



# 聚乙烯粉尘爆炸研究进展

马 冉<sup>1</sup>, 高建村<sup>1,2</sup>, 杨 凯<sup>1,2</sup>, 吕鹏飞<sup>1,2</sup>, 庞 磊<sup>1,2</sup>

(1. 北京石油化工学院 安全工程学院, 北京 102617; 2. 北京市安全生产工程技术研究院, 北京 102617)

**摘要:**以聚乙烯生产工艺爆炸风险评价、聚乙烯粉尘爆炸特征参数、聚乙烯粉尘爆炸灾害动力学传播规律、聚乙烯粉尘与可燃气体混合物爆炸机理、聚乙烯粉尘防爆控制爆炸技术为主线,综述了国内外聚乙烯粉尘爆炸的研究现状,归纳各方面研究所存在的不足之处;指出未来聚乙烯粉尘爆炸研究发展的 5 个方向:1)对不同种类聚乙烯粉尘爆炸特性开展比较研究;2)建立可定量预测爆炸特征参数的工程模型;3)深入剖析可燃气体对粉尘爆炸的影响机制及规律;4)运用系统安全分析等方法进一步深入、定量地研究粉尘爆炸风险;5)加强对聚乙烯粉尘爆炸灾害衍化动力学规律及其有效控制技术的研究,为聚乙烯生产工艺安全的深入研究和事故防控提供理论依据和实际指导。

**关键词:**聚乙烯;粉尘爆炸;爆炸灾害;事故预防控制

中图分类号:X937

文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2017)06-0059-05

## Progress research on polyethylene dust explosion

MA Ran<sup>1</sup>, GAO Jiancun<sup>1,2</sup>, YANG Kai<sup>1,2</sup>,  
LYU Pengfei<sup>1,2</sup>, PANG Lei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Safety Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. Beijing Academy of Safety Production Engineering and Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** Recent advances in polyethylene dust explosion at home and abroad were reviewed and existing problems in researches about the polyethylene dust explosion were concluded, based on risk assessment of polyethylene production process, characteristic parameters of polyethylene dust explosion, the dynamics of damage caused by polyethylene dust explosion,

收稿日期:2017-05-16, 修回日期:2017-11-07。

基金项目:国家重点研发计划项目,编号:2017YFC0804700;北京市科技计划项目,编号:Z161100001116081;北京市优秀人才培养资助青年拔尖个人项目,编号:2016000026833ZK05。

第一作者简介:马冉(1994—),女,硕士研究生,研究方向为化工安全。E-mail:5220150134@bjpt.edu.cn。

通信作者简介:庞磊(1982—),男(蒙古族),博士,副教授,硕士生导师,研究方向为爆炸安全理论与技术。E-mail:pang@bjpt.edu.cn。

explosion mechanism for the mixture of polyethylene dust and combustible gas, and explosion-proof and controlled explosion technique for polyethylene dust. Furthermore, some prospects concerning polyethylene dust explosion were presented as follows: 1) comparative studies between different kinds of polyethylene dust explosion deserve to be carried; 2) the engineering models which can quantitatively predict the characteristic parameter of the explosion should be established; 3) the mechanisms and laws of dust explosion affected by combustible gas need to be investigated in depth; 4) the dust explosion risks can be evaluated further and quantitatively by means of systematic safety analysis and so on; 5) more efforts should be paid to research the dynamics and effective controlling of the polyethylene dust explosion. These will provide theoretical basis and practical guidance for intense research and accident prevention of security during the polyethylene production process.

**Keywords:** polyethylene; dust explosion; explosion disaster; accident prevention and control

聚乙烯(polyethylene, PE)是由乙烯聚合而成之聚合物,至今已有 60 年左右的产品发展史,其全球产量居五大泛用树脂之首。近年来,国内外石化行业迅速发展,聚乙烯生产装置的数量与生产能力也随之高速增长。与此同时,聚乙烯生产过程中所暴露出的事故隐患也逐渐增多,而聚乙烯粉尘爆炸是该工艺涉及的众多事故隐患类型中较为典型的一种。事故的发生不仅造成严重的人员伤亡和经济损失,还影响了企业的正常生产运行,并带来社会的负面影响<sup>[1]</sup>。2002 年 2 月 23 日,辽阳石化分公司烯烃厂聚乙烯生产装置发生粉尘爆炸事故,造成 8 人死亡,1 人重伤,18 人轻伤<sup>[2]</sup>。2005 年 4 月 20 日,北京燕山石油化工有限公司化工一厂低压聚乙烯料仓发生粉尘爆炸,所幸无人员伤亡,但造成部分经济损失<sup>[3]</sup>。2013 年 3 月 14 日,韩国全罗南道丽水市花峙洞的大林产业高密度聚乙烯(HDPE)第二工厂发生粉尘爆炸事故,导致 6 人死亡,11 人受伤<sup>[4]</sup>。频发的聚乙烯粉尘爆炸事故充分体现了聚乙烯生产过程安全控制和管理的紧迫性与必要性。聚乙烯生产全过程中,造粒、干燥、气力输送、卸料等工艺均有较高浓度聚乙烯粉尘云的存在<sup>[5]</sup>,同时会不

