



机械摩擦和过热表面对粉尘层着火温度的影响

葛安卡¹, 张礼敬¹, 邢树鹏²

(1. 南京工业大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

摘要 采用实验研究与理论分析相结合的方法研究机械摩擦和过热表面对粉尘层着火温度的影响,并探究粉尘层的最低着火温度。结果表明:面粉、聚酰胺粉尘、兽药粉因机械摩擦热而点燃的温度分别为310.5、308.5、400.3℃;其粉尘层最低着火温度分别为298℃、288℃、389℃;在企业生产粉尘的过程中,上述粉尘因机械摩擦造成热积累一直蓄积,摩擦热如导出不及时,就会引发火灾与爆炸事故。

关键词 机械摩擦;摩擦热;粉尘;红外热像仪

中图分类号:X913 文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2018)02-0085-08

Influence of dust layer about mechanical friction and hot surfaces on ignition temperature

GE Anka¹, ZHANG Lijing¹, XING Shupeng²

(1. College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: For the study of mechanical friction and heat surface of ignition temperature of dust layer, the experimental study and theoretical analysis method was studied. The results show that the flour dust, polyamide, veterinary medicine powder by mechanical friction heat and light temperature are 310.5, 308.5, 400.3 °C. The minimum ignition temperature of dust layer at 298 °C, 288 °C and 288 °C respectively. Therefore, in the process of production of related companies, the above several dust caused by mechanical friction dust layer on fire accident risk is bigger,

need to improve the production process of van measures to prevent dust explosion.

Keywords: mechanical friction; friction heat; dust; infrared thermal imager

粉尘爆炸的机理非常复杂,对其发展和演化规律的研究起源经历了一定的历史发展时期^[1-3]。粉尘爆炸控制以及防范技术措施的研究一直在推进,但是研究各种粉体或粉尘的物理化学性质,粉尘着火燃烧规律,不同粉尘属性影响因素,是粉尘爆炸基础研究与应用研究的关键环节^[4-5]。常见的点火源形式有冲击或摩擦、静电火花、熔接或熔断火花、自燃火花、明火、金属过热、电气设备等^[6-7]。点火源是粉尘爆炸的必要条件,研究点火源形式对控制粉尘爆炸发生具有直接指导意义。根据相关研究,不同的点火源引发粉尘事故的频率不同,其中,点火源冲击或摩擦引发的粉尘爆炸占比最高,为29.19%,静电火花占比17.70%、熔接熔断火花占比11.96%、自燃火花占比11.00%^[7]。

从统计结果可以看出,冲击或摩擦引发粉尘事故的可能性最大。机械设备在运转过程中由于缺乏润滑而摩擦生热^[8-9],物料、硬性杂质或脱落的零件与设备内壁撞击会产生火星,表面粗糙的坚硬物体相互猛烈撞击或摩擦时,也会产生火星。燃烧后空气产生膨胀波,造成沉积的粉尘飞扬,形成粉尘云,粉尘云达到爆炸极限,就可能会产生粉尘爆炸^[10-11],大量研究将粉尘层过热表面作为粉尘点燃的主要原因,对机械摩擦产生的摩擦热研究甚少^[12-14]。故此,本课题对生产过程中机械摩擦产生的摩擦热与过热表面着火温度进行对比研究,主要通过实验对比分析,研究机械摩擦对粉尘点燃温度的影响,以避免类似事故的发生,为企业预防粉尘爆炸事故提供理论指导。

1 实验

1.1 实验操作平台

实验中将摩擦棒与砂轮石固定,利用摩擦棒作

收稿日期:2017-09-11,修回日期:2018-01-28。

第一作者简介:葛安卡(1974—)男,博士研究生,研究方向为化工过程安全。E-mail:geankal@hotmail.com。

通信作者简介:张礼敬(1962—)男,博士,教授,博士生导师,研究方向为金属材料失效分析、建设项目(工程)安全评价。E-mail:zhanglj@njtech.edu.cn。

