

空间材料科学: 回顾与发展问题探讨^{*}

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 空间材料科学研究是人类最有价值的空间探索事业之一。在过去的 30 多年里, 该领域取得了巨大的进展, 同时从其成功与挫折中也积累了很多经验和教训。随着空间实验机会的增加, 以及更多的国家加入到空间科学研究中来, 空间材料科学研究在未来 20 年预期会取得更大的突破。为保持在空间探索领域的竞争力, 我国需要制定一部具有深刻科学洞见同时又切实可行的空间材料科学研究战略规划。

关键词 空间材料科学, 空间探索, 重力, 地基实验, 硬件, 战略规划



曹则贤研究员

1 前言

材料是人类社会文明程度的重要指标; 人类社会的发展史可用所使用的典型材料来划分。到目前为止的人类社会发展史大体上可分为石器

时代、青铜器时代、铁器时代和当前的硅时代^[1]。有人甚至把此前的人类历史统称为硅前时代。人类文明的进步强烈地依赖于材料的获得和材料利用能力的提高。可以说, 材料科学是一国经济成功之保证, 影响其国民生活的方方面面; 目前世界上的发达国家, 一定是材料科学研究的先进国家。这方面, 典型的例子有美国、日本、德国等。

材料科学研究材料的特征、过程和应用

等诸多方面, 注定了它是涉及数学、力学、物理学、化学和工程学诸多领域的综合学科, 如物理学研究材料的制造、表征、测试、测量、物性的理解等, 化学研究材料的制造、设计和加工等, 数学和力学则提供对材料的描述、计算和理解, 等等。目前, 所有的有一定实力进行科学研究的国家都把材料科学研究放在首位, 因而材料科学研究近年来得到迅猛的、全方位的发展。从技术角度来看, 新材料、新技术和新产品不断涌现; 从学术角度来看, 近年出现了许多新的材料科学杂志且其学术声誉不断得到提高。后者典型的证据是 *Advanced Materials* 和 *Nature Materials* 等高品质杂志的迅速窜高的声誉。40 年以前, 人类所有关于材料的研究和开发利用的活动都是在地面上进行的。任何物质单元因有一定的质量, 在地球表面上都会受到地球引力的影响。在某些材料体系或材料过程中, 地球对材料的引力(或曰材料的重力)可能会起到不可忽视的、有时甚至是主导性的作用, 这包括一些重力驱动的现象如漂浮、对流、沉淀和静压力变化等。很显

^{*} 收稿日期: 2006 年 12 月 20 日

然, 这些现象会影响任何流体相中的过程。相应地, 在空间随重力环境的变化则会表现出完全不同的行为来, 会呈现出新的现象或允许揭示原来被重力掩盖了的现象^[2]。此外, 人类的宇航事业是以材料科学进步为基础的, 空间飞行所用材料本身就要求系统的空间材料科学研究。而人类的空间探索活动, 也会把对空间环境和空间存在的物质材料的利用作为目的之一。基于以上考虑, 可以看到针对以下几种情形空间材料科学研究是必要的:

(1) 在重力的变化或存在与否对所关注的材料过程或过程实现的外部条件具有明显影响的情形下;

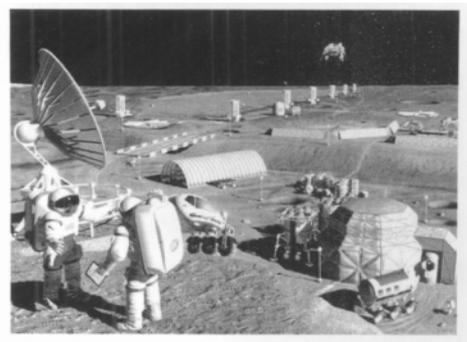
(2) 针对宇航业必需的材料(如防护、推进、润滑)和空间存在的物质;

(3) 寻求地面上没有的其它条件, 比如极端高真空和强辐射时。

其中, 第一种情形就是所谓的微重力材料科学研究。它是空间材料科学研究的主体部分, 在一些文献中, 微重力材料科学甚至和空间材料科学不刻意加以区分。本文讨论的重点也是放在微重力材料科学研究上。