可避免地产生一定能量的静电、电火花、机械热表面、摩擦等多种点火源,若不加以有效控制,则极易在局部空间发生粉尘爆炸。

粉尘爆炸机理复杂,危害效应多样。到目前为止,国内外对粉尘爆炸的相关研究以金属粉尘(如镁粉、铝粉、铝合金粉)、粮食粉尘(如小麦粉、淀粉)、煤粉、木粉等粉尘为主要研究对象,专门针对聚乙烯粉尘爆炸的研究极为有限,特别是聚乙烯粉尘爆炸的特征参数仍不够全面,聚乙烯粉尘爆炸灾害衍化规律尚不够清晰,相应的事故防控技术有待进一步明确和深化。基于此,本文中围绕聚乙烯生产工艺粉尘爆炸风险综合分析、聚乙烯粉尘爆炸特性、聚乙烯粉尘爆炸灾害动力学传播规律、聚乙烯与可燃气体杂混物爆炸机理、聚乙烯粉尘防爆控爆技术等方面对国内外的研究现状进行详细分析和讨论,旨在归纳总结此类事故研究领域中的不足和局限性,并提出相应的研究展望。

## 1 国内外研究现状

### 1.1 聚乙烯生产工艺粉尘爆炸风险综合分析

聚乙烯生产工艺存在火灾、爆炸等多种事故风险,相应的风险分析、评价是聚乙烯安全生产的重要研究方向。王林元等<sup>[6]</sup>分析指出,高压聚乙烯生产过程中的料仓内部及成品包装过程中均具有粉尘爆炸危险性,并建议采用密闭干燥、密闭包装和控制点火源等安全控制措施。冯文萍<sup>[7]</sup>应用事故树分析法(FTA)、危险与可操作性研究(HAZOP)方法、道(DOW)化学火灾爆炸危险指数法对高密度聚乙烯生产工艺过程的粉尘爆炸危险性进行了评价,并提出应急对策。陈帅<sup>[8]</sup>分析高密度聚乙烯生产工艺中的物料、溶剂、催化

剂及产品的爆炸危险性,并对该生产过程中可能的爆炸事故类型进行了预测。研究中对聚乙烯生产工艺中所存在的危险性因素分析比较透彻,但缺乏具体的粉尘爆炸预防控制措施。王月红等<sup>[9]</sup>借助预先危险性分析方法和道化学法识别出低密度聚乙烯料仓粉尘爆炸事故的危险性,通过定量分析表明,采用反吹风和净化吹风系统作为安全措施的可行性。邓哲文<sup>[10]</sup>指出聚乙烯装置颗粒料仓发生粉尘爆炸的内因和外因,提出预防聚乙烯料仓粉尘爆炸事故的对策和措施。谭凤贵<sup>[11]</sup>汇总并分析了2000—2008年期间的聚乙烯料仓典型爆炸事故,模拟了典型的爆炸事故案例中高料位报警器的放电特性,并提出开展危险评估和危险教育以及建立防静电爆炸的本质安全系统以减缓和抑制粉尘爆炸事故。贾志轩<sup>[12]</sup>对聚酯生产装置中存在的火灾和爆炸危险进行了分析,指出聚酯装置中粉体粒度极小,有较大的粉尘爆炸风险,并从多方面提出粉尘爆炸的防范措施。

