

DOI: 10.7652/xjtuxb201909023

核电站安全壳打压试验中可燃物 爆炸下限的实验研究

翁文庆¹, 张可², 王定义³, 符文², 孙江枫¹

(1. 中广核研究院有限公司, 518000, 广东深圳; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

3. 中广核核电运营有限公司, 518000, 广东深圳)

摘要: 为了研究缩短核电站安全壳完整性试验和泄漏率试验工期的可行性,对安全壳打压试验过程中所使用的化学品的挥发性测试结果进行了研究和分析,筛选出25种可燃性物质,在60℃或略高于可燃物闪点的初始温度下,对其在100、310和520 kPa的初始压力条件下的爆炸下限进行了实验研究,获得了重要的安全性实验数据。实验结果表明,对于低闪点的可燃性液体,其在不同初始压力下的爆炸下限几乎相同;对于闪点较高的可燃性液体,当初始压力较高时,由于可燃蒸气的液化,出现不能被点燃的现象,有利于安全壳打压过程中危险性的降低;针对11种初始压力升高后出现不可燃现象的物质,提出了一种其在所测试的初始温度下可以被点燃的最大初始压力的估算方法,可为完整性试验和泄漏率试验过程中的安全性分析提供理论依据,以缩短试验工期。

关键词: 核电站;打压试验;爆炸极限;闪点

中图分类号: O643.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)09-0176-07

Experimental Research on Lower Flammability Limits of the Combustible Vapors in Containment Test

WENG Wenqing¹, ZHANG Ke², WANG Dingyi³, FU Wen², SUN Jiangfeng¹

(1. China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. China Nuclear Power Operations Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: To shorten the processing period during containment test in nuclear power plant, a feasibility study was carried out. Firstly, the volatility test results of the chemicals used during containment test were analyzed, and 25 combustible substances were screened out. Then, the lower flammability limits of the 25 substances were tested at the temperature of 60℃ or a little above their flash points, under the pressures of 100, 310 and 520 kPa, respectively. The results indicate that the lower flammability limits of the liquids with low flash points are almost the same at different initial pressures. For the liquids with high flash points, there appears a phenomenon that their vapors cannot be ignited due to partial liquefaction of the combustible vapors at high pressures, which is favourable to reduction of flaming risk during containment test. Finally, for the 11 substances which will become nonflammable when the pressure reaches a certain value, a method was proposed to estimate the maximum pressure at which their vapors can be ignited. This estimation method provides a theoretical basis for the safety analysis during containment test

收稿日期: 2019-03-16。 作者简介: 翁文庆(1981—),男,硕士,高级工程师;张可(通信作者),男,高级工程师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676159);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XJJ2017115)。

网络出版时间: 2019-06-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190617.0931.002.html>

procedure.

Keywords: nuclear power plant; containment test; lower flammability limit; flash point

核电站安全壳是核安全的最后一道屏障,其功能是在任何情况下都要防止放射性物质逸出,以保护环境与公众的安全^[1]。为确认安全壳的功能,我国核安全法规 HAD102/06 强制要求核电站在建造初始及在役阶段,必须进行安全壳的完整性试验和泄漏率试验(CTT)^[2]。通常在核电站建造完工时,做第 1 次 CTT;核电站首次换料大修时,做第 2 次 CTT;以后每隔 10 年做 1 次 CTT^[3]。典型的 CTT 中打压过程持续时间为 128 h:在升压过程中,鼓入压缩空气缓慢增压,然后分段保持一定的时间;在降压过程中,以一定速率释放压缩空气,同样分段保持一定的时间,最终降压至常压。CTT 打压过程中的峰值压力为 520 kPa,充压速率不超过 15 kPa/h,卸压速率不超过 14 kPa/h,具体如图 1 所示。

