materials Science*

供稿|杨平 / YANG Ping

### 内 容 导 读

法国弗里德尔(Friedel)家族对自然科学做出了巨大贡献,其中若干经典现象或概念虽然在《材料科学基础》中予以介绍,但其起源并未被读者所认知。杨平教授特意撰写文章将位错、向错、孪晶界等基本概念的产生背景与Friedel家族祖孙的生平进行联系,同时也讨论了这些有趣的事件对杨平教授自己的教学、科研的一些影响和感触。希望此文能给热爱材料科学的读者们对材料人物历史—理论知识—实际应用的有机联系带来帮助或启迪。

学习《材料科学基础》材料结构中的晶体、液晶概念,材料线缺陷中的位错、向错概念,材料面缺陷中的重合位置点阵CSL(倒易密度值 $\Sigma$ )和孪晶界概念,以及位错与各类缺陷交互作用,如运动位错与林位错之间的作用力(加工硬化理论),运动位错与溶质点缺陷之间的作用力(固溶强化理论),运动位错切割共格第二相过程(弥散强化理论)时,估计很难想到这些基本概念都与法国一个著名的科学世家弗里德尔(Friedel)家族有关。

1994年,弗里德尔家族的著名科学家之一、法国科学院院长J. Friedel出版了一本介绍其家族科学人生故事的传记*Graine de Mandarin*(原文为法文,中文译名《文华种子》,见图1)<sup>[1]</sup>。书中主要介绍了其曾祖父——有机化学家和晶体学家C. Friedel、

祖父——晶体学家和矿物学家G. Friedel、父亲——有机化学家E. Friedel和J. Friedel本人——作为固体物理学家和材料物理学家在世界科学界引起重要影响。本文主要介绍G. Friedel和J. Friedel的生平与《材料科学基础》中一些重要概念的关系,目的是加深对材料科学相关概念的理解和对相关历史的了解,同时也对弗里德尔家族的科学大师们表示崇高的敬意。

### G. Friedel和J. Friedel简介<sup>[2]</sup>

法国晶体学家和矿物学家乔治·弗里德尔(Georges Friedel, 图2(a))1865年出生于法国米卢兹(Mulhouse),1933年逝世于法国斯特拉斯堡(Strasbourg)。1893年他成为国立圣埃蒂安高等矿业学院(École Nationale des

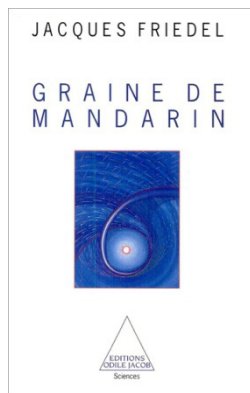
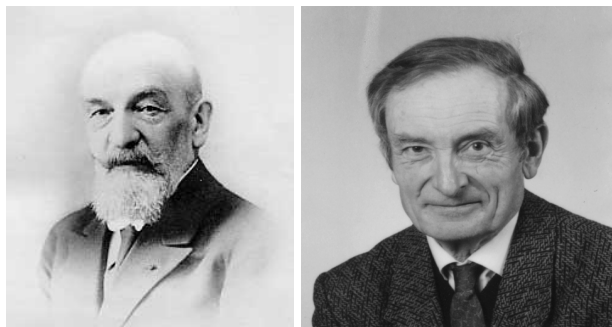


图1 J. Friedel于1994年出版的*Graine de Mandarin*传记封面<sup>[1]</sup>

Mines de St. Etienne)的教授。第一次世界大战之后，G. Friedel调到斯特拉斯堡大学工作。由于疾病的困扰，他在1930年提前退休。G. Friedel在5个方面进行了开创性工作：液晶、向错、重合位置点阵理论、孪晶、X射线衍射。他以Friedel定理(指因XRD下的反演中心对称性的干扰，32种宏观对称性不同的点阵只能归结为11种，称11种劳厄群)、Friedel盐(他于1897年合成了氯铝酸钙和铝酸钙，后者用于研究形变双晶)和中间相(即液晶)分类而闻名。1892年他最先将液晶(他自己称之为中间相Mesomorph)分为向列相、胆甾相和近晶相。G. Friedel确定了晶体外部形态和内部结构的法则。虽然19世纪末期积累了大量孪晶的文献，但这一理论长时间没有准确的数学表达式。1904年，G. Friedel命名的结晶研究组专刊在X射线晶体学形成之前总结了孪晶已有的知识和理论，明确解释孪晶的形成并完善了晶体学理论，同时，他指出了不同孪晶形成条件的一般规则。他被认为是重合位置点阵CSL概念的最先提出者，在1911年研究孪晶时提出的，指出了孪晶正好是 $\Sigma 3$ 重合关