### 1.2 聚乙烯粉尘爆炸参数特征

聚乙烯粉属于典型的合成有机粉体材料。结合粉尘爆炸原理、现有典型事故案例及已有研究可以确定,聚乙烯粉尘具有可燃性,在特定条件下能够发生粉尘爆炸事故。聚乙烯粉尘爆炸特性的影响因素较多,例如粒度分布等粉体自身属性以及初始压力、温度、湿度、湍流等环境条件。从现有文献、技术标准等资料来看,聚乙烯粉尘爆炸特征参数仍不够全面。例如,GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》<sup>[13]</sup>、Traoré等<sup>[14]</sup>、罗宏昌<sup>[15]</sup>和毕明树等<sup>[16]</sup>仅给出特定工况下的聚乙烯粉尘爆炸特征参数,如表1所示,但数据不够全面,且没有明确测试条件或粒径分布。

表 1 聚乙烯粉尘爆炸特征参数表

Tab. 1 Parameters of polyethylene dust explosion characteristics

| 来源     | 粉尘名称   | 平均<br>粒径/ $\mu\text{m}$ | 高温表面堆积粉尘层<br>(5 mm)的引燃温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 粉尘云最低<br>着火温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 最小点<br>火能量/ $\text{mJ}$ | 粉尘云爆炸下限<br>浓度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ | 最大爆炸<br>压力/ $\text{MPa}$ | 最大压力上升<br>速率/ $(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|--------|--------|-------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------|---|--------------------------|--|
| 文献[13] | 聚乙烯    | 40                      | 熔融   | 410                               | —                       | 26  | —                        | —  |
| 文献[14] | 聚乙烯    | 136                     | —  | 480                               | 500                     | 60  | —                        | —  |
| 文献[15] | 高密度聚乙烯 | —                       | —  | 390                               | 10                      | 20  | 0.598                    | 51.7   |
|        | 低密度聚乙烯 | —                       | —  | 410                               | 30                      | 20  | 0.588                    | 27.6   |
| 文献[16] | 聚乙烯    | —                       | —  | —                                 | 10                      | —   | —                        | —  |

在粉尘爆炸研究领域,基于风险理论,将爆炸特征参数分为爆炸敏感性和事故严重性两类。常采用粉尘云最小点火能量、粉尘云最低着火温度、粉尘层最低着火温度、爆炸下限等参数来表述粉尘爆炸的敏感性,并采用最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、爆

炸指数来表述粉尘爆炸事故严重性。

为探究聚乙烯粉尘爆炸敏感性,国内外学者开展了大量研究。靳鑫<sup>[17]</sup>对粒径约为500  $\mu\text{m}$ 的聚乙烯粉体进行热重-扫描量热法(TG-DSC)分析及最小点火能量测试,结果表明,聚乙烯活化能为26.03  $\text{kJ/mol}$ ,

最小点火能量大于 10 J。然而,对于煤矿以外的其他行业,通常粒径小于 425  $\mu\text{m}$  的粉尘才能参与爆炸快速反应<sup>[16]</sup>,因此该研究对于聚乙烯粉尘爆炸事故防治缺乏实际意义。

尹同山<sup>[18]</sup>研究聚乙烯粉体热解特性,发现聚乙烯热解温度约为 445  $^{\circ}\text{C}$ 。Han 等<sup>[19]</sup>借助热重分析法(TGA)、扫描量热法(DSC)分析研究了中位粒径为 61.6  $\mu\text{m}$  的高密度聚乙烯热解特性及粉尘云最小点火能量,结果表明,高密度聚乙烯粉尘的着火温度范围是 380~490  $^{\circ}\text{C}$ ,当粉尘云浓度高达 1 200~1 800  $\text{g}/\text{m}^3$  时,其最小点火能量小于 1 mJ。马小明等<sup>[20]</sup>通过实验测定不饱和和聚酯树脂粉尘的爆炸特征参数,指出该粉尘是一种爆炸敏感度极高的易燃粉尘,存在由静电火花引发爆炸的事故隐患,其粉尘云最小点火能量约为 4~10 mJ,粉尘云最低着火温度为 480  $^{\circ}\text{C}$ ,粉尘层最低着火温度大于 400  $^{\circ}\text{C}$ ,在生产过程中应采取静电防护措施。

学者们亦对聚乙烯粉尘爆炸事故严重性开展了研究。Iarossi 等<sup>[21]</sup>以尼龙和聚酯纤维为研究对象,考察材料纤度和长度对这 2 种粉尘爆炸强度的影响规律,研究发现粉尘颗粒长度越小、纤度适中,则 2 种粉尘的最大爆炸压力和最大压力上升速率较高,长度一定时,纤度对聚酯纤维最大爆炸压力和最大压力上升速率的影响更加显著。Benedetto 等<sup>[22]</sup>假定聚乙烯粉尘全部热解为乙烯气体继而发生爆炸,从而建立热动力学模型,预测聚乙烯粉尘爆炸的最大爆炸压力和最大压力上升速率随粉尘云浓度的变化规律。Benedetto 等<sup>[23]</sup>综合考量聚乙烯粉尘爆炸过程中粒子的内部与外部传热、粉尘热解释放挥发分、挥发分的燃烧等因素,建立一种新型模型定性分析粉尘爆炸过程中粒径对粉尘反应活性的影响机制,并预测了聚乙烯粉尘爆炸指数随粉体粒径大小的变化规律。

