

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.004

石松子粉尘爆炸危险性及抑爆研究*

彭于怀^① 黄丽媛^② 曹卫国^{①③} 郑俊杰^{①③} 卑凤利^{①③} 潘峰^{①③}

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②邦达诚环境监测中心(江苏)有限公司(江苏常州,213000)

③国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了研究粒径对石松子粉尘爆炸危险性的影响,采用 Godbert-Greenwald (G-G) 炉和 20 L 球爆炸装置对石松子粉尘云进行了试验,分析了粒径对爆炸特性的影响,并探讨了 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对石松子粉的抑爆效果。结果表明:粒径越小的粉尘着火温度越低,潜在危险性更大;粒径小于 $48\ \mu\text{m}$ 的粉尘,在质量浓度为 $750\ \text{g}/\text{m}^3$ 时达到最大爆炸指数 $22.61\ \text{MPa} \cdot \text{m}/\text{s}$,其爆炸危险性为 II 级,相比于粒径小于 $75\ \mu\text{m}$ 的粉尘,爆炸危险性更高;添加 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 后,能够显著降低石松子粉的爆炸压力和爆炸指数;与 SiO_2 相比, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 具有更好的抑爆效果。

[关键词] 石松子粉;粉尘爆炸;着火温度;爆炸压力;爆炸指数;抑爆

[分类号] X932

引言

粉尘爆炸是指可燃性粉尘悬浮在助燃环境中与空气混合,在有限的空间内达到一定的爆炸浓度后,被适当能量的点火源点燃发生的爆炸现象^[1-6]。粉尘爆炸过程中火焰在粉尘云中迅速传播,同时温度和压力也会快速升高。在密封或半密封的有限环境中,粉尘爆炸快速释放巨大的能量和很强的冲击波,使粉尘爆炸过程难以控制,因此粉尘爆炸具有很大的危害性和破坏性^[3-6]。

现代工业的迅速发展,对粉体的需求逐渐增多。若对粉体的爆炸特性以及防止粉尘爆炸机制不了解,防护措施不到位,在粉体的生产、运输和应用过程中都有可能发生粉尘爆炸。近几年来粉尘爆炸事故频繁发生。2011 年 1~5 月,美国田纳西州加纳庭市的海格纳士公司工厂发生了 3 起铁粉爆炸事故,导致 4 死 4 伤^[7]。2010 年 2 月,秦皇岛某淀粉工厂发生玉米淀粉粉尘爆炸事故,造成 21 人死亡、49 人受伤^[8]。不断发生的粉尘爆炸事故不仅给工厂设施、设备造成重大破坏,还威胁着人民的生命和财产安全,给社会稳定带来非常大的负面影响。粉尘爆炸的相关研究,特别是抑爆技术的开发可为工业安全生产提供理论和实际指导依据,能在一定程度上降低粉尘爆炸事故发生的概率。通过添加高效

抑爆剂,可以在粉尘爆炸发生的过程中,降低燃烧爆炸区域的温度,阻碍火焰的传播和蔓延,显著降低粉尘爆炸的爆炸压力和爆炸指数,减小爆炸强度和破坏性,起到抑制或避免粉尘爆炸的作用。因此,对粉尘爆炸特性参数、粉尘爆炸危险性以及粉尘抑爆进行深入研究就显得十分重要,对于预防和控制此类工业事故具有重要的理论价值和实际意义^[9-10]。

石松子粉作为可燃性粉尘,常被用作粉尘爆炸系列研究中的爆炸物^[11]。本文以石松子粉为试验对象,采用 Godbert-Greenwald (G-G) 炉测试装置对粒径不同的粉尘云着火温度进行了研究。采用 20 L 球爆炸装置,研究了粒径大小对石松子粉爆炸压力和爆炸指数的影响,并且初步探讨了添加 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对石松子粉爆炸抑制程度的影响,分析了两种物质的抑爆机制,旨在为工业安全生产提供理论支撑。

