

位错理论与加工硬化研究大师 Nabarro 教授与 Kuhlmann- Wilsdorf 教授

Renowned Professors Nabarro and Kuhlmann-Wilsdorf in the Field of
Dislocation and Work-hardening

供稿|杨平 / YANG Ping

内
容
导
读

位错研究大师 Nabarro 和 Kuhlmann-Wilsdorf 都来过北京科技大学进行学术交流。两人有着十分密切的关系，同时存在学术上不同的观点。他们的学术成就不同程度地在材料科学基础课程中出现过。本文首先简单介绍两人的科学贡献，然后从课程教学的角度讨论了两人与课程中一些知识点的联系，希望能帮助相关专业课程学习者和授课教师从更深层理解相关知识点及背后的历史背景，将人文历史与专业理论有机结合，促进课程学习、促进教学与科研。

引言

材料科学基础（以下简称材料基）课程中介绍的 Peierls-Nabarro 力是学生非常熟悉的知识点，所以 Nabarro 教授是学生熟知的位错大师。Kuhlmann-Wilsdorf 教授在位错引起的加工硬化及与位错相关的形变组织研究成果虽也出现在材料基中，但没有以她的名字命名，所以学生不熟悉她的名字。与位错理论相关的主要研究者是 Mott, Nabarro, Frank, Friedel, Cottrell 等，将 Nabarro 与 Kuhlmann-Wilsdorf 联系在一起讨论，估计很多人难以理解。作为讲授材料基课程的教师，将二人在本文中一起讨论，原因是：（1）两位位错研究大师都到过北京科技大学

进行学术交流。（2）两人有过很长的一段合作研究位错经历，都在英国布里斯托（Bristol）大学、南非 Witwatersrand 大学工作。特别是 Nabarro 2006 年去世后，Kuhlmann-Wilsdorf 于 2009 年在材料科学进展（Progress in Materials Science）期刊上发表了纪念 Nabarro 的文章，不仅介绍了两人深厚的友谊，也介绍了两人在学术上的不同观点。（3）Nabarro 来自位错理论研究最深入的英国布里斯托大学、诺贝尔奖获得者 Mott 教授担任主任的物理研究所，而 Kuhlmann-Wilsdorf 最早来自同样有悠久位错研究历史的德国 Göttingen 大学，该大学与位错研究有关的大师有 Prandtl, Becker, Masing, Haasen 等，以及

Becker 的学生 Boas 和 Orowan。另外, R. Cahn 在其主编的物理冶金学“圣经”——《物理冶金学》(第 2 版)一书中, 位错一章是他邀请 Kuhlmann-Wilsdorf 撰写的, 说明她在位错理论上的影响力是很大的。作者撰文的核心目的是将材料基课程中与他们两人有关的概念整理出来介绍给材料专业的学生, 希望能提升他们的学习效果和专业兴趣。同时了解两人的友谊和学术上的不同观点有助于培养我们的批判思维能力和质疑的态度。图 1 将本文讨论的几个方面的关系以线路图方式给出, 以避免较多琐碎细节可能产生的理解混乱。



图 1 本文介绍两人相关方面的线路图

Nabarro 教授与 Kuhlmann-Wilsdorf 教授生平简介及他们研究轨迹的交集

Nabarro 简介^[1]

Frank R. N. Nabarro 教授(1916—2006)是理论物理学家, 固体物理的先驱, 也是位错及金属强度理论奠基人; 他还是教育家, 反对种族隔离, 提倡各种族都有平等受教育的机会。1940 年 Nabarro 教授获得牛津大学学士学位, 因第二次世界大战中断学业, 1941—1945 年服兵役, 但在 1940 年他就发表了 4 篇文章, 其中含有与 Mott 教授合作发表的文章。他的《晶体位错理论》(Theory of Crystal Dislocations)著作^[2]现在仍然是经典书籍, 这本 1967 年出版的著作是基于他 1952 年发表的文章《静态位错的数学理论》(Mathematical theory of stationary dislocations)^[3]。Nabarro 研究位错是个偶

然的事件, 在 Bristol 大学 Mott 教授分配给他的课题是研究磁学中的矫顽力与磁畴壁移动问题, 但几个月后他发现这个问题已被德国学者(R. Becker)解决, 因此他改换课题, 开始研究位错。Nabarro 的研究集中在两个方面: 一是位错运动克服第二相粒子需要的应力(即析出强化), 二是纯金属中位错运动需要克服的摩擦阻力(点阵阻力, P-N 应力)。他还预测了高温、低速应变时通过空位运动实现的“蠕变”现象, 即 Nabarro-Herring 低温蠕变机制。

