

## 熔融金属液滴热细粒化过程研究

林 千<sup>1</sup>, 佟立丽<sup>1</sup>, 曹学武<sup>1</sup>, Alexander VOROBYEV<sup>2</sup>, Vladimir KRIVENTSEV<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 俄罗斯奥布宁斯克核动力工程大学, 奥布宁斯克 249040)

**摘要:** 熔融液滴的细粒化是决定燃料与冷却剂相互作用破坏后果的关键过程, 它决定最终的热能与动能的转化比, 是预测事故后果的重要因素之一。然而目前对该过程中基于本身内能的热细粒化机理尚不清楚。本工作通过单个熔融金属液滴与水相互作用的实验, 借助高速摄像系统对熔融液滴的热细粒化现象进行拍摄, 观察发现熔融金属液滴与水的相互作用经历了若干次加速膨胀细粒化过程, 测量到熔融液滴的细粒化时间为 0.8 ms, 两次细粒化的时间间隔为 0.8 ms, 细粒化加速膨胀时间仅为 0.4 ms。根据实验观察和分析, 提出了一种由熔融液滴与水接触面不稳定沸腾效应引起的热细粒化机理。

**关键词:** 燃料与冷却剂相互作用; 熔融液滴; 热细粒化

**中图分类号:** TL364.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2009)07-0604-05

### Thermal Fragmentation Process of Melt Droplet

LIN Qian<sup>1</sup>, TONG Li-li<sup>1</sup>, CAO Xue-wu<sup>1</sup>, Alexander VOROBYEV<sup>2</sup>, Vladimir KRIVENTSEV<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Obninsk State University for Nuclear Power Engineering, Obninsk 249040, Russia)

**Abstract:** The fragmentation of melt droplet is a key factor to predict the damage degree of fuel coolant interaction accident, which determines the final ratio of internal energy transferred to power. However, the fragmentation mechanism based on internal energy is not very clear currently. The interaction of single melt droplet with water was studied by experiment in the paper. Thermal fragmentation of melt droplet was observed with high-speed camera. Experiment results show that the interaction goes through several circles of expansion. The measured fragmentation time is about 0.8 ms, the interval time of two fragmentations is 0.8 ms, and the accelerating expansion time is 0.4 ms. A new thermal fragmentation mechanism based on boiling effect was proposed.

**Key words:** fuel coolant interaction; melt droplet; thermal fragmentation

燃料与冷却剂相互作用(FCI)是核反应堆在发生严重事故情况下的一个重要现象。在液态金属冷却快堆的堆芯坍塌事故中及轻水堆的

堆芯熔化事故中,大量的堆芯熔融物可能与冷却剂发生强烈的热物理作用,引起蒸汽爆炸并对反应堆安全构成威胁。在近 30 年,许多研究

机构和学者对该现象进行了深入的研究<sup>[1-4]</sup>,然而目前的研究结果表明,对于该现象中一些关键性问题的物理作用机理仍不清楚。燃料与冷却剂相互作用包括熔融物团块的破裂、熔融液滴与冷却剂的粗混合、触发、熔融液滴的细粒化、繁殖传播、膨胀爆炸等过程。其中,熔融液滴的细粒化是决定熔融物传热面积变化率的关键过程,它决定了最终的热能与动能的转化比,因此,熔融液滴的细粒化是预测燃料与冷却剂相互作用事故后果的重要因素之一。但由于熔融液滴的细粒化过程不仅作用剧烈且持续时间短暂,对于弄清其物理作用机理和发展过程带来一定困难,目前,对于蒸汽爆炸过程中熔融金属液滴的细粒化机理仍处于研究探索阶段。本工作通过单个熔融金属液滴与水作用的实验来研究燃料与冷却剂相互作用过程中熔融液滴的热细粒化过程,采用高速摄像系统来观察作用过程中熔融液滴与水的作用区域变化和熔融液滴的细粒化过程,测定细粒化时间等关键参数,并对细粒化机理进行分析。