### 1.3 聚乙烯粉尘爆炸灾害动力学传播规律

火焰和冲击波是表述粉尘爆炸灾害衍化过程的主要表现形式。目前,针对聚乙烯粉尘爆炸火焰及冲击波传播的研究极少,但是关于其他类有机粉尘的火焰传播特性已有相应研究。例如, Gao 等<sup>[24-25]</sup>以 3 种长链一元醇为研究对象,借助高速光学仪器、精细的热电偶和离子电流探头来记录火焰传播行为、测量燃烧区的火焰温度分布和反应行为,并记录该类粉尘在半封闭式小房间内的爆炸火焰传播过程,分析有机颗粒云的火焰传播特性和温度分布。结果发现,颗粒挥发性以及粉尘云浓度对火焰传播行为影响显著。

Zhang 等<sup>[26]</sup>对比分析纳米级和微米级聚甲基丙烯酸甲酯粉尘爆炸火焰传播特性,研究发现纳米级聚甲基丙烯酸甲酯粉尘爆炸火焰光度更为强烈。Gao 等<sup>[27]</sup>使用高速摄影和滤光器组合的方法记录 3 种不同粒

度分布的十八烷醇粉尘爆炸过程的火焰传播,证实火焰前端结构随粒度分布的变化而改变,并且开发了一个简单的数学模型来确定临界粒度,以说明十八烷醇粉尘爆炸过程中的火焰传播机制。刘静平等<sup>[28]</sup>借助高速摄影和红外成像仪研究了硬脂酸粉尘火焰在上端开口圆柱形垂直燃烧管道的传播过程,研究表明,火焰传播速度和火焰温度随时间均呈现先增大后减小的趋势。上述研究虽均未涉及聚乙烯粉尘,但其研究方法以及得到的有机粉尘火焰传播特性可为深入探索聚乙烯粉尘爆炸火焰和冲击波传播规律提供参考。

### 1.4 聚乙烯粉尘与可燃气体杂混物的爆炸机理

可燃性粉尘和可燃气体杂混物的爆炸危险性具有叠加效应,即 2 种以上爆炸性物质混合后,能形成危险性更高的混合物。这种混合物的爆炸下限值比它们各自的爆炸下限值均低。杂混物爆炸机理复杂,影响因素众多<sup>[16]</sup>。在聚乙烯生产工艺中,聚乙烯粉尘受热易分解出乙烯、乙烷等可燃气体,与空气、粉尘形成杂混物,具有较高的爆炸危险性,因此,研究聚乙烯与可燃气体杂混物的爆炸特性对聚乙烯生产工艺安全控制具有重要意义。

近年来,国内外学者对聚乙烯与可燃气体杂混物的研究热度有所上升。Addai 等<sup>[29]</sup>研究了聚乙烯粉尘与可燃气体杂混物的最小点火能量,研究发现当添加丙烷体积分数仅为 1%时,聚乙烯的最小点火能量从 116 mJ 减小到 5 mJ。Nifuku 等<sup>[30]</sup>对塑料和聚氨酯混合粉尘的爆炸特性进行实验,研究表明,当可燃气体存在时,杂混物爆炸下限显著减小。刘义等<sup>[1,31]</sup>运用 Hartmann 管测试比较不同粒径聚乙烯粉尘相应杂混物的最小点火能量。结果表明,可燃性气体对杂混合物最小点火能量的影响随着粒径的增大而逐渐增大。吕岳等<sup>[32]</sup>借助 20 L 球形爆炸试验装置,研究甲烷体积分数对 2 种典型塑料粉尘-空气混合物特征参数的影响。研究发现,当甲烷体积分数从 0 增加到 4%时,塑料粉尘爆炸的猛烈度和敏感度也随之增加,爆炸下限明显减小。除聚乙烯粉尘杂混物外, Addai 等<sup>[33-34]</sup>对木粉、淀粉、色粉、石松子粉等粉尘与甲烷、乙烷、氢气、乙醇、甲苯等可燃气体形成的杂混物进行了研究,虽然粉尘和气体种类不同,但也能够为聚乙烯与乙烯、乙烷等可燃气体杂混物的爆炸研究提供依据。