1945—1949 年, Nabarro 在英国 Bristol 大学任研究员, 和 J. Eshelby、C. Frank 两位英国皇家学院院士一起在诺贝尔奖得主 N. F. Mott 教授手下工作。后来 Nabarro 去英国伯明翰大学担任冶金系讲师, 和 A. Cottrell 一同工作(北京科技大学柯俊院士毕业于这个学校并获得终身讲师位置, 与 Cottrell 是同事)。此时, Nabarro 已经是晶体位错和塑性方面的名人。1953 年, 南非约翰内斯堡的 Witwatersrand 大学邀请 Nabarro 担任物理系的教授和主任, 以提高大学的冶金研究水平, 帮助其发展工业。后来 Nabarro 成为南非物理研究会副主席, 并于 1971 年当选英国皇家学院院士。

1980 年, Nabarro 教授曾担任北荷兰出版公司的权威性著作《固体中的位错》(Dislocations in Solids)五卷本的总编辑。该书由全球相关领域专家撰写的研究文章组成, 其中 Nabarro 教授的论文(共发表过 163 篇)每卷的入选量可达二、三十篇。1996 年, 由于对晶体塑性的研究贡献, Nabarro 当选为美国工程院院士, 荣誉教授。在纪念 Nabarro 的报纸上, 记者这样写到: “从位置到位错, Nabarro 将障碍变成了机遇(From Locations to Dislocations: Frank Nabarro Turns Obstructions into Opportunities)”(图 2)。

Nabarro 于 1995 年获美国的 Mehl 奖^[4](图 3)。他报告的题目是《高温合金中的筏化》, 即高温合金 γ 相基体中 γ' 有序相析出物形状在应力作用下的演变规律及驱动力, 这是他在应变能影响析出相形貌工作的继续。

Kuhlmann-Wilsdorf 简介^[5]

上世纪 20 年代欧洲的科学家们, 如 G. Masing 从固体力学性质的观察和实验出发, M. Polanyi 从计

www.mrs.org/publications/bulletin
PROFILES & PERSPECTIVES

From Locations to Dislocations: Frank Nabarro Turns Obstructions into Opportunities

With quiet humor and a strong will, Professor Frank Reginald Nunes Nabarro has endured university politics and a country's battle with apartheid to become an unquestionable scientific force in his adopted country and world-wide. He brought Nabarro-Herring creep to materials science, and through his book on dislocation theory, showed himself to be one of the mathematical wizards of that field. He continued to go deeper into the field throughout his schooling and early career in the United Kingdom and his 50-plus years in South Africa at the University of the Witwatersrand, Johannesburg. Always questioning and probing, he is clear about what he knows and what seems beyond his or anyone's grasp.

When he heard that a young student in his department was eager to meet him, but felt unworthy to be with someone so celebrated, Frank promptly introduced himself and genuinely wondered how they had not made each other's acquaintance earlier. He wanted to understand her scientific work, aware that there is always something more to learn.

Frank Nabarro came to his first Materials Research Society meeting at age 87, attending the 2003 MRS Fall Meeting in Boston. When asked why, he apologetically admitted that an invitation to an event happening in parallel to the meeting tipped the balance, with his real goal being to meet with long-time friends and colleagues. Yet, as he has done so often in his life, he leveraged a chance circumstance into something more. I was unabashedly excited to be introduced to him by John Cahn, who knew me well from my work and the dislocation theory

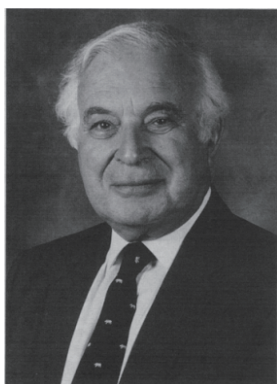


class. So you changed halfway through. If you were the worst at woodwork, you had to look after the glue pot. This is where I found myself and I thought, "This is no game at all," so I said, "Can I please do double chemistry?"

Trinity College; I got into New College, Oxford, which is a gorgeous college. Although it has some modern buildings, it has its nearly original medieval courtyard, a bit of the old city wall of Oxford, and the original chapel and hall and

图2 英国材料研究学会网站发布的报道 Nabarro 的文章

The 1995 Institute of Metals Lecture and Robert Franklin Mehl Award Rafting in Superalloys



FRANK R.N. NABARRO

图3 Nabarro 于1995年获美国 Mehl 奖报告题目及文章首页^[4]

算出发, 研究实际晶体力学强度远低于完整晶体理论强度的问题。这些都为1934年 G. I. Taylor、M. Polanyi、E. Orowan 三人提出位错模型打下基础, 而这些人出自哥廷根大学。