## 1 实验简介

实验装置和实验系统示于图1。主要包括高温炉、坩埚、水池、高速摄像系统、温度控制器等。前期的参数敏感性分析实验发现,采用铅锡合金(50%锡)材料、炉温在400~500℃范围内、水温为20℃时的实验相对于其他条件下的实验,熔融液滴的细粒化现象最明显。因此,本工作对细粒化机理研究主要进行了这类细粒化现象最明显的实验,以期观测到最好的细粒化实验效果。前期的参数敏感性分析实验发

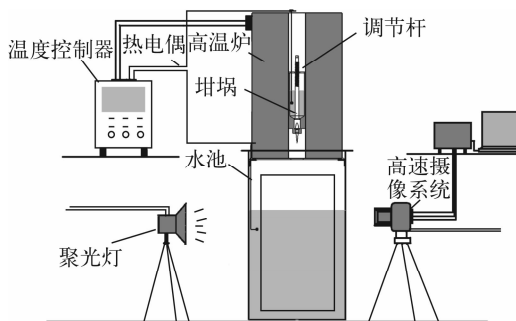


图1 实验装置和实验系统示意图

Fig. 1 Scheme of experiment facility and system

现,在该实验参数范围内,熔融液滴的下落高度不是一敏感参数,说明在实验参数范围内水力学机理的影响不大,如果发生细粒化现象,则主要由热细粒化机理引起。在进行热细粒化机理研究的实验中,熔融液滴的下落高度均为20 cm,相应的下落速度为2 m/s。为对细粒化过程进行细致观察和研究,采用了高速摄像系统(6 000~10 000 帧/s)来拍摄熔融液滴与水的作用过程。

实验中待炉温、水温及水池内水位达到实验工况要求时,通过旋转坩埚中心的调节杆,使坩埚内的熔融液态金属流出,形成液滴自由下落。控制熔融液滴以50~100滴/min的释放速率自由下落,液滴的平均当量直径约为4.5 mm,平均质量为0.487 g。同时启动水池侧面的高速摄像机对熔融金属液滴与水的作用过程进行拍摄(持续拍摄时间约1 s)。实验后,取出沉降在水池内收集板上的实验产物,晾干处理。收集实验产物样品,并对每组样品拍照和整理实验数据。

## 2 实验结果讨论

### 2.1 细粒化过程观察

实验中,透过水池侧面的有机玻璃窗口可直接观察到熔融金属液滴与水的作用过程。熔融液滴入水前呈水滴状,入水时由于这两种介质接触面的巨大温差引起熔融液滴周围水的剧烈沸腾蒸发,同时可观察到,熔融金属液滴的形状由单个水滴状瞬间变成了蓬松的多孔海绵状。这个变化过程太快,肉眼无法看清其变化发展过程。通过高速摄像系统对这个作用过程进行拍摄,对该过程有了更细致的认识和新的发现。

图2所示为高速摄像系统拍摄到的典型细粒化过程(10 000 帧/s)。以液滴完全入水为计时零点,入水后由于水面的冲击作用及接触面的水分蒸发,在水面下很快形成一熔融液滴和水蒸气的混合区域,该混合区域即为熔融液滴与水的作用区域。在开始阶段,此区域由中心的熔融液滴和包裹熔融液滴的蒸汽膜组成。由于水蒸气的影响,无法清楚观察到作用过程中混合区域内熔融液滴的外形变化、蒸汽膜的厚度变化及液滴的细粒化过程,但可清楚观

