

粉尘爆炸研究方向初探

郭汉彦* 陈立红**

(中国科学院力学研究所)

【摘要】 本文从现有的对粉尘爆炸特性的认识出发,分析了粉尘云特性,粉尘爆炸与爆轰,湍流对反应波阵面的加速几个方面,提出了近期应该在粉尘爆炸参数测试技术标准化、粉尘指数 K_{st} 、粉尘爆燃转炸的过程、泄炸机理以及控炸装置和控炸设计规范等方面的研究上下功夫,以便更有效地利用现有的试验条件,更快、更多、更好地解决工程实际问题。

【关键词】: 粉尘爆炸 炸燃 炸轰 湍流 控炸

一、引言

我国工业每年产生可燃粉末数亿吨。其中粉尘产品占 70~80%,其余为伴生粉尘。产品中煤粉产量最大,各种火电锅炉、喷煤炼铁及其他窑炉年用煤粉 1.8~2.1 亿吨。粮食、饲料粉居第二位,年产 1.2 亿吨。其次,煤矿、冶金、交通、纺织、轻工、医药、火炸药、木材加工等几乎所有行业每年都会产生几万吨至几千万吨的可燃性粉末产品或伴生粉尘。当可燃粉尘以一定浓度悬浮于空中,遇火源时就可能发生局部爆炸。若条件合适,局部爆炸有可能向四周传播,引起系统爆炸。调查表明,我国每年发生粉尘爆炸的频率为:局部爆炸 150~300 次,系统爆炸 1~3 次,且表现为增长趋势。仅能源、冶金、交通、纺织四个部门的重大粉尘爆炸事故的直接损失、善后处理、停减产损失和重建投资就达 4~5 亿元。由此引起的劳动争议、队伍失稳,影响生产,也影到社会的安定。

因此,从实际生产的要求出发,迫切需要发展粉尘爆炸的防护、治理及控制技术。

目前,国内外关于粉尘爆炸的研究分为两方面:机理研究及应用技术。

机理研究中很重要的一部分是粉尘爆炸特性参数。粉尘爆炸参数包括反映其点火特性的最小点火能、着火温度和爆炸浓度下限以及反映其爆炸强度的在密闭容器中的最大爆炸压力和最大压力上升速率。实验所用容器容积一般为 20 升到 1 立方米。研究还包括颗粒燃烧特性、层流火焰、湍流影响及粉尘爆轰等。

应用技术是对实际生产工艺过程中所采用的防爆控爆措施。包括惰化、抑尘、泄爆、隔爆、抑爆等技术和装置。按其情况进行参数设计,某些典型情况需作大型模拟试验。

由于粉尘爆炸是不定常的、气固两相湍流流动的化学反应动力学问题,非常复杂,因此在研究中存在许多问题未搞清楚,使得将实验室中的小尺度试验得到的结果放大应用到工程实际尺寸中去时,存在很大偏差。根据现有的研究结果,我们首先综合介绍一下粉尘爆炸特性,并从实际生产的要求出发,提出近期内需要解决的几个问题。

二、粉尘爆炸的特性

* 全国安全生产委员会事故调查与隐患评估专家、中国科学院力学研究所研究员。

** 中国科学院力学研究所助理研究员。

粉尘爆炸的特性主要包括粉尘云的特性、粉尘云爆炸的二重性即可能产生爆燃也可产生爆轰，湍流对粉尘爆燃波的加速作用等。

(一) 粉尘云的特性

粉尘云的特性有如下几个方面。

1. 粉尘云中颗粒的分散性

粉尘云为固体微粒与空气的混合物。其颗粒是分散的，下面对颗粒的间距做一估算。

设固体颗粒均匀地悬浮于空气中，并设所有的颗粒均为直径相同的球形颗粒，以 d_p 为其直径， δ_p 为粉尘浓度， ρ_p 为颗粒材料密度，则可得到单位体积中颗粒数 n 为：

$$n = \frac{6\delta_p}{\pi\rho_p d_p^3}$$

一般认为当可燃粉尘粒径小于 420 微米时具有爆炸危险，其爆炸下限位于几十克/米³ 至几百克/米³，上限为几公斤/米³ 左右。设颗粒材料密度为 1 克/厘米³ 时，有下列数值。

