

典型高浓度过氧化氢激波及热刺激下的爆炸危险性研究

王军红¹, 徐飞扬¹, 罗一民¹, 马智勇¹, 吴星亮¹, 徐森^{1,2}

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 国家民用爆破器材质量监督检测中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 为研究推进剂级过氧化氢的爆炸危险性和浓度对过氧化氢危险性的影响, 对3种不同浓度(质量分数分别为91%、95%和98%)过氧化氢分别开展联合国隔板试验、克南试验以及包装单元间殉爆试验, 研究过氧化氢在冲击波刺激和封闭热刺激下的响应特性。结果表明: 在强冲击波(约20 GPa)直接作用下, 91%、95%和98%浓度过氧化氢对应的验证板穿孔孔径分别为68、74和76 mm, 过氧化氢均表现出了整体爆炸危险性, 且浓度越高, 传播爆轰的能力越强; 在相对弱激波(约2 GPa)刺激下, 3种浓度过氧化氢对应验证板均无穿孔情况, 表明起爆能力对过氧化氢的整体爆炸危险性具有决定性作用; 克南试验中随着过氧化氢浓度由91%、95%和98%依次增加, 发生爆炸的临界孔径依次为1.0、2.0和2.5 mm。两者间的一致性进一步佐证了高浓度过氧化氢潜在的整体爆炸风险。在殉爆试验中, 随着爆轰波强度的增加, 浓度为98%过氧化氢样品的反应剧烈程度虽然不断增强, 但仍呈现为负结果。

关键词: 过氧化氢; 爆炸危险性; 联合国隔板试验; 克南试验; 殉爆试验

中图分类号: TJ04; O69

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)05-0130-08

Study on explosion risk of typical high-concentration hydrogen peroxide under shock wave and thermal stimulation

WANG Junhong¹, XU Feiyang¹, LUO Yimin¹, MA Zhiyong¹, WU Xingliang¹, XU Sen^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, China;

2. China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials,

Nanjing 210094, China)

Abstract: To investigate the explosion risk of propellant-grade hydrogen peroxide and how various concentrations affect this hazard, hydrogen peroxide samples with mass concentrations of 91%, 95%, and 98% respond to shock wave and thermal stimulation under high containment were tested using UN

收稿日期: 2024-05-09 修回日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(12272184)

作者简介: 王军红(1998—), 男, 硕士, 研究领域为液体推进剂安全性。

通信作者: 徐森(1981—), 男, 教授, 研究领域为爆炸力学、含能材料爆轰、危险性分级。

引用格式: 王军红, 徐飞扬, 罗一民, 等. 典型高浓度过氧化氢激波及热刺激下的爆炸危险性研究[J]. 火箭推进, 2024, 50(5): 130-137.

WANG J H, XU F Y, LUO Y M, et al. Study on explosion risk of typical high-concentration hydrogen peroxide under shock wave and thermal stimulation[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(5): 130-137.

gap, koenen, and sympathetic detonation tests. The results show that under a strong shock wave impact of about 20 GPa, the perforation diameters in the verification plates are 68 mm, 74 mm and 76 mm for hydrogen peroxide concentrations of 91%, 95% and 98% respectively. All tested hydrogen peroxide concentrations exhibit overall explosive hazards, and the higher the concentration, the stronger the ability to propagation detonation. At a weaker shock wave stimulation (around 2 GPa), none of the hydrogen peroxide concentrations caused perforation in the verification plates, suggesting that initiation capacity is critical to the compound's explosivity. During the Koenen test, an increase in the critical explosion diameter, which was measured at 1.0 mm, 2.0 mm and 2.5 mm, respectively, corresponding to the hydrogen peroxide concentrations rising from 91% to 95%, and finally to 98% was observed. Consistent findings across both tests underscore the significant explosion risk associated with high-concentration hydrogen peroxide. The sympathetic detonation test reveals that with increasing detonation wave intensity, the reactivity of the 98% hydrogen peroxide sample heightens despite a negative outcome.