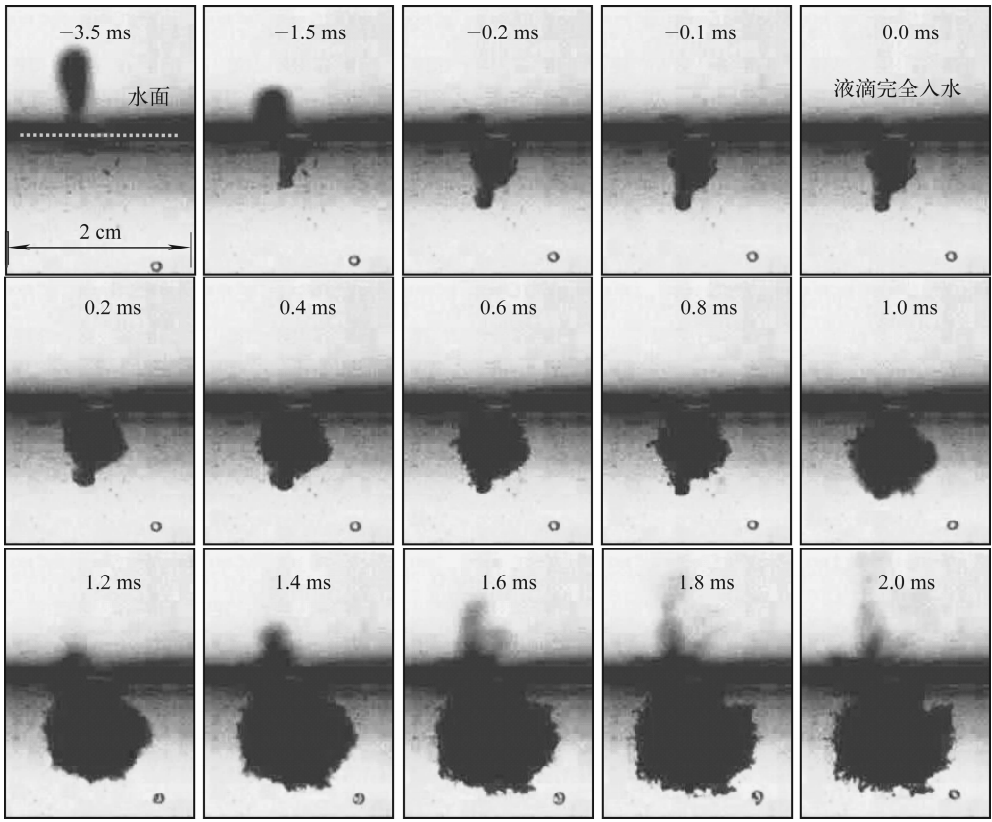


图2 熔融液滴与水作用细粒化过程拍摄图像

Fig. 2 Melt droplet fragmentation process

观察到作用区域的边界变化,该边界即是熔融液滴和水蒸气混合区域与外围水的边界。从图2可看出,这个作用区域并不稳定,在液滴完全入水后,作用区域的直径开始变大,体积也迅速膨胀,经过约2.0 ms后才不再有较大变化。经对作用区域仔细观察和比较后发现,作用区域有两个加速膨胀过程,一个出现在入水后0.1~0.3 ms,另一个出现在1.0~1.2 ms。实验后收集到的产物呈现多孔海绵状结构,同时还伴随大量多孔状和粉末状实验产物产生(图3)。

## 2.2 细粒化作用区域

从前面的实验观察可知,细粒化作用区域反映了熔融液滴的细粒化过程。实际上,在细粒化过程进入迅速膨胀阶段后,熔融液滴与水(水蒸气)充分混合,在液滴外围的蒸汽膜厚度可忽略,因此,观察到的作用区域边界即为熔融液滴与水作用后的边界。通过测量细粒化过程中作用区域的直径和直径变化率,可更深入地了解熔融液滴的细粒化过程。由于在实验中,熔

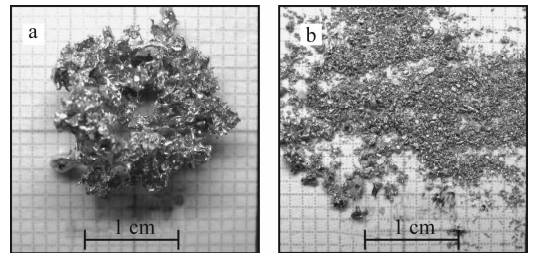


图3 熔融液滴细粒化实验产物

Fig. 3 Fragmentation debris

a——多孔状碎片;b——粉末状碎片

融液滴的下落及与水接触后的作用过程是自发的,即使相同条件下的实验也可能存在不同的实验现象,故只能从其相互作用规律方面对细粒化过程做定性讨论。

图4所示为某5次实验的作用区域直径变化曲线。这5次实验均观察到了剧烈的熔融液滴与水相互作用过程和细粒化现象。这5次实验的实验条件相同或相近,实验炉温为400~500℃,水温为20℃,下落高度为20 cm。在这

