

粉尘爆炸实验装置综述

魏育民 郭汉彦 李和娣 (中国科学院力学研究所)

提要 本文回顾了粉尘爆炸实验的各种装置,按粉尘颗粒和气流运动方式进行分类。同时,

对每一类实验装置的优缺点及各类实验装置所得结果的合理性进行了分析。

关键词 粉尘爆炸、实验装置

1. 前言

当可燃性粉尘悬浮在空气中时,如果有点火源存在,就可能发生爆炸。在一百多年前就发现了粉尘爆炸,随着工业的发展,粉尘爆炸事故也大大增加了。越来越多的粉末材料能涉及到粉尘爆炸的事故中。例如:煤、粮食、金属、塑料及化工等粉末原料。1977年美国的两次粮食事故,再次引起了人们对这一问题的关注。美国国家防火协会、美国矿务局、英国消防研究站、英国矿山安全研究所、英国帕尔默实验室以及日本劳动省产业安全研究所等等都对粉尘爆炸这一课题作了许多研究工作。研究的主要内容有:

(1) 粉尘材料的特性即粉尘材料的物理、化学性质。(2) 点火温度。(3) 最小点火能量。(4) 爆炸极限浓度。(5) 极限氧浓度。(6) 爆炸压力。(7) 压力上升速率。(8) 火焰或爆轰波速度及它的传布机理。(9) 泄压。

为此研制了各种实验装置,其目的是要在实验室条件下,在实验容器内造成尽可能均匀的、浓度可控的、初始扰动最小的悬浮在空气中的粉尘云。

2. 装置分类

实验可分为大规模实验和实验室的小规模试验两大类。大规模试验包括水平坑道^[1-3]和垂直粮食^[4]实验。它的试验尺寸直径为几米,长度为几百米、高度为几十米。在实验室试验中,小规模试验装置可以不同形式来划分。如按结构形式来分有 *a)* 水平管道, *b)* 垂直管道, *c)* 球形和 *d)* 柱形等爆炸容器。如按粉尘

的制备和输送方式来分,有 *a)* 喷入法, *b)* 吸入法, *c)* 喷吸法和 *d)* 自由溶体法等。上述的各种分类法,仅从外观或操作方法上进行区分。本文从粉尘在实验容器中的运动状况在本质上进行分类,进而得到在什么样实验条件下,得到的结果能适用在什么范围。本文的分类有 *a)* 不定常状态(即容器中粉尘浓度随时间变化)。初始条件 $u_p \approx 0, u_g \approx 0$ 。 u_p, u_g 分别为粉尘粒子速度及气体速度。 *b)* 定常状态(即容器中粉尘浓度不随时间变化)。初始条件 $u_p \approx 0, u_g \approx 0$ 。 *c)* 定常状态。初始条件

$$u_p \approx 0, u_g = 0.$$

现分述如下:

(1) 不定常状态。初始条件

$$u_p \approx 0, u_g \approx 0.$$

这一类是最古老而目前又在广泛使用的方法。一百多年前 Holzwart & Von Meyer^[5] 建立了这类装置,以后, Bedson & Widdes^[6], wheeler^[7], Godbert^[8] 等发展改良了这类装置,形成 Godbert 标准水平喷入^[10]装置。此外, Taffanel 和 Durr^[9], Godbert & Greenwald, 建立了上部喷入法装置而 Clement-Frazer^[11], Trostel-Frevert^[12], Hartmann^[13], Eckhoff^[14] 等建立了下部喷入法装置。其中 Hartmann 法成为美国国家矿务局的标准试验装置,现选用 Hartmann 法为这一类装置典型结构,介绍这类装置的工作过程。结构图如图 1 所示。装置是一柱形容器,粉尘试样放置在容器底部半球形杯中或储料杯中,由外部储气罐中高压气体经过一个特殊形喷咀类似伞形喷嘴导入,使

粉尘飞散，达到均匀分布于实验容器内。再由电火花点火。上述的各种方法，它们的基本原理是相同的。由高压气体携带粉尘进入容器或高压气体进入容器使粉尘飞散。所不同的是粉料放置的位置在容器内部或外部，气体进入容器的位置在上部、下部或水平。这些差别的目的是希望粉尘能够更均匀、更长时间悬浮在容器中。