Keywords: hydrogen peroxide; explosion risk; UN gap test; Koenen test; sympathetic detonation test

0 引言

可常温储存液体推进剂^[1]以其高比冲、低点火延迟等优势,是当今液体推进系统的主流选择。随着液体推进剂的发展,绿色推进剂是未来发展的必然要求。过氧化氢作为可常温存储的绿色无污染推进剂的典型代表^[2],具有液相区宽、流动性强、低饱和气压、无毒、环保性好、密度比冲高、比热高、可自分解、可自燃、可常温贮存和易维护使用等^[3-4]一系列优点。国内外通常将质量分数 70% 以上稳定型的过氧化氢作为液体推进剂使用,广泛应用于鱼雷、导弹和火箭动力系统等^[5-6]。由于过氧化氢中过氧键(-O-O-)的不稳定性^[7],其在高温(甚至常温)下存在剧烈放热失控的风险^[8-9],加剧了潜在的应用风险,与之匹配的危险性量化研究将直接关乎其未来应用前景。

目前,对于过氧化氢危险性分级,联合国《关于危险货物运输的建议书试验和标准手册》第七版^[10]中将质量分数大于 60% 的过氧化氢划分为 5.1 项(氧化剂),附属项为第八类(腐蚀性物质)。然而,其自身高反应活性所带来的潜在爆炸风险却被忽视。比如 2016 年江西樟树一厂违规回收不合格氧化工作液导致质量分数为 50% 过氧化氢发生爆炸造成三死一伤^[11],2023 年山东聊城一厂将质量分数为 70% 过氧化氢转移至未完全清理的工作液配置釜时发生爆炸造成九死一伤^[12]。可以明显看出,当过氧化氢质量分数在 50% 左右时,存在明显的意外爆炸风险,而过氧化氢作为液体推进剂时,质量

分数高达 70% 以上,发生意外的风险和严重程度将更大。大量研究已经证实,过氧化氢的热分解始于过氧键的断裂,反应首先生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$),后 $\cdot\text{OH}$ 参与二级反应生成大量的热并转化为水^[13-14]。水作为过氧化氢的分解产物,不仅可以推动分解平衡左移,吸收产生的热量,抑制其分解;水自身作为稀释剂,还可以进一步降低体系中自由基浓度,继而降低其反应活性。Chen 等^[15]研究表明,随着 H_2O_2 质量分数由 10% 提升至 45%,反应放热量由 192 J/g 提升至 1 079 J/g,分解起始温度也由 68 °C 下降至 43 °C。相似的规律在液体推进体系中同样存在,Pourpoint 等^[16]的结果表明,随着过氧化氢质量分数从 94% 增至 98% (92% 点火不稳定),燃料与火箭级过氧化氢推进剂点火延迟迅速减少,这可归因于体系中自由基含量的增多和传热性能的变化。

显然,对于过氧化氢的反应机理、基础安全特性和应用已有大量研究^[17-19],作为清洁能源在未来必然有很大的研究空间。然而大多研究都倾向于过氧化氢的应用研究,忽略了过氧化氢自身存在的爆炸危险性,尤其针对推进剂级的高浓度过氧化氢的爆炸危险性研究仍然存在空白,大量实践性验证工作仍等待补充。

综上所述,为了进一步量化过氧化氢体系的应用安全性,本研究以质量分数依次为 91%、95% 和 98% 的 3 种过氧化氢水溶液为研究对象,基于联合国(UN)隔板试验、克南试验和殉爆试验,分别讨论其在激波荷载、高度封闭下的持续高热和包装单元间相互爆炸 3 种刺激下的响应行为,旨在获得其在

冲击波、热等外界刺激下的安全特性,以期为过氧化氢用于推进剂使用在生产运输使用过程中的输送管道合理设计、泄压装置尺寸、样品安全存放间隔距离等提供一定的科学参考依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验样品

3 种浓度过氧化氢水溶液由中国科学院大连化学物理研究所提供,样品浓度及基础参数^[5]如表 1 所示。

表 1 不同浓度过氧化氢试验样品及基础参数信息

Tab. 1 Information on different concentrations of hydrogen peroxide experimental samples and basic parameters

