

喷射钠火的初步分析及实验方法研究

刘晨, 洪顺章, 杜海鸥, 谢淳

(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

摘要:以换热器入口端和蒸发器出口端的管道为例,研究管道中液态钠泄漏所产生喷射钠火的成因和影响后果,研究实际泄漏情况下钠的泄漏流速和形成钠滴的大小,比较模拟水喷射下的水流速和水滴大小,理解液滴在不同流量下和不同大小喷嘴的喷射形式和相互关系,选择合适的钠喷射喷嘴开展钠喷射实验,获得喷射钠火的相关数据,帮助理解钠喷射燃烧现象。

关键词:喷射钠火;液滴;钠泄漏

中图分类号:TL43

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)02-0139-06

Research on Spray Fire Technology and Experiment Method

LIU Chen, HONG Shun-zhang, DU Hai-ou, XIE Chun

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-34, Beijing 102413, China)

Abstract: Spray fire due to the leakage of sodium from pipe of heat exchanger nearby was analyzed to understand its cause and results. The rate of sodium leakage and the diameter of sodium droplet were developed in the piping under postulated fire scenarios. Comparing to the rate of flow and droplet diameter with water spray experiments, on the basis of the analysis of the formation for droplet spray and parameters relationships with different sizes of the hole and flow rate, sodium spray nozzle is selected to gather data of spray fires that will result in more advanced understanding of sodium spray combustion phenomena.

Key words: spray fire; droplet; sodium leakage

以第四代核电站为代表的快中子增殖堆以金属钠作为主冷却剂,主要使用在堆芯主容器和二回路的冷却系统中,钠始终以液态的形式在容器和管道中流动,其中主回路的钠温在500℃左右,二回路管道中的钠温在200~300℃左右,任何液态钠的泄漏和燃烧都可能对核电站的安全性造成潜在威胁。特别强调的是,如果钠以液滴的形式在抛射的过程中发生

燃烧,将产生所谓的雾火^[1]。当发生喷射钠火有可能形成钠的剧烈燃烧,房间压力的快速上升以及产生大量的热气溶胶,这些现象相对于钠以池式形式的燃烧会造成更严重的后果,因此开展对喷射钠火技术的研究,理解其根本原因,掌握钠的泄漏对快堆核电站所造成危害性的知识显得尤为重要。

本文主要围绕对换热器入口端和蒸发器出

口端的管道中的液态钠泄漏时发生喷射钠火的状况进行分析,研究实际泄漏情况下钠流速和钠滴大小,指导设计合理的模拟泄漏情况下钠喷射的实验方法,通过获得的雾化数据,对喷射雾化技术进行分析。

1 喷射钠火初步分析

1.1 泄漏情况下钠流速分析

首先对其泄漏的条件进行假设:泄漏管道是单层壁结构,由热绝缘体包围管道外层;当其中1段管道发生破裂,定义破口是1个圆形孔,钠从破口中泄漏,同时泄漏孔的直径在整个泄漏过程中大小不变。

当液态钠从管道一端(a 点)流入,从管道另一端(c 点)流出,在管道中间发生破裂,钠从中(b 点)流出。已知流入管道钠流的压力和流速(p_a, v_a),使用伯努利方程计算泄漏点的流速(v_b)。由于方程的局限性,假设管道中钠流的条件不随流出管道钠流的变化而变化,因此通过流出管道钠流的压力和流速(p_c, v_c)与流入管道 a 点的值相等。同时,泄漏点的压力(p_b)与外界大气压一致。

1个流线型的能量方程推出的压差方程建立如下:

$$\frac{d}{dt} \int_{v_{os}} \left(\frac{v^2}{2} + gz + u \right) \rho dv + \int_{A_t} \rho \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) v \cdot NdA = Q - W$$

式中: g 为重力加速度; h 为参考面高度; v 为液体速度; ρ 为液体密度; z 为位能; Q 为静压能; W 为动能; A 为截面积, m^2 。考虑流体的体积不变,并与时间无关,所以方程初始值为0。

同时计算液体质量流量 m (kg/s) 的方程如下:

$$m = \rho v A$$

管道中的钠流以第1个点形成流线型,第2个任意点在管道外,对能量方程优化为:

$$m \left[(h_b - h_a) + \left(\frac{v_b^2}{2} - \frac{v_a^2}{2} \right) + g(z_b - z_a) \right] = 0$$

