

电火花作用下粉尘云着火的延迟时间

卜亚杰¹, 苑春苗¹, 郝剑涛¹, 李 畅²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 为确定粉尘云在电火花作用下的着火敏感性,以钛粉为研究介质,通过以电火花能量释放速率为源项的气-粒两相能量守恒方程建立模型,获得了电火花作用下放电火花能量、粉尘粒径、环境氧体积分数、环境温度及湍流程度对粉尘云着火延迟的影响规律.结果表明:粉尘粒径大小对着火延迟的影响最大,越小的颗粒其着火越迅速;环境温度比室温高 50 ~ 100 K 时,粉尘着火延迟时间显著缩短;湍流会加速颗粒间换热速度,缩短着火延迟时间;点火能量与环境氧浓度对着火延迟的影响较小.通过模拟计算扩展了实验研究,也为相关粉尘爆炸预防工作提供理论依据.

关 键 词: 粉尘爆炸;钛粉;着火延迟时间;电火花;理论计算

中图分类号: X 932 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)11-1658-05

Electric Spark Ignition Delay Time of Dust Clouds

BU Ya-jie¹, YUAN Chun-miao¹, HAO Jian-tao¹, LI Chang²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: YUAN Chun-miao, E-mail: yuanchunmiao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the electric spark ignition sensitivity of dust clouds, using titanium powders as a sample, a mathematical model was established based on the gas-particle phase energy conservation equation with spark energy release rate as source phase. The influence of spark energy, particle size, ambient oxygen concentration, ambient temperature and turbulence on the ignition delay of dust cloud was obtained. Results show that particle size has the greatest impact on ignition delay, smaller particle size results in shorter ignition delay. When the ambient temperature is 50 ~ 100 K higher than the room temperature, the ignition delay time is significantly shortened. Turbulence accelerates the heat transfer rate between particles and shortens the ignition delay time. In addition, the spark energy and the ambient oxygen concentration have little effect on the ignition delay. The calculation is considered as supplement to experimental research as well as theoretical basis for the relevant dust explosion prevention.

Key words: dust explosion; titanium powder; ignition delay time; electric spark; theoretical calculation

近年来,重特大金属粉尘爆炸事故频发,严重威胁着相关粉体过程工业生产的安全.2010年发生在美国 AL Solutions 公司的钛金属粉尘爆炸事故导致 3 人死亡,1 人受伤^[1].2014 年昆山“8·2”铝粉爆炸事故导致 75 人死亡,185 人受伤,直接经济损失高达 3.51 亿元^[2].因此,研究粉尘着火爆炸的发生过程并采取相应防护措施避免灾难的

发生具有重要意义.研究表明,可燃金属粉尘(钛、铝、镁、铁等)极度危险,最小点火能量通常低于 10 mJ^[3-4],若在空间内被意外分散为粉尘云,遇到点火源后着火爆炸的过程十分迅速.对于粉尘爆炸的防护主要在测试其最小点火能量、最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、爆炸极限等特征参数的基础上,采取泄爆、隔爆等措施预防粉

尘爆炸事故的发生^[5]. 随着粉体惰化技术研究的发展,气相惰化与惰性粉尘惰化都能有效地延缓或阻止金属粉尘爆炸的发生^[6-7],抑爆技术作为一种更为积极有效的防爆方法逐渐成为粉尘爆炸防护措施研究的热点,而研究影响粉尘爆炸过程着火延迟时间的因素,可以为抑爆技术的使用提供依据,使得能在火焰传播的初期采取有效措施抑制粉尘爆炸,或有效降低粉尘爆炸的强度.

钛作为工业生产中常见的金属元素,其化学性质活泼,容易与空气中氧气发生剧烈的氧化反应. 本文以着火敏感性极高的微米钛粉为研究介质,以电火花为点火源,基于气-粒两相能量守恒方程建立数学模型,模拟计算了不同因素对粉尘云着火延迟时间的影响,为相关粉尘爆炸预防工作提供理论依据.

