

# 工业建筑常见金属粉尘爆炸影响因素及其机理

魏泽正 段仁武

陆军工程大学

**摘要:**通过对国内外金属粉尘爆炸相关文献资料的阅读和相关试验研究的分析,指出了工业建筑中易燃金属粉尘最小点火能量的研究方法和主要影响因素。针对易燃金属粉尘爆炸的特点,从浓度、粒径、温度等因素对易燃金属粉尘着火敏感性的影响因素及其机理进行了分析,指出了现有研究的不足,并对提出预防金属粉尘燃烧爆炸安全事故的建议。

**关键词:**着火敏感性;工业建筑;易燃金属粉尘;机理分析;防爆措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.11.024

## 引言

随着中国现代工业的发展,铝制品、铝镁合金制品等金属制品已然成为我们日常生活中不可或缺的一部分,铝制品和铝镁合金制品在打磨抛光的过程中会产生大量的金属粉尘,导致工业建筑粉尘爆炸事件频频发生,造成了很多不必要的职员死伤和财产损失,存在严重的安全风险隐患。金属粉尘爆炸影响因素的研究对典型金属粉尘爆炸危险性分析评估和燃烧爆炸安全事故的预防工作具有重要意义,能够为铝镁金属粉的广泛发展和应用研究提供参考。

## 一、工业建筑金属粉尘着火敏感性

在进行粉尘生产加工中对金属粉尘爆炸进行预防时,要事先对其着火敏感性进行评估,依据工厂的环境来对粉尘云着火敏感性和各类点火源的等效能量进行提前防范是最省钱以及合理的,是整个生产体系实现“本质安全”的重要措施,即从根源上防止事故的发生。着火敏感性一般由最小点火能量(Minimum Ignition Energy)进行表示,即是指能够导致粉尘燃烧或爆炸的最小能量,单位一般为mJ。国内外诸多学者针对金属粉尘的着火敏感性及其影响规律开展了广泛的试验研究,对典型金属粉尘着火敏感性的影响机理及试验研究主要集中在喷粉压力、点火延迟时间等实验条件,同时也探究不同实验设备对实验的影响<sup>[1]</sup>。

按照影响因素对粉尘的着火敏感性的影响结果,我们将这些因素区分为单调元素和极值元素。单调性元素是指着火敏感性随其状态参数的变化而呈现单调变化的趋势;极值性元素是指着火敏感性随其状态参数的变化而呈现出类似抛物线的趋势<sup>[2]</sup>。

## 二、工业建筑金属粉尘研究现状

### (一)研究方法

现阶段着火敏感性的测试设备主要有Hartmann管<sup>[4]</sup>、20L球、带有振动筛进料的落水管。其中Hartmann管,20L球的使用最为频繁,振动筛落管较为少见。着火敏感性测试设备一般不采用振动筛落管。Hartman管有体积较小、清粉方便等诸多优点,但Hartman管火焰与管壁的接触会消耗部分反应热能,因此相较于20L的球形罐不适合用于测量最大爆炸压力和最大压力上升率。一般而言,1.2升Hartman管和20L的球形罐测量结果差别不大。

在认识和了解现有设备的构造和理论的基础上,为得到更加准确的试验结果,一些学者对现有设备进行了改进。曹兆睿等人<sup>[5]</sup>设计并改进了着火敏感性测试装置,该装置可采集不同位置的火焰温度,可实行多个可选能级电火花点火,且确保了比较好的准确度。通过对高德伯德-格林瓦尔德恒温炉的分析和改造,国内学者王海福等人<sup>[6]</sup>设计了一套试验装置,采用的扬尘系统使尘埃被吹散得更均匀,同时温度的控制更精确,测试结果的重复性更好。

