

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.003

粉尘爆炸防护措施的研究进展*

袁 帅^① 王庆慧^① 王丹枫^② 杨凝畅^②

①东北石油大学机械科学与工程学院(黑龙江大庆,163318)

②大庆油田有限责任公司第三采油厂(黑龙江大庆,163113)

[摘 要] 随着工业现代化的发展,粉末技术应用越来越广泛。由于人们对不同物料粉尘的危害认识不清,特别是粮食粉尘和金属粉尘爆炸机理和防治技术研究不够系统、深入,缺乏有效的粉尘爆炸安全防护,导致最近几年粉尘爆炸事故频繁发生。为预防和控制粉尘爆炸事故,更加深入地了解粉尘爆炸,首先从粉尘爆炸的机理和必要条件介绍了粉尘爆炸;其次,总结了粉尘爆炸防护措施的试验研究现状,对惰化技术、泄爆技术、抑爆技术3个方面进行阐述。此外,分析目前防护措施的不足,并提出将来发展的方向,为粉尘爆炸防护研究提供引导作用。

[关键词] 粉尘爆炸;爆炸机理;防护措施

[分类号] X932

Research Progress of Preventive and Control Measures for Dust Explosion

YUAN Shuai^①, WANG Qinghui^①, WANG Danfeng^②, YANG Ningchang^②

①College of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University (Heilongjiang Daqing, 163318)

②No. 3 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Co., Ltd. (Heilongjiang Daqing, 163113)

[ABSTRACT] With the development of modern industrialization, powder technology has been widely used. However, the danger of different materials dusts is not well understood, especially the lack of in systematic and in-depth developments in dust explosion mechanism, prevention and control technology of grain dust and metal dust, and in effective safety protection of dust explosion, which result in more and more dust explosion accidents in recent years. For the prevention, controlling and deep understanding of dust explosion, the mechanisms and boundary conditions were introduced and explained. Furthermore, current experimental research in protection of dust explosion was summarized in view of inerting technology, explosion technology, and explosion suppression technology. The shortcoming of current protection was analyzed and the direction of future development was proposed to provide guidance for dust explosion protection research.

[KEYWORDS] dust explosion; explosion mechanism; prevention measures

引言

随着现代工业的飞速发展,在采矿、冶金、粮食、医药、化工、木材、金属、塑料等粉尘行业生产、加工、运输、储存过程中,可燃粉尘的种类和用量显著增加,其机械化、规模化也是空前的,再加上人们对不同物料粉尘的危害认识不清,缺乏粉尘爆炸安全防护的基础知识和有效防护手段,导致近年来重大粉尘爆炸事故频繁发生。

根据美国化学危险和灾害调查委员会(CSB)的统计,在1980年至2005年期间,美国共发生280多

次的粉尘爆炸,造成119人死亡,718人受伤^[1]。进入21世纪后,粉尘爆炸事故的数量是20世纪80年代的3倍之多^[2],2008年,美国皇家糖厂糖粉粉尘爆炸是美国近年来损失最大的工业粉尘爆炸事故,死14人,伤36人,其中19人重伤^[3]。

自改革开放以来,我国粉尘爆炸事故屡有发生。1981年12月,黄埔港粮食筒仓发生大爆炸,共造成7人受伤,并造成重大经济损失^[4]。1987年3月,哈尔滨某厂发生亚麻粉尘爆炸事故,共造成58人死亡,177人受伤。2010年2月,秦皇岛市某公司发生玉米淀粉粉尘爆炸,共造成19人死亡,49人受伤,其中8人重伤。2014年8月,昆山市某公司抛光车

* 收稿日期:2016-11-23
作者简介:袁帅(1991-),男,硕士研究生,主要进行粉尘爆炸特性参数试验与数值模拟研究。E-mail:18739952913@163.com
通信作者:王庆慧(1964-),男,博士,副教授,研究方向为粉尘爆炸防护。E-mail:wangqinghui84@163.com

间发生特别重大粉尘爆炸事故,共造成 146 人死亡,91 人受伤,这是迄今为止国内发生的最大的工业粉尘爆炸事故。2016 年 4 月,深圳市某五金加工厂发生铝粉尘爆炸事故,截至 5 月 6 日,已造成 4 人死亡、6 人受伤,其中 5 人严重烧伤。

为了减少粉尘爆炸事故造成的人员伤亡和财产损失,有必要进一步对粉尘爆炸机理进行研究,总结粉尘爆炸防护措施的现状,并分析不足之处,提出粉尘爆炸防护措施方面的发展方向,以期为防爆设计部门提供有价值的信息,对预防和控制此类工业灾害事故具有重要的实际意义和理论价值。

