

低熔点熔融金属锡蒸汽爆炸实验研究

李天舒, 杨燕华, 袁明豪, 胡志华

(上海交通大学 核科学与工程学院, 上海 200240)

摘要:设计建造了1个低熔点熔融金属与水相互作用的实验装置,进行了3种不同工况的熔融金属与冷却剂接触实验,其中1种实验发生蒸汽爆炸现象。对每个实验后的碎片进行比较,发生爆炸后的碎片较小,呈多孔介质状。初步实验分析表明,在相同工况下,不同的实验材料影响熔融金属与水相互作用效果:纯度较高的金属能够发生蒸汽爆炸。熔融金属的温度也影响金属的碎化程度。结果分析表明Taylor不稳定性对金属液柱的破碎具有很大作用。

关键词:蒸汽爆炸;熔融金属与水相互作用;可视化实验

中图分类号:TL33 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2007)S0-0262-06

Experimental Study on Vapor Explosion With Low-Temperature Molten Stannum

LI Tian-shu, YANG Yan-hua, YUAN Ming-hao, HU Zhi-hua

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of fragmentation in vapor explosion, a simple experiment facility for low-temperature molten material into water was designed. Three molten materials and water interaction experiment of different experimental conditions were carried out. In one of them, the vapor explosion was observed. The debris of different experiments were collected and comparisons were made for each other; the mean debris of vapor explosion experiment is smaller. The experimental results show that the metal category and temperature all have great effects on the jet fragmentation and vapor explosion. The pure tin water interaction could result in vapor explosion. The Taylor instability has a great effect on the breakup of the jet.

Key words: vapor explosion; molten metal and water interaction; observation experiment

两种化学成分不同,介质彼此几乎互不混合的物质,如高温熔融物和冷液,快速紧密接触

时,若一种介质的温度远高于另一种液体的正常沸点,该欠冷液体迅速快速蒸发;在某种条件

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50376036)

作者简介:李天舒(1973—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,核电站严重事故多相流动与传热专业

下,高温介质会碎裂或发生进一步细化,传热面积急剧增加,导致周围液体产生爆发性沸腾,并伴随产生冲击波;若此冲击波具有显著的破坏潜能时,形成爆炸性沸腾,这种爆发性的沸腾称为蒸汽爆炸(Vapor Explosion),可诱发重大事故。自然界中火山爆发时,高温岩浆弥散、蔓延过程中,就会发生这类蒸汽爆炸现象。近20年来,这种蒸汽爆炸成为核反应堆和液化天然气工业中的一种重大潜在事故受到重视,引起工程师和许多领域学者的关注和研究。就全世界范围而言,已开展了许多实验和理论研究^[1-4]。在核电领域,蒸汽爆炸是核动力系统在发生严重事故时,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。1979年美国的三里岛事故和1986年苏联的切尔诺贝利核电站事故,在这两个至今为止历史上最大的核电站事故中,都发生了严重的堆芯熔融损伤。在严重事故工况下,所有那些可能引起或发生的现象,都引起世界各核电拥有国的重视^[5-7]。

关于蒸汽爆炸的现象,国内外已进行了大量的研究,但仍遗留某些机理问题至今没有完全解明。本研究在国家自然科学基金资助下通过设计一个低熔点的熔融金属与水接触的实验装置,在有限的实验室条件下(常压、金属温度600℃、实验材料质量较小),研究熔融金属的蒸汽爆炸机理。

1 实验研究

1.1 实验系统

总的实验装置如图1所示。实验装置主要由电阻熔化炉、水箱和监视测量设备组成,电阻炉如图2所示。电阻炉内有一特制的不锈钢坩埚(凡与液体金属锡接触的部位均采用不锈钢,防止黏结)。坩埚底部有一30 mm直径圆孔,圆孔上开一5 mm高45°斜坡,增加塞子接触面积,防止液态熔融金属泄漏。坩埚底部开口外伸出10 mm圆管,圆管外套有螺纹,以便不同直径漏斗旋在此上。在坩埚圆周壁面有电阻丝加热。电阻功率4 kW,可得到1 000℃熔融金属温度。电炉内用一圆锥型不锈钢塞子塞住。塞子上连接一长螺杆。螺杆上有一螺母,可使螺杆向下,将不锈钢塞子紧紧塞住电炉下端开口。实验时,将

