

粉尘爆炸

杨昇田 冯振生

(国家地震局工程力学研究所)

摘要 本文主要讨论粉尘爆炸机理及其防范。

关键词 可燃粉尘, 爆炸下限浓度, 点燃能量, 爆炸特性值, 排代效应, 二次粉尘爆炸, 连锁爆炸。

一、前言

一九八七年三月十五日, 哈尔滨亚麻纺织厂发生了连锁爆炸, 爆炸引起了大火, 造成了一起受灾面积大, 人员伤亡多, 财产损失严重的特大事故。这次爆炸经有关部门的工程技术人员和管理人员的调查认定是一起亚麻粉尘爆炸事故。

世界上发生的粉尘爆炸事故, 根据国外统计资料每年有四百多起, 其中就有百分之十是重大事故, 就美国而言, 在近十年发生的重大粉尘爆炸事故, 每年平均就有八起, 也相当严重。一九七七年的美国一次粉尘爆炸事故就死亡65人。日本在近二十年也接连发生粉尘爆炸事故一百七十多起。

在国内, 粉尘爆炸也时有发生, 五十年代初期, 哈尔滨面粉厂因面粉微粒爆炸被夷为平地, 就亚麻行业而言, 最近几年就曾出现过两次亚麻粉尘爆炸事故。

众所周知, 粉尘爆炸是指可燃粉尘与空气混合物的爆燃或爆轰, 它和可燃气体的爆炸有某些相似之处。但由于粉尘是固态物质的微粒, 它和空气因相态不同, 相间反应复杂, 所以研究起来也比较困难。但由于粉尘爆炸已引起了各国研究者的重视, 已有专著出版。在一九七七年十月, 美国的堪萨斯城召开了首届国际防止粉尘爆炸问题学术讨论会, 尽管在这次会议上发表了很多很好的论文, 但仍不能防止粉尘爆炸事故的不断发生, 就在这一年里美国国内又发生了二十六起粉尘爆炸事故。因此, 粉尘爆炸机理及防范的研究仍然是世界各国科学家面临的一个十分重要的课题。

二、粉尘爆炸

1. 可燃粉尘的分类

只有可燃性粉尘才可能发生爆炸。可燃性粉尘大致可以分为以下三类

- ① 金属粉尘 (如铝粉, 镁粉);
- ② 可燃矿物粉尘 (如煤粉);
- ③ 有机物粉尘, 它包括

纤维尘 (如麻粉尘, 棉纤维尘, 烟草, 木粉, 纸粉);

粮食尘（面粉，淀粉，奶粉，糖等）；
人工合成化工材料（如塑料，染料）。

金属粉尘和矿物粉尘的燃烧过程较为简单，这是因为在燃烧过程中，它们中间的反应梯级数目少。而有机物粉尘在燃烧过程中的产物复杂，它们可能停留在反应过程中的任何阶段，所以是复杂的

2. 粉尘爆炸机理

粉尘爆炸就是可燃物尘粒与空气中的氧充分接触，在特定条件下，瞬时完成的剧烈氧化反应。反应中放出大量热，形成急剧增高的压力波。

在具有一定程度密闭的体系里（如车间或容器），当在空气中悬浮的可燃粉尘浓度达到一定值时（爆炸下限浓度），又遇有点火源，首先引起局部粉尘微粒的燃烧，进而迅速引燃周围悬浮着的微粒，由于微粒间的连锁反应，使整个体系内的悬浮粉尘瞬时起火，产生大量的热和强烈的压力形成粉尘爆炸，在产生冲击波的波阵面上发生很高的温度梯度和压力梯度。粉尘爆炸一旦开始之后，初始产生的冲击波在传播过程中，扰动了原来处于静止沉积状态的粉尘（如车间中的墙面，天棚，柱头，管道内，地沟，天窗，设备表面等的层状积尘），或者由于爆炸引起集尘器内的粉尘排出重新飞扬形成粉雾，使原来不具备粉尘爆炸条件的地区和场所具备了粉尘爆炸的条件，它们在高温和火焰的环境作用下，立刻又会引起二次爆炸，所有这些连锁反应都是在瞬间发生并完成的。

