

粉尘爆炸的发生频率

H. Aglan

美国 Case Western Reserve 大学工学院高分子科学系

提要 提出了计算特殊系统中粉尘爆炸发生频率的本构模型。已用此模型来分析粉尘浓度对粉尘爆炸发生频率的影响。此模型将一个适当的常数跟所用粉尘的激活能结合了起来。

进行了大量实验来确定粉尘浓度对爆炸发生频率的影响。对每一个浓度，都在相同的一组条件下进行了 100 次爆炸试验。

这些实验数据证实了本文提出的模型是正确的。

1 引言

粉尘爆炸是一种化学过程，其中热的释放速率快得可以形成冲击波和火焰。强大的冲击波和火焰，使人们受伤或死亡，也给工厂和建筑物造成灾难性的破坏。例如，煤矿中的粉尘爆炸之猛烈令人难以想象，由好些吨重的可燃粉尘燃烧起来的火焰，竟以约 1500m/s 的速度通过巷道传播。除了煤矿和兵工厂之外，潜在的粉尘爆炸灾害存在于大量工厂和设备中。它们包括：谷物加工厂，棉纺厂，木材加工设备，造纸厂，橡胶工厂，沥青及树脂加工厂，香料和咖啡加工厂，医药和化学制品工厂，粉煤装置，啤酒作坊，塑料工厂，以及生产许多有机和无机粉末形式材料的工厂。

或许可以认为，关于粉尘爆炸问题的文献已经在相当长的时间内研究了粉尘爆炸的理论。可是情况却不是这样。看来只有很少的研究工作者曾经研究过粉尘爆炸的机理，而且大多数工作是针对需要采取的预防措施进行的，目的是消除爆炸的发生，或者当爆炸发生时尽量减小爆炸引起的破坏性后果。粉尘爆炸的破坏性效应主要取决于如下的一些爆炸特性：最大压力升，火焰的传播速度及范围，火焰前方冲击波的速度，增加压力的持续时间，在某些情况下由爆炸引起的负压力波。这些特性又受到如下的一些参量的影响，粉尘云的浓度，粉尘颗粒的粒度和形状，粉尘的化学成分，对燃烧过程的供氧量，热气体向周围壳壁的传热特性，等等。这些因素已为本领域的许多先驱人物^[1-4]研究过。

跟气体爆炸类似，有些研究工作者^[5-7]曾经试图确定各种粉尘的最低爆炸浓度（爆炸低限）。Palmer^[7]曾经指出，大多数工业粉尘的最低爆炸浓度的范围是 0.02—0.5g/l，不过有些粉尘的最低爆炸浓度在这个范围之外。推测起来，这些估计数值是在对每一个浓度顶多进行 10 次试验的基础上作出的。在这些给定的条件之下，不发生爆炸的情况只是表明，爆炸发生的概率约小于 90%。关于这点，重要的是要提到 Jacobsen^[8]所说的如下的话：“用一种铬的试样（粒度 100% 小于 74 μ m）进行试验，这种粉尘受电火花作用并不着火，从而认

为铬粉尘不会引起粉尘爆炸灾害。在某一次工业爆炸之后，用6种另外的试样进行了试验。平均颗粒直径为 $3\mu\text{m}$ 的弥散铬粉尘，却被一次电火花引起着火了。”

这些观测结果得出了与粉尘爆炸这项工作有关的最重要的要害是，如果不详细说明有关粉尘爆炸发生的频率，那就不清楚任何谈及粉尘爆炸性质的说法是否还有意义。

只有当理论的基础是建立在能够透彻了解爆炸的机理之上时，研究这个复杂问题中涉及的各项因素才是有用的。根据文献，很清楚，尚未有足够的知识来达到这点。因此，爆炸的危险尚不能根据粉尘浓度、粉尘云着火温度、弥散压强、暴露的着火表面积、或粉尘的化学成分等的数量方面的知识来进行计算；换句话说，尚不能根据通常可以测量的参量的知识来进行计算。有些科研工作者曾经根据传热的观点，包括辐射传热以及预反应区内粉尘与空气之间的热交换，对问题的理论方面进行了讨论。Smelkov^[9]首先考虑到概率概念。Rose^[10,11]介绍了由于火焰通过粉尘云开始与传播的相互作用而引起的爆炸发生概率的计算。

