

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.07.018

乌龙茶叶粉尘爆炸特性实验研究

许开立, 陈西萌, 刘博

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 选取某茶叶公司的乌龙茶叶粉尘为研究对象, 用激光粒度分析仪对其粒径分布进行表征。在粉尘层着火温度实验装置、高德伯尔格-格润瓦尔德炉、哈特曼管爆炸实验装置、Siwek 20 L球形爆炸系统中测试研究了粉尘着火敏感度及爆炸猛烈度。实验结果表明: 粉尘层的最低着火温度为 250 °C, 粉尘云的最低着火温度为 510 °C, 最小点火能 >1 000 mJ, 爆炸下限为 120 g/m³, 粉尘云的最大爆炸压力达 0.82 MPa, 最大压力上升速率达 63.002 8 MPa/s, 爆炸指数达 17.1 MPa·m/s, 乌龙茶叶粉尘爆炸等级为 St-1。借助热重分析和工业分析, 对其爆炸特性进行了理论分析。研究结果对了解茶叶粉尘爆炸危险性、加工车间的安全管理以及防爆设计具有一定的参考价值。

关键词: 乌龙茶叶粉尘; 粒径分布; 爆炸特性; 着火敏感度; 爆炸猛烈度

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)07-1057-08

Experimental Study on Explosion Characteristics of Oolong Tea Dust

XU Kai-li, CHEN Xi-meng, LIU Bo

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, E-mail: xukaili@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The particle size distribution of oolong tea dust produced by a tea company was characterized by laser particle size analyzer. The dust ignition sensitivity and explosion severity were experimentally studied in the ignition temperature of dust layer test instrument, Godbert-Greenwald furnace, Hartmann tube explosion experimental apparatus and Siwek 20 L spherical explosion test system. The experimental results show that the minimum ignition temperature of dust layer (MITL) is 250 °C, the minimum ignition temperature of dust cloud (MITC) is 510 °C, the minimum ignition energy (MIE) is more than 1 000 mJ, the lower explosion limit (LEL) is 120 g/m³, the maximum explosion pressure is 0.82 MPa, the maximum pressure rise rate is 63.002 8 MPa/s, and the explosion index is 17.1 MPa·m/s, indicating that the explosion grade is St-1. Finally, the explosion characteristics of the dust were analyzed theoretically with the aid of thermogravimetric analysis and industrial analysis. The research results have certain reference value for understanding the explosion hazard of tea dust, the safety management of the processing workshop and the explosion-proof design.

Key words: oolong tea dust; particle size distribution; explosion characteristics; ignition sensitivity; explosion severity

茶叶粉尘是指在茶叶生产加工过程中伴随生成的粉尘, 其不仅具有茶叶本身自带的植物性物质, 还具有和其他材料因相互作用而新产生的物质^[1]。茶尘是一类植物性、金属性、混合性粉尘,

不仅会降低茶叶品质、缩短设备寿命、损害人体健康, 而且在环境中达到一定浓度限度后遇高温、明火、摩擦或碰撞等情况时可能会引发火灾和爆炸^[2]。

收稿日期: 2023-03-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001300)。

作者简介: 许开立(1965-), 男, 山东郓城人, 东北大学教授, 博士生导师。

对于烟草、玉米、小麦等植物性粉尘,国内外学者已对其爆炸危险性做了大量的研究.徐伟巍等^[3]用 20 L 爆炸球对不同浓度、不同粒径下的烟草粉尘的爆炸压力进行了实验研究;Zhang 等^[4]通过 5 L 爆炸容器对玉米淀粉进行了点火延时时间与爆炸特性参数的实验研究;Wang 等^[5]对比了 NaHCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 三种抑爆剂对红色玉米淀粉爆炸性能的抑爆能力;Zhao 等^[6]通过高速摄影机于半封闭型垂直管中拍摄研究了 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 对小麦粉尘火焰传播的影响.但是,目前国内外针对茶尘的研究主要集中在职业危害方面,在粉尘爆炸性能方面较为欠缺.

本文对某茶叶公司的乌龙茶叶粉尘进行了爆炸特性的实验研究.通过实验测定了乌龙茶叶粉尘的着火敏感度(爆炸下限、最低着火温度、最小点火能)以及爆炸猛度(最大爆炸压力、爆炸指数、最大压力上升速率),以期为乌龙茶叶加工场所进行粉尘爆炸事故预防工作提供理论依据.

1 粉尘试样

实验样品为某茶叶公司提供的某一批次乌龙茶叶粉体,该粉体为图 1 所示的棕色粉末,其工业分析结果见表 1,为便于进行对比,将其他粉尘的工业分析结果也列入了表 1.利用百特激光粒度分析仪对其进行粒度分析,其粒度分布如图 2 所示,结果表明 $D_{10}=4.892 \mu\text{m}$, $D_{50}=17.24 \mu\text{m}$, $D_{90}=48.36 \mu\text{m}$.