为转动部件与砂轮石进行摩擦。将粉尘放入储粉凹槽中,实验过程中可能会由于转动部件的动力将粉尘旋转溢出凹槽,但可在加料口另外加入适量的粉尘。实验装置中的挡粉套筒主要是防止转动部件转动过程中带动粉尘溢出,使粉尘积聚在套筒内,选用透明的材料可以更直观清楚地观察到实验过程中出现的现象。实验操作平台示意图如图 1 所示。

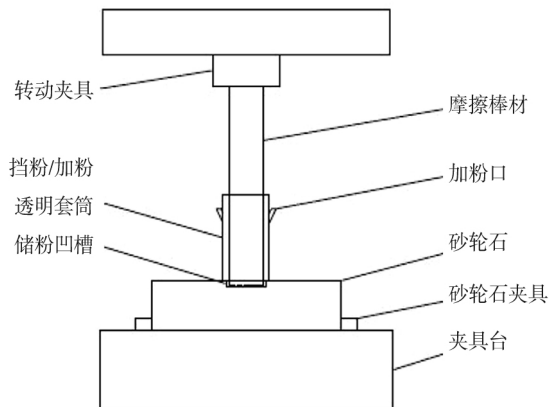


图 1 实验操作平台示意图

Fig. 1 Experimental operating platform

摩擦传动实验的目的是利用转动部件摩擦传动生热,影响摩擦生热的基本参数包括试验台工作运转变量、加载变量、时间变量^[15]。工作运转变量指电机转速、扭矩、功率、主轴振动频率;加载变量指加载载荷的大小;时间变量指实验时间。摩擦传动实验主要测试参数包括摩擦力 f 、摩擦系数 μ 。

1) 摩擦力 f 。滚动摩擦力大小的计算公式为

$$f = \frac{M}{R}, \quad (1)$$

式中: M 为负载力矩, R 为负载力矩 M 与滚动物体质心的力臂之比。当摩擦棒表面与砂轮石内粉尘接触时,过物体质心的力臂大小数值上等于物体的回转半径 r ,实验所用摩擦棒直径为 14 mm。

2) 摩擦系数 μ 。摩擦系数是摩擦实验中非常重要的一个测试参数,根据摩擦定律可知,摩擦系数等于摩擦力与物体所受正压力 F 之比。因而要得出某一状态下摩擦力的摩擦系数就要知晓此时的摩擦力和正压力,即

$$\mu = \frac{f}{F} = \frac{M}{RF}。 \quad (2)$$

电动机功率损耗:

$$P_L = P_e + b_1 P + \frac{dE_m}{dt} + \frac{dE_{ke}}{dt}, \quad (3)$$

式中 P_L 为电动机功率损耗; P 为电动机的输出功率; E_m 为电磁损耗; E_{ke} 为动能损耗; P_e 为电损; b_1 为电动机载荷损耗系数。

忽略机械传输系统的功率损耗,根据能量守恒定律^[15-16],摩擦热为

$$Q_{\text{摩}} = (P - P_L)T, \quad (4)$$

式中 T 为时间。

1.2 实验仪器及设备

1) NEC 红外热像仪,该仪器的基本特性参数如表 1 所示。

2) 粉尘层着火温度测试装置,其装置的示意图如图 2 所示。

表 1 红外热像仪的基本特性参数

Tab. 1 Basic characteristics of infrared camera

参数	范围及型号
温度/℃	-40~1500
温度分辨率	0.04 at 30℃(启用改善 S/N 功能)
测量精度	R1、R2、R3 $\pm 2\%$ (读数范围) 或 $\pm 2^\circ\text{C}$ (取二者中较大的值) R4 全规格范围 $\pm 2\%$ 以下(at 350℃, 60Hz)
探测器	非制冷焦平面传感器(UFPA)
有效像素	320(H)×240(V)
工作波长/ μm	8~14
频率/Hz	60 8.5 60 8.5