2 微重力材料科学

物体自由下落时不会感受到自身的重力。这一深邃的物理洞见构成了爱因斯坦广义相对论的思想基础。在向地面下落的物体, 以及在广大的远离星体的自由空间中, 重力可以降低到接近于零的水平, 即构成微重力环境。材料科学在微重力下的研究当然只在重力存在与否对所关注的过程或过程实现的外部条件具有明显影响的情形



下才有意义, 因此, 微重力材料科学研究关注的材料一般不涉及刚体、弹性体甚至塑性体这样的内部分子关联较强的体系, 而主要是流体^{*}, 包括蒸汽、液体、固体材料的熔液以及部分软物质(生命物质与气泡、泡沫材料等)、颗粒物质以及这些材料形式之间的或它们同固体的组合。微重力材料科学的这一特点决定了它的研究内容和研究手段。其研究内容包括材料自身的物性研究, 如浸润过程、烧结过程, 物质运输过程(扩散、对流)等, 熔体的固化和结晶过程, 溶液法晶体生长等。涉及的物理概念多为质量运输过程, 表现为凝聚、形核和生长, 其物理驱动力为液体/熔体的表面能(张力)和界面能。气体和液体/熔体间的界面能主要体现在泡沫结构和泡沫材料研究中^[2]。

空间材料科学是最早开展的空间科学研究领域。经过 30 余年的不懈努力, 空间材料科学研究到目前为止几乎涉及了所有方面的重要材料研究, 包括^[3-5]:

(1) 形核与亚稳态; (2) 微结构的预测与控制; (3) 界面与相分离问题; (4) 输运问题; (5) 晶体生长与缺陷控制, 等等。

如果以“与材料有关的”空间研究内容

* 这里的流体不只是常规意义上的称为 Fluid 的物质。如果严格地考察材料的刚度, 则用材料中典型材料单元之间的距离 χ_{ij} 同距离的变化 δ_{ij} 之比较, 显得非常科学。如果 $\delta_{ij}=0$, 是为刚体; 如果 $\delta_{ij} > 0$ 且去除外力后可以回复到零, 则为弹性体; 如果 $\delta_{ij} > 0$ 且不能回复 (tensile), 是为塑性体; 而如果 $\delta_{ij} > \chi_{ij}$ 即距离的变化和距离可比拟甚至更大, 则为流体。对于气体, 明显地有 $\delta_{ij} \gg L$, L 为限定空间的尺度。按照这个定义, 则流体可以包括所有的液体, 熔体, 软物质, 颗粒物质, 气泡与泡沫物质 (foam, bubble, froth or spume) 等。而正是在这些距离的变化和距离可比拟甚至更大的材料体系中, 重力的效应才得以明显地表达出来。——作者注

论,根据欧空局的数据,则包括凝聚现象、应用指向的熔化过程、沸腾汽化过程、毛细现象、化学斑图的形成、燃烧、复合物、晶体生长中的对流与偏析现象、扩散、流体的动力学与稳定性、电磁学、电泳、铁流体、流体物理、流体临界现象、泡沫、亚稳相与玻璃、颗粒物质、界面现象、近临界点研究、火焰、金属合金、微结构与形貌稳定性、粒子凝聚和物理化学,等等^[3]。可以说,空间材料科学研究的广度已得到了充分的体现。

3 空间材料科学的关键成果

空间材料科学研究是最先开展的空间科学研究,取得了相当多的成果。在前述的重要方向上有:在电磁悬浮炉中对金属玻璃热力学性质的系统研究,对大块金属玻璃的设计能提供指导性的知识;确立了对流对枝晶生长机理的影响;了解了液相烧结中颗粒压模形状改变的原因,在此基础上地面工艺免除了研磨的步骤,具有相当的经济效益;对 Ostwald Ripening 机理的深入研究摒除了 20 世纪 60 年代的旧理论;测定了许多种金属、半导体等材料在高温下的扩散系数;对提拉法和浮区法晶体生长过程的深刻理解引起了对这两种方法生长的晶体质量的改进;获得了对流对固液界面稳定性的影响的深刻认识,等等^[3-5]。

