



Ignition and Explosion of Metal Dusts: Modeling and Experiments

金属粉尘着火爆炸的 理论与实验

苑春苗 李 畅 李 刚/著

外 借



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

金属粉尘着火爆炸的理论与实验

苑春苗 李 畅 李 刚 著

科学出版社

内 容 简 介

本书在综述近年国内外重要研究进展的基础上,以读者相对熟悉的可燃粉尘爆炸特性参数标准测试装置为切入点和理论验证物理模型,重点阐述沸点、PBR 值差异较大的镁、钛两种典型金属粉尘在高温表面、电火花两种常见点火源作用下,着火爆炸理论的模型构建、数值求解方法、参数敏感性分析及实验验证结果。同时,也介绍纳米金属、气相介质惰化(氮气、氩气)和粉末惰化(纳米二氧化钛)的相关研究内容。

本书的目的是使读者对金属粉尘爆炸的基本理论有更深入的理解,也希望从事燃烧应用、能源动力等领域的工程师们能从中获益,本书也可作为高等院校相关专业的教师和学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属粉尘着火爆炸的理论与实验 / 苑春苗, 李畅, 李刚著. —北京: 科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-054657-9

I. ①金… II. ①苑… ②李… ③李… III. ①金属粉尘-着火-爆炸-试验 IV. ①TF123.9-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 238364 号

责任编辑: 张 震 杨慎欣 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 17

字数: 343 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

粉尘爆炸是一种较为典型的事故类型，近年来我国粉尘爆炸事故频发，如2014年抛光铝粉“8·2”特别重大爆炸事故，事故后果尤为严重，粉尘爆炸问题也因此受到了前所未有的重视，近年来国内学者对该问题的研究热情也日益高涨。然而，现阶段找到一本系统介绍可燃粉尘着火爆炸基本理论的国内学者所著的学术著作却是一件难事。我国当前严峻的粉尘爆炸事故威胁以及粉尘爆炸相关科学问题的迫切研究需求，促成了本书的产生。

阅读本书，读者可以发现本书作者多次出现在所引用文献中，这是因为本书所述核心内容是作者近10年发表在《中国安全生产科学技术》《东北大学学报》、*Journal of Hazardous Materials*、*Journal of Loss Prevention in the Process Industries*、*Fuel*等国内外学术刊物上的研究成果。选择金属粉尘作为本书研究对象，昆山铝粉爆炸事故背景是原因之一，主要原因是金属粉尘的物化特性较为典型，作者近年来的研究对象也主要以金属粉尘为主。

本书以读者所熟悉的标准测试装置为物理模型，在此基础上系统介绍粉尘层、粉尘云在高温热板、电火花等常见点火源作用下的着火爆炸理论模型，使得读者对粉尘爆炸的基本理论有更深入的理解，也希望能对从事相关领域的工程师及科研工作者们有所帮助。

本书共6章。第1、2章是基础铺垫；第3~6章是核心理论内容。阐述次序基本为先理论模型，然后参数敏感性分析及实验验证。

第1章介绍粉尘爆炸相关的基本概念，以及与本书后面章节核心内容相关的国内外重要研究进展，以便读者对本书内容在整体上有基本概念和认识。

第2章介绍为验证本书所述理论涉及的实验测试原理、装置、方法等。通过本章实验测试部分的系统描述，使读者对粉尘爆炸特性的标准测试、非标准测试及相关标准有全面的了解。

第3章首先介绍常见点火源之一——高温热表面作用下的粉尘层着火理论。相对于粉尘云而言，粉尘层的存在形式和状态相对简单，更容易理解和掌握。但两者相互关联，着火后的粉尘层在扬起后具有粉尘爆炸的危险。

第4章是在第3章的基础上介绍粉尘云在高温热表面下的着火理论，重点考虑了两种典型情况：第一种是可燃粉尘快速流经高温表面；另一种是可燃粉尘悬浮长时间接触高温表面。希望读者从根本上认识到在粉尘爆炸前期的着火阶段，粉尘云内颗粒的温度变化规律及其对着火过程的影响。

第5章介绍另一种常见点火源，即电火花作用下粉尘云的着火理论。重点考虑两部分：第一是电火花的能量属性及其空间温度场的分布；第二是可燃粉尘在电火花作用下的空间温度分布及其对着火及火蔓延过程的影响。

