

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.01.002

可燃性粉尘云着火危险性实验

黄楚原,袁必和,赵 齐,员亚龙,刘 静,陈先锋

(武汉理工大学 安全科学与应急管理学院,湖北 武汉 430070)

摘要:为了深入研究淀粉粉尘着火危险性的内在机理和规律,采用粉尘云最低着火温度测试系统对不同质量浓度、粒径下的玉米淀粉粉尘云最低着火温度进行实验研究,得到了不同工况下的粉尘云最低着火温度、着火延迟时间等参数和最低着火温度下的炉壁温度曲线,并以此综合评价玉米淀粉粉尘云的着火危险性。结果表明:随着测试温度降低,着火延迟现象愈发明显。粉尘云质量浓度逐渐增大时,其最低着火温度先下降后上升、存在最小值,不同质量浓度下粉尘云的着火延迟时间与其最低着火温度成正比。淀粉颗粒粒径的减小降低了粉尘云最低着火温度,且二者之间存在相关性较强的函数关系。

关键词:最低着火温度;粉尘云质量浓度;着火延迟时间;粉尘粒径

中图分类号:X 932

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)01-0008-06

Experimental Study on Ignition Risk of Combustible Dust Cloud

HUANG Chuyuan, YUAN Bihe, ZHAO Qi, YUN Yalong, LIU Jing, CHEN Xianfeng

(School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract:In order to investigate the internal mechanism and regularity of ignition hazard of starch dust, the minimum ignition temperature of corn starch dust cloud under different concentration and particle size was tested by using the minimum ignition temperature test system of dust cloud. The minimum ignition temperature, ignition delay time and the furnace wall temperature curve under different conditions were obtained, and the ignition risk of corn starch dust cloud was evaluated comprehensively. The results showed that with the decreasing of the test temperature, the ignition delay phenomenon became more obvious. When the concentration of dust cloud increased gradually, the minimum ignition temperature first decreased and then increased, and there is a minimum value. The ignition delay time of the dust cloud was proportional to the minimum ignition temperature with different concentrations. The minimum ignition temperature of dust cloud reduced with the decrease of starch

收稿日期:2019-12-03。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774221, 51703175);中央高校基本科研业务费资助项目(2019-YB-039, 2019-zy-299)。

作者简介:黄楚原(1991—),男,陕西汉中,人,博士生。通信联系人:陈先锋(1975—),E-mail:cx618@whut.edu.cn

引用本文:黄楚原,袁必和,赵齐,等.可燃性粉尘云着火危险性实验[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(1):8-13.

particle size, and there is a strong functional relationship between them.

Key words: minimum ignition temperature; dust cloud concentration; ignition delay time; dust particle size

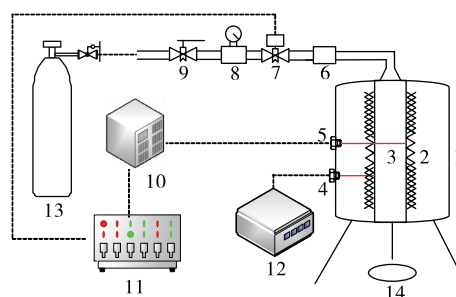
粉尘云最低着火温度是用作电器防爆设备选型和设计发热设备表面温度裕度的重要参数^[1]。2015年6月27日,台湾新北市八仙水上乐园发生重大粉尘燃爆事故,造成12人死亡,500多人受伤。经调查,事故是由于以玉米淀粉为主要原料的彩粉被抛洒在空气中形成粉尘云,后接触到高于其最低着火温度的电脑灯发热表面造成粉尘云燃爆,并进一步引发堆积在地面上的粉尘层形成粉尘云而发生二次爆炸。最低着火温度作为粉尘着火危险性的特征参数之一,具有重要的理论研究和实际应用价值,因此国内外学者对其做了大量研究。LI等^[2]研究发现,煤粉、瓦斯和空气三者耦合体系中煤尘颗粒越多、越细,体系的最低着火温度越低。ADDAI等^[3-4]建立了可燃性粉尘和惰性材料混合物最低着火温度的估算模型,并通过实验发现添加惰性材料可以增大粉尘最小点火能量和最小着火温度,将最小着火风险控制在60%~80%的范围之间。DANZI等^[5]研究了不同粒径石灰石粉对面粉粉尘云最低着火温度的影响,结果表明,石灰石粉粒径对最低着火温度影响较弱。TURKEVIC等^[6]对富勒烯、石墨烯等含碳纳米材料的最小点火能和最小着火温度的研究表明,含碳纳米材料具有比煤粉更高的最小点火能,最小着火温度与煤粉基本一致都高于550℃。BOSKOVIC等^[7]对烘焙后的木粉最小着火温度进行了研究,结果表明,大于100 μm的烘焙木粉比原始状态下的木粉具有更高的最小着火温度。YUAN等^[8]发现纳米TiO₂可以提高微米Ti粉末的最低着火温度,显著降低了微米Ti粉末与热表面接触时的着火危险性。曹卫国等^[9-10]测试了玉米和小米淀粉的粉尘云着火温度、爆炸下限质量浓度、爆炸压力、爆炸氧极限浓度等参数,并对粉尘云火焰传播过程进行了研究。陈先锋等^[11]实验分析了管道内粉尘云质量浓度对火焰传播特性的影响,发现粉尘火焰传播速度和火焰温度峰值均呈现先增大后减小的特征。李刚、钟英鹏等^[12-13]测试了不同分散压力、灰分、水分等单一变量条件下粮食伴生粉尘和镁粉的最低着火温度。庞磊等^[14]研究了典型高密度聚乙烯粉尘云最低着火温度的分布特征,得到了最低着火温度与粉尘云浓度及喷粉压力的关系。