该类装置的优点是：制造操作简单，试验用粉量少，可制成密闭容器。这样可测爆炸后最大压力和压力上升速率。能适用于各种不同类型的粉尘，包括有毒粉料以及各种粉尘和可燃气体混合物的试验。

该类装置存在问题是：由于用一般高压气流导入容器的方法，因此，在容器中浓度和分布均匀性是随时间改变的。它们初始条件，如粉尘粒子速度，气体速度、湍流度及参与反应的粉尘量既难于掌握又无法测量，得到的结果仅仅用一个平均值。由于在密闭容器中使用，气流容器又有一定体积，所以，管的高度（长度）有一定的限制，也就无法进行火焰（或爆燃）速度的测量，也无法对火焰传播机理进行研究。

(2) 定常状态。初始条件

$$u_g \approx 0, u_p \approx 0.$$

这一类方法是利用气流和粉尘粒子在动平衡下进行试验，因此，气体是连续地输送粉料进入容器。有 Grumer & Bruszak^[15]、Line^[16]、Sowes^[17]、Cassel^[18]、Singer^[19] 等装置。气流从上部或下部进入容器，现选用 Grumer & Bruszak 方法作为这一类装置典型结构，介绍这类装置的工作过程。其结构图如图 2 所示。装置由一垂直或水平管道和粉料发生器构成，粉料放置在料斗内，由送料器把粉尘送入混合室，同时，空气由一喷嘴进入混合室，经过一段距离后，空气和粉料进入容器。

该方法的特点是：气体连续携带粉尘进入容器，所不同的是有不同形式的粉尘发生器及粉尘云进入容器的位置在上部或下部。

这类装置的优点是：由于利用了气体和固体粒子动平衡的方法，所以，浓度和均匀性不再

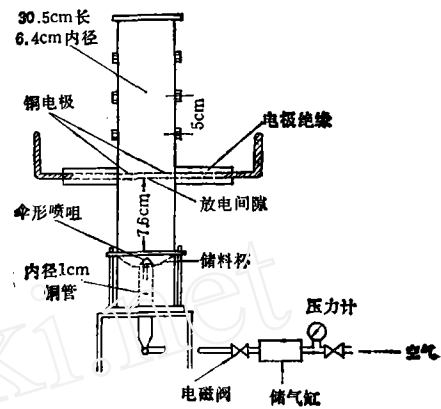


图 1

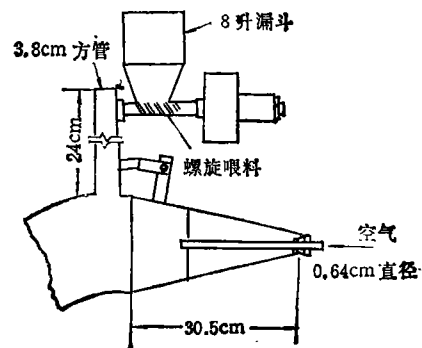
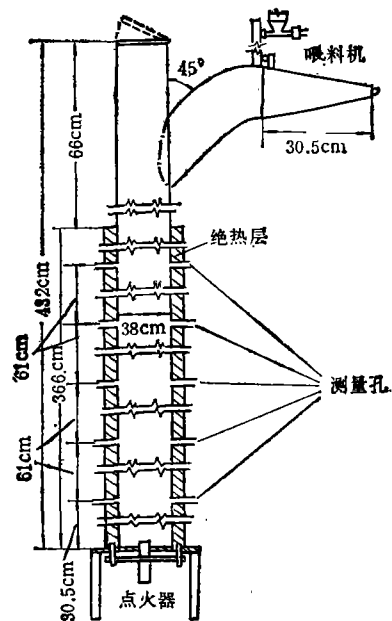


图 2

随时间变化,其次, u_p 、 u_g ,浓度均可由不同参数加以控制,垂直管可以制成很长,这样就可以测量火焰速度及研究火焰传播机理。

该装置存在问题:由于试验是在开口容器中进行的。所以不能对所有粉料适用。同时,无法测得最大压力和压力上升速率。由于初始的粉料和气体的运动,影响了所测得的火焰传播速度。此外,在试验中,粉料使用量大,同时,不能进行粉料和可燃气体混合物的实验。

