

熔融金属锡在水中运动时压力波动 特性实验研究

胡逊祥¹, 董玉杰¹, 胡志华²

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 上海交通大学核科学与工程学院, 上海 200240)

摘要:在核电站严重事故分析中, 熔融金属与水的相互作用是一个重要的研究课题。本实验利用高速摄像机和压力传感器记录了不同熔融金属温度、水温以及熔融金属直径条件下熔融金属锡与水作用过程中的运动图像和压力波动曲线, 分析了这3种因素的作用机理。

关键词:熔融金属; 压力波动; 泰勒不稳定性

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0110-06

Experimental Research on Characteristics of Pressure Wave of Molten Stannum Moving in Water

HU Xun-xiang¹, DONG Yu-jie¹, HU Zhi-hua²

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the analyses of severe accidents of nuclear power plants, it is very important to study molten-fuel-coolant-interactions. In the paper, the motion images of molten stannum in water and the pressure wave were obtained in different conditions, which are different temperatures of the molten stannum, different temperatures of the water and different diameters of the molten stannum, by using the high-speed camcorder and the pressure sensor. Furthermore, the process of the interactions was considered.

Key words: molten metal; pressure wave; Taylor instability

熔融物质与冷却剂相互作用时, 两种或两种以上的物质参与其中, 冷热流体之间的巨大温差使得流体界面处发生剧烈相变, 蒸汽膜的破裂引起的内部压力波的增强和传播极大强化了冷热流体间的传热和传质, 瞬间产生的能量释放会导致破坏力非常大的蒸汽爆炸^[1]。

在核电领域, 蒸汽爆炸现象是反应堆发生

严重事故导致堆芯熔化后可能产生的一系列严重后果之一, 在核电站严重事故研究中, 各国均将水蒸气爆炸作为重要的研究课题^[2-4]。此外, 自然界中的火山爆发, 液化天然气工业严重事故等都可能产生蒸汽爆炸。

蒸汽爆炸涉及的反应过程与常温颗粒在粘性流体内的运动特性完全不同, 在理论指导下

探讨伴随瞬态传热、高速沸腾的多相流瞬变过程的物理机理,建立合理的物理模型并利用实验来验证具有重要的学术意义和工程应用前景^[5-7]。本工作通过可视化的实验研究影响熔融物质与冷却剂相互作用过程压力波动特性的主要因素,探讨其作用机理。

1 实验装置

实验装置由低温熔融电炉、水箱、测量系统、照明系统及装置台架组成(图1)。实验采用熔点较低的锡,通过上述实验装置模拟熔融锡的落水过程,记录此过程中的图像及压力波。

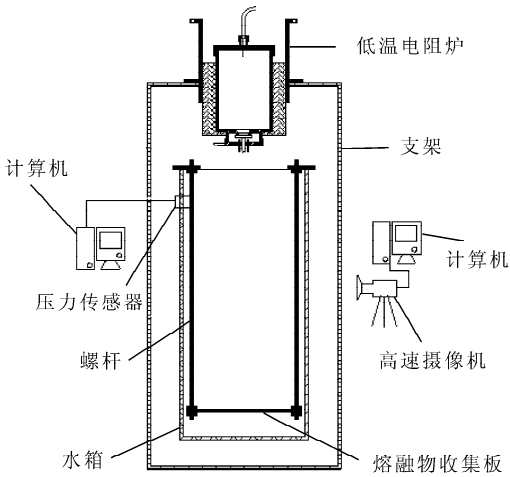


图1 实验装置示意图

Fig.1 Scheme of experiment system

2 实验方案

在上述实验装置的基础上,设计了3个系列实验,即改变低温电阻炉的加热温度进行不同温度工况下的熔融金属锡落水实验(A系列实验);利用水箱底部的不锈钢电热管加热水以改变水的温度进行不同冷却水过冷度工况下熔融金属锡的落水实验(B系列实验);将不同直径的不锈钢漏斗旋在坩埚底部开口外伸圆管上得到不同直径的熔融金属进行不同直径熔融金属锡落水实验(C系列实验)。

