

文章编号: 1001-4888(2021)01-0114-09

高温熔融铝液与水接触爆炸过程实验研究^{*}

周宁¹, 李雪¹, 陈兵², 梅苑¹, 任福平¹, 李恩田¹, 袁雄军¹

(1. 常州大学 石油工程学院, 江苏常州 213164; 2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

摘要: 为探究高温熔融铝液与水相互作用的爆炸机理, 设计了一套高温熔融铝液与水接触爆炸实验测试系统, 应用红外热像仪、高速摄像机、压力传感器等设备监测高温熔融铝液与水相互作用过程, 并对高温熔融铝液与水接触爆炸过程的能量转化规律进行了分析。实验结果表明: 高温熔融铝液与水接触瞬间发生膜态沸腾, 水剧烈汽化产生的冲击在水中产生扰动并快速扩张, 40ms 后膜态沸腾向核态沸腾转变, 直至发生爆炸喷溅。综合能量守恒定律、爆炸冲击理论与实验结果可得, 高温熔融铝液与水接触爆炸过程, 约有 3.34%~11.23% 高温熔融铝液的潜热能转化为爆炸冲击波能量。

关键词: 熔融铝液; 蒸汽爆炸; 爆炸冲击波; 能量转化率

中图分类号: X932

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-157

0 引言

高温熔融金属与水接触时, 巨大的温差使得熔融金属与水接触面发生剧烈的相变, 高温熔融金属表面的蒸汽膜破碎, 剧烈的传热和传质使蒸发速率激增, 导致周围液体产生爆发性沸腾, 形成强大的内部压力波, 瞬间释放的能量会导致破坏力较大的蒸汽爆炸^[1]。熔融铝液与水在非正常情况下接触产生的爆炸势必造成严重的人员伤害和经济损失。1998 年广东某铝材厂因铝棒“铸穿”使炉内约 200kg 熔化铝液流到水面上从而产生爆炸, 造成 7 人死亡, 1 人重伤, 距现场 30m 处有 4 人轻伤^[2,3]。2007 年山东魏桥集团铝母线铸造厂发生铝液外溢爆炸重大事故, 造成 16 人死亡, 13 人重伤^[3]。现代工业中高温铝液遇水热爆炸反应本质属于纯相变爆炸^[4]或带有部分化学反应的蒸汽爆炸^[3,5]。最早的研究工作源于美国铝业联盟 Alcoa 实验室, Long 等^[6]通过研究高温熔融铝液与水接触的爆炸实验得出铝液质量越大、温度越高, 产生爆炸的可能性以及强度越大^[3]。Hess 等^[7,8]根据高温熔融铝液与水接触爆炸的威力大小将其分为柔和爆炸、剧烈爆炸和猛烈爆炸。Nelson^[9,10]研究了单个铝液滴在水中的点火机制, 发现铝液发生自持化学反应的温度在 1500℃ 以上; 虽然只有少量的铝液参与化学反应(占铝液总量的 3%~6%), 但在整个化学反应过程中释放出的能量会加剧事故后果。Umetsu 等^[11]对蒸汽爆炸发生的可能性和爆炸强度开展了实验研究, 发现爆炸发生可能性与热放射本能呈负相关, 并根据热放射本能确定了三种蒸汽爆炸类型^[3]。Liu 等^[12]在研究蒸汽爆炸结构与碎裂机制的关系时提出了一种新的热破碎模型。Berthoud^[13]对蒸汽爆炸的产生机理、蒸汽爆炸的毁伤威力进行了研究, 提出爆炸过程中所做的机械功可通过熔融金属所含的热能来推算。Board 等^[14]对大规模的蒸汽爆炸进行了实验观察, 提出将蒸

^{*} 收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-10-02

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0805100); 第十六批“六大人才高峰”创新人才团队项目(TD-JNHB-013); 中国安全生产科学研究院基本科研业务费专项资金项目(2019JBKY08); 江苏省高校自然科学研究重大项目(17KJA440001); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB620004)

