

高速飞行中的等离子体问题

吴承康*

(中国科学院力学研究所)

在远程弹道导弹和人造地球卫星、航天飞机或行星探测器等进入大气层时,由于极高的飞行速度,引起周围气体的高度加热,形成部分电离等离子体,对于飞行器的结构可靠性和传热、无线电通讯、飞行中的物理现象产生很大的影响。高性能航天器需要长时间、小推力、极高比冲的推进系统,为此发展了电热推进、离子推进、等离子推进等新的电推进方法。本文扼要介绍三方面的问题:高速飞行等离子体的高温传热,高速飞行等离子体对电磁波的影响,和高比冲电推进方法。

(一) 高速飞行等离子体的高温传热问题

1. 热环境。高速飞行器进入大气层时,前面的气体受到飞行器的剧烈压缩,周围的气体与飞行器壁面发生强烈摩擦,气温升高到七、八千度或甚至一万多度,形成部分电离等离子体。对于不同的飞行器,由于物体形状和速度、高度、时间的轨道各不相同,所产生等离子体的参数与对飞行器加热的环境就会有很大不同。基本上,高性能弹道导弹与载人飞船的热环境属于两种不同典型。

洲际弹道导弹为了加速打击、提高精度,采用低阻力的小头细长形状和大角度再入。在二、三十秒内下降到十几公里高度,速度仍在5公里/秒以上。等离子体特点是高压、高温,属于连续介质,处于或接近热平衡状态。对飞行器加热以对流加热为主,热流大,剪切力大,时间短。

有翼滑翔式航天飞机由于载人和多次使用的需要,采用小角度再入,在高空长时间减速。因此等离子体特性是低压、高温、非平衡,属于由自由分子流到连续介质之间的过渡区。对飞行器加热以对流加热为主,热流小,剪切力小,时间长。

弹道式卫星再入,介于上述二者之间,但更接近后者,尤以载人飞行器更是如此。由月球回地的阿波罗飞船,速度较高,加热中辐射部分不能忽略。

进入行星大气层的探测器,由于飞行速度极高,产生等离子体的温度也高,对飞行器加热以辐射为主,对流也仍重要。具体的参数和特点根据行星大气成份和参数、行星质量和飞行轨道参数而定。

高速飞行等离子体加热问题中有代表性的参数是飞行器前驻点的气体参数 h_s , T_s , p_s (焓,温度,压强)和对飞行器的加热率 q_s , q_{max} (驻点和最大热流)和剪切力 τ_{max} (最大剪切应力)一些高速飞行器进入大气层时,典型的轨道和驻点气流参数见图1—4。

气体对于表面的加热,受壁面粗糙度、进入气体附面层的物质、流场中固体颗粒的存在、层流到湍流的转换等影响很大。在辐射加热时,气体辐射性质和固体的吸收和反射特性都很重要。这些问题现在也都是研究中的课题。

2. 防热措施。由于气动加热,有必要采取防热措施。曾经提出和试验过多种防热方法,如金属热汇、辐射散热、烧蚀防热、发汗冷却,以至利用磁场使等离子体偏离物面等。但经过多年实践,现在最成熟的高热流下防热措施是烧蚀法,低热流下可用烧蚀-辐射法。发汗冷却一直处于研究阶段。磁场方法只做过一些原理探索,但因实际上难以实现,并未进一步做工作。

两类不同的热环境要求不同的防热系统。导弹类以烧蚀性能为主,航天器类以隔热性能为主。但具体到每个飞行器,每个部分,由于加热环境和任务要求的不同,采用什么防热系统都是一