Doris Kuhlmann-Wilsdorf (1922—2010) 女士在德国哥廷根大学获得博士学位, 师从 G Masing 教授。Kuhlmann-Wilsdorf 是哥廷根大学物理所所长 R Becker 教授^[6] (提出著名的 Becker-Doering 形核理论) 的养女。哥廷根大学有着研究位错的悠久历

史, 如 L. Prandtl (空气动力学专家)、R. Becker (理论物理学家)、G Masing 和 P. Haasen (金属物理学家, Becker 教授的养子)。另外, E. Orowan、W. Boas 也是 Becker 在柏林技术大学的学生。

1949年 Kuhlmann-Wilsdorf 在 Nabarro 的推荐下在英国布里斯托大学 Mott 教授的物理实验室做博士后, 与 Nabarro 一同工作并研究位错。随后 Kuhlmann-Wilsdorf 与丈夫 Wilsdorf (具有出色的电镜使用及管理能力) 一同去南非 Witwatersrand 大学工作, 与在该大学担任物理系主任的 Nabarro 关系密切, 为 Nabarro 提供了诸多帮助^[1]。因不满南非的政治环境, 反对种族隔离, 1956年 Wilsdorf 夫妇离开南非到美国宾西法尼亚大学工作, 1963年又分别转到美国弗吉尼亚大学工程物理系任教授 (Kuhlmann-Wilsdorf) 和材料系任主任 (Wilsdorf)。Kuhlmann-Wilsdorf 的研究领域是塑性变形、晶体缺陷、金属表面和力学性能, 并且集中在加工硬化、摩擦学、熔化和电气接触。1984年美国 TMS-AIME 秋季年会在底特律举办, 在“位错理论50年”研讨会上 Kuhlmann-Wilsdorf 做了“1934—1984年间的加工硬化理论”总结报告, 也介绍了自己的不同加工硬化理论^[7]。她还提出了相似性原理 (Principle of similitude), 指出

形变量不同时, 形变胞状组织形变不变, 只是尺寸在均匀变小。

Kuhlmann-Wilsdorf 是美国工程院院士, 从 1947 年到 2000 年发表了近 300 篇文章。1988 年因其金属塑性变形理论而获得德国材料学会最高奖 Heyn Medal, 当时她报告题目是《通过低能位错结构理论 LEDS 构建本构方程从而推动金属工业》。2001 年因对工业机械的改进, 包括与电动刷有关的 6 项发明专利被提名为 Christopher J. Henderson 发明奖, 她发明的金属纤维小刷子对单极电器的成功研究很关键。2002 年获美国 Campbell 奖^[8], 见图 4。

Kuhlmann-Wilsdorf 去世后, 美国佛吉尼亚大学材料科学与工程系在院刊上发布纪念她的文章, 见

The 2002 Edward DeMille Campbell Memorial Lecture
ASM International

Advancing Towards Constitutive Equations for the Metal Industry via the LEDS Theory



DORIS KUHLMANN-WILSDORF

图 4 Kuhlmann-Wilsdorf 于 2002 年获美国 Campbell 奖报告首页^[8]

图 5。该校的一座咖啡厅大楼以她们夫妇名字命名, 大楼内有他们夫妇的大幅油画^[6]。

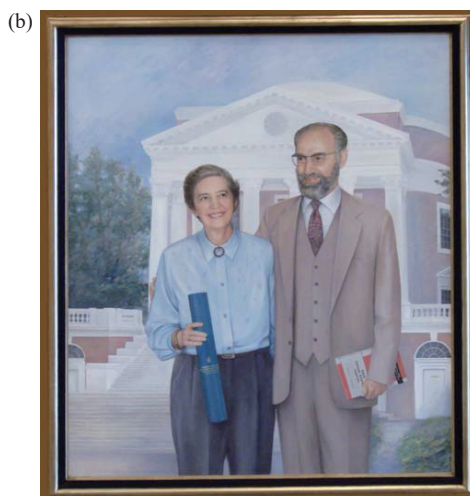
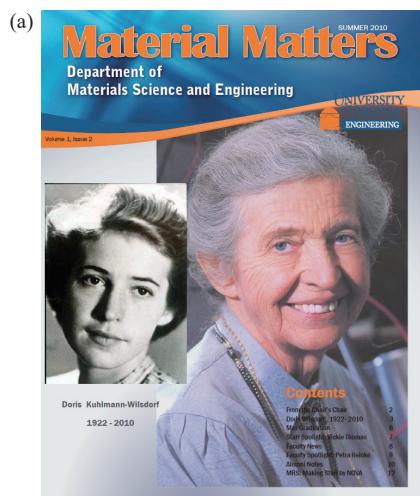


图 5 Kuhlmann-Wilsdorf 去世时系刊纪念她的画册封面 (a) 以及以他们夫妇命名的咖啡厅大楼中他们夫妇的肖像画 (b)^[6]