样品编号	样品质量分数/%	熔点/℃	沸点/℃
1	91	-11.65	140.85
2	95	-5.25	145.85
3	98	-2.65	148.85

1.2 试验方法及条件

1.2.1 UN 隔板试验

冲击波感度是判断样品传播爆轰能力的重要参量,用以量化样品对于冲击波的敏感程度^[20-21]。依据《关于危险货物运输的建议书试验和标准手册》第七版中关于爆炸品的分级程序和试验方法,基于 UN 隔板试验对过氧化氢样品进行冲击波效应研究,试验布置如图 1 所示。试验后若样品管完全破碎或验证板明显穿孔,则样品具有整体爆炸危险性,记为“+”结果,反之为“-”。

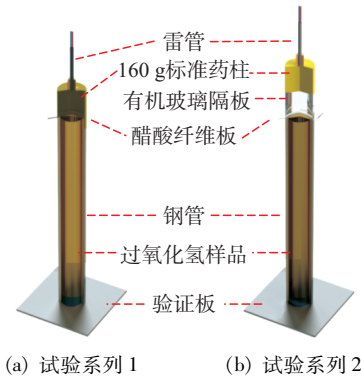


图 1 UN 隔板试验布置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the test layout for the UN gap

图 1 中,验证板、316 无缝钢管、标准药柱、传爆药柱和雷管由下往上依次放置于 3 mm 厚的不锈钢验证板上。为避免样品管杂质对试验造成影响,试验样品钢管先用稀盐酸除去样品管表面杂质,后用质量分数为 60% 过氧化氢浸泡 2 h,再用水和丙酮反复清洗残留,最后放入 60 ℃ 烘箱中烘干备用。过氧化氢样品置于样品管中,其液面与无缝钢管顶部平齐。使用厚为 0.19 mm 的醋酸纤维素板将过氧化氢与标准药柱隔绝,以防二者间发生反应。特别地,在实验系列 2 中,样品和标准药柱间由厚度为 50 mm 的有机玻璃隔板相隔,以衡量样品在较弱冲击波刺激下的响应特性。顶部的雷管由雷管座固定于传爆药柱表面,并由胶带固定使其接触紧密。

1.2.2 克南试验

基于克南试验分析样品在封闭条件下的热敏感度,通过改变顶部排气孔直径以调节样品的封闭性^[22]。根据样品发生爆炸的临界孔径量化判断爆炸危险等级,具体试验结构如图 2 所示。试验后观察样品管的破裂情况,若样品管破裂为 3 大块或许多小碎片,则样品具有整体爆炸危险性,记录为“+”结果,反之为“-”,实验中同一孔板连续 3 次试验结果为“-”则试验结束。

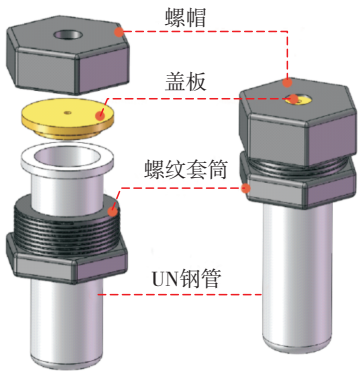


图 2 克南试验中样品管示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sample tube in Koenen test

图 2 中,从上到下依次为螺帽、盖板、螺纹套筒和钢管。试验中装样至离钢管口 1 cm 处(清理残留在管口样品),后将样品管从上端套入螺纹套内,压上适当的孔板并用台钳将螺帽拧紧,固定放置在克南试验燃烧台上,用丙烷气加热至样品完全反应或持续加热 5 min 以上。考虑到过氧化氢的反应活

性,克南试验样品钢管先用稀盐酸除去样品管表面铁锈等杂质,再用水和丙酮反复清洗残留的杂质,最后放入 60 ℃烘箱中烘干备用。

1.2.3 殉爆试验

基于殉爆试验分析包件间的殉爆安全性,通过调节样品与主发弹的摆放方以调节殉爆等级^[23]。根据被发样品的反应情况及验证板变形程度,从而确定样品安全存放距离、库房安全距离的设定等。考虑起爆位置对试验结果的影响,从两样品连线 0°、90°以及 135°这 3 个角度起爆,试验布置如图 3 所示。试验后观察验证板情况,若被发样品下验证板破裂,则过氧化氢具有殉爆特性,反之则过氧化氢不具备殉爆特性。