在本文中，利用基于粉尘爆炸的发生频率是一个统计问题的概念得出的本构模型，提出了对实验结果的一个分析。在这基础上，安全措施的目的，应当是将粉尘爆炸的发生频率减小到可以接受的极小值，绝对安全的概念是不切实际的。显然，这样一种爆炸的发生频率，主要将取决于大气中可燃粉尘的浓度和初始源（热表面或火星）的温度。本文的研究是在初始源（热丝）温度不变情况下，针对粉尘浓度对粉尘爆炸发生频率的影响进行研究。

2 理论研究

本节打算综述以前得到的方法^[12]的理论背景，该方法已由笔者考虑到实验结果而进行了修正。这个方法提出了可以计算粉尘爆炸频率的一个理论，从而根据一种特殊情况下可以接受的概率，原则上能够计算可以容许的物理条件。

这个方法的基础是，对于在可燃材料云中发生的爆炸，一种化学反应必须予以激发，并且所产生的火焰应当在整个粉尘云中传播。

爆炸的起爆和传播这两个条件显然是必不可少的，因为假如第一个条件没有实现，则链式反应就不可能开始，而如果第二个条件没有得到满足，则激活的颗粒将把自己烧光而不会激起一个自持的反应。

因此，在一个时间区间 t 中，爆炸的次数是反应原子对的数目（这些原子对将在时间区间 t 中越过能垒(energy barrier)）与一个原子对在接连横跨过能垒后火焰传播的概率的乘积。这可以表达成如下的数学形式：

$$N_t = n_t P_t \quad (1)$$

式中 N_t 为在时间区间 t 中充分发展的爆炸的次数， n_t 为越过能垒的原子对的总数， P_t 为粉尘云中火焰传播的概率。

显然，有两种可能的起爆机理。第一种机理是，一个热表面是起爆源，称为“表面起爆”。第二种机理是，反应是被“周围”空气温度超过绝对零度这一事实所引起，这称为“自起爆”。

如果表面起爆过程中包含的原子对的数目为 n_s ，而自起爆过程中包含的数目为 n_a ，则 n_t 的值可能是 n_s 或者可能是 n_a ，视系统中进行的起爆方式而定。然而，实际上，两种起爆方式都可能进行，因此

$$n_i = n_s + n_a \quad (2)$$

对于一个均匀的系统, Arrhenius 方程给出概率 P^* , 这是一原子对将以单一趋近势垒的方式越过高度为 E 的能垒的概率,

$$P^* = e^{-E/RT} \quad (3)$$

式中 R 为绝对气体常数, T 为反应物的温度, E 为材料的激活能。

然而, 在所考虑的系统, 两种反应物可能处于不同的温度之下。例如, 与热表面相邻的氧分子或原子可能处于与热表面相同的温度之下, 而趋近热表面的粉尘颗粒, 却可能是处于周围温度之下。另一方面, 辐射传热可能将趋近热表面的颗粒的表面温度, 提高到热表面的温度。可是, 哪种可能性是合适的, 只能由实验的结果来确定。

在我们这里进行的研究中, 假定反应物是处于不同的温度之下。为了克服系统的非均匀性的困难, 假定对于任何反应物的一个分子, 有效动能与分子的温度成正比, 只要在碰撞过程中动能是守恒的, 碰撞的总能量为

$$\zeta' = R(T_1 + T_2) \quad (4)$$

式中 ζ' 为碰撞的总能量, T_1 和 T_2 为互相碰撞的两个原子反应物的温度。

在这基础上,

$$P^* = \exp\{-2E/[R(T_1 + T_2)]\} \quad (5)$$

而因为 $R \approx 2 \text{ cal } ^\circ\text{K} \cdot \text{mol}$, 所以

$$P^* \approx \exp[-K_1/(T_1 + T_2)] \quad (6)$$

式中 K_1 为传统的激活能, P^* 为一原子对以单一趋近方式越过能垒的概率。

这个假定是合理的, 因为一个分子的动能 KE 由下式给出:

$$KE = (1/2)mv^2 = (1/2)m(\sqrt{3RT/M})^2 \quad (7)$$

式中 m 为颗粒的质量, v 为速度, M 为分子量。

因此, 动能与温度成正比, 而与给定系统内的原子或分子的质量无关。

现在更详细地讨论表面起爆, 因为它是本研究工作的起爆方式。与热表面碰撞的氧分子的数目, 等于如下一个体积内存在的分子的数目: 这个体积的横截面积等于热表面的面积, 其高度等于一个分子在一个单位时间内移动的距离。可以得到, 每秒钟与热表面的单位面积碰撞的分子的数目为

$$n_1 = \alpha_1 (T'_a)^{-1/2} \quad (8)$$

式中 T' 为试验弹内部的周围空气温度, α_1 为比例常数。

与热表面碰撞的这个数目的一部分数目 F 将离解, 可以得到, 每秒钟离开单位表面积离解原子的数目为

$$n_2 = 2\alpha_1 F (T'_a)^{-1/2} \quad (9)$$

这些离解的原子以速度 $\sqrt{3RT_s/M}$ 离开热表面, 而且与距离为 $\tau\sqrt{3RT_s/M}$ 以内的其他的原子相碰撞。这里 T_s 为热表面的温度, τ 为时间。

每单位面积上氧原子与粉尘颗粒之间的碰撞数目 n_3 , 与每秒钟离开表面的氧原子的数目 n_2 , 以及与绕热丝周围的厚度为 $\tau\sqrt{3RT_s/M}$ 的一层内部的颗粒数目都成正比。于是,

$$n_3 \propto n_2 \tau \sqrt{3RT_s/M} CS = \alpha_3 CS (T_s)^{1/2} (T'_a)^{-1/2} F \quad (10)$$

式中 C 为粉尘浓度, S 为粉尘的比表面积。

于是, 在起爆过程中, 在时间 t 内越过能垒的原子对数目 n_s 由下式给出:

$$n_s = n_3 A t \exp[-K_1/(T_p + T_s)] \quad (11)$$

式中 A 为热表面的面积, T_p 为可燃颗粒的表面温度。

根据上面的讨论, T_1 与 T_p 等价, T_2 与 T_s 等价。 T_p 的值是未知的, 必须根据实验结果来确定。

现在回头来讨论传播过程。在推导传播概率的表达式时要作两个假定。

① 当一原子对越过能垒并燃烧时, 它将把它的相邻原子的温度提高到火焰的温度 T_f 。接下来这又把相邻颗粒的表面的温度提高到温度 T_f 。

② 自由氧原子的温度为周围空气的温度 T'_a 。

然而, 这两个假定还是令人怀疑的, 因为与燃烧颗粒邻接的自由氧原子温度可能提高到 T'_a 与 T_f 之间的某一个值。这点再一次必须由实验来解决。

因此, 在传播过程中以单一趋近能垒的方式越过此能垒的一原子对的概率为

$$P^* = \exp[-K_1/(T'_a + T_f)] \quad (12)$$

式中 T'_a 为方程 (4) 中的 T_1 , 而 T_f 为方程 (4) 中的 T_2 。

如果现在有 n 个趋近能垒, 则这些趋近中之一不越过能垒的概率为

$$\bar{P} = (1 - P^*)^n \quad (13)$$

而某一单一趋近越过能垒的概率为

$$P = 1 - (1 - P^*)^n \quad (14)$$

或

$$1 - P = (1 - P^*)^n \quad (15)$$

式中 P 及 P^* 相对于 1 都是小量。对方程 (15) 的两端取对数, 得到

$$P_p = nP^* = n \exp[-K_1/(T'_a + T_f)] \quad (16)$$

在传播过程中趋近能垒的数目与时间无关, 它由下式给出:

$$n = \alpha_2 C S (T'_a)^{-1/2} \left[\frac{\exp(-K_2/T'_a)}{\delta_2 + \exp(-K_2/T'_a)} \right] \quad (17)$$