3 实验结果与分析

3.1 A系列实验

1) 实验图像分析

通过对低温电阻炉的温度设定,分别得到在400、500、600、700、800℃这5种工况下的熔融金属,同时保证冷却剂的温度为常温,下落的熔融金属的直径为21mm,且每次实验时熔融金属的下落高度相同,开启坩埚内的活塞,使熔融金属落入水中,用高速摄影仪记录实验过程,并通过压力传感器和数据采集卡得到压力波动数据。

图2所示为熔融物与水的相互作用实验图像。

由图2可知,温度为400℃时,熔融锡一进入水面立即发生蒸汽爆炸,随着金属温度的升高,发生蒸汽爆炸的地点逐渐远离水面。这是因为当温度相对较低的熔融锡进入水中时,水

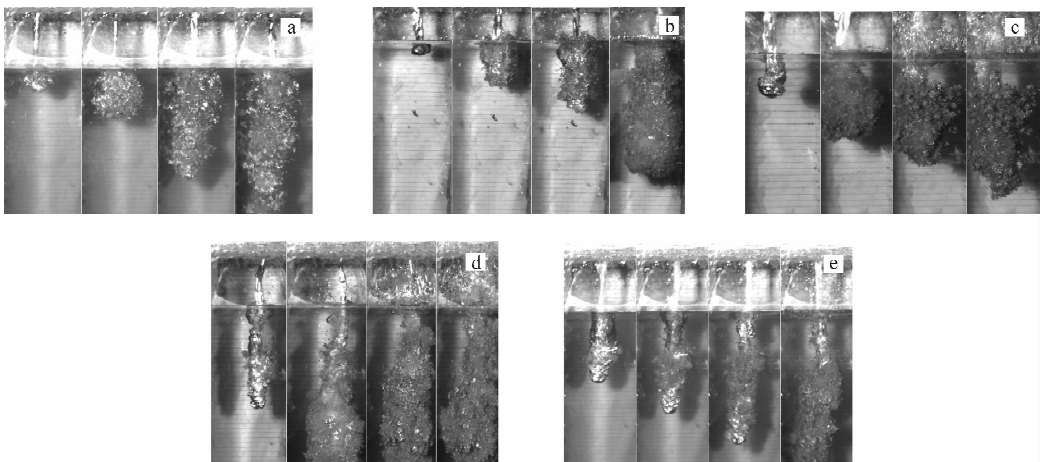


图2 不同温度熔融物与水作用的实验图像

Fig.2 Motion images of molten stannum with different temperatures

温度,℃: a—400; b—500; c—600; d—700; e—800

还未来得及蒸发便与熔融锡前端接触,作用在熔融锡的压力较大,泰勒不稳定性的作用相应较大,液态冷却剂能够马上进入熔融金属内引发熔融锡的进一步碎化,致使熔融物与冷却剂的接触面积急剧增大,产生急速汽化,引发蒸汽爆炸。800℃熔融金属进入水中时,因温度高,水尚未与熔融金属接触业已蒸发,形成汽膜覆盖在金属表面,仅一小部分水与熔融锡前端接触,当汽膜塌陷后,水方进一步与金属进行接触,引发蒸汽爆炸,这样蒸汽爆炸就需一定时间。故而随着熔融金属温度的升高,发生蒸汽爆炸的时间相应延长,发生蒸汽爆炸的地点逐渐远离水面。

2) 实验数据及分析

各种工况下的压力图像通过压力传感器获得(图3)。

如图3所示,熔融金属锡与水相互作用过程的峰值压力并非简单地随金属温度的升高而增加。熔融金属温度从400升到700℃时,过程中产生的峰值压力随温度升高而增加;金属的温度从700升到800℃时,过程中的峰值压力随温度升高而减小。在该系列实验中,熔融金属温度为700℃时,峰值压力达到最大值。

