

固体表面上流动膜沸腾与液滴蒸发机理研究的新进展¹⁾

王补宣 张能力 彭晓峰

(清华大学热能工程系,北京 100084)

当单个液滴落在温度超过某一临界值的炽热固体表面上时,液滴会像弹性球一样跳跃,并伴随着液滴表面蒸发而滴径逐步缩小。这种现象由 J. G. Leidenfrost 在 1756 年所发现,是物理学上著名的“球化态”奇异现象,称为 Leidenfrost 现象。出现此现象的热表面临界温度则称为 Leidenfrost 温度(LFT)。不同液体在不同压力下和不同表面状况的 LFT 是不同的。常压下水在一般平整度的钢铁表面上的 LFT 大约为 300°C。液滴大小不同时所呈现的 Leidenfrost 现象也会有差异。滴径较大的液滴撞击温度超过 LFT 的热表面时,将克服表面张力的制约而伸展成圆盘状,悬浮在炽热固体表面上,被蒸发气体热层所隔开。如果流体或群滴作用在温度超过 LFT 的固体表面上,在液体和表面之间出现一层蒸气膜,就构成所谓的“膜沸腾”。这时的蒸气膜具有随机的脉动性。视液体流动或者静止,膜沸腾又可分为流动膜沸腾和池内膜沸腾。

直到本世纪 40 年代,除了象钢铁和其他金属在水槽中的淬火处理难免要涉及膜沸腾的急速降温现象以外,工程上总把膜沸腾与壁面高温和壁温飞升直至被烧毁的现象相联系在一起,力求消极地防止它的发生。随着新技术的发展和耐高温材料的研究进展,60 年代兴起对 Leidenfrost 现象和 LFT 的系统深入的研究,重新促成了对膜沸腾、尤其是流动膜沸腾的工程应用前景的再认识过程。另一方面,液滴和雾滴在温度低于 LFT 的固体表面上或者在中、常温气流中的蒸发,却是工程上常见的热物理现象,例如雾化燃烧、喷雾干燥、喷水强化气冷、多组分低态物料的浓缩等,因而引起研究者对研究和了解液滴蒸发速度及滴径随时间变化

等具体规律的兴趣。

1980 年,面对学位制的建立,基于当代热物理领域中传热学发展的国际动向以及我国新兴工业与国防建设的需要,我们制定了系统研究流体在固体表面上蒸发与沸腾传热的设想,从 1981 年起全面开展了工作。在中国科学院和随后的国家自然科学基金会以及教育部和国家教育委员会博士点基金的支持下,截至 1988 年为止,已在国际著名学术刊物和国际学术会议论文集以及国内一级学报上先后发表了 32 篇学术论文,并且通过研究工作培养了两名博士和多名硕士。我们的工作实际上包括两个不同的子项目:(1)过冷液体高速流过壁面温度高于 LFT 的流动膜沸腾传热研究;(2)液滴在壁面温度低于 LFT 时受热蒸发的机理研究。这是具有明确工程应用背景和高技术应用前景的气、液两相流传热方面前沿性的研究课题,其意义有:(1)对核动力水堆失水和复水的紧急事故处理以及对大型直流锅炉、石油化工等工艺设备运行的安全都有重要的实际意义;(2)对高温壁面的保护性冷却,对国际冶金行业正在研究开发的快速淬冷及其新技术,对提高有关冶金产品的产量和质量,以及发展微晶和非晶化新材料的商品生产都具有关键的指导作用;(3)对强化沸腾和冷凝的相变传热以及对强化和优化雾化燃烧,都有实际的指导意义,并可为消防灭火以及军事上防化兵的建设提供科学依据。