粉尘爆炸的条件和特点

1. 具有爆炸的上限和下限浓度。这一点与可燃气体爆炸相类似，粉尘爆炸必须具备存在一定的与空气充分混合的粉尘浓度区间。常称之为粉尘爆炸浓度的上限和下限。高于上限浓度或低于下限浓度粉尘只能燃烧而不会爆炸。

粉尘的爆炸上限及下限浓度与粉尘的化学性质及颗粒有关，通常在知道了粉尘的化学成分，燃烧热，并作出某些简化的假设情况下，是能够估计出粉尘爆炸的上限和下限的。可以认为，许多种工业粉尘，其爆炸下限浓度为 $20 \sim 60$ 克/米³，爆炸上限浓度位于 $2 \sim 6$ 公斤/米³之间。通常我们关心的是爆炸下限。由于受许多因素的影响，爆炸极限不是固定不变的。爆炸的上限和下限，通常是在特殊的容器中，实际引爆后测出的。表1是几种可燃粉尘的爆炸下限。

表 1 某些物质粉尘的爆炸下限

可燃物质	烟煤	淀粉	面粉	黄豆粉	小麦粉	糖粉	镁粉	棉尘	亚麻尘
浓度(克/米 ³)	17	7	15~25	35~50.4	9.7~60	15~19	20	50	16.7(有些资料为42.5)

如果不知道某些粉尘的定量爆炸下限浓度数值，通常近似判断方法是：伸手不见五指，或者在20厘米的距离内看不见对方。

粉尘爆炸浓度的下限，与下列因素有关，在所给值上下摆动。

I/ 粉尘的颗粒大小：通常颗粒小，下限降低。当粉尘的颗粒度大于400微米时，即使用强点燃源也不会爆炸。

II/ 点燃能量及点燃方式：通常强点燃（电弧）高能量下限会降低

III/ 粉尘的温度：粉尘温度高，下限会稍偏低一些。

IV/ 不同粒度的混合粉尘：应将全部质量都看成是混合尘中的最细颗粒质量。

V/ 杂混合物尘：杂混合物是指在粉尘有空气的混合物中含有可燃气体，或可燃蒸气的粉尘，也就是指的有“两种来源的混合物”，例如在亚麻与空气混合物中含有少量的甲烷（沼气）。这种混杂物是非常危险的，虽然它们各自均未达到各自的爆炸下限，但也会遇到火花而爆炸（例如亚麻和甲烷混合尘：如果在混合有甲烷的亚麻尘浓度低于它的爆炸下限16.7克/米³，甲烷在空气中的浓度低于下限4.7%，但两者混合后都会猛烈爆炸）。也就是说杂混合物尘能大幅度地降低各自的爆炸下限浓度^[2,3,4]。

VI/ 爆炸下限和粉尘湿度的关系：当粉尘含水量不大时（如低于50%时），关系不明显，仅当含水量很多时可燃粉尘才不会爆炸。

一九八三年黑龙江省克山县亚麻原料厂的爆炸就是忽视了这一点造成的。该厂在国庆节休假时停车检修，10月1日上午，对麻屑孔施用了风焊，引起了麻屑的阴燃，虽往外掏出了一些阴燃着的麻屑，但并未有彻底掏干净已阴燃物，虽然两次往管道中灌注了水，但因注水量不足，未能使粉尘含水量超过50%，所以在4日下午恢复生产时，仅开机五秒钟就发生了爆炸。

最强的爆炸效应在理论上应当在零平衡时出现，此时的浓度有时高出下限2~3倍，在爆炸以后，常常有未燃尽的，类似焦炭的残渣留下来，是由于燃烧不完全的缘故，这种现象在哈尔滨亚麻厂粉尘爆炸中亦可见到。