第6章介绍粉尘云着火后，爆炸压力的发展过程。重点考虑两种常见的理论模型：第一种是针对低沸点易蒸发的可燃粉尘；第二种是针对高沸点易发生表面燃烧的可燃粉尘。通过模拟可燃粉尘在密闭容器中的爆炸压力发展过程，使读者了解粉尘爆炸发生后影响事故严重程度的本质因素。

本书中所有研究工作都是在国家重点研发计划项目（项目编号：2016YFC0801703）、国家自然科学基金项目（项目编号：51374001、51604175、51474053）、教育部中央高校基本科研业务费项目（项目编号：N150104001）、辽宁省教育厅一般项目（项目编号：L20150181）等资助下进行的。本书撰写过程中研究生郝剑涛、卜亚杰、蔡景治、王富强等做了大量的文献调研及整理工作，著书过程也参考和借鉴了国内外专家学者的相关文献资料，作者在此深表谢意。

作者才疏学浅，加之时间匆促，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

苑春苗 李 畅 李 刚

2017年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 粉尘定义与分类	1
1.2 粉尘爆炸	2
1.2.1 粉尘爆炸的特点	2
1.2.2 粉尘爆炸发生的条件	5
1.2.3 粉尘爆炸的表征参数	6
1.2.4 粉尘爆炸的影响因素	8
1.2.5 粉尘爆炸的防护技术	9
1.3 金属粉尘	14
1.3.1 金属粉尘的来源	14
1.3.2 金属粉尘的物化特性	15
1.3.3 金属粉尘颗粒的燃烧特性	15
1.3.4 金属粉尘爆炸的特点	20
1.3.5 金属粉尘爆炸的常见点火源	22
1.4 金属粉尘着火爆炸特性的研究现状	24
1.4.1 粉尘层最低着火温度研究现状	24
1.4.2 粉尘云最低着火温度研究现状	25
1.4.3 粉尘云最小点火能研究现状	29
1.4.4 粉尘云最大爆炸压力、最大压力上升速率研究现状	39
1.4.5 纳米金属粉体燃爆特性的研究现状	44
参考文献	48
第 2 章 粉尘爆炸特性参数测试与标准	55
2.1 粉尘层最低着火温度	55
2.1.1 测试原理	55
2.1.2 测试装置	56
2.1.3 着火判据	59
2.1.4 测试方法	59

2.1.5	数据处理	60
2.1.6	应用	60
2.2	粉尘云最低着火温度	62
2.2.1	测试原理	62
2.2.2	测试装置	63
2.2.3	测试方法	69
2.2.4	数据处理	69
2.2.5	应用	69
2.3	粉尘爆炸下限	70
2.3.1	测试原理	70
2.3.2	测试装置	71
2.3.3	测试方法	71
2.3.4	应用	72
2.4	粉尘云最小点火能	72
2.4.1	测试原理	72
2.4.2	测试装置	73
2.4.3	测试方法	76
2.4.4	应用	76
2.5	最大爆炸压力、最大压力上升速率及爆炸指数	77
2.5.1	测试原理	77
2.5.2	测试装置	78
2.5.3	测试方法	80
2.5.4	应用	80
2.6	测试标准	81
2.6.1	爆炸特性参数的国内外测试标准	81
2.6.2	相关测试标准及行业标准	82
2.7	本书研究所涉及物质	85
2.7.1	镁粉	85
2.7.2	钛粉	87
	参考文献	93
第3章	热表面作用下粉尘层的着火理论与实验	95
3.1	粉尘层表面受热的抽象物理模型	95
3.2	粉尘层温度分布假设模型	96
3.2.1	Semenov/Frank-Kamenetskii 模型	96

