

冷液中运动高温球传热阻力耦合特性实验研究

李小燕, 张佶翱, 杨燕华, 徐济鋈

(上海交通大学核科学与系统工程系, 上海 200030)

摘要: 高温颗粒与冷液接触会引发剧烈的沸腾蒸发瞬变现象, 涉及到工程安全, 是一高速瞬变多相传热问题。本实验室设计建立了高温颗粒下落冷液沸腾可视化实验装置, 初次实验将 1 个或有限几个高温球形颗粒坠入水中, 利用高速摄像机记录其在冷液中的运动速度, 证实了确实存在由周围冷液快速蒸发引起的作用在运动中高温颗粒上的特殊阻力, 验证了高温颗粒的蒸发曳力模型。

关键词: 高温颗粒与冷液相互作用; 蒸汽爆炸; 可视化实验; 蒸发曳力模型

中图分类号: TK124; O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2003)05-0442-05

Experiment Study on the Coupling Effect Between Film Boiling Heat Transfer and Evaporation Drag Around a Hot-particle Moving in Cold Liquid

LI Xiao-yan, ZHANG Ji-ao, YANG Yan-hua, XU Ji-jun

(Department of Nuclear Science and System Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Extremely high rapid evaporation could occur when high temperature particles contact with low temperature liquid. This kind of phenomenon is associated with the safety of engineering and the problems in high-transient multi-phase fluid and heat transfer. The study is concerned in the design and build-up an observable experiment facility. The first series of experiments are performed by pouring one or six high temperature particles into a low saturated temperature liquid pool. The falling down speeds of particles are recorded by high-speed camera, so the special resistant acting on the moving high-temperature particles can be known, which is induced by the high speed evaporation surrounding the particles. The study has experimentally verified the theory of evaporation drag model.

Key words: high temperature particles-low temperature liquid interaction; vapor explosion; observable experiment equipment; evaporation drag model

近 20 年来, 蒸汽爆炸成为核反应堆和液化 天然气工业中的一种潜在事故受到重视。蒸汽

收稿日期: 2002-07-19; 修回日期: 2002-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50046026)

作者简介: 李小燕 (1970—), 女, 浙江嘉善人, 讲师, 在职博士研究生, 核反应堆工程与安全专业

爆炸现象可能造成重大事故,特别在核电领域。核动力系统在发生严重事故时,蒸汽爆炸是核反应堆堆芯发生熔化工况后可能产生的一系列后果之一。由于水蒸气爆炸涉及到传热与流体力学内极为苛刻的现象,如超高速传热与蒸发(μs量级)、超高压传播(接近或大于0.1 GPa),成为当今研究的热点^[1,2]。

蒸汽爆炸是剧烈的多相流现象,包含了快速的热量和质量转换。这些转换引起许多物理现象,如高速相交换、高热不平衡、水力不稳定性、压力波、液滴的碎化等,是一非平衡、非稳态,包含极其复杂热流体相互作用的动力学过程,所涉及的热物理现象复杂、时间尺度小、温度范围宽,其机理研究困难。理论研究现仅集中在建立各种模型来解释这些物理现象中所含的物理机理方面,需要实验研究来进行模型验证。国外业已进行的一些大规模蒸汽爆炸实验有 QUEOS 实验、MAGICO-2000 实验、BILLEAU-2200 实验、SIGMA-2000 实验、ZREX 试验、FARO 实验和 KROTOS 试验。

为揭示影响高温颗粒下沉速度的主要因素,需对汽膜的生长和传热特性进行详细的实验和理论研究。本实验室拟设计一套研究高温颗粒与水相互作用的实验装置,通过有针对性的实验设计,了解粒子间无相互影响时,1个高温颗粒在水中产生蒸汽量的多少以及水急剧蒸发阻止颗粒向下运动的合力的大小。通过实验考究各种模型的可信度,并为进一步研究高速瞬态蒸发传热奠定实验基础。