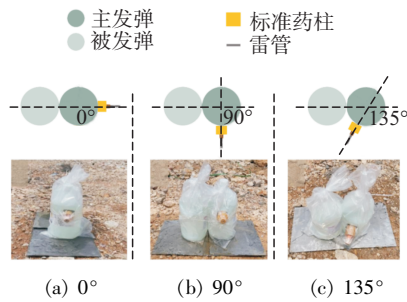


图 3 殉爆试验不同摆放位置试验布置及示意图

Fig.3 Experimental layout and schematic diagram of different placement positions for sympathetic detonation test

2 试验结果与分析

2.1 UN 隔板试验

图 4 为 3 种过氧化氢样品在 UN 隔板试验后的响应结果。在隔板系列 1 下,试验后所有样品的验证板均明显穿孔,切面圆滑,无缝钢管完全破碎,证实了过氧化氢样品对爆轰的传递作用。随着过氧化氢质量分数由 91% 增至 98%,样品爆轰程度不断加剧,验证板穿孔孔径依次由 68 mm 增至 76 mm,说明随着质量分数的逐渐提高,过氧化氢传播爆轰的能力增强。隔板系列 2 结果证实,随着有机隔板的引入,传递至样品的冲击波强度迅速衰减,3 种过氧化氢样品均由系列 1 的“+”转为“-”结果。试验后的钢管及验证板均轻微形变,结果显示响应程度的明显下降。试验表明爆轰波的超压大小对于过氧化氢传播爆轰有决定性作用。

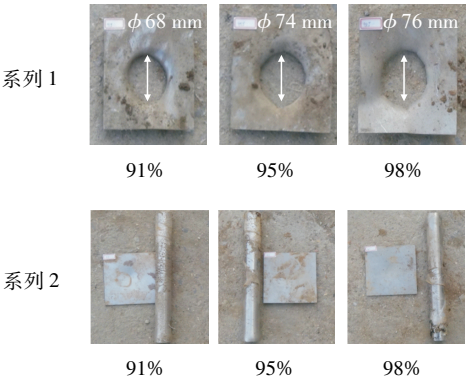


图 4 UN 隔板试验结果图

Fig.4 Test results of the UN gap

表 2 详细记录了 3 种过氧化氢样品在 UN 隔板系试验下的结果和具体数值。

表 2 UN 隔板系列试验结果

Tab.2 Results of UN gap test

试验名称	样品质量分数/%	试验现象	试验结果
UN 隔板系列 1	91	验证板穿孔,形成直径约为 68 mm 的圆孔,钢管完全破裂	+
	95	验证板穿孔,形成直径约为 74 mm 的圆孔,钢管完全破裂	+
	98	验证板穿孔,形成直径约为 76 mm 的圆孔,钢管完全破裂	+
UN 隔板系列 2	91		-
	95	验证板及钢管均产生微小形变	-
	98		-

UN 隔板系列 1 和系列 2 间的差异性已经证实,91% ~98% 质量分数的过氧化氢溶液虽然对冲击波并不敏感,但仍具有一定的传播爆轰的能力。文献^[24]表明,在 UN 隔板系列 1 和系列 2 中,试验测得标准药柱爆轰产生的冲击波在样品面上形成的冲压力分别约为 20 GPa 和 2 GPa。随着冲击波强度衰减,91% ~98% 质量分数的过氧化氢响应程度同步降低。González 等^[25]研究表明,过氧化氢中存在氢键,过氧化氢既可以是氢键的供体又可以是氢键的受体,因此过氧化氢中会形成笼状稳定结构;但过氧键稳定性较差,容易发生断裂。基于此分析认为,过氧化氢中由于过氧键键能较小,容易发生断

裂,当积累的能量使大量过氧键断裂时,就容易导致反应失控发生爆炸事故。但是由于过氧化氢中存在氢键,在反应中相同浓度过氧化氢中氢键消耗的能量保持不变,因此在弱刺激下提供的能量大部分被氢键消耗,最终导致过氧化氢的反应剧烈程度大幅度下降。因此,在实际生产和储运过程中,要合理设计样品间的储存距离以及反应釜间的防护结构,控制样品出现局部高浓度的情况,能有效控制过氧化氢的反应等级,防止爆轰的传播。

