

与 Hillert 教授有关材料科学基础课程知识点及他与北京科技大学的科研交流

Some Concepts in the Course of Fundamentals of Materials Science Related to Prof Hillert and His Scientific Communication with University of Science and Technology Beijing

供稿|杨平 / YANG Ping

内
容
导
读

瑞典皇家工学院的 M. Hillert 教授是北京科技大学最早聘请的名誉教授之一，他的研究领域很宽，材料科学基础（简称材科基）课程的一些知识点与他有关，如扩散控制的新相长大速度公式、晶粒长大原理、调幅分解及计算相图等。早在 1980 年他就来北京科技大学讲学，基于其讲稿翻译的《合金扩散与热力学》一书对我国材料工作者及学生产生重要影响。他在热力学计算相图方面的原创工作对北京科技大学相关领域产生重要影响，在计算相图方面还亲自培养了北京科技大学青年教师。本文基于材料科学基础课程的学习及北京科技大学的国际交往方面分析讨论了 Hillert 教授的一些贡献，希望对课程建设、青年教师对相关领域的背景了解有所帮助。

引言

瑞典皇家工学院的 Mats Hillert 教授的研究方向很多，比如相变、扩散、热力学、计算相图、调幅分解、晶粒长大等。材料科学基础（简称材科基）课程中至少 4 个知识点与他的学术贡献有关，但并未都冠以他的名字，因为这些知识点不一定是他一个人的研究成果，而是多名学者共同的成就，很难界定谁是最先发现者。此外，Hillert 教授是北京

科技大学 1980 年最早聘任的名誉教授之一，他多次来北京科技大学访问。北京科技大学于 1984 年与他所在的瑞典皇家工学院建立了合作关系，一些青年教师，研究生被学校派往这个大学进修或攻读学位。因此，Hillert 教授在北京科技大学的教学和人才培养上也做出了重要贡献。本文讨论了材料科学基础课程中一些与他相关的知识点，分析了他与北京科技大学科研、教学及人才培养方面的一些贡献，希望对学生和任课教师夯实专业基础知识、拓

展科研思路、了解课程历史有所帮助。图1给出本文讨论的思路示意图。

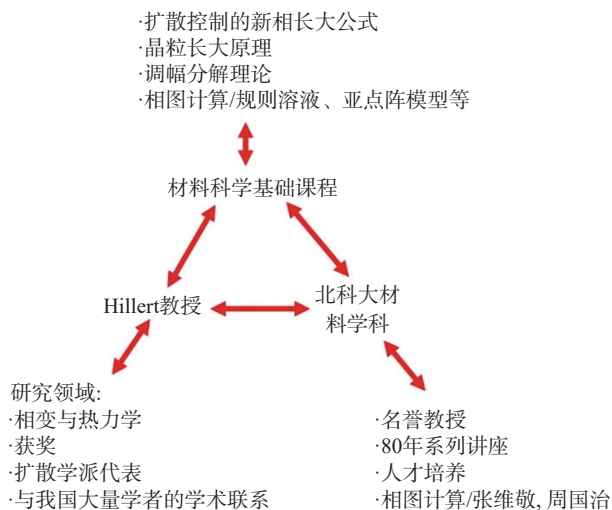


图1 材料科学基础教学、Hillert教授与北京科技大学材料学科发展三者关系示意图

Hillert教授的研究生涯简介

Hillert教授（1924—2022）于1947年在瑞典Gothenburg市的Chalmers技术大学获化学工程专业学士学位，1948年在皇家工学院做研究人员，1956年在美国麻省理工学院（MIT）获得博士学位，导师是马氏体相变大师M. Cohen教授，博士期间跟随Carl Wagner教授学习热力学。1961年Hillert成为瑞典皇家工学院教授，1973年当选瑞典皇家工程院院士，1982年当选瑞典皇家科学院院士，1991年荣誉退休，退休后依然从事研究。2022年12月他的接任者、学生J. Ågren教授在一个研讨会上对Hillert教授的科学及教学上的贡献进行了专门的介绍。Hillert教授的研究方向主要集中在相变和热力学2个大方向上，两个方面相互融合。相变方面，他研究了扩散型相变、不连续脱溶及扩散诱导晶界迁移、块形转变、马氏体相变、晶粒长大、调幅分解、迁移界面的局部状态，溶质对迁移晶界的拖曳力等；热力学方面，他除了将经典热力学理论应用在各种相变过程外，还研究了磁效应对自由能贡献的热力学计算方法，提出计算单相自由能的亚点阵模型，也称化合物-能量模型；另外在相图计算Calphad方法及理论，欧洲热力学数据库科