1 材料、仪器和试验方案

1.1 材料及预处理

石松子粉:由国家民用爆破器材质量监督检验中心提供,试验前在常压、 $50\ ^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥 24 h,放在室温下密闭保存,分别过 200 目筛(粒径小于 $75\ \mu\text{m}$)和 300 目筛(粒径小于 $48\ \mu\text{m}$)。

标准化学点火具:点火源的总能量为 10 kJ。

* 收稿日期:2014-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51174047)

作者简介:彭于怀(1989~),男,硕士研究生,主要从事纳米粒子制备和粉尘爆炸方面的研究。E-mail:p252349798@163.com

通信作者:郑俊杰(1973~),女,工程师,主要从事含能材料方面的研究。E-mail:zhengjunjie1974@163.com

SiO₂ 和 NH₄H₂PO₄ 粉体均过 200 目筛备用。

1.2 粉尘云着火温度测试

粉尘云着火温度试验在 G-G 炉内测定,测试装置见文献[12]。G-G 炉由加热石英炉管组成,石英管垂直安装,其中炉管壁绕有电阻丝,炉膛体积为 0.27 L,其下部开口与外部大气相通,上端与压缩空气喷粉控制系统相连接。试验时,首先称取一定质量的石松子粉尘,加入到储尘罐中,再将加热炉加热到预先设定的试验温度,然后将储气罐内的气压调到试验压力。当电磁阀开启时,储气罐内的压缩空气将储尘罐内待测粉尘快速喷入加热炉内,形成粉尘云。通过炉子下方的反射镜可以观察到炉内是否着火。

1.3 20 L 球形爆炸试验

爆炸压力和爆炸指数通过 20 L 球形爆炸装置^[13]测试得到。

在环境温度为(20±5)℃条件下,将一定量的石松子粉加入到储粉罐内,加压到 2 MPa。将爆炸罐内抽成一定真空状态,以确保喷粉后爆炸罐内的压力在点燃时处于大气压状态下。粉尘被点燃后,罐内的压力由安装在器壁上的压力传感器检测,传感器与数据记录系统相连。通过软件记录爆炸过程中的压力-时间曲线,得到爆炸压力 p_m 和压力上升速率 $(dp/dt)_m$,然后根据下述公式可以得到爆炸指数 K_m :

$$K_m = (dp/dt)_m \times V^{0.33}.$$
 (1)

式中:V 为球形装置的体积。

改变粉尘的质量浓度进行爆炸测试,得到爆炸压力和爆炸指数与质量浓度的关系,作图可以得到最大爆炸压力 p_{max} 与最大爆炸指数 K_{max} 。

2 粉尘爆炸特性研究

2.1 粉尘云最低着火温度

在环境温度为(20±5)℃、喷粉压力为 0.08 MPa 的条件下,分别对粒径小于 75 μm 和 48 μm 的石松子粉进行测试。通过改变石松子粉浓度来测量粉尘云的最低着火温度,每组试验重复 10 次。在任一粉尘浓度下,粉尘云最低着火温度介于连续 10 次试验均未发生着火时的温度和连续 10 次试验至少有一次着火时的温度之间。若温度高于 300℃,则应该减去 20℃;若不高于 300℃,则应该减去 10℃,最后作为粉尘云的最低着火温度被记录下来^[14]。不同浓度下粉尘云在不同温度下的着火试验结果如表 1。

由表 1 分析得到:

1) 对于粒径小于 75 μm 的粉尘,在试验温度为

表 1 粉尘云着火温度测试

Tab. 1 Ignition temperature test of dust cloud

粉尘粒径	质量浓度 / (g · m ⁻³)	温度 / ℃	试验结果
过 200 目筛 (小于 75 μm)	250	500	× × × × × × × × ×
	500	500	√ √ √ √ √ √ √ √
	750	500	√ × × × × × √ √ × ×
	250	490	× × × × × × × × ×
	500	490	× × × √ × √ √ √ × √
	750	490	× × × × × × × × ×
	250	480	× × × × × × × × ×
	500	480	× × × × × × × × ×
	750	480	× × × × × × × × ×
	250	480	√ √ × √ × √ √ √ √
过 300 目筛 (小于 48 μm)	500	480	√ √ √ √ √ √ √ √
	750	480	√ √ √ √ √ √ √ √
	250	470	× × × √ × × × √ × ×
	500	470	√ √ × √ √ √ √ √ ×
	750	470	√ × × √ √ √ × √ × ×
	250	460	× × × × × × × × ×
	500	460	× × × × × × × × ×
	750	460	× × × × × × × × ×
	250	460	× × × × × × × × ×
	500	460	× × × × × × × × ×