1 粉尘云着火模型

1.1 气-粒两相能量守恒方程

假设放电瞬间球形粉尘云内的颗粒分布均匀稳定,球坐标下气-粒两相的能量守恒方程式为气相:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = (\lambda_g + \xi c_g \rho_g) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \frac{N4\pi r_p^2 h_c (T_p - T_g) + 4\pi r_p^2 q \rho_g c_s k_0 \exp(-E_a/RT_p) - \frac{3\sigma \varepsilon_p}{r_s} (T_g^4 - T_0^4) + \frac{E_s}{\frac{4}{3}\pi r_s^3 \cdot t_s}}{\frac{4}{3}\pi r_s^3 \cdot t_s} \quad (1)$$

颗粒相:

$$c_p \rho_p \frac{4}{3}\pi r_p^3 \frac{\partial T_p}{\partial t} = 4\pi r_p^2 q \rho_g c_s k_0 \exp(-E_a/RT_p) + 4\pi r_p^2 h_c (T_g - T_p) + 4\pi r_p^2 \sigma \varepsilon_p (T_g^4 - T_0^4) \quad (2)$$

考虑到反应过程中颗粒的消耗,其粒径变化满足:

$$\rho_p \frac{4}{3}\pi \frac{\partial r_p^3}{\partial t} = -4\pi r_p^2 \rho_g c_s k_0 \exp(-E_a/RT_p) \quad (3)$$

初始条件:

$$t=0, T_g = T_p = T_0, r_p = r_{p,0} \quad (4)$$

边界条件:粉尘云球对称分布,中心区域气-粒两相温度梯度均为 0,即

$$r=0, \frac{\partial T_p}{\partial r} = 0, \frac{\partial T_g}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

考虑到边界内部的热量传递,以及边界外部的对流及辐射散热,则边界处气体温度应满足:

$$r=r_{\text{cloud}}, \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r} = h_c (T_0 - T_g) + \varepsilon_g \sigma (T_0^4 - T_g^4) \quad (6)$$

式中: $c_g, \rho_g, T_g, \varepsilon_g$ 分别表示气体比热容、密度、温度、热辐射系数; $c_p, \rho_p, T_p, \varepsilon_p$ 分别表示颗粒比热容、密度、温度、热辐射系数; $r, r_p, r_{p,0}, r_{\text{cloud}}, r_s$ 分别表示计算节点到粉尘云中心点距离、颗粒当前半径、颗粒初始半径、粉尘云半径、放电火花半径; E_s, t_s 分别表示放电火花能量、火花放电时间; $\xi, q, E_a, \lambda_g, h_c, R, \sigma, c_s, k_0$ 分别表示湍流系数、化学反应放热、表观活化能、气体导热系数、气体对流换热系数、普适气体常数、斯蒂芬玻尔兹曼常数、环境氧体积分数、指前因子.

1.2 参数限值条件的确定

单个钛粉颗粒在受热着火期间,将发生非均相的表面反应,颗粒温度小于其沸点. 着火计算域为非密闭空间,火花内核外的火焰区气体温度 T_g 应低于其绝热火焰温度 T_f (即 3 343 K^[8]). 相关实验研究表明火花内核区的最高温度可达 60 000 K^[9],即内核区气体温度 $T_g \leq 60\,000\text{ K}$.

计算过程中涉及的其他重要参数如表 1 所示.

表 1 计算参数表			
Table 1 Parameters for calculation			
参数	变量符号	数值	单位
气-粒换热系数	h_c	2.0	1
钛粉密度	ρ_p	4 506.0	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
钛比热容	c_p	0.522	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
钛化学反应热	q	19.7	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
钛粉热辐射系数	ε_0	0.75	1
表观活化能	E_a	207.9	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

1.3 粉尘云着火判据

采用等时间、等空间的步长对方程(1)~(6)进行离散,使用 C 语言对离散后的方程迭代计算,以不同时间节点对应的空间节点处的温度制图,得到图 1 和图 2 所示的电火花作用下粉尘云发生着火和未发生着火时的空间温度场分布. 从图 1 可以看出,火花放电开始后,火花内核区外的温度极大值点由火花中心陆续向外移动,火焰前端在 2 ms 时位于节点 A 处,在 3.38 ms 时火焰区分别传播到节点 B、C 处,表明发生了可自持的火焰传播,即粉尘云发生了着火. 图 2 中的温度分布曲线在火花放电开始后未出现局部极大值点,空间温度由于热量耗散逐渐降低,远离火花中心的区域受火花热辐射的影响温度虽有上升,但远低于颗粒的着火温度,即粉尘云未发生着火. 模拟计算时,若火焰能够自持传播到 5 倍火花内核半径以外,则认为点火成功,终止计算进程. 计算中,取着火延迟时间为在粉尘云能被点燃的条件下,从火花