(a) G. Friedel

(b) J. Friedel

图2 G. Friedel<sup>[3]</sup>和J. Friedel<sup>[2]</sup>祖孙二人的照片

系<sup>[3]</sup>。作为教师的G. Friedel对他的学生产生的巨大影响至今依然存在，例如由他编写的著名经典书籍《晶体学》的第一版出版后，于1964年再版成著名的经典教科书《晶体学教程》沿用至今。

法国现代固体物理学家及材料学家Jacques Friedel<sup>[2]</sup>是Georges Friedel(图2(b))的孙子，也被称为法国固体物理及材料物理之父，他以过渡金属理论、位错理论、Friedel振荡、Friedel求和定则(Friedel Sum Rule)而闻名，其中只有位错理论在《材料科学基础》中有介绍。1921年J. Friedel出生于巴黎，2014年在巴黎去世。如同这个精英大家族的祖辈一样，J. Friedel于1944年考入法国最著名的高等院校“拿破仑军校”(Ecole Polytechnique，中文译名“巴黎综合理工”)，并同时入巴黎国立高等矿业学院学习，1952年他在英国布里斯托大学Nevill F. Mott(后来的诺贝尔物理学奖获得者)指导下获博士学位。1959—1989年他在巴黎Orsay大学任固体物理教授，发表了200多篇文章。J. Friedel曾任法国物理学会主席、欧洲物理学会主席、法国科学院主席，同时他也是英国皇家学会会员。1970年他获得法国CNRS金奖，2010年获欧洲科学院“达芬奇”成就奖。在位错理论中，他提出过著名的位错对小析出物的切割机制(称为Friedel Cutting析出强化)，与E. Orowen的位错绕过大粒子机制(Orowen Looping)对应，他还提出过交滑移模型，与Seeger的交滑移模型对应，以及林位错加工硬化模型等(称Friedel-Saada Forest Hardening)。作为位错理论课程的教师，他于1956年出版法文书《位错》(*Les Dislocations*)，1964年再版并被译成英文版，1980年翻译成中文版《位错》由科学出版社出版<sup>[4-6]</sup>。19世纪60年代末期他开始对软物质液晶进行研究，并将位错理论应用于对向错的描述；同时对超导现象进行了深入的研究。J. Friedel与M. Kléman一起对液晶中向错等缺陷的研究与其祖父G. Friedel对液晶的研究<sup>[7]</sup>相汇合且延续下去，也将J. Friedel自己对位错线缺陷和向错线缺陷的研究统一了起来。

J. Friedel对法国凝聚态物理和材料物理的影响是深远的，为此，2013年10月22日法国总统奥朗德(Hollande)授予法国科学院主席J. Friedel十字大勋章以表彰其对法国自然科学的巨大贡献，见图3。



图3 法国总统奥朗德授予法国科学院主席J. Friedel(93岁) 十字大勋章

## 与G. Friedel和J. Friedel有关的材料科学概念

### G. Friedel提出的材料科学概念

1) 重合位置点阵CSL的概念非常重要，它是描述晶界几何结构规律性的一个模型，但其起源却有争议。与J. Friedel共事的法国晶体学家O. H. Duparc<sup>[4-6]</sup>(J. Friedel去世时撰写其纪念文章的作者之一<sup>[2]</sup>)对物理冶金学家认为CSL的起源是1949年Kronberg和Wilson<sup>[8]</sup>提出的说法愤愤不平，他认为当时的物理冶金学家Rosenhain、Desch等对矿物学家的早期工作缺乏了解。G. Friedel于1904年就提出倒易密度 $\Sigma$ 值的概念，他使用孪生指数(Twin Index)一词，定义为初级单胞节点数与孪晶操作得到的重合节点数之比，还给出了 $\Sigma=h^2+k^2+l^2$ 的计算公式，其中 $h$ ， $k$ ， $l$ 是孪晶面的面指数。G. Friedel在1904年使用的multiple lattice就是现在的coincidence site lattice。

2) 液晶的分类：在1888年瑞士的植物学家Reintzer和德国的晶体学家Leihnman实验中发现液晶之后，G. Friedel也进行了研究，并于1907年与François Grandjean一起将液晶描述为中间相(Mesophase或Mesomorph)焦锥液体(Focal Conic Liquid)，他反对使用液晶Liquid Crystal一词，认为液体不可能是晶体，但一直没能改变人们对液晶一词的使用习惯。他于1922年在法国物理年报(*Annales de Physique*)上发表长达200页的报告“物质的中间态”(Mesomorphic States of Matter)，在该文中他将液

晶分为三种类型，即向列相、胆甾相和近晶相。并在描述向列相结构时指出，其内部存在线状奇异缺陷，就是向错。据说液晶的分类法是G. Friedel在西班牙海滨度假时灵光一闪而提出的。