* 本报告由林治楷、王柏懿、呼和敖德及电工研究所提供材料,由吴承康执笔。

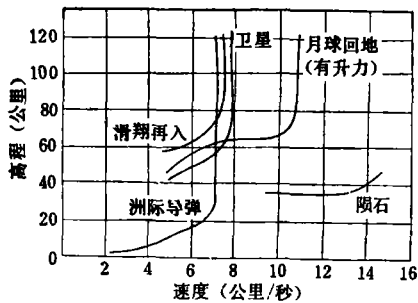


图1 几类再入大气层飞行器的典型轨道

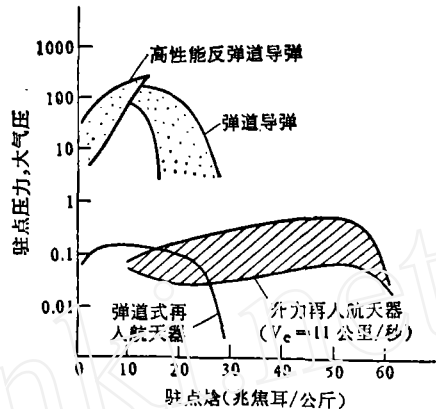


图2 几类再入大气层飞行器的典型驻点参数

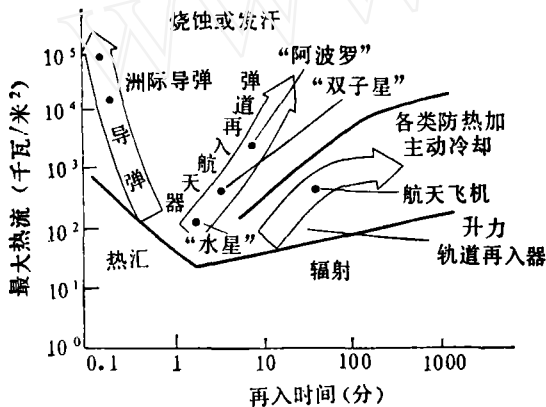


图3 几类再入大气层飞行器的再入时间与最大热流

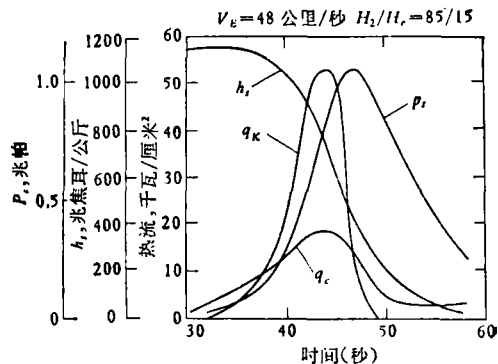


图4 进入木星大气层的飞行器驻点环境参数

项细致的工作,新的材料、工艺、结构不断地为适应各种要求而被研究出来。

3. 烧蚀防热的计算和模拟试验。理论分析计算、地面模拟试验和飞行试验是研究解决高速飞行气动热问题的三大手段,它们互相配合、互相补充。经过大量研究工作,高温气流对壁面的传热和烧蚀材料的烧蚀过程原则上已经清楚,可以计算。计算内容包括有化学反应、有质量注入的高温气流附面层计算,固体材料内热传导和化学变化、分解气体产生和通过固体的流动,壁面材料的熔化、流动和蒸发等过程。国外对过程的细节进行大量研究,编制了复杂的计算程序,对于一般情况可算出结果。但还有复杂情况如表面产生沟槽花纹、固体机械剥蚀,局部复杂形状,新材料,未弄清的烧蚀机理和物性数据等,使准确的计算难以进行。较成熟的计算方法也需要实验验证。生产工艺结构也需要检验和考验。因此模拟试验是高速飞行加热和防热研究的重要手段。

对于高速飞行加热问题,完全重复飞行条件或造成完全相似的实验条件是不可能的。只能用近似的或局部的相似试验,把实验结果和理论分析结合起来,把各部分的试验结果加以综合来解决问题。为了研究流体力学现象,可以用低温材料在风洞中做试验。为了研究高温气流传热,可以做激波风洞试验。但为了试验实际使用的高温防热材料与结构,必须有长时间(以秒或分计)的高温气流。其中,电弧加热等离子发生器和燃气流试验装置是两类用得最多的。燃气流装置主要是为了试验大尺寸结构和研究外形变化,其气流温度离实际还差得比较远。真正产生接近实际飞行气体温度的连续式试验设备只有电弧加热器。