2.2 克南试验

3 种浓度过氧化氢克南试验结果汇总于表 3 中。

表 3 克南试验结果

Tab.3 Summary of the Koenen test results

样品质量分数/%	孔径/mm	试验结果	极限直径/mm
91	2.5	-	1.0
	2.0	-	
	1.5	-	
	1.0	+	
95	2.5	-	2.0
	2.0	+	
98	5.0	-	2.5
	3.0	-	
	2.5	+	
	2.0	+	

克南试验结果表明,91% ~98% 质量分数的过氧化氢溶液在封闭条件下均对持续高热呈现出敏感性。随着过氧化氢质量分数从 91%、95% 到 98%,发生反应等级为“+”的临界孔径同步增长由 1.0 mm、2.0 mm 到 2.5 mm,呈现出良好的对应关系。当孔径恒定为 2.0 mm 时,过氧化氢样品在克南试验中的反应进程如图 5 所示。录像系统详细记录了过氧化氢样品在克南试验中的反应进程,具体如图 5 所示。随着克南管被火焰迅速包裹,样品逐步受热并沸腾。大量样品被抛洒至管外,伴随剧烈的热分解,生成明显的火光。其中,91%、95% 和 98% 质量分数的过氧化氢分别于加热 31、33 和 30 s 后受热引燃,呈现出高度的相似性,这可归因于完全相同的加热条件和样品间高度接近的沸点。文献[26-27]和 Scatchard 等^[27]的试验结果均证实,

90% 质量分数的过氧化氢水溶液与纯过氧化氢沸点分别为 145.9 ℃ 和 150.5 ℃,平均偏差约为 3%,呈现出高度的相似性。随着火焰持续作用,91% 质量分数的过氧化氢溶液始终保持燃烧状态,克南管始终保持完好;相比之下,95% 和 98% 质量分数的过氧化氢相继于 15 s 和 3 s 后爆炸,伴随明显的火球,试验后管体完全破碎,进一步证实了爆炸的发生,具体如图 5 所示。

随着过氧化氢质量分数的增加,样品在高热条件下将趋于更剧烈的响应程度,响应延迟时间也有所缩短。依据王犇等^[28]的试验数据和结论,随着质量分数从 27.5% 增至 70%,最大放热量由 550 J/g 成倍增加至 1 600 J/g。因此,在克南试验中随着质量分数从 91% 增加至 98%,表现为受热引燃的时间相近,但是反应剧烈程度迅速增加。因为随着质量分数从 91% 增加至 98%,依据勒夏特列原理和卢瑟福定律,反应物浓度升高会使反应平衡右移且反应速率加快,致使反应剧烈程度增加。

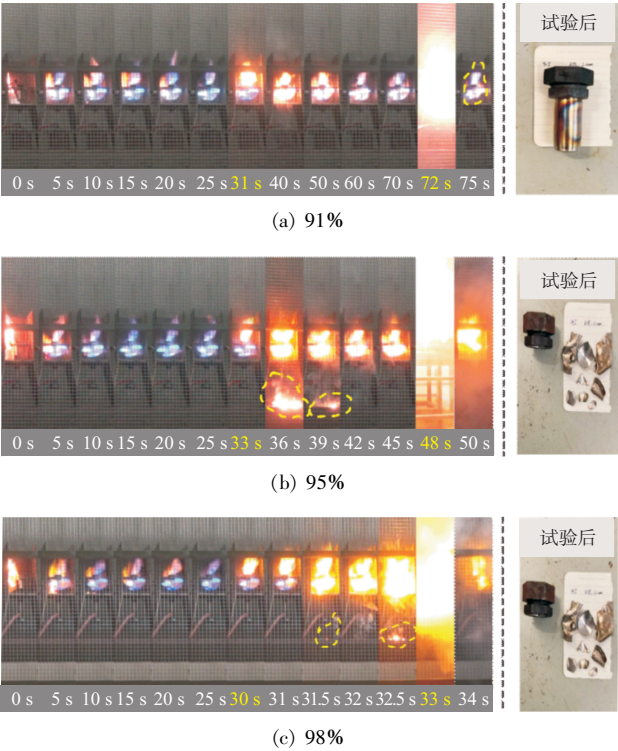


图 5 不同质量分数过氧化氢样品在克南试验中 2.0 mm 孔径下的反应进程及结果图

Fig.5 Reaction process and results of hydrogen peroxide samples with different mass concentrations in the Koenen test with 2.0 mm aperture