(3) 定常状态,初始条件 $u_p = \text{常数}$ 、 $u_g = 0$ 。它是利用固体质点在重力下自由降落的方法,使粉料在试验容器内均匀。Brown & Essenhigh^[20]、Nettleton & Stirling^[21]、Palmer^[22]、石浜^[23,24]等人就使用了这类装置,现选用 Brown & Essenhigh 装置为这类装置的典型结构,介绍这类装置的工作过程。其结构图如图 3 所示。

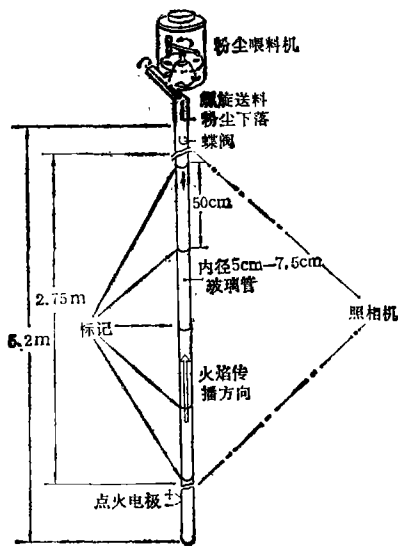


图 3

该装置为一垂直管道,粉尘试料放置在装置上部储料器内,由螺旋叶片输送粉料进入试验容器,依靠粉料本身重力自由下落,在经过一段距离后,当粉料重力和阻力相等时,有一均匀下落速度。控制粉料下落量,得到一个均匀分布的可控浓度。不同装置差别仅在输送粉料的装置上,如用振动筛,旋转容器法等。

该类装置的优点是:制造、操作简单、能得

到一个初始扰动最小的、浓度可控的、均匀的粉尘云。能测量火焰(或爆燃)的速度及最小点火能量、极限浓度等。

该类装置存在问题:试验在开口容器中进行。所以,无法测得最大压力和压力上升速率,不能对所有种类粉料及粉尘和可燃气体混合物在其中试验。同时,粉料颗粒容易结块,使浓度和均匀度不易控制。

3. 结论

这三类装置各有它们自己的特点和存在的问题。所以,我们要利用它们的特点取得更合理的结果。例如,在第一类装置中能得到最大压力,如果假定容器是绝热的,因为最大压力与粉料性质、浓度、氧含量有关,而与时间及初始条件无关。这样在第一类装置中,它的缺点对最大压力的影响几乎可以忽略不计。而在第二类 and 第三类的装置中,得到最小点火能,因为最小点火能是依赖于它的浓度和均匀性。而在这两类装置中,能得到比第一类更好控制浓度和均匀性。这样结果也更可信。在第三类的装置中,能得到火焰传播速度,湍流对火焰传播的影响以及火焰传播机理的研究。因为火焰传播速度与湍流有关,它要求初始扰动为最小,然后,人为加入可控制的扰动,从而研究湍流的影响。

综上所述,至今为止我们还没有找到一个完美的实验装置。在这种装置里,能得到一个均匀的可控制浓度的粉尘云,而又没有初始的扰动。在同一次实验中,既能测得最大压力及最大压力上升速率,而又能得到火焰传播速度及湍流的影响。这样一种完美实验装置是我们今后研制方向。

参 考 文 献

- [1] S. K. Shaw, Rocket Igniters for Experimental coal-Dust Explosions, S. M. R. E. Research Report No. 175 (1959).
- [2] T. Suzuki, K. Sacaki, K. Seki & O. Katsuki, New Facilities of the Experimental Coalurine. Intern. Conference of Directors of Safety in Mines Research, Dortmund, west Germany (1967).
- [3] 铃木俊夫: 炭じん爆発防止の問題点: 大型坑道試験の检讨, 探鉱と保安 11-1(1965).