通信作者: 周宁(1977—), 男, 博士, 教授。研究方向: 爆炸与冲击动力学、石化安全与事故应急。

汽爆炸分为四个阶段:粗混合阶段、触发阶段、传播阶段和膨胀做功阶段^[3]。欧盟委员会发起的 KRO-TOS 小型机理性实验^[15,16]表明:熔融物物性对水与熔融金属相互作用过程影响较为明显,相对于真实堆芯熔融物,在相同初始实验条件下, Al_2O_3 与水反应过程更为剧烈,即使在没有外部触发的条件下, Al_2O_3 仍然有可能与水产生自发性蒸汽爆炸^[17]。Furuya 等^[18]分别研究了铅铋合金、锡、铅、锌、铟和铋 6 种不同熔融金属与水的相互作用过程^[17],发现熔融金属与水发生剧烈热传递和传质时容易发生蒸汽爆炸,当熔融金属超过一定温度后,不再发生蒸汽爆炸。Bang 等^[19]开展了熔融金属在水中射流破碎作用机理的实验研究,实验结果较好地支撑了现有理论模型的预测结果。Iskhakov 等^[20]研究了熔融铅-水相互作用,应用 Hugoniot 分析方法对俄罗斯 BREST 反应堆 SGTR/L 进行了分析,估算了 Chapman-Jouguet 平面内的爆速和爆压。王骞^[21]开展了熔融锡液和熔融铝液与冷却水相互作用规律的实验研究,得到熔融锡液和锡柱发生蒸汽爆炸的规律,但未发生蒸汽爆炸。Wang 等^[22]对水滴与铅、锡熔体的相互作用开展实验研究,结果表明在液滴与铅、锡液的相互作用中,可以观察到液滴破碎、气泡和凸度三种现象,并得出了相关现象与实验工况的变化关系。Wang 等^[23]开展了锡液柱冲击冷却水池的实验研究,结果表明熔融锡柱与水的接触作用模式有不爆炸、接触区域外部爆炸和接触区域内部爆炸。Shen 等^[24]对高温熔融铝与水发生爆炸开展了相关实验研究,结果表明,铝与水比例较高时爆炸较轻微,铝与水比例较低时爆炸更剧烈。

综上,前人开展的大量研究主要集中在高温熔融铝液与水接触作用的微观机理,对高温熔融铝液的热能转化为水蒸气的热能、蒸汽爆炸的机械能和爆炸破坏效应的机理和过程还不清楚。因此,本文采用实验手段与理论分析相结合对高温熔融铝液与水接触的作用过程,以及爆炸过程中高温熔融铝液的能量转化过程进行研究,以期揭示高温铝液与水接触爆炸对周围设备设施的破坏效应,为熔铸铝工艺安全布局 and 作业岗位布局提供理论参考。

1 实验系统装置

实验在常州大学高温熔融金属与水接触实验平台上开展,实验测试系统如图 1 所示。主要包括远程遥控可翻转高频金属熔融炉、石英玻璃水槽、奥林巴斯高速摄像机(i-SPEED 3)、红外热像仪、自由场压力传感器(型号 KD2002-01X,量程 10k~10M,灵敏度为 1.0pC/kPa,工作温度为 $-20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$)和数据采集系统。金属熔融炉置于试验台上用于盛装熔融金属并对其进行加热,当铝锭熔化达到实验设定值(1180°C),为保证反应腔室内部熔融金属温度均匀分布,将熔融炉腔中的熔融金属稳定 5min 后,通过远程遥控启动与中频加热炉连接的转动装置,使金属熔融炉偏转,将炉内融化的铝液通过导流槽导入实验水槽中,在熔融铝液下落过程中测试系统分别记录高温熔融铝液与水作用过程的影像、爆炸压力、空间温度场等。

2 实验方案

采用图 1 实验装置开展高温熔融铝液与水接触过程及其爆炸效应实验研究,通过调节高频熔融炉的频率控制熔融金属的温度,实现熔融金属的温度与实验设定的温度精确匹配。实验中采用高速摄像机拍摄高温熔融铝液从导流槽下落进入水槽中与水作用的过程,主要包括熔融金属碎化过程、高温高压气泡产生及运动过程、熔融金属爆炸喷溅过程等;采用自由场压力传感器测试熔融铝液与水接触爆炸过程中空间冲击波超压。根据前人研究的经验,铝液温度较高时,熔融金属与水接触爆炸更为剧烈,因此本实验将熔融铝液的最终温度设定为 1180°C (远高于其熔点 660°C),为更好地监测到爆炸压力,将两个压力传感器呈 90° 设置在距离水槽边沿 0.4m 处,高速摄像机拍摄速度设置为 500f/s。熔融铝液与水的质量比是影响爆炸事故后果最重要的因素,为全面考察该因素对高温熔融铝液与水接触作用过程及爆炸效应的影响,本研究一共设计了熔融铝液与水的质量比分别为 5、10、15、20 工况下的熔融铝液与水接触爆炸实验,为减小实验误差,每个实验工况开展 4 次实验。实验工况参数设置如表 1 所示。