克南试验结果已经证实,91%~98%质量分数的过氧化氢水溶液在封闭条件下对于持续高热作用非常敏感。随着含水量的升高,发生爆炸的临界孔径不断增加。克南试验与隔板试验结果间的一致性表明,水(H_2O)作为缓释组分,能有效降低其潜在的燃爆风险。因此,在过氧化氢生产储运中,设计泄压面积大小时必须考虑过氧化氢的浓度,并实时检测过氧化氢浓度和罐内温度变化,使反应温度控制在安全温度范围内,才能避免事故发生。

2.3 殉爆试验

依据 UN 隔板试验结果分析,过氧化氢冲击起爆感度较高且 98% 质量分数的样品反应剧烈程度最高,因此包件间殉爆试验选取 98% 质量分数的样品进行试验。98% 过氧化氢包装单元间无间距不同起爆位置殉爆试验结果如图 6 所示。

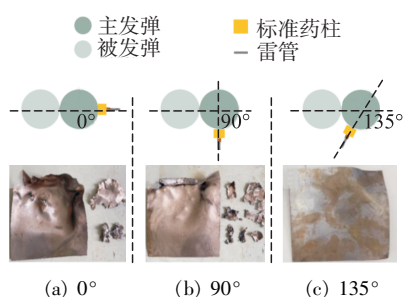


图 6 98% 质量分数过氧化氢包装单元间殉爆试验示意图及试验结果图

Fig. 6 Explosion test diagram and the test results of hydrogen peroxide packaging unit with 98% mass concentration

包装单元间无间距的殉爆试验中,主发样品从 3 个角度起爆后,3 次试验均是主发样品验证板完全破碎,被发样品验证板发生变形。试验结果表明 3 次试验中主发样品均发生爆轰反应,被发样品 0°、90°以及 135°这 3 种起爆角度验证板变形程度依次减弱,夹角为 0°时被发样品反应等级接近爆炸。分析试验过程,造成这种差异的原因是主发样品起爆后为不定常爆轰,样品起爆后有一定的爆轰波增长过程^[29-30],因为从 0°到 135°,起爆位置与被发样品距离减小,样品在最大距离时还未达到稳定爆轰,在 90°和 135°时主发样品还在爆轰波增长阶段,导致作用在被发样品的冲击波强度较弱,样品反应的剧烈程度降低。

包装单元间的殉爆试验证明,98% 质量分数的

过氧化氢在殉爆试验中被发样品均为爆燃及以下。分析试验结果,随着起爆角度的改变,导致起爆点距离被发样品变近,使冲击波提前作用在被发样品上,但由于过氧化氢起爆过程存在冲击波成长过程,这使得作用在被发样品上的冲击波强度降低,反应程度减弱。这也说明过氧化氢的对冲击波感度不敏感,不易被冲击起爆,也与隔板试验结果相对应。包装单元间无间距的殉爆试验表明,在爆炸品储运过程中,为降低发生危险等级,应尽量避免大量爆炸品连续放置。试验结果为高浓度过氧化氢的安全运输和储存提供了一定的试验数据,能够为仓库安全距离的设定,运输过程中的堆放方式提供了参考。

3 结论

1) 在 UN 隔板试验中,质量分数分别为 91%、95% 和 98% 的过氧化氢,在强冲击波(约为 20 GPa)下,验证板穿孔直径依次为 68 mm、74 mm 和 76 mm,说明过氧化氢整体爆炸危险性与浓度(质量分数)呈正相关;在较弱激波载荷(约为 2 GPa)下,3 种浓度过氧化氢试验后验证板均只发生轻微变形,表明激波强度对于过氧化氢的冲击起爆有决定性因素。

2) 克南试验已经证实,高热作用是诱发过氧化氢剧烈响应的重要因素。91%、95% 和 98% 质量分数的过氧化氢水溶液,3 种质量分数过氧化氢的临界起爆直径分别为 1.0、2.0 以及 2.5 mm。结果表明, H_2O 作为缓释组分,随着水含量的增加,过氧化氢在封闭条件下的临界爆炸直径也随着增大。