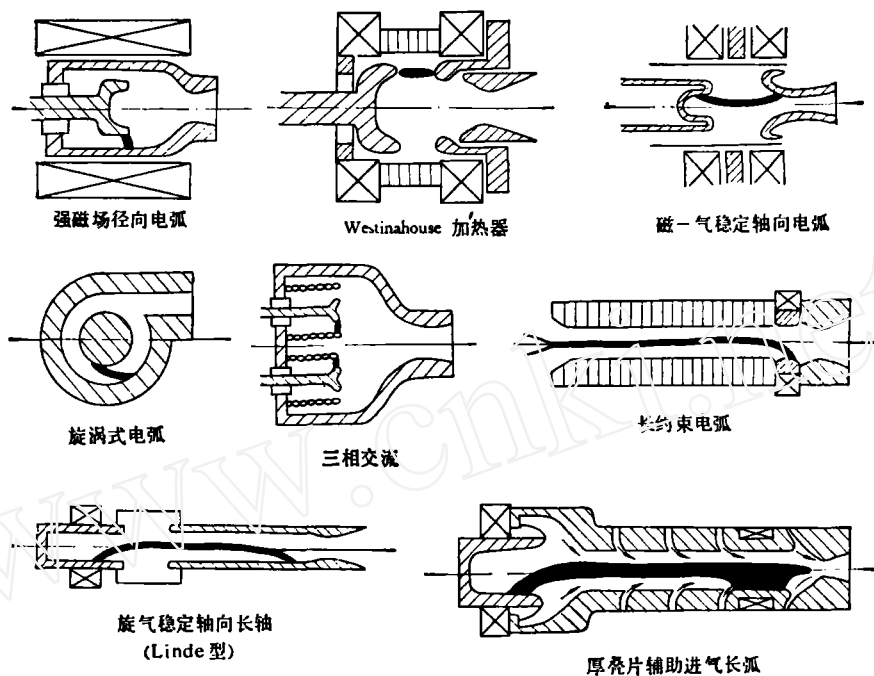


图5 各种形式的电弧加热器

50年代末开始用电弧加热气流来研究高速飞行加热问题。多年来试验了各种形式的加热器。图5所示只是一小部分。还试验了多种电磁加速装置。利用磁场和电流作用的洛伦茨力产生高速高焓气流。但经过二十年来的发展,作为气动热模拟试验装置的高焓设备,逐渐集中到大功率、直流、长弧型的加热器。电磁加速器由于其本身的复杂性和试验趋向用局部试验和理论分析计算的结合,未得到进一步发展。

小功率的、焓值不高的加热器一般采用喷枪式。但要做到参数十分稳定,电极寿命长,污染小,适应各种工作气体和各种运行参数范围,还缺乏系列化的成熟设计,在国内尤其是如此。大功率加热器由于不易解决大电流引起的一系列问题和并联加热器的复杂性,以及交流加热器在电弧稳定和参数范围方面的缺点,现在的趋向是用高电压(达5万伏)、中等电流(≤ 2 千安)的单台直流加热器。六十年代末加热器型式趋向高压、中焓、大流量的旋气稳定长弧和低压、高焓、小流量的叠片壁稳长弧,但在性能上也都有缺点。七十年代发展了这两种方式结合的加热器,即用较厚的叠片保持弧长,而在片间送入旋气以防串弧。根据不同热环境模拟的要求,试验的方式可采用各种各样,如亚音速射流、超音速射流、包罩、超音速风洞等。最近由于研究木星探测器进入木星大气层的需要,将模型放入长弧的弧柱部分,以利用高温辐射传热做试验。