学组织（SGTE）相关活动中起领导作用。

1973年在美国波士顿举行了第一届Calphad会议，会议由L. Kaufman主持，包括H. Ansara, P. Spencer, M. Hillert, J. Cahn等13人参加，以后每年举办。首届参会的13人为早期的CALPHADIANS^[1]，Kaufman和Hillert是主要领导者（图2）。Calphad组织在Gibbs诞生150年（1989年）设立了Gibbs Triangle奖，每4~5年颁发一次，Hillert教授于2000年获得此奖。2022年98岁高龄的Hillert教授依然参加了在瑞典皇家工学院召开的国际Calphad会议，足见他对相图计算这个他亲自参与创建的组织活动的热爱，令人敬佩。



图2 一些早期的CALPHADIANS，后排左二是Hillert教授；前排左二B. Sundman，左三H. Ansara，右三B. Janssen，右二A. Dinsdale，右一H. L. Lukas^[1]

Hillert教授在1974年就获得Mehl奖（图3），他是Mehl奖设立后的第2位获奖者。在其获奖报告中Hillert教授分别以Fe-C体系相变、纯铁相变、低碳铁合金相变、无扩散型相变为例，介绍了扩散过程控制的相变和界面过程控制的相变，定量表述了局部平衡问题、溶质对界面迁移的拖曳作用和交互作用，给出相变速度表达式。他在1999年获W. Hume-Rothery奖，获奖题目是“合金中溶质对界面迁移的作用”，这个内容及Mehl讲座报告都与笔者前文提到的J. Cahn和K. Lücke的工作相似^[2]。2004年他在法国Annecy召开的第二届再结晶及晶粒长大国际会议上获得Smith奖，他在晶粒长大定量规律上的贡献对笔者长期从事取向硅钢晶粒长大过程的研究有重要作用，这在笔者前期文献^[3]已做介绍。Hillert教授是Chalmers技术大学、Grenoble技术研究所、挪威Trondheim大学、北京科技大学

和东北大学的名誉教授。国际固态相变系列会议于2010年设立了 Hillert-Cahn 讲座奖,以表彰两位学者对金属和合金相变科学发展所做出的杰出贡献。2014年北京大学出版社出版 Hillert 教授的著作《相平衡、相图和相变——其热力学基础(第二版)》(英文影印版),原书是剑桥大学出版社在2008年出版,见图4。该书为专业人员和高年级学生科研与教学的重要参考书,体现了 Hillert 教授对教学和人才培养方面的重要贡献。