图 1 高温熔融金属与水接触爆炸实验装置分布

Fig. 1 Distribution of explosion experimental equipment for high temperature molten metal and water contact

表 1 高温熔融铝与水接触爆炸实验参数设置

Tab. 1 Experimental parameters setting of high temperature molten aluminum and water contact explosion

铝液质量/kg	水的质量/g	铝水质量比	压力传感器距水槽距离/m
1.2942	259	5	0.4
1.4161	283		
1.5230	305		
1.8342	367		
0.8964	90	10	0.4
1.3495	135		
1.4291	143		
1.6825	168		
1.3333	89	15	0.4
1.4523	97		
1.4960	100		
1.5632	104		
1.3023	65	20	0.4
1.4501	72.5		
1.4960	75		
1.5632	78		

3 实验结果与分析

3.1 高温熔融铝液与水接触爆炸的可视化过程

图2是铝液与水质量比为5的高温熔融铝液与水接触相互作用过程的高速摄像照片,高温熔融铝液从熔融炉腔经导流槽以球形或椭圆形的液柱形态落入水槽,熔融铝液与水接触瞬间在铝液椭球体底部与水交界面出现扰动,但铝液表面整体比较光滑,形态没有明显的变化或变形。由于熔融铝液与水之间存在的巨大温度差导致熔融铝液与水接触面上产生剧烈的传热传质而发生相变,铝液与水接触界面处的水因吸收较多的热量而剧烈沸腾并蒸发,20ms时在熔融铝液表面形成一层蒸汽膜,蒸汽膜对铝液与水之间的传热传质有一定阻碍作用,此时铝液椭圆形的边部略有变形,此阶段仍属于膜态沸腾。随着铝液落入水槽中的质量增加,40ms时铝液椭球体明显变大,在重力作用下,铝液椭球体向水槽下方移动,此时激波作用较强,对水槽上部流场的扰动作用较大,形成了明显的扰动波,铝液椭球体的侧缘发生碎化。随着铝液持续落入水中,相变膨胀对周围熔融金属产生干扰,形成 Rayleigh-Taylor 不稳定和 Kelvin-Helmholtz 不稳定,蒸汽膜因受扰动而发生塌陷,沸腾模式由膜态沸腾转变为核态沸腾,60ms时熔融铝液形态进一步变形,在熔融铝液与水接触的边界发生剧烈碎化现象。由于熔融铝液柱与水的接触面积增大,高温熔融铝液与水之间的传热强度增大,80ms时流场扰动明显增强,扰动影响范围扩大,铝液椭球体在自身重力作用下往水槽底部移动,铝液滴内部产生大量气泡。80ms后高温熔融铝液与水接触反应非常剧烈,熔融铝液与水接触界面及铝液内部发生剧烈碎化,铝液椭球体形状已完全消失,形态不规则。与此同时,扰动波不仅作用于水槽上部流体,还对水槽两侧的流体产生扰动。在局部高压下形成的压力脉动向水槽四周传播过程中,铝液滴碎化加剧,熔融铝液完全与水接触,传热传质速率达到最大,240ms时铝液完全被汽化作用及碎化作用包裹,无法分清铝液形态。500ms后,熔融铝液与水相互作用非常剧烈,铝液滴碎化尤为明显,水汽化后的气泡非常多,碎化的铝液滴与水汽化的气泡充满整个水槽。1700ms以后爆炸效应明显,在此阶段,水槽内水量明显减少,水温高,水槽内的过热气体遍及整个水槽及水槽上方,汽团高度约40cm,熔融铝液滴碎化比较充分,两者之间的相互作用区域充满整个水槽,剧烈的传热传质产生的蒸汽团压缩周围的空气形成大量冲击波,在极短时间内引起整个系统的爆炸性膨胀^[17],形成蒸汽爆炸。