3)对孪晶的研究：矿物界通常用Macle(双晶/孪晶)一词，通常自然材料中的“双晶”用肉眼就能观察到，而物理冶金界使用Twin(孪晶)一词，人造材料(如金属等)中的孪晶要用显微镜观察。文献[9]中介绍德国晶体学家和矿物学家Laves时也提到孪晶是Laves的主要研究内容之一，那么Laves的孪晶研究和G. Friedel的孪晶研究有何主要差异呢？仔细阅读O. H. Duparc的综述文章<sup>[3]</sup>便可清楚看到两人之间对孪晶研究的差异：Laves主要是对长石矿物中孪晶进行了系统的研究，而G. Friedel是对各类矿物孪晶的晶体学特征，点阵重合状态、对称性关系、取向变化特点及差异进行研究。G. Friedel对成百上千的矿物孪晶样品进行了分析，又仔细阅读了数十甚至数百篇矿物学家的相关论文，完成了对孪晶的分类。Laves的导师，瑞士晶体学家Paul Niggli于1919年和1924年将G. Friedel对孪晶的分类写进了德文的教科书<sup>[4-6]</sup>，可见G. Friedel对孪晶的研究也比Laves早得多。孪晶与重合位置点阵界面有密切关系，重位点阵界面是低能面，通过孪晶操作得到的双晶间的界面才最有可能是低能面，虽然常见的低指数 $\Sigma$ 重位点阵关系远超过 $\Sigma 3$ 的孪晶关系，但孪晶及孪晶操作引出了重位点阵界面的概念。

### J. Friedel提出的材料科学概念

1)交滑移模型：1955年德国金属物理学家A. Seeger提出FCC金属中螺位错交滑移模型<sup>[10]</sup>。螺位错通常会不同程度的分解为2个肖克莱不全位错加上之间的层错，使其滑移面固定。当要进行交滑移时，不全位错要先束聚，合并成一段全位错后，该段全位错再交滑移到新的滑移面上并分解<sup>[11]</sup>。J. Friedel于1956年与B. Escaig提出的交滑移模型称为F-E模型<sup>[12, 13]</sup>，图4给出其与Seeger模型的差异，即Seeger模型的起始点是两个平行的不全位错，交滑移时要先束集(英文用constriction一词，收缩或压缩)，再合并成一段全位错；而F-E模型起点就是弯曲并有交点的两个不全位错(见图4中第1阶段)，这样就基本

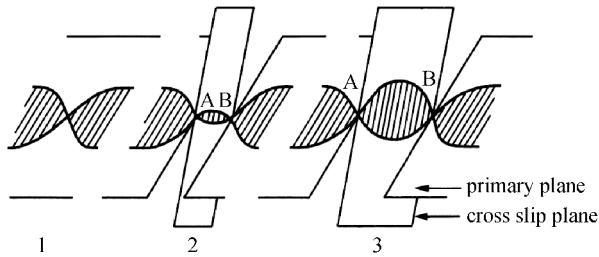


图4 F-E交滑移模型<sup>[12, 13]</sup>

免去了束集过程所需的激活能。

2) J. Friedel的线性硬化阶段的定量模型。

FCC金属单晶应力-应变曲线的第二阶段是线性硬化区，涉及的加工硬化理论很多，最核心的一点是要证明该阶段的加工硬化率是常数(第一阶段是易滑移阶段，加工硬化率很低；第三阶段是抛物线阶段，高的加工硬化率逐渐下降)。J. Friedel首次定量分析证明此阶段运动位错与Cottrell障碍交互作用时障碍物的数目随应变的增加是个常数，而不是随应变的增加而增加或减少<sup>[14]</sup>，从而定量证明了线性加工硬化率阶段的物理本质。

3) J. Friedel的位错切割共格粒子的弥散强化模型。

当运动着的位错遇到第二相粒子，就要与其发生交互作用，对硬的大粒子就要通过绕过的方式，穿过并留下位错环，即欧罗万机制 (Orowan Looping

或Orowan Bowing, 1948年)，对小的共格粒子会以共格方式切割而过，形成新相界，称弗里德尔切割机制(Friedel Cutting)，两个机制都会造成强化，合起来也称Fleischer-Friedel颗粒强化图<sup>[15]</sup>。在位错扫过随机分布的第二相粒子产生的强化过程中，J. Friedel推出的定量结果是所需外应力与粒子体积的平方根成正比；类似的，在位错扫过随机分布的溶质原子产生的强化过程中，J. Friedel推出的定量结果是所需外应力与溶质浓度的平方根成正比<sup>[2]</sup>。