3.2.2 Thomas 假设模型	98
3.3 粉尘层内温度分布理论模型	98
3.3.1 理论模型与守恒方程	98
3.3.2 边界条件及初始条件	99
3.4 无量纲处理	99
3.5 计算方法	100
3.5.1 偏微分方程分类形式	100
3.5.2 划分网格	101
3.5.3 守恒方程的离散	102
3.5.4 初边值条件的离散	102
3.5.5 离散方程的通用形式	103
3.5.6 代数方程组求解	104
3.6 守恒方程的放热源项	104
3.6.1 空气条件下的化学反应放热速率	104
3.6.2 惰化条件下的化学反应放热速率	105
3.7 计算参数及过程	111
3.8 层内温度分布的数值计算与实验验证	113
3.8.1 最高温度限值时的层内温度变化	113
3.8.2 粉尘层着火的临界热板温度	115
3.8.3 层内着火过程分析	119
3.8.4 气相惰化条件下的临界热板温度	123
3.8.5 粉体混合物的临界着火温度	127
参考文献	130
第 4 章 金属粉尘云表面受热着火理论	132
4.1 输运状态粉尘云表面受热的着火理论	132
4.1.1 着火模型的构建方法	132
4.1.2 输运状态下的气-粒两相运动	133
4.1.3 输运状态下气-粒两相能量守恒	136
4.1.4 粉尘云着火判据	138
4.1.5 能量守恒方程的求解	139
4.2 热爆炸理论模型	141
4.3 瞬时温度模型与热爆炸理论模型对比分析	143
4.3.1 粉尘云最低着火温度的计算结果	143
4.3.2 瞬时温度模型的参数敏感性分析	145

4.4 悬浮状态下粉尘云颗粒的着火理论	148
4.4.1 悬浮状态下粉尘云的能量守恒	148
4.4.2 悬浮状态下粉尘云颗粒温度的计算	151
4.4.3 悬浮状态下粉尘云最低着火温度的影响因素分析	154
4.5 微纳米金属粉尘云最低着火温度的差异	156
4.5.1 微纳米颗粒的形态差异	156
4.5.2 纳米钛粉尘云的能量守恒方程式	159
4.5.3 基于云着火理论的纳米团块尺寸估计方法	160
4.6 微纳米钛粉混合物的着火理论	164
4.7 微米钛粉惰化混合物的着火理论	165
4.8 纳米钛粉惰化混合物的着火理论	166
参考文献	167
第5章 电火花作用条件下金属粉尘云的着火理论	170
5.1 电火花	170
5.1.1 电火花放电能量的测试	171
5.1.2 火花放电过程对粉尘浓度的影响	172
5.1.3 非电气火花	172
5.2 电火花作用下粉尘云的着火理论模型	174
5.2.1 粉尘云点火过程分析	174
5.2.2 模型假设	175
5.2.3 守恒方程及初边值条件	175
5.2.4 着火判据	177
5.2.5 计算方法	178
5.2.6 模型计算参数的确定	181
5.3 电火花作用下空间温度模拟计算	185
5.3.1 火花放电过程模拟	185
5.3.2 火花作用空间温度分布的影响因素	186
5.3.3 电火花作用下粉尘云的空间温度分布	192
5.4 最小点火能的模拟计算与实验验证	195
5.4.1 粒径对最小点火能的影响	195
5.4.2 粉尘浓度对最小点火能的影响	202
5.4.3 电感对最小点火能的影响	204
5.4.4 惰化介质对最小点火能的影响	207
参考文献	215

第 6 章 密闭容器中金属粉尘云的压力发展	217
6.1 低沸点金属粉尘在密闭容器中的爆炸压力发展模型	217
6.1.1 模型假设	217
6.1.2 爆炸过程的物料衡算	217
6.1.3 能量衡算	220
6.1.4 压力发展过程	220
6.1.5 压力上升速率的影响因素	221
6.1.6 猛度参数计算程序	222
6.2 低沸点金属粉尘的爆炸压力发展过程	223
6.2.1 爆炸压力发展过程	223
6.2.2 理论猛度参数的敏感性分析	225
6.2.3 气相惰化气氛对猛度参数的影响	227
6.3 高沸点金属粉尘在密闭容器中的爆炸压力发展模型	231
6.3.1 模型假设与物料衡算	231
6.3.2 物料平衡	232
6.3.3 模型计算参数与计算程序	232
6.4 高沸点金属粉尘的爆炸压力发展过程	233
6.4.1 微米金属粉尘的爆炸压力发展过程	233
6.4.2 纳米金属粉尘的爆炸压力发展过程	236
6.5 高沸点金属爆炸猛度参数的敏感性分析	241
6.5.1 粒径对爆炸猛度参数的影响	241
6.5.2 粉尘浓度对钛粉爆炸猛度参数的影响	247
6.6 微纳米金属粉尘的可爆性	247
6.6.1 微纳米金属粉尘的最低可爆浓度	247
6.6.2 粉末惰化介质对可爆性的影响	249
参考文献	252
附录	254
附录 A 粉尘云能量守恒方程的无量纲化	254
附录 B BAM 炉喷吹分散压力估算	256
附录 C 密闭容器内爆炸物质转化率的计算	257
索引	258