δ_p (g/m ³)	d_p (μm)		
	50	100	200
50	7.64×10^8	9.55×10^7	1.19×10^7
100	1.53×10^9	1.91×10^8	2.39×10^7
500	7.64×10^9	9.55×10^8	1.19×10^8
1000	1.53×10^{10}	1.91×10^9	2.39×10^8

若以 L 表示颗粒中心间距离，可得

$$L = d_p \sqrt[3]{\frac{\pi\rho_p}{6\delta_p}}$$

对应于颗粒密度 $\rho_p = 1$ 克/厘米³，可得下列数表。

δ_p (g/m ³)	d_p (μm)		
	50	100	200
50	1.09	2.19	4.37
100	0.87	1.74	3.47
500	0.51	1.02	2.03
1000	0.40	0.81	1.61

可见在粉尘爆炸出现的浓度范围内，颗粒的中心距位于零点几毫米至几毫米之间。

2. 粉尘云中颗粒与空气的密度比

空气在常温常压下的密度是 0.00129 克/厘米³，粉尘颗粒的材料密度在 1 克/厘米³ 左右，二者相差约一千倍。

在静止时，由于颗粒材料密度远大于空气，所以大多数颗粒由于重力作用而产生沉降，只有少数颗粒（一般直径小于 5 微米）才能长久悬浮于空气中。当空气具有运动速度

时, 由于湍流的影响使颗粒悬浮于空中。因此实际中要注意平时以堆积形式存在的粉尘, 它可能会被扬起而形成爆炸。

3. 粉尘云中颗粒与空气的体积比

粉尘云中固体颗粒所占体积与粉尘云气固两相混合物所占体积之比:

$$\zeta = \frac{\delta_p}{\rho_p}$$

颗粒材料密度取为 1 克/厘米³, 则粉尘浓度为 50 克/米³ 时, ζ 为 5×10^{-6} ; 若 δ_p 达 1000 克/米³, 则 ζ 为 10^{-3} 。由此可见即使粉尘浓度已高达 1000 克/米³, 即已达到爆炸上限的量级, 其颗粒所占体积仍只不过为总体积的千分之一。所以在粉尘爆炸时, 可完全不必考虑粉尘的存在对空气体积变化的影响。这一点与可燃气体不同。可燃气体在爆炸范围内时, 其体积可占总体积的百分之几到十分之几, 因而必须加以考虑。

4. 粉尘云中粉尘与空气质量比

一立方米的空气在常温常压下重 1.29 公斤。若粉尘浓度为 500 克/米³, 则粉尘质量与混合物总质量之比为 0.28。若粉尘浓度为 1000 克/米³, 则比值为 0.44。从这些数值可以看到, 尽管粉尘云中粉尘所占体积很小, 但其所占质量却不小。

5. 粉尘云中粉尘与空气中氧气进行反应的化学平衡比。

当可燃粉尘与空气中的氧气恰好完全反应时, 此粉尘浓度称为化学比浓度。一般粉尘爆炸威力最大时的浓度为其化学比浓度的 2~3 倍。当粉尘浓度大于化学比浓度时, 将发生不完全反应。例如某有机粉尘或煤粉发生爆炸时, 常会产生大量 CO, 而非完全反应生成 CO₂。CO 可能使人员窒息伤亡, 也可能成为次生火灾的燃烧源。

以上我们进行了粉尘云中粉尘颗粒与空气的性质比较, 从而可较清楚地了解到粉尘云的一些特点。在对粉尘爆炸进行研究时, 应特别注意这些特性。

(二) 粉尘云的炸燃与爆轰

爆燃与爆轰是两种不同的爆炸类型。

对于可燃介质反应阵面 (定常条件) 存在以下关系:

$$\rho_1 (V_1 - D) = \rho_2 (V_2 - D)$$

$$p_1 - p_2 = \rho_1 (D - V_1) (V_1 - V_2)$$

$$\left[E_2 - E_1 + \frac{(D - V_2)^2 - (D - V_1)^2}{2} \right] \rho_1 (D - V_1) = \rho_1 (D - V_1) - p_2 (D - V_2)$$

式中 E 表示内能, 为温度 T 和密度 ρ 的函数。用 Q 表示燃烧热, 则上式可简化为

$$E_2(T_2, \rho_2) - E_2(T_1, \rho_1) = Q + \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_1 - V_2)$$