1 粉尘爆炸研究

1.1 粉尘爆炸机理

粉尘爆炸首先是粉尘粒子(如煤、木材、天然纤维物、金属)表面从点火源通过热辐射为主、热传导为辅的形式获得能量,使得表面受热,温度急剧升高,温度达到粉尘粒子的加速分解温度或蒸发温度,析出蒸气和可燃气体,这种气体与空气混合接触时发生气相点火;这样粒子中既有气相也有固相,两者同时发生燃烧会更加剧烈,这一层又成为点火源引起临近一层发生燃烧;如此以同心圆球面的方式向外围蔓延,并且化学反应速度不断加快,最后引起爆炸。另外,一些粉尘粒子(如硫磺、磷)获得能量后受热,先熔融,再气化为蒸气,最后与空气混合发生燃烧;还有一些粉尘(如焦炭)只发生固相燃烧,燃烧时没有火焰,只有光和热,同样以热辐射和热传导的方式将热量传递给附近未燃烧粉尘,这样,附近的粉尘受热气化后使燃烧循环地进行下去。

1.2 粉尘爆炸发生的条件

尽管粉尘爆炸的机理尚未完全弄清楚,但粉尘爆炸的必要条件已经明确。需要如下 5 个要素,也称为粉尘爆炸五边形:

1) 存在可燃粉尘,且粉尘浓度处于爆炸极限内;粉尘爆炸采用的化学计量浓度与气体爆炸不同,气体爆炸极限采用的是体积分数,而粉尘采用单位体积所含粉尘粒子的质量来表达,单位为 g/m^3 。

2) 存在氧化剂,一般为空气中的氧气,足够的氧含量是可燃性粉尘云得以燃烧的基础。

3) 存在点火源,其点火能量要达到粉尘的最小点火能,粉尘爆炸所需的最小点火能量比气体爆炸大 1~2 个数量级,大多数粉尘云最小点火能在 5~50 mJ 量级范围^[5]。

4) 可燃粉尘与氧化剂以一定比例混合,粉尘呈

云状,这样可以增大气固接触面积,加快反应速度。

5) 粉尘云在相对封闭空间内,压力和温度才能急剧升高,反应速度加快;需要指出,某种工况下,粉尘在未完全封闭的空间内发生燃烧反应,若热量无法及时释放,也会发生粉尘爆炸。

其中,前 3 个条件是燃烧的 3 要素,后 2 个条件为粉尘爆炸区别于粉尘燃烧的条件。

2 粉尘爆炸防护措施研究

研究粉尘爆炸的目的是降低粉尘爆炸带来的危害,根据粉尘爆炸机理、必要条件,提出更加有效的预防措施,将粉尘爆炸的可能性降至零;基于粉尘爆炸发生、发展规律,可以研制出减轻和控制粉尘爆炸效应的结构防护措施。

2.1 粉尘云的形成

一般可燃粉尘云的形成有两种形式:一种是尘化作用形成;另一种形成方式是积尘转化^[6]。

由于积尘分布较为广泛,而且不管作业还是停机,只要当空气中存在湍流、冲击波或机械振动时,积尘就很有可能被重新扬起,在空气中形成高浓度爆炸性粉尘空气混合物,这也是导致二次爆炸的重要原因之一。

在粉尘爆炸扬尘设计基本试验研究方面,目前通常采用气体携带吹粉较多,考虑到由初始爆炸产生的冲击波扬起积尘,学者采用瓦斯气体与空气混合物爆炸形成激波卷扬并引爆粉尘来研究二次爆炸发生机理,得出二次爆炸的爆炸压力随质量浓度的增加先增后降,随粒径的减少而增大。采用激波扬尘法测定的爆炸压力要明显高于气体携带法测得的爆炸压力,如铝粉浓度在 $100 \text{ g}/\text{m}^3$ 时,爆炸压力差值最大为原来的 283%^[7],也证实二次爆炸危害要比一次爆炸严重,所以,积尘的防治尤为重要。

当然,避免积尘的措施从粉尘形成的第一步(即尘化过程)就要着手,可以从改进工艺和设备方面消除和减少粉尘向车间内飞扬。

2.2 惰化防护

惰化是粉尘爆炸防护方法中较新的方法,它是基于粉尘爆炸本质安全原则,通过降低爆炸系统中的氧含量或者可燃粉尘浓度,阻止火焰的自主传播,是一种预防爆炸的可能性和减弱爆炸的严重程度的方法。

防爆技术措施可分为两类:一类是预防性技术措施,即通过控制和消除爆炸发生条件,以减少或避免爆炸事故发生;另一类是防护性措施,即通过控制

爆炸破坏力的形成,以减轻爆炸事故造成的灾害程度或避免爆炸事故的发生^[8]。可见,惰化防爆既是一种预防性技术措施,又是一种防护性技术措施。目前,惰化防护措施主要包括气相惰化和惰性粉体惰化两种。