第 1 章 绪 论

1.1 粉尘定义与分类

粉尘（dust）是指悬浮在空气中的固体微粒，国际标准化组织定义粉尘为粒径小于 75 μm 的固体悬浮物。粉尘有许多类似名称，如颗粒、粉末等，一般不予明确区分。不同职业规范对粉尘的定义通常都是根据粉尘颗粒的大小来划分的。例如，日本防火协会对粉尘的定义：任何直径小于 420 μm 的固体颗粒且分散在空气中时能被点燃并发生爆炸。英国标准 BS 2955:1993、英国标准 BS EN 1127-1:2011 将直径小于 1000 μm 的颗粒定义为粉体，而将直径小于 76 μm 的颗粒称为粉尘^[1,2]。美国消防协会（NFPA 654—2013）将直径小于 420 μm 的颗粒称为粉尘。国际电工委员会标准 IEC 80079-20-2:2016 将可燃性粉尘定义为公称直径小于或等于 500 μm 的细小固体颗粒，在大气条件下能与空气形成爆炸性混合物。美国矿务局根据颗粒的大小对粉尘进行了定义，如表 1.1 所示。

表 1.1 不同行业中粉尘的定义

不同行业粉尘	颗粒直径/ μm
粉尘（表面加工业）	<425
悬浮煤粉（煤矿业）	<75
矿井粉尘（非煤矿业）	<850，且有 20%的颗粒直径<75
粉尘（煤矿业）	<850

粉尘按照性质一般分为无机粉尘、有机粉尘和混合性粉尘。金属粉尘属于无机粉尘，如铁粉、锡粉、铝粉、锰粉、铅粉、锌粉等；玉米淀粉等属于有机粉尘；混合性粉尘是两种以上有机和无机粉体物质混合形成的粉尘，在生产中最为多见。Eckhoff 根据物理特性将可燃性粉尘分为 12 种，具体如表 1.2 所示^[3]。

表 1.2 可燃性粉尘的分类

粉尘类别	举例
粮食粉尘 农产品粉尘 食品粉尘	玉米淀粉、小麦面粉、咖啡、食糖、奶粉、豆粉、鱼骨粉、混合饲料等，以及粮食加工与储运过程产生的粉尘（粮食表皮和泥土粉尘的混合物）
木材粉尘	木材加工产生的副产品粉尘、生产木质素的木粉等
金属粉尘	金属加工产生的副产品粉尘、作为产品的金属粉，例如铝粉、镁粉、锌粉、锆粉、铁粉、钴粉等
纺织纤维	天然纤维如棉、毛、麻等，化学纤维如涤纶、氨纶、腈纶等
石油化工粉尘	聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、ABS 等各种聚合物塑料和树脂
单质状态的化工原料或产品	硫黄、磷粉、硅粉等
制药工业粉尘	克拉维酸钾
农药粉尘	环嗪酮（杀虫剂）、恶唑酰草胺（除草剂）等
植物制品	烟草
其他化工粉尘	抗氧化剂、缓释剂

Geldart 等根据图 1.1 中气粒密度差与颗粒粒径的关系, 将颗粒分为 A、B、C、D 四个类别, 用于描述粉体颗粒的流化特性。A 类颗粒粒度较细, 粒径一般为 $30 \sim 100 \mu\text{m}$, 表观密度小于 1400kg/m^3 。B 类颗粒具有中等粒度, 粒径一般为 $100 \sim 600 \mu\text{m}$, 其表观密度为 $1400 \sim 4000 \text{kg/m}^3$, 沙粒是典型的 B 类颗粒。C 类颗粒属超细颗粒或黏性颗粒, 一般平均粒径小于 $30 \mu\text{m}$ 。此类颗粒由于粒径很小, 颗粒间的相互作用力相对较大, 极易导致颗粒黏聚, 所以很难分散。D 类颗粒粒度最大, 平均粒径一般在 0.6mm 以上, 大部分流化床锅炉用煤、玉米、小麦颗粒等属于这类颗粒^[4]。