1 颗粒运动特性

高温熔融物坠落水中的物理现象是一个多相热物理基础问题。从根本上来讲,蒸汽爆炸的产生取决于单位体积内产生的蒸汽量及蒸汽速率。从单个高温颗粒的瞬变出发,这种高瞬态蒸发涉及颗粒坠落运动和膜态沸腾等急剧而高速传热传质的复杂耦合现象。在观察汽膜内高温颗粒的运动时发现,在高温颗粒比周围流体的比重大的情况下,高温颗粒并未与冷却剂直接接触。杨燕华的蒸发曳力理论^[3]认为,在汽膜内存在较大的力阻止高温颗粒下落。高温颗粒周围的汽膜厚度是不均匀的,热球周围的蒸发率和蒸汽密度为非球对称分布,而且,汽膜内压力分布不均匀将导致在汽膜内形成绕流。这

种非球对称分布可能构成了一种阻止热球下落的合力,使高温颗粒在冷却剂中的垂降速度大为降低。

在水中运动的高温球形颗粒所受的拖曳力是作用在粒子表面的压力和黏性力的合力,当粒子是球形时,拖曳力可写为:

$$\vec{F}_h = - \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (p \sin \theta - \tau \cos \theta) n \vec{d} \quad (1)$$

根据蒸发曳力理论,高温球形颗粒完全没入水中时的速度 u_h^p (m/s) 表达式^[3]为:

$$u_h^p = \sqrt{u_{h,0}^2 + 4 r_h g - \frac{10 p_g}{9} \left(\frac{\phi}{a} - 1 \right) - \frac{3}{5} g t_p a} \quad (2)$$

式中: r_h 为高温球形颗粒的半径, m; $u_{h,0}$ 为高温球形颗粒刚刚接触水面时的速度, m/s; g 为重力加速度, m/s²; p_g 为水面上的大气压, Pa; ρ_h 为高温球形颗粒的密度, kg/m³; ρ_l 为冷却剂的密度, kg/m³; ϕ 为蒸汽产生的速度, m/s; a 为静态汽膜生长率; t_p 为高温球形颗粒从刚刚接触水面到完全进入水中所需的时间, s。

蒸汽产生速度 ϕ (m/s) 的表达式为:

$$\phi = \frac{h}{g}, \quad h = \frac{q_h}{h_{fg}}, \quad q_h = \rho_l h (T_h^4 - T_l^4) \quad (3)$$

式中: h 为蒸汽产生率, kg/(m²·s); g 为蒸汽密度, kg/m³; ρ_l 为冷却剂的吸收率; ρ_h 为高温球形颗粒的辐射发射率; T_h 为高温球形颗粒的温度, K; T_l 为冷却剂的温度, K; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴), 为黑体辐射常数; h_{fg} 为冷却剂的汽化潜热 J/kg。

2 实验

为了模拟高温颗粒垂降粘滞性冷液中沸腾蒸发瞬变运动,必须确定沸腾蒸发瞬变运动的控制参数,以获得可以调节的如下控制参数:高温颗粒的尺寸、温度、入水前后的速度、冷液过冷度、冷液表面的压力和垂降距离等。高温颗粒垂降入冷却剂中时,蒸汽膜立即产生。为了解这一物理现象过程,利用可视化观察及用高速摄像来获得清晰的图像。

2.1 实验系统设计

整个实验系统由高温电阻炉及真空系统、可视化实验水箱、热球运动机构及通道组成(图1)。高温电阻炉设计要求可加热 10 个直径为 1

~ 10 mm ZrO_2 小球,炉内盛装小球的坩埚为 100 mm × 20 mm × 100 mm 石墨矩形槽。炉膛设计为圆柱型, $\phi 460$ mm × 680 mm, 卧式。整个炉体用碳砖烧结而成, 外套不锈钢炉壳, 壳外包有水冷套, 炉膛包括释放室和加热室两部分。加热室内有石墨加热体和保温层。加热室的一侧开有直径 8 mm 的测温通道, 测温通道外侧镶嵌耐温玻璃, 内侧平时用高亮度的不锈钢挡板挡住。另外, 加热室还开有抽真空通道, 用以注入惰性气体。释放室的作用是将实验小球加热完毕后拉出, 转动把手, 使其在重力作用下自由下落。实验小球在氩气环境下加热到高温, 最高可达 2 200 。