②粉尘爆炸的特性值^[5]

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{max} \text{ —— 最大爆炸压力} \\ (dP/dt)_{max} \text{ —— 最大压力上升速度} \\ K_{st} \text{ —— 爆炸强度, 单位(帕·米/秒)} \end{array} \right.$$

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} \quad (V \text{ 是体积})$$

可根据“三次方定律”，用爆炸特性值来估算爆炸强度。大量的可燃粉尘的试验研究证明，当容积 ≥ 0.04 米³时，“三次方定律”对粉尘也完全适用。即 $(dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = K_{st}$ 。

它们之间存在下面关系

I/ 试验结果表明，在粉尘种类，粒度固定的前提下，当容积变动时最大爆炸压力几乎恒定保持不变。

表2是某些工业细粉尘的 P_{max} 和 K_{st} 值。由表可见，不同的爆炸强度都产生几乎相同的最大压力。

从哈尔滨亚麻厂的爆炸效应来看：集尘管道和地沟的破坏，除尘器的撕裂，除尘管道的转弯处拉断或受压力失稳；除尘室，换气室，地下麻库以及梳麻车间在多点多层次爆炸后的破坏，厂房，墙壁和屋顶，玻璃窗的破坏，都比较均匀，很少有强烈的抛掷现象，如果从控制爆破的角度看，它是一次很好的低压力，等强度的极限值附近的破坏。

同种可燃粉尘的爆炸特性值数据有一个变化范围，这可能是由于颗粒大小的不同而影响爆炸性能。另外试验粉尘也不总是化学纯的，经常混有其它杂质。

表 2 某些工业细粉尘的 P_{max} 和 K_{st} 值

粉尘种类	P_{max} (10 ⁵ 帕)	K_{st} (10 ³ 帕·米/秒)
聚氯乙烯	6.7~8.5	27~98
奶 粉	8.1~9.7	58~130
糖	8.2~9.4	59~165
褐 煤	8.1~10.0	93~176
木 粉	7.7~10.5	83~211
纤 维 素	8.0~9.8	56~229
颜 料	6.5~10.7	28~344
铝	5.4~12.9	16~750

II/ 点燃方式(化学引爆, 电容放电或固定火花隙)和点燃能量(几个毫焦耳~10⁴焦耳)对最大爆炸压力 P_{max} 几乎没有影响。对大多数粉尘其爆炸强度 K_{st} 也变化不大; 但仍有个别的粉尘种类(约占所试验粉尘50种的10%), 却有影响, 其规律是

$$K_{st}^{\text{化学引爆}} = K_{st}^{\text{电容放电}} > K_{st}^{\text{固定火花隙}}$$

数据见表 3。

表 3 点燃方式和点燃能量对可燃粉尘爆炸特性的影响

粉尘种类	点燃方式	点燃能量 E (焦耳)	爆炸最大压力 P_{max} (10 ⁵ 帕)	爆炸强度 K_{st} (10 ³ 帕·米/秒)
石 松 粉	化学引爆	10000	8.2	186
	电容放电	0.080	8.3	199
	固定火花隙	10	8.4	153
纤 维 素	化学引爆	10000	9.7	150
	电容放电	0.04	9.2	147
	固定火花隙	10	8.2	63
2 茶 酚	化学引爆	10000	8.0	100
	电容放电	0.005	7.7	90
	固定火花隙	10	7.9	90

表 3 的数据否定了可燃粉尘爆炸特性值主要与点燃能量有关的假定。也就是微弱的点燃能源(如电容器放电, 仅有百分之几焦耳)同样能点燃粉尘引起粉尘爆炸。

可燃气和可燃粉尘的爆炸特性进行比较, 可以发现两者是同样剧烈的。

在粉尘爆炸中, 按 K_{st} 值表示的爆炸强度, 把粉尘爆炸分成四个级别, 将每一个爆炸级别限制在一定的 K_{st} 中(见表 4), 国外对 500 多种可燃粉尘的试验表明, 大多数粉尘的爆炸级为 S_{T1} (见图 1)。