4 对空间材料科学的评价

在对空间材料科学研究进展进行评价之前,笔者以为有必要提请读者注意到空间材料科学与其它空间学科不同的地方,即与空间材料科学研究相对应存在着材料科学这门学科,且材料科学研究目前已到了令人吃惊的深度与广度。在材料学科领域内,想成为多方面的专家其难度已超过笔者的想象力。人们对空间材料科学研究的成

果做评价时,会不可避免地拿相关的材料科学研究作为参照。

空间材料科学研究至今已进行 30 余年,尽管付出了许多努力,认识到了许多新现象,但研究结果的深度、自洽性同地面类似研究相比,非常初步,有时其结论显得匆忙,经不起推敲。其原因有两方面:其一是受实验条件和资源限制,只能进行简单的实验,且重复的机会少,缺少对实验过程的全面观察记录,缺少对实验过程的实时人为干预调节,等等;其二是对空间条件的特殊性认识不足。在空间进行的材料过程中,总有我们在地面上意想不到的事情或现象出现。而这恰恰是空间材料科学实验的必要性所在和迷人之处。同时应该看到,向外太空的扩展是人类心灵深处的愿望而且也许很快会成为一种必要,材料在空间环境中的研究与开发利用是其关键环节。初期的进展缓慢和高代价是必然的。

5 空间材料科学的设备问题

我们看到,目前空间(材料)科学“发展的瓶颈体现在空间实验设备和实验机会上。材料科学的一个特点是多学科交叉,对设备和方法有着强烈的依赖,且设备具有极度多样性!空间材料科学所需要的仪器五花八门,不胜枚举。所有地面上用于材料科学研究(制备、检测、表征、物性测量、性能测试等等)的仪器设备都是空间材料科学研究的必备仪器,然而,由于空间条件的限制,这包括重量、功率、体积、实验的无人操纵等方面的因素,当前材料科学的空实验部分所涉及的仪器设备主要是固体材料熔化设备、溶液晶体生长设备以及一些简单的观察和记录设备,如带一定温控功能的管式炉、电磁悬浮炉、溶液混合系统、观测溶液浓度分布的

* 此处列举内容的内涵有许多重叠处或模糊的地方,不可深究。——作者注

** 此写法表示相关内容对空间材料科学和其它空间科学领域可能同样适用。下同。——作者注

干涉仪和 CCD 相机,等等。显然,这些只能满足一些简单的空间材料制备和研究需求。材料研究主要还是以空间获得材料在地面上做对比研究。

空间材料科学领域的实验技术基于地面上的成熟研究,是有充分保障的。但是设备受空间资源的限制一直难以满足研究的需求。资源限制是空间材料科学短期内不可能改变的现实。因此,空间材料科学设备研究在试图将更多更复杂的设备送上空间的同时,设备的微型化、小功率化、信息自动化、模块化和系统平台化(提供普适型条件)是必要的趋势。新的升空设备应尽可能实时原位地进行实验过程操控和记录,并且允许加载电磁场等外场。发展专门的大型实验平台成为当前的趋势。空间实验平台可以搭载更复杂的实验仪器,可以人工操控对实验研究过程实时干预,进行参数调整,从而从根本上改变目前空间材料科学进展缓慢的局面。欧空局研制的用于有人照料空间实验的“材料科学实验室”代表了空间材料科学实验模块的方向。

6 经验和教训

空间(材料)科学研究在取得了相当多重要成就的同时,因它是全新的未知领域,也就遭遇了相当的挫折,从而积累了许多经验和教训。美国宇航局(NASA)、欧空局、俄罗斯联邦空间局和日本空间局都有总结^[5-7],其中尤以日本空间局的总结较为系统^[7]:

(1) 空间科学实验是对地面上科学实验的延伸。但是,在空间中改变实验参数、进行人为干预非常困难,因此应该进行大量的地基实验或实验准备。建议地基实验和空间实验的比重为 95 : 5;

(2) 注重团队合作。实验相关的科学家、硬件研制人员、工程技术人员和项目管理人员应能密切配合;

(3) 注重数值模拟,最好能预先模拟实验结果;

(4) 强调科学与技术的结合。一个科学目的的达到,需要实验技术上、工程上的保证;

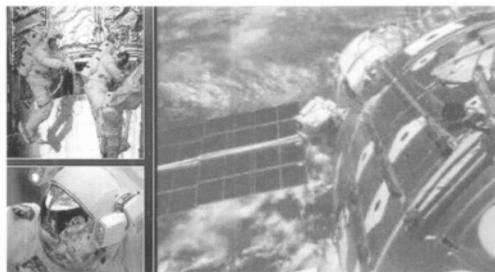
(5) 从事材料科学研究的人员最好能熟悉空间环境问题。升空前的准备实验应在与升空设备完全相同的设备内进行。对实验系统在空间中可能出现的状况要有充分的认识;

(6) 无论此前进行过多少次准备性的实验,空间实验时都不可掉以轻心。即使是样品尺寸的简单变化,都要当作全新的体系对待;

(7) 认识到经常会有“无心插柳”式的收获。空间实验常常会得到意想不到的结果;

(8) 要注重实验设备的研制。原创性的结果只能来自原创性的实验硬件。

NASA 从事空间材料科学研究时间最长,范围最广,最有资格总结经验和教训。在最近几年的回顾和展望中,NASA 都强调空间项目的科学性问题^[3-4]。由于空间实验周期长、花费大,如果项目的科学性不足无疑就是某种程度上的耽搁和浪费!在对科学与技术进步份量的衡量中,NASA 坚持这样的指导思想:“不是所有的基础科学研究都能产生技术,但所有的现代技术绝对是基于基础科学研究的成果”。这一点,我国在制定空间(材料)科学项目政策和遴选项目时应注意到。



NASA 积几十年的经验注意到的另一个空间(材料)科学关键教训是,几乎所有的空间(材料)科学项目其最终的花费都比原先预期的要多。由于经费的不足,原先遴选的项目可能最终无法完成。一方面,此类的问题应能通过缜密的规划尽可能地避免;另一方面,也应豁达地予以接受,毕竟它具有一定的客观必然性。

表1 我国空间材料科学研究实验统计(截至2003年5月)

序号	项目种类	实验次数
1	金属及合金	27
2	半导体电子材料	21
3	超导材料	8
4	复合材料	5
5	氧化物单晶生长	5
6	氧化物单晶实时观察	2
7	物性参数测量与研究	2
	总计	71

7 中国空间材料科学研究现状

我国的空间材料科学研究从1987年利用返回式卫星进行GaAs晶体的空间熔炼生长开始,至今已经历十几年,也研究开发了多种材料空间实验装置,积累了一定的技术基础和研制经验,发展态势良好。主要研究内容包括晶体生长炉的研制,溶液法晶体生长装置的研制,金属合金等多种材料凝固实验和扩散规律、结晶规律的研究,如GaSb、GaAs、HgCdTe、 $CeBi_{12}SiO_{20}$ 和 $\alpha-LiIO_3$ 晶体的生长,等等。但由于资源限制,目前进行的还主要只是与固体熔化和溶液法晶体生长有关的研究。设备为多工位炉和溶液晶体生长设备。同美俄等空间大国相比,我们在设备研究、实验次数、开展研究的范围和深度上都有较大的差距。其中,最明显的差距体现在所用的设备上,其自动化程度、适用性同美、俄、欧、日相比都较差。这大大限制了我国空间材料科学研究进展的步伐。在未来的空间科学研究规划中,空间实验设备应加大投入,并且要充分认识到对相应的地面研究加大投入、维持高水平研究队伍的重要性。