目前多数研究只是测定了某一因素作用下粉尘云最低着火温度的数值,对粉尘云着火各阶段、各参数与最低着火温度间的关系等还需要系统的研究与分析。鉴于此,文章将处于最低着火温度下的炉壁温度变化曲线分段研究,反向探究粉尘云浓度和粉尘粒径对最低着火温度的影响,分析不同浓度下着火延迟时间、粉尘粒径与粉尘云最低着火温度间的关系,探究粉尘云最低着火温度的内在机理和规律。

1 实验测试系统与方法

1.1 粉尘云最低着火温度测试系统

实验装置如图1所示,测试系统从功能上可分为加热系统、压力喷粉系统、炉体温度控制和着火温度采集系统。加热系统主体为粉尘云最低着火温度测试标准装置 Goldberg-Greenwald 管式炉(以下简称 G-G 炉),G-G 炉的主要部件为容积 276 mL、下端敞口的石英炉管,管壁外绕有中间稀、两端密的电阻丝用以保证炉管内各处温度相等,炉体上有 2 只 K 型热电偶分别用来测定炉壁温度和控制石英管的加热温度。压力喷粉系统主要由盛粉槽、电磁阀和小型储气



1—G-G 炉壳;2—加热电阻丝;3—石英炉管;4—炉体加热控温热电偶;5—炉壁温度采集热电偶;6—盛粉槽;7—电磁阀;8—小型储气罐;9—截止阀;10—数据采集仪;11—PLC 同步控制器;12—温度控制器;13—压缩空气瓶;14—反光镜。

图1 粉尘云最低着火温度测试系统

Fig.1 Test system of minimum ignition temperature of dust cloud

罐构成,用以将粉体喷出形成粉尘云。炉体温度控制和着火温度采集系统主要是由温度控制器、数据采集仪、PLC 同步控制器构成,用来调控石英管炉内温度和记录粉尘云着火温度。

1.2 粉尘云最低着火温度测试方法

实验过程中先通过温度控制器设定好石英炉管内的温度并开始加热,将预先称量并干燥好的玉米淀粉加入盛粉槽内,配气罐内充入一定压力的压缩空气。当石英炉管内温度稳定在待测温度时,通过 PLC 同步控制器控制电磁阀打开,将储气罐中的压缩空气通入,盛粉槽内粉尘被喷入炉体内,同时数据采集仪对 G-G 炉壁温度变化情况进行采集,并利用 G-G 炉下方的反光镜观察粉尘是否燃烧、是否有着火延迟,若火焰喷出滞后时间超过 3 s,则判定为未着火。

2 实验结果与分析

2.1 玉米淀粉粉尘云最低着火温度的测定

根据标准要求和实验方案设计,预先测定相对较大的玉米淀粉粉尘云着火温度区间,然后以 5 °C 为步长逐步降低测试温度、缩小区间,当区间缩小到 10 °C 以内,采用二分法最终确定玉米淀粉粉尘云最低着火温度。表 1 是对质量浓度为 1 200 g/m³、分散压力为 0.12 MPa 的玉米淀粉粉尘云着火情况的记录,实验测定了此工况下玉米淀粉粉尘云最低着火温度为 417 °C。