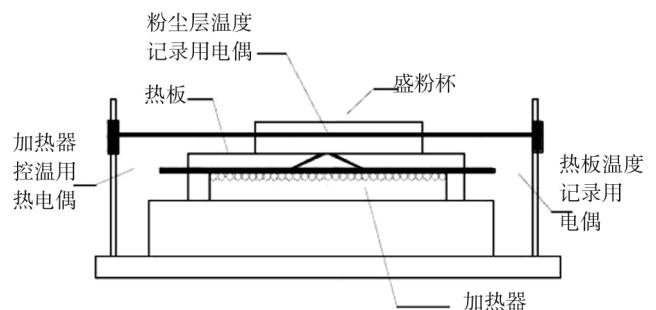


图 2 粉尘层着火温度测试装置示意图

Fig. 2 Dust layer fire temperature test device diagram

1.3 实验材料

实验选用的摩擦部件为砂轮石和摩擦棒(直径为 14 mm 的铁棒) ,通过铁棒旋转(转速为 1 540 rad/min) 与砂轮石接触进行摩擦。粉尘为面粉、兽药粉尘、聚酰胺纤维粉尘 ,平均粒径均为 16~18 μm 。样粉均在干燥箱内 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘 2 h ,样粉湿度为 5% ;环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,环境湿度为 46%。

2 结果与分析

2.1 摩擦热点燃粉尘测试

2.1.1 机械摩擦热点燃面粉分析测试

在同样的条件下 ,进行 2 组重复实验 ,分别测试机械摩擦热对面粉点燃的影响 ,实验测试现象如表 2 所示。

表 2 摩擦热点燃面粉实验

Tab. 2 Friction hot-lit flour experiment

测试序列	温度/ $^{\circ}\text{C}$	测试现象
1	172.4	有较浓烈的异味出现 ,铁棒摩擦处周边面粉颜色由白色变成浅黄色
	268.4	铁棒摩擦处周边面粉由浅黄色变为深黄色 ,与铁棒直接接触的面粉变为黑色 ,并伴有轻微焦味出现
	300.8	与铁棒直接接触的面粉有轻微燃烧现象出现 ,并开始冒烟 ,伴有浓烈的焦味
2	155.9	有轻微的异味出现 ,铁棒摩擦处周边发现面粉颜色有略微改变
	184.3	有较为浓烈的味道出现 ,铁棒周边粉尘呈浅黄色 ,与摩擦面直接接触的铁棒底部粉尘为棕黄色
	280.7	铁棒摩擦处周边面粉由浅黄色变为深黄色 ,与铁棒直接接触的面粉变为黑色 ,并伴有轻微焦味出现
	320.2	与铁棒直接接触的面粉有轻微燃烧现象出现 ,铁棒周边接触的面粉变为黑色 ,并开始冒烟 ,伴有浓烈的焦味

在实验中 ,2 次通过红外热像仪测得的不同温度下面粉摩擦热的温度场图像如图 3 与图 4 所示。

由测试结果可知 :当摩擦温度达到 155 $^{\circ}\text{C}$ 左右时 ,面粉就会缓慢反应 ,有异味出现 ;当摩擦温度在 170~280 $^{\circ}\text{C}$ 时 ,随着温度的逐渐增加 ,面粉的颜色由

最开始的白色渐渐变为浅黄色、深黄色、黑色 ;当摩擦温度达到 300 $^{\circ}\text{C}$ 之后 ,面粉就开始冒烟 ,出现焦味。因此 ,可以得出 ,当面粉机械摩擦产生的摩擦热达到临界温度 300 $^{\circ}\text{C}$ 时 ,极易引起面粉点燃的火灾爆炸事故。



a 172.4 $^{\circ}\text{C}$



b 268.4 $^{\circ}\text{C}$



c 300.8 $^{\circ}\text{C}$

图 3 测试 1 不同温度下面粉摩擦热的温度场图像(测试 1)

Fig. 3 Temperature field image of frictional heat of flour at different temperatures