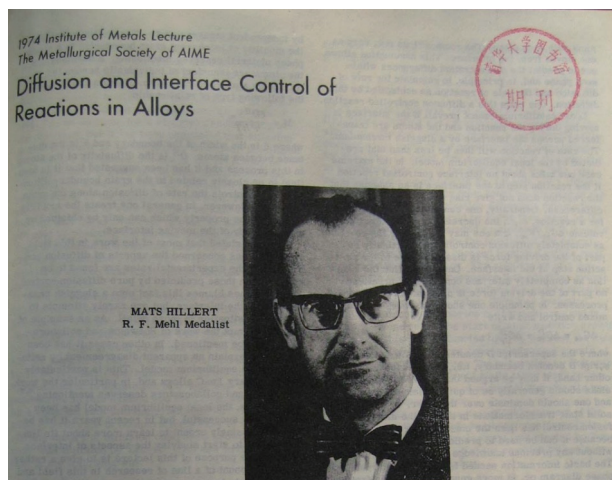


图3 Hillert 教授1974年获Mehl奖的文章首页

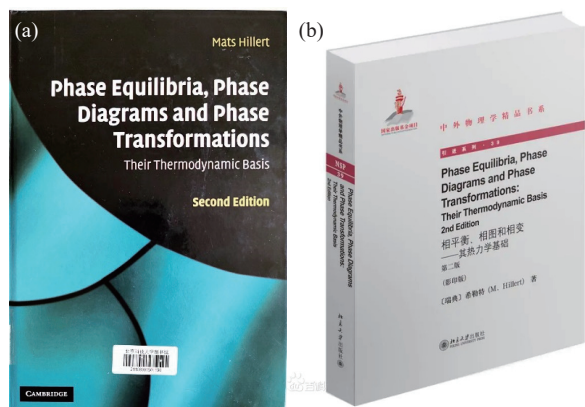


图4 Hillert 教授的专著《相平衡、相图与相变》原版(a)及影印版封面(b)

材料科学基础课程中与 Hillert 教授相关的一些知识

在材料科学基础课程中至少有4个知识点与 Hillert 教授有关,主要是:(1)扩散型相变新相长

大公式,即 Zener-Hillert 方程;(2)再结晶后的晶粒长大原理;(3)调幅分解理论;(4)热力学相图计算模型(规则溶液的亚点阵模型)。

扩散型相变新相长大的 Zener-Hillert 方程

美国物理学家 C. Zener 于1949年^[4]和瑞典材料学家 M. Hillert 于1957年^[5]推导了扩散过程控制时新相的长大速度方程,称为 Zener-Hillert 模型。材料科学基础课程及教材中只给出 Zener 推导出的片状新相侧向增厚变宽时长大速度公式,见式(1),式中 v 为长大速度, D 为扩散系数, y_d 为浓度变化区域长度, C_0 、 C_α 、 C_β 分别为合金原始浓度、母相、新相平衡浓度;如果考虑侧向尖端生长,就要考虑界面曲率的影响, Hillert 对该过程进行了修正,见式(2),式中 C 为常数, r 为曲率半径, r_c 为临界曲率半径^[6],但相关公式并未在材料科学基础教材中给出。不过 Zener-Hillert 方程类似于共析分解时片层间距变小,考虑相界面阻力项时的表达式,这个式子在课程中进行了推导。在相变研究领域,人们一直提及 Zener-Hillert 方程^[7]。

$$v = \frac{D(C_0 - C_\alpha)}{y_d(C_\beta - C_\alpha)} \quad (1)$$

$$v = \frac{D(C_0 - C_\alpha)}{C(C_\beta - C_\alpha)r} \left(1 - \frac{r_c}{r}\right) \quad (2)$$

$$v_{\max} = \frac{D(C_0 - C_\alpha)}{2C(C_\beta - C_\alpha)r_c} \quad (3)$$

晶粒长大过程示意图及晶粒长大速度公式

描述晶粒长大的定量公式有不少,课堂上为简化,仅推导了最简单的 Beck 方程,即晶粒尺寸与时间的 $1/2$ 次方的抛物线关系,与原子扩散距离与时间的关系相同。随后引用了 Hillert 在1965年 *Acta Metall* 上发表的表示微观机制的长大示意图^[8](图5)。在二维截面上,多于六条边的晶粒通常长大,而少于六条边的晶粒将消失。

Hillert 推导出的定量公式很好地说明了存在一个晶粒尺寸临界值 R_{cr} 。

$$\frac{dR}{dt} = \alpha M \sigma \left(\frac{1}{R_{cr}} - \frac{1}{R} \right) \quad (4)$$

式中, α 为晶界常数, M 、 σ 为晶界迁移率和比晶界面能, R 为晶粒尺寸, t 为时间。可见,小于临界尺寸

的晶粒的长大速度是负值，即消失。同时还显示比界面能及晶界迁移率影响长大速度。此外，课程上还提到 von Neumann 的晶粒长大公式，它与晶粒的边数相关，多于 6 条边的晶粒长大，少于 6 条边的晶粒缩小。同样教材中并未给出 Hillert 的晶粒长大速度公式，但其意义及对笔者科研的影响在文献 [3] 中有详细介绍。