因此, 如果仅考虑表面起爆, 则在时间区间 t 内, 给出爆炸总数目的最后方程变成

$$N_t = \alpha C^2 S^2 A t \exp\left(\frac{-K_1}{T'_a + T_f}\right) \left[\frac{(T'_a)^{-1/2}}{T'_a} \exp\left(\frac{-K_1}{T'_a + T_f}\right) \left(\frac{\exp(-K_2/T'_a)}{\delta_1 + \exp(-K_2/T'_a)} \right) \cdot \left(\frac{\exp(-K_2/T'_a)}{\delta_2 + \exp(-K_2/T'_a)} \right) \right] \quad (18)$$

式中 δ_1 和 δ_2 都为实验的常数。

在本研究工作中, 考虑到方程 (18) 的简化, 有一些参量保持为常量。首先, 热表面的温度将保持为常量, 使 T_s , T_p 及 T'_a 也将为常量, 于是方程 (18) 的方括弧内的项都变为常量。其次, 只有一种粉尘 (石松子 (Lycopodium)) 用来使粉尘的比表面积为常量。热表面的面积也将保持为常量。把这些常量代入方程 (18), 它就可以化成

$$N_t = \beta t C^2 \exp[-K_1/(T_f + T'_a)] \quad (19)$$

方程 (19) 给出时间区间 t 内可能的爆炸数目是粉尘浓度、试验弹内部空气温度及粉尘云燃烧所产生火焰的温度三者的函数。

火焰温度的一个表达式已经根据本文所用系统的能量与质量的平衡推导出来^[13]。对于本文所用的粉尘及实验条件, 这个火焰温度的最终表达式为

$$T_f = \frac{352 + 28230\bar{C} + 516m(C - \bar{C})}{(352/T_a) + 1.86\bar{C} + 1.76m(C - \bar{C})} \quad (20)$$

式中 C 为粉尘浓度, \bar{C} 为粉尘燃烧掉的数量, m 为粉尘云气体部分得到的温度 T_f 与颗粒的初始温度 T_a 之间的差值的分数。

3 实验

设计了容量为 1l 的圆筒形试验弹来进行爆炸试验。试验弹装备有固定在粉尘弥散装置上的粉尘弥散环。离弹底约 100 mm 高处有一对直径 20 mm 的机制套环焊接在弹壳上。这些套环的孔内装有陶瓷绝缘套管, 在这些套管上有滑动支架。这些滑动支架夹住并控制着一电热丝的暴露表面, 这根电热丝用作粉尘云的起爆源。用一电源组的直流电源将点火丝加热到所需的温度。这种试验弹的详图见前文[14]。为了满足健康和安全的规定, 设计了一个收尘系统与弹体连接在一起。此系统可收集任何未燃烧的粉尘和各种试验后留下的任何残留物。

如同方程 (18) 所指出的, 上述的分析要求精确测量热表面的温度 T_s 和试验弹内部空气的温度 T_a 。

在爆炸试验过程中, 热丝的温度用光学高温计来测量。高温计是直接对照一标准的铂、13% 铑-铂温差电偶来校准, 以便消除测量热表面温度时的任何误差。发现高温计读数及温差电偶读数是灵敏地线性的, 没有偏离线性曲线超过 2°C 的点。如图 1 所示, 这个关系可以

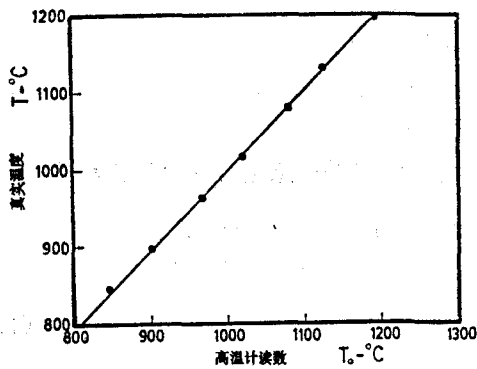


图 1 热表面的真实温度与高温计读数之间的关系

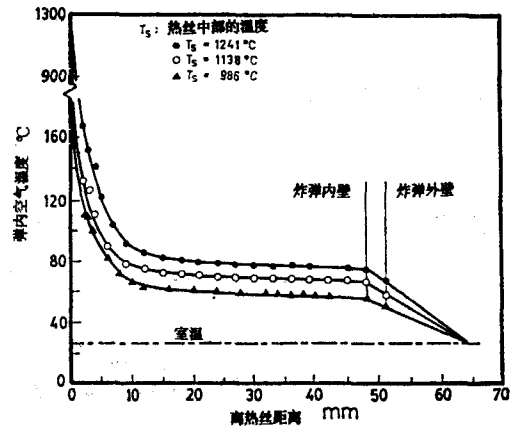


图 2 试验弹内部的空气温度分布

表示成如下形式:

$$T_s = 1.0098T_0 - 11.58 \quad (21)$$

式中 T_s 为温差电偶读数 (单位°C), T_0 为高温计读数 (单位°C)。

对热表面的不同温度和面积确定了试验弹内部空气的温度分布。对于热表面的面积不变而温度不同的情况, 试验弹内部空气温度的典型分布如图 2 所示, 这是用温差电偶设备得到

的,此装置将热丝屏蔽了起来,以避免读出热辐射。一般情况,弹体内部的空气温度分布可以分成如图2中所示的两个部分。第一部分是其中的空气温度迅速降低到接近热表面的温度。第二部分是其中的温度下降得非常慢,几乎是常量。就是这种几乎是常温的温度主要控制着传播机理,它在本文研究中用 T'_a 表示。

在这里使用的爆炸装置中,采用压缩空气吹风来使爆炸粉尘弥散。因此,对于给定质量的粉尘,压缩空气的压强可以影响粉尘的弥散程度,从而影响弹体内粉尘云的均匀性。为了解决这个问题,用实验建立了在爆炸发生最大概率下粉尘浓度与弥散压强之间的关系^[14]。这个关系示于图3,从图中可得试验粉尘每一质量的最佳弥散压强。

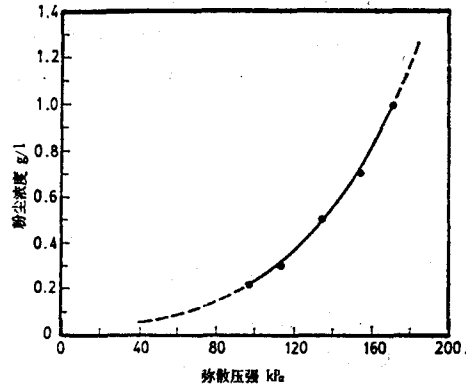


图3 粉尘浓度与最佳弥散压强的函数关系

在本文的研究工作中,选用石松子粉尘作为试验材料。这种材料是石松(club moss)的孢子,具有非常确定的化学特性和物理特性。这种粉尘是几乎球形的等弥散体,具有约 $30\mu\text{m}$ 的均匀粒度。

用粉尘浓度对爆炸发生概率的影响来检验本文提出的模型的正确性。因而,对于15种不同的粉尘浓度(0.1—1.4g/l),每一粉尘浓度都在相同的一组条件下进行了100次爆炸试验。对于每一粉尘浓度,这些相同的条件包括相同的热表面面积、温度和弥散压强。根据100次爆炸试验的结果确定了爆炸的频率。

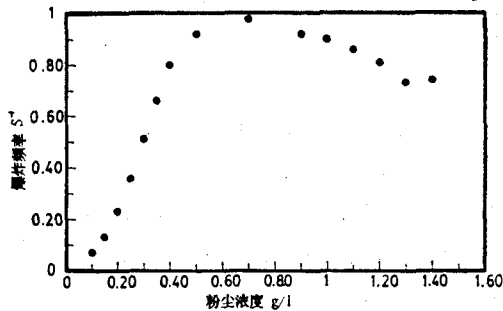


图4 粉尘爆炸发生频率与平均粉尘浓度的函数关系(实验结果)

目急剧上升,过此以后则缓慢地下降。

对于不变的热表面温度,弹体内部空气的平均温度 T'_a 将是常量。 T'_a 的值从图2中的空气温度分布曲线得到。在热表面温度为 1170°C 时, T'_a 的值为 80°C 。