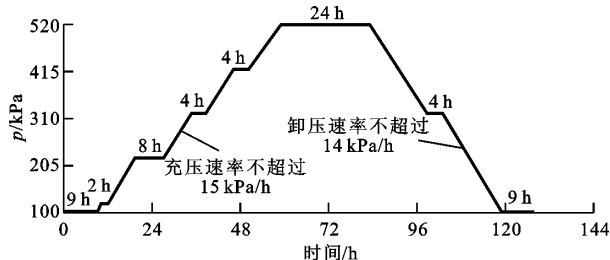


图 1 典型 CTT 试验过程

在 CTT 启动前,反应堆厂房要实施大范围的阀门检修及贯穿件试验,在维修过程中使用的化学品多达千种,包括油漆、威第尔清洗剂、WD-40 等。作为潜在的挥发源项,这些化学品可直接或间接挥发出众多的可燃性气体或蒸气。当挥发出的可燃性物质在局部聚积后,遇点火源即有发生燃烧爆炸的风险。此外,在打压试验期间,压力的升高也可能导致可燃性物质燃爆风险的增大^[4]。据阳江 301 号机组大修的反馈,上述 CTT 维修活动总工期为 71.94 d,若能通过安全性的研究表明该工期可进行一定程度的缩短,将会产生巨大的经济效益^[5]。对于可燃性气体或蒸气,最安全的方法是将其浓度控制在爆炸下限之内。因此,本文对 CTT 试验期间挥发源所挥发出的可燃性气体或蒸气的爆炸下限进行了实验研究,为 CTT 期间的安全性研究提供了必需的安全数据。

1 可燃性物质的筛选

CTT 前的维修过程中使用的化学品数量众多,

包括威第尔清洗剂、无水乙醇、丙酮、油漆、反应堆压力容器螺栓用润滑剂、通用防锈润滑剂、合成航空润滑脂、齿轮油、液压油、超声耦合剂、着色渗透探伤剂渗透液等。在所使用的化学品中,可燃性气体的用量非常少,其中用量相对较大的仅有异丁烷一种,其他可燃物均为可燃性液体。与可燃性气体相比,国内外目前关于可燃性液体蒸气爆炸极限的研究还非常不足^[6],各种文献、手册、化学品安全说明书中的数据互相引用,原始实验数据非常少见,且已有的爆炸极限数据大多未注明所对应的温度。因此,为了给 CTT 试验提供准确的安全性数据,首先必须对其所涉及的可燃性液体蒸气的爆炸极限进行实验研究。

通过色谱-质谱联用的方式,对用量较大的 30 余种化学品进行了挥发性测试,根据挥发性测试的结果,首先剔除闪点在 80 °C 以上的挥发分。然后,对挥发分中的同分异构体进行分析,由于同分异构体的爆炸下限一般差别较小^[7],因此在每种同分异构体中仅选择一种物质进行测试,共筛选出 25 种可燃性物质。结合化学品的实际用量,这些可燃物中挥发分中占比较高的几种物质为戊烷、己烷、甲苯、对二甲苯和正丁醇。表 1 列出了筛选出的 25 种可燃性物质及其闪点值。本文实验中所使用的化学试剂大多购买自上海阿拉丁生化科技股份有限公司和国药集团化学试剂有限公司,试剂纯度(质量分数)大多优于 99%。

2 实验系统

可燃物质爆炸下限(即可燃物爆炸时的体积分数 φ_{LFL})的测试使用西安交通大学研制的基于 20 L 球形容器的测量装置,图 2 为爆炸极限测量装置照片。该装置基于 ASTM E918 标准和 EN 1839 标准建立,爆炸容器为内部体积约为 20 L 的钢球,设计最高耐压为 100 MPa。该装置可测试的初始温度范围为室温~200 °C,初始压力范围为 0.1~2 MPa。可燃混合物的温度通过钢球外侧缠绕的多根加热带进行控制,使用美国 Omega 公司生产的外径为 0.5 mm 的铠装热电偶进行测量,温度数据通过 Agilent 34970A 数字多用表进行读取,钢球内部混合气体的温度均匀度和波动度均不超过 ± 2 °C。在测试过程中,不同体积比的可燃气体或液体蒸气与空气的混