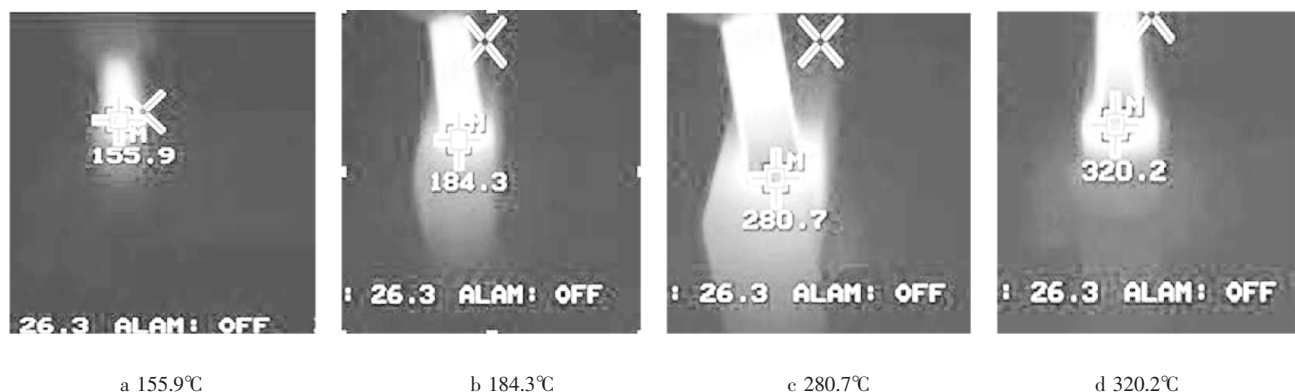


图 4 测试 2 不同温度下面粉摩擦热的温度场图像

Fig. 4 Temperature field image of frictional heat of flour at different temperatures

2.1.2 机械摩擦热点燃兽药粉分析测试

在同样条件下,进行了 2 组重复实验,分别测试了机械摩擦热对兽药粉的影响,测试现象如表 3 所

示。

在实验过程中,通过红外热像仪测得的温度场如图 5、图 6 所示。

表 3 摩擦热点燃兽药粉实验

Tab. 3 Friction hot spots Veterinary powder test

测试序列	温度/℃	测试现象
1	194.8	有轻微的异味出现,药粉颜色变化不明显。
	226.7	有较浓烈的异味出现,铁棒摩擦处周边药粉颜色由浅黄色变成深黄色,与铁棒直接接触的药粉变为黑色。
	259.0	有轻微烟和焦味出现,铁棒摩擦处周边药粉变为深黑色。
	391.7	有浓烈的焦味出现,药粉底部呈现深黑色融化状。
2	200.9	轻微的异味,兽药粉的颜色并未发生明显的改变。
	231.9	有较浓异味出现,铁棒直接接触的摩擦出现微融化状。
	280.7	有微烟,铁棒周边的兽药粉变为黑色。
	408.9	铁棒周边有较浓烟出现,有较浓烈的焦味出现,摩擦的凹槽处呈现深黑色融化状。

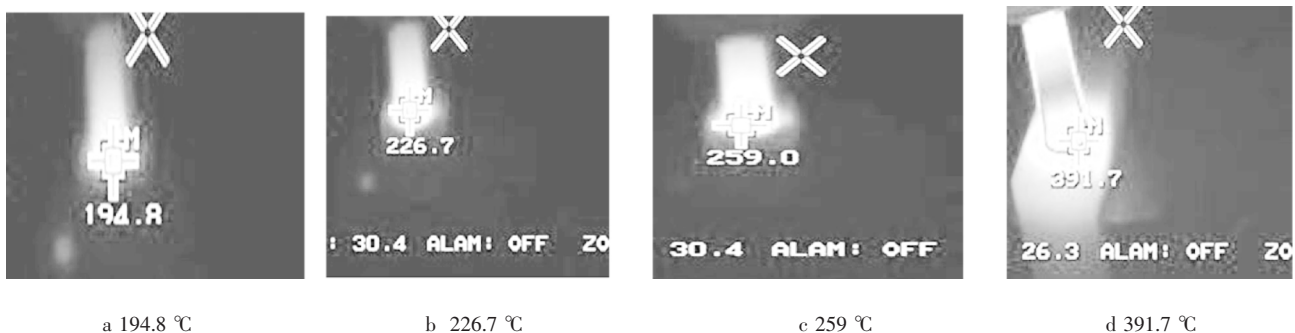


图 5 测试 1 不同温度下兽药粉的摩擦热的温度场图像

Fig. 5 Temperature field image of frictional heat of veterinary powder at different temperatures