材料基课程中与两位大师相关的一些知识点

与 Nabarro 相关的知识点

1) Peierls-Nabarro 点阵应力。R. Peierls 于 1940 年^[9]提出简单立方晶体中刃型位错的点阵模型, 计算了应力场和位错能量, Nabarro^[10]于 1947 年又修正了 Peierls 的结果, 完成了著名的 Peierls-Nabarro 位错点阵模型。1997 年在 P-N 力理论提出的 50 周年时 Nabarro 专门撰文回顾了这段历史^[11]。

2) 位错塞积公式及塞积群中位错的分布。塞积

现象是位错与障碍 (晶界与相界) 的交互作用产物。位错源产生的同号位错不能跨过界面而堆积在障碍物附近, 从而产生应力集中, 可以诱发其它位置新的位错源, 也阻碍其它位错的运动, 或诱发微裂纹。一同在 Mott 教授领导下的布里斯托实验室的 J. D. Eshelby, F. C. Frank 和 F. R. N. Nabarro 三人于 1951 年定量解出塞积位错群中各位错的位置^[12]。Nabarro 虽然在文章中排名第三, 但他最先计算出的塞积群中的位错总数目, 只是 Eshelby 推导出更完善、更普适的表达^[1]。

3) Nabarro 于 1950 年先预测了晶界对流变应力的贡献反比于晶粒直径的平方根^[1,13] (即 Hall-Petch

关系), 后被 Hall (1951 年)、Petch (1953 年) 的实验证实。Nabarro 认为位错塞积群分布在取向不利的晶粒中, 位错运动的障碍有两类, 一类是靠热激活可以克服的弱障碍, 另一类是只能靠外力克服的障碍 (如晶界), 以塞积群为例就可建立晶界强化模型和对应的反比关系。但 Nabarro 的这篇文章是在 1949 年一个英国流变学者的学术会议上发表的, 因而受物理冶金方面的学者关注较少^[1]。

4) 固态转变时析出第二相形态与弹性应力场的关系式。这是在材料基教材第 10 章相变原理中介绍的。Nabarro 于 1940 年分析了固态相变时非共格核心形成时的弹性应变能阻力^[14-15], 定量求出圆盘状、球状、针状第二相对弹性应变能的不同贡献, 推导出教材中引用的弹性应变能关系式; 结果表明, 片状析出物弹性应变能最低, 球状的最高, 见图 6。

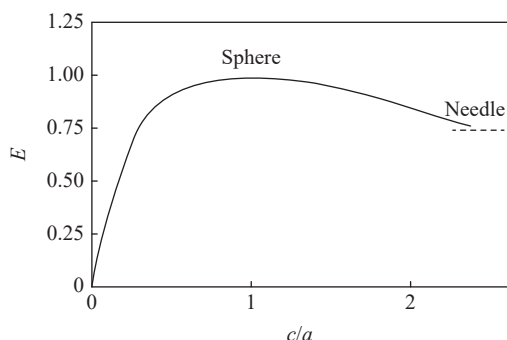


图 6 Nabarro 推导的弹性应变能形状影响因子 E 随椭圆长短轴比值 c/a 的变化关系^[14]

5) 碳在铁中产生的 Snoek 气团现象。Snoek 效应指溶质原子的扩散运动引起内耗峰, 由内耗峰可计算出这个过程的激活能。这与位错不一定相关。Snoek 气团是指间隙原子与应力场的交互作用而择优分布在顺着拉应力轴方向分布的间隙位置, 这个应力场可以不是位错产生。材料基课程中特指螺位错的切应力场导致的溶质原子在位错线上择优分布及富集现象。直接观察其存在是很难的, 但用内耗法可以间接的测出; 针对螺位错上富集的溶质原子进行理论分析 (Snoek 钉扎), 计算螺位错摆脱气团钉扎所需的外应力应该是多少。Nabarro 于 1948 年计算了在位错线择优富集溶质原子的 Snoek 气团^[16]。

6) 在晶体中, 柏氏回路用以定出位错的特征量——柏氏矢量 $\mathbf{b}$, 而在液晶中, 则用 Frank-Nabarro 回路来定出向错的特征量 s ^[17]。液晶也是 Nabarro 上世纪 70~80 年代研究的一个兴趣点。

材料基课程中与 Kuhlmann-Wilsdorf 有关的知识点

Kuhlmann-Wilsdorf 教授比 Nabarro 小 6 岁, 开始研究位错晚于 Nabarro, 她 1948 年在哥廷根大学博士毕业后, 位错理论已初步形成, 因此她主要研究位错对加工硬化及对应的形变组织变化的影响, 从 1947 年的第一篇文章到 2009 年去世的前一年, 持续一生研究加工硬化理论。但在材料基课程中很少有与她名字直接相关的知识点。