2.2.1 气相惰化技术

由于降低氧气含量不仅可以避免粉尘层火灾事故,也能抑制粉尘云的爆炸事故,并且在我国现行防爆标准中有所应用^[9];所以,气相惰化的研究倍受关注。目前,气相惰化主要有真空惰化、压力惰化、压力-真空联合惰化、使用惰性混合气体进行真空和压力惰化、吹扫惰化以及虹吸惰化^[4]。气相惰化介质主要有氮气、二氧化碳、热风炉尾气和惰性气体(如氩气、氦气等);可根据粉尘加工过程中对粉尘洁净要求不同而采用不同的惰性介质。对粉尘爆炸惰化抑爆效能参数主要包括爆炸猛度参数(最大爆炸压力与压力上升速率)和爆炸感度参数(着火温度、粉尘云最低着火温度和粉尘云爆炸下限)。

学者们主要采用气相惰化对金属粉尘、淀粉、药物等粉尘的惰化防护进行了研究。

当氧气体积分数低于 8% 时^[10],有机粉尘与空气混合物不会发生爆炸。从经济角度出发,李好等^[11]对氮气 N₂、二氧化碳 CO₂、氩气 Ar 3 种气体的粉尘爆炸惰化能力进行了试验考查,结果表明:氮气是粉尘爆炸防护最为经济有效的惰性气体,当粉尘浓度处于危险浓度时需要更多的氮气才能达到惰化的要求,所以在工业过程中,应尽量避免粉尘处于危险浓度附近。为节省惰性气体在工业生产过程中的应用,张金锋等^[12]采用 20 L 标准爆炸球通过冲入氮气来降低氧气体积分数,在爆炸球内氧气体积分数降低至 10.93% 时,粉尘未发生爆炸,继续降低氧气体积分数,抑爆效果更加明显,故推荐采用氮气来控制有机粉尘爆炸风险。

金属粉尘中,对于镁粉的惰化防护研究较多,为研究不同惰性环境下镁粉尘云最低着火温度,起初,Ryzhik^[13]研究了两种环境下用激波诱导镁粉着火的延迟时间,得出空气条件下为 1.1 ms,氧氩混合气体下为 1.3 ms。Ryzhik^[14]研究了氮气对铝镁合金粉尘最低着火环境温度的影响,结果表明:氧浓度较低、镁含量较高时,氮化反应才明显发挥作用。

不同惰性气体惰化效应间的比较仍然是惰化防护的热点,如钟英鹏^[15]使用氮气 N₂、氩气 Ar 和二氧化碳 CO₂ 在 Siwek 20 L 爆炸球中对镁粉爆炸惰化后的爆炸特性做了系统的试验,试验结果表明:氮气、氩气和二氧化碳均对镁粉具有一定的惰化能力,

通过综合比较 3 种惰性气体对极限氧浓度的影响,发现镁粉的 D₅₀ 为 104 μm 时,采用二氧化碳惰化效果最佳,氮气其次,氩气最差;而镁粉的 D₅₀ 为 47 μm 时,氮气的惰化效果最佳,二氧化碳次之,氩气最差。在惰性条件下氧浓度对爆炸猛度参数的影响方面,其试验结果与苑春苗^[9]的试验结果基本相同,即氧的体积分数为 15.3% 时,镁粉体积质量大于 500 g/m³,氮气、氩气惰化时的最大爆炸压力及最大爆炸压力上升速率均低于空气条件下的数值;随着氧浓度的降低,两者的惰化效果均在增加,但氩气惰化效果的增加较氮气显著。有关氮气、氩气气氛下对镁粉尘的最低着火温度的影响进行的试验研究表明:氮气对镁粉尘层的惰化性能略弱于氩气,虽然两者惰性性能相近,惰化机理却不同^[16],前者是通过增加氮气,降低氧含量的化学反应速率,减弱总体的化学放热速率;而后者是通过降低氧气和氮气的化学反应速率,减弱总体的化学反应速率。所以,在有镁粉参与的行业中,采用氩气作为保护气更为合适。

目前,国内外气相惰化对粉尘爆炸抑爆方面,主要集中在惰化条件下对粉尘爆炸烈度参数的影响,而在气相惰化对粉尘爆炸火焰过程特性参数影响方面的研究较少,需要加强这方面的研究,可以借助试验和数值模拟相结合的方法研究惰化气体对粉尘爆炸火焰传播过程的影响。因其在工程应用中较少,单一的惰化技术无法满足当前粉尘爆炸防护需求,局部惰化与其他防护措施科学经济的组合是研究粉尘爆炸气相惰化防护的必然趋势。

2.2.2 惰性粉尘惰化技术

为了揭示惰性粉尘在管道内对工业粉尘爆炸的惰化抑制作用,特别是火焰传播过程的细微结构特性和特征参数,管道惰化抑爆试验装置是在国际上常用的哈特曼管试验装置的基础上进行改造、创新而形成的。