### Friedel家族的重要概念与作者自己的教学与研究

1) 界面结构的CSL理论是界面研究的主要内容，界面的作用广泛存在于材料形变、再结晶、相变过程中，使用电子背散射衍射技术(EBSD)容易测出CSL存在的频率程度。涉及共格界面的 $\Sigma 3$ 关系早已被研究者广泛观察到，即使在显微镜下观察到晶粒内部平直的界面或条状物，也能确认它的存在。但是，有时弯曲的界面两侧晶粒也常对应 $\Sigma 3$ 关系，称非共格界面的 $\Sigma 3$ 关系，至少可在两种情况下显著出现：一是做电池材料用的、经过小形变退火的铅合金，二是大形变后相变退火时控制相变先在表面发生时形成的组织中，见图5(a)<sup>[16]</sup>。另外， $\Sigma 3$ 以外的

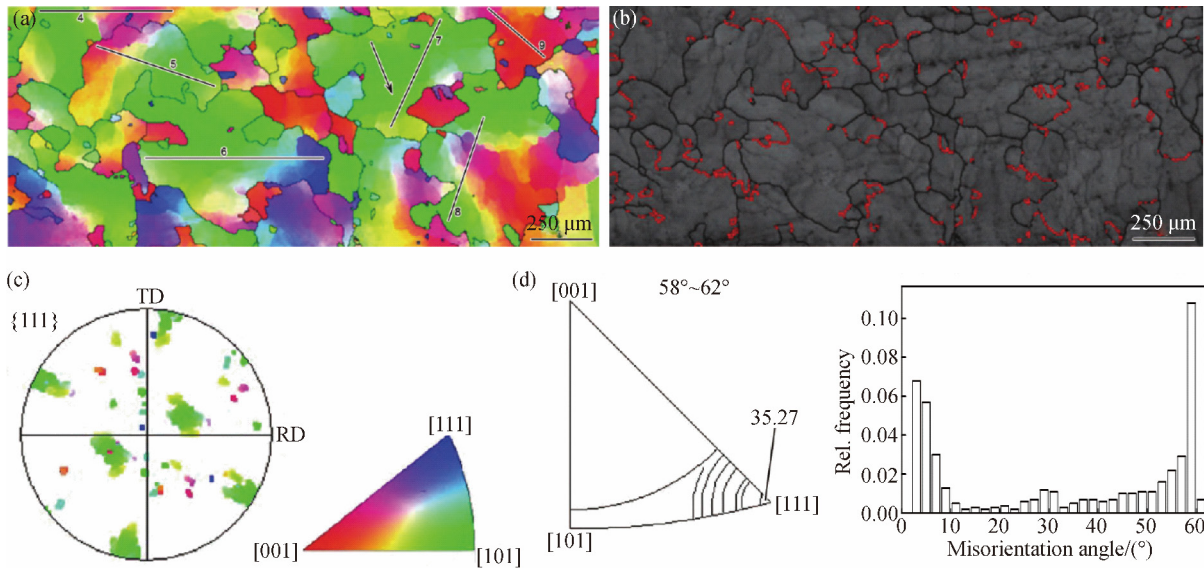
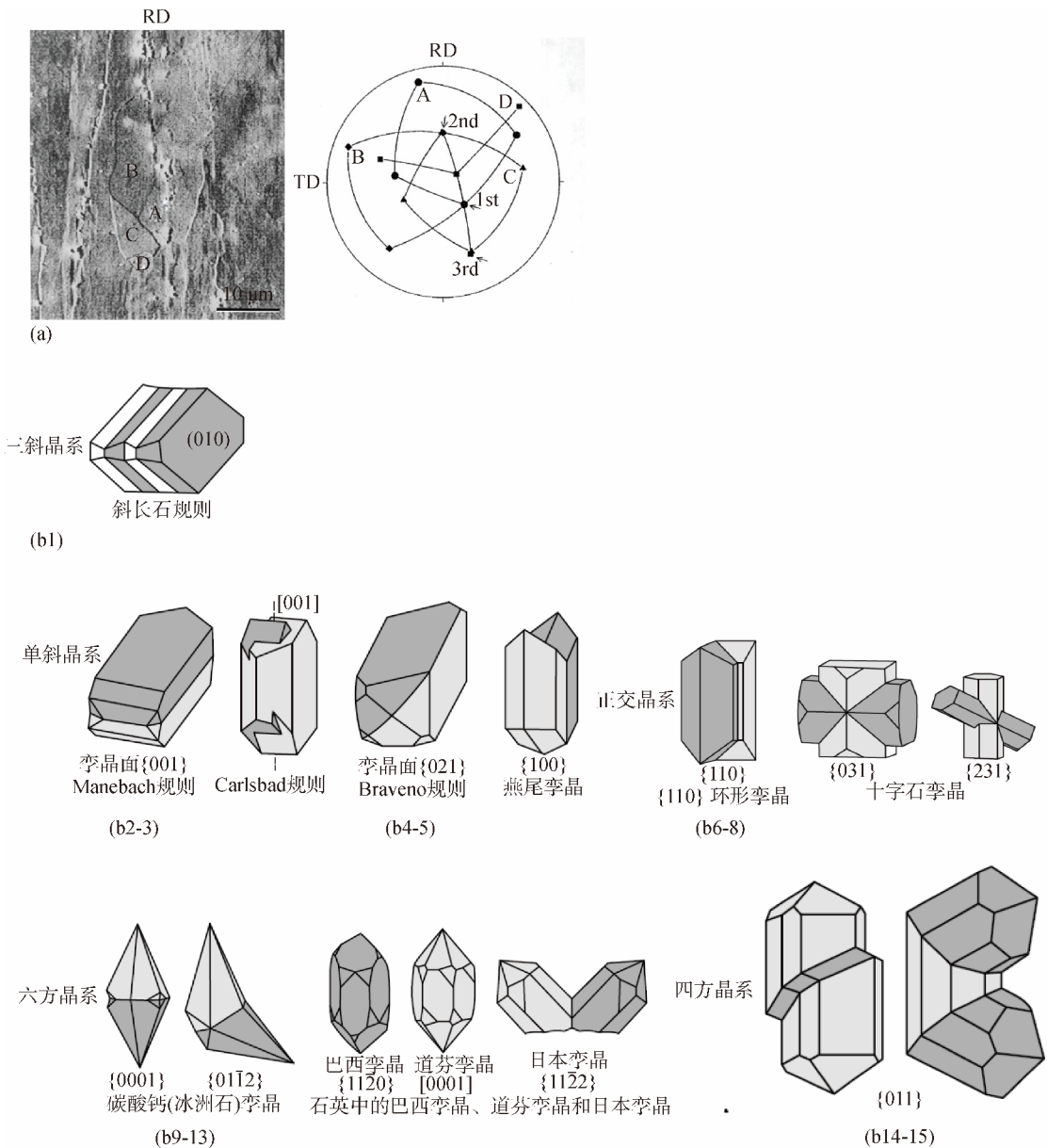