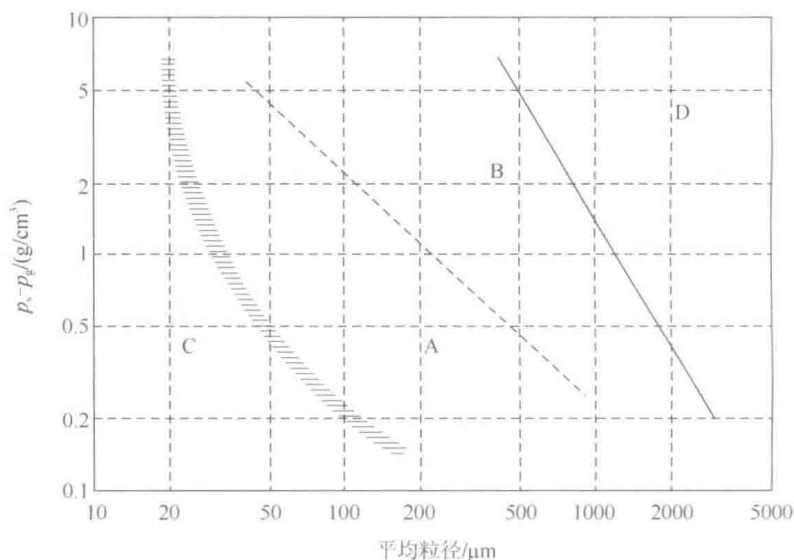


图 1.1 气粒密度差与颗粒粒径的关系

1.2 粉尘爆炸

粉尘危害性主要体现在两个方面：空气污染和粉尘爆炸。空气污染对人的健康影响与粉尘的粒径、颗粒成分有关。粉尘常含有许多有毒的重金属成分，如铬、锰、镉、铅等。对于粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物，能较长期地在大气中漂浮，被人体吸入后，极易深入肺部，引起中毒性肺炎或硅肺病，甚至肺癌。本书重点阐述粉尘的第二个方面的危害，即粉尘爆炸。

1.2.1 粉尘爆炸的特点

世界上第一次有记录的粉尘爆炸事故发生在 1785 年 12 月，在意大利都灵 (Turin) 的一个面包作坊。尽管粉尘爆炸防护理论与技术的研究已经历了 100 多年，但随着近代工业中可燃粉体的多样化、生产工艺的复杂化，粉尘爆炸事故仍然是目前较为严峻的现实威胁^[5]。如图 1.2 所示，以发达国家中的美国为例，近年来的粉尘