电弧加热器性能的计算,在长弧壁稳类型已得到较好结果,但对于更为复杂的其他型式加热器,直接计算还不成熟。利用相似准则,可以对某些同型加热器性能进行外推,但成功的程度也还有差别。

4. 小结。一般的导弹、飞船进入大气层的气动加热技术问题在国外已经解决,但对于高性能弹头,新材料、更细致的机理,更可靠的模拟试验方法和进入行星大气层的问题,仍然是研究的对象。研究工作开展的面不象以前那样广泛了,但是深入提高的工作仍在进行。

(二) 高速飞行等离子鞘问题

1. 问题的性质和等离子鞘参数。所谓等离子鞘,是指高速飞行中产生的高温电离气体,尤其

是其中的自由电子,形成了一个包在飞行器外面的套层。它对无线电通讯产生了障碍,同时也在飞行器后面形成一个可为雷达波观察到的带电尾迹。等离子鞘使飞行器和外界之间的电磁波传输严重衰减或中断,因而使载人飞船语言通讯、飞行器参数实时遥测、导弹末制导和电子对抗不能正常进行,而这又往往在飞行过程中最关键的时刻发生。从带电尾迹对雷达波的散射,可以辨别飞行器的某些特性,因而对飞行器的跟踪、识别具有重要意义。为了改善对外通讯,需要解决通过等离子鞘传播电磁波的问题。为了利用尾迹电特性进行突防或反突防,需要弄清尾迹特性和影响这些特性的因素。

等离子鞘参数主要是电子密度分布,其次是电子碰撞频率和电子温度,这些主要取决于飞行高度、速度和物体形状。大钝头飞行器(如阿波罗载人飞船),气体电离主要产生于强激波无粘流动的头面部,并经膨胀流入后身流场。尖头细长体电子主要发生在附面层内。小钝头细长体在各种飞行高度(雷诺数),二者的贡献有所不同。高雷诺数时电子主要来自焓层,中等雷诺数(40公里以上)附面层和焓层贡献相当。低雷诺数(70公里以上)粘性效应波及整个激波层。随着高度不同,化学反应也由平衡转向非平衡和冻结流动。典型的等离子鞘参数分布情况见图6。除飞行参数以外,由表面喷出的物质如烧蚀产物或吸电子物质对电离能产生显著影响,如含钾钠物质增加电子,含氟物质减少电子。

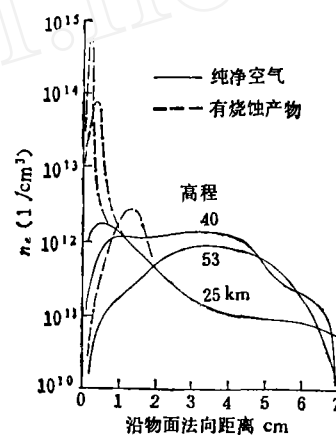


图6 RAM-C弹头侧面电子密度分布

等离子鞘参数的计算主要是把各种化学反应,包括电离反应放在流场中一起计算。即气体成份随流场的变化。在大雷诺数情况下可以用流管法,它基于已知的无粘流场压力分布,用流管一维流动专门研究化学反应的影响。附面层的计算也有几种方法。对于中等和小雷诺数($Re_{\infty} > 10^2$,相当于80~30公里高度),用简化 Navier-Stokes 方程解流场,对于更小的雷诺数,需用直接求解 N-S 方程的方法。理论分析工作方面还需研究分离流场、涡流对电子密度影响,烧蚀产物影响、喷射物质对电子影响,以及化学反应常数的影响等。

等离子鞘参数在飞行中的测量,国外用过波导天线测量,静电探针,射频电导率探针,电声探针,电阻线探针,微波辐射计,隔离狭缝天线等方法。目前测量方法仍在发展阶段。在传感器原理,实验室校验,数据的分析,和使弹载传感器方便可靠,造价便宜等方面还应进行很多工作。