图5 Fe-0.33Mn冷轧后相变退火形成的大量非共格 $\Sigma 3$ 关系界面(标红色的晶界)：(a) 取向成像图，颜色与晶体学取向的关系见取向三角形图标<sup>[16]</sup>；(b) 菊池带质量图，弯曲的红色线标注出满足 $\Sigma 3$ 孪晶关系的位置；(c) 该区域的取向分布， $\{111\}$ 极图，可看出绕 $\langle 111 \rangle$ 轴转 $60^\circ$ 的孪晶取向差；(d) 该区域晶粒间的取向差和转角分布，显示存在大量的 $60^\circ \langle 111 \rangle$ 关系

其他 $\Sigma$ 关系就不那么容易直接观察到，要用到EBSD技术才能测定。例如，2阶或3阶孪晶是 $\Sigma 9$ 、 $\Sigma 27$ 的取向差关系；形变过程中不同形变量下也常遇到其他非 $\Sigma 3$ 的 $\Sigma$ 关系；相变遵循某种特定取向关系时，也出现非 $\Sigma 3$ 的 $\Sigma$ 关系，如 $\Sigma 11$ 。图6(a)是1994年作者在德国亚琛大学攻读博士学位时使用EBSD技术观察到的高层错能金属Al中存在3重孪晶<sup>[17]</sup>。另外，除了文献[9]中给出的各类结构金属中的孪晶图片外，作者还关注了不同晶体结构的矿物中出现的各种孪晶(双晶)，它们通过外形就可观察到，而不需要显微镜，

见图6(b)。甚至在作者们的日常生活中也能经常观察到类似孪晶的树木、枣、西红柿和樱桃等，见图6(c)。作者一直在思考一个有意思的问题，晶体中的孪晶要满足界面两侧原子排列的镜面对称性，而非晶态的植物以及以独立个体存在的人类双胞胎的“镜面对称元素或基因”又是什么呢？

2) 液晶与向错：表面上具有流动性的液晶与位错线缺陷没有什么关系，但液晶中存在大量另一种线缺陷——向错；液晶的流动性正好给在固态晶体中由于产生很高能量而难以存在的向错提供了缓冲