图 1 乌龙茶叶粉体

Fig. 1 The oolong tea powders

表 1 粉体工业分析数据(质量分数)

试样	%			
	水分	挥发分	灰分	固定碳
乌龙茶叶	3.90	68.42	8.58	19.10
松木屑	4.75	80.56	0.56	14.13
烟草粉尘	10.56	65.10	12.04	12.30

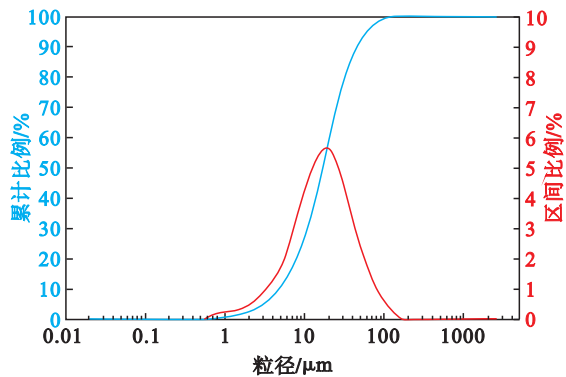


图 2 乌龙茶叶粉体粒度分析结果

Fig. 2 Analyzed results of oolong tea dust particle size

2 实验测试

2.1 着火敏感度参数测试

2.1.1 粉尘层/云最低着火温度

粉尘层最低着火温度(minimum ignition temperature of dust layer, MITL)的定义是指将粉尘层进行加热时,能够令其温度产生突变或点燃的最低温度—环境温度;粉尘云最低着火温度(minimum ignition temperature of dust cloud, MITC)的定义则是指当粉尘在空气中混合受热时,能够令其温度产生突变或点燃的最低温度—环境温度^[7].根据测定以上两者温度,可进行电气设备防爆型号的选择工作以及进行可发热设备的热表面温度控制工作.

本文依据 ASTM E2021-15《粉尘层热表面着火温度的标准试验方法》^[8]进行粉尘层最低着火温度的测定,设备示意图如图 3 所示.实验时,将高 12.7 mm 的盛粉环放置在热板炉的加热板中央,在温度控制器中设置所需温度来对加热板进行加热;当加热板温度在预设温度误差内稳定后,将乌龙茶叶粉尘放入盛粉环内并在 2 min 内将粉尘层表面刮平;随后,持续观察加热板及粉尘层随加热时间的变化(通常为 2 h).若粉尘层长时间未表现出明显的自热现象,则终止实验,替换粉尘层并将加热板温度进行升高;若出现着火现象,则更换粉尘层以继续进行降温实验,直至获得最低着火温度.当测试中出现如下两种现象中的一种时,则可以视为粉尘层发生着火:① 粉尘层有明显的着火现象出现,如红光、火焰;② 测量到粉尘层温度比加热板温度高 50 °C 及以上.

粉尘云最低着火温度由高德伯尔格—格润瓦尔德炉装置测定,实验装置如图 4 所示.以 ASTM

E 1491-06《粉尘云最低自燃温度的标准试验方法》为参照标准进行实验^[9]: 首先, 将加热炉设置到预定的测试温度, 待炉体内的温度稳定到设定值后, 向储粉室内装入一定量的乌龙茶叶粉尘, 并将一定量达到预定压力值的空气充入储气罐内, 开启电磁阀, 将储粉室内中的粉尘喷吹至炉内; 随后, 在加热炉下方察看着火情况并对数据进行记录. 实验过程中, 当有火焰从炉体下端出现时, 则认为粉尘云发生着火.

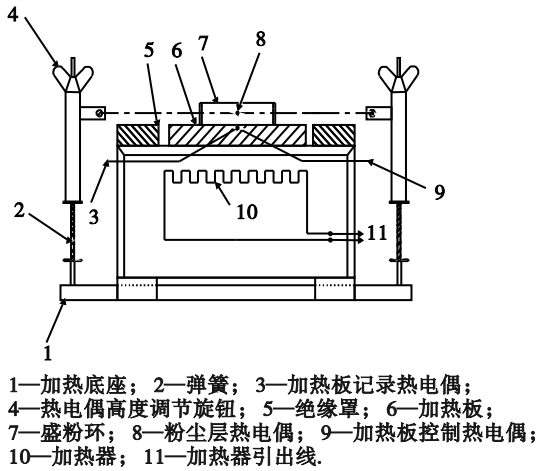


图 3 热板炉装置
Fig. 3 The hot plate furnace

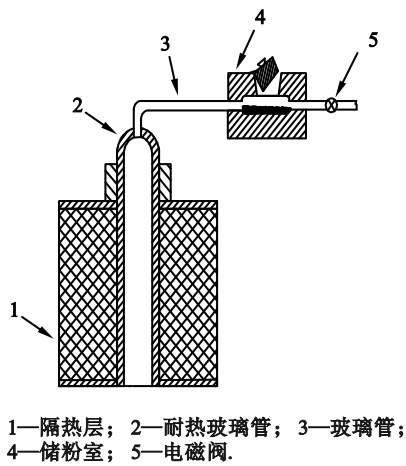


图 4 高德伯尔格-格润瓦尔德炉纵截面
Fig. 4 Vertical cross section of Godbert-Greenwald furnace

2.1.2 粉尘云最小点火能

最小点火能 (minimum ignition energy, MIE) 是衡量粉尘着火灵敏度的参数, 是指能引起粉尘云爆炸或连续燃烧的最小火花能量^[10].