1) 伴生位错边界 (我们习惯叫界面) (Incidental dislocation boundaries, IDB) 与几何必需边界 (Geometrical necessary boundaries, GNB)。如图 7, 基于位错滑移产生的形变组织涉及一系列术语, 如位错缠结, 胞块 (CB), 稠密位错墙, 伴生位错界面, 几何必需界面, 显微带等等, 这些在材料基课程中进行了系统的介绍, 其中伴生位错界面 (IDB) 与几何必需界面 (GNB) 两个术语是 Kuhlmann-Wilsdorf 和 N Hansen 教授提出的^[18], Hansen 将其系统总结成形变组织的形成规律, 编在最新的第 5 版《物理冶金学》中。

2) 在 Eshelby、Nabarro 计算的塞积位错分布位置基础上, Kuhlmann-Wilsdorf 与其丈夫合作在 1958 年借助计算机计算了 80 个位错塞积时位错的分布并在实验上加以证实^[19]。

3) Kuhlmann-Wilsdorf^[20]1962 年提出形变产生新位错的不均匀分布 (位错缠结) 造成短程交互作用而产生加工硬化, 这是材料基教材中介绍的 4 种加工硬化机制中的最后一个, 前三个属于长程交互作用, 最后一个局部应力场 (短程交互作用) 引起的硬化。短程交互作用机制还有 Mott 提出的带割阶位错运动提高阻力的加工硬化机制。

4) 确定运动中的位错更有效地吸收空位^[19], 位错与点缺陷的交互作用中, 除了与溶质原子的交互作用 (Cottrell 气团等) 外, 也与空位点缺陷发生交互作用。她提出运动中的或刚停止运动的位错因摆

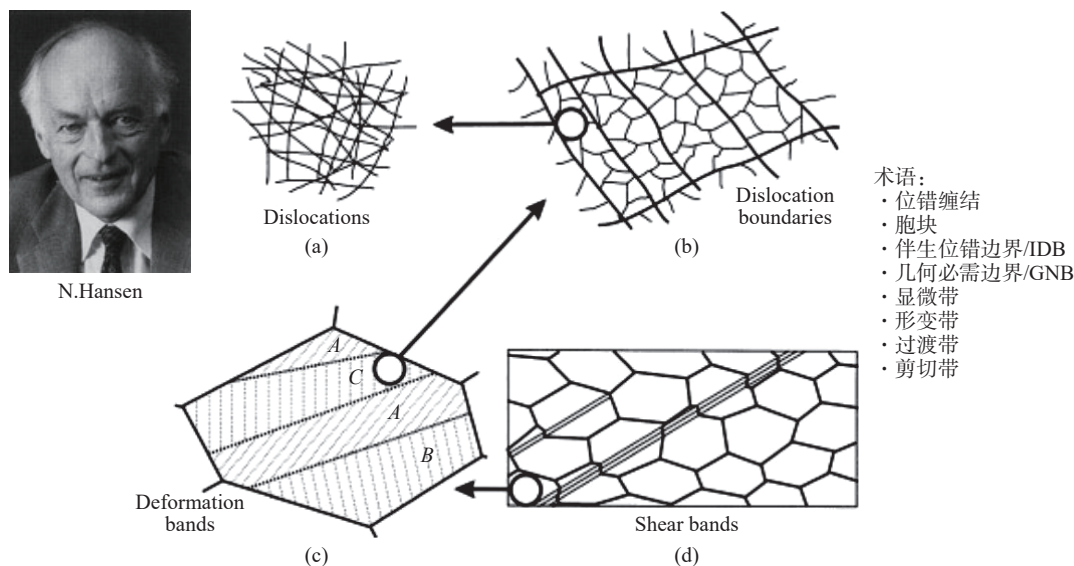


图7 材料基课程上介绍的由Mehl奖获得者N. Hansen提出的形变组织相关术语及演变过程

脱了溶质或杂质的吸附，更容易吸收周围的空位。

5) 加工硬化的低能位错结构 (Low energy dislocation structure, LEDS) 理论^[6,8,20]。在1962年提出的可以全面表述应力-应变曲线上各阶段的加工硬化理论后，LEDS理论也称Mesh-Length理论 (网格长度理论)，是后面LEDS理论最初的名字。Kuhlmann-Wilsdorf于1987年又提出更系统的LEDS理论。LEDS理论是普适的低能结构 (Low energy structure, LES) 理论中适合于位错结构的一种特殊，普适的低能结构理论适用于各种不同形变机制，包括塑料在内的各种材料的形变。LEDS理论认为，随形变量的加大，形变过程中要开动不同滑移系，位错交互作用、增殖等会演变成各种组织，如位错缠结、稠密位错墙、小角度晶界、显微带等，位错之间总是发生强烈的交互作用，但这些过程总是伴随系统能量降低的过程，随位错密度增加，高位错密度区和低位错密度区组成的类似等轴亚晶组织特点不变，只是平均尺度在减小，具有相似性 (Similitude)，这是从能量学的角度说明为何是这样的组织演变。