加上爆炸产物状态方程

$$f(P_2, V_2, T_2) = 0$$

和自持定常爆炸的 C-J 条件, 便有两种不同类型的解——爆燃与爆轰。其区别如下。

1、对于爆轰而言, $P_2 > P_1$, $\rho_2 > \rho_1$, 即反应后不仅压力增加密度也增加。而对于爆燃而言, $P_2 < P_1$, $\rho_2 < \rho_1$, 即压力和密度都降低。

2、若 $V_1 = 0$, 即反应物初速为 0 时, 则有

$$P_2 - P_1 = \rho_1 V_2$$

对于爆轰, $P_2 > P_1$, 则反应阵面与反应生成物速度方向相同; 对于爆燃, $P_2 < P_1$, 二者速度方向相反。

3、爆轰的反应阵面对于其前未反应介质来说是超音速的, 而爆燃是亚音速的。

同一种类的粉尘发生爆炸时有可能产生爆燃也有可能产生爆轰。这是由初始条件及其前流动参数确定的。爆燃与爆轰的参数相差很远, 下表列举了一些进行对比

	爆燃	爆轰
波速 / 波前声速	0.0001~0.03	5~10
波后气流速度 / 波前气流速度	4~16	0.4~0.7
波后压力 / 波前压力	0.98~0.976	13~55
波后温度 / 波前温度	4~16	8~21
波后密度 / 波前密度	0.06~0.25	1.4~2.6

从上表看到, 爆轰的威力比爆燃强许多倍。从防护角度而言, 爆燃是可防护的, 而爆轰几乎是不可防护的。现已观察到某些粉尘(铝粉、淀粉等)存在爆轰现象。研究粉尘爆燃转爆轰的过程, 其目的在于消除爆燃转爆轰的条件, 把爆炸限制在可防护的范围内。

(三) 湍流对粉尘爆燃波的加速作用

粉尘云的流动状态一般为湍流状态, 其流动轨迹不是象层流时互相平行, 而是互相缠绕。爆炸前由于气流本身流动不均匀性, 粉尘颗粒与空气混合的不均匀性以及流场中各种障碍物和粗糙表面造成了粉尘云两相流的湍流状态。发生粉尘爆炸时, 由于化学反应的不均匀, 各处能量释放的不均匀以及浮力等多种因素的影响, 粉尘云的湍流度更为加大。此时粉尘的爆燃反应阵面已不再是薄的光滑的面, 而是一个存在大的不规则起伏甚至抖动的面。在整个反应区内不再存在单一连续火焰面, 而是未燃区与已燃区相互混杂, 其反应面积远大于层流燃烧时的火焰阵面。由于化学反应和湍流的相互正反馈作用, 使得爆燃阵面加速, 其结果可能从初始点火时每秒几十厘米的速度迅速上升到每秒几百米, 甚至有可能达到每秒一千米以上从爆燃转为爆轰。至此可知粉尘云爆炸尽管其初始点火时其爆燃阵面的传播速度很低, 但由于粉尘爆炸过程中的湍流加速作用不可避免, 所以粉尘爆炸具有由低速低压的爆燃转变为高速高压的爆轰的危险性。

三、粉尘爆炸的研究方向

防止粉尘爆炸是采取消除其产生条件的方法进行的。粉尘爆炸具有三要素即可燃的悬浮粉尘、氧化剂和火源。消除其中任一条件, 都可达到防止爆炸的目的。例如采取抑尘装置消除悬浮尘, 用惰化来消除氧化剂以及消除火源的管理及技术措施等。因为许多粉尘是生产过程中的中间产品或最终产品, 要想消除粉尘几乎不可能; 许多工艺难以采用惰化保护; 消除火源也难以确保万无一失, 所以很多情况下控制粉尘爆炸措施就必不可少。

为了满足工业生产中控制粉尘爆炸的需要, 考虑到粉尘的爆炸特性, 针对粉尘爆炸的研究现状, 我们认为目前需要针对以下问题着重进行研究。

(一) 粉尘爆炸参数试验的标准化

粉尘爆炸参数中反映粉尘点火特性的有着火温度、最小点火能和爆炸浓度下限,反映爆炸强度的有最大爆炸压力和最大压力上升速率。试验结果及分析表明,爆炸参数不仅与粉尘本身的物理化学特性有关,而且有些参数还与实验所用容器形状、尺寸大小、喷尘装置及点火位置等因素有关。目前试验所用容器形状多为球型或长度等于直径的圆柱体,其容积近期多为20升,国际标准ISO规定采用一立方米。这种密闭器中测得的粉尘爆炸特性参数如何代表其它形状或大尺寸容器中的参数目前尚无定论。由于粉尘爆炸特性参数是控爆设计所依据的基本数据,所以粉尘爆炸参数试验测定方法需要标准化。