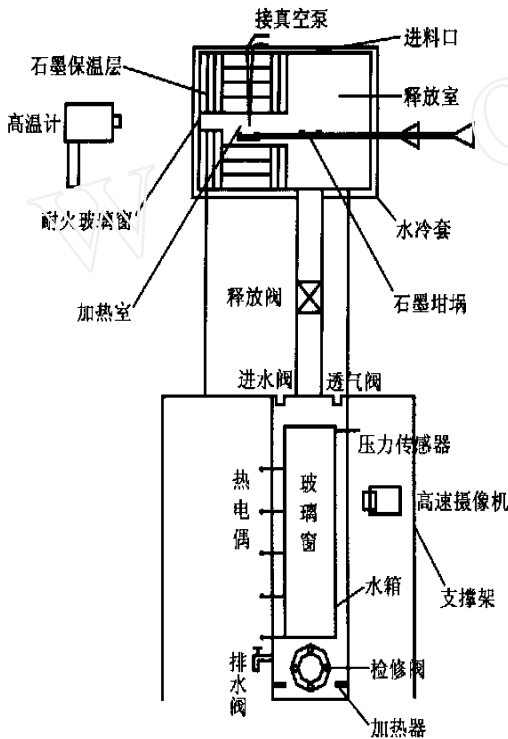


图 1 实验台架示意图

Fig. 1 Scheme of the experiment facility

可视化实验水箱置于电炉下, 由不锈钢框架组成, 高 1 m, 长、宽均为 0.3 m。距水箱顶部和底部 0.15 m 处的四面各镶有 70 cm × 20 cm 的玻璃, 以便可视化观察。容器的正面预备作可视化研究的窗口, 侧面两块玻璃作透光用, 实验时配有无频闪的强光源。背面作背景兼刻度, 实验时用带刻度的厚纸遮光。

可视化实验水箱顶端有一直径 100 mm 的开口, 用来连接从高温炉出来的导管。另配有

直径为 20 mm 的进水阀和透气阀各 1 个。水的温度及压力由按高度对称分布布置的 10 个热电偶和 2 个压力传感器测量。水箱下部布置有直径 20 mm 的排水阀, 底部配有 3 支 3 kW 不锈钢电热管, 用以调节水的不同过冷度。

实验时, 用高速摄像机观察并摄取小球在水中的动态特性。

2.2 实验方案

为验证模型, 设计了以下两组实验, 以验证可视化实验装置系统的可用性。

1) 1 个高温球形颗粒落水实验

实验前, 将高速摄像机预先设置为 500 或 1 000 帧每秒, 计算机连接到位, 并将其视野分别设置在水面和水下 40 cm 处。实验时, 分别将直径 3.5、10 mm 的 ZrO_2 小球加热到高温, 从距离水面 1.55、1.61、1.96 m 处自由落入过冷度不同的水中, 调节高速摄像机进行摄像, 考虑到试验小球在坠落过程中辐射及对流散热, 经计算可得 ZrO_2 小球在下落到水面附近时的温度。小球入水后的速度可通过测量连续两帧图像中小球的相对位置获得, 连续两帧图像的时间间隔为 0.002 s 或 0.001 s。实验观察到, 小球入水后, 水面立即产生较大气泡, 且测得的小球速度比入水前有明显下降 (图 2)。在水面下 40 cm 处, 观测到高温颗粒的速度降低更多 (图 3)。

2) 冷球落水实验

分别将直径 3、5、10 mm 的 ZrO_2 小球直接从距离水面 1.55、1.61、1.96 m 高处自由坠落入过冷度不同的水中, 实验观测到小球入水后的速度未见明显下降。

2.3 实验数据分析

可视化实验结果表明: 蒸发环境下小球周围的流态分布与单相冷态时全然不同, 高温颗粒入水后的速度明显下降, 而常温颗粒入水后的速度则下降较少, 说明确实存在一种阻止高温颗粒向下运动的阻力; 水面下 40 cm 处观测到的高温颗粒速度几乎不再降低, 可认为已达到自由沉降速度 1.42 m/s, 大于同一条件下冷球的自由沉降速度 1.30 m/s。曹学武等^[4]推断: 高温颗粒周围的气流运动在一定条件下可能加速颗粒的下沉速度, 在紊流情况下, 高温时单个小球的拖曳力因子比常温时小, 因此, 高温颗粒的自由沉降速度大于常温颗粒。