以 ASTM E 2019-03《空气中粉尘云最低点火能量的标准试验方法》为参考实验标准, 采用图 5 所示的 1.2 L 哈特曼管爆炸实验装置测定粉尘云最小点火能. 实验进行时, 将粉尘分散在哈

特曼管底部, 开启电磁阀, 储气仓内的空气将茶叶粉尘扬起并在管内形成云状分散系, 随后触发电极放电, 电极间距设为 6 mm. 如果粉尘被点燃并在放电火花附近出现大于 6 cm 的火焰传播, 则认为粉尘云发生了着火; 如果粉尘在 10 次连续实验中均未被点燃, 则认定在该点火能量下粉尘云不能被引发着火^[11].

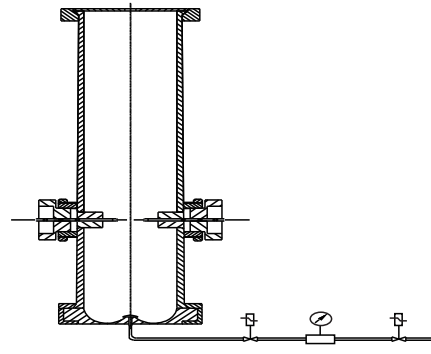


图 5 哈特曼管
Fig. 5 Hartmann apparatus

2.1.3 粉尘云爆炸下限

爆炸下限 (lower explosion limit, LEL) 是指在给定的点火源能量的作用下, 刚好能够令其自动发生持续燃烧的最小粉尘浓度^[12]. 在生产过程中, 可通过控制粉尘浓度来防止粉尘爆炸的发生. 实验采用 Siwek 20 L 球形爆炸测试系统进行, 其主要由控制系统、装置本体和数据采集系统组成, 装置本体如图 6 所示. 实验参照 ASTM E 1515-14《可燃粉尘最低爆炸浓度的标准试验方法》进行, 当 $PR \geq 2$ 时即判定粉尘发生爆炸^[13].

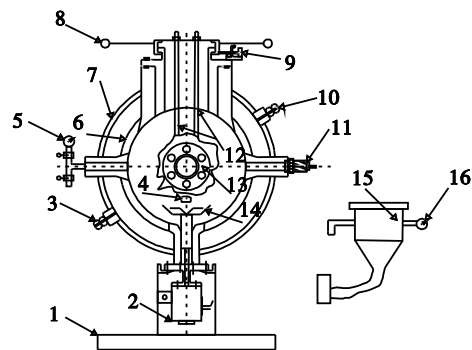


图 6 Siwek 20 L 装置
Fig. 6 Siwek 20 L apparatus

1—底座; 2—气粉两相阀; 3—循环水入口; 4—吹扫进气口; 5—真空表; 6—夹套内层; 7—夹套外层; 8—操作手柄; 9—安全限位开关; 10—循环水出口; 11—压电型压力传感器; 12—点火杆; 13—观察窗; 14—分散喷嘴; 15—高压储粉罐; 16—电接点压力表.

$$PR = (p_{ex,a} - \Delta p_{ignitor}) / p_{ignition} \quad (1)$$

式中: PR 为压力比; $p_{ex,a}$ 为在一次爆炸过程中产

生的最大绝对压力, bar (1 bar=0.1 MPa); p_{ignition} 为点火时容器内的绝对压力, bar; $\Delta p_{\text{ignitor}}$ 为无粉尘状态点火头的空爆压力, bar.

实验时,将乌龙茶叶粉尘放于储粉罐内,随后储粉罐内的粉尘在 2 MPa 喷粉压力下喷入预先抽至真空度为 40 kPa (表压 -60 kPa) 的 20 L 罐体内;待喷粉 60 ms 后,引爆位于罐体中心的化学点火头 (点火能量为 2.5 kJ), 罐体内的压力变化由爆炸测试系统通过压力传感器采集.

2.2 爆炸猛度参数测试

粉尘爆炸猛度参数是指最大爆炸压力 p_{max} , 最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 以及 K_{st} 值^[14-17], 其可为抗爆设计提供理论参考依据^[18]. 本实验由 Siwek 20 L 球形爆炸测试系统测定. 根据 ASTM E 1226-19《粉尘云爆炸性能的标准试验方法》, 测试最大爆炸压力等猛度参数时采用 10 kJ 点火能量. 实验时,将乌龙茶叶粉尘放于储粉罐内,用压缩空气向 20L 罐体中喷散粉尘,待喷粉完成 60 ms 后引爆容器中心处能量为 10 kJ 的化学点火头. 随后,分析由压力传感器采集到的压力-时间数据变化曲线,得到相对应浓度时的爆炸压力值和压力上升速率以及爆炸指数值^[19]. 图 7 为粉尘爆炸时压力与时间的典型数据曲线图.