③ 粉尘爆炸的最低点燃能量 $(E_{0.1})_{min}$ 被定义为最易点燃的混合物在 20 次连续试验时, 刚好不能点燃时的能量值。最低点燃能量值和下列因素有关

1/ 一种粉尘的最低点燃能量与粉尘浓度有很大关系, 而每种粉尘都有各自的一个最易

表 4 粉尘爆炸的级

粉尘爆炸的级	K_{st} (10 ³ 帕·米/秒)	备 注
S_{te}	0	不可爆粉尘
S_{t1}	> 0 ~ 200	
S_{t2}	201 ~ 300	
S_{t3}	> 300	

点燃的浓度。在 1 米³的容器中的多次粉尘爆炸试验证实，最易点燃浓度通常和出现最大爆炸压力浓度，最大爆炸强度浓度不一样，三者关系如下

$$C_{\text{最易点燃浓度}} = \left| C_{P_{max}} - k (C_{(dp/dt)_{max}} - C_{P_{max}}) \right|$$

式中 $C_{P_{max}}$ ——最大爆炸压力浓度， $C_{(dp/dt)_{max}}$ ——最大爆炸强度浓度， k ——修正系数，通常情况下等于 1。

粉尘浓度大于或小于 $C_{\text{最易点燃浓度}}$ 可立即引起最小点燃能量上升。这就是为什么在开车或停车时最易发生粉尘爆炸的原因，因为这时很容易出现最易点燃浓度。克山县亚麻原料工厂在开车五秒钟时就发生爆炸，可能与这个原因有关。

II/ 粉尘的粒度大小对最低的最小点燃能量有决定性的影响，粉尘越细越容易点燃(见图 2)。

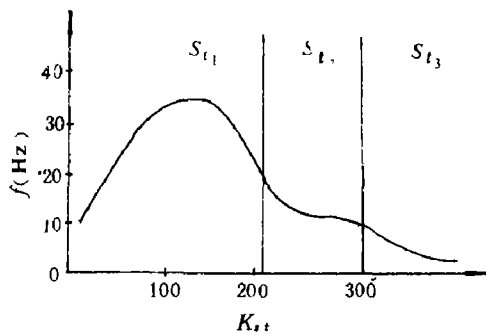


图 1 500 余种试验粉尘中爆炸级出现的频率

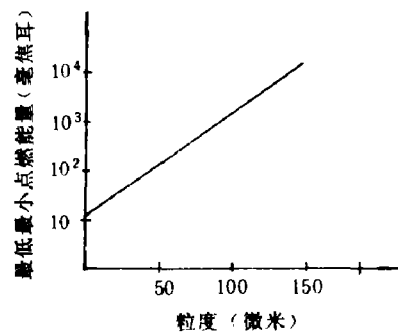


图 2 聚乙烯粉尘粒度大小对最低最小点燃能量的影响

III/ 随湍流度的降低，最易点燃粉尘浓度往其高数值方向移动，所以最小点燃能量升高。

IV/ 最小点燃能量与温度的关系，大约是温度每上升 100 °C，最小点燃能量大约降低一个数量级。

④ 粉尘爆炸所发出的能量和粉尘的燃烧热有关，燃烧热高的，爆炸产生的能量大，破坏力强。表 5 是某些粉尘的燃烧热，为便于对比，表中也给出了一些固体炸药的燃烧热。从表 5 中可以看出，易燃粉尘的燃烧热约是常用炸药的 3 ~ 5 倍。因而相同质量的粉尘爆炸，其猛度和破坏力要比固体炸药大得多。