在测定玉米淀粉粉尘云最低着火温度的过程中发现,当 G-G 炉内温度达到或高于粉尘云最低着火温度时,观察到喷粉后先有部分并未着火的淀粉粉尘下落,略有延迟后产生自上到下的火焰,并在瞬间充满整个炉体。通过对比实验现象发现随着测试温度降低着火延迟现象愈发明显、越临近最低着火温度时着火延迟时间越长。

在测得玉米淀粉粉尘云最低着火温度后,进一步对此温度下的炉壁温度曲线进行处理,从图 2 可以看出,在炉内初温为 417 °C 时,受喷粉后气流和淀粉热解过程影响,炉壁温度先下降后上升。通过分析可将炉壁温度变化过程大致分为 3 个主要阶段:AB 为粉尘初始预热阶段,即喷粉后约 1.1 s 内,此阶段主要是玉米淀粉内的小分子碳氢化合物分解,炉壁温度基本维持恒定;BC 为粉尘快速热解阶段,即喷粉后 1.1~2.3 s,此时玉米淀粉中的可燃性挥发分物质开始大量吸热析出,这是造成炉壁温度出现下降的主要原因;CD 段为粉尘云快速燃烧阶段,即喷粉后 2.2~6.4 s,因炉内温度高于或达到粉尘云最低着火温度,析出的可燃性挥发分开始燃烧放

表 1 玉米淀粉粉尘云在不同温度下的着火情况

Table 1 The ignition at different temperatures of corn starch dust cloud

实验编号	实验温度/°C	着火次数/实验次数
1	410	0/10
2	428	10/10
3	423	10/10
4	418	8/10
5	414	0/10
6	416	0/10
7	417	7/10
8	416	0/10

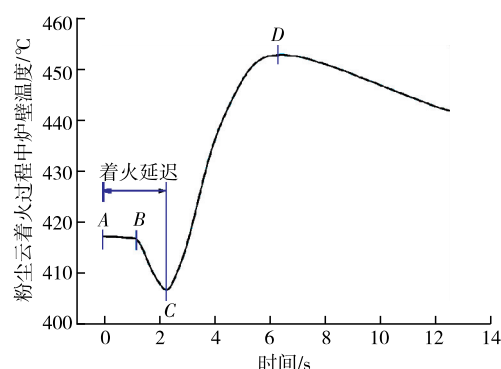


图 2 质量浓度为 1 200 g/m³ 的玉米淀粉粉尘云在最低着火温度下的炉壁温度

Fig.2 The furnace wall temperature at the minimum ignition temperature of corn starch dust cloud with 1 200 g/m³

热,炉壁温度快速上升并达到最大值 453 ℃,此后炉壁温度开始缓慢下降。

2.2 质量浓度对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响

为研究质量浓度对粉尘云最低着火温度的具体影响,分别以质量浓度为 1 200,1 600,2 000,2 400,2 800 g/m³ 的玉米淀粉粉尘云作为对象进行实验,测试结果如图 3 所示。不同质量浓度下粉尘云最低着火温度不同且着火延迟时间也不同,但着火后炉壁温度变化趋势基本一致。

从图 4 可以看出,玉米淀粉最低着火温度随粉尘云质量浓度的增大先降低后升高,在质量浓度为 2 000 g/m³ 时形成最低拐点即燃烧当量浓度。在粉尘云质量浓度低于 2 000 g/m³ 时,粉尘颗粒之间的间距在喷粉气流流场的冲击下较大,致使其相互之间吸附力作用效果减弱,单位体积内参与反应的有效粉尘颗粒数量减少。从微观角度看,粉尘云质量浓度较低时,相同温度下单位体积内反应物中活化分子较少,活化分子间的有效碰撞也较少,初期反应释放的热量少,需从外界吸收较多的能量加速粉尘热解气化,因而质量浓度低于燃烧当量时最低着火温度偏高^[15]。在粉尘云质量浓度高于 2 000 g/m³ 时,空气中氧气含量相对恒定的情况下,单位体积内粉尘颗粒数量增多、粉尘颗粒与氧气比下降,此外除参与燃烧颗粒外,过剩的粉尘颗粒还会吸收较多的热量^[16]。从微观角度上看,相同分散压力条件下,粉尘云质量浓度较大时,粉尘吸附成团效应加强,致使其比表面积减小,造成一方面粉尘颗粒与氧气接触面积减小,另一方面粉尘颗粒挥发分析出难度加大、析出速率降低,因此高于燃烧当量时最低着火温度上升。

