

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.002

# 空气中氮气或氩气浓度对锆粉尘层着火温度的影响<sup>\*</sup>

毛  立<sup>①</sup>  周星宇<sup>②</sup>  唐双凌<sup>②</sup>  黄寅生<sup>①</sup>  杨欣静<sup>③</sup>  宋晓鹏<sup>③</sup>  马健行<sup>①</sup>

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②南京理工大学环境与生物工程学院(江苏南京,210094)

③中国核电工程有限公司(北京,100840)

[摘  要]  为了探索抑制锆包壳剪切过程中锆粉着火的方法,采用粉尘层最低着火温度测定仪、红外热成像仪、真空手套箱等测定了不同粒径的锆粉尘层在空气和含不同浓度氮气、氩气的空气中的最低着火温度和火焰温度。结果得出:锆粉的中位粒径从2.4 μm升至71.7 μm,粉尘层最低着火温度从200 ℃升至390 ℃,表明粒径越小的锆粉着火敏感性越高;4种粒径的锆粉燃烧火焰最高温度都在1 776~1 913 ℃范围内,锆粉粒径较大时,燃烧的剧烈程度较低;氮气或氩气体积分数从60%~65%升至70%~85%时,锆粉尘层最低着火温度升至400 ℃,表明空气中高浓度的氮气或氩气对锆粉燃烧有抑制作用,且浓度越高,抑制作用越强,锆粉粒径越小,抑制效果越好。氩气的抑制效果强于氮气。

[关键词]  锆粉;粉尘层;着火温度;空气;氮气;氩气

[分类号]  O381;X932

## Effect of Nitrogen or Argon Concentration in Air on Ignition Temperature of Zirconium Dust Layer

MAO Li<sup>①</sup>, ZHOU Xingyu<sup>②</sup>, TANG Shuangling<sup>②</sup>, HUANG Yinsheng<sup>①</sup>, YANG Xinjing<sup>③</sup>,  
SONG Xiaopeng<sup>③</sup>, MA Jianxing<sup>①</sup>

①School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology  
(Jiangsu Nanjing, 210094)

②School of Environmental and Biological Engineering, Nanjing University of Science and Technology  
(Jiangsu Nanjing, 210094)

③China Nuclear Power Engineering Co., Ltd. (Beijing, 100840)

[ABSTRACT]  In order to explore the method of suppressing the ignition of zirconium powder in the shearing process of zirconium cladding, the minimum ignition temperature and flame temperature of zirconium dust layer with different particle sizes in air and air containing different concentrations of nitrogen and argon were measured by dust layer minimum ignition temperature tester, infrared thermal imager and vacuum glove box. Results show that when the median particle size of zirconium powder increases from 2.4 μm to 71.7 μm, the minimum ignition temperature of dust layer increases from 200 ℃ to 390 ℃, indicating that the smaller the particle size of zirconium powder is, the higher the ignition sensitivity is. The maximum combustion flame temperature of the four kinds of zirconium powder is in the range of 1 776~1 913 ℃, and the intensity of combustion is lower when the size of zirconium powder is larger. When the volume fraction of nitrogen and argon increases from 60%~65% to 70%~85%, the minimum ignition temperature of the zirconium dust layer rises to 400 ℃. It shows that high concentrations of nitrogen and argon have inhibition effect on the combustion of zirconium powder. The higher the concentration, the stronger the inhibition effect, and the smaller the size of zirconium powder, the better the inhibition effect. The inhibition effect of argon is stronger than that of nitrogen.

[KEYWORDS]  zirconium powder; dust layer; ignition temperature; air; nitrogen; argon

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-01-05  
基金项目:乏燃料后处理专项(1181020307)  
第一作者:毛立(1997-),男,硕士研究生,主要从事粉尘爆炸的研究。E-mail:18234183803@163.com  
通信作者:唐双凌(1971-),男,副研究员,硕导,主要从事辐射防护与环境保护研究。E-mail:tshling@163.com  
黄寅生(1962-),男,教授,博导,主要从事军事化学与烟火技术研究。E-mail:huangyinsheng@sina.com