注:“√”代表着火;“×”代表未着火。

480℃下,3 种不同浓度条件下进行的 10 次试验均未发生着火,说明试验温度较低,不足将粉尘引燃。在 490℃的试验温度下,质量浓度为 250 g/m³ 和 750 g/m³ 的粉尘均未着火;而 500 g/m³ 的粉尘着火 5 次。这是由于在 250~750 g/m³ 范围内,质量浓度较低时,爆炸产生的热量不足以维持火焰传播,粉尘云不发生着火。质量浓度较高时,单位体积内的粉尘颗粒增加,使有效参与燃烧反应的粉尘减少,燃烧粒子周围未参与燃烧反应的粉尘数量相对增加,吸收部分反应热,并对炉膛内氧气流通起到一定的阻碍作用,使粒子燃烧反应速率降低,粉尘云未被点燃。在质量浓度为 500 g/m³ 时,粉尘被点燃多次,发生着火概率最大,说明这是粉尘云的最佳着火浓度。在试验温度为 500℃时,250 g/m³ 的粉尘着火 0 次、750 g/m³ 的粉尘着火 3 次、500 g/m³ 的粉尘全部发生着火。因此,粒径小于 75 μm 的粉尘云最低着火温度在 460~470℃范围内。

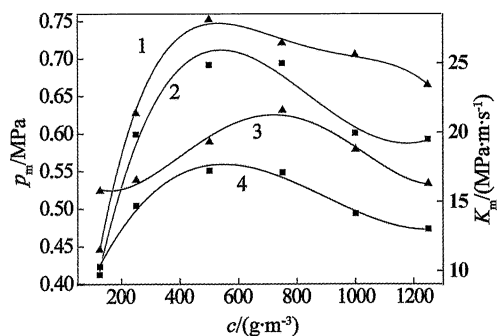
2) 对于粒径小于 48 μm 的粉尘,在试验温度为 460℃时,3 种不同质量浓度条件下进行的 10 次试验均未发生着火。在 470℃的试验温度下,质量浓度为 250 g/m³ 的粉尘着火 2 次、750 g/m³ 的粉尘着火 5 次、500 g/m³ 的粉尘着火 8 次,这说明质量浓度在 250~750 g/m³ 范围内,存在一个最佳着火浓度。在 500 g/m³ 时,着火次数最多,发生着火的概率最大,表明该质量浓度为粉尘最佳着火浓度。在 480℃的试验温度下,质量浓度为 250 g/m³ 的粉尘着火

8 次, 500 g/m³ 和 750 g/m³ 的粉尘全部发生着火。因此, 粒径小于 48 μm 的粉尘云最低着火温度在 440 ~ 450 °C 范围内。

由以上分析可知, 粒径小于 75 μm 和粒径小于 48 μm 粉尘的粉尘云的最佳着火质量浓度均为 500 g/m³。粒径小于 48 μm 的粉尘云着火温度比粒径小于 75 μm 的粉尘云着火温度更低, 主要原因是粉尘的燃烧主要在颗粒表面, 粉尘粒子越小, 粉尘的比表面积越大, 与空气接触更充分, 反应更完全。此外粉尘粒子越小, 相同体积内的粉尘粒子数增加, 有效参与反应的粉尘颗粒增加, 产生的热量更多, 反应更加剧烈, 使最低着火温度降低, 粉尘更容易被点燃, 发生粉尘爆炸的潜在危险性增加。