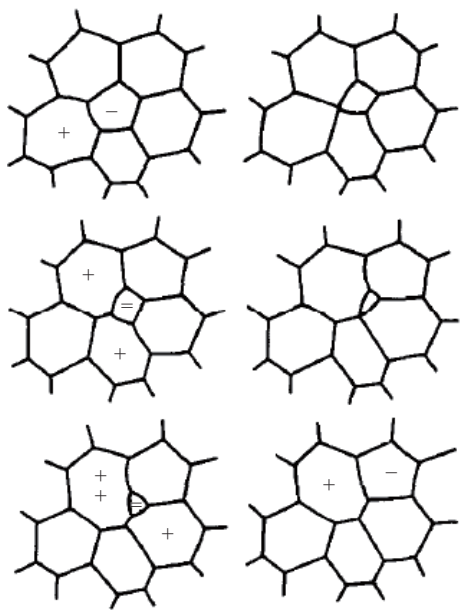


图 5 课程上介绍的 Hillert 晶粒长大微观机制的示意图^[8]

调幅分解理论

调幅分解理论的主要贡献者是 J. Cahn 和 J. E. Hilliard，两人在 1958 年创立了调幅分解的现代理论^[9-10]，这是材料科学基础课程所介绍的内容，笔者在文献 [2] 中也做了进一步讨论。其实诺贝尔奖得主、荷兰科学家 Johannes van der Waals 早在其博士论文中研究液-气相变，就首次提出形核方式为调幅（Spinodal）相变；1943 年 V. Daniel 和 H. Lipson 在英国剑桥大学的卡文迪许（Cavendish）实验室也研究过 Cu-Ni-Fe 中的调幅分解过程^[11]，但都未建立系统的理论。Ägren 教授在 2022 年 12 月的一个研讨会上指出，Hillert 教授 1956 年完成的博士论文题目是金属固溶体中形核理论，就是对 W 形的自由能曲线，取二阶导数，找到拐点，对应的就是失稳分解/调幅分解过程。1956 年，与 Hillert 在一个办公室的 J. Hilliard 在通用电气（GE）公司与 J. Cahn 见面

时将 Hillert 的博士论文推荐给 Cahn。两人受启发，随后以连续函数形式表达了分解的数学关系，1958 年发表了文章，并在文章中提到 Hillert 的论文并对其进行了致谢，确认其想法受 Hillert 论文的启发。其实 Hillert 也在 Cahn 投稿前半年就投出了自己的稿件，但在 1961 年才发表^[12]。Cahn 也提及他有 Hillert 文章发表前的文稿。由于 Hillert 的贡献，现在调幅分解理论也被称为 Hillert-Cahn-Hilliard 理论。

相图计算中的规则溶液表达式及亚点阵模型

材料科学基础课程中相图一章由相图的几何构造及相图的热力学基础两部分构成。在相图的热力学基础中先以二元合金为例介绍了单相自由能的计算方法，介绍了由规则溶液模型计算原子间的交互作用参数，确定超额自由能，这是单相自由能的关键组成部分，有了各相的自由能与温度的关系曲线，通过公切线法则就能确定相图了。J. H. Hildebrand 于 20 世纪 20 年代先提出规则溶液^[13]的定义，将满足 $G_m = x_A \cdot x_B \cdot I_{AB}$ （ x_A 、 x_B 为 A、B 组元原子分数， I_{AB} 为相互作用系数，为常数）^[14] 的溶液称为规则溶液，有教材认为这个表达式是 Hillert 提出的^[15]。1970 年 Hillert 提出规则溶液的双亚点阵模型^[16-17]，其大致含义是：将 AB 型中间相或离子熔体看成由 A、B 离子组成的两个亚点阵，既考虑了置换式溶质原子，又考虑了间隙式溶质原子，也考虑了空位，再按规则溶液模型计算出各相自由能。1979—1981 年间 Hillert 发表多元复杂系统的相平衡计算方法，B. Jansson 采用这个方法编制了第一版 Thermo-Calc 软件，这个商用软件应该是我国使用最多的热力学相图计算软件，Hillert 是最早的计算相图推动者之一，是这一领域的领军人物。