表 1 挥发性实验所筛选出的可燃性物质

CAS 号	物质	分子式	闪点/℃	供应商	纯度(质量分数)/%
75-28-5	异丁烷	C ₄ H ₁₀	−83	山东金莱尔	99.9
109-66-0	正戊烷	C ₅ H ₁₂	−40	阿拉丁	99.0
110-54-3	正己烷	C ₆ H ₁₄	−22	国药	99.5
142-82-5	正庚烷	C ₇ H ₁₆	−4	国药	99.0
111-84-2	正壬烷	C ₉ H ₂₀	31	阿拉丁	99.0
124-18-5	正癸烷	C ₁₀ H ₂₂	46	阿拉丁	99.0
1120-21-4	十一烷	C ₁₁ H ₂₄	60	阿拉丁	99.0
112-40-3	十二烷	C ₁₂ H ₂₆	74	阿拉丁	99.0
629-50-5	十三烷	C ₁₃ H ₂₈	79.4	国药	99.0
108-87-2	甲基环己烷	C ₇ H ₁₄	−4	阿拉丁	99.0
64-17-5	乙醇	C ₂ H ₆ O	11	国药	99.7
67-63-0	异丙醇	C ₃ H ₈ O	12	国药	99.7
71-36-3	正丁醇	C ₄ H ₁₀ O	35	国药	99.5
71-41-0	正戊醇	C ₅ H ₁₂ O	35	国药	98.5
104-76-7	异辛醇	C ₈ H ₁₈ O	77	阿拉丁	99.0
108-88-3	甲苯	C ₇ H ₈	4	国药	99.5
106-42-3	对二甲苯	C ₈ H ₁₀	30	阿拉丁	99.0
95-63-6	1,2,4-三甲苯	C ₉ H ₁₂	48	阿拉丁	98.0
67-64-1	丙酮	C ₃ H ₆ O	−20	国药	99.5
25167-70-8	二异丁烯	C ₈ H ₁₆	−6.7	阿拉丁	98.0
108-10-1	4-甲基-2-戊酮	C ₆ H ₁₂ O	23	国药	99.0
123-42-2	二丙酮醇	C ₆ H ₁₂ O ₂	64.4	阿拉丁	99.0
763-69-9	3-乙氧基丙酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₃	52.2	国药	99.0
556-67-2	八甲基环四硅氧烷	C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄	60	上海笛柏	98.0
541-02-6	十甲基环五硅氧烷	C ₁₀ H ₃₀ O ₅ Si ₅	72	阿拉丁	99.0



图 2 爆炸极限测量装置照片

合物直接在钢球内进行配制,配气使用的压力传感器为美国 Druke 公司生产的精度为 0.04% 的压阻式压力传感器。混合气体采用熔断丝的点火方式,熔断丝为直径 0.076 mm 的铜丝,使用功率为 500

VA、输出电压为 115 V 的隔离变压器作为点火电源。爆炸压力的测量使用杭州米科传感技术有限公司生产的 MIK-300G 型高温传感器,测量精度为 0.5%。点火后可燃混合物是否发生燃烧根据 ASTM E918 标准进行判断:若最大爆炸压力相比于初始压力升高 7%,则认为混合物被点燃;若最大爆炸压力高于 7%,则降低可燃物浓度重新配气测试;若最大爆炸压力低于 7%,则增大可燃物浓度进行测试。实验中对于每种可燃物的测试次数不少于 10 次,最终确定爆炸下限时的最大浓度间隔不超过 ±0.02%。爆炸极限测量装置可测试可燃气体的爆炸极限,测试之前,首先使用真空泵将钢球抽真空至 $p_1 < 0.5$ kPa。当测量可燃气体的爆炸极限时,爆炸容器内可燃性气体的比例根据理想气体分压定律算出。配气时缓慢充入可燃气体至压力 p_2 ,然后缓慢充入干燥空气至压力 p ,则可燃气体的体积分数为

$$\varphi = \frac{p_2 - p_1}{p} \times 100\%$$

(1)