2.2 粉尘云爆炸压力和爆炸指数

试验环境温度 (20 ± 5) °C, 喷粉压力 2.0 MPa, 点火能量为 10 kJ, 喷粉后点火延时 60 ms。试验前, 需对点火能量为 10 kJ 的点火具进行爆炸压力空白试验, 先将爆炸罐内气压抽到 -0.06 MPa, 在不加粉尘的条件下, 喷粉后, 球罐内的气压逐渐升高, 当刚好达到一个大气压时 (压力为 0.00 MPa), 引燃化学点火具, 点火具产生的压力为 0.10 MPa。在粉尘质量浓度为 125、250、500、750、1000 和 1250 g/m³ 的条件下, 对粒径小于 48 μm 粉尘进行爆炸压力和爆炸指数测试, 同时与本课题组已发表的文献 [13] 上的粒径小于 75 μm 的粉尘相应质量浓度的爆炸压力和爆炸指数相比较, 结果如图 1 所示。



- 1 - 试验值: 粒径小于 48 μm 爆炸压力曲线;
- 2 - 文献值: 粒径小于 75 μm 爆炸压力曲线;
- 3 - 试验值: 粒径小于 48 μm 爆炸指数曲线;
- 4 - 文献值: 粒径小于 75 μm 爆炸指数曲线

图 1 不同粒径粉尘爆炸压力和爆炸指数随质量浓度的变化关系

Fig. 1 Influence of the mass concentration on explosion pressure and pressure index for dust with different diameters

分析图 1 可知, 对于粒径小于 48 μm 的粉尘, 粉尘质量浓度为 125 g/m³ 时, 爆炸压力为 0.44 MPa, 爆炸压力在质量浓度为 500 g/m³ 时达到其最

大值为 0.75 MPa。在 125 ~ 500 g/m³ 范围内, 爆炸压力的增长速率较快。若进一步增加粉尘质量浓度, 爆炸压力则开始逐步降低。比较图中 1、2 两条曲线可知, 与文献 [13] 中粒径小于 75 μm 的粉尘相比, 在任一质量浓度下, 粒径小于 48 μm 的粉尘产生的爆炸压力更大。

对于粒径小于 48 μm 的石松子粉, 在质量浓度为 125 g/m³ 时, 爆炸指数为 15.75 MPa·m/s; 在质量浓度为 750 g/m³ 时达到最大爆炸指数 22.61 MPa·m/s。在一定的质量浓度范围内 (125 ~ 750 g/m³), 爆炸指数随着粉尘质量浓度的增加而急速上升。此后进一步增大粉尘质量浓度, 爆炸指数开始逐步降低。同文献 [13] 中粒径小于 75 μm 的最大爆炸指数 (17.20 MPa·m/s) 相比, 粒径小于 48 μm 的最大爆炸指数更大, 粉尘爆炸的剧烈程度更强。粒径小于 48 μm 的粉尘最大爆炸指数为 22.61 MPa·m/s, 根据 ISO6184—1—1985 危险性分级标准规定, 其危险性应为 II 级。

粒径小于 48 μm 石松子粉尘的最大爆炸压力和最大爆炸指数均大于文献 [13] 中粒径小于 75 μm 粉尘, 危险性等级也增加了一级。这可能是因为粒径小的粉尘比表面积较大, 与氧气接触充分, 爆炸燃烧较易发生, 燃烧反应剧烈, 单位时间内产生的热量更多, 爆炸压力增大, 剧烈程度增加。因此, 粒径小的石松子粉, 爆炸过程中产生的爆炸压力和爆炸指数更大, 其破坏性和危险性也进一步增加。

3 石松子粉的抑爆研究

3.1 惰性粉体对石松子粉尘爆炸的影响

粉尘抑爆主要方式是添加高效抑爆剂, 在粉尘爆炸发生的过程中, 能够有效吸收粉尘爆炸产生的热量, 使爆炸区域内的温度降低, 阻碍火焰的传播和蔓延, 起到抑制粉尘爆炸和降低粉尘爆炸强度的作用。因此, 粉尘的抑爆研究对于有效预防和控制工业粉尘爆炸事故具有重要的意义。