由于焓等于内部能量加上压力比密度,且流体是等温的,则方程变化为:

$$\left(\frac{p}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} \right)_a = \left(\frac{p}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} \right)_b = \text{const}$$

参照以上假设,利用伯努利方程计算泄漏点的流速为:

$$v_b = C_D \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}}$$

式中: v_b 为孔外的流速,m/s; C_D 为流量系数; p_a 为管道压力,Pa; p_b 为管道外压力,Pa。Calvert定义流量系数等于收缩系数和速度系数的积。对于1个理想的孔,取收缩系数为0.62。速度系数通常很高,在0.95~0.99之间^[2],本文取0.98,则流量系数为0.61。

体积流量 Q (m^3/s):

$$Q = vA$$

假设管道泄漏的初始条件,如表1所列。

表1 泄漏情况描述
Table 1 Conditions of leakage situations

参量	数值	
	过热器入口段	蒸发器出口段
密度, kg/m ³	830	875
温度, °C	495	310
管道内绝对压力, Pa	800	200
管道外绝对压力, Pa	101	101
管道质量流量, kg/s	70	137.5
管道流速, m/s	2.7	2.2
管道壁厚, m	0.010	0.012
管道内径, m	0.199	0.301

基于表1,计算泄漏时泄漏孔的流速分别为25.9 m/s。

根据不同泄漏条件下的流速,计算每种情况下不同尺寸孔的体积流量和质量流量,结果列于表2。

1.2 钠和水流量的计算

由于每个喷嘴的参数是由水的流量决定的,因此需根据假设泄漏情况下钠的流量计算水的流量,通过计算水的流量选择合适的水喷嘴进行实验。这里使用无量纲液体比重 φ 的概念:

$$\varphi = \rho_s / \rho_w$$

式中: ρ_s 为液体钠的密度,kg/m³; ρ_w 为液态水的密度,kg/m³。

表 2 不同尺寸孔的体积流量和质量流量

Table 2 Rate of volume and mass flow for different sizes of holes

孔径/mm	质量流量/(kg · s ⁻¹)		体积流量/(L · min ⁻¹)	
	过热器	蒸发器	过热器	蒸发器
	入口段	出口段	入口段	出口段
1	0.02	0.006	1.2	0.43
2	0.07	0.03	4.7	1.7
3	0.15	0.06	11	3.8
5	0.4	0.2	30	11
10	1.6	0.6	118	42
20	6.5	2.5	471	170
30	15	5.6	1 060	382
40	26	10	1 885	679

表 3 液体流量的变化率

Table 3 Changing rates of flow for liquid

参量	数值	
	过热器入口段	蒸发器出口段
水的密度, kg/m ³	997	997
钠的密度, kg/m ³	830	875
钠的比重	0.8	0.9
ΔQ	1.1	1.07

表 4 钠和水流量的转换

Table 4 Conversion of flow rate for sodium and water

孔径/mm	过热器入口段		蒸发器出口段	
	流量/(kg · s ⁻¹)		流量/(kg · s ⁻¹)	
	钠	水	钠	水
1	0.02	0.02	0.006	0.006
5	0.4	0.36	0.03	0.03
10	1.6	1.45	0.06	0.06
20	6.5	5.9	0.2	0.19
30	15	13.6	0.6	0.56
40	26	23.6	2.5	2.34

液体比重转换系数示于图 1。液体流量的变化率 ΔQ 为:

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{钠}}}{Q_{\text{水}}} = \sqrt{\frac{1}{\varphi^2}}$$

式中:Q_钠为液体(钠)的流量,kg/s;Q_水为水的流量,kg/s。

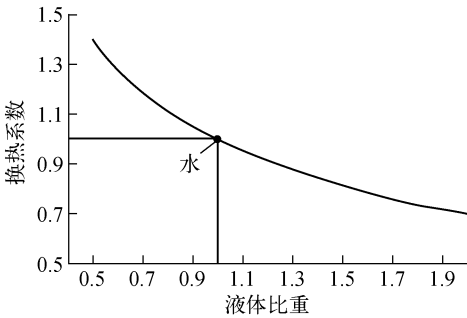


图 1 液体比重转换系数

Fig. 1 Specific gravity of liquid

经计算,相应钠流量与水流量的变化率列于表 3。

具体的流量转换计算结果列于表 4。

1.3 钠滴与水滴参数的比较

由于液态钠和液态水的流体属性不同,因而从喷嘴中产生的液滴直径也不相同。当温度为 100 °C 时,钠的密度为 927 kg/m³,水的密度为 958 kg/m³,同时,钠的表面张力为 0.19 N/m,水的表面张力为 0.072 N/m。