### (二)铝粉试验研究

陈成<sup>[7]</sup>以铝粉粉尘和比较典型的火药粉尘(TNT粉尘)为试验对象,对其爆炸下限浓度和着火敏感性进行了试验研究。研究发现,浓度越大,所需点火能量越小。由于精化工艺的不断改进,对超细铝粉的爆炸特性研究也比较常见。Zhang等人<sup>[8]</sup>采用水平管爆炸试验装置,对粒径不一样的纳米型铝粉与普通铝粉的爆炸性能对比试验研究,研究结果表明,纳米型铝粉在爆炸的过程里,最大爆炸压力持续时间比非纳米型铝粉长3~4倍;在纳米的范畴里,纳米型铝粉的爆炸压力范围比较宽(在40~750kPa之间)。为研究纳米型铝粉的爆炸特性,0. DUFAUD等人<sup>[9]</sup>采用20L爆炸球试验装置研究了粉尘浓度、环境湿度和粒度分布对铝粉燃烧爆炸的影响。研究发现,空气中的H<sub>2</sub>O对铝粉尘爆炸的影响有两个方面:一方面,当干燥铝粉在比较潮湿的环境中发生爆炸时,湿度会有着抑制作用;另一方面,当发生水吸附,有氢气的产生后,便会导致爆炸强度的增加。炎正馨<sup>[10]</sup>对比研究了纳米铝粉、微米铝粉分别与氧化丙烯混合后在入射激波诱导下的爆炸特性。采用同步采集技术,通

过多台单色谱仪测定了两种反应混合物在不同激发激波中的点燃延迟时间。

### (三) 镁铝粉尘试验研究

田甜<sup>[11]</sup>以镁铝合金粉为试验研究对象,采用1.2升Hartmann管对其爆炸特性进行了试验研究。实验结果表明:镁铝合金粉的爆炸所用时间最少,反应也最为强烈,其爆炸反应强度比混合镁铝合金粉高得多;同时,镁铝合金粉中镁的占比越高,其性质越不稳定;随着镁的占比的增大,镁铝混合粉的性能越靠近纯镁粉的性能。张小涛<sup>[12]</sup>利用20L球形爆炸设备,对镁铝合金粉的着火敏感性进行了试验研究,并对其燃烧爆炸规律进行了探究。X. LI等<sup>[13]</sup>人分析和比较了确定粉尘和空气的混合物着火敏感性的测量手段和三种不同的设备(Hartmann管,20L球,带有振动筛进料的落水管)。曹杭等人<sup>[14]</sup>通过实验对镁铝合金粉尘安全特性进行研究。试验发现,未过筛镁铝合金样品颗粒尺寸分布在 $0.10\mu\text{m}$ ~ $10.00\mu\text{m}$ ;铝镁合金样品颗粒流动性指数为46,流动性不是很好,在常规状态下容易发生聚集;铝镁合金样品颗粒的喷流指数为55,喷流程度为有倾向性,通风除尘时气体流态化程度较一般。章君和胡双启<sup>[15]</sup>根据镁铝合金粉自燃爆炸的特点,采用Hartmann管分析了粉末含量、粒径大小以及 $\text{CaCO}_3$ 对镁铝合金粉体点燃能的作用。实验结果表明,当质量浓度由 $100\text{g}/\text{m}^3$ 提高至 $1800\text{g}/\text{m}^3$ 后,MIE先下降再上升, $\text{CaCO}_3$ 粒度越小,惰化的效果就越明显。刘志敏<sup>[16]</sup>采用水平管研究了镁铝混合粉尘的着火敏感性。结果表明,随混合物中铝含量的增大,爆炸极限也跟着增加。

## 三、易燃金属粉尘着火敏感性影响因素及其机理分析

通过已有文献中的试验数据研究粉尘浓度、粉尘粒径、惰性粉尘、初始环境温度、初始压力对金属粉尘着火敏感性的影响,并对其影响机理进行分析。

### (一) 粉尘浓度

当铝镁金属粉尘浓度太小时,粉尘云粒子分散,点火区域的粉尘比较稀疏,即介入到点火的颗粒较少,使得通过粉尘燃烧释放所得的能量不多,少数粒子受热发生反应后的热辐射、热传导的作用非常弱,颗粒之间能量的传到很少,导致金属粉尘不易发生爆炸。随着浓度增大,参加有效反应的粒子数目变多,反应的粒子通过热辐射、热传导的方式将热量传递给未反应的粒子。当粉尘浓度进一步增加时,火焰的传播速度也会逐渐加快,因此要让颗粒点燃所需要外部能量逐渐减少。