由测试可知：当机械摩擦温度达到 194 ℃左右时 ,兽药粉开始发生变化 ,有轻微的异味产生 ;当机械摩擦温度达到 226 ℃左右时 ,兽药粉颜色开始发生变化 ,由浅黄色转变为深黄色 ,再逐渐转变为黑色 ;当机械摩擦温度达到 231 ℃左右时 ,兽药粉由粉状慢慢转变成融化状；当机械摩擦热累积至 391 ℃左右时 ,兽药粉的颜色与状态分别变为黑色与融化状 ,具有火灾燃烧蔓延风险。

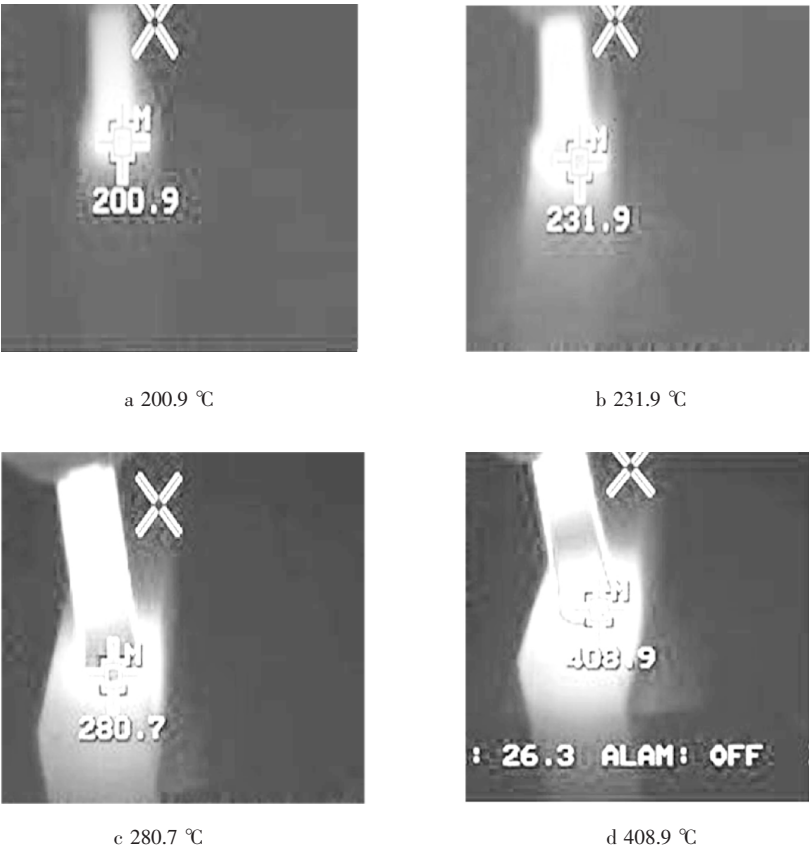


图 6 测试 2 不同温度下兽药粉的摩擦热的温度场图像

Fig. 6 Temperature field image of frictional heat of veterinary powder at different temperatures

2.1.3 机械摩擦热点燃聚酰胺纤维粉测试

在同样条件下 ,进行了 2 组重复实验 ,分别测试了机械摩擦热对聚酰胺纤维粉的影响 ,测试结果如表

4 所示。

在实验过程中 ,通过红外热像仪测得的温度场如图 7、图 8 所示。

表 4 摩擦热点燃聚酰胺纤维粉实验

Tab. 4 Friction heat-ignited polyamide fiber powder test

测试序列	温度/℃	测试现象
1	167.5	略微有味道。
	197.5	铁棒摩擦处周边聚酰胺纤维粉变为浅黄色 ,并有轻微异味出现。
	231.9	有轻微烟和焦味出现 ,铁棒摩擦处有浅黄色变为深黄色 ,局部逐渐开始变黑。
	245.9	有较浓烈的焦味和烟出现 ,底部为熔融状黑色。
	300.2	有火星出现 ,并伴有浓烈焦味和烟。
2	182.3	有略微的味道出现。
	194.1	与铁棒直接接触的聚酰胺纤维粉变为浅黄色 ,有异味出现。
	227.1	有轻微烟和焦味出现 ,铁棒摩擦处有浅黄色变为深黄色 ,局部逐渐开始变黑。
	260.4	有较浓烈的焦味和烟出现 ,底部为熔融状黑色。
	316.9	有火星出现 ,并伴有浓烈焦味和烟。