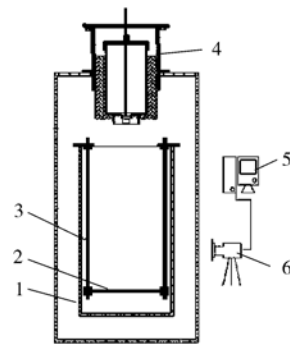


图1 实验台架示意图

Fig. 1 Scheme of experiment facility

1——水箱;2——熔融物收集板;3——螺杆;
4——电阻炉;5——计算机;6——高速摄像机

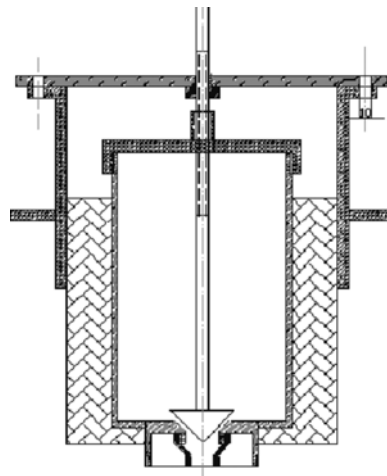


图2 电阻炉示意图

Fig. 2 Scheme of furnace

螺母向下旋,提升螺杆即可。

可视化实验水箱布置在高温电炉之下,为不锈钢框架,高2 m,长、宽均0.3 m。前后镶有两块160 cm×24 cm钢化玻璃,以便可视化观察。容器的正面作为可视化研究窗口,实验时配强光源,背面作背景兼刻度,实验时有带刻度的厚纸遮光。在容器下部布置有排水阀,可更换清洁冷却水。容器底部配3支3 kW不锈钢电热管,用以调节水的过冷度。光源放在水箱前侧45°,注意避免正面玻璃上的反光。另一前侧45°放置一反光镜,可得到清晰实验效果。

1.2 实验材料

本研究采用两种不同金属模拟实验材料:比较纯的金属锡;锡和铅的合金(锡,20%;铅,

80%)。高纯度锡的化学成分列于表1。

1.3 实验内容与方法

将模拟实验材料放入电炉坩锅中,加热到指定温度,冷却剂水保持常温。当电炉内温度稳定后,旋转螺杆上的螺栓,提升螺杆,熔融金属落入水中。整个实验过程由高速摄像机记录下来。实验工况包括:1) 600 °C高纯度锡与常温水接触实验;2) 600 °C铅锡合金与常温水接触实验;3) 300 °C铅锡合金与常温水接触实验。具体实验工况列于表2。

1.4 实验结果及分析

图3~5都是高速摄像机设置在132帧/s时所连续摄得的高纯度熔融锡入水连续图像。图3为熔融金属温度为600 °C,高纯度锡入水爆炸图。图4为80%铅-20%锡合金加热到温度600 °C熔融后入水的连续图。图5为80%铅-20%锡合金加热到温度300 °C熔融后入水的连续图像。通过进行不同80%铅-20%锡合金温度的实验可以研究早期的金属碎化情况。

表1 纯锡的化学成分与力学性能

Table 1 Pure tin chemical constitution and mechanical property

化学成分/%											力学性能
Sn	Cu	Pb	Zn	Al	Sb	Fe	Bi	As	Cd Fe+Al+Zn	其他 总和	
余量	5.5~6.5	0.35	0.01	0.01	7.0~8.0	0.1	0.03	0.1	≤0.15	0.55	布氏硬度: 27HBS

表2 实验工况

Table 2 Experimental conditions

序号	jet 种类	过冷剂 种类	jet 温 度/°C	过冷剂 温度	jet 直 径/mm	出口与水面 距离/cm	入水面速 度/(m·s ⁻¹)	坩锅内 压力	摄像机 帧数
1	高纯度锡	水	600	常温	21	20	0.2	常压	132
2	铅锡合金	水	600	常温	21	20	0.2	常压	132
3	铅锡合金	水	300	常温	21	20	0.2	常压	132