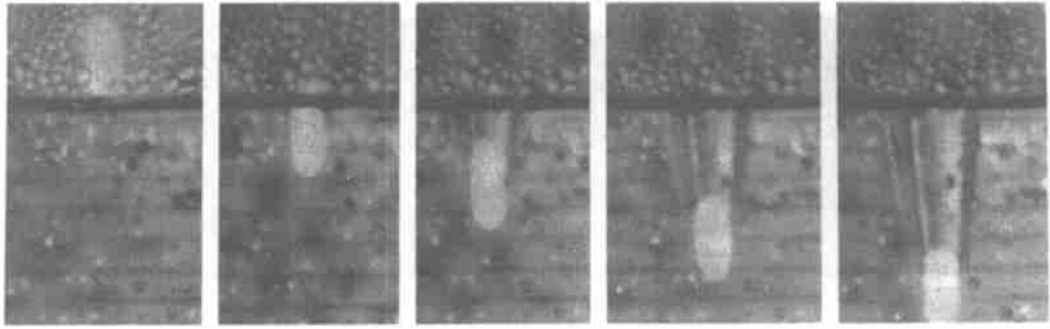


图2 500 帧每秒下连续摄得的 5 帧图像

Fig.2 Photographs taken by the high speed camera for 500 frames per second
 ZrO_2 小球温度 1 800 ; 粒径 5 mm; 入水前速度 5.51 m/s; 水温 32

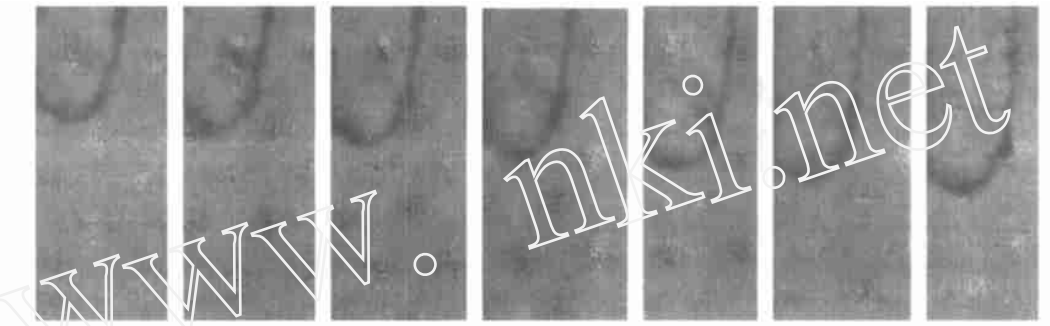


图3 1 000 帧每秒时水下 40 cm 处连续摄得的 7 帧图像

Fig.3 Photographs at 40 cm below the water surface
 taken by the high speed camera set for 1 000 frames per second
 ZrO_2 小球温度 1 184 ; 粒径 10 mm; 入水前速度 6.20 m/s; 水温 90

在计算高温小球或熔融物传热时,拖曳力理论只考虑辐射热传递。资料表明,当熔融物温度很高时,辐射热传递成为主要的传热方式,忽略对流换热及热传导不会带来很大误差。小球温度不太高时,汽膜内的自然对流及强迫对流对总热流密度的贡献很大,必须予以考虑。所以,拖曳力模型不适用于较低温度物体与水相互作用的阻力特性计算,但能较好模拟核反应堆严重事故下堆芯熔融物与冷却剂相互作用即 FCI 条件时熔融物在冷却剂中的阻力特性。

不同初速 $u_{h,0}$ 高温球的入水速度 u_h^i 实验值与计算值的比较示于图 4。从图 4 可看出:小球温度较高时,由式(2)得到的计算值与实验值符合较好。