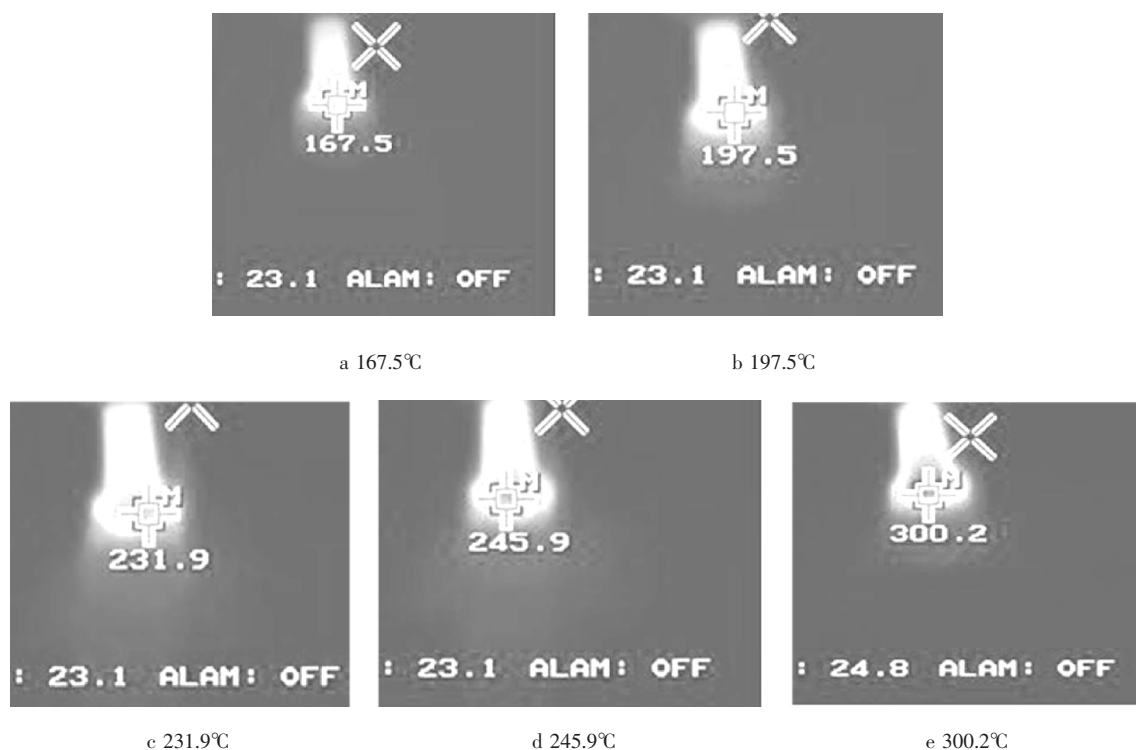


图 7 测试 1 不同温度下聚酰胺纤维粉摩擦热温度场

Fig. 7 Triction temperature field of polyamide fiber powder at different temperatures