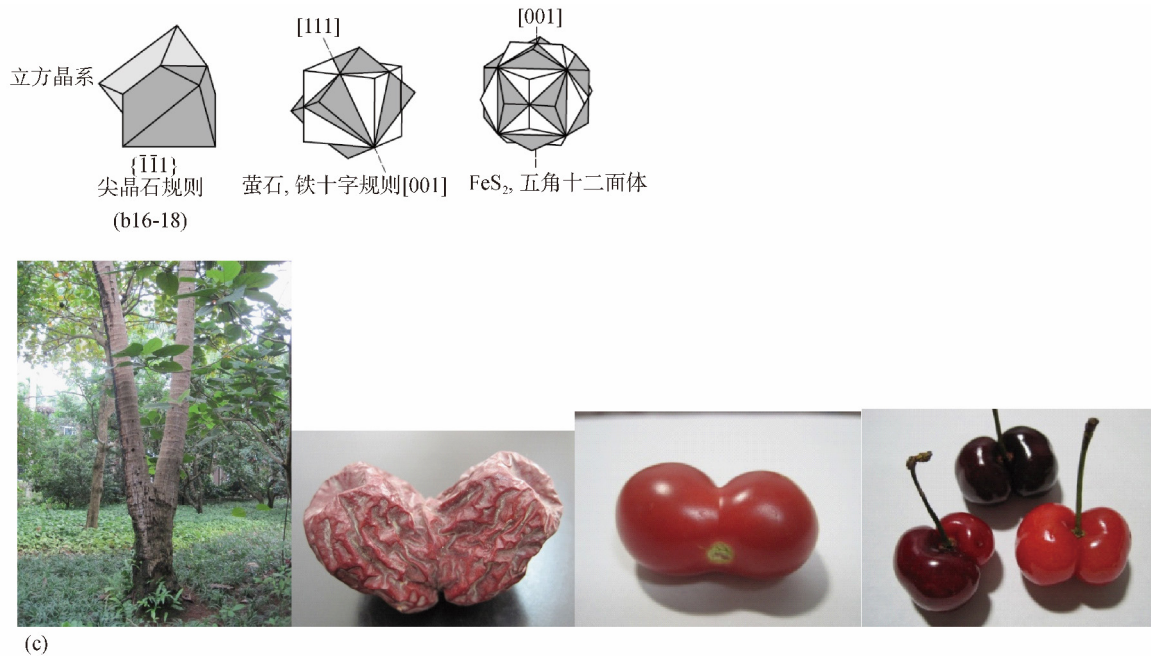


图6 (a) FCC铝的孪晶关系 $60\langle 111 \rangle$ , 3重孪晶<sup>[17]</sup>; (b1) 三斜晶系中的聚片双晶(钠长石中); (b2-5) 单斜晶系中的穿插双晶、接触双晶和接触双晶(正长石中)、接触双晶(石膏中, 也称燕尾双晶); (b6-8) 正交晶系中的接触双晶(文石中); (b9-13) 三方(六方)晶系中的两种接触双晶(方解石中, 后者也称蝴蝶双晶)和石英中的三种孪晶; (b14-15) 四方晶系中的两种接触双晶(金红石中, 也称膝状双晶); (b16-18) 立方晶系中的接触孪晶、贯穿双晶(黄铁矿和萤石中, 前者也称铁十字律双晶)<sup>[17]</sup>; (c) 类似“孪晶”的树、枣、西红柿和樱桃

的余地, 在对称性较低的向列相中会有大量向错, 而对称性较高的近晶相中就可以存在位错和向错, 并且近晶相层状之间会存在类似固态晶体小角度扭转晶界(由两组垂直分布的螺位错组成)一样的由两组垂直的向错组成的小角度界面结构; 在螺旋结构的胆甾相中还存在旋错(Dispersion)。本质上, 位错是晶体平移对称性受到破坏的奇异线, 向错是晶体旋转对称性受到破坏的奇异线, 旋错是晶体螺旋对称性受到破坏的奇异线。作者在给学生讲授《材料科学基础》的同时与学生一起开展趣味小实验, 对热致液晶的形成过程(实际是相变过程)进行了观察, 发表了一篇关于液晶实验研究方面的文章<sup>[18]</sup>。图7给出向列相冷却时的相变过程, 可见液晶内部存在向错(如箭头所示)。向错的观察比位错的观察更容易, 在偏光显微镜下就可观察到。作者指导学生在偏光下观察液晶中的织构和向错特征, 并根据向错特征确定是哪一种类型的液晶, 发表了关于向错研究的文章<sup>[19]</sup>。由此使得学生对这两种抽象的概念有了更深的体会。作者研究了十余年金属材料中的织构现象, 没想到液晶材料中织构的概念与金属中织构概念完全

不同, 也与自然材料岩石中的织构概念不同, 其差异的简单介绍见文献[20], 也正是液晶中的线缺陷向错、旋错、位错的差异造成液晶中不同的织构。

在纪念J. Friedel的法国物理杂志专刊<sup>[21]</sup>中, J. Friedel的学生Pieranski展示了一张很有意义的液晶照片, 通过电磁场控制使向列相液晶中的25个向错排成一个大钟的形状, 寓意为半个世纪前35岁的Friedel写就《位错》一书, 随着时间的推移, 位错理论已经向向错理论完成了延伸。