应该看到,随着我国经济的持续发展,国家把空间探索摆到了一个非常重要的位置。我国的空间飞行器技术也不断取得重大突破,因此,未来一段时间内我国进行空间

材料科学研究的资源(包括资金支持和空间实验机会)会有大幅度的增加。空间材料科学的研究无论从认识材料还是开发材料以及促进国民经济和航天事业本身来讲,都会被放到一个显著重要的位置。

8 当前国际上的研究重点

8.1 主要空间研究的材料对象

(1) 新颖铸造合金;(2) 金属泡沫材料;(3) 半导体晶体;(4) 高温陶瓷;(5) 轻质金属基材料;(6) 生物材料(包括涉及人类长时间空间旅行有关的生物过程;与生命探索有关的有机材料等);(7) 智能与自修复材料;(8) 空间探测事业需求的飞行器空间防护材料、润滑与推进材料;(9) 颗粒物; (10) 电子晶体与光子晶体材料;(11) 高分子材料,等等^[5-7]。

8.2 关注的材料中的核心问题

(1) 过冷液体的性质和其中的形核;(2) 固化过程中的微结构发育动力学;(3) 多相体系的形貌演化;(4) 计算材料科学;(5) 微重力下液态的热物理性质;(6) 物质内的参数耦合输运过程,等等。

实际上,所有的材料和材料行为都是空间材料科学研究的对象。由于空间材料科学比较成熟,近年内战略考虑方面没有什么实质性的改动。但是,基于空间材料科学的历史经验,美俄日欧在未来如何进行材料

科学研究的指导思想上一致强调:

(1) 空间材料科学研究必须立足于大量的充分的、地面相关实验。除了支持飞行实验以外,还支持大量的地基研究,包括任何支持,补充或未来能够发展成飞行实验的研究项目;

(2) 考虑到空间实验设备对空间科学研究进展的严重限制,以及空间环境下仪器构造及运行过程的特殊性,空间材料科学设备应由有专业化认识的队伍参与研制,并由专门机构统管;

(3) 空间探索是全人类的事业。同其它空间科学研究一样,空间材料研究领域内的全方位国际合作是重要的。

9 讨论与建议

9.1 讨论

我们注意到,从利用飞行器到其它星体表面上的探索 and 开发利用月球资源,甚至于目前还是科学幻想的外太空移民,空间(材料)科学研究中之微重力(材料)科学的提法显得不是很恰当了。在月球上,引力水平约为地表上的 $1/6$,属于弱重力范围;而在一些其它星球表面上则可能远高于 $1.0g$,属于目前我们所说的超重力(hypergravity)范围。另外,从近星体轨道到完成登陆的过程是一个引力不断变化的过程。因此,建议使用“不同引力环境下”的空间(材料)科学这一适应性较广的提法来描述与引力有关的空间材料(科学)研究。

另外,国际上在空间(材料)科学项目遴选与培育方面的经验也值得我们借鉴。空间(材料)科学研究周期长、机会少、成本高,因此特别要讲究项目的效率和效益。讲效益是要有科学或技术意义,讲效率是保障珍贵实验机会的有效利用。在项目遴选上,我们认为备选的空间材料科学项目应当回答以下几个问题:

(1) 在所研究的材料体系中到底有哪些相关的物理过程或现象?

(2) 重力的变化或有与无对过程或最终的产品有哪些影响?

(3) 可能有哪些被重力掩盖了的现象?

(4) 它会增加我们关于材料科学的知识吗?

(5) 此研究所获得的知识 and 数据如何能被应用到地面上的研究或工业过程?

(6) 此研究所获得的知识 and 数据如何有益于空间的探索 and 开发?