3) 98% 质量分数的过氧化氢单个包件内的爆轰无法殉爆其他过氧化氢样品,但随着主发样品爆轰波的增长,被发样品反应剧烈程度明显加剧。这与 UN 隔板试验结果保持一致,归因于内部较强的氢键,氢键的断裂会消耗能量,使激波起爆需要更大的能量。

4) 高浓度过氧化氢能够传播爆轰,但是对爆炸冲击波不敏感。在危险性分类中,高质量分数过氧化氢应该考虑归为第一类(爆炸品)。

参考文献

[1] 贺芳,方涛,李亚裕,等. 新型绿色液体推进剂研究

- 进展[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 54-57.
- HE F, FANG T, LI Y Y, et al. Development of green liquid propellants [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(4): 54-57.
- [2] 单继宏, 王晓东, 张涛. 常温绿色过氧化氢动力技术现状及发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(6): 667-673.
- SHAN J H, WANG X D, ZHANG T. Current state and development trend of non-cryogenic green hydrogen peroxide power technology [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(6): 667-673.
- [3] 王镜淇, 王成刚, 陈雪娇, 等. RBCC 组合动力用液体推进剂研究进展[J]. 火箭推进, 2022, 48(6): 101-112.
- WANG J Q, WANG C G, CHEN X J, et al. Research progress of liquid propellant development for RBCC engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(6): 101-112.
- [4] 李越, 刘龙, 贾永高, 等. 基于 H_2O_2 的自燃离子液体研究进展[J]. 化学研究, 2023, 34(1): 1-13.
- LI Y, LIU L, JIA Y G, et al. Research progress of hypergolic ionic liquids based on hydrogen peroxide [J]. Chemical Research, 2023, 34(1): 1-13.
- [5] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- LI Y Y. Liquid propellant [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2011.
- [6] CONNELL T L Jr, RISHA G A, YETTER R A, et al. Investigation of gel hydrocarbon fuels and hydrogen peroxide as a hypergolic bipropellant [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2018, 17(1): 57-73.
- [7] 王贵领, 兰剑, 曹殿学, 等. 直接 $NaBH_4/H_2O_2$ 燃料电池的研究进展[J]. 化工学报, 2008, 59(4): 805-813.
- WANG G L, LAN J, CAO D X, et al. Recent advance in research on direct $NaBH_4/H_2O_2$ fuel cells [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(4): 805-813.
- [8] 喻健良, 王培昕, 闫兴清, 等. 双氧水分解反应放热失控特性及失控判据[J]. 化学工程, 2014, 42(6): 54-57.
- YU J L, WANG P X, YAN X Q, et al. Characteristics and criterion of hydrogen peroxide decomposition runaway reaction [J]. Chemical Engineering, 2014, 42(6): 54-57.
- [9] 李祥茜, 李翠清, 王如君, 等. 30% 双氧水的热稳定性分析[J]. 化学与粘合, 2019, 41(4): 240-243.
- LI X X, LI C Q, WANG R J, et al. Analysis of thermal stability of 30% hydrogen peroxide [J]. Chemistry and Adhesion, 2019, 41(4): 240-243.
- [10] UN. Recommendations on the transport of dangerous goods, manual tests and criteria[S]. New York: United Nations Publication, 2019.
- [11] 李志红. 过氧化氢生产工艺危险性分析及防控措施研究[J]. 石油化工安全环保技术, 2021, 37(4): 40-44.
- LI Z H. Hazard analysis of hydrogen peroxide production process and research on prevention and control measures [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2021, 37(4): 40-44.
- [12] 刘嘴, 薛飞飞. 过氧化氢储存系统的设计要点[J]. 中华纸业, 2022, 43(6): 24-27.
- LIU H, XUE F F. Key points in design for hydrogen peroxide storage system [J]. China Pulp & Paper Industry, 2022, 43(6): 24-27.
- [13] 吴洪达, 黄映恒. 过氧化氢的分解反应[J]. 河池师专学报(自然科学版), 2002, 22(2): 27-30.
- WU H D, HUANG Y H. The research progress in the studies of the hydrogen peroxide decomposition [J]. Journal of Hechi Normal College, 2002, 22(2): 27-30.
- [14] PATERNINA E, ARIAS J M, BARRAGÁN D. Estudio cinético de la descomposición catalizada de peróxido de hidrógeno sobre carbón activado [J]. Química Nova, 2009, 32(4): 934-938.
- [15] CHEN K Y, LIN C M, SHU C M, et al. Anevaluation on thermokinetic parameters for hydrogen peroxide at various concentrationsby DSC [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2006, 85(1): 87-89.
- [16] POURPOINT T L, ANDERSON W E. Hypergolic reaction mechanisms of catalytically promoted fuels with rocket grade hydrogen peroxide [J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(10): 2107-2133.
- [17] 杨伯涵, 袁华, 张运刚, 等. 自由基含量对 H_2O_2 复合固体推进剂贮存稳定性的影响[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(2): 209-213.
- YANG B H, YUAN H, ZHANG Y G, et al. Effect of radical concentration on the storage property of hydrogen peroxide solid propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(2): 209-213.