3.2 高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波压力

图3为在水槽0.4m处测到的高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波电信号及对应的压力时程曲线。该曲线为一个典型的爆炸冲击波曲线,在数据采集后的1.9s时出现压力突跃,压力由3.5kPa突跃到峰值压力187kPa。冲击波峰值压力的大小与爆炸强度、测试点距爆炸中心的位置等因素有关。本文主要是1kg~2kg级的熔融铝液与水作用爆炸过程测试,测试位置的冲击波峰值压力为150kPa~1MPa。冲击波的伤害作用主要取决于峰值超压的大小,根据冲击波对建筑物及人的伤害准则,超压在100kPa~200kPa,可对防震钢混结构等建筑物产生破坏;超压大于100kPa时,可使人的体腔、肝、脾破裂,从而导致死亡。由此可见,小当量的熔融铝液与水接触爆炸的冲击波伤害已达到了很严重的程度。在工业电解铝生产过程中,铝液量在10t以上,如果高温熔融铝液一旦与水意外接触,爆炸产生冲击波及飞溅的高温熔融铝液伤害范围将非常大,并且飞溅的高温熔融铝液可引燃周围可燃物质,引发次生灾害。

3.3 高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波能量分析

3.3.1 高温熔融铝液与水接触能量转化过程

(1) 高温熔融铝液所含热能

在高温熔融铝液与水接触爆炸的过程中,能量主要来源于高温熔融铝液自身存储的热能^[3],有部分能量以光辐射和声能的方式散失掉,同时爆炸产物的飞散仍然需要部分能量,因此,只有一部分能量转化为爆炸能量。高温熔融金属与水之间的传热传质是诱发爆炸的动力,水受热后产生的水蒸气是爆炸在空气中膨胀及爆炸能量传播的介质。质量为 m_r 的高温熔融铝液所储存的热能 Q_r ,可由式(1)计算。

$$Q_r = m_r \left(\int_{T_0}^{T_n} C_d T + \int_{T_n}^T C_{pr} dT + \gamma_r \right) \quad (1)$$



图 2 高温熔融铝液与水接触爆炸过程高速摄像(质量比为 5)

Fig. 2 High-temperature molten aluminum liquid and water contact explosion process high-speed camera (mass ratio of 5)

式中: Q_r 为高温熔融铝液所储热能, kJ; m_r 为熔融金属质量, kg; T_0 为室温; T_n 为金属熔点, $^{\circ}\text{C}$; C 为金属固体热容, $\text{kJ}/(\text{kg}/^{\circ}\text{C})$; C_{pr} 为金属液体热容, $\text{kJ}/(\text{kg}/^{\circ}\text{C})$; T 为高温熔融铝液温度; γ_r 为金属的熔化热, kJ/kg 。

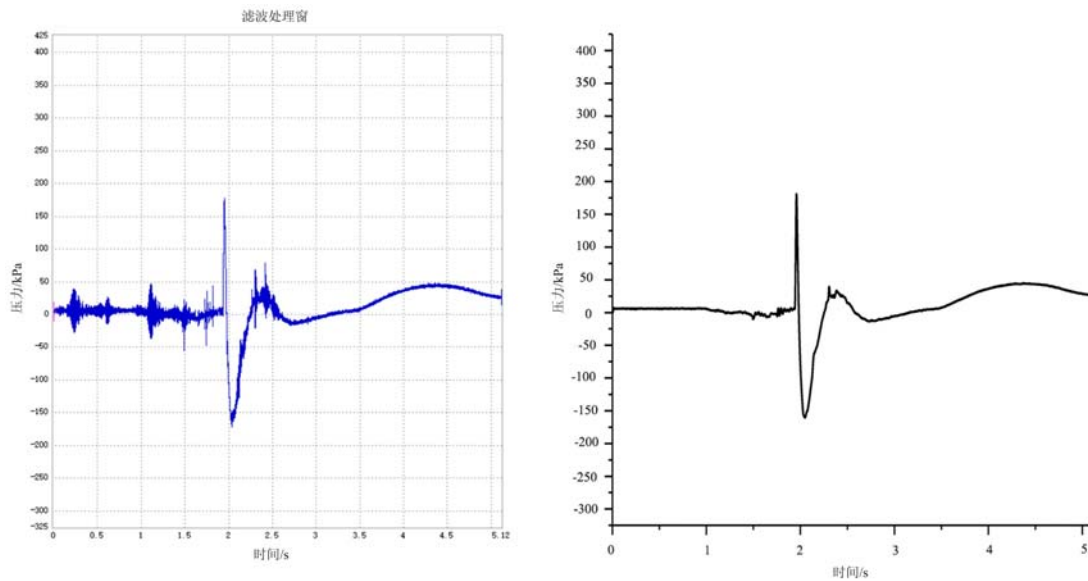


图 3 高温熔融铝液与水接触爆炸压力冲击波电信号及对应的冲击波压力

Fig. 3 Shock wave electric signal and corresponding shock wave pressure of high temperature molten aluminum in contact with water