2. 等离子鞘对电磁波的影响。电磁波在一非均匀的、有边界的等离子体中的传播是复杂的现象。为了定性分析飞行器上发生的现象,考虑电磁波通过一层均匀、厚度已知、截面无限大的等离子体(一维传播)的情况。根据近似分析可知,电磁波频率 ω 与等离子体频率 ω_p 的关系是关键。 $\omega_p \equiv \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e}$, 其中 n_e 是电子的密度, e 和 m_e 是电子电荷和质量, ϵ_0 是真空的介电常数。对于电子与其他粒子无碰撞的简单情况,可以得出,当 $\omega \gg \omega_p$,则电磁波能无衰减地透过等离子体。当 $\omega \ll \omega_p$,在等离子体内部传播的波将衰减,而由外面射向等离子体的波将在界面上完全反射。对于有碰撞的等离子体,情况较为复杂。但对于较低的碰撞频率($\nu \ll \omega_p$),情况和无碰撞的差别不是太大。

由等离子鞘对电磁波的影响,可以得出等离子参数。因此电磁波的衰减和移相可以用于等离子参数的测量,也叫做“等离子诊断”。

3. 解决等离子鞘对通讯障碍的途径。曾经试验过各种措施如提高功率,加磁场等方法,但比较希望的方法是提高电磁波频率和喷射亲电子物质以降低局部等离子鞘的电子密度。

由 ω_p 与 n_e 的关系可见,对于 $n_e \approx 10^{12}/\text{cm}^3$ 的电子密度,相应的等离子频率为 10GHz,若通讯频率采用高于 10GHz 即用毫米波,则可克服一般弹道导弹天线位置等离子鞘问题。毫米波频率高于一般现用通讯系统,但技术上是完全可以实现的。

喷射亲电子物质的方法,是使电子与亲电子物质结合成负离子,因而降低了自由电子密度,也就降低了等离子体频率,使得通讯频率高于 ω_p 而减轻传输中电磁波的衰减。

最有效的亲电子物质是液体。从天线上游喷入流场,能够有一定的穿透深度,并由于速度低于流场气体,在流场中能停留较长的时间。在流场中由于气动破碎(低空)和蒸发破碎(高空)产生大量细碎的液滴,成为电子和离子在其表面复合的第三体。过量的电子使液滴表面的一些分子转化为负离子,负离子蒸发潜热低于中性分子,更易蒸发。因此液雾能有效地吸附电子,减少局部区域的电子密度。此外液体蒸发时吸热,使局部的温度降低,这也将使电子密度降低,有利于电磁波的传播。

喷射的方式和数量是很关键的问题,如何用最少的喷射物质达到最佳的改进通讯的效果是值得研究的问题。

等离子鞘的地面试验研究,可以利用电弧加热风洞,或在普通风洞中用等离子发生器产生等离子体。弹道靶用于电离尾迹的研究是非常合适的。在地面实验中,电探针是简单可靠的探测仪器。微波测量可以提供等离子体的一些参数,但要获得详细的参数分布,所需微波设备是很复杂的。

由于地面试验模拟等离子鞘的局限性,真正的定量试验往往需靠飞行试验来完成。美国主要的公开发表的等离子鞘飞行试验 RAM 计划,从 1961 年到 1970 年分三个系列(A,B,C)共发射 8 次,除一次失败以外,都取得了各种探测仪器的等离子鞘数据。Trailblazer 计划分两阶段,由 1966 年开始,到 1973 年共发射 9 次。可见国外对于等离子鞘问题重视程度。

4. 小结。等离子鞘问题是导弹和空间技术的关键问题之一。在国外经过十多年的积极研究,从原理上弄清了一些问题,但很多细节也还需继续研究。实际解决方法可能已有途径,但实用方案仍属保密。