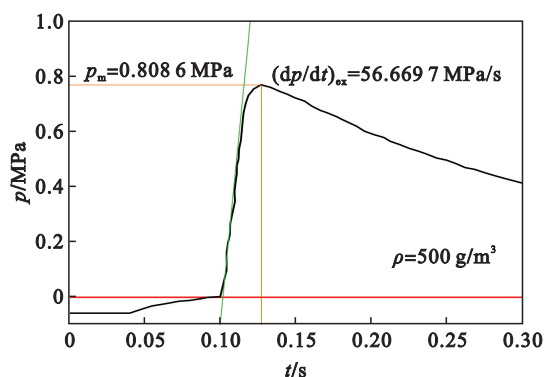


图 7 乌龙茶叶粉尘典型压力-时间变化曲线

Fig. 7 Typical pressure-time curves of oolong tea dust

根据 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 和 V , 由式(2)计算得出 K_{st} 值;

根据式(3),式(4)和式(5)进行压力修正,得到 p_m .

$$K_{\text{st}} = (dp/dt)_{\text{max}} \cdot V^{1/3} \quad (2)$$

式中: K_{st} 为粉尘云的爆炸指数, $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$; $(dp/dt)_{\text{max}}$ 为粉尘云最大爆炸压力上升速率, MPa/s ; V 为爆炸球腔体积, m^3 .

当 $p_{\text{ex}} > 5.5 \text{ bar}$ 时,

$$p_m = 0.775 p_{\text{ex}}^{1.15} \quad (3)$$

式中: p_{ex} 为在一次爆炸过程中产生的最大压力上升 (高于点火时容器内的压力), bar; p_m 为在一次爆炸过程中已进行 20 L 容器中点火器压力和冷却影响校正后产生的最大压力上升, bar.

当 $p_{\text{ex}} < 5.5 \text{ bar}$ 时,

$$p_m = 5.5 \times (p_{\text{ex}} - p_{\text{Cl}}) / (5.5 - p_{\text{Cl}}) \quad (4)$$

$$p_{\text{Cl}} = 1.6 (E_i / 10\,000) \quad (5)$$

式中: p_{Cl} 为化学点火器产生的压力, bar; E_i 为点火能量, J.

3 测试结果及分析

3.1 着火敏感度参数测试结果及分析

3.1.1 粉尘层/云最低着火温度测试结果及分析

通过调节加热板温度,测定乌龙茶叶粉尘的最低着火温度并记录粉尘层开始着火的时间,实验记录如图 8 和表 2 所示.

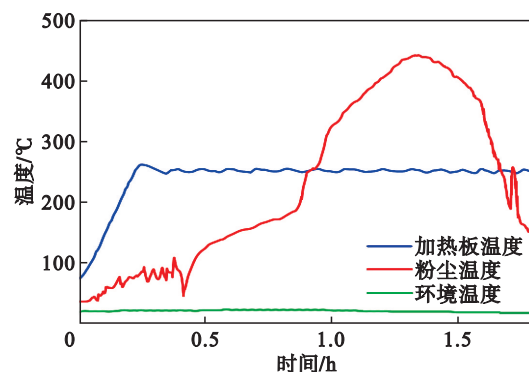


图 8 乌龙茶叶粉尘层最低着火温度测试图

Fig. 8 Test diagram of minimum ignition temperature of oolong tea dust layer

表 2 乌龙茶叶粉尘层最低着火温度实测结果

Table 2 Test results of oolong tea MITL

序号	加热板设置温度/°C	粉尘层内部最高温度/°C	Δt /°C	着火时间/min	实验结果	实验现象
1	250	442.5	192.5	25	着火	发出红光
2	240	164.8	-75.2	—	未着火	无变化
3	240	238.0	-2.0	—	未着火	无变化

由表 2 可知,在 250 °C 下,25 min 时粉尘层发出红光;在 240 °C 下两次实验均未有着火现象变化.粉尘层内部温度在加热板的作用下均会发生

一个集聚过程,随加热板温度的不同,乌龙茶叶粉尘层内部温度变化情况不同.当加热板的温度设为 240 °C 时,粉尘层内部的温度低于加热板温

度,未发生着火;当加热板的温度设为250℃时,如图8所示,粉尘层的内部温度变化明显,其高出热板温度192.5℃,大于50℃,即发生着火.因此,根据标准得出当粉尘层堆积厚度为12.7 mm时,乌龙茶叶粉尘层的最低着火温度为250℃.实验结果说明,堆积状态下的乌龙茶叶粉尘对热源较为敏感.因此,在生产和存贮过程中,必须避免高温环境和高温表面并且及时清理设备表面上附着的粉尘,以防止高温热表面引起粉尘层燃烧事故的发生^[20].