3) J. Friedel是教学和科研相互促进的典范。J. Friedel的科学研究有几个阶段, 其中从1945年到1960年代J. Friedel开展了对位错的研究。在J. Friedel攻读博士学位期间, 与Mott、Frank、Eshelby等人建立了亦师亦友的共事关系。他从Frank讲授的课程中学习位错理论, 毕业后在法国的两所大学及研究所开设了位错课程, 他的讲稿就是在往返两所大学的火车上准备的。通过课程讲授和理论研究, J. Friedel对位错理论有了更深的体会, 1956年出版了法文的*Les Dislocations*一书<sup>[4]</sup>, 再版于1964年(英文版)<sup>[5]</sup>, 并于1980年被译成中文<sup>[6]</sup>。J. Friedel的这种教

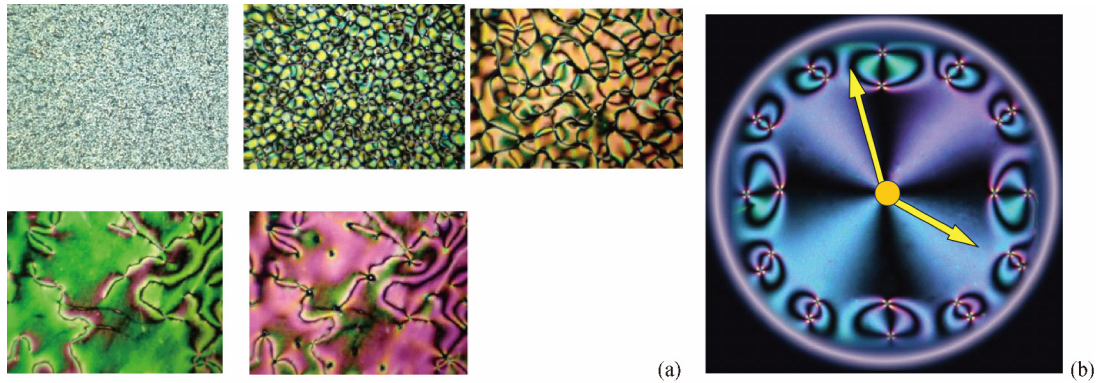


图7 (a)向列相液晶冷却时的相变过程<sup>[18]</sup>及(b)电磁场作用下在向列相中产生了25个向错的偏光照片<sup>[21]</sup>

学与科研有效结合的工作方式是作为大学教师的我推崇和学习的榜样。

4) 概念、名人典故与授课者的“熟悉”感。

站在《材料科学基础》课程的大学讲台近三十年，作者对《材料科学基础》的基本概念由陌生到熟悉，由遥远到贴近，这种“熟悉”有因每年的讲课而变成的熟悉，也有因同时从事相关的科学研究而变成的熟悉，最后还有因生活在这个特殊的年龄

段而有机会直接或间接接触到一些与教材中基本概念有关的人物而变成的熟悉。课堂上常给学生提及的一句“颇为自豪”的话就是《材料科学基础》课程较为年轻，涉及的不少人物常常可直接的或间接地与我们联系起来，给人以“就在身边”的感觉。这些经历不仅加深了教师对相关概念的体会，也激发了学生的学习兴趣。例如，法国的晶体学在世界上非常有影响力，图8是一张珍贵的照片，是



图8 诺贝尔化学奖获奖者Dan Shechtman(右四)2012年到法国向同事们致谢(右二为法兰西科学院院长J. Friedel)

2012年本文的主人公J. Friedel与因准晶的发现而获得诺贝尔奖的Dan Shechtman的合影,照片的背景是Dan Shechtman教授到法国向同事们致谢,我也为有我的同学在场而感到自豪; Dan Shechtman教授与郭可信院士都研究准晶, Dan Shechtman教授曾多次来中国并与我国许多高校进行过学术交流。

## 结束语

《材料科学基础》课程由材料的结构(完整晶体和晶体缺陷)和温度压力作用下的变化(形变、再结晶、相变)组成,一组知识点(位错向错、孪晶孪生、加工硬化粒子强化)承载了一部材料科学的发展历史以及一个家族的科学人生故事,这使作者讲授课程中带着更多的联想、更深刻的体会与感受、更丰富的理论知识和讲课技巧以及更好的研究应用,还有一名快进入退休行列的教书匠对年轻人(青年学生与青年教师)的更多期望。

## 致谢

感谢北京科技大学教研项目(No.JG2015Z10)、北京科技大学北科学者人才支持计划、北京科技大学研究生院教材专项基金(No.230201506400103; No.17)的支持。感谢张葵教授对文中涉及的法国高等教育背景的介绍和一些事件、文字上的更正,正是与她的交流激发了作者撰写此文的想法;感谢顾新福博士提供的若干经典文献和非常有益的建议。