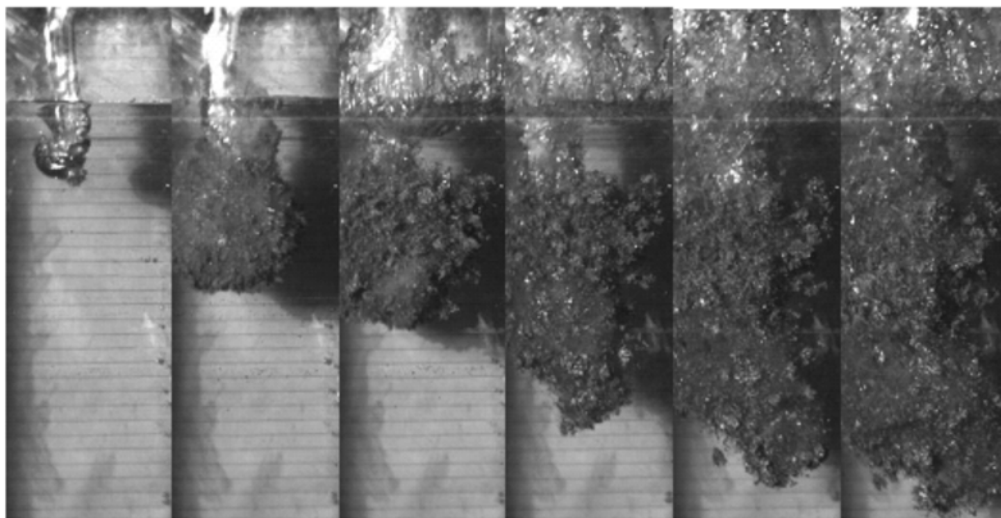


图3 600 °C高纯度锡入水爆炸连续图像

Fig. 3 Pictures of 600 °C pure tin vapor explosion

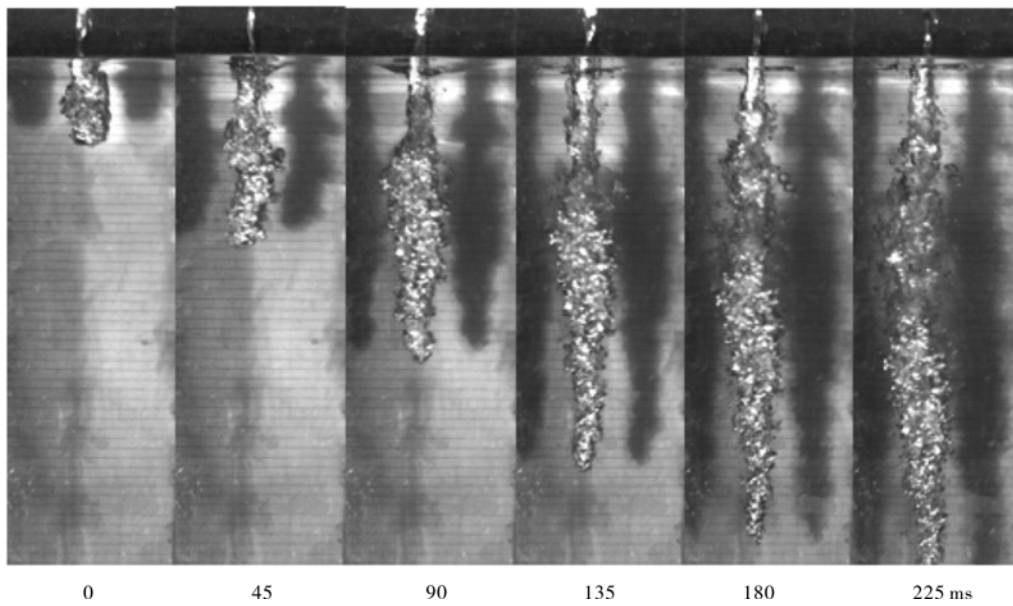


图4 600 °C 铅锡合金入水连续图像

Fig. 4 Pictures of 600 °C tin alloy penetrating into water

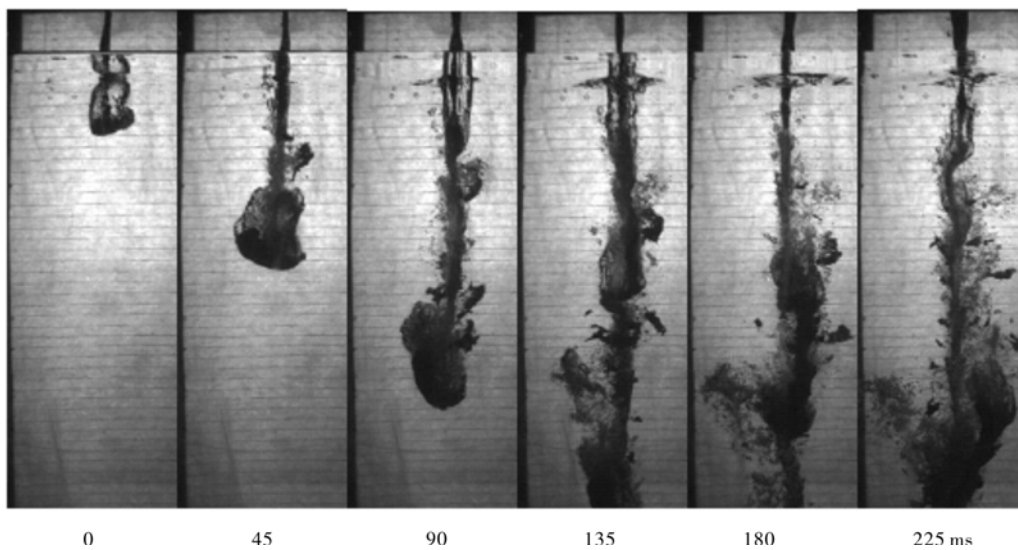


图5 300 °C 铅锡合金入水连续图像

Fig. 5 Pictures of 300 °C tin alloy penetrating into water

从以上3个实验观察到:第1个实验中,熔融金属进入水中,周围立刻产生蒸汽膜。然后经一段时间发生蒸汽爆炸,将水从水箱中溅出。在蒸汽爆炸实验中,熔融金属液柱进入冷却剂后,并没有立刻发生爆炸,而是产生大量蒸汽。然后蒸汽膜发生破碎,进而发生蒸汽爆炸。值得注意的是:蒸汽爆炸发生的位置在水下0.3~0.5 m处,而不是发生在水面和水下很深