将流动的液体看作 1 个移动的圆柱体,建立流体的受力模型,如图 2 所示。

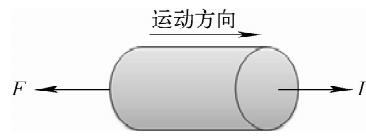


图 2 液滴受力模型

Fig. 2 Spray droplet force model

液体表面张力与液体的移动方向和液体的惯性力方向相反,建立方程为:

$$F_{\text{Surface_tension}} = 2\pi R\sigma$$

液体受到的内应力方向与液体的移动方向一致,建立方程为:

$$I_{\text{Force}} = \rho v^2 A$$

其中:R 为圆柱体半径,m;σ 为表面张力,N/m。

当钠滴开始散落时,作用在液体上相互作用的力达到平衡。液体表面张力和内应力方向的两个方程相等时,说明钠滴开始散落。

$$2\pi R\sigma = \rho v^2 A$$

即钠滴半径的计算公式为:

$$R = 2\sigma/\rho\omega^2$$

由于已知水和钠的属性,可通过计算的两种液体流速,获得钠滴与水滴的直径比,判断钠滴比水滴差别。直径比为:

$$\text{Ratio} = \frac{R_{\text{Sodium}}}{R_{\text{Water}}}$$

经计算得出钠滴的直径比水滴的大 2.2 倍。同时使用不同泄漏孔径也证实了钠滴和水滴的直径比与泄漏孔的直径不相关。

表 5 10 和 30 mm 孔下钠滴与水滴参数的比较

Table 5 Parameters comparison of sodium droplet and water droplet for 10 and 30 mm leak holes

参量	10 mm 的孔		30 mm 的孔	
	水	钠	水	钠
表面张力, N/m	0.072	0.19	0.072	0.19
密度, kg/m ³	958	927	958	927
流速, m/s	1.45	1.6	0.56	0.62
半径, m	1.6×10^{-4}	0.7×10^{-4}	4.8×10^{-4}	1.07×10^{-3}
半径比	2.2		2.2	

2 喷射钠火的实验

2.1 实验方法

实验以研究钠喷射火灾后果、收集钠喷射数据为目的,开展对钠喷射技术的研究。研究不同钠滴的大小及分布情况,建立相应的水喷射模拟回路和钠喷射回路(图 3)。参考快堆钠的运行状态,在 0.24 m³ 的钠喷射接收容器内进行,实验的初始钠温在 200~550 °C 之间,以氩气或氮气瓶对钠罐进行加压,形成钠的流速在 0.01~0.06 kg/s 之间喷射。同时对整个管道和喷头以加热丝的形式缠绕,以保证整个回路钠温恒定及液体钠的流动。另外采用钠泵稳定输送钠流,形成钠回流回路和钠喷射支路,以计量泵、流量计的钠喷射装置等相关设备控制喷射实验中钠的流速。

2.2 喷射形式

由于喷嘴尖端存在干扰,液体经过喷嘴从喷头喷射,经干扰形成液滴。存在的 4 个破裂

状态^[3]分别是:雷利状态、第 1 风驱动状态、第 2 风驱动状态和雾化状态,如图 4 所示。

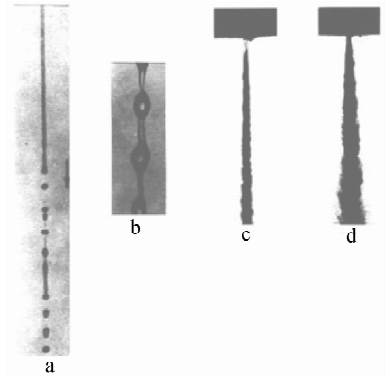


图 4 喷雾形式

Fig. 4 Spray forms

雷利状态和第 1 风驱动状态发生在液体以较低的速度从喷嘴中喷射。由于喷头对液体的干扰产生与喷头直径相等或更大的液滴。图 4a 中,雷利状态的特征是具有相对较长液滴的直径在喷头散开前比在喷头散开后更大。图 4b 显示,第 1 风驱动状态的特征也是钠滴的直径较喷头大。然而,这些液滴和那些没与喷头散开的部分的流体相连,并未与喷头完全散开。