在所研究的熔融金属与水的相互作用过程中,熔融金属进入水中后,其前端迅速与水接触并使之汽化形成一层汽膜包裹在熔融金属表面,随着下落深度的增加,压强增大,汽膜坍塌,冷却剂再次与金属熔融物接触,由于泰勒不稳定作用,冷却剂进入熔融金属内部,受到熔融金属的加热蒸发而膨胀,熔融金属散裂,使金属与冷却剂水的接触面积增大,产生更加剧烈的加热蒸发。这一过程发生在非常短的时间内,从而引发爆发性沸腾蒸发。蒸汽爆炸的产生受两个因素的共同作用:1) 进入熔融金属里的液态冷却剂的量;2) 进入熔融金属内的冷却剂所受到的加热膨胀程度。熔融金属温度高,则进入其中的冷却剂所受的加热膨胀程度大,同时在水后瞬间产生的蒸汽膜就厚,冷却剂不易进入熔融金属中。

3.2 B系列实验

通过调节水箱底部的不锈钢加热管的加热时间,获得不同温度(20、50、90℃)下的冷却剂水,保持下落熔融物温度为600℃、下落直径21mm,实验时熔融金属的下落高度保持一致。开启坍塌内的活塞,使熔融金属落入水中,用高速摄影机记录实验过程并通过压力传感器和数据采集卡获得压力波动数据。

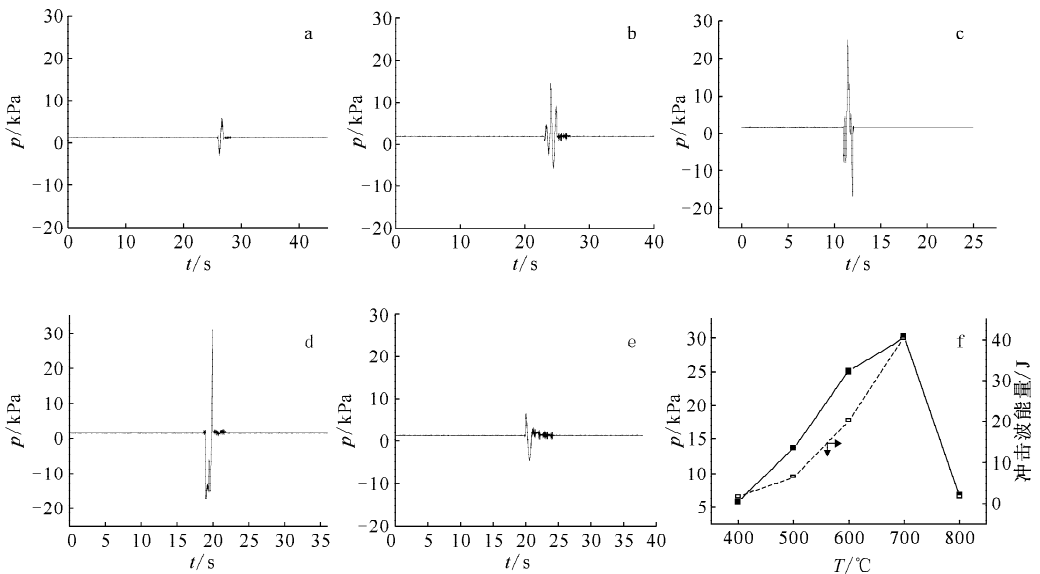


图3 不同温度熔融锡下落的压力波动曲线及冲击波峰值压力、能量随温度的变化曲线

Fig. 3 Curves of pressure waves, maximum pressure and energy of molten stannum with different temperatures

a——压力波动,400℃熔融锡;b——压力波动,500℃熔融锡;c——压力波动,600℃熔融锡;