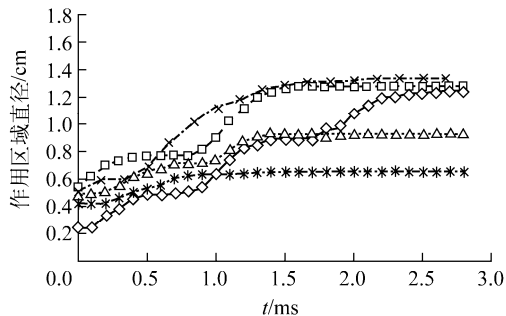


图 4 作用区域的直径变化

Fig. 4 Growth of interaction area

◇——实验 1; □——实验 2; △——实验 3;  
\* ——实验 4; ×——实验 5

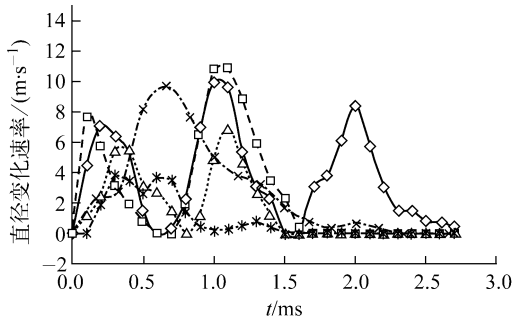


图 5 作用区域的直径变化率

Fig. 5 Growth rate of interaction area

◇——实验 1; □——实验 2; △——实验 3;  
\* ——实验 4; ×——实验 5

样的实验条件下,较易观察到熔融液滴的细粒化现象。从图 4 可看出,这几组实验中作用区域的直径变化情况不完全一致,实验 4 的作用区域在熔融液滴入水后 1 ms 内就停止了膨胀,而实验 1 的作用区域膨胀一直持续了 3.0 ms。另外,可明显观察到作用区域的直径变化呈现阶梯增长的规律,实验 1 和实验 2 经两个阶梯增长后停止膨胀,实验 3 经过了 3 个阶梯增长后才停止膨胀,实验 4 和实验 5 经过 1 个阶梯增长后就停止了膨胀。阶梯增长的规律反映了在实验过程中,经过若干次熔融液滴的细粒化,熔融液滴与水的相互作用才结束。

图 5 为上述 5 组实验的作用区域直径变化速率曲线。从图 5 可知,作用区域的直径变化速率也即熔融液滴的细粒化膨胀速率高达 11 m/s。尽管熔融液滴的细粒化膨胀速率很大,但加速膨胀持续时间不长,不能形成破坏力。另外,各组实验都呈现出若干次加速膨胀过程,且前 4 组实验的膨胀速率峰值均出现在熔融液滴入水后 0.3 ms、1.1 ms 和 2.0 ms 时间点左右。作用区域的多次加速膨胀过程与直径的阶梯增长规律也相吻合,再次证明实验中经历了多次细粒化过程。

### 2.3 细粒化时间

熔融液滴的细粒化时间是指熔融液滴从其初始状态变为细粒化碎片的时间。Patel 等<sup>[5]</sup>将细粒化时间定义为从液滴直径剧烈增大开始到液滴直径变为原来直径的 2 倍为止;Pilch 等<sup>[6]</sup>将细粒化时间定义为从出现细粒化现象开始到不再发生细粒化现象为止。本工作的细粒

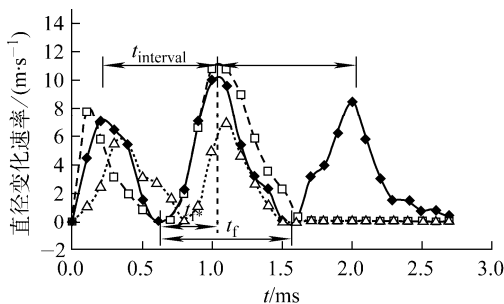


图 6 熔融液滴的细粒化时间

Fig. 6 Melt droplet fragmentation time

◆——实验 1; □——实验 2; △——实验 3

化时间定义为从液滴直径剧烈增大开始到液滴直径不再增大为止,即从作用区域的直径变化速率为 0 开始经一峰值后直径变化速率再次降为 0 为止,然后进入下一计时周期。如图 6 所示, $t_f$  为熔融液滴的细粒化时间,测量实验 1、实验 2 和实验 3 的细粒化时间平均约为 0.8 ms,两次细粒化的时间间隔  $t_{interval}$  与细粒化时间相等也为 0.8 ms。实际上,作用区域的加速膨胀时间  $t_f^*$  更能反映细粒化作用过程,加速膨胀时间是一能量释放过程,将熔融液滴内能转化为机械能对作用区域产生冲击效果,实验 1、实验 2 和实验 3 中加速膨胀时间  $t_f^*$  平均约为 0.4 ms。