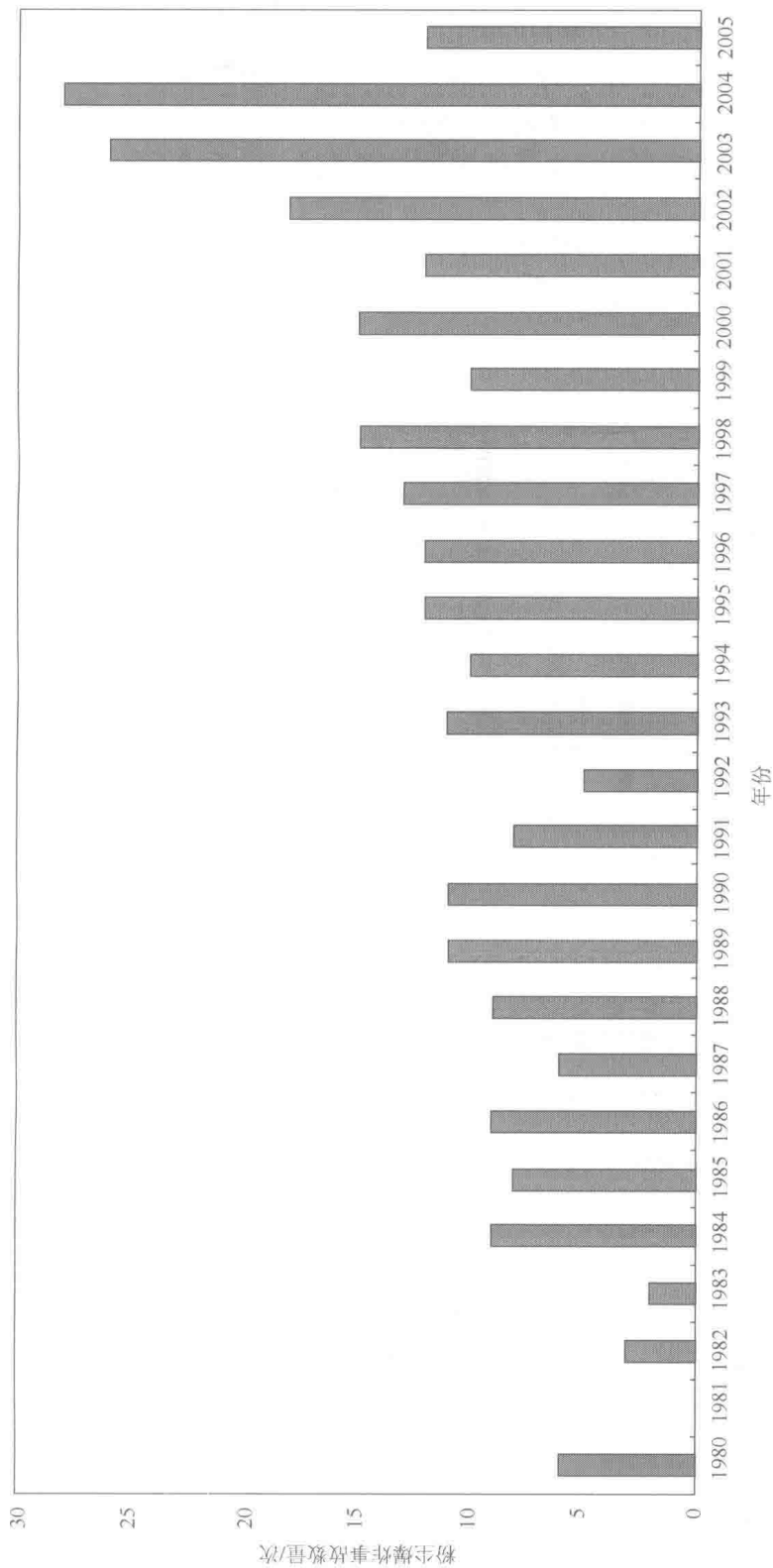


图 1.2 1980~2005 年美国粉尘爆炸事故统计

1981 年数据暂缺

爆炸事故基本呈上升趋势,1980~2005年共发生了280起粉尘引起的火灾爆炸事故,共造成119人死亡、700人受伤。

根据图1.3所示的事故统计结果,2003~2012年,中国的粉尘爆炸事故总数随着工业产值的增加也呈逐渐上升趋势。而2014年一年公开报道的导致伤亡的粉尘爆炸事故就有7起,其中昆山中荣金属制品有限公司重大铝粉爆炸事故,造成75人死亡、185人受伤,直接经济损失达3.51亿元^[6]。

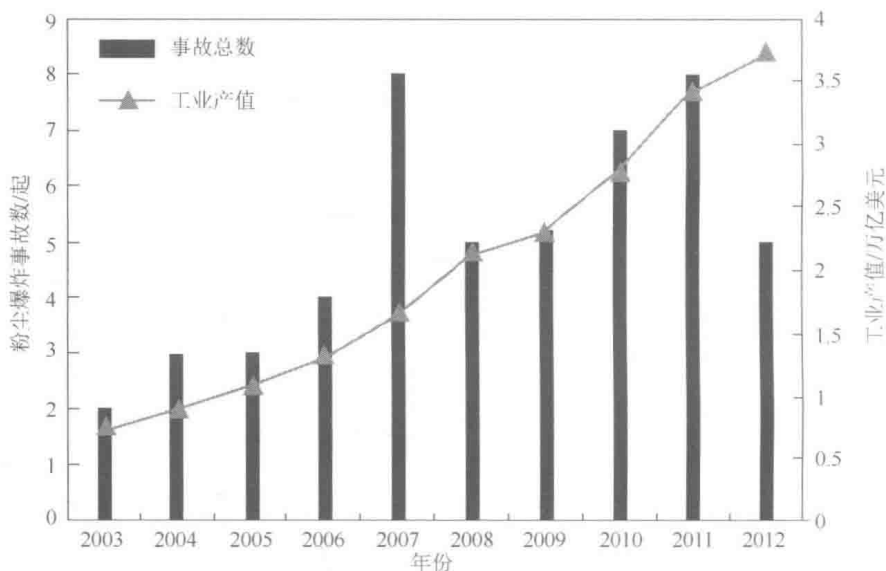


图 1.3 2003~2012 年中国粉尘爆炸事故数与工业产值^[5]