放电开始到火花区外空间温度突跃的时间,表示火花消失后粉尘云颗粒升温至着火并向周围放热,点燃外层颗粒,开始了自持的火焰传播。

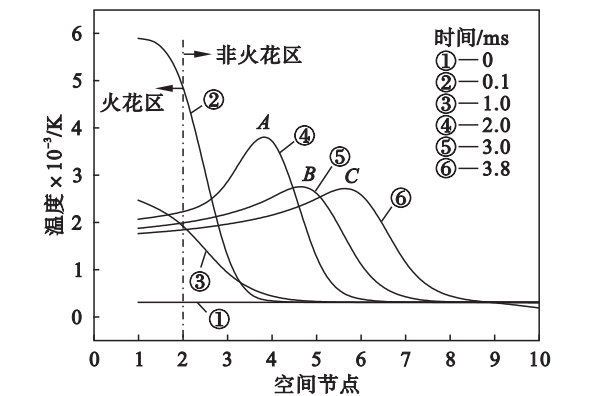


图 1 10 μm 钛粉尘云着火时的空间温度分布 (E=5 mJ)
Fig. 1 Temperature distribution of ignited 10 μm Ti dust cloud (E=5 mJ)

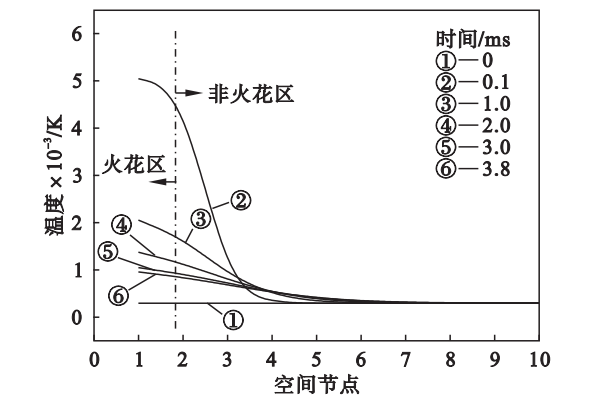


图 2 28 μm 钛粉尘云未着火时空间温度分布 (E=5 mJ)
Fig. 2 Temperature distribution of un-ignited 28 μm Ti dust cloud (E=5 mJ)

2 结果与讨论

2.1 点火能量对着火延迟的影响

图 3 为不同点火能量下 2 kg/m³ 质量浓度的粉尘云着火延迟时间的结果。可以看出,粉尘云着火延迟时间随着点火能量的减小而延长,当点火能量较小时,其对着火延迟的影响程度增大,直至能量小到不能使粉尘云被点燃。放电火花能量越大,火花能量密度及能量释放速率越大,点火中心温度迅速上升,氧气直接扩散到钛粉颗粒表面,发生非均相点火,在短时间内发生自持的火焰传播。Gao 等^[10]使用 20 L 球测得了 4 种不同点火头能量下的十八醇粉尘云着火延迟时间,使用最大能量的 10 J 化学点火头时着火延迟最短,与本文模拟所得规律相符。

2.2 粉尘粒径对着火延迟的影响

粉尘粒径是计算模型中用到的主要参数之

一,也是实验研究中重点测试的影响因素。已有研究表明粉尘粒径对粉尘云的最小点火能有较大的影响,Kalkert – Schecker 理论认为,微米粉尘的最小点火能量与粒径的 3 次方成正比^[11],一般来说,粉尘粒径越小,比表面积越大,其所需的最小点火能越小,越容易点燃;反之,粉尘颗粒越大,越不容易点燃。对于部分金属粉尘,当粒径进入纳米范围时,甚至不需要外在点火源,与空气或实验设施之间摩擦产生的能量就足以引燃粉尘^[12]。