⑤ 空气充足时，燃烧完全，爆炸产生的能量大。加入惰性气体后使炸药上限下降^①。但爆炸下限浓度不变。当含氧量降至 10% (空气中含氧量约为 21%) 以下时，一般粉尘不再爆

炸。

⑥ 管道内粉尘爆炸

在管道内可燃粉尘燃烧反应总是与介质的轴向流动有关，所以，首先应在没有燃烧反应叠加时来观察管道内流动过程的某些特征。管道内的流动有层流和湍流。

从层流转变为湍流取决于无因次雷诺数

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

式中 V —平均速度， d —管道直径， ν —动力粘度系数。当 $R_e < 2100$ 时，预计是层流，在圆形管道内速度分布为抛物线形状。

当层流转变为湍流时，临界速度用下式确定

$$R_e = \frac{V_{\text{临界}} \cdot d}{\nu} = 2100$$

湍流的速度分布与层流的速度分布完全不同，有一定的湍流度，也就是说，湍流在很大程度上起了均衡作用。

一般可以认为，在其它条件相同的情况下管道内表面的粗糙度越大，层流转变为湍流状态越快。在工程直径 (d 为几拾厘米) 的管道里流动的可燃气，当流动速度为 0.1~1.0 米/秒时，就转入到湍流，这个速度范围与可燃气体的正常燃烧速度范围是一致的。这一事实对于观察管道内爆炸过程具有十分重大意义。

对于可燃粉尘，若形成与空气的混合物，一般必须使粉尘呈某种旋涡状态 (使其具有一定的湍流度) 才能发生粉尘爆炸。

在其它条件相同的情况下，爆炸速度一般随管道直径的增加而增加。各种不同粉尘的爆炸压力也是有差别的，但是这种差别不太大。如果缩小管道直径，则粉尘爆炸速度和爆炸压力也都减小。直到最后直径小到再也不能自发传播爆炸为止，这个临界管道直径以厘米来计。

管道长度对可燃粉尘的爆炸性质具有决定性的影响。在 20—40 米长的管道内，爆炸强度 K_{st} 值位于 20 兆帕·米/秒以上的粉尘爆炸 (比如聚乙烯粉尘，木粉，有机颜料粉尘，铝粉) 会转变为爆轰，其爆轰速度在 2000 米/秒上下。

在管道内粉尘爆炸时，存在排代效应，粉尘以最大排代速度流动排出，从管口喷出的暂时没有燃烧的粉尘空气混合物被后面的已燃烧的混合物的火焰点燃，使火焰不断传播，进而会引起可怕的二次粉尘爆炸，同时会引起火灾。

粉尘在闭合管道内爆炸时，由于闭合管道不能排出未燃烧的混合物，所以管道内最大爆炸压力比一端开口管道内的最大压力大几百千帕，这时由于爆炸 (爆轰) 波在闭合管口处的反射，终端法兰处表现出来的爆炸压力可增大数倍。

特别注意，由粉尘爆炸所形成的冲击波在管道内的传播，由于管道效应，影响较远。

表 5 某些粉尘的燃烧热^[9,10]

粉尘名称	燃烧热 (千焦耳/公斤)
铝粉	30,480
小麦粉	16,873
煤粉	25,121
蔗糖粉	16,534
纤维素	17,522
木粉	18,841
亚麻尘	约 20,934
* TNT	5,066
* 硝化甘油	6,322
* 黑索金	6,025

* 为固体炸药

哈尔滨亚麻厂的粉尘爆炸，在管道中则表现为拐角处的撕裂，开口端的喷火。

三、粉尘爆炸的防范

这些措施均极不成熟，仅供参考

1. 破坏危险三角形

燃烧反应需要有可燃物质和氧气，还需要有一定能量的点燃源。破坏危险三角形就可阻止空间爆炸，亦即在密闭的体系里（如车间或容器），必须具备三个条件（或称三要素）：①有可燃细粉尘，②粉尘在空气中达到了一定浓度，③有火源，同时存在才发生爆炸，因此，只要消除其中一个条件，就可以有效的防止粉尘爆炸事故的发生。