再一次考虑图4。所考虑的时间 t 约为100秒,因为在本文试验装置中每次试验允许粉尘云跟热表面接触约1秒钟,而在每一粉尘浓度下进行100次试验。于是方程(19)变成

$$N_i = \beta' C^2 \exp[-K_1/(T_f + T'_a)] \quad (22)$$

式中 $\beta' = \beta \times 100$ 。重新整理方程(22)并取对数,可得

4 结果和讨论

在本研究工作中考查的结果将可能的爆炸数目与粉尘浓度联系起来。粉尘浓度是变化的,而此系统的所有其他参量则都保持为常量,热表面的温度保持为 1170°C 的常量。实验装置和爆炸试验方法的详情见前文[14]。在本文研究工作中考虑的实验结果示于图4。此图示出了可能发生的爆炸数目与粉尘浓度之间的关系。从图4可以看出,粉尘浓度在 0.7g/l 左右时,可能发生的爆炸数

$$\ln(N_f/C^2) = \ln\beta' - K_1/(T_f + T_a) \quad (23)$$

式中 T_f 的值根据方程 (20) 得出。

为了根据实验结果来检验方程 (22) 的正确性, 必须对每一粉尘浓度 C 确定火焰温度 T_f 。为了作到这点, 必须先确定方程 (20) 中的 \bar{C} 和 m 的值。理论上确定 \bar{C} 和 m 二者很困难, 需要用实验对任何特定系统求得二者的值。可是, 这超出了本文研究工作的范围。为了确定这两个值, 需作下面的一些假定:

$$\left. \begin{aligned} \bar{C} &= C, \text{ 当 } C < C_s \text{ 时} \\ \bar{C} &= C_s, \text{ 当 } C > C_s \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中 C_s 为化学计算的粉尘浓度。

这个假定是以实验观测为基础的。在本文的实验中, 粉尘云的完成是对每一粉尘浓度利用最佳相关弥散压强来达到的。因此, 可以观测到, 当粉尘浓度低于化学计量的浓度时, 弹体内没有未燃烧的粉尘, 而当粉尘浓度高于化学计量的浓度时, 弹体内却留下一些未燃烧的粉尘。

常数 m 取 0.5 作为第一近似。这个常数在物理上意味着, 可燃颗粒的温度 T_p 升高了火焰温度 T_f 与颗粒初始温度 T_a 之差的一个分数 m , 即

$$T_p = m(T_f - T_a) + T_a \quad (25)$$

这个假定表明, 粉尘颗粒的温度取火焰温度与颗粒初始温度的平均值:

$$T_p = (1/2)(T_f + T_a) \quad (26)$$

然而, T_p 的值受许多因素的影响。这些因素有粉尘的比热, 温度梯度, 颗粒的质量, 火焰的辐射热, 粉尘浓度, 系统的物理尺寸, 等等。

考虑到上面这两个假定, T_f 可以从方程 (20) 得出。因此, 方程 (23) 取如下形式:

$$(\text{实验上的已知量}) = \ln\beta' - K_1/(\text{已知量}) \quad (27)$$

事实上, 如果图 4 的实验结果可以用所提出的模型来适当地描述, 则方程 (23) 将画成一条直线, 如图 5 所示。实际上这是 $m = 0.5$ 的一条地地道道的直线。这条直线的截距确定出唯象系数 β' 的值。这条直线的斜率则是传统的激活能 K_1 。

根据方程 (22) 利用有关的 K_1 和 β' 的值画出的曲线, 与实验结果一起示于图 6。可以看出, 理论曲线与实验点拟合良好, 尽管在理论分析时作了一些假定。于是, 可以有把握地作出结论, 本文模型与实验结果是符合的。