液体沿固体表面的流动膜沸腾涉及气液界面随机波动的气液两相流边界层,特别是在高

1) 本文介绍的研究工作成果获 1989 年国家自然科学三等奖。

过冷液体高速流动时,膜沸腾情况更加复杂。实验要在高热流密度下进行,对水来说,热流密度将高达 $5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 以上,几乎比通常炉膛内的热流密度高二个数量级,因此控制就很困难。实际的金属轧材过程是在高达 1000°C 的初温下用水急冷,形成流动膜沸腾,目前公开报道的这种膜沸腾的现场实测数据彼此间相差悬殊,影响了系统的理论分析。我们遵循物理研究的方法,主要通过自己的实验观测,加强机理分析,按照工程问题的近似处理要求,尽量采用解析方法,作出理论概括,并经受实测数据的检验,取得了一些开创性的成果:(1)在国际上首次提出,由于蒸气膜层的沿程增厚,因远离临界态的气、液两相密度相差悬殊而引起的纵向压力梯度对层流膜沸腾传热有重要影响,所导得的理论公式在低流速下比已有的 Sparrow 和 Cess 经典公式(1961)所给出的传热强度高一个数量级,并为 E. M. Sparrow 教授本人所认可;(2)独创性地提出了高流速下湍流过冷膜沸腾传热的简化模型和“气液混相中间层”的设想:随机波动的气液相界面构成一个气、液两相同时存在的混合中间层,在此层内进行着激烈的蒸发和凝结相搅混过程,不仅使流体温度保持为相变温度 t_s ,而且使流体的流速维持在边界层之外的流体所具有的均匀流速 u ,从而简化了分析模型,创造性地建立了一种半经验理论,只包含一个待定的经验系数,非常成功地综合了水和 R11 致冷剂实验数据,为国际同行所赞赏并被引用;(3)研究和开发了极高热流密度 (10^7 W/m^2 数量级)下瞬态测试技术,但又不同于70年代原子能文献中所报道的“热块技术”;(4)提供了实用传热计算公式,并从饱和液

(上接第 205 页)

把高分辨电子显微像和电子衍射花样二者所含的结构信息结合起来,采用解卷和相位外推的图像处理技术,可以把一幅原来不反映晶体结构的像转换成结构像,并把像的分辨率提高至 0.1nm 左右,这为用高分辨电子显微术测定晶体结构发展了一种新方法。

[1] J. W. Menter, *Proc. Roy. Soc. A*, **236** (1956), 119.

物理

体到过冷液体,从低速层流到高速湍流,从平板流到槽道流(包括圆管和矩形槽道流)都作了系统性的开拓研究,正在逐步应用于生产实际。

液滴在温度低于 LFT 的固体热表面上蒸发过程的研究虽已有许多文献报道,但我们运用新兴激光显示技术对蒸发液滴内部的微细结构获得非常有意义的新发现,为液滴蒸发机理的研究开创了新局面:(1)在国际上首次发现并拍摄下显示液滴蒸发时滴内存在着著名的 Bénard Cells (“蜂窝流动”)现象,并首次揭示出液滴蒸发可以出现“稳定态”和“不稳定态”两种不同的形态,分析了滴内流动和界面不稳定性,从而为液滴蒸发过程的研究开拓了一个崭新的研究领域,对诸如在微重力的航天实验室条件下的金属熔炼处理及材料纯度测定等具有潜在指导意义;(2)在国际上首次提出介电常数对蒸发形态的影响机制,首次提出了双组分液滴蒸发时“过量表面自由能”和“卷缩系数”的影响关系,得到了划分不同形态的流谱图;(3)发现过细的雾化将使液滴蒸发落入“稳定态”,从而大大降低蒸发速度,这对传统的概念提出了挑战。工作中发展出能实时精确地记录液滴蒸发速度的多种光学显示方法和实验技术,包括提出了独特的全息剪切干涉法和光线追踪法矢量分析全息莫尔剪切干涉图。

如上所述,我们的基础性研究工作取得了多项创新性成果,具有相当的先进性,较好的系统性和一定的完整性,在国际上得到了承认,因而获得了1989年第四次国家自然科学奖三等奖。现在,我们仍在继续深入研究,使这项成果应用于工程实践。

- [2] S. Iijima, *J. Appl. Phys.*, **42**(1971), 5891.
 [3] N. Uyeda et al., *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 5181.
 [4] J. M. Cowley and A. F. Moodie, *Acta Cryst.*, **10**(1957), 609.
 [5] 李方华、范海福,物理学报, **28**(1979), 267.
 [6] 李方华,物理学报, **26**(1977), 194.
 [7] F. S. Han et al., *Acta Cryst. A*, **42**(1986), 353.
 [8] J. J. Hu and F. H. Li, *Ultramicroscopy*, **35** (1991), 339.
 [9] H. F. Fan et al., *Acta Cryst. A*, **41**(1985), 163.
 [10] N. Uyeda et al., *Chemica Scripta*, **14** (1978—1979), 47.