此外，笔者认为 Hillert 教授以下几个方面成果也值得在课程上简单介绍：1）局部平衡与仲平衡概念。这个概念早期是由瑞典材料学家 Hultgren 提出的，这是相图、相平衡与相变研究者常用的概念，对于总结区分各类相变（如珠光体、铁素体、魏氏铁素体、贝氏体、马氏体）很方便。所谓局部平衡是相变时在界面处两相的代位合金元素和间隙原子都对应平衡关系（但远离界面处不是平衡关系），仲平衡是界面上代位原子成分不是平衡关系，而间隙原子成分对应平衡关系。2）一次渗碳体

三维形貌的手绘图。Hillert 早年也研究了白口铁凝固时莱氏体形成的三维组织形貌^[18]，通过不同成分，不同样品截面的组织观察，他手绘了一次渗碳体及共晶奥氏体的三维空间形貌示意图（图 6）。可见该示意图非常精致、细腻，这是我们材料科学基础实验课学生应该学习的，虽然通过拍照可以很快、很轻松地得到组织照片，但手画这种示意图能给人更深刻的印象，先画哪些、后画哪些也是有讲究的（应按照生长顺序画图，而不是相反）。3）魏氏铁素体片扩散控制的长大公式。Hillert 是扩散学派，但是英国的 J. W. Christian 和 H. K. D. H. Bhadeshia 教授等认为魏氏铁素体是切变形成的，是切变学派。4）胞状脱溶与共析分解的差异。Hillert 在 20 世纪 60~70 年代研究胞状脱溶时，非常强调它与共析分解的差异，因为早期不少学者认为两者相似。

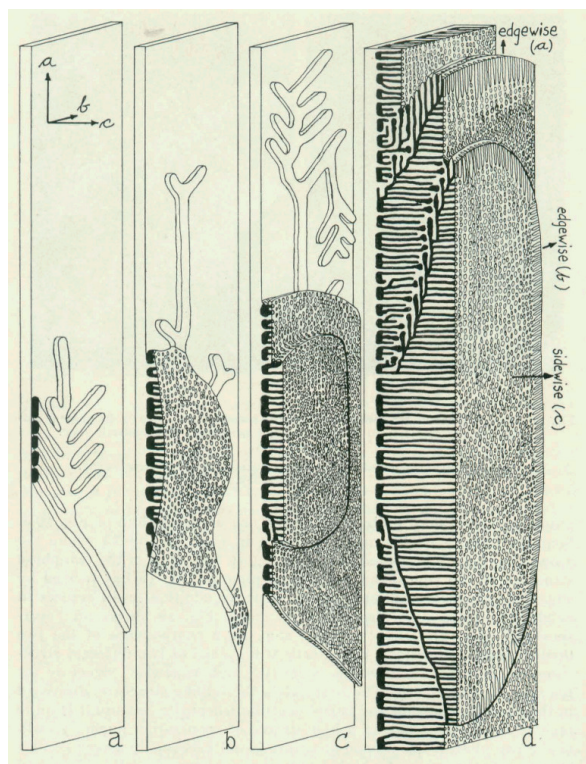


图 6 1960 年在一次渗碳体片上形成共晶莱氏体的模型（黑色为奥氏体）^[18]

Hillert 教授对北京科技大学的科研、教学与人才培养方面的贡献

1980 年 5 月 26 日、29 日，经教育部、冶金部

批准，北京科技大学分别授予 Morris Cohen、Mats Hillert 名誉教授。Cohen 教授为世界著名金属学家、美国科学院院士、麻省理工学院（MIT）终身教授，也是 Hillert 在 MIT 读博的导师，这些在文献 [2] 中进行了介绍。图 7 是赖和怡、刘国勋两位先生根据 Hillert 教授于 1980 年 3 月至 5 月在北京科技大学讲学时使用的两份讲义翻译，并于 1984 年由冶金工业出版社出版的《合金扩散和热力学》。该书是高校物理冶金专业研究生和高年级学生的参考教材，笔者硕士研究生阶段的扩散课程由赖和怡先生讲授，他就是以 Hillert 的讲稿为主要授课内容，并称 Hillert 教授是自己的老师（赖先生在瑞典皇家工学院 Hillert 教授研究组进修过）。这本译著对我国材料专业教学与人才培养做出了贡献。