两人的友谊

Nabarro成名很早，1948年在斯图加特市召开德国材料学会DGM年会时，Nabarro是专门受邀的国外参会者，会议期间，Kuhlmann-Wilsdorf向Nabarro介绍了自己的理论，并利用自己较好的英语

水平充当翻译，帮助不太会英语的参会德国著名学者及行政人员与Nabarro进行有效沟通，从此建立了2人之间的友谊。经Nabarro介绍她进入以位错研究著称的英国布里斯托大学Mott实验室。因此Nabarro对Kuhlmann-Wilsdorf在位错领域的研究有引领的作用。此外，两人共同在南非的Witwatersrand大学工作数年。1962年Kuhlmann-Wilsdorf提出“网格长度”加工硬化理论 (Mesh-Length theory)，后来演变为低能位错结构的加工硬化理论。因这个理论没能很好地被当时加工硬化理论主流派接受 (如Mott, Nabarro, Seeger, Frank, Cottrell, Basinski等)，她在多篇文章中为自己的理论特色及其它理论的不足之处进行了论证^[6-8,21]，例如在2009年材料类权威期刊《材料科学进展》 (Progress in materials science) 中发表的纪念Nabarro的文章^[6]中 (图8)。这篇文章的第一部分是回忆两人的友谊，她认为Nabarro对加工硬化理论影响很大，但Nabarro反对她的低能位错结构理论 (LEDS)。LEDS理论基于Taylor早在1934年就提出的加工硬化理论，认为所有固体的塑性形变，不论是不是以位错机制进行，都会按牛顿第三定律那样保持力的平衡，逐渐向自由能最低状态转变。这种理论会取代Nabarro支持的位错自组织 (“Self-organizing dislocation structures” approach, SODS) 理论，但Nabarro认为这种理论难以理解。



The impact of F.R.N. Nabarro on the LEDS theory of workhardening

Doris Kuhlmann-Wilsdorf*

Applied Science Emerita, Department of Materials Science and Engineering, University of Virginia,
Charlottesville, VA 22904, United States

Contents

1. Part I: personal reminiscences	708
1.1. Germany at the end of WWII	708
1.2. The background of post WWII research on plastic deformation	709
1.3. First personal and professional interactions with F.R.N. Nabarro	710
2. Part II: development of workhardening theory	715
2.1. The beginnings of post WWII workhardening theory	715
2.2. The Peierls-Nabarro force, dislocation uncertainty and melting	717
2.3. The mesh-length theory and the ICMA conference series	718
2.4. Development of the LEDS theory	720
2.4.1. Determining the low-energy form of dislocation cells via computer calculations	720
2.4.2. Dependence of cell morphology on pressure and strain rate	721
2.4.3. LEDS formed in fatigue	722
2.4.4. The Stage I to Stage II LEDS transformation	723
2.4.5. Understanding cells and cell blocks via the LEDS hypothesis	725
2.4.6. Worksoftening and grain boundary substance studied with H.G.F. Wilsdorf	725
2.4.7. Deformation band studies with E. Aernoudt, E. A. Starke, Jr. and K. Winey	726
2.4.8. Dislocations/lattice vacancy interactions: "mushrooming" and planar vs. wavy glide	727
2.4.9. The onset of Stage IV	728
2.4.10. The speed dependence of the flow stress and link length distribution in cell walls	728
2.4.11. Recovery	729
2.4.12. Alloy hardening - solid solutions and precipitates	730
2.4.13. Grain boundary hardening - two versions of the Hall-Petch relationship	731
2.4.14. Conferences and final collaboration with Frank Nabarro	732
3. Part 3: workhardening theory in light of Kuhn's "Structure of Scientific Revolutions"	733
References	735

图8 Kuhlmann-Wilsdorf在 *Progress in Materials Science* 上发表纪念 Nabarro 的文章封面及目录^[6]。

两位大师到北京科技大学的访问

北京科技大学金属物理专业的柯俊院士从改革开放的一开始就与国际各领域的专家保持密切联系，先后邀请了 Kuhlmann-Wilsdorf 和 Nabarro 来北京科技大学访问，但 2 人来北京科技大学的时间相差近 20 年。