d——压力波动,700℃熔融锡;e——压力波动,800℃熔融锡;f——不同温度下的压力波动和冲击波能量

1) 实验图像分析

不同温度冷却水工况下获得的试验图像示于图 4。

由图 4 可看出,冷却剂为常温时,熔融金属锡刚进入水下一小段距离便发生碎化,随着冷却剂温度升高,发生碎化的位置进一步下移,当冷却剂温度升至 90 °C 时,基本未发生碎化。这是因为,冷却剂温度越高越易发生汽化蒸发,当熔融金属进入水中时,水尚未来得及与熔融金属前端发生接触便发生了汽化,并在熔融金属表面形成一层蒸汽膜,避免了周围冷却剂与熔融金属的接触。随着熔融金属在水中下落距离的增加,作用在熔融金属表面汽膜上的压力增大,致使气膜塌陷破裂,外围的冷却剂随即进入汽膜并与熔融金属接触,引发熔融金属的进一步碎化,致使熔融物与冷却剂的接触面积急剧增大,产生急速汽化,引发蒸汽爆炸。当冷却剂温度足够高(本实验中为 90 °C)时,产生的汽膜能一直包裹着熔融金属,使之不发生碎化,也即未发生蒸汽爆炸。

2) 实验过程中的压力波动分析

通过压力传感器和数据采集卡获得的不同冷却剂过冷度下的压力波动图像示于图 5。

冷却剂温度为 90 °C 时,未发生蒸汽爆炸现象,无压力波动记录。冷却剂的温度升高时,熔融金属与水作用过程中产生蒸汽爆炸的峰值压力迅速降低。

在保证其他实验条件一致的前提下,通过改变冷却剂的温度研究熔融物质与水的相互作用,冷却剂处在常温时,熔融物与冷却剂的温差为最大,作用过程中产生的峰值压力最大,产生的冲击波能量也最大。可这样来解释这一现象:冷却剂水的温度越高,熔融金属进入水中时冷却剂越易发生汽化、形成蒸汽,蒸汽包围在熔融金属的表面形成一层汽膜,外面的冷却剂就受气膜阻止难以进入而不易引发熔融金属碎化,蒸汽爆炸发生的可能性则越小。只有当熔融金属下落到水下一定距离时,压强达到一定值后,导致熔融金属表面的蒸汽汽膜坍塌而诱发碎化。极端的情况是当冷却剂的温度为

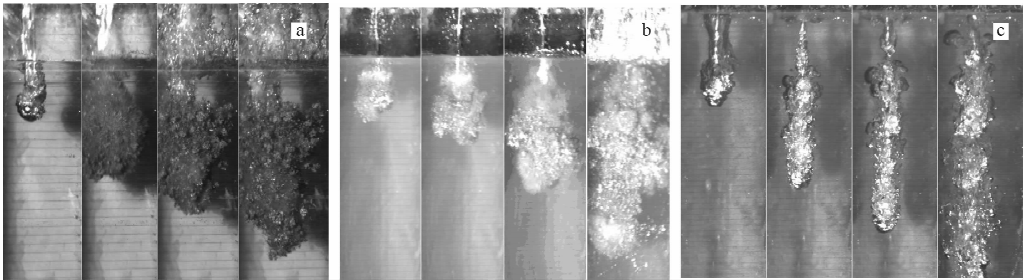


图 4 不同温度冷却水工况下的试验图像

Fig. 4 Motion images of molten stannum in water with different temperatures

冷却水温度, °C : a——20 ; b——50 ; c——90

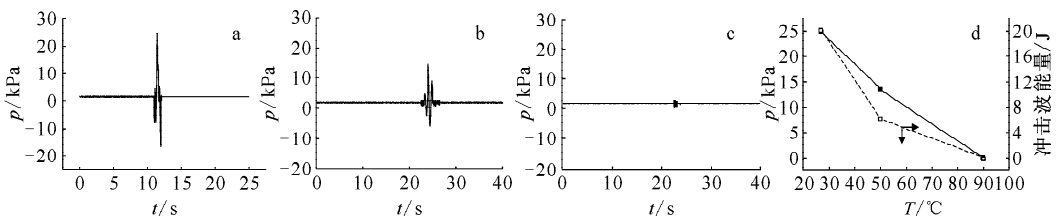


图 5 不同温度冷却水条件下压力波动特性曲线及冲击波峰值压力、能量随温度的变化曲线

Fig. 5 Curves of pressure waves, maximum pressure and energy of molten stannum in water with different temperatures