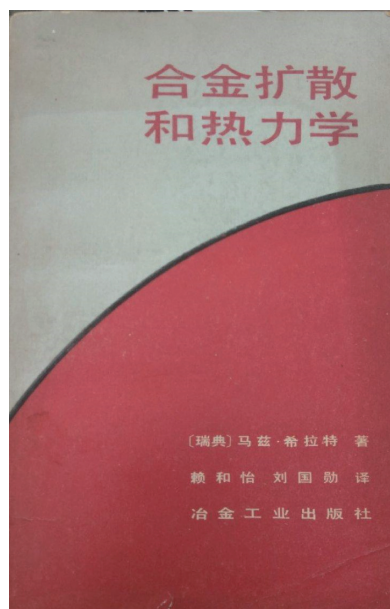


图 7 Hillert 著、赖和怡和刘国勋译的《合金扩散和热力学》一书封面。

1984-12-04，北京科技大学与瑞典斯德哥尔摩皇家工学院（Royal Institute Technology）签订两校合作与交流协议书。笔者所在的“相 77 级”的黄伟明女士跟随 Hillert 教授攻读博士学位。图 8 为黄伟明在读博期间与 Hillert 教授讨论学术问题时的照片及她的博士论文首页，显示 Hillert 教授众多研究领域中的一个——热力学相图计算方向。黄伟明女士的先生刘梓葵教授 1985 年北京科技大学硕士毕业，现为美国宾夕法尼亚州立大学材料系教授，是国际著

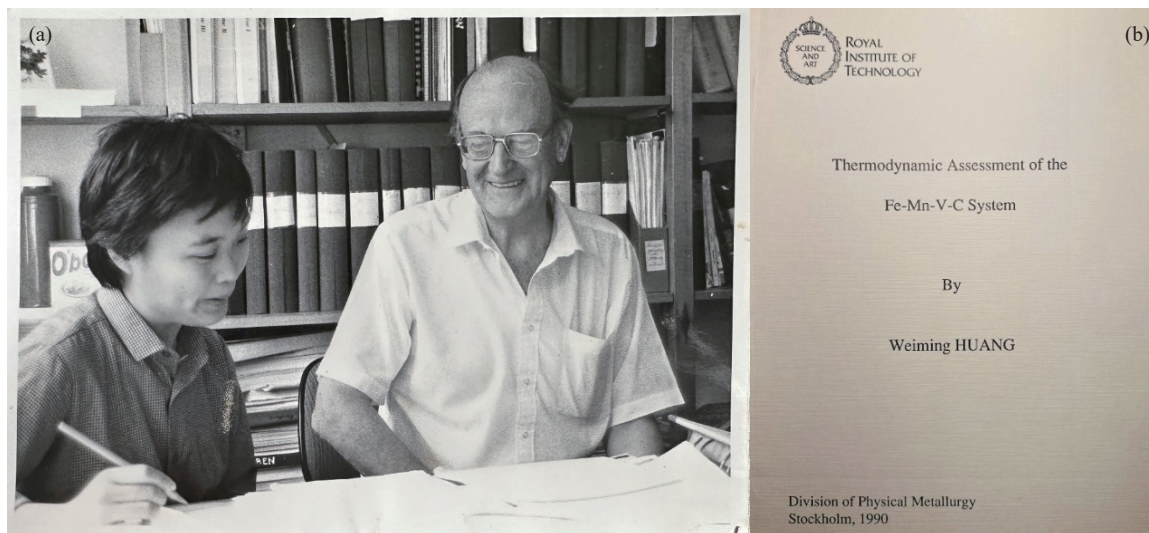


图8 北京科技大学“相 77 级”的黄伟明女士在瑞典 Hillert 教授指导下一起研讨的情景 (a) 及博士论文首页 (b) (照片及论文首页由黄伟明女士提供)