粉尘爆炸管道装置开展的惰性抑爆试验结果表明:惰性粉尘对粉尘爆炸具有一定的抑制作用,相同的惰性介质对不同工业粉尘惰化抑爆效能不同,不同粒度的惰性介质对工业粉尘惰化抑爆效能不同,不同惰化介质对工业粉尘的惰化机制也不同。常用的惰化效能抑爆参数包括爆炸压力、压力上升速率、爆炸下限、粉尘云最低着火温度,而有关惰性粉尘对粉尘火焰传播特性影响的研究较少^[17]。

2.2.2.1 管道内惰性粉尘惰化抑爆

李亚男^[18]研究了磷酸二氢铵和碳酸钙对 3 种不同金属粉尘的爆炸抑制作用,惰化抑爆效能是以火焰的尺寸为衡量标准,试验结果表明:相同粒径的

磷酸二氢铵和碳酸钙对金属粉尘的抑爆效果不同,前者要优于后者,且随着磷酸二氢铵粒径的不断减小,金属粉尘完全惰化所需的质量分数不断减小。在 3 种金属粉尘中,磷酸二氢铵对铝粉的抑爆效果最好,镁粉次之,对钛粉的抑爆效果最差。

学者对铝粉爆炸的惰化技术进行大量的试验,如陈曦等^[19]研究了 3 种不同惰化机制的惰性粉尘对铝粉火焰传播的惰化抑制效果,得出碳酸氢钠、碳酸钙、磷酸氢二钠对铝粉爆炸具有抑制作用,具体体现为火焰亮度、火焰速度、火焰温度均减小,碳酸氢钠惰化效果最好,碳酸钙、磷酸氢二钠对铝粉爆炸惰化效果相当。王玉杰等^[20]也证实了碳酸氢钠能显著降低火焰强度,同时碳酸氢钠具有钝化铝粉尘云团的作用,降低了粉尘的活性,减缓化学反应速率,钝化火焰前端。碳酸氢钠对铝粉火焰温度的抑制作用与其粒径成反比关系;碳酸氢钠粒径越小,对铝粉火焰传播速度的惰化抑制效果越好。李立东^[21]的研究得出:碳酸钙的质量分数的增加对惰化铝粉爆炸抑制作用中的爆炸压力上升速率要比爆炸压力更敏感,并且对火焰速度有减小的作用。对比分析碳酸钙、碳酸氢钠和磷酸氢二钠对铝粉的惰化效果,碳酸氢钠惰化效果最好,碳酸钙与磷酸氢二钠相当。

2.2.2.2 20 L 爆炸球装置内惰性粉尘惰化抑爆

学者们采用 20 L 爆炸球进行了工业粉尘惰化抑爆试验研究,开展惰化抑爆试验较早的粉尘是煤粉,常见于煤矿开采时在巷道内撒布岩粉来惰化沉积煤粉的二次爆炸。人们进行了点火能量大小、惰化剂种类、惰化剂粒度、惰化剂浓度对煤粉爆炸惰化作用影响的试验研究。碳酸盐对煤尘爆炸具有惰化作用,在惰化效果中碳酸盐的比热容占主导,比热容越大,吸热性越强,即对粉尘起到了冷却作用,加速了燃烧过程中的热量消耗,阻碍热量向火焰阵面前的传递,继而抑制火焰的传递和发展。试验研究表明,碳酸盐惰化剂质量分数达到 60% 时^[22],最大爆炸压力迅速下降,在煤尘爆炸惰化效果方面,碳酸钙要比碳酸氢钠和碳酸氢钾的抑制效果好。煤粉挥发分会影响碳酸钙的抑爆效果,碳酸钙对无烟煤的爆炸压力上升速率惰化效果明显高于有烟煤^[23]。由于磷酸二氢盐具有分解温度低、受热分解速率快等特点,黄寅生等^[24]选用磷酸二氢铵 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、磷酸二氢钾 KH_2PO_4 、磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 对煤粉尘爆炸猛度参数的影响进行了试验研究,并与相同条件下的二氧化硅 SiO_2 的抑爆效果作对比,研究粉体质量浓度、粉体粒径和点火能量对抑爆效果的影响,得出煤粉尘质量浓度对 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 抑制效果的影响

较 SiO_2 、 KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的大。在抑制煤尘爆炸的爆炸压力上升速率方面,粉尘质量浓度对 SiO_2 粉体抑制效果的影响较磷酸二氢盐干粉大,抑爆剂对煤尘爆炸的惰化作用几乎不受自身粒径影响,在同种抑爆剂的作用下,点火能量增大,煤尘爆炸烈度参数的下降幅度减少。当煤尘爆炸威力较小时,抑爆剂粉体质量浓度的变化对煤尘的爆炸压力和压力上升速率影响较明显,相关试验发现,磷酸二氢铵质量分数为 30% 时^[23],继续添加磷酸二氢铵,爆炸压力缓慢减小,惰化效能减弱。氢氧化铝分解反应的吸热量可高达 1 967.2 kJ/kg,要高于碳酸钙的物理吸热量,所以在同等添加量下,氢氧化铝表现出更高的惰化效力。所以,根据目前的研究成果,惰化介质对煤粉爆炸抑爆惰化的效果由强到弱依次为磷酸盐中磷酸二氢铵、氢氧化铝、碳酸钙、碳酸氢钠、碳酸氢钾。