测定粉尘云最低着火温度时,初始测试温度设定为500℃,初始粉尘质量浓度设为1 000 g/m³,实验测试结果如表3所示.由表中的数据可以得知,可重复观察到着火的最低温度为525℃,未观察到着火的最高温度为500℃,故乌龙茶叶粉尘云最低着火温度为510℃.因此,在乌龙茶叶实际生产加工过程中必须要顾及粉尘燃烧的隐患风险,及时通风、及时清除粉尘,控制生产加工场所的环境温度,避免出现局部热点.

表3 乌龙茶叶粉尘云最低着火温度测试结果
Table 3 Test results of oolong tea MITC

序号	炉膛温度/℃	粉尘质量浓度/(g·m ⁻³)	实验结果
1	500	1 000	未着火
2	550	1 000	着火
3	525	1 000	着火
4	525	2 000	着火
5	500	2 000	未着火
6	525	3 000	着火
7	500	3 000	未着火
8	500	4 000	未着火
9	500	500	未着火

由以上两个实验的测试结果可知,乌龙茶叶粉尘的MITC值要明显高于MITL值,这主要与测定MITC时粉尘在G-G炉内的时间远远短于测定MITL时粉尘在加热板上静置的时间有关.因此,在乌龙茶叶生产加工过程中应综合考虑两者温度.

3.1.2 粉尘云最小点火能量测试结果及分析

粉尘云最小点火能量测试时的粉体质量通常介于0.3~3.6 g之间^[21],因此本实验选取1.2, 2.4和3.6 g为实验粉体质量.测试带电感的粉尘云最小点火能量时,测试电路为两电极系统、移动电极触发(电感负载1.064 mH,回路电阻0.7 Ω);测试不带电感的粉尘云最小点火能量时,测试电路为两电极系统、移动电极触发(无电感负载,回

路电阻0.1 Ω).实验结果见表4和表5.

表4 乌龙茶叶粉尘云最小点火能量(带电感)测试结果
Table 4 Test results of oolong tea dust cloud MIE with inductance

序号	样品质量/g	点火延时/ms	放电能量/mJ	实验结果	次数
1	1.2	90	100	未着火	10
2	1.2	90	300	未着火	10
3	1.2	90	1 000	未着火	10
4	2.4	90	1 000	未着火	10
5	3.6	90	1 000	未着火	10
6	3.6	60	1 000	未着火	10
7	3.6	120	1 000	未着火	10
8	3.6	150	1 000	未着火	10
9	2.4	60	1 000	未着火	10
10	2.4	120	1 000	未着火	10
11	2.4	150	1 000	未着火	10
12	1.2	60	1 000	未着火	10
13	1.2	120	1 000	未着火	10
14	1.2	150	1 000	未着火	10

表5 乌龙茶叶粉尘云最小点火能量(无电感)测试结果
Table 5 Test results of oolong tea dust cloud MIE without inductance

序号	样品质量/g	点火延时/ms	放电能量/mJ	实验结果	次数
1	3.6	60	1 000	未着火	10
2	3.6	90	1 000	未着火	10
3	3.6	120	1 000	未着火	10
4	3.6	150	1 000	未着火	10
5	2.4	60	1 000	未着火	10
6	2.4	90	1 000	未着火	10
7	2.4	120	1 000	未着火	10
8	2.4	150	1 000	未着火	10
9	1.2	60	1 000	未着火	10
10	1.2	90	1 000	未着火	10
11	1.2	120	1 000	未着火	10
12	1.2	150	1 000	未着火	10

由表4可知,实验初始粉体质量为1.2 g,点火能量为100 mJ,点火延时为90 ms.在1.2 g粉体质量、90 ms点火延时下,1 000 mJ点火能量仍未使得粉尘云发生着火;因此,在1 000 mJ能量下改变粉体质量进一步进行实验.由于上述实验均未有着火现象发生,故分别在1.2, 2.4, 3.6 g粉体质量下采用1 000 mJ能量不断改变点火延时来进行进一步实验.由表5可知,其实验结果与表4中的实验结果相同,均未有着火现象发生,故乌龙茶叶粉尘最小点火能量不带电感和带电感均

大于 1 000 mJ. 由此可知乌龙茶叶粉尘在悬浮状态时对电火花并不敏感,着火灵敏度低^[22-24]. 造成这一现象的原因:①与表 1 中其他粉尘相比,乌龙茶叶粉尘颗粒的挥发分相对较低,其在受热时能够分解出来的可燃组分较少,使得产生的活化中心处的能量以及可燃组分的浓度均不能够维系反应的持续进行;②与表 1 中其他粉尘相比,其具有相对较高的灰分含量,灰分能够吸取燃烧过程中的热量并阻碍可燃组分和氧气接触,从而影响了燃烧的传播.

3.1.3 粉尘云爆炸下限测试结果及分析

根据 ASTM E 1515-14《可燃粉尘最低爆炸浓度的标准试验方法》可知,粉尘云爆炸下限的初始测试质量浓度建议为 100 g/m³,故本实验选定为 100 g/m³. 实验测试结果如表 6 所示,可知粉尘云爆炸下限为 120 g/m³. 当低于该值时由于挥发分燃烧造成的热损失大于其热释放,故其无法维系燃烧或爆炸的传播.