高温下的蒸汽物性发生显著改变。有资料表明:当温度在氧化物熔点附近或更高时,其发射率存在很大的不确定性,发射率对温度的依赖性随材料的不同各异。在典型 FCI 条件下,辐射特性是未知的,它随堆芯熔融物的成分

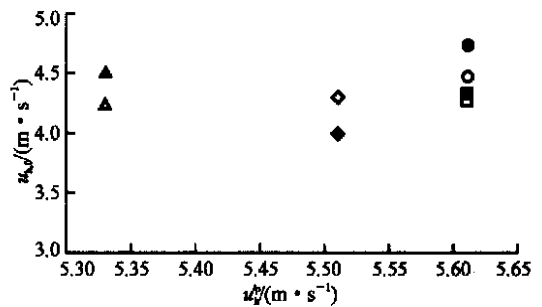


图4 不同温度高温球的实验数据和计算值

Fig.4 Comparison of experiment data and calculated data
 , , , — 实验数据;
 , , , — 计算值
 , — $D(ZrO_2) = 10\text{ mm}$,
 $T(H_2O) = 363\text{ K}, T(ZrO_2) = 1\ 673\text{ K}$;
 , — $D(ZrO_2) = 10\text{ mm}$,
 $T(H_2O) = 359\text{ K}, T(ZrO_2) = 2\ 069\text{ K}$;
 , — $D(ZrO_2) = 5\text{ mm}$,
 $T(H_2O) = 362\text{ K}, T(ZrO_2) = 1\ 581\text{ K}$;
 , — $D(ZrO_2) = 5\text{ mm}$,
 $T(H_2O) = 363\text{ K}, T(ZrO_2) = 2\ 073\text{ K}$

和温度而变化。研究表明:450 ~ 2 200 K 温度范围内, UO_2 的发射率是增长的, $\epsilon = 0.81 \sim 0.84$ 。Held 和 Wilder^[5] 发现, 在接近 2 400 K 时, 有一小的回落, 但尚不知温度继续升高时, 是否持续降低。本实验用高温材料 ZrO_2 的辐射特性的资料缺乏, 取值为 0.84, 这不可避免对理论计算带来某些不确定性。

3 结束语

本实验涉及的热球、冷液高速瞬变蒸发传热问题是流体力学和多相流热物理学科交叉的新的理论应用研究方向。研究建立的高温材料与水相互作用的实验装置为今后进一步研究高速瞬变蒸发传热奠定了实验基础。实验初步显示了蒸发条件下颗粒两相流瞬变、周围的力与蒸发速率相关的运动机理; 针对高温颗粒下落冷液沸腾蒸发瞬变运动的可视化机理模拟实验为发展论证关于瞬变蒸发对颗粒运动影响的阻力模型奠定了基础。本次实验研究时间有限, 实验条件有待改进, 如在获得强光源(如激光)

条件下, 将高速摄像机设置在 2 000 帧每秒以上, 以精确测量高温颗粒速度, 以及通过激光诱导荧光法观测高温颗粒蒸汽膜厚度等重要信息。另外, 还可通过高温炉坩埚的改造, 克服石墨与金属反应的缺陷, 使之适合加热多种材料。

参考文献:

- [1] Corradini ML, Kim BJ. Vapor Explosion in Light Water Reactor: A Review of Theory and Modeling [J]. Prog Nucl Energy, 1988, 22(1): 1 ~ 177.
- [2] Corradini ML, Kim BJ. Vapor Explosion: A Review of Experiment for Accident Analysis [J]. Nucl Saf, 1991, 32(3): 337 ~ 362.
- [3] Yang Yanhua. Multi-phase Simulations for Phenomena in Vapor Explosions [D]. Tokyo, Japan: University of Tokyo, 1996.
- [4] Cao Xuewu, Yoshiharu T. Drag Correlations for a Hot Particle/ Droplet With Vapor Film [J]. J Nucl Sci Technol, 2001, 38(9): 721 ~ 728.
- [5] Held PC, Wilder DR. High-temperature Hemispherical Emittance of Uranium Oxides at 0.65 and 0.70 m [J]. J Am Ceram Soc, 1969, 52(1): 48 ~ 56.