当测量可燃性液体时,爆炸容器内可燃性液体蒸气的比例根据理想气体状态方程计算得出。使用微量进样器刺破设置在钢球上法兰处的硅橡胶密封件注入可燃性液体,注入后可燃性液体闪蒸为蒸气,使用测量精度为 0.1 mg 的精密天平称量注射前后微量进样器的质量差,计算得到注入钢球的液体蒸气的质量 m 。使用不锈钢堵头将硅橡胶密封件密封,然后缓慢充入干燥空气至压力 p ,测量得到混合气体的温度 T ,则所充入的可燃液体蒸气的体积分数为

$$\varphi = \frac{m}{M} \frac{1}{(V/22.4)(p/p_0)(T_0/T)} \times 100\%$$

(2)

式中: $T_0=273\text{ K}$; $p_0=101.3\text{ kPa}$; M 为可燃性液体的摩尔质量; V 为爆炸容器的体积,实验前使用蒸馏水对钢球体积进行了标定,标定结果为 20.29 L。

为检验本装置的准确度,使用本装置对异丁烷、甲醇和乙醇的爆炸下限进行了实验测量,表 2 列出了实验值和文献值的比较。从表中数据可以看出,实验值与文献值非常接近,表明本装置实验结果的可靠性。

表 2 甲醇、乙醇与异丁烷的爆炸下限实验结果

试剂	测量温度 /℃	爆炸下限/%		绝对偏差 /%
		实验值	文献值	
异丁烷	20	1.78	1.80 ^[8]	-0.02
甲醇	100	6.50	6.43 ^[9]	0.07
乙醇	60	3.39	3.40 ^[10]	-0.01

注:绝对偏差=实验值-文献值。

3 实验结果

从图 1 可以看出,CTT 打压过程中不同阶段的压力包括 100、110、205、310、415 和 520 kPa,由于测试物质众多,且实验周期较长,为减少实验量,本文测试过程中选取常压、最高压力和一个中间压力,即测试的初始绝对压力分别为 100、310 和 520 kPa。

由于核电站停止运行后,在 CTT 期间安全壳内局部仍可能存在一定的余温,其最高温度可能会达到 50℃左右。随着温度的升高,可燃物的可燃性会增强。因此,从实际安全性考虑,安全壳内可燃物的爆炸下限测试温度选取为 60℃。表 3 列出了 25 种可燃物在不同初始压力条件下的爆炸下限测试结果,在所测试的物质中仅有异丁烷一种物质在常温常压下为气相,其爆炸下限随初始压力的升高而降

低,即其可燃性增强。除此之外,其余物质在常温常压下均为液相。

表征液体可燃性最重要的指标为液体的闪点,故根据烷烃的闪点进行分析。从实验结果可以看出:在测试温度为 60℃、闪点为 30℃以下的物质中,随着初始压力的升高,除对二甲苯外,其余可燃物的爆炸下限几乎没有变化,表明其可燃性随压力的升高并未增强;在闪点高于 30℃的物质中,随着可燃物闪点的升高,逐渐出现高压下不可燃的测试结果,且可燃物的闪点越高,其出现不可燃的初始压力越低。

对于部分闪点高于 60℃的物质,由于其在 60℃的测试温度下无法被点燃,因此其测试温度略高于其闪点,根据闪点的不同,选取 80 或 100℃作为其爆炸下限的测试温度。从表 3 的测试结果可以看出,对于测试温度为 80 或 100℃的物质,随着测试压力的增大,可燃物同样出现高压下不可燃的现象。