- [18] RANG S, JEONG J, KHANDU BHOSALE V, et al. Reactivity of hypergolic hybrid solid fuel with industrial grade hydrogen peroxide [J]. *Fuel*, 2022, 330: 125543.
- [19] ZHANG D W, YU D H, YUAN Y M, et al. Hypergolic ignition induced by head-on collision of bi-propellant droplets: Monoethanolamine-based fuel and hydrogen peroxide [J]. *Fuel*, 2023, 342: 127788.
- [20] 张全, 张宏哲, 徐森, 等. 硝酸铵溶液的爆炸危险性 & 储运安全条件研究[J]. *爆破器材*, 2023, 52(3): 10-15.
- ZHANG Q, ZHANG H Z, XU S, et al. Study on explosion risk and safety conditions of storage and transportation of ammonium nitrate solution [J]. *Explosive Materials*, 2023, 52(3): 10-15.
- [21] 徐飞扬, 姚亚东, 吴星亮, 等. 制式包装设计压力对无水肼液体推进剂危险等级分类影响试验[J]. *含能材料*, 2022, 30(11): 1099-1105.
- XU F Y, YAO Y D, WU X L, et al. Experimental study on the influence of standard packaging design pressure on the hazard classification of anhydrous hydrazine liquid propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(11): 1099-1105.
- [22] TAN L, LIU D B, WU Q J, et al. Effect of potassium chloride on the detonation performance and thermal stability of ammonium nitrate [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(6): 520-528.
- [23] 李兴隆, 吴奎先, 路中华, 等. 叠层复合装药殉爆安全性试验及数值模拟[J]. *含能材料*, 2022, 30(3): 204-213.
- LI X L, WU K X, LU Z H, et al. Sympathetic detonation test and simulation of laminated composite charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(3): 204-213.
- [24] 徐森. 爆炸品危险性分级程序改进及典型试验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- XU S. Study on improvement of explosive hazard classification procedure and typical test method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [25] GONZÁLEZ L, OTILIA M, YÁÑEZ M. High-level ab initio versus DFT calculations on $(\text{H}_2\text{O}_2)_2$ and $\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ complexes as prototypes of multiple hydrogen bond systems [J]. *Journal of Computational Chemistry*, 1997, 18(9): 1124-1135.
- [26] GIGUÈRE P A, MAASS O. Vapour pressures and boiling points of binary mixtures of hydrogen peroxide and water [J]. *Canadian Journal of Research*, 1940, 18(7): 181-193.
- [27] SCATCHARD G, KAVANAGH G M, TICKNOR L B. Vapor-liquid equilibrium. VIII. hydrogen peroxide—water Mixtures I [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1952, 74(15): 3715-3720.
- [28] 王犇, 马翔, 张淑娟, 等. 过氧化氢危险性分析[J]. *无机盐工业*, 2013, 45(3): 15-18.
- WANG B, MA X, ZHANG S J, et al. Analysis on thermal risk of hydrogen peroxide [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2013, 45(3): 15-18.
- [29] 朱红兵, 卢文波, 吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5): 986-990.
- ZHU H B, LU W B, WU L. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 986-990.
- [30] 郭洪卫, 张浩宇, 李晓刚, 等. 一种反射增强型起爆结构的数值模拟研究[J]. *火工品*, 2021(5): 19-23.
- GUO H W, ZHANG H Y, LI X G, et al. Numerical study of a reflection-enhanced initiation structure [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021(5): 19-23.