## 参考文献

- [1] Friedel J. *Graine de Mandarin*. Editions Odile Jacob. Sciences, 1994
- [2] Sutton A P, Duparc O H. Jacques Friedel. *Biogr Mems Fell R Soc*, 2015, 61: 123
- [3] Duparc O H. A review of some elements in the history of grain boundaries, centered on Georges Friedel, the coincident 'site' lattice and the twin index. *J Mater Sci*, 2011, 46: 4116
- [4] Friedel J. *Les Dislocations*. Paris: Gauthier-Villars, 1956
- [5] Friedel J. *Dislocations*. London: Pergamon Press, 1964
- [6] Friedel J. 位错. 王煜, 译. 北京: 科学出版社, 1980
- [7] Kléman M, Friedel J. Disclinations, dislocations and continuous defects: a reappraisal. *Rev Mod Phys*, 2008, 80: 61
- [8] Kronberg M L, Wilson F H. Secondary recrystallization in copper. *Trans Met Soc AIME*, 1949, 185: 501
- [9] 杨平. 拉维斯相及拉维斯的科研究生涯. *金属世界*, 2015(3): 3

- [10] Schöck G, Seeger A. Activity energy problems associated with extended dislocations// *The Physical Society-Bristol Conference on Defects in Crystalline Solids*, 1955: 340
- [11] Seeger A. *Dislocations and Mechanical Properties of Crystals*. New York: John Wiley and Sons, 1957
- [12] Escaig B. *Dislocation Dynamics*. New York: McGraw-Hill, 1968
- [13] Escaig B. Sur le glissement dévié des dislocations dans la structure cubique à faces centrées. *J Phys*, 1968, 29: 225
- [14] Friedel J. On the linear work hardening rate of face-centred cubic single crystals. *Phil Mag*, 1955, 46: 1169
- [15] Reppich B. 颗粒强化//米格兰比 H, 主编. 材料的塑性变形与断裂 //恩 R W, 哈森 P, 克雷默 E J, 主编. 材料科学与技术丛书, 第6卷. 北京: 科学出版社, 1998
- [16] 章楼文, 杨平, 毛卫民. 电工钢相变组织中的Σ3和取向梯度现象. *金属学报*, 2017, 53(1): 20
- [17] Yang P, Engler O. The formation of twins in recrystallized binary Al-1.3%Mn. *Materials Characterization*, 1998, 41: 165
- [18] 唐治, 杨平, 刘芳, 等. 材料专业“液晶组织观察与分析”实验初探. *实验室研究与探索*, 2010, 29(1): 123
- [19] 柏鉴玲, 杨平, 关琳, 等. 液晶类型的织构法确定及向错的观察与确定. *中国冶金教育*, 2012(4): 20
- [20] 杨平. 材料科学名人典故与经典文献. 北京: 高等教育出版社, 2012
- [21] Pieranski P. Dislocations and other topological oddities, condensed matter physics in the 21st century: The legacy of Jacques Friedel. *Comptes Rendus Physique*, 2016, 17: 242

**作者简介:** 杨平, 博士, 教授, 博士生导师, 北京科技大学材料学院“材料科学基础与材料各向异性”梯队负责人(首席教授)。1982年和1986年分别获得北京科技大学材料专业学士学位和硕士学位; 1997年获德国亚琛工业大学金属学与金属物理所材料科学博士学位。主要研究方向: 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; 擅长使用电子背散射衍射(EBSD)技术; 各类钢、铝合金、镁合金、钛合金等材料的研究; 各类电工钢及高锰TRIP/TWIP钢的研究。负责国家自然科学基金5项, 参加国家863计划3项, 国家973计划项目1项, 厂协项目10余项等。在国内外期刊发表科研论文共366篇(SCI检索113篇), 发表教学研究文章34篇。获发明专利6项, 获省部级一等奖、三等奖各1项, 获得北京市教学名师、北京市师德先进个人、宝钢优秀教师奖、北京市教学成果一等奖、二等奖(均为第一获奖者)、2017年入选北京科技大学鼎新学者。主要著作: 《电子背散射衍射技术及其应用》《材料织构分析原理与检测技术》《电工钢的材料学原理》《材料科学名人典故与经典文献》《工程材料结构原理》; 参编教材《材料科学基础》《材料科学与工程基础》《金相实验基础》等; 讲授本科生《材料科学基础》(国家精品课程、国家精品资源共享课、研究型教学示范课堂)、全英文《材料形变与再结晶》课程(研究型教学示范课堂)、研究生《材料结构》课程。《金属世界》期刊特约撰稿人。