引言

锆 Zr 是一种银灰色金属,粉末为黑色,原子序数为 40,相对原子质量为 91<sup>[1]</sup>。锆具有优秀的工艺特性和抗腐蚀性能<sup>[2]</sup>。除此之外,锆合金具有耐高温水蒸气腐蚀、导热率高、热中子吸收截面小等适合作为核燃料棒包壳的性质<sup>[3]</sup>。

锆材由于具有各种优点,被广泛应用于兵器制造、航空航天以及核电等领域中<sup>[4]</sup>。其中,核电对锆的需求巨大。在核电乏燃料后处理过程中,需要对乏燃料的锆合金外壳进行切割而使其中的铀、钚等核材料裸露。剪切操作中,刀具与包壳的摩擦过程会产生细毛边,容易在剪切中产生锆粉,并在剪切机的角落积累。作为可燃性粉尘,在密闭空间中,锆粉浓度上升到一定程度,有可能会被剪切机切断时产生的火花引爆。粉尘爆炸的反应时间短,并伴随大量放热,形成局部的高温、高压,破坏力极强<sup>[5]</sup>。国外出现过堆积的锆材燃烧爆炸的事故<sup>[6]</sup>。乏燃料后处理的过程涉及具有强放射性的多种核素,若产生锆粉燃烧爆炸,释放出的烟雾和微粒可能含有大量放射性核素。在锆粉燃烧的高温下,某些放射性核素会大量挥发,对环境产生严重的污染。为有效防控锆粉燃烧爆炸事故,研究锆粉的燃爆特性以及燃烧爆炸抑制方法非常必要。

关于锆燃烧爆炸已经进行了很多研究。邓军等<sup>[7]</sup>利用 20 L 爆炸球对锆粉的爆炸参数进行了测试,得到了点火能量及浓度与爆炸强度的关系。Ewalda 等<sup>[8]</sup>将锆粉在氧气氛围下进行燃烧实验,发现气体压强越高,锆粉燃烧温度越高。Badiola 等<sup>[9]</sup>实验得出,锆粉的均匀燃烧温度和绝热燃烧火焰温度基本一致,且颗粒燃烧温度与粒径关系不大。丁以斌等<sup>[10-11]</sup>研究了锆粉尘云的燃烧火焰特性,发现火焰传播速度与锆粉浓度呈正相关,锆粉浓度增加,预热区厚度先减小后增加,最大达到 2.52 cm。Cao 等<sup>[12]</sup>采用哈特曼管以及 G-G 炉研究了锆粉尘云的着火敏感性以及火焰传播特性。苏浩等<sup>[13]</sup>采用哈特曼管对锆粉尘云的最小点火能量及最低着火温度进行了研究,得到了锆粉浓度、点火延时及喷粉压力与最小点火能的关系。还有很多学者对锆燃烧爆炸进行了相关研究<sup>[14-20]</sup>。

前人的研究主要为以下几点:锆粉在空气中的点燃过程、爆炸特性参数、在氧气中的燃烧、敏感性参数、火焰传播过程。研究的重点主要在于锆粉的爆炸特性,对于锆粉的燃烧特性,特别是氮气、氩气

对锆粉的燃烧特性参数的影响缺乏进一步的研究。本文中,主要研究了不同粒径的锆粉在空气中的粉尘层最低着火温度和燃烧火焰温度,以及锆粉的粉尘层最低着火温度与空气中氮气、氩气浓度的关系,探索了使用氮气、氩气抑制锆包壳剪切过程中锆粉发生燃烧的可能性。

1 实验

1.1 实验材料

所用的锆粉纯度 >99.9%,有 5 种规格,中位粒径  $D_{50}$  分别为 2.4、7.3、29.1、71.7、209.9  $\mu\text{m}$ 。

由于锆粉较为敏感,采用水封的方法储存。实验前需要将锆粉进行烘干,避免含水量对实验结果产生影响。将 5 种锆粉样品放入恒温真空干燥箱中烘干,温度设置 60  $^{\circ}\text{C}$ ,真空度保持在  $-0.09\text{ MPa}$ ,烘干时间为 24 h。干燥过程中,每隔 6 h 将烘箱内水蒸气擦干。烘干后,粒径较小的锆粉呈深灰色粉末状,粒径较大的锆粉表面有金属光泽,如图 1 所示。