金属粉尘浓度特别高时,单位体积内的粉尘颗粒过多,会把外部的点火能量过于分散,到达自身反应活化

能颗粒的占比变小。同时,当粉尘浓度太大时,粒子会受到粒子间的相互作用而出现团聚的现象,使得粉尘粒子的比表面积变小,热辐射能力变弱。而且因为Hartman管比较小,浓度过高会导致设备的氧气供给不够充足,导致粉尘的燃烧反应不完全,因此要让颗粒点燃必须要有更大的外部能量,导致了试验中的着火敏感性升高。

### (二) 粉尘粒径

易燃金属粉尘的浓度一定时,当颗粒直径逐渐增长时,着火敏感性逐渐上升,这是由于每一粒粒子质量越大,导致比表面积变小,颗粒与 $\text{O}_2$ 的反应面积越小,点火需要的点火能量越小。这是由于典型金属粉尘爆炸为两相(气固)反应,其点火能与粒子表面反应速度、粒子的比表面积、热传输率以及有效燃烧放热有关。一般情况下,对于典型的金属粉尘云,当粉尘粒径减小时,着火的可能性越高,爆炸的威力越大。当粒径逐渐增加,粉尘粒子的比表面积变小,颗粒与 $\text{O}_2$ 的反应面积越小,进而导致燃烧产生的热量的释放和传输速度较慢,因此要让颗粒点燃必须要有更大的外部能量。Benedetto和Russo<sup>[17]</sup>指出:当粉尘粒径降到一定直径的时候,粉尘燃烧反应将以均相燃烧为主,即粒径极小的粉尘云与可燃气体的反应过程非常相似。

### (三) 初始环境温度

易燃金属粉尘的初始环境温度逐渐变高,粉尘粒子到达挥发分逸出时需要的能量变少,从而导致着火敏感性降低。Bartknecht<sup>[18]</sup>通过试验的结果得到着火敏感性与温度的联系:温度每增高 $100^\circ\text{C}$ ,MIE差不多会降低一个数量级。当粉尘含有挥发物时,温度增加到一定程度后,因为挥发物会全部挥发,随着温度继续增高,MIE也会升高。在一般的工厂生产时,金属粉尘已经在一个温度较高的环境,这会使粉尘云MIE有所降低,因此在实际的生产环境中必须注意粉尘爆炸的防护。

### (四) 惰性粉尘

易燃金属粉尘在进行测试着火敏感性时,惰性气体、粉尘的加入会使得着火敏感性逐渐上升,且当加入惰性物质的量高于某一限制值后,粉尘将不会发生爆炸。从粉尘爆炸的有关理论来分析惰性粉尘的抑爆机理:

(1) 微粒数量较小的惰性尘粒如果漂浮在空中的气体数量足够大的话,就很容易吸附到可燃成分尘粒的表面,从而导致可燃尘粒和气体之间的接触面积变得更小,这时反应物不能够充分的燃烧,最大爆炸压力值也会减小,从而抑制粉尘爆炸,降低了危险性。

(2) 在易燃粉尘发生燃烧爆炸反应时,粒子间的

能量主要以热传导和热辐射的方法传输。赵衡阳<sup>[19]</sup>通过研究发现,物体绝对温度的4次方与辐射散热为正相关。减少粒子间的热传导和火焰辐射,可以有效地抑制粉尘爆炸。