第 2 风驱动状态和雾化状态在具有较高流速的喷射下发生的。由于喷嘴的干扰使液滴散

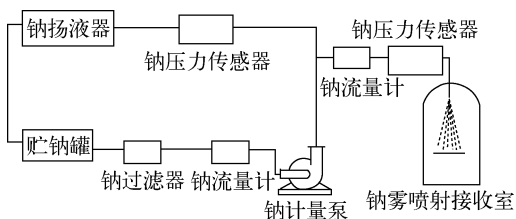


图 3 钠喷射回路流程示意图

Fig. 3 Sodium spray circle

成比喷头的直径更小的液滴。图 4c、d 显示喷头在第 2 风驱动状态和雾化状态下产生的液滴,都具有较小的直径,同时在每个状态下均形成了很好的喷射形式。第 2 风驱动状态开始形成液滴的散开位置远离喷嘴,而雾化状态在离开喷嘴一开始就形成很好的喷射形式。

随着液体的惯性和表面张力的作用,喷嘴的干扰决定了特定喷头的形状。由于液体的惯性,表面张力和气动力行为的结合,喷头决定了发生破碎状态。使用 Weber 数量化这 4 种状态(表 6)。Weber 数定义为 1 个无量纲的值,是惯性力和表面张力比作用于射流。

$$We_g = \rho_g u^2 (2a) / \sigma$$

式中: We_g 为 Weber 数; ρ_g 为标准周围气体的空气密度, kg/m^3 ; u 喷头出口速度, m/s ; a 为喷头半径, m ; σ 为钠的表面张力, N/m 。

表 6 4 种喷射状态下的 We_g

Table 6 We_g under four distinct jet regimes

喷射状态	We_g
雷利状态	$We_g < 0.4$
第 1 风驱动状态	$0.4 < We_g < 13$
第 2 风驱动状态	$13 < We_g < 40.3$
雾化状态	$We_g > 40.3$

当空气密度为 $0.117 kg/m^3$ 、钠的表面张力为 $0.19 N/m$ ^[4]、喷头出口速度分别为 25 和 9 m/s 时,喷头半径计算为:

$$A_a = A_0 C_c; a = \sqrt{A_a / \pi}$$

式中: A_a 为喷头面积, mm^2 ; A_0 为孔的面积, mm^2 ; C_c 为收缩系数^[2]; a 为喷头的半径, mm 。

计算的结果基于选择不同的孔而不同,结果列于表 7。

不同孔径下计算的空气 We_g 列于表 8。

表 8 也显示了每个孔径与计算的 We_g 所对应喷射形成的液滴状态。

2.3 喷嘴的选择

由于实验的目的是收集雾化数据,进一步理解钠喷射燃烧现象。已得出喷射是发生在第 1 风驱动和第 2 风驱动状态下,因此为了形成好的液滴形态的喷射,选择合适的喷嘴进行钠喷射实验,理解喷射燃烧的根本。在假设一定

表 7 不同孔径与喷头半径的比较

Table 7 Comparison of radii for hole and nozzle

孔径/ mm	孔面积/ mm^2	收缩 系数	喷头面积/ mm^2	喷头半径/ mm
10	79	0.62	49	3.9
20	314	0.62	195	7.9
30	707	0.62	438	12
40	1 257	0.62	779	16
50	1 963	0.62	1 217	20
60	2 827	0.62	1 753	24

表 8 不同孔径下的 We_g

Table 8 We_g for different sizes of holes

孔径/ mm	喷头 半径/ mm	We_g		分裂状态	
		过热器	蒸发器	过热器	蒸发器
		入口段	出口段	入口段	出口段
10	3.9	30	4	第 2 风驱动	第 1 风驱动
20	7.9	61	8	雾化	第 1 风驱动
30	12	92	12	雾化	第 1 风驱动
40	16	123	16	雾化	第 1 风驱动
50	20	153	20	雾化	第 1 风驱动