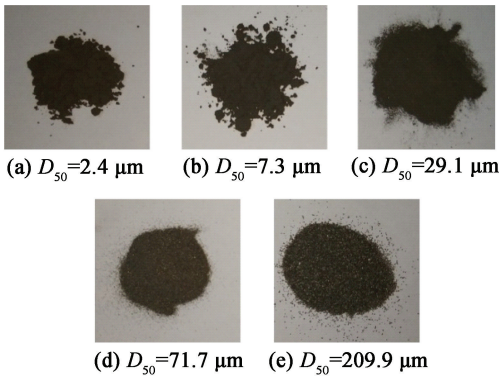


图 1 锆粉样品

Fig. 1 Zirconium powder samples

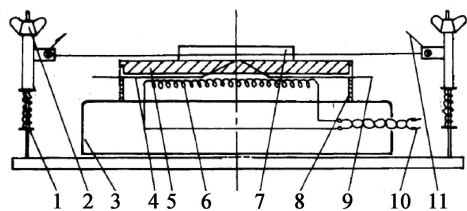
1.2 实验设备

使用 Bettersize2600 型激光粒度分析仪(丹东百特仪器有限公司)对 5 种锆粉颗粒进行粒度分析。

使用 DZ6090 型恒温真空干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)对锆粉进行烘干处理。

根据国际标准 IEC 1241—2—1—1994 和国家标准 GB/T 16430—2018<sup>[21]</sup>测试锆粉尘层最低着火温度。测定设备为 LIT-1-450 型粉尘层最低着火温度测定仪(图 2)。该设备主要由控温系统和加热板组成,通过加热板上的热电偶测定实验过程中粉尘内部的温度。加热板理论最高加热温度为 450  $^{\circ}\text{C}$ 。

锆粉尘层燃烧温度测定采用德国 DIAS Infrared GmbH 公司生产的 PYROVIEW 512N 型短波高温红



1 - 弹簧;2 - 热电偶高度调节旋钮;3 - 加热器底座;  
4 - 表面记录热电偶;5 - 热表面;6 - 加热器;7 金属环;  
8 - 裙边;9 - 热表面控制热电偶;10 - 加热器引出线;  
11 - 粉尘层热电偶。

图 2  锆粉尘层最低着火温度测定仪示意图

Fig. 2  Schematic diagram of the dust layer  
minimum ignition temperature tester

外热成像仪系统。主要对粉尘层燃烧进行温度测量并记录,观测粉尘层燃烧火焰温度的变化情况。

不同浓度氮气、氩气的空气中,锆粉尘层最低着火点测定实验在 JMS-2 型真空手套箱内进行。主要由箱体(钢化玻璃、乳胶手套等)、LED 灯、集成抽、充气管道组成,同时配有真空泵、空气压缩机以及氮气瓶、氩气瓶等辅助设备。

1.3 实验方法

粉尘层最低着火温度测定时,一般从高温往下测定。当加热板温度达 400 ℃时粉尘层还未有燃烧现象,则实验结束。当设定温度 > 300 ℃时粉尘燃烧,则降低 20 ℃再次进行测定;当设定温度 ≤ 300 ℃时粉尘燃烧,则降低 10 ℃再次进行测定。粉尘层最低着火温度不高于粉尘层最高未着火温度 10 ℃以上,而且应进行 3 次验证。实验步骤如下:

- 1) 检查仪器状态,连接电源并开机;
- 2) 开启红外热成像仪并设定好相关参数;
- 3) 设置好温度后,按下启动按钮;
- 4) 待温度达到设定温度并稳定时,添加粉尘于加热板上;
- 5) 用平直刮板沿 5 mm 高金属圈上边缘刮平锆粉,使其平铺在环内,清理多余粉尘;
- 6) 等待 30 min 或更长的时间,观察锆粉是否着火;
- 7) 待粉尘温度下降,清理加热板上的粉尘。

若有以下 3 种情况均视为燃烧:粉尘层出现燃烧火焰或发生无火焰燃烧;粉尘层内部温度与热板设置温度差大于 250 ℃;粉尘层温度达到 450 ℃。

不同浓度氮气、氩气的空气中,锆粉尘层最低着火温度测试是在空气中的实验基础上进行的。其实实验原理与空气中相同,为了保证所需的气氛条件,在实验开始前,用真空泵将 JMS-2 型真空手套箱抽真