金属粉尘中,镁粉属于高爆性粉尘,镁粉会和部分碳酸盐惰化剂分解出来的气体发生放热反应,所以,在碳酸盐中碳酸氢钠等易分解的抑爆剂不能起到惰化作用,反而有助于镁粉爆炸的发展^[25]。碳酸钙、氯化钠主要通过物理导热方式惰化镁粉,由于碳酸钙相对于氯化钠导热率和比热容较小,所以氯化钠对镁粉的惰化效果要比碳酸钙好^[26],硼砂和镁粉的混合物发生燃烧后,硼砂可以在镁粉颗粒表面生成薄膜,从而隔离镁粉与氧气的反应,中断了燃烧反应,从而达到惰化的效果。综上所述,惰性剂对镁粉粉尘爆炸的惰化效果由强到弱依次为硼砂、氯化钠、碳酸钙。

由于单一惰化剂的惰性效果差,容易污染原料,运用复配的方法研究惰化剂之间是否有协同增效功能。任一丹等^[23]发现磷酸二氢铵与碳酸钙两者间会发生抑制燃烧爆炸的附加反应,存在明显协同效应;而碳酸钙与氢氧化铝复配却未表现为协同效应。原因在于两者之间未发生抑制燃烧爆炸的附加反应。所以判断两种惰化剂是否具有协同作用,关键在于会不会发生抑爆燃烧爆炸的附加反应。张镓等^[27]发现在氢氧化铝和碳酸钙添加量未达到完全惰化需求量时,二者的惰化效果曲线增长趋势类似,都随着添加量的增加而线性增加;所以采用两者的 Δp_{\max} 的累计值之和作为比较基准,得出氢氧化铝与碳酸钙的质量比为 8 : 1 时混合制得的复合惰化剂 CA 表现出更好的惰化效果,且 CA 对于烟煤粉的完全惰化需求量(FIC)低于氢氧化铝和碳酸钙。

目前,对惰化抑爆效能的判定标准仍然不统一,关于惰化剂对粉尘爆炸火焰传播特性的影响的试验

研究和数值模拟研究很少,由于粉尘爆炸惰化机理还没有完全被认知,需要运用试验和数值模拟结合的方法研究惰化剂对粉尘爆炸的惰化效果及影响因素。研发高效惰化剂仍然是现阶段粉尘爆炸惰化抑爆的重要任务,需要对惰化剂的惰化效果进行分级。

2.3 泄爆防护技术

泄爆是在容器上设置一定面积的泄爆装置,该装置的动作压力远小于容器的破裂压力,一旦容器内发生爆炸,爆炸超压达到泄爆装置的动作压力时,泄爆装置就会发生破裂,将容器内的压力波、火焰、已燃及未燃粉尘泄放到容器外部,使得容器内的最大爆炸压力低于容器的破裂压力,从而确保爆炸容器安全^[28]。由于泄爆防护技术具有技术成本低和较易实现等特点,泄爆防护是目前防护措施中应用最为广泛的方法。

为能降低容器内爆炸压力,泄爆面积的确定和泄爆导管的选取是泄爆设计的重点。如何选择泄爆面积来确保最大泄爆压力不会超过容器最大许用压力是爆炸的基本问题;然而,粉尘特性、初始湍流程度、容器形状、泄爆条件等因素都会影响泄爆设计。泄爆机理还未被完整认知^[29]。目前,关于泄爆面积的计算,还没有完善的理论方法,但是设计标准如 NFPA 68^[30]、EN14491^[31] 推荐的经验公式已被广泛地应用。Ismaila^[32]、Alberto^[33] 等学者对比了两种方法在使用范围内的预测精度,发现这两种是基于承载能力较低的装置的泄爆试验数据拟合得到的,适合于泄爆装置动作压力 p_{stat} 和最大泄爆压力 p_{red} 低的情况;喻健良等^[34] 进行了高静态动作压力下的爆炸泄放试验,并将试验值与 NFPA 68 和 EN 14491 计算值进行对比,发现在预测高静态动作压力下的泄爆面积时,NFPA 68 预测精度较好,且数值稳定。

随着连通容器内粉尘爆炸成为研究热点,有关它的泄爆也得到了关注。国外学者 Holbrow^[35-36]、Lunn^[37] 等针对体积范围 2 ~ 20 m³ 的圆柱形容器,开展了在长为 15 m、半径分别为 0.15、0.25、0.5 m 的管道组合的连通容器中粉尘的爆炸与泄爆试验,分析了长度、泄爆面积等因素对连通容器内粉尘爆炸与泄爆的影响。