因熔融金属固体热熔与熔融态的金属液体热熔随温度变化不大,公式(1)可进一步简化为

$$Q_r = m_r C(T_n - T_0) + m_r C_{pr}(T - T_n) + m_r \gamma_r \quad (2)$$

(2) 高温熔融铝液热能转化为爆炸冲击波的能量为 Q_b , 其计算公式为

$$Q_b = Q_v \omega \quad (3)$$

式中: Q_v 为 TNT 炸药爆炸热量, 4184 kJ/kg; ω 可由公式(4)求出。

对于凝聚炸药, Brode 公式将不同爆炸环境下冲击波超压与对比距离 $\bar{r}$ 的关系描述为

$$\Delta p = 0.096 \bar{r}^2 + 0.143 \bar{r}^2 + 0.573 \bar{r}^3 - 0.0019 \quad (4)$$

式中: $\bar{r} = \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}$; ω 为高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波 TNT 当量, 实验测得距离爆炸中心各位置的冲击波压力即可计算 ω 。

(3) 高温熔融铝液蕴含的潜能转化效率

高温熔融铝液与水接触爆炸中仅有部分能量转化为爆炸冲击波能量, 其转换效率可表示为

$$\eta = Q_b / Q_r \quad (5)$$

式中: Q_b 为转化为爆炸能量的高温熔融铝液的部分热量, kJ; Q_r 为高温熔融铝液所储热能, kJ; η 为熔融金属热能转化为爆炸冲击波能的转化效率。

3.3.2 高温熔融铝液与水作用爆炸冲击波能量转化率分析

在质量比为 5 的工况中设计了 4 组实验, 计算得到高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波能量的转化率, 如表 2 所示。

随着熔融金属铝与水的质量比增加, 爆炸冲击波能量转化率变大, 但二者之间并不是简单的线性关系(图 4)。质量比为 5 时的熔融金属铝与水爆炸冲击波能量转化率在 3.34% 至 3.95% 之间, 均值为 3.74%。质量比为 10 时, 水量相对减少, 高温熔融铝液与水作用过程中作用于加热水及使其汽化的能量减小, 则用于膨胀做功及爆炸的能量相对增加, 所以质量比为 10 的能量转化率高于质量比为 5 的能量转化率, 金属质量与水的质量比为 10 时的能量转化率在 5.3% 至 7.22% 之间, 均值为 6.02%。当熔融金属铝与水的质量比为 15 时, 熔融金属铝与水的剧烈碎化促使更多的能量转化成爆炸冲击波, 在高温熔融铝液与水的质量比为 15 时, 爆炸冲击波能量转化率达到最高, 能量转化率在 10.24% 至 11.23% 之间, 均值为 10.68%。而当金属质量与水的质量比为 20 时, 水量较小, 但金属铝的质量与其他工况条