a——压力波动,冷却剂 20 °C ; b——压力波动,冷却剂 50 °C ;

c——压力波动,冷却剂 90 °C ; d——不同冷却剂温度下的压力波动和冲击波能量

90 °C时,温度已接近于水的沸点,熔融金属进入冷却剂后在表面发生膜态沸腾,形成蒸汽汽膜包裹熔融物质,阻碍了蒸汽爆炸的发生;冷却剂温度低时,大部分冷却剂尚未来得及汽化便与熔融金属的前端接触而进入其内部,进入内部的冷却剂在熔融物质不停的加热下蒸发汽化,内部产生很大的压力,引发熔融金属碎化,碎化使得熔融物与水的接触面积急剧增大,进而引起更大范围的快速蒸发汽化,在短时间内积聚大量蒸汽,使得系统内压力升高,汽化过程中伴随有波动,从而引发压力的不稳定性。

3.3 C 系列实验

通过将不同直径的不锈钢漏斗旋在坩埚底部开口外伸圆管上得到不同直径的熔融金属(8、21、28 mm),同时保持冷却剂的温度为常温、下落的熔融金属锡温度为 600 °C、熔融物的下落高度保持一致,开启坩埚内的活塞,使熔融金属落入水中,用高速摄影仪记录实验过程并通过压力传感器和数据采集卡获得压力波动数据。

1) 实验图像分析

不同直径熔融柱与水相互作用的实验图像

示于图 6。

由图 6 可看出,不同直径的下落熔融金属与冷却剂作用时,发生蒸汽爆炸的剧烈程度不尽相同。随着熔融金属的直径增大,发生蒸汽爆炸的位置越远离水面。熔融金属直径大,与水的接触面积亦大,越易形成汽膜阻隔熔融金属与冷却剂的进一步接触,使得进一步碎化延迟。只有当熔融金属下落到一定高度后,压力足以使汽膜塌陷而诱发碎化。

2) 实验过程中的压力波动分析

通过压力传感器和数据采集卡获得的不同的冷却剂过冷度下的压力波动图像示于图 7。

熔融金属与水相互作用过程中产生的峰值压力随金属直径的增大而增加。熔融金属直径越大,与水的接触面积亦大,发生的爆炸越剧烈,产生的压力峰值越大。

在保持其他实验条件一致的前提下,熔融金属柱与水的作用剧烈程度取决于熔融金属的端面面积。实验中可明显看出,入水的熔融金属柱端面面积越大,发生蒸汽爆炸的程度越剧烈,产生的峰值压力越高,冲击波能量也随之增大。可这样解释这一现象:熔融金属柱的直径