王健^[38] 研究了粉尘反应性、点火位置、初始湍流和粉尘浓度等因素对大型管道连通容器系统最大泄爆压力的影响,结果表明:当点火源在容器泄爆口附近时,其最大泄爆压力 $p_{\text{red,max}}$ 的值最小;相反,在初始容器底部时,其最大泄爆压力 $p_{\text{red,max}}$ 的值最大。

由于直接泄爆会出现泄爆火焰和冲击波的危害,被泄放火焰在泄放口点燃未燃粉尘,容易发生二

次爆炸,进而造成二次伤害。采用泄爆管可以缓解这一问题,然而泄爆管的存在增大泄爆压力损失现象,导致爆炸压力上升^[39];为预测导管泄爆容器压力峰值,张庆武等^[40] 采用支持量机算法对压力峰值与各因素的内在关系进行了研究,建立导管泄爆容器压力峰值预测模型,其预测能力优于经验公式。

关于导管泄放粉尘爆炸过程中容器及导管内的压力特性,重点探索泄放过程中二次爆炸发生的条件及其规律,结果表明:管内压力波首先卷起未燃粉尘,随后火焰点燃产生二次爆炸。当泄爆管长度 $L_T \geq 1\ 500\ \text{mm}$,粉尘质量浓度 $\rho \geq 500\ \text{g/m}^3$ 时^[41-42],泄爆管内发生二次爆炸的概率很高,当导管内存在粉尘时会加大二次爆炸强度,也会增大容器内二次压力峰值;泄放导管越长,粉尘质量浓度越大,二次爆炸压强越大。

目前,泄爆防护的研究主要集中在泄爆面积和泄爆管对泄爆压力的影响,由于泄放口径较大,容易出现二次爆炸,泄放出来的高温火焰和未完全燃烧的粉尘给周边环境带来潜在的威胁,不利于泄爆技术的发展;但目前无焰泄压设计研究很少,泄爆膜既可以阻止未燃粉尘和火焰从泄放口喷出,又可以使装置内部的压力波泄放出来,进而保护了容器。可以通过研究泄爆膜材质对泄爆过程中二次爆炸以及火焰影响,寻找一种既能有效消除无焰泄放过程中二次爆炸的发生,又能保证最大泄爆压力的数值不会很高的经济材料,是无焰泄压设计的重点。

2.4 自动抑爆技术

自动抑爆技术是在火焰传播显著加速的初期通过喷洒抑爆剂来抑制爆炸的作用范围及猛烈程度的一种爆炸控制技术。

Amrogowicz 等^[43] 对磷酸二氢铵和碳酸氢钠在惰化与抑制上的效力方面进行对比,得出磷酸二氢铵在惰化方面比碳酸氢钠更有效,而碳酸氢钠在抑制爆炸方面比磷酸二氢铵更有效;谢波等^[44] 认为抑爆技术研究主要涉及爆炸探测方式、抑爆剂及数量、抑爆器喷撒技术参数 3 方面的问题;左前明等^[45] 对粉尘抑爆剂在煤矿中的应用及研究现状进行了分析,提出了抑爆剂分为惰化剂和抑制剂两种,并且综述了自动抑爆的物理作用机理、化学作用机理和物理化学混合作用机理。

目前,抑爆技术是一种更为积极有效的防爆方法,在粉尘爆炸过程中,高效的抑爆剂能有效吸收由爆炸产生的热量,阻碍火焰的传播和蔓延,起到既能抑制粉尘爆炸、又能有效降低粉尘爆炸强度的作用,所以抑爆是粉尘爆炸防护措施研究的热点。通过试