在这里无疑要考虑改变假定的 m 值的影响。当 m 的值取为 0.3 时, 所得的曲线示于图 7。可以看出, 模型计算得到的曲线与实验数据拟合的程度比 $m = 0.5$ 时的好得多。对于不变的热表面温度 1170°C 和 $m = 0.3$, 可能发生粉尘爆炸的频率与粉尘浓度的函数关系为

$$N_f = 2.195 \times 10^6 C^2 \exp[-27200/(T_f + T_a)] \quad (28)$$

式中

$$\beta' = 2.195 \times 10^6, K_1 = 27200 \text{ cal/g} \cdot \text{mol}$$

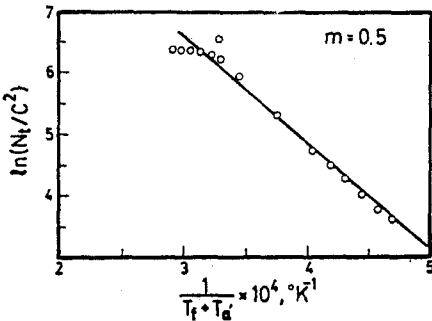


图 5 $m = 0.5$ 时, 理论直线拟合实验数据

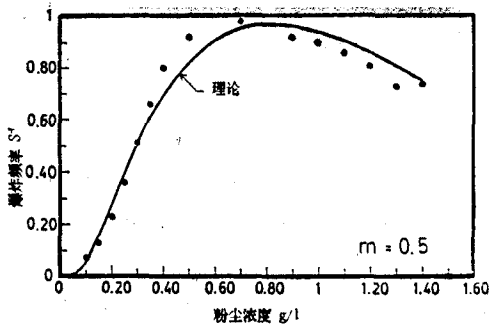


图6 $m=0.5$ 时, 理论计算得到的粉尘爆炸发生频率以及实验得到的结果

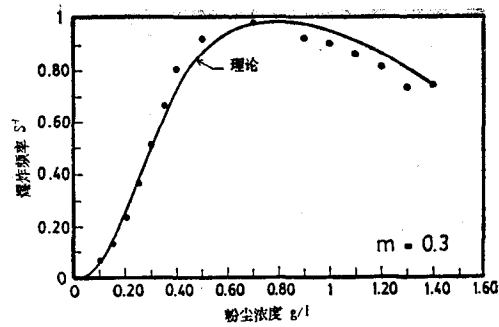


图7 $m=0.3$ 时, 理论计算得到的粉尘爆炸发生频率以及实验得到的结果

应当指出, 当 $m=0.3$ 时, 激活能 K_1 的值与报道的类似反应类型类似材料的激活能的价值非常一致。Kosik et al^[15]报道, 木材的激活能为 $30000\text{cal/g}\cdot\text{mol}$ 。这支持了本文讨论的概念, 支持了本文研究工作过程中所作的假定。

5 结 语

提出了计算粉尘爆炸发生频率的一个本构模型。此模型的第一步是能够建立粉尘爆炸发生频率与所涉及的各种因素之间的关系。此模型的正确性已利用石松子粉尘进行大量实验所得的结果加以证实。对于所考虑的系统, 此模型计算得到的粉尘爆炸发生频率与粉尘浓度之间的函数关系, 与实验所确定的非常接近。此模型的准确性也用如下事实作了验证: 用此模型计算得到的激活能, 与类似材料已报道过的激活能很一致。

本模型的实际用途是很明显的。以本模型作基础可以将粉尘予以分级。对每一种工业粉尘, 确定出其唯象系数 β' 和表观激活能 K_1 , 便可以做到这点。这样, 具有较高 β' 值和较低 K_1 值的粉尘, 与具有较低 β' 值和较高 K_1 值的粉尘相比, 前者表示更容易发生粉尘爆炸灾害。

参考文献 (15篇, 略)

董务民译自: *Particulate Sci. Tech.*, 6, 3 (1988): 343—358.

读者·作者·编者

请使用全国自然科学名词审定委员会已正式公布的名词术语

全国自然科学名词审定委员会, 已于1987年和1988年先后正式公布《天文学名词》(已由科学出版社于1987年9月出版)和《物理学名词——基础物理部分》(已由科学出版社于1989年3月出版)。其他学科的名词术语, 有的已经正式公布, 有的将陆续公布。根据国务院规定, 凡经名词审定委员会审定公布的名词术语, 科研、教学、生产、经营、以及新闻出版等各部门, 均应遵照使用。

本刊将努力使用已正式公布的名词术语。请本刊广大读者和作者, 也按照国家规定, 注意使用已正式公布的名词术语, 共同为早日实现我国科技名词术语的统一和规范化而努力。

《力学进展》编辑部