(三) 空间电推进问题

国外从五十年代起进行了大量深入的电推进研究,先后发展了十多种不同类型的电推进器,其中几种已在空间成功应用。国际会议不断召开。电推进器具有高比冲、小推力、长寿命、高精度和可靠性好等特点,将在各种卫星、空间站、空间探测器的姿态控制,位置保持和轨道修正,以及未来行星际飞行的主推进方面获得应用。电推进的基本原理是利用各种电和磁的效应,把推进工质加速到远远超过化学燃料燃烧所能达到的喷射速度,因而得到极高的比冲——每公斤喷射的工作物质所能产生的对飞行器的冲量(推力与作用时间的乘积)。现在成功研制的电推进系统可分电热式、静电式和电磁式三大类。以下分别介绍这三种电推进器。

1. 电热式推进器。电热推进器是冷气推进器的一种简单改进。它利用电阻元件或电弧放电作为热源,增加工质的焓值,从而提高排气速度。有稳态和脉冲两种类型,工质可以是氢、氮、氨、肼等。早期研究工作用电弧加热工质,达到较高比冲,用氢做工质,但未达到真正上天试验。电阻加热式推进器在卫星中进行使用。1968 年电阻加热氨推进器在卫星上运行,推力 222 毫牛顿,比冲 135 秒,功率 11 瓦,用于卫星姿态控制。可以看到,这类推进器比冲并不很高(当然比冷气要高),但使用方便。近几年来,对于电热肼推进器研究较多。这种推进器用电加热使肼达到化学分解的温度,使可靠度增加,并能提高比冲。达到的性能是推力 320 毫牛顿,真空比冲 320 秒,寿命 100 小时。计划用电热肼推进器作为通讯卫星的南北位置保持。电热推进器的主要优点是结构简单,

使用灵活,可脉冲工作。缺点是温度受限制,排气速度小于 10^4 米/秒,寿命也不够长。

2. 静电推力器。静电推力器是利用电场来加速离子,从而产生推力的装置。其主要部分是离子发生器,加速电场和加电子中和器三部分。离子发生器中工质(液态的铯或水银,也可用惰性气体),通过供给系统在蒸发器内蒸发,进入放电室,在圆柱形的放电室中,从阴极发出的电子在径向电场和纵向磁场作用下,绕磁力线作螺旋运动并与工质原子相撞形成离子。放电室下游有一帘栅极,其电位与主阴极电位相同。加速极装在帘栅极下游不到一毫米处,电位为负,使离子加速喷出,在出口处由中和器提供电子使喷出的射流为电中性。静电推力器原理见图 7。

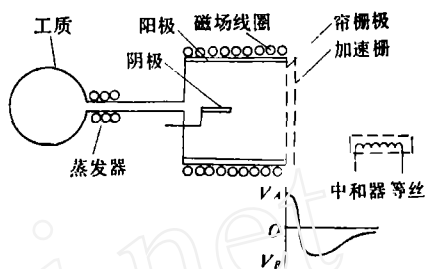


图 7 电子轰击式静电推力器原理图

7. 目前美国 NASA 集中发展 $\Phi 30\text{cm}$ 的星际飞行和轨道提升用主推力器和 $\Phi 8\text{cm}$ 的同步卫星南北位置保持的推力器。 $\Phi 30\text{cm}$ 推力器推力 135 毫牛顿,比冲 3000 秒,总功率 2700 瓦。 $\Phi 8\text{cm}$ 推力器推力 10 毫牛顿,比冲 3000 秒。寿命要求超过 20000 小时。可以看出,离子推力器是真正高比冲的推力器。

静电推力器经过多年的试验研究,包括在空间的耐久性试验,但目前仍处于样机试验阶段。对于太阳系飞行用的电推进系统,进行了任务分析。此外,近年来出现了探索离子推力器原理和技术在工业上应用可能性的努力,如提出用离子推力器在溅射沉积、离子束加工,表面处理等方面,为工业、生物学、医学、材料学提供新工艺、新器件、新材料。这是一个值得注意的新动向。这也表明,一项新技术要具有强的生命力,必须寻求多方面的应用。