- [4] R. K. Eckhoff 来华讲座 (1983).
- [5] R. Holzwardt & E. Von Meyer, Über die Ursachen Von Explosionen in Braun Kohlen-Briquetle- Fabriken. *Dingl. Polytech. Jour*, 280 (1891).
- [6] P. P. Bedson & H. Wrddas, Experiments Illustrative of the In flammability of Mixtures of Coal-Dust and Air Trans. Instn. Min Engrs. London 32 (1906—1907).
- [7] R. V. Wheeler, On the Relative Inflammability of Coal Dust second Report London (1912).
- [8] A. L. Godbert et al., A Routine Test of Inflammability of Mine Dusts S. M. R. B. paper 68 (1931).
- [9] J. Taffanel & A. Durr, Cinquième Série de Sais sur les Inflammations de Pouscières, Comité Central des Houillères de France, Compt. rend 152 (1911).
- [10] A. L. Godbert & H. p. Greenwald, Laboratory Studres of Inflammability of Coal Dust. U. S. Bureau of Mines, Bull 389 (1986).
- [11] J. K. Clement & J. N. Lawrence, Laboratory Determination of the Explosibility of Coal Dust and Air Mixture U. S. Bureau of Mines Tech. paper 141 (1917). J. C. W. Frazer, E. J. Hoffman & L. A. Scholl, A Laboratory study of Inflammability of Coal Dust, U. S. Bureau of Mines Bull 50 (1913).
- [12] L. J. Trotel & H. W. Frevert, the Lower limits of Concentration for Explosion of Dust in Air, *Chem. Metall. Eng.* 30 (1924).
- [13] I. Hartmann M. Jacobson & R. p. williams, Laboratory Explosibility study of Americam Coals, U. S. Bureau of Mines Rept. Inv. 5052 (1954).
- [14] R. K. Eekhoff: 来华讲座 (1983).
- [15] J. Grumer & A. E. Bruszak, Inhibition of Coal-Dust-Air Flame S. U. S. Bureau of Mines Rept. Inv. 7552(1971).
- [16] L. E. Line, W. J. Clark & C. J. Rahman, An Apparatus for studying the Burning of Dust Clonds. 6th Symp. (Intern). on Combustion (1956).
- [17] P. C. Bowes, J. H. Burgoyne & D. J. Resbash, The Inflanmability in Suspension of Mixtures of Combustible and Incombustible Dusts, J. Soc, Chem. Ind, London 67(1948).
- [18] H.M. Cassel, A. K. DasGupta & S. Gurnswamy, Factors Affecting Flazxe Propagation through Dust clouds. 3rd Symp. (Intern) on Combustion and Flame and Explosion Phenomena (1948)
- [19] J. M. Singer, Ignition of Mixtares of Coal Dust Mathane and Air by Hot Laminar Nitrogen Jets, 9th Symp. (Intern) on Combustion (1963).
- [20] K.C. Brown & R.H. Essenhigh, Dust Explosions in Factories: A New Vertical-Tube Test Apparatus, S. M. R. E. Research Report No. 165 (1959).
- [21] M. A. Nettleton & R. stirling, Detonations in suspensions of Coal Dust in Oxygen, *Combustion und Flame* 21-3 (1973)
- [22] K. N. Palmer & P. S. Tonkin, Coal Dust Explosions in a Large-Seale vertical Tube Apparatus, *Combustion and Flame* 17-2 (1971).
- [23] 石 浜、涉・榎本兵治,粉じん爆発関する研究(との1) 密閉型均一粉じん雲作成のための実験方法と実験装置について,第3回安全工学国内シコシウム講演予稿集(1972).
- [24] 石浜、涉・榎本兵治: 粉じん雲爆発特性実験研究方法の変遷(1975)完全工学 14,4(1975)

(本文于1986年12月2日收到)

(上接第29页)

取断裂力学 J_R 阻力曲线,打印列出拟合方程系数,显示和绘制 $J-\Delta a$ 曲线图;(9)可在线/离线测试,绘制材料机械性能拉伸图及打印出参数;(10)可自动记录温度、热应变,并进行复杂修正、换算,直接求得真实热应力主应力和方向;(11)可进行1~16通道或其间任意个通道数的静、动态应变采集,并直接自动换算求出速度,位移;时间曲线;(2)可按数字滤波,频谱分析,

相关分析等基本处理,实现信号干扰的削弱和消除,和在杂乱信号中提取有规律的信号;(3)备有供系统检验,校正之用的稳态、瞬态和随机的单道及双道信号,它们由软件功能产生;(4)可代为研制其他力学及工程试验数据的自动分析处理模块程序,通过软件接口键入系统。

在系统研制过程中及完成后,已具体进行了若干力学科学及工程试验数据采集分析处理的应用,取得了明显的效益。