对工业粉尘而言, 无机盐粉体具有较好的抑爆效果。本试验主要从粉尘源着手, 采用抑爆法比较 SiO₂ 和 NH₄H₂PO₄ 对石松子粉的抑爆效果。添加抑爆剂后, 粉尘爆炸压力及其爆炸压力上升速率的下降幅度, 分别用 $\Delta\omega$ 和 Δv 来表示, 如式 (2) 和式 (3) 所示:

$$\Delta\omega = \frac{P_{m1} - P_{m0}}{P_{m0}} \times 100\%; \quad (2)$$

$$\Delta v = \frac{K_{m1} - K_{m0}}{K_{m0}} \times 100\%。 \quad (3)$$

式中: $\Delta\omega$ 和 Δv 分别指添加抑爆剂后粉尘的爆炸压

力和爆炸指数的变化率; p_{m_0} 和 K_{m_0} 分别指无抑爆剂存在条件下粉尘的爆炸压力(MPa)和爆炸指数(MPa·m/s); p_{m_1} 和 K_{m_1} 分别指添加抑爆剂后的粉尘爆炸压力(MPa)和爆炸指数(MPa·m/s)。

用 20 L 球测试装置,分别研究了外加 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对粒径小于 $75\ \mu\text{m}$ 、质量浓度为 $500\ \text{g}/\text{m}^3$ 的石松子粉的抑爆效果,其中 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 均小于 $75\ \mu\text{m}$ 。试验中石松子粉的质量一定,外加的抑爆剂相对于石松子粉的质量分数分别为 0、20%、40%、60%、80%、100%。试验结果见图 2 和图 3。

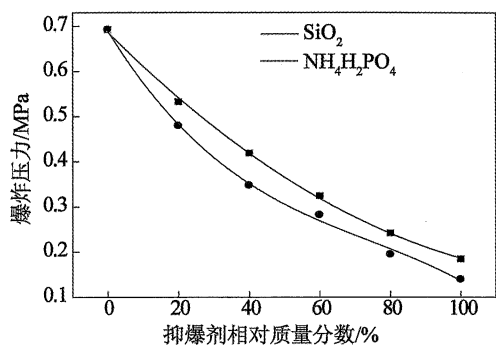


图 2 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 添加量对石松子粉爆炸压力的影响

Fig. 2 Influence of the addition of SiO_2 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ powders on explosion pressure of lycopodium

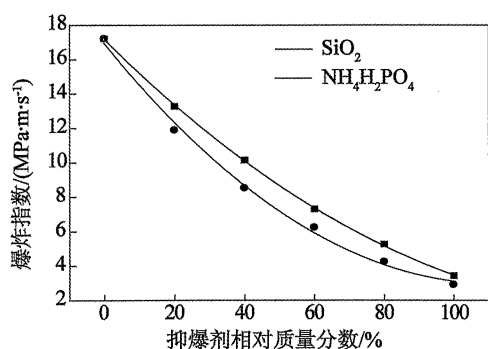


图 3 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 添加量对石松子粉爆炸指数的影响

Fig. 3 Influence of the addition of SiO_2 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ powders on explosion index of lycopodium

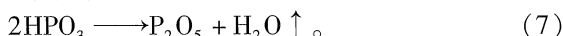
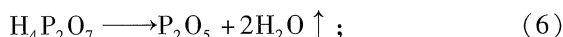
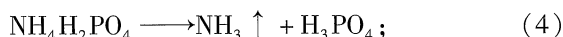
由图 2 和图 3 可知,当 SiO_2 的相对质量分数为 20% 时,爆炸压力和爆炸指数相对于无添加下的下降幅度分别是 23.0% 和 22.8%。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的相对质量分数为 20% 时,爆炸压力和爆炸指数相对于无添加下的下降幅度分别是 30.7% 和 30.9%。当 SiO_2 的相对质量分数为 100% 时,爆炸压力和爆炸指数相对于无添加下分别下降 73.3% 和 80.1%。当 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的相对质量分数为 100% 时,爆炸压力和爆炸指数相对于无添加下分别下降 79.8% 和