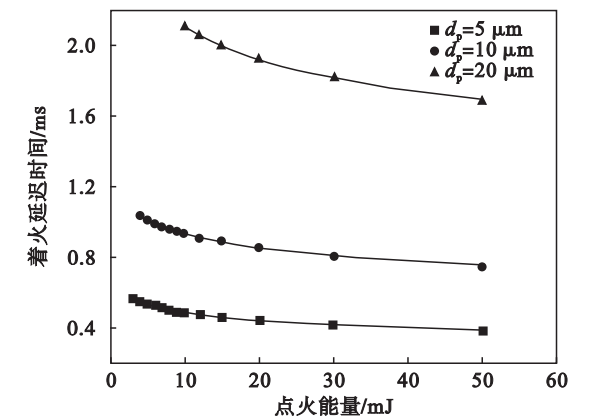


图 3 电火花能量对着火延迟时间的影响
Fig. 3 Effect of electric spark energy on ignition delay time

图 4 是不同粉尘粒径下计算所得粉尘云着火延迟时间的结果。在其他条件相同的情况下,粉尘粒径越大,粉尘云的着火延迟时间越长,且颗粒粒径对粉尘云着火延迟的影响很大。对空气中悬浮钛粉颗粒的燃烧实验表明,钛粉初始粒径对燃烧时间影响很大,粉尘粒径越小,比表面积越大,颗粒燃烧更剧烈,燃烧时间更短^[13]。从热力学角度看,颗粒较小时,其热容量也较小,高温气体对它的加热速率较快,有利于点火的成功,因此着火延迟时间很短。

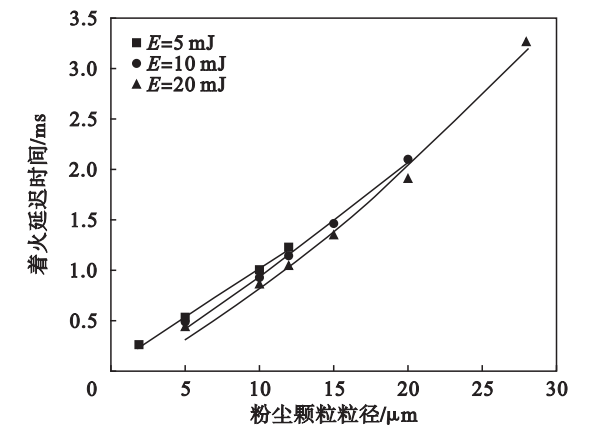


图 4 粉尘粒径对着火延迟时间的影响
Fig. 4 Effect of particle size on ignition delay time

2.3 环境氧体积分数对着火延迟的影响

在不同粉尘粒径及点火能量的计算条件下，氧体积分数对粉尘云着火延迟时间的计算结果如图 5 所示. 可以看出,随着氧体积分数的减小,着火延迟时间略有上升,但变化较小,在纯氧中的着火延迟时间与空气中相差不大. 当环境氧体积分数减小时,一方面,颗粒之间因供氧不足而出现争夺氧气的情况,使已燃颗粒表面燃烧速率及放热速率减慢,导致粒径较大的颗粒不能完全燃烧;另一方面,未燃粉尘颗粒则因升温较慢而变得愈加难以被点燃,甚至不能着火,故导致着火延迟时间减小.

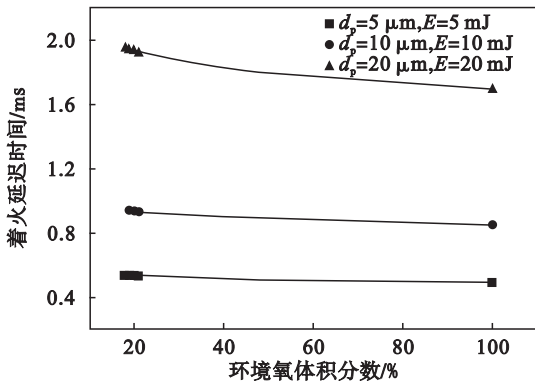


图 5 环境氧体积分数对着火延迟时间的影响
Fig. 5 Effect of oxygen concentration on ignition delay time