名相图计算领域的期刊 Calphad 主编。他于 2014 年获得 Gibbs 奖, 2015 年获得中科院李熏讲座奖, 2018 年获得美国 Hume-Rothery 奖; 提出“材料基因”的理念, 以及“叠熵” (Zentropy, 也被译为综熵) 的理念^[19]。她们一家与 Hillert 一家有非常深厚的友谊。Hillert 教授参加的国际学术交流主要是在扩散型相变领域, 笔者收集到不少国内学者与他的合影, 显示了其与我国广大学者深厚的友谊。

北京科技大学的张维敬教授于 1993 年到瑞典皇家工学院 Hillert 教授组内进行合作研究。据我国相图计算及热力学研究专家、东北大学郝士明教授介

绍, 张维敬教授在中国计算相图事业的从无到有、从小到大, 从弱到强的发展中做出了不可磨灭的贡献。张维敬教授从 1981 年的中国物理学会相图专业委员会的第一届开始, 一直担任副主任工作, 1996—1999 年担任相图专业委员会主任, 20 世纪 80 年代初, 他开始自学计算机, 并进入计算相图的领域。1998 年 5 月张维敬教授及其研究组主办了第 27 届国际相图计算 Calphad 会议 (见图 9(a) 的论文集首页), 这是该会议第一次进入我国。会议受到师昌绪、柯俊等前辈们的大力支持与积极肯定, 标志着我国改革开放程度的提高, 也标志着计算相图



图9 张维敬教授等 1998 年组织举办的国际相图计算会议 (Calphad) 论文集首页 (a) 及 1993 年 Hillert 教授与北京科技大学教授合照 (b), 从左到右: 刘国权教授, 张维敬教授, 李长荣教授, Hillert 教授, 顾正秋教授, 谢锡善教授 (照片为李长荣教授提供)

事业在我国的发展。张维敬先生的弟子们已经遍及世界各地并成为相图计算领域的学术骨干或权威。在北京科技大学由杜振民教授、李长荣教授领导的相图计算研究室继承并发展了张维敬教授的相图计算研究领域,成为特色鲜明的研究室,在国内外具有较高的学术影响力,图9(b)为张维敬教授、李长荣教授等北京科技大学学者与 Hillert 教授于 1993 年在北京科技大学的合影。

北京科技大学冶金材料物理化学家周国治(图10)院士^[19-21]1994年受好友张永山(Y. Austin Chang, 美国工程院院士, 中科院外籍院士, 北京科技大学名誉教授)邀请,参加了在美国威斯康星州举行的第23届国际相图会议,并在会议上作了题为《一种用二元系统预测多组分系统热力学性质的新求解模型》的报告。该报告中发表的新理论模型解决了金银铁、金银铜、铁铜铝等多个体系的多元系计算难题,赢得国际冶金物理化学界权威 Hillert 教授的高度赞扬^[19]。周院士于1995年在国际相图会议上发表的“新一代溶液几何模型”,该模型不含任何需要使用者去确定的“待定参数”,解决了国际上30多年来几何模型存在的固有缺陷,同时为实现模型选择和计算的完全计算机化开辟了道路。其理论模型被命名为“周模型”(Chou Model),至今仍被广泛应用。他的研究成果已被同行系统地编入到多部高校教科书中。除了以 Hillert 为代表的瑞典皇家工学院开发了 Thermo-Calc 热力学相图计算软件、加拿大蒙特利尔大学的 A.D. Pelton 教授(加拿大皇



图10 周国治院士^[20]

家学院院士,北京科技大学名誉教授,2010年在北京科技大学中国材料名师讲坛上作报告)开发了 FactSage 相图计算软件以外,张永山(美国威斯康星大学)、周国治院士的优秀硕士生陈双林等也开发了极具特色的 Pandat 热力学相图计算软件。2010年周国治与 Hillert 教授所在的瑞典皇家工学院联合培养的博士生王丽君的博士答辩,被国际专家组的教授们评为近几年来少见的优秀答辩,并对她的工作给予了很高的评价。