粉尘爆炸是一个极其复杂的过程,它伴随着物理性质、化学性质的变化,同时也受各种外界条件的影响。与可燃气体相比,可燃粉尘爆炸涉及的因素更多,使得粉尘爆炸事故危险源的辨识、评价与控制更为困难^[7,8],导致粉尘爆炸事故频发。与可燃气体相比,粉尘爆炸的复杂性主要体现在以下几个方面。

1. 形成爆炸性混合物的机制不同

可燃气体通过浓度梯度向空间扩散,在很短时间内可形成均匀的爆炸性混合物,通过监控浓度进行爆炸预警。由于重力沉降,可燃粉尘颗粒需要借助外部作用力才能分散成云状,形成爆炸性混合物。粉尘分散程度与多种因素有关,如粒径、密度、工艺条件等。通常粉尘在空间的浓度分布是不均匀的,很难通过局部点的粉尘浓度预警来预防粉尘爆炸的发生,使粉尘爆炸的危险具有隐蔽性。气体爆炸一般可以通过监控浓度预警,而粉尘爆炸一般无法通过粉尘浓度预警。

2. 点燃需要的能量和引燃诱导时间不同

可燃粉尘点燃能量的范围很大,可低至 1mJ 以下,也可高达 1J。大部分可燃性粉尘的点燃能量小于 100mJ。气体点燃能量相对较低,通常小于 1mJ,着火诱导时间相对于可燃粉尘较短。

3. 爆炸能量大、有二次爆炸特性

粉尘空气混合物的能量密度比气体空气混合物大。粉尘颗粒着火后,燃烧速度慢、燃尽时间长。粉尘云一旦点燃后,爆炸产生的能量很高。若按产生能量的最高值进行比较,粉尘爆炸是气体爆炸的好几倍,温度可达 2000℃ 以上,最大爆炸压力为 345~1690kPa。初始爆炸产生的冲击波可扬起生产环境中大量沉积的未燃粉尘,使其悬浮补充到当前的爆炸进程中,引发更猛烈的二次爆炸。

4. 中毒、烧伤

与可燃气体不同,粉尘爆炸可产生有毒气体。如碳不完全燃烧产生一氧化碳,塑料、树脂、农药等燃烧产物或分解产物为有毒气体。同时,由于粉尘爆炸持续时间短、颗粒燃尽时间长,常存在未燃尽的炽热粉体颗粒,导致更严重的烧伤。昆山中荣金属制品有限公司重大铝粉爆炸事故中,现场收治的大部分伤者的烧伤面积超过 90%,伤势最轻的烧伤面积也超过 50%,几乎所有人都是深度烧伤。

1.2.2 粉尘爆炸发生的条件

可燃粉尘通常呈粉尘层、粉尘云两种状态,分别对应粉尘层火灾和粉尘云爆炸两种事故后果,具体如图 1.4 所示。可以看出,粉尘发生爆炸必须具备以下五个条件^[9]。

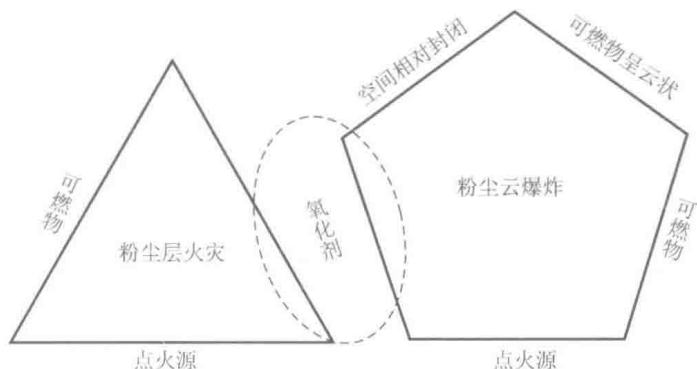


图 1.4 火灾三角形与爆炸五边形

1. 可燃粉尘

粉尘是可燃的，且粉尘浓度要在爆炸范围内。浓度太低，粉尘颗粒间距离过大，火焰不能传播；浓度太高，因为氧气缺乏和不参与反应粉尘的吸热作用，火焰也不能传播。可燃粉尘的氧化反应需要一定的接触面积，即比表面积。粉尘粒径小到一定程度才能发生爆炸，一般粉尘的粒径小于 $420\mu\text{m}$ 才具有爆炸性。