验研究影响抑爆效果的因素,寻找达到最佳抑爆效果的条件,也需要建立完整的爆炸抑制过程的数值模型,为爆炸抑制设计提供指导作用。

3 结语

总之,粉尘爆炸的研究要比气体爆炸复杂得多。我国粉尘爆炸的研究尚处于起步阶段,粉尘爆炸防护措施的试验与数值模拟,对有效地预防和减轻此类工业灾害性事故具有重要的现实意义和社会价值。本文中,总结了国内外粉尘爆炸惰化、泄爆、抑爆的研究进展,分析目前研究的不足,提出了未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] CSB. Investigation report;combustible dust hazard study: 2006-H-1[R]. U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board(CSB),2006.
- [2] 张小良. 粉尘爆炸的四个误区[J]. 现代职业安全, 2014(11):51.
- [3] VORDERBRUEGGEN J B. Imperial sugar refinery combustible dust explosion investigation[J]. Process Safety Progress,2011,30(1):66-81.
- [4] 张二强,张礼敬,陶刚,等. 粉尘爆炸特征和预防措施探讨[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(2):88-92.
ZHANG E Q, ZHANG L J, TAO G, et al. Preliminary study on characteristics and preventive measures of the dust explosion[J]. Journal of Safety Science and Technology,2012,8(2):88-92.
- [5] 薄涛,谭迎新. 粉尘爆炸事故预防及其扑救对策研究[J]. 武警学院学报,2008,24(4):46-49.
BO T, TAN Y X. The solutions to preventing and rescuing dust explosions[J]. Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy,2008,24(4):46-49.
- [6] 刘邦先,周乃如,朱凤德. 粮食粉尘爆炸及防护[J]. 粮食与油脂,2005(1):10-12.
LIU B X, ZHOU N R, ZHU F D. Grain dust explosion and dust explosion suppression[J]. Journal of Grain and Oil,2005(1):10-12.
- [7] 张一博,谭迎新. 激波诱导铝粉二次爆炸的试验研究[J]. 中国安全科学学报,2012,22(10):61-64.
ZHANG Y B, TAN Y X. Experimental study on secondary explosion of aluminum dust detonated by shock wave[J]. China Safety Science Journal,2012,22(10):61-64.
- [8] 王海福,冯顺山. 防爆学原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:41-43.
- [9] 苑春苗. 惰化条件下镁粉爆炸性参数的理论与实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2009:4-5.
- YUAN C M. Theoretical and experimental study on explosibility parameters of Mg powers in inerting conditions[D]. Shenyang:Northeastern University,2009:4-5.
- [10] 顾兆林. 风扬粉尘:近地层湍流与气固两相流[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [11] 李好,张镔,杜兵,等. 充氮环境下淀粉爆炸特性的实验研究[J]. 消防科学与技术,2016,35(2):166-170.
LI H, ZHANG T, DU B, et al. Experimental investigation of starch dust explosion characteristics in nitrogen atmosphere[J]. Fire Science and Technology,2016,35(2):166-170.
- [12] 张金锋,刘鑫. 氮气惰化抑制 7-氨基头孢烷酸粉尘爆炸试验研究[J]. 安全与环境学报,2016,16(3):42-45.
ZHANG J F, LIU X. Research on the nitrogen inerting suppression of explosion of 7-ACA powder[J]. Journal of Safety and Environment,2016,16(3):42-45.
- [13] RYZHIK A B. Conditions of the thermal explosion of disperse magnesium in media with with an insufficiency of oxidizer [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves,1978, 14(3):394-396.
- [14] RYZHIK A B. Ignition of suspensions of aluminum-magnesium alloy powders in nitrogen-oxygen media [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves,1978,14(2):258-260.
- [15] 钟英鹏. 镁粉爆炸特性实验研究及其危险性评价[D]. 沈阳:东北大学,2008.
ZHONG Y P. Experimental research on magnesium dust explosion and its risk assessment[D]. Shenyang:North-eastern University,2008.
- [16] 苑春苗,李刚,李畅. 惰化气氛下镁粉尘的最低着火温度研究[C]//2010(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 沈阳:东北大学,2010:749-753.
YUAN C M, LI G, LI C. Minimum ignition temperature of magnesium powers in inerting conditions[C]//Proceedings of 2010(Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology. Shenyang:Northeastern University,2010:749-753.
- [17] AMYOTTE P R, PEGG M J, KHAN F I, et al. Moderation of dust explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2007,20(4/5/6):675-687.
- [18] 李亚男. 磷酸二氢铵对金属粉尘的爆炸抑制研究[D]. 太原:中北大学,2015.
- [19] 陈曦,陈先锋,刘晔亚. 惰化条件下铝粉爆燃火焰传播特性研究[C]//2015 消防工程技术国际学术研讨会论文集. 天津:公安部科技信息化局、公安部天津消防研究所,2015:10.
- [20] 王玉杰,陈曦,陈先锋,等. 碳酸氢钠粉体粒径对铝粉