表 6 乌龙茶叶粉尘云爆炸下限测试结果

序号	$\rho/(g \cdot m^{-3})$	p_{ex}/MPa	PR	是否爆炸
1	100	0.080 4	1.490	未爆炸
2	100	0.070 6	1.392	未爆炸
3	100	0.118 3	1.869	未爆炸
4	120	0.350 6	4.192	爆炸

3.2 爆炸猛度参数测试结果及分析

分别对质量浓度为 250, 500, 750, 1 000 g/m³ 的乌龙茶叶粉尘进行爆炸猛度参数测定实验,实验结果详见图 9,图 10. 由图可知,乌龙茶叶粉尘的爆炸压力和压力上升速率在 3 组实验中均随粉尘质量浓度的增加出现先增大后减小的现象,而呈现这一现象的原因如下:当粉尘未达到最佳爆炸浓度时,单位体积内的粉尘爆炸有效粒子随粉尘质量浓度的增加而增加,故爆炸猛度增加;当超过最佳爆炸浓度后,由于容器内粉尘过量而导致氧气不足,单位体积内粉尘爆炸有效粒子反而减少,降低了能量的释放,同时热量传递效率较低不能充分引燃高浓度的粉尘,且在爆炸过程中多余的粉尘还会吸收热量和冲击波,对反应的继续发生产生抑制作用,故爆炸猛度随之降低^[14].

在第 1 组实验中当质量浓度为 750 g/m³ 时爆炸压力和压力上升速率达到最大值, p_m , $(dp/dt)_{ex}$ 分别为 0.831 3 MPa 和 62.801 9 MPa/s; 在第 2 组实验中,当质量浓度为 750 g/m³ 时爆炸压力和压力

上升速率达到最大值,分别为 0.811 6 MPa 和 62.147 9 MPa/s; 在第 3 组实验中,当质量浓度为 500 g/m³ 时爆炸压力和压力上升速率达到最大值,分别为 0.813 9 MPa 和 64.058 7 MPa/s. 故 $p_{max} = (0.831 3 + 0.811 6 + 0.813 9)/3 \approx 0.82$ MPa, $(dp/dt)_{max} = (62.801 9 + 62.147 9 + 64.058 7)/3 \approx 63.002 8$ MPa/s, $K_{st} = 63.002 8 \times (0.02)^{1/3} \approx 17.1$ MPa·m/s. 通过表 7 粉尘爆炸危险性的分级可知,乌龙茶叶粉尘爆炸等级为 St-1,其危险性较弱^[25-27].

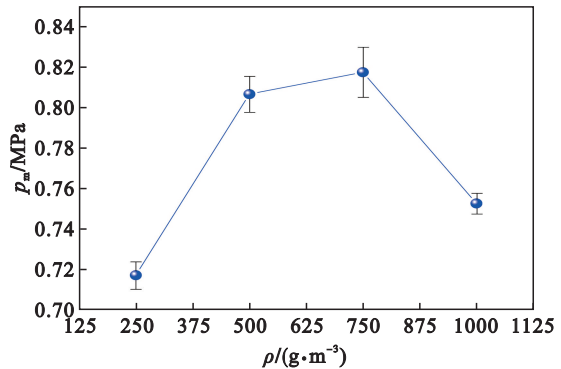


图 9 10 kJ 点火能量下 $\rho-p_m$ 的变化

Fig. 9 Variation of $\rho-p_m$ under the ignition energy of 10 kJ

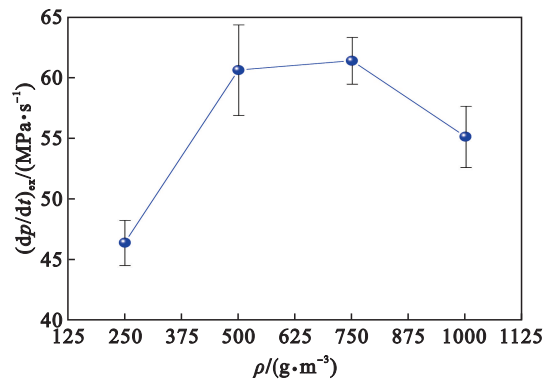


图 10 10 kJ 点火能量下 $\rho-(dp/dt)_{ex}$ 的变化

Fig. 10 Variation of $\rho-(dp/dt)_{ex}$ under the ignition energy of 10 kJ

表 7 粉尘爆炸危险性分级

爆炸等级	爆炸指数/(MPa·m·s ⁻¹)	爆炸属性
St-1	0 < K < 20	弱
St-2	20 ≤ K ≤ 30	强
St-3	K > 30	极强

4 热重分析

为了解乌龙茶叶粉尘的热分解过程,分别在空气和氮气氛围下对其进行了热重分析:样品的

初始质量均设定为10 mg,载气速率为40 mL/min,升温速率为20 °C/min,温度区间为33~900 °C。样品在两种气体氛围下的热重分析结果分别见图11和图12。