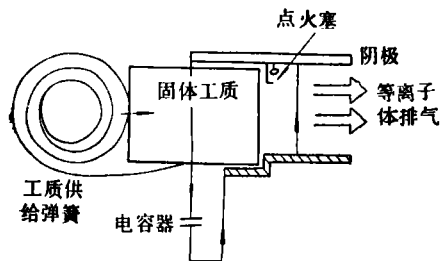


图 8 固体脉冲等离子体推力器原理图

3. 电磁推力器。电磁推力器是利用电磁力的作用使等离子体加速喷射而产生推力的装置。有稳态及交变等离子体动力电弧射流(MPD)与脉冲等离子体推力器(PPT)三种。MPD 装置可产生较大推力和较高比冲,但还处于实验室阶段。近年来发展较快的是用固体太氟隆作工质的脉冲等离子体推力器。工质系统简单、适宜于失重及真空环境。用储能电容器瞬时强电流放电形成高温电弧烧蚀和离化工质,经过电磁力和热力加速排出而产生推力。此种推力器已于 1968 年装在同步卫星上用于东西向位置保持,其原理见图 8。现在研制中的样机性能是:单元冲量 30.5 毫牛顿-秒,平均推力 4.5 毫牛顿,平均比冲 1500 秒,耗功 135 瓦。现已证明,象这样的样机,效率可达 30%,进一步研究加速机理,可以改善其效率及性能。此种推力器适用于高精度、长寿命的各种卫星姿态和轨道控制。

等离子推进器的技术和其他一些重大科学技术有关,如可控热核反应、高温等离子体物理、高能粒子加速器等方面的研究成果,对等离子体加速器有关技术问题有直接影响。而等离子推进的研究也对这些科学技术有参考意义。这种学科间的相互影响在苏联的等离子研究工作中看得尤为清楚。

4. 小结。电推进技术经过二十多年的发展,已从原理性实验、实验室研究过渡到工程样机生产与空间飞行试用的阶段。其中比较先进和成熟的推力器是离子发动机及脉冲等离子体推进器。近期应用是各种同步卫星的姿态和轨道控制,将来可能用于卫星的轨道提升和星际飞行主推进。有关的科学技术研究对于其他科学技术有互相促进的作用,如电推进的研究对于等离子体物理学,稀薄气体动力学、真空放电物理以及有关测试技术等方面都有帮助,也促进了某些新材料、新工艺、新技术的发展。

(下转第 18 页)

3. 相变的热处理时效

以 CaO-ZrO_2 系统在 1300°C 进行时效处理时发现,随着时间的延长,四方相的晶粒有所增长, K_{Ic} 和 σ_f 相应提高至时效为 30 小时的最佳值。其原理和上述的尺寸效应是一致的。

七、结 语

陶瓷的力学性能主要取决于材料的组分、结构、微观缺陷和显微织构等因素。强度与脆性的含义不尽相同,但有着本质的内在联系,两者都受到材料内部的微不均性,如弹性各向异性、热膨胀各向异性,以及相变诱导的应力和缺陷等因素的影响。由于陶瓷的微观结构非常复杂,一种结构参数的变化,往往伴随着其他参数的改变,在力学性能的研究方面,目前虽已由宏观进入到显微织构的层次,但还有待于更全面地弄清显微织构方面的问题,进入到更深入的微观结构层次,以解决陶瓷力学性能方面的本质问题。