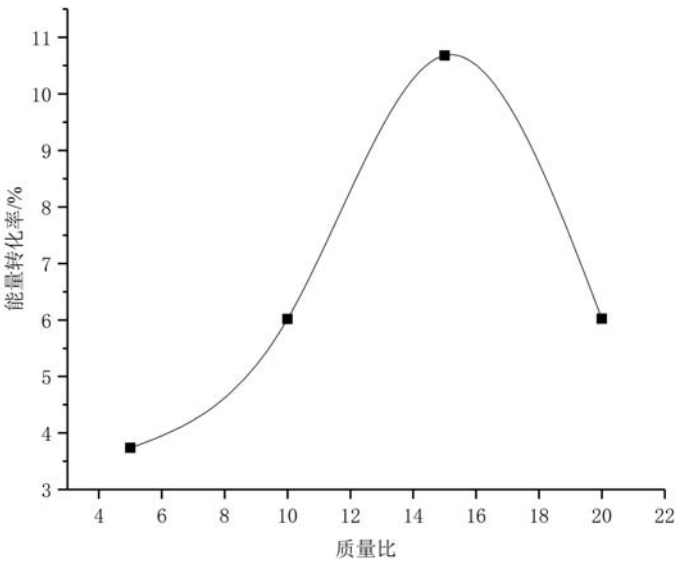


图 4 高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波能量转化率

Fig. 4 High-temperature molten aluminum liquid and water contact explosion shock wave energy conversion rate
件下的金属铝质量差别不大,在高温熔融铝液与水反应过程中,虽然作用于加热水及使其汽化的能量较小,但由于水量不足以让熔融金属发生剧烈飞溅,流场扰动弱,压力波较小,使得熔融金属与水接触爆炸的有效能量少,所以爆炸冲击波的能量转化率明显降低,金属铝质量与水的质量比为 20 时的能量转化率在 5.49%至 6.57%之间,均值为 6.02%。由此可得出小当量的高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波能量转化率相对较低,为 3.34%~11.23%。

表 2 熔融铝液与水接触爆炸冲击波能量转化结果

Tab. 2 Explosion shock wave energy conversion results of molten aluminum liquid and water contact

铝液质量 /kg	水的体积 /ml	质量比	压力传感器 距水槽距离/m	TNT 当量 /kg	高温熔融铝 潜热/kJ	能量转化 效率 η /%
1.2942	259	5	0.4	0.015	1693.07244	3.95
1.4161	283	5	0.4	0.016	1852.54202	3.85
1.5230	305	5	0.4	0.017	1992.3886	3.80
1.8342	367	5	0.4	0.018	2399.50044	3.34
0.8964	90	10	0.4	0.019	1172.67	7.22
1.3495	135	10	0.4	0.021	1765.42	5.30
1.4291	143	10	0.4	0.023	1869.55	5.48
1.6825	168	10	0.4	0.03	2201.05	6.07
1.3333	89	15	0.4	0.044	1744.22	11.23
1.4523	97	15	0.4	0.045	1899.90	10.55
1.4960	100	15	0.4	0.047	1957.07	10.70
1.5632	104	15	0.4	0.047	2044.98	10.24
1.3023	65	20	0.4	0.021	1703.67	5.49
1.4501	72.5	20	0.4	0.028	1897.02	6.57
1.4960	75	20	0.4	0.026	1957.07	5.92
1.5632	78	20	0.4	0.028	2044.98	6.10

4 结论

通过开展高温熔融铝液与水质量比为 5、10、15、20 工况下高温熔融铝液与水接触作用及爆炸过程的实验研究,得出以下结论:

(1) 高温熔融铝液与水接触相互作用过程中出现明显的膜态沸腾、核态沸腾、铝液的碎化与大量气泡运动聚集、爆喷 4 个阶段。高温熔融铝液与水接触的瞬间由于水的剧烈蒸发膨胀产生明显的流场扰动,同时铝液形态由光滑的椭球形逐渐转变为边缘不规则并开始碎化。随着熔融铝液与水接触界面的蒸汽膜塌陷,熔融铝液与水的接触面积增大,促进了两者之间的传热传质作用,同时整个水槽都受到 Rayleigh-Taylor 不稳定性和 Kelvin-Helmholtz 不稳定性的影响,扰动加剧,铝液碎化加剧,大量高温高压水气泡聚集并运动到水、空气与熔融金属界面时发生爆喷,产生冲击波并携带高温高压铝液向水槽四周喷溅。

(2) 实验工况下高温熔融铝液与水接触爆炸过程的能量转化率为 3.34%~11.23%。高温熔融铝液与水接触爆炸冲击波能量主要来源于高温熔融铝液自身存储的热能,高温熔融铝潜热一般为 1693kJ/kg~2399kJ/kg,在高温熔融铝液与水的质量比为 15 时,爆炸冲击波能量转化率最高,达到 11.23%。该结论可为熔铸铝工艺设备安全布局设计和作业人员逃生路线规划提供理论参考。