为了给 CTT 过程提供更进一步的安全性分析依据,对于压力升高后出现不可燃现象的物质,本文对其在所测试的初始温度下可以被点燃的最大初始压力进行了简单的估算。对于可燃性液体,当初始温度不变而初始压力升高时,液体蒸气是否可燃和其在与空气混合物中的分压比相关。当其分压比较大时,由于可燃物浓度充足,混合物可能被点燃;当其分压比较小时,由于可燃物浓度不足而导致混合物不能被点燃。

图 3 给出了测试温度为 60℃时正壬烷在本文所研究的压力范围内的可燃性分析。由于正壬烷蒸气所能产生的最大分压力为其在 60℃时的饱和蒸气压,使用 REFPROP 10.0 软件计算出 60℃时正壬烷的饱和蒸气压为 3.978 kPa,因此图中纵坐标大于 3.978 kPa 的区域实际上不存在。本文实验获得了正壬烷在 100 kPa 和 310 kPa 时的爆炸下限,因此当初始压力增大至 310~520 kPa 之间的某个

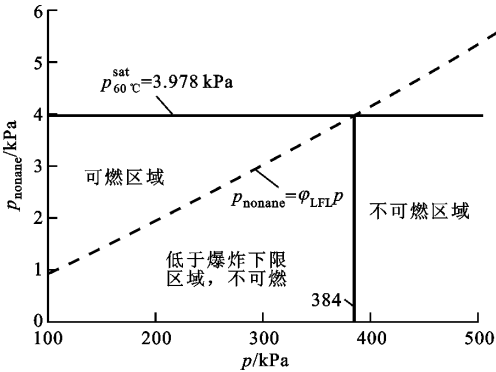


图 3 不同初始压力下正壬烷的爆炸范围图

值之后,其蒸气将无法被点燃。在正壬烷可以发生燃烧的初始压力范围之内,若其蒸气的分压比高于该初始压力下的爆炸下限时,则可以被点燃;若其蒸气的分压比低于该初始压力下的爆炸下限时,则不能被点燃。因此,若已知正壬烷在不同初始压力下的爆炸下限,即可在图中作出如虚线所示的正壬烷在其爆炸下限时 的分压力曲线,即

$$p_{\text{nonane}} = \varphi_{\text{LFL}} p \tag{3}$$

该曲线与图中正壬烷饱和蒸气压水平线交点所对应的横坐标值即为正壬烷可以被点燃的最大初始压力值。

基于上述方法,对其他几种出现不可燃现象的可燃物进行了估算,表 3 列出了 11 种物质在其所测试的温度下可以被点燃的最大初始压力估算值。在估算过程中,需要用到每种物质在测试温度下的饱

和蒸气压数据,对于正壬烷、正癸烷、十一烷和十二烷,其饱和蒸气压数据来源于 REFPROP 10.0 软件,对于十三烷、正丁醇和 1,2,4-三甲苯,其饱和蒸气压数据来源于 ChemCAD 数据库^[11],计算公式如下

$$p_T^{\text{sat}} = \exp\left(a + \frac{b}{T} + c \ln T + dT^e\right) \tag{4}$$

式中: p_T^{sat} 为可燃物在温度 T 时的饱和蒸气压; a 、 b 、 c 、 d 和 e 为饱和蒸气压计算公式中的系数,其值列于表 4 中。对于正戊醇、异辛醇、二丙酮醇和 3-乙氧基丙酸乙酯,由于缺乏现有的计算方程,因此从美国国家标准与技术研究局 NIST 的 ThermoData Engine 数据库^[12]中收集了该 4 种物质的饱和蒸气压实验数据,并对偏差较大的数据进行了剔除,同样根据式(4)的方程形式拟合得到其饱和蒸气压方程。