83.2%。随着 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 在样品混合物中添加量的逐渐增大,石松子粉的爆炸压力和爆炸指数均不断降低,说明 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对石松子粉的抑爆作用均有较为明显的效果。在相同的添加量下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的爆炸压力和爆炸指数均比 SiO_2 的爆炸压力和爆炸指数小,可知添加 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 后石松子粉粉尘爆炸的爆炸压力和爆炸指数下降幅度均比 SiO_2 的大。对比两种抑爆剂的抑爆效果,可知相对于 SiO_2 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 具有更好的抑爆效果。

3.2 惰性粉体的抑爆机理

SiO_2 并不参与燃烧爆炸反应。一方面,它通过吸收粉尘爆炸释放的热量^[15],使爆炸温度降低,延缓燃烧爆炸反应速率,由于部分反应热被 SiO_2 所夺走,导致火焰温度下降,使火焰传播蔓延的能力降低;另一方面, SiO_2 增加了氧气在粉尘爆炸反应过程中传递阻力,这等同于增加反应罐中局部粉尘的浓度,使石松子粉浓度大于其爆炸上限^[16],让部分粉尘不能有效地参与燃烧爆炸反应。此外由于石松子粉燃烧爆炸过程中产生的部分自由基与 SiO_2 颗粒表面碰撞而消耗,降低了参与爆炸链式反应的自由基,中断了部分链式反应。这些都会使石松子粉尘的爆炸压力和爆炸指数降低,进而达到抑爆效果。该抑爆机制是物理抑爆。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 比 SiO_2 具有更好的抑爆效果,原因是 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 抑爆机制是物理-化学混合抑爆^[17]。在高温环境下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体会大量吸收周围的热量,发生如下反应:



$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的物理抑爆机制主要有以下几个方面:

一是上述每步反应都会吸收石松子粉燃烧爆炸反应放出的较多的热量,并产生水蒸气,起到冷却降温作用,使爆炸区域温度降低,从而减缓了爆炸反应速率,降低燃烧爆炸反应的猛烈程度,即是 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的分解冷却作用;

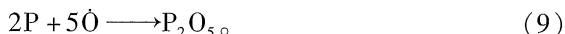
二是分解生成的 P_2O_5 惰性氧化物,热稳定性较好,覆盖在石松子粉颗粒表面,起到热屏障的作用,通过阻隔热量的传递和降低与 O_2 的接触来有效阻止爆炸的发展以及火焰的传播,即 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的分解阻隔传导作用;

三是 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解产生大量的水蒸气和惰性气体(NH_3),能够稀释氧气浓度,能够减缓可燃物质

的燃烧速率,即 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的分解稀释作用。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的吸热分解是物理抑爆的主要形式。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 化学抑爆机理为: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 通过吸热分解产生 N、P 等活性原子,与石松子粉爆炸反应产生的 O 和 H 自由基或其他活性基团作用而终止链反应,使参与燃烧爆炸反应的自由基数量急剧减少,从而中断反应链,起到抑制爆炸的作用:



由于球形密闭容器内存在大量的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 石松子粉燃烧爆炸反应产生的自由基与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体表面碰撞而被吸附,使得有效参与燃烧爆炸反应的自由基减少,中断了部分链式反应,从而整体的反应速率降低,起到抑制爆炸的作用。由于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的物理-化学混合抑爆机制,使其能够有效地降低对石松子粉的爆炸压力和爆炸指数。因而添加 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 后对石松子粉尘爆炸的抑制效果要好于 SiO_2 。