2. 足够的氧含量

一定氧含量是粉尘燃烧的基础，当空气中的氧含量减少到一定浓度时，粉尘氧化反应速率太低，放热速率不足以维持火焰传播。

3. 点火源

存在点火源，且点火能量大于粉尘的最小点燃能量，或点火热表面温度超过粉尘的最低着火温度。在一定散热条件下，粉尘必须具有足够的氧化放热速率才可能着火。不同种类粉尘的热力学常数和化学反应动力学常数不同，氧化反应放热速率也不同。不论何种粉尘，要使反应速率增高，必须提高温度。粉尘点燃的方式包括热表面、电火花、静电和粉尘自热等。

4. 粉尘与空气混合

只有粉尘与空气混合处于悬浮粉尘云状态，才能使粉尘与氧气有足够的氧化反应接触面积。如果粉尘层不被分散或扰动形成粉尘云，则粉尘层只能着火而不会发生爆炸。

5. 足够的空间密闭程度

必须在密闭或部分密闭的包围体内粉尘燃烧才能产生较高的压力。

1.2.3 粉尘爆炸的表征参数

粉体物质的爆炸危险性通常用以下参数进行表征^[3,5,9]。

1. 最大爆炸压力 p_{max} 和最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\text{max}}$

粉尘云最大爆炸压力 (maximum explosion pressure) 指在某一爆炸容器下测试所得的最大爆炸压力 (普遍使用 20L 球形爆炸测试装置测试)，单位 MPa 或 bar^①。粉尘云最大压力上升速率 (maximum rate of explosion pressure rise) 指在某一爆炸

① 1bar=10⁵Pa。

容器下测试所得的最大压力上升速率,单位 MPa/s 或 bar/s。可燃性粉尘爆炸时出现的最大爆炸特性值就是最大爆炸压力和最大压力上升速率。就密闭容器内的粉尘爆炸过程而言,压力上升速率是衡量爆炸强度的尺度。它们随粉尘的种类、粒度、浓度和着火源的种类,以及容器大小、初压、氧含量、挥发组分和可燃气体浓度、灰分的含量等变化而变化。

2. 爆炸指数 K_m

爆炸指数 (explosion index) 是最大压力上升速率和容器体积归一化处理后的结果,单位 MPa·m/s 或 bar·m/s。爆炸指数值越大爆炸越猛烈,即烈度越高。爆炸指数值必须在国际标准规定的爆炸容器或与之等效的爆炸装置中测定,一般是在特定的 20L 球形爆炸测试装置中测定。

3. 爆炸下限

粉尘云最低可燃浓度 (minimum explosible concentration, MEC) 也称爆炸下限 (lower explosion limit, LEL),单位 g/m^3 。粉尘/空气混合物只有在爆炸上限和下限之间一定的浓度范围内,才具有爆炸性。一般工业可燃粉尘的爆炸下限为 $20\sim 60\text{g/m}^3$,掌握爆炸下限的数据对于保障工业生产安全具有非常重要的意义。

4. 极限氧浓度

当氧浓度低于某一极限浓度时,无论粉尘浓度为多大,粉尘云均不能发生爆炸,该浓度称为该种粉尘的极限氧浓度 (limiting oxygen concentration, LOC)。如果浓度稍大于此含量,则粉尘会发生爆炸。预防粉尘爆炸的气体惰化措施是控制系统中氧含量,使其小于极限氧浓度。

5. 最低着火温度

粉尘最低着火温度 (minimum ignition temperature, MIT) 包括粉尘层最低着火温度 (minimum ignition temperature of dust layer, MITL) 和粉尘云最低着火温度 (minimum ignition temperature of dust cloud, MITC) 两个方面。粉尘层最低着火温度是指特定热表面上一定厚度粉尘层能发生着火的最低热表面温度,而粉尘云最低着火温度则是指粉尘云通过特定加热炉管内壁被点燃的最低温度。粉尘的最低着火温度取决于粉尘粒度、挥发组分的含量、周围气体的氧含量等。粉尘最低着火温度是防爆电气设备设计与选型及防爆工艺设计的重要依据之一。

6. 最小点火能

最小点火能 (minimum ignition energy, MIE) 是指在标准测试装置中点燃粉