- 火焰传播特性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 53-58.
- WANG Y J, CHEN X, CHEN X F, et al. Effect of sodium bicarbonate particle size on characteristics of aluminum dust flame propagation[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(3): 53-58.
- [21] 李立东. 铝粉爆炸泄放及抑制实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- LI L D. Experiments on explosion venting and suppression of aluminum dust [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [22] 伍毅, 袁旌杰, 蒯念生等. 碳酸盐对密闭空间粉尘爆炸压力影响的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 92-96.
- WU Y, YUAN J J, KUAI N S, et al. Effect of carbonates on dust explosion pressure in closed vessel[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(10): 92-96.
- [23] 任一丹, 刘龙, 袁旌杰, 等. 粉尘爆炸中惰性介质抑制机理及协同作用[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(2): 158-162.
- REN Y D, LIU L, YUAN J J, et al. Inhibition mechanisms and synergy effects of solid inertants in dust explosion[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(2): 158-162.
- [24] 黄寅生, 戴晓静, 曹卫国. 磷酸二氢盐与 SiO_2 粉体抑制煤尘爆炸的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(3): 57-61.
- HUANG Y S, DAI X J, CAO W G. Experimental study on coal dust explosion suppression with dihydrogen phosphate salts and SiO_2 powders[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(3): 57-61.
- [25] 蒯念生, 李建明, 陈志. 基于本质安全原理的镁粉爆炸风险控制研究[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(5): 369-372.
- KUAI N S, LI J M, CHEN Z. Study on the risk control of magnesium dust explosion based on inherent safety principles[J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(5): 369-372.
- [26] 付羽, 李刚, 孙飞, 等. 镁粉粉末惰化性能实验研究[C]//2008(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 沈阳: 东北大学, 2008: 602-607.
- FU Y, LI G, SUN F, et al. Experimental study on magnesium powder inerting performance [C]//Proceedings of 2008 (Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology. Shenyang: Northeastern University, 2008: 602-607.
- [27] 张铤, 李好, 黄卫星. 粉尘爆炸复合型固体惰化剂的实验研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(7): 910-912.
- ZHANG T, LI H, HUANG W X. Experimental investigation of compound solid inertant on dust explosion[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(7): 910-912.
- [28] 闫兴清. 高静态动作压力下粉尘爆炸泄放特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- YAN X Q. Characteristics of dust explosion venting at elevated static activation overpressures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [29] AMYOTTE P R, ECKHOFF R K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: an overview[J]. Journal of Chemical Health & Safety, 2010, 17(1): 15-28.
- [30] National Fire Protection Association, USA. Standard on explosion protection by deflagration venting; NFPA 68 [S]. USA, 2007.
- [31] European Committee for Standardization. Dust explosion venting protective systems; BS EN 14491—2006 [S]. Brussels: British Standard Institute, 2006.
- [32] ISMAILA A, ANDREWS G E, ABDULLAHI I, et al. Venting as a means of mitigating explosions: the need to revised European and USA (NFPA68) guidance for explosion venting[J]. Archives of Applied Science Research, 2012(1): 155-168.
- [33] TASCÓN A, AGUADO P J, RAMÍREZ A. Dust explosion venting in silos: a comparison of standards NFPA 68 and EN 14491 [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(2): 204-209.
- [34] 喻健良, 闫兴清. 高静态动作压力下粉尘爆炸泄放标准的可靠性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(9): 1316-1320.
- YU J L, YAN X Q. Reliability of dust explosion venting standards under elevated static activation overpressures [J]. Journal of Northeastern University (Nature Science), 2015, 36(9): 1316-1320.
- [35] HOLBROW P, LUNN G A, TYLDESLEY A. Dust explosion protection in linked vessels: guidance for containment and venting[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, 12(3): 227-234.
- [36] HOLBROW P, ANDREWS S, LUNN G A. Dust explosions in interconnected vented vessels [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 91-103.
- [37] LUNN G A, HOLBROW P, ANDREWS S, et al. Dust explosions in totally enclosed interconnected vessel systems[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 45-58.
- [38] 王健. 粮食粉尘爆炸的实验研究与数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- WANG J. Experimental investigation and numerical simulation of grain dust explosion [D]. Shenyang: North-

- eastern University, 2010.
- [39] KASMANI R M, ANDREWS G E, PHYLAKTU H N, et al. Vented gas explosion in a cylindrical vessel with a vent duct[C]//SKEVIS G. Proceedings of the 3rd European Combustion Meeting. Greece; Greek Section of the Combustion Institute, 2007.
- [40] 张庆武, 蒋军成, 喻源, 等. 基于支持向量机的导管泄爆容器压力峰值预测[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(6): 748-753.
- ZHANG Q W, JIANG J C, YU Y, et al. Prediction of peak pressure in the explosion-vented vessel with a venting duct based on support vector machine[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(6): 748-753.
- [41] 喻健良, 闫兴清, 李迪. 采用泄爆管的粉尘爆炸在泄放过程中的压力特性[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(6): 669-672.
- YU J L, YAN X Q, LI D. Pressure characteristics in dust explosion relief process by using a relief pipe[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(6): 669-672.
- [42] 闫兴清, 喻健良, 李迪. 导管泄放粉尘爆炸过程中二次爆炸现象研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2): 219-222.
- YAN X Q, YU J L, LI D. Secondary explosion during aluminum dust explosion venting with a relief duct[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(2): 219-222.
- [43] AMROGOWICZ J, KORDYLEWSKI W. Effectiveness of dust explosion suppression by carbonates and phosphates[J]. Combustion & Flame, 1991, 85(3): 520-522.
- [44] 谢波, 王克全. 工业粉尘爆炸抑制技术研究现状及存在的问题[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(1): 13-15.
- XIE B, WANG K Q. Study status of industrial dust explosion suppression techniques and existent problems[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000, 27(1): 13-15.
- [45] 左前明, 程卫民, 汤家轩. 粉体抑爆剂在煤矿应用研究的现状与展望[J]. 煤炭技术, 2010, 29(11): 78-80.
- ZUO Q M, CHENG W M, TANG J X. Current status and prospects of application and research of power coal mine explosion suppression agent[J]. Coal Technology, 2010, 29(11): 78-80.