4 结论

1) 对于过 200 目筛(粒径小于 $75\ \mu\text{m}$) 的粉尘云,最低着火温度在 $460\sim 470\ ^\circ\text{C}$ 范围内。过 300 目筛(粒径小于 $48\ \mu\text{m}$) 的粉尘云最低着火温度在 $440\sim 450\ ^\circ\text{C}$ 范围内。说明粒径小的石松子粉最低着火温度更低,随着粉尘粒径的减小,粉尘的比表面积增大,与空气接触更充分,发生粉尘爆炸的潜在危险性更大。

2) 过 300 目筛的石松子粉爆炸压力在粉尘质量浓度为 $500\ \text{g}/\text{m}^3$ 时达到其最大值为 $0.75\ \text{MPa}$ 。过 300 目筛的粉尘的最大爆炸压力比过 200 目筛的更大,产生的爆炸强度和破坏力也更大。过 300 目筛的粉尘,在粉尘质量浓度为 $750\ \text{g}/\text{m}^3$ 时达到最大爆炸指数 $22.61\ \text{MPa}\cdot\text{m}/\text{s}$,粉尘爆炸危险性等级为 II 级。与过 200 目筛的粉尘相比,过 300 目筛的粉尘最大爆炸指数更大,危险性等级更高。说明粒径小的石松子粉尘,发生粉尘爆炸危险性越高,产生的破坏力越大。

3) 随着 SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 在样品混合物中添加量的逐渐增大,石松子粉的爆炸压力和爆炸指数均不断降低, SiO_2 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对石松子粉的抑爆作用均有较为明显的效果。 SiO_2 属于物理抑爆机制,而 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 属于物理-化学混合抑爆机制。相对于 SiO_2 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 具有更好的抑爆效果。

参 考 文 献

[1] Eckhoff R K. Dust explosion research. State-of-the-art

outstanding problems[J]. Journal of Hazardous Material, 1993,35(1):103-117.

[2] Ebadat V. Dust explosion hazard assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(6): 907-912.

[3] 赵雪娥,孟亦飞,刘秀玉. 燃烧与爆炸理论[M]. 北京: 化学工业出版社,2010.

[4] Abbasi T, Abbasi S A. Dust explosions-cases, causes, consequences, and control[J]. Journal of Hazardous Material, 2007,140(1-2):7-44.

[5] Eckhoff R K. Understanding dust explosions. The role of powder science and technology[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009,22(1):105-116.

[6] Amyotte P R, Eckhoff R K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview[J]. Journal of Chemical Health and Safety, 2010,17(1):15-28.

[7] CSB releases final investigation report on three accidents at the Hoeganaes iron powder facility in Gallatin, Tennessee[EB/OL]. [2012-01-05]. <http://www.csb.gov/csb-releases-final-investigation-report-on-three-accidents-at-the-hoeganaes-iron-powder-facility-in-gallatin-tennessee/>.

[8] 潘峰,马超,曹卫国,等. 玉米淀粉粉尘爆炸危险性研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(7): 46-51.

Pan Feng, Ma Chao, Cao Weiguo, et al. Research on explosion risk of corn starch dust [J]. China Safety Science Journal, 2011,21(7):46-51.

[9] Piccinini N. Dust explosion in a wool factory: Origin, dynamics and consequences [J]. Fire Safety Journal, 2008,43(3): 189-204.

[10] Gao Wei, Dobashi R, Mogi T, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012,25(6): 993-999.

[11] American Society for Testing Material. E1491 standard test method for minimum autoignition temperature of dust clouds [S]. Pennsylvania: Standards Press of America, 2006.

[12] Gao Wei, Zhong Shengjun, Mogi T, et al. Study on the influence of material thermal characteristics on dust explosion parameters of three long-chain monobasic alcohols[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(1):186-196.

[13] 秋姗姗,曹卫国,黄丽媛,等. 石松子粉粉尘爆炸试验研究[J]. 爆破器材,2012,41(3):16-18.

Qiu Shanshan, Cao Weiguo, Huang Liyuan, et al. Experimental research on lycopodium dust explosion [J]. Explosive Materials, 2012,41(3):16-18.