### 2.4 细粒化机理讨论

由于在作用过程中,熔融液滴与水的相对速度较小,在这个过程中,水力学细粒化机理几乎不起作用;然而从实验观察却发现,该过程中的熔融液滴细粒化现象非常明显,故本实验中观察到的细粒化过程是由热细粒化机理主导

的,其细粒化能量来源于熔融液滴本身的内能。

通过对细粒化过程的仔细观察,分析其热细粒化机理如下。

1) 在发生相互作用之前,由于熔融液滴与水存在巨大温差,高于水的最小膜态沸腾壁面过热温度(参考常规沸腾曲线),因此,当熔融液滴与水接触时将在熔融液滴与水之间产生蒸汽膜,形成稳定的膜态沸腾。蒸汽膜不仅阻碍了熔融液滴与水的直接接触,也使得传热受阻,而相互作用区域暂时处于相对稳定的状态。

2) 随着熔融液滴温度的下降,壁面过热度逐渐低于最小膜态沸腾温度,传热过程进入过渡沸腾区域,这是一不稳定的沸腾传热过程,熔融液滴与水间歇式接触,引起强烈的扰动,可能引起熔融液滴周围的压力不一致和产生局部压力脉冲,对熔融液滴产生冲击(或对局部表面产生冲击),引起熔融液滴的变形(或局部细粒化)。熔融液滴的变形以及局部细粒化使得接触传热面积增加,引起更剧烈的传热过程,产生一更大的局部压力脉冲,引起整个熔融液滴的细粒化,在这个过程中可明显观察到作用区域的膨胀。

3) 作用区域膨胀后,熔融液滴将再次与水直接接触,此时如果还存在未发生细粒化的熔融液滴,并且其温度仍在沸腾曲线的过渡沸腾区且熔融液滴未发生凝固,将发生第2次细粒化过程,引起作用区域的第2次膨胀,如此循环下去。

### 3 结论

通过对单个熔融金属液滴与水的相互作用过程中熔融液滴细粒化的实验研究,借助高速摄像系统,观察到明显的熔融金属液滴细粒化现象。在本文实验条件范围内,熔融液滴的细粒化由热细粒化机理主导,细粒化过程能量来源于熔融液滴本身的内能;基于相对速度的水

力学细粒化机理对细粒化过程不产生影响。实验还观测到,熔融金属液滴与水的相互作用经历若干次热细粒化过程才停止。作用区域的多次加速膨胀过程表现为作用区域直径的阶梯增长规律。熔融液滴的细粒化膨胀速率高达11 m/s。本实验范围内,熔融液滴的细粒化时间平均约为0.8 ms,两次细粒化的时间间隔约0.8 ms,细粒化过程中的加速膨胀时间约0.4 ms。此外,还对热细粒化机理进行了简单分析。本工作的研究结果为进一步开发熔融液滴的热细粒化模型提供了基础。

### 参考文献:

- [1] BERTHOUD G. Vapor explosions[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32(1): 573-611.
- [2] MAGALLON D, MAILLIAT A, SEILER J M, et al. European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235 (2-4): 309-346.
- [3] FLETCHER D F. Steam explosions triggering: A review of theoretical and experimental investigation [J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 155(1): 27-36.
- [4] CORRADINI M L, KIM B J. Vapor explosion in light water reactor: A review of theory and modeling[J]. Progress in Nuclear Energy, 1988, 22 (1): 1-177.
- [5] PATEL P D, THEOFANOUS T G. Hydrodynamic fragmentation of drops[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 103: 207-223.
- [6] PILCH M, ERDMAN C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(6): 741-757.