(二) 爆炸指数 K_{st}

因粉尘爆炸最大压力上升速率与试验装置的形状及容积有关,为进行比较,西德弗·巴尔特克纳西提出以容积为一立方米,形状为球形或直径等于高度的圆柱形容器中进行试验所测得的最大爆炸压力上升速率做为粉尘爆燃指数 K_{st} ,并利用 K_{st} 值对粉尘进行分类,做为泄爆设计的依据。为了与容积不同于一立方米的试验装置所取得的数据进行比较,参照0.004~20立方米的密闭容器内粉尘爆燃试验的结果,提出了粉尘爆炸近似符合的“立方根定律”,

$$K_{st} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} V^{\frac{1}{3}}$$

式中 V 为爆炸试验装置的容积, $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{max}$ 为该装置内测得的最大压力上升速率。

分析表明, $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{max}$ 既取决于容器形状与容器,又取决于粉尘爆燃阵面速度。立方根定律成立只适用于粉尘爆燃速度为常数时。由于湍流影响,粉尘爆燃速度随传播距离而增加,因此 K_{st} 值不是一个常数,而是随容器容积的增加而增加。对于可燃气体这一点已经得到试验证实,并得到了可供使用的数据。对于粉尘爆炸则同样需要证实并取得可供使用的数据,以便根据正确的 K_{st} 值进行泄爆设计。

(三) 粉尘爆燃转换为爆轰的过程

实际生产的工艺中,有四通八达的管道。粉尘爆炸在管内传播有可能由爆燃转为爆轰。在进行此类粉尘爆炸控制设计时,需知由爆燃转变为爆轰的条件以及相应的压力升高过程,以便在低速低压的爆燃转化为高速高压的爆轰之前采取措施及控制粉尘爆炸。

(四) 泄爆机理

泄爆是现在最广泛应用的一种防护措施。但对泄爆的研究偏重点往往在于泄爆装置本身,对泄爆机理研究得不够。即泄爆对场结构,冲击波传播以及反应波阵面传播的影响研究不够。现在国内应用的很多泄爆装置缺乏分析,总以为安装了比不安装强,这种观点有可能导致严重的后果。因此,加紧对泄爆机理的研究,有利于我国对粉尘爆炸防护工作的开展,取得社会、经济双重效益。

(五) 控爆装置及控爆设计规范

研制后投产的控爆装置已有一些,但使用还有些问题。一是价格偏高,二是性能不稳。研制控爆装置要考虑国家现有财力,注重经济实惠,并要性能可靠,消除误动作。

粉尘爆炸的控制目前尚无设计规范,给实际工作带来了困难。尽快综合研究成果,制订初步的设计规范是很必要的。随着工作的深入,规范亦可得到不断的完善。

四、结束语

粉尘爆炸是一门新兴的科学，有很多不成熟的方面。本文力图在现有研究的基础上，综合机理与应用两个方面，以使这门科学的研究成果早日应用到实际生产中去，达到安全防护的目的。本文作者希望能与各位专家以及实际生产单位的同行一同进行交流探讨。

参考文献

- 1 R·柯朗, K·O·弗里德里克斯,《超声速流与冲击波》,科学出版社,1986
- 2 弗·巴尔特克纳西特,《爆炸过程和防护措施》,化学工业出版社,1985
- 3 冯·卡门, H·W·埃蒙斯,《燃烧和爆轰的气体动力学》,科学出版社,1988
- 4 Irvin Glassman,《Combustion》,Academic Press,1977

THE DISCUSSION OF DUST EXPLOSION TOPICS

Guo Hanyan*, Chen Lihong**

Institute of Mechanics, Academia Sinica

Abstract

From the current knowledge of dust explosion, it is analysed the characteristic of dust cloud, dust deflagration and detonation, the flame acceleration by turbulence in this paper. It is proposed that it should concentrate on the standardization of experimental technique, the dust index K_{st} , the process from deflagration to detonation, the mechanism of vent, the device and design standard of controlling explosion etc., so that it can solve practice problems quickly, better and more by using the experimental devices on hand more effectively.

安全科学是保护人类身心健康、提高
 工效、促进国民经济发展的科学。

* Professor. ** Associate Professor.