在最低着火温度下粉尘云着火延迟现象明显,如图 4 所示,通过图 3 的炉壁温度变化曲线反推得到不同质量浓度下玉米淀粉着火延迟时间,并将其与最低着火温度的变化情况进行对比,发现二者之间成正比,即粉尘云最低着火温度越低,其着火延迟时间越短。这主要是因为着火延迟现象的产生是粉尘云着火前的颗粒扩散、热解气化阶段所造成的,粉尘云最低着火温度越低说明此质量浓度下粉尘云的热解气化的能力越强、达到快速燃烧所需条件的时间也相应越短。

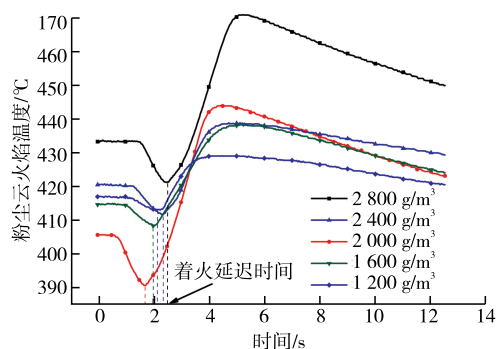


图 3 最低着火温度下不同质量浓度的玉米淀粉粉尘云炉壁温度曲线

Fig.3 The furnace wall temperature curve of dust cloud with different concentration at minimum ignition temperature

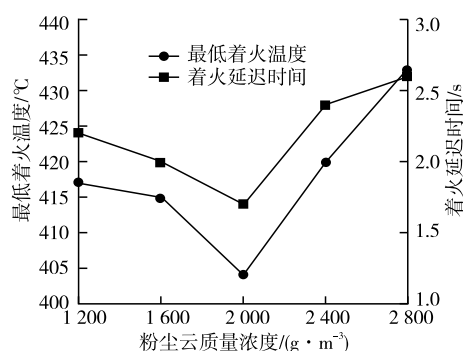


图 4 不同质量浓度的玉米淀粉粉尘云最低着火温度与着火延迟时间

Fig.4 The minimum ignition temperature and ignition delay time of corn starch dust cloud with different concentrations

2.3 粉尘粒径对淀粉粉尘云最低着火温度的影响

粉尘粒径是影响粉尘理化性质的重要因素。利用振动筛进行粒度筛分,测得 75,48,38,25,23 μm 下质量浓度为 1 200 g/m³ 的玉米淀粉粉尘云最低着火温度如图 5 所示,由图中可以直观看出粉尘云最低着火温度随粉尘粒径减小而降低。

玉米淀粉粉尘云的燃烧属于非均相体系下的气相燃烧,主要是淀粉颗粒受热解析出挥发分在空气中的燃烧。在淀粉被相同气压的空气吹入 G-G 炉内后,粉尘粒径越小,流动性越好,形成的粉尘云不易团聚,受热更均匀,根据上文划分,当粉尘颗粒处于 AB 和 BC 热解气化阶段时,小粒径的粉尘颗粒比表面积大,相同热量情况下吸热多、传热效率高,受热分解速率快,越容易提前进入快速燃烧状态。在粉尘颗粒进入 CD 快速燃烧阶段时,由于粒径较小的粉尘热解更快更充分,且在空气中氧浓度相同的条件下,小颗粒的粉尘与氧气接触结合更充分、发生氧化反应的效率更高,但当粉尘的粒径过小时,其粒子间静电吸附效应增强,会造成颗粒的部分团聚,反而使颗粒的比表面积相对变小,导致了在小粒径范围内的粉尘云最低着火温度降低趋势放缓^[17]。总体上粒径越小的淀粉颗粒其热解气化、剧烈燃烧的能力更强,所需的最低着火温度更低。

通过观察还发现淀粉粒径与最低着火温度具有较强的线性关系,利用软件进行拟合得到二者间的数学关系式为

$$y = 1.950x + 321.468 \quad (1)$$

式中: x 为玉米淀粉粒径, μm ; y 为粉尘云最低着火温度, $^{\circ}\text{C}$ 。拟合后的曲线相关系数 R^2 为 0.987,说明二者相关性较高,曲线拟合情况比较准确。在淀粉粒径大致范围已知的情况下,可对其粉尘云最低着火温度进行计算,为安全允许温度裕度设计提供参考。

3 结 论

通过对最低着火温度下炉壁温度变化曲线的研究,分析了不同质量浓度下着火延迟时间、粉尘粒径与粉尘云最低着火温度间的关系,得出以下结论:

1) 粉尘云最低着火温度是评价粉尘云着火危险性的特征温度。粉尘云着火的过程主要可以划分为热解气化及快速燃烧阶段;随着测试温度降低着火延迟现象愈发明显,临近最低着火温度时着火延迟时间最长。

2) 质量浓度是影响粉尘云最低着火温度的重要参数。最低着火温度随着玉米淀粉粉尘云质量浓度的增大先下降后上升,在质量浓度为 $2\,000\text{ g/m}^3$ 时达到最低;不同质量浓度粉尘云的着火延迟时间与最低着火温度成正比,即最低着火温度越低,着火延迟时间越短。

3) 粒径对粉尘自身理化性质有重要影响。淀粉粉尘云最低着火温度随着粉尘粒径的减小而降低,但降低趋势逐渐放缓,二者之间存在相关性较强的函数关系。

参考文献:

- [1] 李畅,苑春苗,李刚.粉尘云最低着火温度的研究现状与发展趋势[J].工业安全与环保,2013,39(3):19-21.
- [2] LI G, PING X, WU W W, et al. Experimental study on the ignition of the coupling system of coal gas and coal dust [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8):1388-1390.
- [3] ADDAI E K, GABEL D, KRAUSE U. Experimental investigations of the minimum ignition energy and the minimum

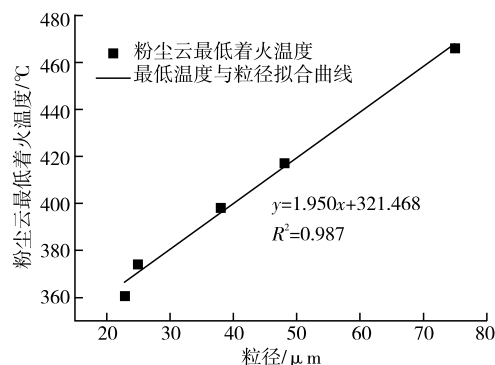


图5 不同粒径玉米淀粉粉尘云最低着火温度

Fig. 5 The minimum ignition temperature of corn starch dust cloud with different particle sizes

- ignition temperature of inert and combustible dust cloud mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 307: 302-311.
- [4] ADDAI E K, GABEL D, KRAUSE U. Models to estimate the minimum ignition temperature of dusts and hybrid mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 304:73-83.
- [5] DANZI E, MARMO L, RICCIO D. Minimum ignition temperature of layer and cloud dust mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36:326-334.
- [6] TURKEVICH L A, DASTIDAR A G, HACHMEISTER Z, et al. Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: explosion parameters of selected materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 295:97-103.
- [7] BOSKOVIC A, BASU P, AMYOTTE P. An exploratory study of explosion potential of dust from torrefied biomass [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015, 93(4):658-663.
- [8] YUAN C, AMYOTTE P R, HOSSAIN M N, et al. Minimum ignition temperature of nano and micro Ti powder clouds in the presence of inert nano TiO₂ powder[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 275(2):1-9.
- [9] 曹卫国,郑俊杰,彭于怀,等.玉米淀粉粉尘爆炸特性及火焰传播过程的试验研究[J].爆破器材,2016(1):1-6.
- [10] 曹卫国,潘峰,徐森,等.小麦淀粉粉尘爆炸特性参数的研究[J].安全与环境学报,2012,12(2):213-216.
- [11] 陈先锋,张洪铭,陈曦,等.小麦淀粉粉尘云火焰传播特性研究[J].中国安全科学学报,2016,26(12):53-57.
- [12] 李刚,刘晓燕,钟圣俊,等.粮食伴生粉尘最低着火温度的实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(2): 145-147.
- [13] 钟英鹏,徐冬,李刚,等.镁粉尘云最低着火温度的实验测试[J].爆炸与冲击,2009,29(4):429-433.
- [14] 庞磊,马冉,高建村,等.粉尘云浓度对 HDPE 粉尘云最低着火温度的影响[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5): 5-9.
- [15] 任瑞娥,谭迎新.镁铝合金粉最低着火温度的实验测试[J].消防科学与技术,2014(8):864-866.
- [16] 陶可通,陈先锋,张洪铭,等.玉米淀粉粉尘云浓度对其火焰传播特性影响[J].中国安全科学学报,2015, 25(5): 37-41.
- [17] 胡樱馨,胡双启.面粉最低着火温度的研究[J].粮食与油脂,2016(1):33-35.

(责任编辑:李艳,谭晓荷)