空,使内部真空度维持在 -0.1 MPa 左右,采用流量计以及测氧仪配制氩气或氮气与空气的混合气体,再通入箱体,达到常压后,关闭气阀,开始实验。

2 实验结果与分析

2.1 空气中锆粉最低着火温度

实验时,周围环境温度维持在 (25 ± 10) ℃ 范围内,金属环的高度为 5 mm,得到的实验结果见表 1。表 1 中:1 代表锆粉着火;0 代表锆粉未着火。

表 1 空气中不同粒径的锆粉尘层最低着火温度

Tab. 1 Minimum ignition temperature  
of zirconium dust layer with different particle  
sizes in air

中位粒径/ μm	加热板温度/ ℃	着火情况	最低着火 温度/℃
2.4	220	1	200
	210	1	
	200	1,1,1	
	190	0,0,0	
7.3	230	1	220
	220	1,1,1	
	210	0,0,0	
	200	0	
29.1	340	1	320
	330	1	
	320	1,1,1	
	310	0,0,0	
71.7	400	1	390
	390	1,1,1	
	380	0,0,0	
	370	0	
209.9	400	0,0,0	> 400

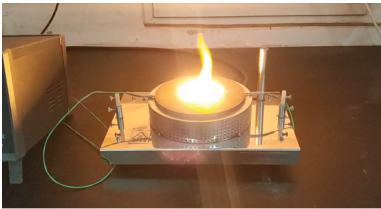
从表 1 可以看出,中位粒径从 2.4 μm 增加至 71.7 μm 的过程中,锆粉尘层最低着火温度从 200 ℃升至 390 ℃,上升了 190 ℃。

锆粒径越大,颗粒比表面积越小,越难以和空气充分接触,反应产生燃烧热越少,达到着火温度越慢;此外,颗粒的热辐射面积也减小,降低了锆粉颗粒之间及锆粉与热表面的换热效率。锆粉尘层的最低着火温度与粒径呈现正相关关系,表明粒径越小的锆粉着火敏感性越高。

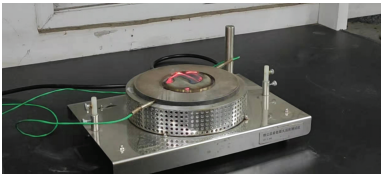
2.2 空气中锆粉燃烧火焰温度

锆粉尘层完全着火现象如图 3(a) 所示。实验中发现,中位粒径为 71.7 μm 锆粉在燃烧时存在分

阶段燃烧现象,第一阶段的过程中,锆粉尘层未完全点燃,亮度较低,如图 3(b)所示。



(a) 完全着火



(b)  $D_{50} = 71.7\ \mu\text{m}$  锆粉分阶段燃烧初期

图 3 锆粉尘层着火现象

Fig. 3 Ignition phenomenon of zirconium powder

进行锆粉尘层最低着火温度测定时,用红外热成像仪记录锆粉尘层的燃烧火焰温度,温度-时间曲线见图 4。其中,热成像仪的温度感应范围为500~2 100 ℃。中位粒径为 2.4、7.3、29.1、71.7  $\mu\text{m}$  的锆粉最高燃烧温度分别为 1 837、1 776、1 913、1 880 ℃。4 种粒径不同的锆粉尘层燃烧火焰最高温度都较为接近,最高温度与最低温度之差仅为 137 ℃,说明锆粉尘层燃烧火焰最高温度与粒径的关系不大。中位粒径为 71.7  $\mu\text{m}$  锆粉燃烧存在从着火转变为完全燃烧的阶段,中间阶段燃烧的火焰温度在 1 100 ℃附近,且亮度明显比完全着火时小,说明锆粉粒径较大时燃烧的剧烈程度较低。