### 1.5 聚乙烯粉尘防爆控爆技术

工业粉尘爆炸的 5 个要素包括可燃粉尘、粉尘云、引火源、助燃物、空间受限。在粉尘自身属性、空间受限等因素受工艺条件限制不易改变的情况下,控制氧含量等惰化技术成为主要的爆炸预防措施。惰化保

护是一种工业防爆技术手段,通常把惰化介质加入到爆炸气氛中以降低氧浓度,减少可燃物分子和氧分子作用的机会,降低发生爆炸反应的可能性。若燃烧已经发生,惰化介质粒子与游离基碰撞而使其失去活性,同时还将大量吸收燃烧反应释放的热量,抑制燃烧反应蔓延到其他可燃组分上,因而加入惰化介质,能有效降低可燃物组分爆炸范围,当惰化介质增加到足够浓度时,可燃物-空气混合物将不再发生燃烧<sup>[16]</sup>。目前,部分学者进行了惰化介质对聚乙烯粉尘爆炸抑爆性能的研究。

Addai 等<sup>[35]</sup>研究了氧化镁、硫酸铵和沙子等惰性物质对高密度聚乙烯爆炸敏感性的影响,结果表明,添加惰性物质后的粉尘混合物,其最小点火能和最低着火温度显著增高,爆炸风险可以降低至原来的 60%~80%。Amyotte 等<sup>[36]</sup>研究指出,添加固体惰化剂、增大粉尘颗粒粒径均可有效降低聚乙烯粉尘活性,进而降低其爆炸危险性。Traoré 等<sup>[14]</sup>研究表明,通过增加空气湿度可使聚乙烯粉尘云最小点火能和最低着火温度显著升高,进而有效抑制聚乙烯粉尘爆炸敏感性。Choi<sup>[37]</sup>等研究发现,当氮气在空气中的体积分数不小于 84%时,环氧树脂、聚酯等聚合物粉末的最小点火能均超过 100 mJ,极大地降低工业过程中的粉尘爆炸风险。孙中心等<sup>[38]</sup>将氮气循环系统融入到密闭蒸汽管回转干燥技术中,通过系列工艺使聚乙烯粉体物料的含水率降至 0.15%(质量分数)以下,有效地解决了干燥系统的粉尘爆炸隐患。静电也是粉尘爆炸的又一基本条件。相关研究表明,静电的不可消除性是导致聚乙烯粉尘静电危险性的主要因素<sup>[7]</sup>,静电排放已被证实是引起聚乙烯料仓粉尘爆炸的主要因素, Tan 等<sup>[39]</sup>研究表明,离子风静电消除器可有效除气力输送过程中产生的静电,降低聚乙烯粉尘爆炸风险。

目前,粉尘爆炸控制的主要措施包括泄爆、隔爆、抑爆、抗爆等,然而针对聚乙烯生产工艺粉尘爆炸泄爆、隔爆、抗爆等技术的研究较少。黄健聪<sup>[40]</sup>阐述了塑料粉尘料仓泄爆装置的重要性、塑料粉尘料仓爆破片工作原理和主要参数,从泄压面积的计算、火焰传播和压力传播、爆破片的安装位置、反冲力等方面探讨爆破片的设计要点,并且给出具体的工程实例。

## 2 存在问题与研究展望

1)从现有资料及研究成果来看,针对聚乙烯粉尘爆炸特性的研究比较片面,粒度、粉尘分散性、粉尘云浓度、环境温度、环境湿度、湍流等因素对聚乙烯粉尘爆炸特征参数的影响规律尚未得到系统研究。聚乙烯粉尘爆炸基础数据明显不足,同时缺乏分类研究。因此,应重视对聚乙烯粉尘爆炸特征参数的积累,探究

环境温、湿度和粉尘云浓度等因素对其爆炸特性的影响规律。对不同种类如高密度、低密度、线性低密度的聚乙烯粉尘爆炸特性开展对比研究,结合实验和理论分析,建立可定量预测爆炸特征参数的工程模型。