### 四、结论

本文阐述了工业建筑中易燃金属粉尘着火敏感性的测试方法和装置,并对国内外现有试验研究现状进行了综述,然后对着火敏感性的主要影响因素及其机理进行了分析,具体结论如下:

(1) 由于安全性考虑和试验条件的限制,现有试验装置并未测得着火敏感性的极限情况,在对工业建筑进行危险性分析评估和安全事故预防时存在一定危险,应对现有研究装置进行改进以探究最小点火能极限值。

(2) 随着对着火敏感性影响因素及其机理研究的日益深入,从最初单一金属粉尘的研究,逐渐步入合金粉尘和混合粉尘的研究;同时由于现代工业精化工艺的不断改进,研究由常规颗粒向纳米级颗粒发展。但实际的工业生产条件复杂多样,而现有研究中对着火敏感性影响因素考虑的较为单一,没有将诸多因素耦合在一起进行分析。

(3) 通过对金属粉尘着火敏感性的影响因素及其机理进行分析,得到以下关于预防金属粉尘燃烧爆炸安全事故的措施:①及时清理生产时带来的金属粉尘,降低浓度;②降低初始环境温度,使得粉尘粒子到达挥发分逸出时需要的能量变大,从而导致点火能量升高;③加入惰性物质时,着火敏感性会逐渐升高,且当加入惰性物质高于某一限制值后,粉尘将不会发生爆炸。

### 参考文献

[1] 陈成. 铝粉及TNT粉尘的最小点火能和爆炸下限研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.

[2] 任纯力. 粉尘云最小点火能实验研究与数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

[3] H. Z. Zheng, Z. C. Wu, S. P. Wang. Study On The Minimum ESD Ignition Energy Of Cotton Textile. The Proceedings of the 6th International Conference on Applied Electrostatics. 2008, 11.

[4] 丁小勇, 谭迎新, 秦洞, 李媛. 垂直哈特曼管与水平管道中铝粉爆炸特性[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(06): 561-563.

[5] 曹兆睿, 庄春吉, 李花, 等. 粉尘云最小点火能实验装置的设计与改进[J]. 宁波工程学院学报, 2019(3): 21-25.

[6] 王海福, 郑珊, 冯顺山, 等. 粉尘云最小点火温度测试实验系统设计[J]. 中国安全科学学报, 2001(06): 65-67.

[7] 陈成. 铝粉及TNT粉尘的最小点火能和爆炸下限研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.

[8] Chao. Zhang, Bai Quan. Lin, Wen Xia. Li, et al. Comparative Experimental Study on Explosion Characteristics of Nano-Aluminum Powder and Common Aluminum Powder in the Explosive Device of a Long Pipeline[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1460(683): 113-118.

[9] O. DUFAUD, M. TRAORE, L. PERRIN, et al. Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2010, 2(2): 226-236.

[10] 炎正馨. 激波诱导下纳米铝粉与微米铝粉的爆炸特征对比研究[J]. 物理学报, 2011(07): 526-530.

[11] 田甜. 空间镁铝粉尘爆炸特性的实验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2006.

[12] 张小涛. 20L球形爆炸容器中镁铝合金粉爆炸特性的实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.

[13] X. LI, S. RADANDT, J. HE, et al. Vergleich und Analyse verschiedener Messverfahren zur Bestimmung der Mindestzündenergie brennbarer Stäube[J]. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 2000, 3(3): 89-94.

[14] 曹杭, 程道来, 张志凯等. 铝镁合金粉尘安全特性实验研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 238(10): 54-62.

[15] 章君, 胡双启. 镁铝合金粉最小点火能的实验研究[J]. 中国粉体技术, 2015(05): 103-105+108.

[16] 刘志敏. 镁铝混合粉尘爆炸规律研究[J]. 山东工业技术, 2015(04): 56-58.

[17] Benedetto A D, Russo E. Thermo. kinetic modelling of dust explosions[J], Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, (20): 303-309.

[18] Bartknecht W. 爆炸过程和防护措施[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985, 15-19.

[19] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.