的地方。

观察实验后的金属碎片发现:发生爆炸的平均金属碎片颗粒较小,部分颗粒达到1 mm甚至更小,即使有大块锡块,碎块上有无数各种孔隙,贯通或凹坑,表面有许多尖锐毛刺,其结构松散,容易破碎。冷凝后的碎片如图6所示,颗粒分布如图7所示。

在第2个实验中,没有发生爆炸现象。所

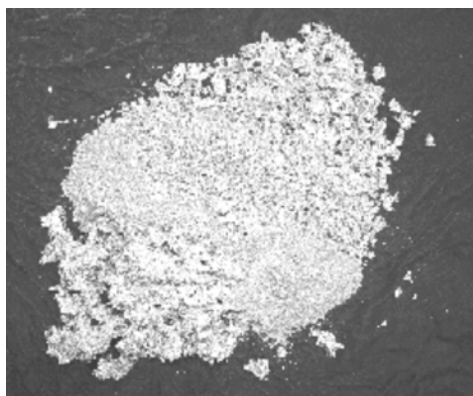


图6 600 °C高纯度锡入水爆炸后碎片
Fig. 6 Debris picture of 600 °C pure tin

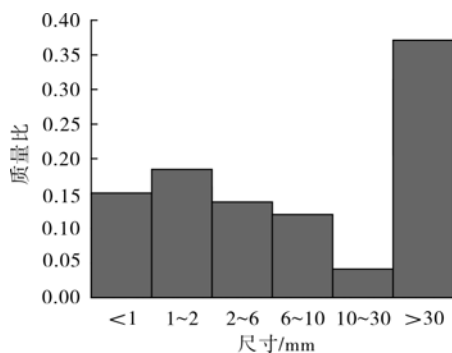


图7 600 °C锡碎化后颗粒尺寸分布
Fig. 7 Debris size of 600 °C pure tin

以,产生蒸汽爆炸的原因并不仅取决于熔融物温度,与熔融物材料本身物性也有关,比如表面张力和液体金属粘度等。其实验后的碎片明显增大。冷凝后的碎片如图8所示,颗粒分布如图9所示。