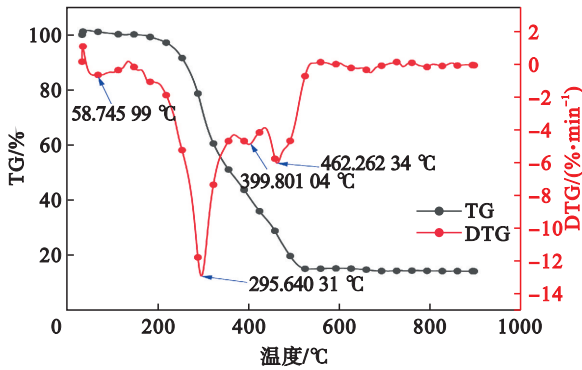


图11 空气氛围下乌龙茶叶粉尘的TG-DTG曲线
Fig. 11 TG and DTG curves of oolong tea dust under air atmosphere

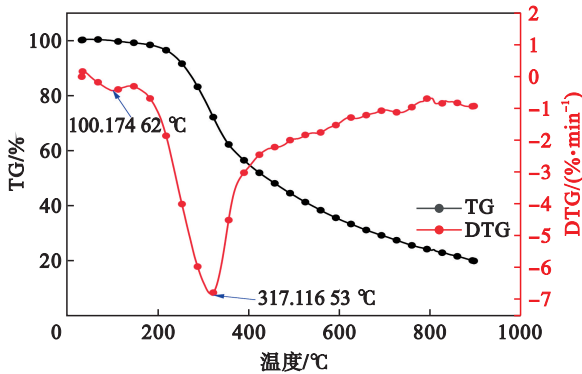


图12 氮气氛围下乌龙茶叶粉尘的TG-DTG曲线
Fig. 12 TG and DTG curves of oolong tea dust under nitrogen atmosphere

由图11可知,样品在空气氛围下进行热分解主要经历了4个不同的失重阶段。第一阶段为33~200 °C,主要是样品中水分的析出过程,从DTG曲线可知,峰1的峰值温度在59 °C左右;第二阶段为200~400 °C,由DTG曲线可知,当温度升高到296 °C左右时出现一个明显的高峰并且在400 °C左右存在一个小峰,该阶段会产生大量的挥发性物质,失重率占全过程的50%以上,为乌龙茶叶热解的主要阶段;第三阶段为400~530 °C,通过DTG曲线可知,当温度继续升高至462 °C左右时曲线再次出现峰值,在此阶段后乌龙茶叶基本分解完全,剩余无法分解的杂质和灰分到达第四阶段(完全炭化阶段)^[28]。同时,将图11与图12进行对比可知,乌龙茶叶粉尘在氧气氛围下的分解时间比在氮气下更短,这说明其与氧气发生了氧化反应,促进了自身的分解失重行为。

由此可见,乌龙茶叶粉尘在空气中燃烧分解

较为完全,整个分解过程也较为快捷,释放的总能量密度较大,故其在植物性粉尘(p_{max} 约为0.5~1 MPa, K_{st} 约为1~20 MPa·m/s)中具有较高的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率。

5 结 论

1) 乌龙茶叶粉尘层最低着火温度为250 °C,粉尘云最低着火温度为510 °C。在生产和存贮过程中,必须避免高温环境和表面,要及时清理掉设备表面上附着的粉尘。

2) 粉尘云最小点火能>1 000 mJ,其着火灵敏度低。

3) 粉尘云爆炸下限为120 g/m³,在茶叶生产加工过程中应严格控制粉尘质量浓度在120 g/m³以下,避免粉尘爆炸事故的发生。

4) 乌龙茶叶粉尘在250~1 000 g/m³内爆炸压力与压力上升速率均伴随粉尘质量浓度的增加呈现为先增后减的规律。在10 kJ点火能量下,最佳爆炸质量浓度为500~750 g/m³,粉尘云最大爆炸压力达0.82 MPa,最大压力上升速率达63.002 8 MPa/s。

5) 乌龙茶叶粉尘的爆炸指数为17.1 MPa·m/s,爆炸危险性等级为St-1,其危险性较弱。

参考文献:

- [1] 郑功宇,陈寿松,李丹,等.茶叶精加工过程中粉尘问题的研究探讨[J].中国茶叶加工,2014(1):35-39.
(Zheng Gong-yu, Chen Shou-song, Li Dan, et al. Study of the dust problem of the tea refining process [J]. *China Tea Processing*, 2014(1):35-39.)
- [2] 温正军,申瑶,何升波,等.茶叶精制加工过程中粉尘研究现状及展望[J].茶叶,2017,43(4):193-197.
(Wen Zheng-jun, Shen Yao, He Sheng-bo, et al. A review on formation and control of tea dusts during tea refinement process [J]. *Journal of Tea*, 2017, 43(4):193-197.)
- [3] 徐伟巍,覃欣欣.浓度与粒径对烟草粉尘爆炸压力的影响[J].山东化工,2020,49(12):224-225.
(Xu Wei-wei, Qin Xin-xin. Effect of concentration and size on explosion pressure of tobacco dust [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2020, 49(12):224-225.)
- [4] Zhang Q, Zhang B. Effect of ignition delay on explosion parameters of corn dust/air in confined chamber [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 33:23-28.
- [5] Wang Q H, Fang X, Wen H, et al. Explosion hazards of colored powders and the effects of suppressant powder materials [J]. *Powder Technology*, 2021, 390:11-19.
- [6] Zhao Q, Chen X F, Dai H M, et al. Inhibition of diammonium phosphate on the wheat dust explosion [J]. *Powder Technology*, 2020, 367:751-761.
- [7] 陈国华,江湖一佳,王新华.红木粉爆炸特性实验研究[J].消防科学与技术,2016,35(9):1200-1203.
(Chen Guo-hua, Jiang Hu-yi-jia, Wang Xin-hua. Study on characteristics of mahogany wood dust explosion [J]. *Fire*

- Science and Technology*, 2016, 35(9): 1200–1203.)
- [8] ASTM International. Standard test method for hot-surface ignition temperature of dust layers: ASTM E2021–15 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [9] ASTM International. Standard test method for minimum autoignition temperature of dust clouds: ASTM E1491–06 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [10] Yan H W, Nie B S, Peng C, et al. Evaluation on explosion characteristics and parameters of pulverized coal for low-quality coal: experimental study and analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 18851–18867.
- [11] ASTM International. Standard test method for minimum ignition energy of a dust cloud in air: ASTM E2019–03 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [12] 代濠源, 樊建春, 刘迪, 等. 粒径对硫磺燃烧爆炸特性影响的试验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(2): 120–124.
(Dai Hao-yuan, Fan Jian-chun, Liu Di, et al. Experimental study on influence of particle size to combustion and explosion characteristics of sulfur [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(2): 120–124.)
- [13] ASTM International. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts: ASTM E1515–14 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
- [14] 于立富, 李刚, 潘超, 等. 中国油页岩粉尘爆炸特性实验研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(8): 1203–1206.
(Yu Li-fu, Li Gang, Pan Chao, et al. Experimental research on China's oil shale dust explosibility [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(8): 1203–1206.)
- [15] Balantić J, Skobir Balantić D A, Novosel B. Investigation of the explosion-related parameters and their influence on the severity of an explosion involving aluminum dust [J]. *Process Safety Progress*, 2019, 38(4): e12047.
- [16] Yang J, Yu Y, Li Y H, et al. Experimental investigation of the suppression effects of ammonium polyphosphate on explosion characteristics of unsaturated polyester resin dust [J]. *Fire and Materials*, 2020, 44(6): 854–864.
- [17] Wang J F, Meng X B, Ma X S, et al. Experimental study on whether and how particle size affects the flame propagation and explosibility of oil shale dust [J]. *Process Safety Progress*, 2019, 38(3): e12075.
- [18] Wan Sulaiman W Z, Mohd Idris M F, Gimbut J, et al. Assessment of explosibility and explosion severity of rice flour at different concentration and ignition time [J]. *Process Safety Progress*, 2020, 39(sup1): e12107.
- [19] ASTM International. Standard test method for explosibility of dust clouds: ASTM E1226–19 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [20] Cheng Y C, Huang H C, Luo J W, et al. Evaluation of the dust potential hazard of thermal power plants through coal dust combustion and explosion characteristics [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 144(2): 575–585.
- [21] 李畅. 微米及纳米钛粉爆炸特性参数的理论与实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
(Li Chang. Theoretical and experimental study on explosibility parameters of micro and nano titanium powders [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)
- [22] Sakata K, Tagomori K, Sugiyama N, et al. Dust explosion characteristics of aluminum, titanium, zinc, and iron-based alloy powders used in cold spray processing [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(1/2): 123–130.
- [23] Song N, Luo T Y, Yu Y, et al. Investigation on suppression of melamine polyphosphate on acrylonitrile-butadiene-styrene dust explosion [J]. *Process Safety Progress*, 2021, 40(4): 345–354.
- [24] Tsai Y T, Yang Y, Huang H C, et al. Inhibitory effects of three chemical dust suppressants on nitrocellulose dust cloud explosion [J]. *AIChE Journal*, 2020, 66(5): e16888.
- [25] 卫园梦, 王庆慧, 杨晓明, 等. 微米级硅粉尘爆炸特性及抑爆试验研究 [J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(6): 775–779.
(Wei Yuan-meng, Wang Qing-hui, Yang Xiao-ming, et al. Experimental study on explosion characteristics and explosion suppression of micron silicon dust [J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(6): 775–779.)
- [26] Lin T H, Lin S Y, Hsueh K H, et al. Dust explosion parameters of polyester resin [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 127(1): 1037–1045.
- [27] Sun H, Pan Y, Guan J, et al. Thermal decomposition behaviors and dust explosion characteristics of nano-polystyrene [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 135(4): 2359–2366.
- [28] Magdziarz A, Wilk M. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, 114(2): 519–529.