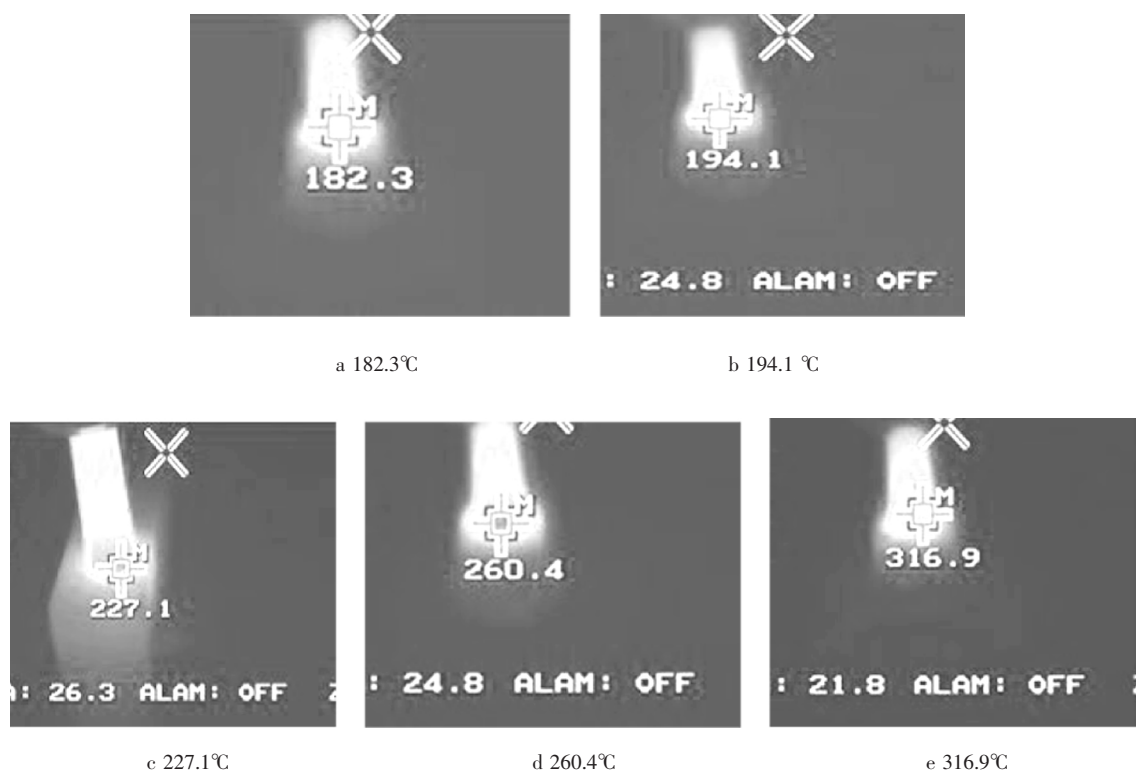


图 8 测试 2 不同温度下聚酰胺纤维粉摩擦热温度场

Fig. 8 Friction temperature field of polyamide fiber powder at different temperatures

由测试可知：当机械摩擦温度达到 167 °C 左右时，聚酰胺纤维粉开始出现异味；当机械摩擦温度达到 194 °C 左右时，聚酰胺纤维粉的颜色发生

变化，变为浅黄色；当机械摩擦温度达到 245 °C 左右时，聚酰胺纤维粉最终变为黑色，并且此时还伴随着焦味与黑烟；当机械摩擦温度达到 300 °C 左

右时,在机械摩擦下的聚酰胺纤维粉已经开始出现火星。综上可以得出,当聚酰胺纤维粉机械摩擦产生的摩擦热达到 300 ℃时,同时也存在粉尘积累的情况下,摩擦热点燃聚酰胺纤维粉造成事故发生的可能性增大。

2.2 粉尘层最低着火温度测试

分别测试面粉、聚酰胺纤维粉、兽药粉的粉尘层最低着火温度,测试数据见表 5—7。由表 5、6、7 可知:

在粉尘层厚度和金属环内径相同的情况下,兽药粉的粉尘层最低着火温度最高,在 389 ℃着火,并有少量烟与较浓的焦味;在 395 ℃时,有轻微火星与较浓烈的焦味出现。聚酰胺纤维粉尘的粉尘层最低着火温度最低,在 288 ℃时着火,并有火星和焦味;在 315 ℃时,有较明显火星出。面粉的粉尘层最低着火温度位于两者之间,在 298 ℃时,有轻微的火星并且伴随少量的烟生成,在 315 ℃时,火星比较明显。

表 5 面粉最低着火温度测试数据

Tab. 5 Determination of minimum ignition temperature of flour

加热板温度/℃	粉尘层厚度/mm	金属环内径/cm	热板实时温度/℃	粉尘实时温度/℃	着火状态	是否着火
320	12	10	330	305	有火星出现	是
310	12	10	325	301	有轻微火星和较浓烈焦味出现	是
300	12	10	306	298	有轻微火星及少量烟出现	是
290	12	10	298	285	无着火现象	否
280	12	10	282	278	无着火现象	否