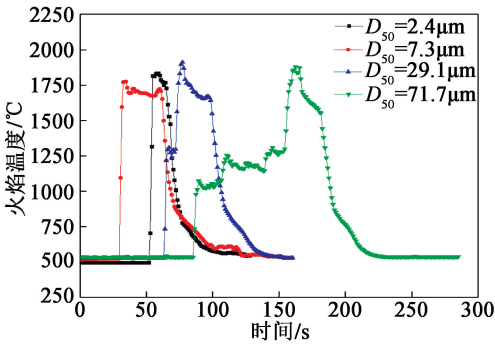
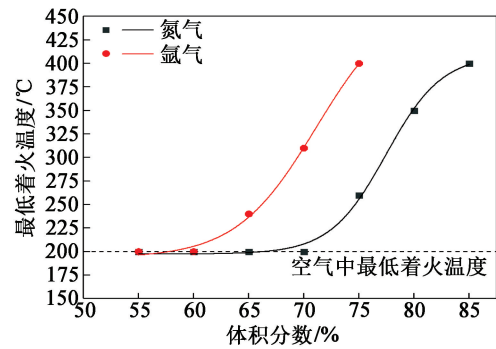


图 4 不同粒径的锆粉尘层燃烧火焰温度随时间的变化

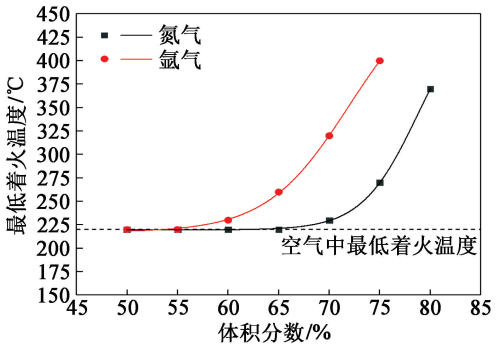
Fig. 4 Flame temperature of zirconium dust layer with different particle sizes changing with time

2.3 不同浓度氮气、氩气中锆粉的着火温度

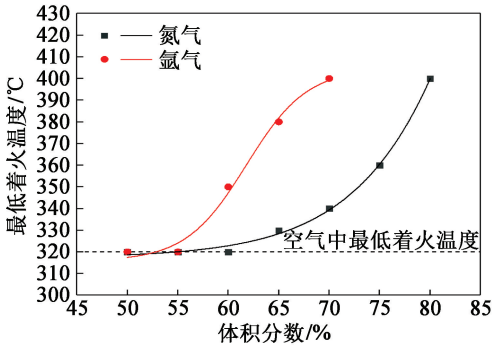
锆粉尘层最低着火温度随氮气、氩气浓度的增加而升高,氮气、氩气对不同粒径锆粉最低着火温度的影响程度不同,如图 5 所示。



(a)  $D_{50} = 2.4\ \mu\text{m}$



(b)  $D_{50} = 7.3\ \mu\text{m}$



(c)  $D_{50} = 29.1\ \mu\text{m}$

图 5 氮气和氩气浓度对锆粉尘层最低着火温度的影响

Fig. 5 Effect of argon concentration and nitrogen concentration on the minimum ignition temperature of zirconium dust layer

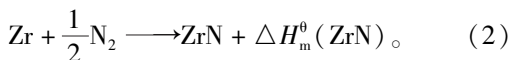
氮气或氩气浓度较低时,随着氮气或氩气浓度增加,锆粉尘层最低着火温度变化较小,说明较低浓度的氮气或氩气对锆粉阻燃作用较弱。

当通入的氮气或氩气体积分数增加到60%~65%时,锆粉尘层最低着火温度开始升高,随着氮气或氩气浓度继续增加,锆粉尘层最低着火温度迅速升高。可以发现,锆粉尘层的最低着火温度在氮气、氩气浓度较大的空气中和纯空气中相比,呈显著升高趋势,说明浓度较高的氮气、氩气可以有效抑制锆粉尘层着火,且氮气、氩气浓度越高,其对锆粉尘层着火的抑制作用越强。同时,氮气或氩气浓度较高

时,相同气体浓度下氩气气氛的最低着火温度比氮气要高,说明氩气对锆粉尘层着火的抑制效果优于氮气。

在体积分数 75% 的氮气以及体积分数 70% 的氩气氛围下,最低着火点差值与锆粉中位粒径成正比关系。同等氮气、氩气浓度下,粒径较小的锆粉在氮气、氩气气氛中最低着火温度和空气中的差值较大。锆粉中位粒径为 2.4、7.3、29.1  $\mu\text{m}$  时,氩气氛围下最低着火温度差值为 60、50、40  $^{\circ}\text{C}$ ;氮气氛围下最低着火温度差值为 110、100、80  $^{\circ}\text{C}$ 。说明氮气、氩气的阻燃作用对粒径较小的锆粉影响较大。