Nabarro 于 2006 年登上北京科技大学的材料名师讲坛

2006 年 6 月 Nabarro 到中国西安参加第 14 届材料的强度国际会议时，柯俊院士邀请其来北京科技大学访问，在中国材料名师讲坛上做了题为《高强度金属化合物的位错运动——碳化钨的滑移研究》的报告，徐金梧校长向其赠送了纪念品，当时的万发荣教授，王戈副校长，谢建新院长，柯俊院士参加了报告会（图 9）。

图 10 给出我国金属物理学家、内耗研究大师葛庭燧先生于 1985 年在日本的国际位错大会上与 Nabarro 的合照^[22]，是我国科学家与国际位错研究大



图 9 (a) 材料名师讲坛报告时的合影，前排 Nabarro 先生，后排从左到右：万发荣教授、王戈副校长、徐金梧校长、柯俊院士、谢建新院士；(b) 徐金梧校长向 Nabarro 教授赠送纪念品



图 10 1984 年在日本召开的固体中位错的国际会议上 Nabarro (左) 与我国金属物理学家葛庭燧先生 (中) 的合照^[22]

师 Nabarro 学术共同研究的见证。葛庭燧先生研究各种晶体缺陷，自然也研究位错。而他擅长的内耗法可以研究并区分点缺陷、线缺陷、面缺陷本身的动

力学行为及它们间交互作用行为。

Kuhlmann-Wilsdorf 于 80 年代来北京科技大学访问

图 11(a) 为北京科技大学金属物理专业柳得棹教授 1981 年夏季在北京作为柯俊院士研究组成员，接待了 Wilsdorf 夫妇时的合影，展示北京科技大学金属物理专业很早就与国外金属材料基础研究领域的密切合作。柳教授回忆说，Kuhlmann-Wilsdorf 教授参观北京科技大学实验室时，对各种先进的进口仪器，并不怎么觉得特殊，相反对金属物理专业研究生自己制作的透射电镜样品制备双喷仪很感兴趣，

并大加赞赏。随后，柳得棹教授于 1983 年去美国弗吉尼亚大学回访了 Kuhlmann-Wilsdorf 教授，参观了大学校园，见图 11(b)，并在她家做客。柳得棹教授还回忆说，Kuhlmann-Wilsdorf 教授非常刻苦，实验能力很强。虽然当时北京科技大学还没有设立中国材料名师讲坛，也未能找到相关的学术报告记录，似乎有些遗憾，但这些点滴的记载也构成了“材料基课程-北京科技大学材料人物历史-国际位错-形变领域大师”密切相关的一个历史事件，值得保留下来。

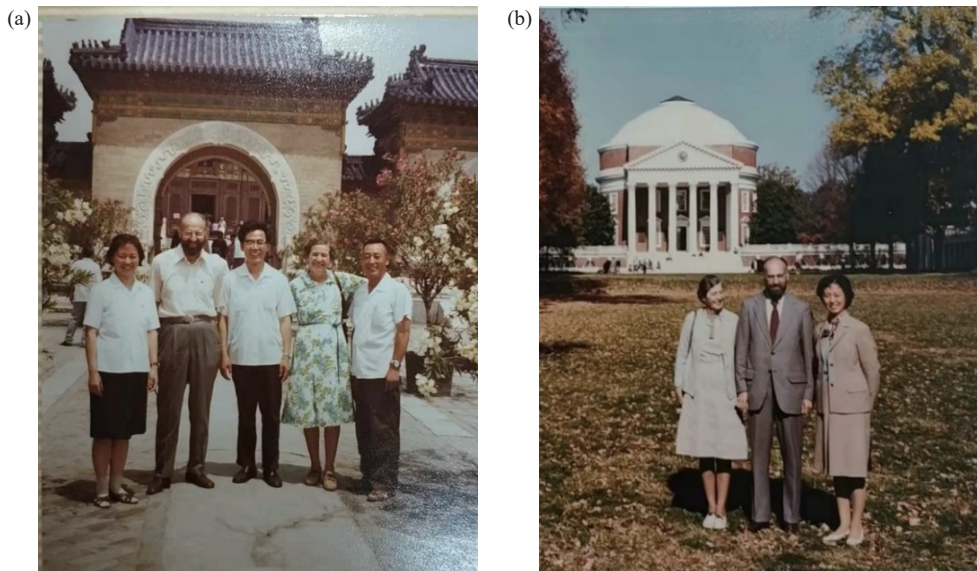


图 11 (a) 1981 年夏季 Wilsdorf 教授夫妇访问北京科技大学期间参观十三陵合影，从左一至左四依次为：柳得棹，Wilsdorf 教授，高佩钰（北京科技大学外事处领导），Kuhlmann-Wilsdorf 教授；(b) 柳得棹（右一）教授 1983 年应邀到 Kuhlmann-Wilsdorf 教授的美国弗吉尼亚大学访问