表 3 可燃性物质爆炸下限实验结果

物质	测试温度 /℃	饱和蒸气压 /kPa	爆炸下限/%			φ_{LFL}	最大可燃初始 压力/kPa
			100 kPa	310 kPa	520 kPa		
异丁烷	60	869.2 ^a	1.75	1.72	1.69		
正戊烷	60	214.6 ^a	1.29	1.30	1.28		
正己烷	60	76.41 ^a	1.07	1.06	1.05		
正庚烷	60	28.05 ^a	0.94	0.92	0.90		
正壬烷	60	3.978 ^a	0.94	1.01	不可燃	$0.906\ 7 + 3.333 \times 10^{-4} p$	384
正癸烷	60	1.525 ^a	0.94	不可燃	不可燃	0.94	162
十一烷	80	1.740 ^a	0.76	不可燃	不可燃	0.76	229
十二烷	100	2.027 ^a	0.67	不可燃	不可燃	0.67	303
十三烷	100	1.017 ^b	0.96	不可燃	不可燃	0.96	108
甲基环己烷	60	27.14 ^b	0.99	0.99	1.00		
乙醇	60	46.73 ^a	3.34	3.32	3.36		
异丙醇	60	38.87 ^b	2.33	2.34	2.36		
正丁醇	60	8.053 ^b	1.77	1.76	不可燃	1.77	455
正戊醇	60	3.277 ^b	1.44	不可燃	不可燃	1.44	228
异辛醇	100	4.416 ^b	0.86	0.89	不可燃	$0.845\ 7 + 1.429 \times 10^{-4} p$	483
甲苯	60	18.54 ^a	1.20	1.21	1.22		
对二甲苯	60	6.865 ^a	1.17	1.27	1.44		
1,2,4-三甲苯	60	2.073 ^b	1.27	不可燃	不可燃	1.27	163
丙酮	60	115.7 ^a	2.65	2.66	2.65		
二异丁烯	60	26.39 ^b	0.88	0.87	0.88		
4-甲基-2-戊酮	60	14.47 ^b	1.28	1.30	1.27		
二丙酮醇	80	4.584 ^b	1.39	不可燃	不可燃	1.39	259
3-乙氧基丙酸乙酯	80	2.245 ^b	1.14	不可燃	不可燃	1.14	197
八甲基环四硅氧烷	100	8.715 ^b	0.66	0.62	0.59		
十甲基环五硅氧烷	100	2.588 ^b	0.62	0.59	0.65		

注:带上标 a 的数据来源于 REFPROP 10.0;带上标 b 的数据来源于 ChemCAD 数据库或 NIST ThermoData Engine 数据库。

表 4 7 种可燃性物质饱和蒸气压关系式中的系数值

物质	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>T/K</i>
十三烷 ^a	118.27	−11 432	−13.769	$5.964\ 1\times 10^{-18}$	2	268~676
正丁醇 ^a	93.173	−9 185.9	−9.746 4	$4.779\ 6\times 10^{-18}$	6	185~563
正戊醇 ^b	86.800	−9 468.6	−8.647 1	$−4.146\ 8\times 10^{-17}$	6	303~398
异辛醇 ^b	35.841	−7 500.3	−1.217 4	$−5.129\ 3\times 10^{-17}$	6	347~452
1,2,4-三甲苯 ^a	85.301	−8 215.9	−9.216 6	$4.797\ 9\times 10^{-6}$	2	229~649
二丙酮醇 ^b	75.691	−7 963.2	−7.631 5	$3.181\ 7\times 10^{-17}$	6	288~399
3-乙氧基丙酸乙酯 ^b	9.552 9	−13 111	6.410 2	$−1.195\ 1\times 10^{-15}$	6	367~397