结束语

1) Hillert 教授的科研贡献中至少有4个方面在材料科学基础课程中出现过,也对作者的科研有直接帮助。

2) Hillert 教授与北京科技大学曾有过密切的交往,是北京科技大学名誉教授,对北京科技大学材料专业教学的贡献体现在系列学术讲座、赖和怡和刘国勋老师根据 Hillert 的讲义编译出版的《合金相图与热力学》一书及对校外教师及研究生的科研影响上,也直接培养了北京科技大学的博士生或青年教师。

3) 在相图计算领域,我系金相教研室的张维敬教授、冶金物理化学专业的周国治院士都与 Hillert 有密切的学术交流,推动了北京科技大学相关的相图计算研究的国际化。

致谢:感谢黄伟明博士、李长荣教授、顾新福副教授对本文提出的一些建议及提供的信息。

参考文献

- [1] Spencer P J. The origins, growth and current industrial impact of Calphad. *Calphad*, 2022, 79: Art No. 102489
- [2] 杨平. 与 J. Cahn 教授相关的材料学基本概念. *金属世界*, 2021(5): 7
- [3] 杨平. 再结晶及晶粒长大国际会议的 Smith 奖及其获奖者:《材料科学基础》课程中的基本概念与名人典故. *金属世界*, 2013(5): 77
- [4] Zener C. Theory of growth of aspherical precipitates from solid solution. *J Appl Phys*, 1949, 20(10): 950
- [5] Hillert M. The role of interfacial energy during solid-state phase transformations. *Jernkontorets Ann.* 1957, 141: 757
- [6] 戚正风. 固态金属中的扩散与相变. 北京: 机械工业出版社,

- 1998
- [7] 徐耀祖. 材料相变. 北京: 高等教育出版社, 2013
- [8] Hillert M. On the theory of normal and abnormal grain growth. *Acta Metall*, 1965, 13(3): 227
- [9] Cahn J W, Hilliard J E. Free energy of a nonuniform system I: Interfacial free energy. *J Chem Phys*, 1958, 28(2): 258
- [10] Cahn J W. On spinodal decomposition. *Acta Metall*, 1961, 9(9): 795
- [11] Cahn R W. 走进材料科学. 杨柯译. 北京: 化学工业出版社, 2008
- [12] Hillert M. A solid-solution model for inhomogeneous systems. *Acta Metall*, 1961, 9(6): 525
- [13] Hildebrand J H. The term "Regular Solution". *Nature*, 1951, 168: 868
- [14] Hillert M. Phase equilibria, phase diagrams and phase transformations: their thermodynamic basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- [15] 徐瑞, 荆天辅. 材料热力学与动力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
- [16] Hillert M, Staffansson L I. The regular solution model for stoichiometric phases and ionic melts. *Acta Chem Scand*, 1970, 24: 3618
- [17] Hillert M, Jansson B, Sundman B. et al. A two-sublattice model for molten solutions with different tendency for ionization. *Metall Mater Trans A*, 1985, 16: 261
- [18] Hillert M, Steinhäuser H. The structure of white cast iron. *Jernkontorets Ann*, 1960, 144: 520
- [19] 北京科技大学校友网. 人生曲折路, 不坠凌云志: 记冶金物理化学专家、中国科学院院士周国治. (2021-9-15) [2023-9-28]. <https://alumni.ustb.edu.cn/rw/dsfc/842501f3be474d0595e3a8b2d52d0100.htm>
- [20] 章梅芳, 陈笑钰, 张馨予. 因为赌气, 他从学渣变学霸, 最终成长为院士. (2023-01-16) [2023-09-28]. <https://www.toutiao.com/article/7189060381556408865/?wid=1692801812189>
- [21] 李凯, 蔡毓生, 孙欣欣. 踏平坎坷始辉煌 千锤百炼终成钢: 专访潮籍中科院院士、冶金材料物理化学家周国治. 潮商, 2010(5): 48

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。