表 6 聚酰胺纤维粉最低着火温度测定

Tab. 6 Polyamide fiber powder minimum ignition temperature determination

加热板温度/℃	粉尘层厚度/mm	金属环内径/cm	热板实时温度/℃	粉尘实时温度/℃	着火状态	是否着火
330	12	10	367	315	有较明显火星出现	是
320	12	10	355	307	有火星出现,微量烟和焦味出现	是
310	12	10	336	288	有火星及焦味出现	是
300	12	10	298	272	无着火现象	否
290	12	10	285	263	无着火现象	否

表 7 兽药粉最低着火温度测定

Tab. 7 Determination of minimum ignition temperature for Agita powder

加热板温度/℃	粉尘层厚度/mm	金属环内径/cm	热板实时温度/℃	粉尘实时温度/℃	着火状态	是否着火
380	12	10	396	395	有轻微火星出现和较浓烈焦味出现	是
370	12	10	387	389	有少量烟和较浓烈焦味出现	是
360	12	10	370	360	无着火现象	否
350	12	10	361	348	无着火现象	否
340	12	10	346	338	无着火现象	否

3 结论

通过对面粉、聚酰胺纤维粉、兽药粉机械摩擦过程中摩擦热和粉尘层最低着火温度的研究可得以下结论：

1) 在选用砂轮石与摩擦棒（直径为 14 mm 的铁棒，转速为 1 540 rad/min）机械摩擦的条件下，面粉、聚酰胺粉尘、兽药粉出现点燃现象的温度分别为 310.5、308.5、400.3 ℃。

2) 面粉、聚酰胺纤维粉、兽药粉的粉尘层最低着火温度分别为 298、288、389 ℃。

3) 面粉、聚酰胺纤维粉、兽药粉在机械摩擦过程产生的摩擦热和粉尘层的最低着火温度相差不大，而且机械摩擦造成热积累一直蓄积，在实际生产过程中摩擦热如果导出不及时可能引发燃烧、爆炸事故。

参考文献(References)：

- [1] 李运芝,袁俊明,王保民. 粉尘爆炸研究进展[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2004, 3(2): 79-82.
- [2] 杨豪,王培植,万样云. 我国气体与粉尘爆炸事故现状及影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2016, 15(1): 97-99.
- [3] 陈卫红,邢景才,史廷明等. 粉尘的危害与控制[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:7-9.
- [4] 吴剑. 机械加工过程中粉尘污染危害控制研究 [J]. 科技视野, 2015 (19):245-266.
- [5] 蒯念生,黄卫星,袁旌杰等. 点火能量对粉尘爆炸行为的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015, 32(4):432-438.
- [6] 陈宝智,李刚,赫尔特. 粉尘爆炸特殊风险的辨识、评价和控制[J]. 中国安全科学学报, 2007(5):96-100
- [7] 多英全,刘垚楠,胡馨升. 2009-2013 年我国粉尘爆炸事故统计分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2):186-190.
- [8] 张迎新,王新华,顾锡文,等. 防爆起重机轮轨机械摩擦危险工况分析[J]. 润滑与封, 2013, 38(9):94-97.
- [9] 刘忠. 化工机械润滑故障控制探讨[J]. 化学工程与装备, 2014(11): 69-70.
- [10] 张超光,蒋军成,郑志琴. 粉尘爆炸事故模式及其预防研究 [J]. 中国安全科学学报, 2005(6):73-76.
- [11] NIFUKU M. A study on the static electrification of powders during pneumatic transportation and the ignition of dust cloud[J]. Powder Technology, 2003, 15(2) 27-38.
- [12] 张汉兴,刘强. 粉尘爆炸机理初探[J]. 爆破, 1989.12(3):5-8.
- [13] ATKINSON G, COWPE E, HALLIDAY J, et al. A review of very large vapour cloud explosion Cloud formation and explosion severity [J]. Journal of Loss Prevention the Process Industries, 2017.48(1) : 367-375.
- [14] LEAL C A, SANTIAGO G F. Do tree belts increase risk of explosion for LPG spheres[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(3):84-92.
- [15] QI Z, YA X, WANG Z L. Explosion hazards of LPG-air mixtures in vented enclosure with obstacles [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017.3(1) 59-67.
- [16] MARMO L, PICCININI N, DANZI P. Small magnitude explosion of aluminium powder in an abatement plant: a telling case [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98 :31-43.