注:带上标 a 的物质数据来源于 ChemCAD 数据库;带上标 b 的物质数据来源于 NIST ThermoData Engine 数据库。

上述估算方法基于理想气体分压定律,当初始压力较高时,在计算分子量较大的可燃物时将会产生一定的偏差。此外,上述方法还需要已知可燃物爆炸下限随初始压力的变化关系,即

$$\varphi_{\text{LFL}} = f(p) \tag{5}$$

由于不可能对可燃物在所有压力下的爆炸下限进行实验测量,且部分可燃性物质能够被点燃的压力范围非常有限,因此本文对式(5)的表达式进行了简化处理,具体取值见表 3。根据实验结果,正癸烷等 8 种物质在 310 kPa 下均不可燃,因此其爆炸极限取常数,即为其在 100 kPa 时的爆炸下限;对于正壬烷和异辛醇,由于其在 310 kPa 下的爆炸下限明显大于 100 kPa 的值,因此其爆炸极限按线性简化计算;对于正丁醇,由于其在 100 kPa 和 310 kPa 时的爆炸下限几乎相等,因此其爆炸下限同样按 100 kPa 的值取为常数。从表 3 中给出的可燃物可以被点燃的最大初始压力可以看出,11 种物质的估算结果均落在所测试的 100、310 和 520 kPa 中不可燃压力与其中较高的可燃压力之间,表明本文所提出的估算方法具有较好的准确度,该估算方法可为 CTT 过程中的安全性分析提供重要的理论依据。

4 结 论

本文通过对核电站安全壳完整性试验和泄漏率试验过程中所使用的化学品挥发性测试结果的研究和分析,筛选出 25 种可燃性物质,在 60℃或略高于可燃物闪点的初始温度条件下,对其分别在 100、310 和 520 kPa 的初始压力条件下的爆炸下限进行了实验研究,获得了可燃性物质重要的安全性数据,通过对实验数据的分析,得到以下结论。

(1)对于大多数可燃性挥发分,当压力升高时,爆炸下限均未随之降低,因此在安全壳打压期间,可燃物的可燃性并未增强,而随着压力的上升,挥发分

的挥发性减弱,其危险性降低。

(2)对于闪点较高的可燃性物质,随着可燃物闪点的升高,在高压下由于可燃性液体蒸气发生部分液化,逐渐出现高压下不可燃的测试结果,且可燃物的闪点越高,其出现不可燃的初始压力越低,有利于安全壳打压期间危险性的降低。

(3)对于初始压力升高后出现不可燃现象的物质,本文基于其饱和蒸气压与爆炸下限的关系,提出了一种可燃性液体蒸气在其所测试的初始温度下可以被点燃的最大初始压力的估算方法,可为 CTT 过程中的安全性分析提供理论依据。

参考文献:

[1] 李建伟. 核电站安全壳性能试验设计 [J]. 机电信息, 2011(6): 20-22.
LI Jianwei. Performance test design of the nuclear power plant containment [J]. Mechanical and Electrical Information, 2011(6): 20-22.

[2] 袁旭, 刘建伟. M310 核电机组安全壳整体密封与强度试验(CTT)在一回路冷态功能试验(CFT)前实施的策略分析 [J]. 科技创业家, 2013(16): 97-98.
YUAN Xu, LIU Jianwei. Strategy analysis of the implement of the containment test (CTT) for M310 nuclear power plant before the cold function test (CFT) in the primary circuit [J]. Technological Pioneers, 2013(16): 97-98.

[3] 宫广臣, 周创彬. 十年大修项目的运行风险分析和风险控制 [J]. 中国核科技报告, 2005(2): 179-189.
GONG Guangchen, ZHOU Chuangbin. Operation risk analysis and control during ten-year outage program [J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2005(2): 179-189.

[4] 赵健, 李少纯, 张波. 安全壳火灾监测系统研究与应用 [J]. 核标准计量与质量, 2017(1): 47-50.
ZHAO Jian, LI Shaochun, ZHANG Bo. Research and