其中第(4)条有关课题的学术价值,第(5)、(6)两条体现的是其应用价值和经济效益。

9.2 建议

空间材料科学研究是空间探索中的一大重要领域,美、加、俄、欧、日在空间材料科学研究方面都做了大量持久的投入;其它空间技术相对落后的国家,如澳大利亚、印度、巴西,甚至新加坡,也都在积极参与空间(材料)科学的研究。我国的空间(材料)科学目前还只是处于起步阶段,有大量的基础工作要做。当前宜稳定一支知识结构全面、活跃在科研第一线的专业队伍,建立高水平的地基材料科学实验室,积极在地面上进行空间指向的材料科学前沿研究和空间材料科学设备的研制,并同时进行空间材料科学的成果、政策性问题和发展历程的调研。空间材料科学研究是一项周期长、投入大的研究领域。它强烈地依赖于空间投送能力、空间研究设备的制造水平,又反过来对空间探索具有一定的促进和保障作用。美、俄、欧在空间材料科学方面的成就都是通过长久艰苦的探索逐步取得的,其发展战略也是立足于长远目标。目前限制空间材料科学研究的关键因素是实验平台的缺少和专门用于空间实验的科学设备的滞后,而非来自材料



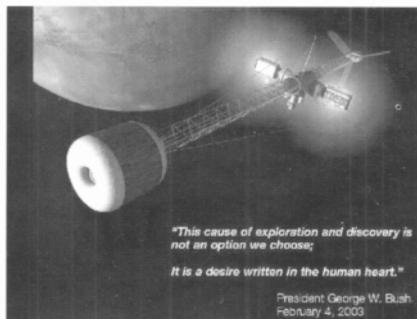
科学本身。因此,我国的空间材料科学研究战略重点也应放在空间实验设备的研制上,并应建立先进的地基材料科学实验室以支持系统全面的、空间指向的地面材料科学研究。在发展自主研究能力的同时,加强国际合作,加强对国际已有的空间材料科学项目的系统研究,汲取经验,以达到少走弯路,减少失误,迅速提升我国空间材料科学研究水平和能力的目的。另一点,应避免政出多门的局面,有效防止急功近利的部门行为对空间科学发展的妨碍。以科学问题本身为导向,协调好研究队伍包括其上级管理部门之间的利益关系,对空间(材料)科学项目加大评审的力度,并将评审过程做到完全透明、公开。国家对已确立的研究项目,应根据项目自身的特点给予长期稳定的支持。对于其中大部分不能升空进行的空间指向的相关研究工作,其研究成果,甚至包括一些失误、失败,同样应看作是空间(材料)科学研究事业的成果。须知空间(材料)科学研究的最终目的是增加人类的知识,提高人类的生存水平,重要的是达到此一目的,而不是达到此

一目的的具体时间和地点。

主要参考文献

- 1 Ball P. *make to measure*. Princeton: Princeton university Press, 1997.
- 2 Walter H U. *Fluid Sciences and Materials in Space*. Berlin: Springer, 1987.
- 3 *The Vision for space exploration*. NASA, 2004.
- 4 *Space Science: Strategic Plan*. NASA, 2000.
- 5 *New Space Program of Russian Federation and Space Debris Problem*. Federal Space Agency of Russia, 2006.
- 6 *Cosmic Vision*. European Space Agency, 2005.
- 7 *JAXA Vision*. JAXA, 2005.

致谢 本文得到中国科学院“空间科学项目中长期发展规划研究”软课题资助。



Discussions on Retrospect and Development of Space Materials Science

Cao Zexian

(Institute of Physics, CAS, 100080 Beijing)

Space materials science research is one of the most valuable human space explorations. In the past three decades, great progresses have been made in this direction, yet there are much to be learned from both the achievements and frustrations. With the availability of more research opportunities and the participation of more space countries, a new breakthrough in the space materials science is expected in the next twenty years. To remain a competent space explorer, China needs an insightful and feasible strategic planning for space materials science research.

Keywords space materials science, space exploration, gravity, ground-based experiment, hardware, strategic planning

曹则贤 中国科学院物理研究所研究员。1987年毕业于中国科技大学物理系,1997年获德国 Kaiserslautern 大学物理学博士学位。1998年入选中科院“百人计划”,现任职于表面物理国家重点实验室。近年在 Science, APL 等国际重要杂志上发表研究论文 40 余篇,另发表中文物理学教育/科学哲学论文 10 余篇。