[14] 国家技术监督局. GB/T 16429—1996,粉尘云最低着

- 火温度测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- State Bureau of Technical Supervision. GB/T 16429-1996, Determination of the minimum ignition temperature of dust cloud [S]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [15] Dastidar A G, Amyotte P R. Using calculated adiabatic flame temperatures to determine dust explosion inerting requirements [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2004, 82 (B2): 142-155.
- [16] 张增志, 谷娜, 张际飞. 瓦斯抑爆材料研究进展及瓦斯吸收剂初步研究[J]. 煤矿安全, 2008 (8): 4-8.
- Zhang Zengzhi, Gu Na, Zhang Jifei. Progress of methane explosion suppression material and preliminary study of methane absorbent [J]. Safety in Coal Mines, 2008 (8): 4-8.
- [17] Luo Zhenmin, Wang Tao, Tian Zhihui, et al. Experimental study on the suppression of gas explosion using the gas-solid suppressant of CO₂/ABC powder [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30: 17-23.

Hazards and Suppressions Research on Lycopodium Dust Explosion

PENG Yuhuai^①, HUANG Liyuan^②, Cao Weiguo^{①③}, ZHENG Junjie^{①③}, BEI Fengli^{①③}, PAN Feng^{①③}

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

②Bon Contact Environment Monitoring Center (Jiangsu) Co., Ltd. (Jiangsu Changzhou, 213000)

③National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To investigate the influence of particle size on lycopodium dust explosion hazards, the dust explosions were experimentally studied using a Godbert-Greenwald (G-G) furnace and a 20 L sphere explosion test unit, and the variation regularities of the explosion characteristic with the diameter of lycopodium were analyzed. Moreover, the effects of SiO₂ and NH₄H₂PO₄ on dust explosion suppression were also studied. The results indicate that the smaller the dust particle size, the lower the ignition temperature, and consequently the bigger the potential hazards. Dust particle size in less than 48 μm at a mass concentration of 750 g/m³ results in a maximum explosion index of 22.61 MPa · m/s, which ranks a grade II explosion in the risk classification exhibiting a higher grade of hazard in comparison the dust size less than 75 μm. Adding SiO₂ and NH₄H₂PO₄ can efficiently reduce lycopodium dust explosion pressure and explosion index, and the explosion suppression effects of NH₄H₂PO₄ are better than that of SiO₂.

[KEY WORDS] lycopodium; dust explosion; ignition temperature; explosion pressure; explosion index; explosion suppression

文 摘

1 碳/硝酸钾 (C/KNO₃) 点火剂的研究

《火工品》, 2001 (2), 31-32 (中文)

对碳/硝酸钾点火剂和黑火药的理化性能和输出特性作出了对比研究, 并对该点火剂的适用性进行了讨论和预测。

2 铅-硼 (Pb-B) 点火剂的成分测定

《火工品》, 2001 (2), 38-39 (中文)

用分离法和络合滴定法进行了铅-硼点火剂的成分测定。相对偏差为 0.17% ~ 0.30%, 回收率为 99.4% ~ 100.3%。

3 雷管用延期药

捷克专利, CZ287322, 2000 年 10 月 11 日, 共 3 页 (捷克文)

电雷管和非电雷管的延期药中分别含有硅铬铁 (ferrosilicochromium) 40% ~ 60%、Pb₃O₄ 40% ~ 60% 和 TiO₂ 2% ~ 10% (均为质量分数)。这种延期药的延期时间 ≤ 1000 ms。

4 油包水乳化炸药

日本专利, JP2002 60294, 2000 年 2 月 26 日, 共 4 页 (日文)

这种油包水乳化炸药由氧化剂溶液、碳氢化合物油料、乳化剂和微球组成。微球的真比重为 0.10 ~ 0.35, 残存率 (survial rate, 即在压力下的容积和原始容积之比) 在 13.79 MPa (2000 磅/平方英寸) 时为 ≥ 45% 容积比。这种炸药具有高的抗冲击力和低的瞎火率。

钟一鹏译自美国《化学文摘》

Vol. 136, No. 13 (2002)