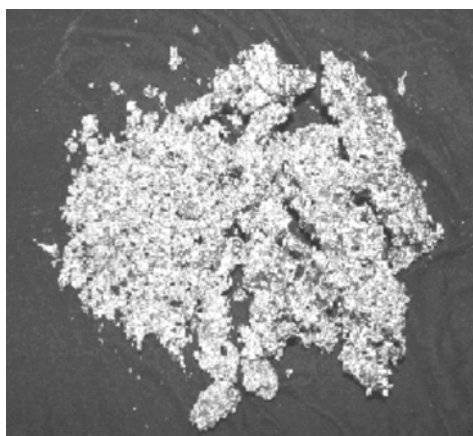


图8 600 °C熔融锡合金入水后碎片
Fig. 8 Debris picture of 600 °C tin alloy

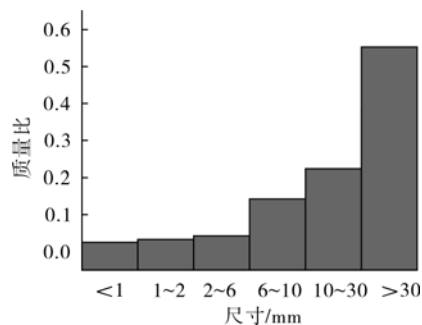


图9 600 °C锡合金碎化后颗粒尺寸分布
Fig. 9 Debris size of 600 °C tin alloy

从图9可看出,锡合金碎化后颗粒尺寸分布大部分在10 mm以上。6 mm以下的颗粒质量不到10%。但600 °C锡合金碎化冷凝后碎片与爆炸后相似:结构松散,容易破碎,表面是针状突起,呈多孔介质状。

图10所示为300 °C锡合金熔融后入水冷凝后的图片。因其温度比该金属熔点稍高一些,300 °C锡合金入水后还没有来得及碎化便发生凝固。因此可通过碎片了解一些碎化早期的瞬间情况。其碎化后碎片尺寸没有小于10 mm,呈长条状。碎片表面相对光滑,没有看到贯穿的孔隙,毛刺一律向下。可清晰看到水与金属降落反方向作用留下的凹槽。可以认为由于Taylor不稳定性,当熔融金属进入水中,水进入熔融金属内,在某种条件下引发碎化或蒸汽爆炸。

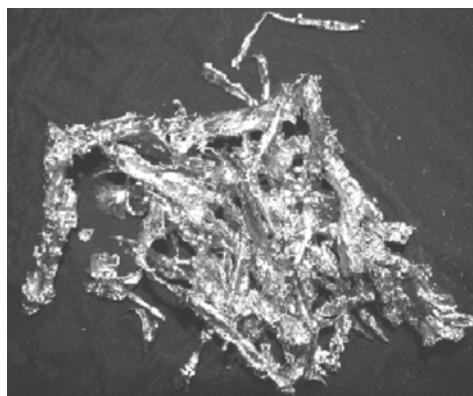


图10 300 °C锡合金碎化后碎片
Fig. 10 Debris picture of 300 °C tin alloy

2 结论

1) 建立了低熔点熔融金属与水接触的实

验台架。

2) 在实验室条件下,发生蒸汽爆炸的条件并不苛刻:在常压下,金属锡的温度达到 600 °C,熔融金属液柱直径为 21 mm,熔融金属进入水中的速度很低(漏斗出口与水面距离 22 mm)就能发生蒸汽爆炸。因此,蒸汽爆炸现象是设计反应堆时必须考虑的问题之一。

3) 爆炸发生在水面下不远的地方。模拟材料和液体金属温度对蒸汽爆炸和碎化有很大影响。

4) Taylor 不稳定性对金属液柱的破碎具有很大作用。

参考文献:

- [1] 李小燕. 膜态沸腾下运动中的高温颗粒热动力瞬态特性研究[D]. 上海:上海交通大学核科学与工程学院, 2005.
- [2] CORRADINI M L. Vapor explosion in light water reactor: A review of theory and modeling[J]. Prog Nucl Energy, 1989, 22(1): 1-17.
- [3] FLETCHER D F. Steam explosion triggering: A review of theoretical and experimental investigations[J]. Nucl Energy and Des, 1995, 155: 27-36.
- [4] KIM B, CORRADINI M L. Modeling of small-scale droplet fuel/coolant interactions[J]. Nuclear Science and Engineering, 1998, 98: 16-28.
- [5] ABEA Y. Study on thermal-hydraulic behavior during molten material and coolant interaction [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230: 277-291.
- [6] DINH T N, BUI V A. Experimental and analytical studies of melt jet-coolant interactions: A synthesis[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 189: 299-327.
- [7] ALMSTROM H, SUNDEL T. Significance of fluid structure interaction phenomena for containment response to ex-vessel steam explosions[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 189: 405-422.