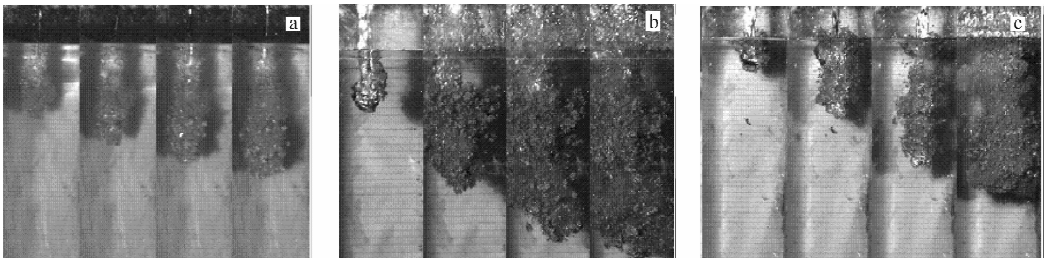


图 6 不同直径熔融金属柱与水作用的实验图像

Fig. 6 Motion images of molten stannum with different diameters

熔融柱直径,mm:a—8;b—21;c—28

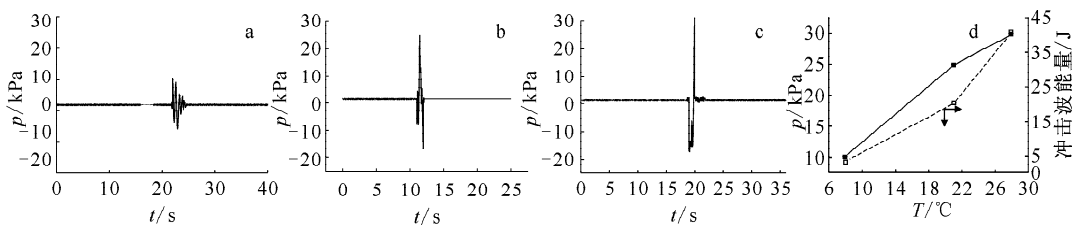


图 7 不同直径熔融金属柱与水作用的压力波动曲线及冲击波峰值压力、能量随温度的变化曲线

Fig. 7 Curves of pressure waves, maximum pressure and energy of molten stannum with different diameters

a—压力波动,熔融金属直径 8 mm;b—压力波动,熔融金属直径 21 mm;

c—压力波动,熔融金属直径 28 mm;d—不同温度下的压强和冲击波能量

大,端面面积亦大,与水的接触面积大,冷却剂蒸发汽化的速度快,易形成汽膜,且汽膜内的压力也大,当熔融物质下落到水下一定深度而达到足够的压强时,在泰勒不稳定的作用下,会使汽膜坍塌,导致与水相互接触诱发碎化,进而产生蒸汽爆炸。

4 结论

熔融金属与水相互作用产生的压力波的大小由进入熔融金属内的液态冷却剂的多少和进入熔融金属内的液态冷却剂所受到的加热膨胀程度这两个因素所决定。熔融金属和冷却剂的温度越高、熔融金属柱直径越大,冷却剂则越易汽化形成汽膜,汽膜的阻止作用使冷却剂不易进入金属内部诱发进一步的碎化。进入熔融金属内的冷却剂所受到的加热膨胀程度则受熔融金属本身的温度以及冷却剂的温度制约。熔融金属和冷却剂的温度高,易引起冷却剂的蒸发汽化,膨胀程度大,作用过程中产生的压力也越大。

参考文献:

- [1] 陈凌海,罗锐,王洲,等. 两种不同类型 FCI 的机理对比研究[J]. 核动力工程:2007, 28(1):45-48.
CHEN Linghai, LUO Rui, WANG Zhou, et al.

Comparison of two different fuel-coolant interaction systems [J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(1): 45-48(in Chinese).

- [2] YAMANO N, MARUYAMA Y. Phenomenological studies on fuel-coolant interactions for light water reactors [D]. [S. l.]: Severe Accident Research Lab, Department of Reactor Safety Research, 2000.
- [3] 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.
- [4] KRIEG R, DEVOS J. On the prediction of the reactor vessel integrity under severe accident loadings (RPVSA) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 209: 117-125.
- [5] ZYSZKOWKI W. Experimental Investigation of Fuel-coolant Interaction [J]. Nuclear Technology, 1977, 33: 40-59.
- [6] MEYER L. QUEOS: An experimental investigation of the premixing phase with hot sphere [J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 189: 191-204.
- [7] HUHTINIEMI D M. FCI experiments in the corium/water system [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 177: 339-349.