参 考 文 献

- [1] Griffith, A. A., *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, Ser. A. 221 (1920) 163.
- [2] Orowan, E., *Repts. Prog. in Phys.*, 12(1949), 185.
- [3] Irwin, G. R., *J. Appl. Mech.*, 29(1957), 361.
- [4] Irwin, G. R., *Handbuch der Physik*, 6, Springer, Berlin (1958), 551.
- [5] Orowan, E., *Trans. Inst. Engrs Shipbuilders Scot.*, 89(1964), 165.
- [6] Gilman, J. J., *J. Appl. Phys.*, 27, 3(1956), 1262.
- [7] 谢瑞宝,上海市硅酸盐学会 1966 年年会文集。
- [8] Nils Claussen, *Sprechsaal*. Bd. 109, 541.
- [9] Nils Claussen, *J. Amer. Cer. Soc.*, 59, 1(1976), 49.
- [10] Nils Claussen, *Amer. Cer. Soc. Bull.*, 56, 6(1977), 559.
- [11] Lindley, M. W., *Nature*, 229, 5281(1971), 192.
- [12] Brennan, J. J., et al., AD-757063 (Jan. 1973).
- [13] 伍三组, *新型无机材料*, 4, 4 (1975).
- [14] Davies, L. M., *Proc. Brit. Cer. Soc.*, 6(1966), 29.
- [15] Morley, J. G., et al., *Nature*, 196, 1082(1962).
- [16] Pearson, G. L., et al., *Acta Met.*, 5, 2(1957), 181.
- [17] Davidge, R. W., et al., *Proc. Brit. Cer. Soc.*, 20 (1972), 364.
- [18] Pranatis, A. L., *J. Amer. Cer. Soc.*, 53, 8(1969), 340.
- [19] Gilman, J. J., Mechanical behavior of crystalline solids, *Proc. Amer. Cer. Soc. Symp.*, N. Y. (April 1962), 79—102.
- [20] Pauling, *The nature of the chemical bond* Cornell Univer. Pr., Ithaca, N. Y. (1960).
- [21] Gilman, J. J., *J. Appl. Phys.*, 32, 2(1961), 738.
- [22] Knudsen, F. F., *J. Amer. Cer. Soc.*, 42 8(1959), 376.
- [23] Petch, N. J., *J. Iron Steel Inst.*, 174, 1(1953), 25.
- [24] 王长宏、周道鹏、张清纯、严东生, *新型无机材料*, 2, 2, (1973), 42.
- [25] Тресвятский, С. Р., *Изв. АН СССР: Неорган. Матер.*, 4, 7 (1968), 1011.
- [26] Spriggs, R. M., et al., *J. Amer. Cer. Soc.*, 47, 7 (1964), 323.
- [27] 谈华贵, *新型无机材料*, 5, 1(1977), 13.
- [28] Evans, A. G., et al., *J. Mater. Sci.*, 5, 4(1970), 314.
- [29] Rae, J. M., et al., *Special Ceramics, Proceedings of the VI Symposium on Special Ceramics, held by Brit. Cer. Res. Assoc., Manchester, BCRA. (1974), 347.*
- [30] Asheroff, W., *ibid.*, p. 245.
- [31] Ryskhewith, E., *J. Amer. Cer. Soc.*, 36, 2(1953), 65.
- [32] 张清纯、林素贞,上海市硅酸盐学会 1979 年陶瓷专业论文报告会论文汇编, p. 81.
- [33] Trostel, L. T., *J. Amer. Cer. Soc.*, 45, 11(1962), 563.
- [34] Rice, R. W., *J. Mater. Sci.*, 12, 3(1977), 627.
- [35] Simpson, L. A., et al., *J. Amer. Cer. Soc.*, 54, 1 (1971), 56.
- [36] 张清纯, *机械工程材料*, 4(1979), 1.

(上接第 7 页)

空间技术中等离子体问题牵涉面极为广泛。这些问题在国外已作了大量工作,其中一些问题并已获得解决,因而已经不是现在国外基础研究的“热门”。但看来工作并未停止,尤其是对很多关键问题仍在保密。结合我国实际需要,除解决实际问题外,应就有关科学技术问题本身,开展研究,不断深入。这样必将对提高我国在这一方面的科学技术水平和促进与此有关的科学技术发展起到巨大的作用。