结束语

1) 位错理论研究大师 Nabarro 和加工硬化的位错结构理论研究大师 Kuhlmann-Wilsdorf 都是材料基课程一些知识点的发现者，都来过北京科技大学访问交流，与北京科技大学教师（特别是柯俊院士）、学生有交流互动，显示了北京科技大学国际交往起步早、国际影响力高的特点，相关历史是又一个“材料基知识点-北京科技大学材料学者-国际材料大师”相互关联的课程思政案例。

2) 经过进一步查阅，可以看到材料基课程的很多知识点都与 Nabarro 先生的研究成果相连，经过总结使我们更有效地理解他的成果和贡献，提升教学

效果。同样，Kuhlmann-Wilsdorf 教授在 R. Cahn 的不朽之作《物理冶金学》一书中的位错一章的总结撰写及持续一生对加工硬化理论的追求为学生、青年学者及教材编写人员提供很好的参照。

3) 从材料领域顶级刊物的综述文献中领略了两人深厚的友谊，两人在加工硬化理论上的不同观点及处理方式，两人背后的位错研究历史上最著名的 2 个学术机构（即英国的布里斯托大学和德国的哥廷根大学），提醒我们对不同的加工硬化理论的再认识。

致谢：感谢北京科技大学柳得棹教授提供的她与 Wilsdorf 教授夫妇的合影照片。

参考文献

- [1] Brown L M, Frank Reginald Nunes Nabarro MBE. 7 March 1916—20 July 2006. *Biogr Mems Fell R Soc*. 2010, 56: 273
- [2] Nabarro F R N. *Theory of crystal dislocations*. London: Oxford at the Clarendon press, 1967
- [3] Nabarro F R N. Mathematical theory of stationary dislocations. *Adv Phys*, 1952, 1(3): 269
- [4] Nabarro F R N. Rafting in superalloys. *Metall Mater Trans A*. 1996, 27: 513
- [5] Department of Materials Science and Engineering, University of Virginia. Doris Wilsdorf: 1922—2010. *Mater Matters*, 2010, 1(2): 3
- [6] Kuhlmann-Wilsdorf D. The impact of F. R. N. Nabarro on the LEDS theory of work hardening. *Prog Mater Sci*. 2009, 54(6): 707
- [7] Kuhlmann-Wilsdorf D. Theory of Workhardening 1934—1984. *Metall Mater Trans A*, 1985, 16: 2091
- [8] Kuhlmann-Wilsdorf D. Advancing towards constitutive equations for the metal industry via the LEDS theory. *Metall Mater Trans A*, 2004, 35: 369
- [9] Peierls R. The size of a dislocation. *Proc Phys Soc*, 1940, 52(1): 34
- [10] Nabarro F R N. Dislocations in a simple cubic lattice. *Proc Phys Soc*, 1947, 59(2): 256
- [11] Nabarro F R N. Fifty-year study of the Peierls–Nabarro stress. *Metall Mater Trans A*, 1997, 234/236: 67.
- [12] Eshelby J D, Frank F C, Nabarro F R N. XLI. The equilibrium of linear arrays of dislocations. *Philos mag*, 1951, 42(327): 351
- [13] Nabarro F R N. Influence of grain boundaries on the plastic properties of metals//Harrison V G W. *Recent Developments in Rheology*, London: United Trade Press Ltd, 1950
- [14] Nabarro F R N. The strains produced by precipitation in alloys, *Proc R Soc Lond A*. 1940, 175(963): 519
- [15] Nabarro F R N. The influence of elastic strain on the shape of particles segregating in an alloy. *Proc Phys Soc*, 1940, 52(1): 90
- [16] Nabarro F R N. Mechanical effects of carbon in iron//*The Physical Society Bristol Conference*. Bristol, 1948
- [17] Allen S M, Thomas E L. *The Structure of Materials*. New York: John Wiley, 1999
- [18] Kuhlmann-Wilsdorf D, Hansen N. Geometrically necessary, incidental and subgrain boundaries. *Scripta Metal Mater*, 1991, 25(7): 1557
- [19] Cahn R W. *Physical Metallurgy*. 5th Ed. Amsterdam: North-Holland publishing company, 1970
- [20] Kuhlmann-Wilsdorf D. A new theory of workhardening. *Trans Met Soc AIME*, 1962, 224: 1047
- [21] Kuhlmann-Wilsdorf D. Energy minimization of dislocations in low-energy dislocation structures. *Phys Status Solidi A*, 1987, 104(1): 121
- [22] 刘深. 中国科学院院士传记：葛庭燧传. 北京：科学出版社，2010

基金项目：北京科技大学教改项目“北京科技大学精品在线开放课程建设”（KC2023ZXKF04）。

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。在国内外期刊发表科学论文430多篇，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。