2.4 环境温度对着火延迟的影响

一次粉尘爆炸事故的发生往往开始于意外放热,即设备表面或环境空间内温度远超过正常室温,或作业环境中其他可燃物发生火灾引发了粉尘的着火爆炸. 图 6 是不同环境温度条件下,粉尘云着火延迟时间的计算结果. 可以看出,当环境温度比室温高 50 ~ 100 K 时,粉尘着火延迟时间显著下降,随着温度的进一步升高,着火延迟时间开始缓慢下降,并趋于平稳. 同时,较大粒径粉尘的着火受环境温度影响较大,较高的环境温度使颗粒在受热前的初始温度较高,缩短了其吸热着火的过程.

2.5 湍流对着火延迟的影响

由于粉尘具有沉降、凝聚等性质,实验中使用气流将待测粉尘吹入爆炸测试容器中,若喷吹压力较小,粉尘云无法以颗粒初始粒径分散,且部分颗粒在喷吹结束后将快速沉降,使得实际粉尘浓度偏低. 因此,粉尘云各爆炸参数的测试中都不应避免点火空间内存在湍流. 研究显示,在喷吹后 60 ms 时点火将获得分散均匀、湍流较小的最佳实验条件^[14].

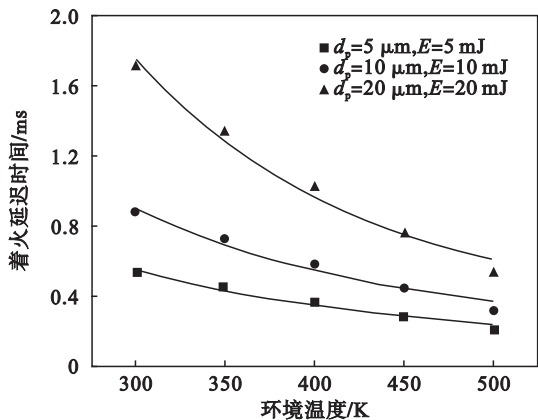


图 6 环境温度对着火延迟时间的影响
Fig. 6 Effect of ambient temperature on ignition delay time

以点火能量 5 mJ, 颗粒粒径 5 μm, 点火能量 10 mJ, 颗粒粒径 10 μm 两组计算条件为例,保持粉尘质量浓度 2 kg/m³ 不变,所得计算结果如图 7 所示. 湍流越大,着火延迟时间越短,且变化趋势逐渐变缓,不同条件下变化趋势基本相同. 这是因为,湍流越大,就加快了颗粒间换热速度,同时使整个粉尘云空间的换热加快,加热到颗粒所需温度的时间越短,着火延迟时间越短,越容易点燃. 但湍流过大则会把热量带离点火核心区域,使得系统散热速率超过吸热速率,最终粉尘云不会被点燃.

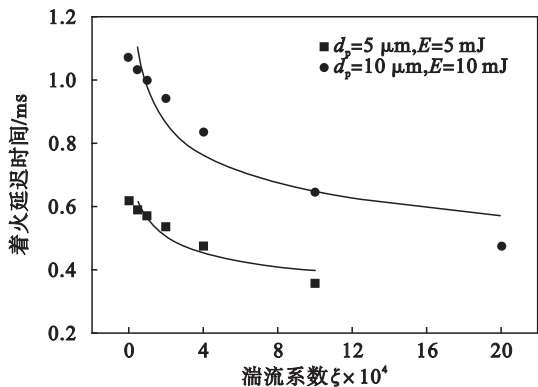


图 7 湍流对着火延迟时间的影响
Fig. 7 Effect of turbulence on ignition delay time

3 结 论

1) 建立模型计算研究了点火能量、粉尘粒径、环境氧体积分数、环境温度及湍流对粉尘云着火延迟时间的影响. 粉尘粒径大小对着火延迟的影响最大,越小的颗粒其着火越迅速;环境温度比室温高 50 ~ 100 K 时,对大颗粒粉尘影响较大,其着火延迟时间显著缩短;点火空间内一定的湍流会加速颗粒间换热速度,使得着火更加迅速,

(下转第 1672 页)