的泄漏孔径、压力和流速下操作喷嘴进行实验。

对美国喷雾系统公司生产的喷嘴进行总结,主要有 4 种基本类型的喷嘴:扁平扇形、实心锥形、空心锥形和雾化喷嘴。每种分类都有许多不同喷嘴的设计,包括对内部设计、喷射角度、操作压力、操作流速、液滴直径和不同液滴的分布。为了选择合适有效的喷嘴进行实验,需了解每种喷嘴的优缺点。

1) 扁平扇形喷嘴产生喷射液体是 1 条细线。在整个扇形喷嘴范围内形成均匀一致的分布,液滴颗粒适中,适用于需要均匀的高打击力的喷射应用。由于喷射成为 1 条细线,氧气能均匀和容易地分布到每个液滴上,从而增加了喷射的燃烧率。

2) 实心锥形喷嘴产生均匀一致的圆形实心锥形喷雾形状,液滴中等到较大颗粒。

3) 空心锥形喷嘴产生近似于实心锥形喷嘴形成的中空锥形图案的喷射。由于液滴直径的减少,使得燃烧率增加,因此考虑从空心锥形

喷嘴的喷射燃烧率比实心锥形喷嘴的喷射燃烧率大。

4) 空气雾化喷嘴通过液压和气压的共同作用产生雾化效果。雾化喷嘴特征是单流体、小颗粒、小流量的喷嘴。雾化喷头产生细小到更细小的液滴,直径约 0.015 cm,通常应用在冷却和涤气上,与空心锥形喷嘴相同,雾化喷嘴也使用在润滑、涂层和加湿上。然而,雾化喷嘴需比其它喷嘴有更低的流速,同时需惰性气体气压作用与流体上,这些特点均不利于实验的操作。

由于实验希望使用的喷嘴能产生合适的液滴大小,并满足实际的实验条件。参照显示了美国喷雾系统公司提供的信息,在 280 kPa 下各种喷嘴在不同流量下产生的水滴直径列于表 9。

表 9 不同喷嘴的液滴直径比较

Table 9 Descriptions and diameters of different droplets

喷嘴类型	体积流量/(L·min ⁻¹)	体积中位数直径/ μm
扁平扇形喷嘴	0.38~38	220~2 500
实心锥形喷嘴	0.72~87	850~2 800
空心锥形喷嘴	0.38~91	300~1 900
雾化喷嘴	0.03~30	15~200

从表 9 可看出,雾化喷嘴产生的液滴太小,同时由于需要液压和气压的共同作用产生的雾化效果,不满足实际的实验条件。而空心锥体喷嘴产生液滴直径为 300~1 900 μm ,这个范围对于实验的来说也相对较小,且实际的燃烧情况下,空心锥体喷嘴产生的燃烧状态,会造成燃烧率更高,不符合实验目的。因此扁平扇形和实心锥形喷嘴能生成好的液滴,但同样扁平

扇形液滴也将产生更大的燃烧率。因此,实心锥形的喷嘴能产生适合于实验的液滴直径,并满足实验要求。基于实心锥体喷头的选择,并参考了美国喷雾系统公司的分类,证实了这种喷嘴,与假设情形的出口直径,压力和流速最为匹配。

3 结论

通过对交换器入口端和蒸发器出口端的管道钠泄漏情况的分析,对不同形式的喷雾钠火进行设计分析,获得了不同泄漏情况下不同孔径的泄漏速度,并对相应钠的流速和钠滴直径以及水流速和水滴直径进行比较,发现在同一状态下的钠滴比水滴直径大。最后参照美国喷雾系统公司提供的喷嘴类型选择了实心锥体喷头进行设计实验,研究钠喷射燃烧现象。

参考文献:

- [1] 张斌,朱继洲,韩浪. 钠冷快堆钠喷雾火事故三位数值模拟[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 105-109.
ZHANG Bin, ZHU Jizhou, HAN Lang. 3-dimensional numerical simulation of sodium spray fire accidents in LMFBRs [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2): 105-109 (in Chinese).
- [2] DAUGHERTY R L, FRANZINI J B. Fluid mechanics[M]. New York: McGraw-Hill, 1965.
- [3] LIN S P, REITZ R D. Drop and spray formation from a liquid jet[J]. Annual Review Fluid Mechanics, 1998, 30(1): 85-105.
- [4] INCROPERA F P, DEWIT D P. Introduction to heat transfer[M]. USA: John Wiley and Sons Inc., 2000.