锆不仅可以和氧气发生反应,也可以和氮气发生反应<sup>[2]</sup>:



但是氮气仍对锆粉燃烧有一定抑制作用。因为锆粉和氧气的反应速率比和氮气的反应速率要高,相同质量锆粉与氧气发生反应放出热量是其与氮气发生反应放出热量的 3 倍。氮气浓度增加,锆粉和氮气的接触概率增加,反应概率随之增加,相应地降低了锆粉与氧气发生反应的概率,进而减缓了锆粉发生燃烧反应的总体放热。

锆粉不会和氩气发生化学反应,通入氩气会降低空气中氧气与氮气的浓度,进而降低锆粉与氧气和氮气的接触概率,对锆粉尘层燃烧有一定抑制效果。一定浓度的氮气、氩气即可达到阻止锆粉尘层着火的效果。因此,在锆包壳剪切过程中维持一定浓度氮气、氩气可以有效防止锆粉燃爆事故的发生。

### 3 结论

采用粉尘层最低着火温度测定装置对不同粒径的锆粉在空气中进行了粉尘层最低着火温度研究。采用红外热成像仪测定了锆粉尘层火焰温度,研究了锆粉粒径与粉尘层最低着火温度及火焰温度的规律。对 4 种粒径锆粉在不同浓度氮气或氩气中进行了粉尘层最低着火温度研究,研究了氮气、氩气对锆粉着火的抑制效果以及抑制效果与粒径的关系。最终得出如下结论:

1) 锆粉的中位粒径从 2.4  $\mu\text{m}$  升至 71.7  $\mu\text{m}$ ,粉尘层最低着火温度从 200  $^{\circ}\text{C}$  升至 390  $^{\circ}\text{C}$ ,表明粒径越小的锆粉着火敏感性越高。

2) 4 种粒径锆粉尘层火焰最高温度都较为接近,表明锆粉尘层燃烧火焰最高温度与粒径的关系

不大。中位粒径为 71.7  $\mu\text{m}$  的锆粉燃烧存在从着火转变为完全燃烧的阶段,说明锆粉粒径较大时燃烧的剧烈程度较低。

3) 氮气或氩气体积分数从 60%~65% 上升到 70%~85% 时,锆粉尘层最低着火温度升至 400  $^{\circ}\text{C}$ 。表明高浓度的氮气或氩气对锆粉燃烧有抑制效果,且浓度越高,抑制效果越好;锆粉粒径越小,抑制作用越强;氩气比氮气的抑制效果强。在锆包壳剪切过程中维持空气中高浓度氮气、氩气气氛可以有效预防锆粉发生燃爆事故。

### 参 考 文 献

- [1] 中国有色金属工业协会专家委员会. 中国锆、钨[M]. 北京:冶金工业出版社,2014:5-6.
- [2] 熊炳昆,温旺光,杨新民,等. 锆钨冶金[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:1-13, 45-46.
- [3] 熊炳昆,杨新民,罗方承,等. 锆钨及其化合物应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:192-216.
- [4] 熊炳昆. 锆粉的制备与应用[J]. 稀有金属快报, 2005, 24(10): 49-51.
- [5] 杨胜强. 粉尘防治理论及技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2007: 51-64.
- [6] 王梦蓉. Al Solutions 公司金属粉尘爆炸事故[J]. 现代职业安全, 2014(9): 90-95.
- [7] 邓军,任旭刚,王秋红,等. 锆金属粉尘云的爆炸特性[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 496-501.  
DENG J, REN X G, WANG Q H, et al. Explosion characteristics of zirconium metal dust cloud [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 496-501.
- [8] EWALD K H, ANSELMINI-TAMBURINI U, MUNIR Z A. Combustion of zirconium powders in oxygen [J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 291(1/2): 118-130.
- [9] BADIOLA C, DREIZIN E L. Combustion of micron-sized particles of titanium and zirconium [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2237-2243.
- [10] 丁以斌,孙金华,何学超,等. 锆粉尘云的火焰传播特性[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(4): 353-357.  
DING Y B, SUN J H, HE X C, et al. Flame propagation characteristic of zirconium particle cloud [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(4): 353-357.
- [11] 丁以斌. 锆粉云火焰传播特性的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.  
DING Y B. Experimental study on flame propagation characteristics of zirconium particle cloud [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.