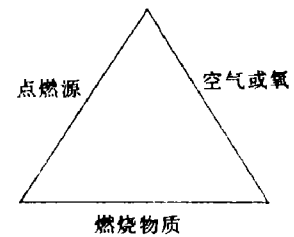


图 3 危险三角形

2. 彻底消除点燃源。包括一般点燃源，指焊接、吸烟和操作过程中的点燃源，如静电起火，金属撞击火花，摩擦火花，电器设备和机械设备故障产生电火花和火花等。据世界资料统计：在有关粉尘爆炸事故中由机械火花引燃的约占30.1%。机械摩擦发热引起燃烧约占9.8%，二者约占40%。

3. 对有可能产生火源的设备和装置，应按装有爆炸抑制系统。

4. 在有爆炸危险的除尘，滤尘设备和管道中设制防爆膜，泄压阀等。

5. 经常清除地沟和管道、车间内的粉尘，防止二次爆炸。

6. 厂房要有足够的防爆泄压面积，并按抗爆抗震设计，避免更大的次生灾害。

7. 电气设备要采用防爆装置，加装地线，管道中要有消除静电的装置。特别注意电器设备的电火花，电弧火花，防止短路，过载，过热。

8. 为了防止连锁爆炸，各除尘系统要自己单独构成循环回路，并用防火墙隔开。要综合考虑厂区的设计布局。

9. 除尘，滤尘设备要远离生产车间。

10. 新建，改建厂房时最好弃去布袋式除尘器，改用先进设备。

11. 予报装置的研制，随时予报浓度。

参 考 文 献

- [1] Zehr, J. Anleitungen Zu den Berechnungen über die Zündgrenzwerte und die maximalen Explosionsdrücke. VDI-Berichte, 19 (1957).
- [2] Pellmont, G., Explosions und Zündverhalten von hybriden Gemischen aus brennbaren Stäuben und Brenngasen, Dissertation ETH Zürich (1979).
- [3] Bartknecht, W., Brenngas und Staubexplosionen. Forschungsbericht F 45 des Bundesinstitutes für Arbeitsschutz, Koblenz (1971).
- [4] Verein deutscher Ingenieure, VDI-Berichte 304, S. 47 (1978).
- [5] Schöll, E. W., Abschlußbericht zum Forschungs-vorhaben, Ermittlung geeigneter Unterlagen zur Verhütung Von Staubexplosionen und deren Folgeschäden, Bergbau-Versuchsstreecke Dortmund-Derne

(Juni 1978).

- [6] Freytag.H., Gefahren durch Zündquellen und Schutzmaßnahmen. AICHEM 1967. herausgegeben von der Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie. Heidelberg.
- [7] Hupe.H.,Staubexplosionen und Sicherheitsmaßnahmen. Untersuchungen im praxisnahen Maßstab bei spezieller Berücksichtigung von Gummi-, Holz- und Lackschleifstäuben.Dissertation TH Aachen (1975).
- [8] 国防工业出版社, 火灾, 1984, 1.
- [9] B.N 别列利曼著 (顾振军等译), 简明化学手册, 化学工业出版社, 1957, 8
- [10] Rudolf Meyer (陈正衡、祝锡五译), 爆炸物手册, 煤炭工业出版社, 1980, 9.

DUST EXPLOSION

Yang Shengtian Feng Zhensheng

(*Institute of Engineering Mechanics, State Seismological Bureau*)

ABSTRACT The mechanism of dust explosion and precaution against it are discussed in this paper. Accident examples are illustrated.

KEY WORDS combustible dust, lower limit density of explosion, kindling energy, specific property value of explosion, exhaust effect, secondary dust explosion, chain explosion.