- application of the fire monitoring system for the containment [J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2017(1): 47-50.
- [5] 韩正, 王雷, 梁斌. 浅谈缩短核电站安全壳打压试验时间的可行性 [J]. 科技视界, 2016(10): 254-255.
HAN Zheng, WANG Lei, LIANG Bin. Discussion on the feasibility of shortening the time of containment test in nuclear power plant [J]. Science & Technology Vision, 2016(10): 254-255.
- [6] 张可, 朱华龙, 孟现阳, 等. 可燃性液体爆炸极限实验系统的研制 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(1): 21-24.
ZHANG Ke, ZHU Hualong, MENG Xianyang, et al. Development of the flammability limits measurement system for combustible vapors [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(1): 21-24.
- [7] ALBAHRI T A. Prediction of the lower flammability limit percent in air of pure compounds from their molecular structures [J]. Fire Safety Journal, 2013, 59: 188-201.
- [8] KONDO S, URANO Y, TOKUHASHI K, et al. Prediction of flammability of gases by using F-number analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 82(2): 113-128.
- [9] ROWLEY J R, ROWLEY R L, WILDING W V. Experimental determination and re-examination of the effect of initial temperature on the lower flammability limit of pure liquids [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2010, 55(9): 3063-3067.
- [10] CORONADO C J R, CARVALHO J A, Jr, ANDRADE J C, et al. Flammability limits: a review with emphasis on ethanol for aeronautical applications and description of the experimental procedure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 241/242: 32-54.
- [11] Chemstations Inc. ChemCAD software [CP]. Version 5.1. Houston, USA: Chemstations Inc., 2001.
- [12] FRENKEL M, CHIRICO R D, DIKY V V, et al. NIST ThermoData Engine: NIST standard reference database [DB]. Version 8.5. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2013.

(编辑 荆树蓉)

(上接第128页)

- [15] BHAGWAT A B, SRIDHARAN A. Numerical simulation of oblique air jet impingement on a heated flat plate [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2017, 9(1): 011017.
- [16] CHUANG S H, WEI C Y. Computations for a jet impinging obliquely on a flat surface [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1991, 12(7): 637-653.
- [17] 陈庆光, 徐忠, 吴玉林, 等. 平面倾斜冲击射流场的数值分析 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 237-239.
CHEN Qingguang, XU Zhong, WU Yulin, et al. Numerical analysis of a planar oblique impinging jet flow field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2): 237-239.
- xjtuxb201905015]
- 姚韵嘉, 祝培源, 陶志, 等. 间隙射流对端壁气膜冷却性能影响的实验研究 [J]. 2019, 53(3): 43-49. [doi:10.7652/xjtuxb201903007]
- 张垲垣, 李志刚, 宋立明, 等. 槽缝射流旋流比和密度比对涡轮端壁冷却和吸力面泛冷却性能的影响 [J]. 2018, 52(9): 95-101. [doi:10.7652/xjtuxb201809013]
- 宗潇, 刘浩, 杨赓石, 等. 高速蒸汽与过冷水直接接触凝结局部换热特性研究 [J]. 2018, 52(9): 134-139. [doi:10.7652/xjtuxb201809018]
- 宗潇, 刘继平, 杨赓石, 等. 矩形通道内蒸汽射流凝结换热面积的实验研究 [J]. 2018, 52(7): 46-51. [doi:10.7652/xjtuxb201807007]
- 陈喆, 吴九汇, 任阿丹, 等. 矩形喷嘴超声速射流啸叫模式切换的分布性研究 [J]. 2018, 52(5): 62-68. [doi:10.7652/xjtuxb201805009]
- 兰进, 徐亮, 马永浩, 等. 实验研究类螺纹孔旋流冲击射流的冷却特性 [J]. 2018, 52(1): 8-13. [doi:10.7652/xjtuxb201801002]

(编辑 荆树蓉)

[本刊相关文献链接]

- 黄华坤, 孙铁志, 尤天庆, 等. 考虑转换的 SST 模型在冲击射流传热中的应用 [J]. 2019, 53(5): 92-99. [doi:10.7652/xjtuxb201905013]
- 张蓓乐, 陈小砖, 薛绒, 等. 采用液氮喷雾技术的低温环路结构模拟系统研究 [J]. 2019, 53(5): 109-114. [doi:10.7652/