[12] CAO Y, SU H, GE L F, et al. Ignition sensitivity and flame propagation of zirconium powder clouds[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018,365:413-420.

[13] 苏浩,仲海霞,曹勇,等. 锆金属粉尘云最小点火能和最低着火温度的试验研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(2): 25-31, 36.

SU H, ZHONG H X CAO Y, et al. Experimental investigation of the minimum ignition energy and the minimum ignition temperature of zirconium dust cloud [J]. Explosive Materials, 2019, 48(2):25-31, 36.

[14] 任旭刚. 锆粉尘爆炸特性及其抑爆的实验研究[D]. 西安:西安科技大学,2016.

REN X G. Experimental study on explosion characteristics and explosion suppressant of zirconium dust [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.

[15] ELIAS E, HASAN D, NEKHAMKIN Y. Zirconium ignition in exposed fuel channel [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 286:205-210.

[16] 周琪,孙金华,王秋红,等. 纯锆粉及包覆  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  锆粉的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(6): 533-538.

ZHOU Q, SUN J H, WANG Q H, et al. Flame propagation characteristic of zirconium particle and zirconium particle coated with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(6): 533-538.

[17] 王秋红,孙金华,周琪,等. 锆粉空气预混物多管喷射燃烧的火焰温度特征[J]. 燃烧科学与技术,2012,18(5):448-455.

WANG Q H, SUN J H, ZHOU Q, et al. Flame temperature characteristics of multi-tube injection combustion of zirconium-air cloud mixtures [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(5): 448-455.

[18] WU H C, CHANG R C, HSIAO H C. Research of minimum ignition energy for nano titanium powder and nano iron powder [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1):21-24.

[19] 王秋红,孙金华,邓军. 管道中锆粉云火焰传播的温度与速度特性[J]. 北京科技大学学报,2014,36(10):1378-1383.

WANG Q H, SUN J H, DENG J. Flame temperature and propagation speed characteristics of zirconium dust cloud flame propagation in pipelines [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(10):1378-1383.

[20] 王秋红. 锆粉云瞬态火焰及连续喷射火焰特性的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.

WANG Q H. Experimental study on characteristics of transient flame and continuous jet flame of zirconium dust cloud [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.

[21] 中华人民共和国应急管理部. 粉尘层最低着火温度测定方法:GB/T 16430—2018 [S]. 北京:中国标准出版社, 2018.

Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Determination of the minimum ignition temperature of dust layer: GB/T 16430—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

~~~~~

(上接第 7 页)

基发射药热安定性和力学性能的影响[J]. 火炸药学报,2019,42(2):180-184.

HAN J C, YANG H Q, WANG Y Q. Effect of spherical nitroguanidine particle size on thermal stability and mechanical properties of modified single-base gun propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2019, 42(2): 180-184.

[11] 蒙君昀,周霖,金大勇. DNAN/HMX 熔铸炸药的流变特性[J]. 含能材料,2018,26(8):677-685.

MENG J J, ZHOU L, JIN D Y. Rheological properties of DNAN/HMX melt cast explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(8): 677-685.

[12] 刘慧慧,郑申声,关立峰,等. HMX 级配对醇醛高聚物粘结炸药流变性能的影响 [J]. 含能材料,2016, 24(10):978-984.

LIU H H, ZHENG S S, GUAN L F, et al. Effects of HMX gradation on the rheological properties of the aldol based polymer bonded explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(10): 978-984.

[13] 卫彦菊,王晶禹,安崇伟,等. 粒度级配对 CL-20 基浇注传爆药流变性能的影响 [J]. 火工品,2014(4): 33-37.

WEI Y J, WANG J Y, AN C W, et al. Effects of particle size gradation on the rheological properties of CL-20 base casting booster [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(4): 33-37.

[14] 卫彦菊,王晶禹,安崇伟,等. GAP/CL-20 基混合炸药药浆的流变性 [J]. 含能材料,2015,23(11):1124-1129.

WEI Y J, WANG J Y, AN C W, et al. Rheological behavior of GAP/CL-20 based composite explosives slurry [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(11): 1124-1129.