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. Comparative study on the mechanism of two different types of FCI[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(1):45—48 (in Chinese))
- [2] 苏志泰, 钟汉通. 某铝材厂一宗重大爆炸事故的分析[J]. 广东有色金属, 1998, 4:86—90 (SU Zhitai, ZHONG Hantong. Analysis of a major explosion accident in an aluminum plant[J]. Nonferrous Metals in Guangdong, 1998, 4:86—90 (in Chinese))
- [3] Xin Qi. The fragmentation analysis and energy transformation ratio for explosion of molten aluminum in water [D]. Beijing Institute of Technology, 2015.
- [4] Martynyuk M M. Phase explosion of a metastable fluid[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1977, 13 (2):178—191.
- [5] Liu J, Koshizuka S. An investigation on energetics of ex-vessel vapor explosion based on spontaneous nucleation fragmentation[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, 39(1):31—39.
- [6] Long G. Explosion of molten aluminum in water[J]. Metal Progress, 1957, 71(5):107—112.
- [7] Hess P D. Cause of molten aluminum-water explosions and their prevention[J]. Metal Progress, 1969, 95(4):93—100.
- [8] Brondyke K J, Hess P D. Filtering and fluxing processes for aluminum alloys[J]. The Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 1965, 17(2):146—149.
- [9] Nelson L S, Duda P. Steam explosions of molten iron oxide drops: easier initiation at small pressurizations[J]. Nature, 1981, 296:844—846.
- [10] Nelson L S. Explosion of burning zirconium droplets caused by nitrogen[J]. Science, 1965, 148:1594—1595.
- [11] Umetsu T, Uehara Y. Experimental study on the intensity and probability of vapor explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1995, 8(1):23—27.
- [12] Liu K, Koshizuka S, Oka Y. Relationship between the structure of vapor explosion and fragmentation mechanisms [J]. Nuclear Engineering & Design, 2002, 216(1-3):121—137.
- [13] Berthoud G. Vapor explosions[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32:573—611.
- [14] Board S J, Hall R W. Recent advances in understanding large scale vapor explosions[C]. The Third Specialist Meeting on Sodium Fuel Interactions in Fast Reactors, Tokyo, 1976:249—278
- [15] Huhtiniemi I, Magallon D, Hohmann H. Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 189(1):379—389.
- [16] Huhtiniemi I, Magallon D. Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS[J]. Nuclear Engineering

- and Design, 2001, 204(1):391—400.
- [17] 张政铭. 水与高温熔融金属相互作用过程中接触特性研究[D]. 上海交通大学, 2014 (ZHANG Zhengming. Study of the contact interaction between coolant water and high temperature molten metal[D]. Shanghai Jiaotong University, 2014 (in Chinese))
- [18] Furuya M, Arai T. Effect of surface property of molten metal pools on triggering of vapor explosions in water droplet impingement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(17):4439—4446.
- [19] Bang K H, Kim H T, Tan V D. Experiment and modeling of jet breakup in fuel-coolant interactions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 118:336—344.
- [20] Iskhakov A S, Melikhov V I, Melikhov O I. Hugoniot analysis of energetic molten lead-water interaction[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 129:437—449.
- [21] 王骞. 低熔点熔融金属液滴/液柱与水作用动力学特性研究[D]. 合肥工业大学, 2017 (WANG Qian. Study on kinetic characteristics of interaction between low melting point molten metal droplet/column and water[D]. Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese))
- [22] Chenxi Wang, Changjian Wang, Bing Chen, et al. Comparative study of water droplet interactions with molten lead and tin[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2020, 80:157—166.
- [23] Jiangtao Wang, Manhou Li, Bing Chen, et al. Experimental study of the molten tin column impacting on the cooling water pool[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 143:107464.
- [24] Zhengxiang Shen, Hu Chen, Zhongjie Lü, et al. Study on large-scale steam explosion of molten aluminum and water[J]. Process Safety Progress, 2020, 39:1—9.

Experimental study on the explosion process of high temperature molten aluminum liquid contacted with water

ZHOU Ning¹, LI Xue¹, CHEN Bing², MEI Yuan¹, REN Fuping¹, LI Entian¹, YUAN Xiongjun¹

(1. School of Petroleum Engineering of Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China;

2. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of interaction between high temperature molten aluminum and water, a set of high temperature molten aluminum liquid and water contact explosion experimental test system was designed. The process of interaction between high temperature molten aluminum liquid and water was monitored by infrared thermal imager, high speed camera and pressure sensor. The law of energy transformation in the process of contact explosion between molten aluminum and water was analyzed. The experimental results show that film boiling occurs instantaneously when molten aluminum liquid is in contact with water at high temperature. The shock produced by intense gasification of water produces disturbance in water and the disturbance expands rapidly. After 40ms, the film boiling changes to the nucleate boiling until explosive splashing occurs. According to the law of energy conservation, explosive shock theory and experimental results, the potential thermal energy of high temperature molten aluminum is about 3.34%~11.23% and converted into explosive shock wave energy.

Keywords: molten aluminum liquid; steam explosion; explosion shock wave; energy conversion rate