2)聚乙烯加工生产的过程中,其粉尘容易与乙烯、乙烷等可燃气体形成杂混物,具有较高的爆炸危险性,然而现有对聚乙烯粉尘杂混物爆炸特性的研究较为匮乏,考虑影响因素不够全面,爆炸特征参数比较单一,缺乏对聚乙烯粉尘杂混物爆炸特性及影响因素的系统研究。研究其爆炸特性,深入剖析可燃气体对粉尘爆炸的影响机制及规律,对聚乙烯生产工艺安全控制具有重要意义,应加以重视。

3)目前,关于聚乙烯粉尘爆炸风险评价的研究较为笼统,尚未针对聚乙烯生产工艺所存在的聚乙烯粉尘爆炸风险进行系统分析,所提出的安全措施仅体现在管理层面上,缺乏从生产工艺角度出发安全控制技术。建议结合实际生产工艺和粉尘爆炸五要素,在系统分析国内外同类事故发生情况的基础上,运用系统安全分析等方法进一步深入、定量地研究粉尘爆炸风险。

4)当前国内外学者对泄爆、隔爆、抑爆、抗爆等降低聚乙烯粉尘爆炸危害的措施研究较少,且缺乏与工艺实践应用的结合,聚乙烯粉尘爆炸预防控制技术有待进一步明确和深化,因此,应针对不同种类聚乙烯爆炸特征,研究惰化技术,优化现有技术参数。同时,可尝试从本质安全的角度探索聚乙烯粉体的改性技术,在满足工艺和实用性的前提下降低其爆炸敏感性、爆炸强度、摩擦静电效应等。

5)二次爆炸是粉尘爆炸事故的重要特征,而火焰、冲击波为二次爆炸提供了点火源和扬尘动力。以现有研究来看,对实际生产工艺中聚乙烯粉尘爆炸火焰及冲击波传播的研究几乎空白,因此有必要加强对聚乙烯粉尘爆炸灾害衍化动力学规律及其有效控制技术的研究,重点关注爆炸火焰和冲击波传播特性、泄爆效应等方面,总结并建立有针对性的爆炸控制技术及装备。

## 参考文献(References):

- [1] 刘义,赵东风,路帅等. 聚乙烯粉体粒径对静电放电点火的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, 27(6): 625-629.
- [2] 佚名. 辽阳石化分公司 2002-02-23 聚乙烯装置爆炸事故分析[EB/OL]. (2013-06-04) [2017-03-10]. <http://www.aqxx.org/html/2013/06/04/15201658604.shtml>.
- [3] 张寅. PVC 树脂的输送与贮存的防范措施[J]. 聚氯乙烯, 2006(2): 43-44.
- [4] 戚易斌. 韩国丽水产业园区化工厂发生爆炸致 6 死 11 伤[EB/OL]. (2013-03-15) [2017-03-10]. <http://www.chinanews.com/gj/>

- 2013/03-15/4646575.shtml.
- [5] ABBASI M R, SHAMIRI A, HUSSAIN M A. Dynamic modeling and molecular weight distribution of ethylene copolymerization in an industrial gas-phase fluidized-bed reactor[J]. *Advanced Powder Technology*, 2016, 27(4): 1526–1538.
- [6] 王林元, 江兴平, 段蜀波. 高压聚乙烯树脂生产的危险性分析及安全控制措施研究[J]. *塑料工业*, 2012, 40(8): 17–19.
- [7] 冯文萍. 高密度聚乙烯生产火灾爆炸危险性分析及评价[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [8] 陈帅. 聚乙烯生产系统粉尘爆炸危险性因素分析与安全对策措施[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- [9] 王月红, 关雅洁, 马文学. 低密度聚乙烯粉体料仓粉尘燃爆危险因素分析[J]. *科技风*, 2016, 297(15): 97–98.
- [10] 邓哲文. 聚乙烯颗粒料仓爆炸原因及有效预防措施[J]. *甘肃科技*, 2005, 21(3): 119–121.
- [11] 谭凤贵. 近期聚烯烃料仓粉尘爆炸的分析与对策[J]. *石油化工安全环保技术*, 2008, 24(6): 48–50.
- [12] 贾志轩. 聚酯装置火灾和爆炸危险性分析[J]. *合成纤维*, 2016, 45(9): 47–51.
- [13] 中国工程建设标准化协会化工分会. 爆炸危险环境电力装置设计规范: GB 50058—2014. [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [14] TRAORE M, DUFAUD O, PERRIN L, et al. Dust explosions: how should the influence of humidity be taken into account[J]. *Process Safety and Environment Protection*, 2009, 87(1): 14–20.
- [15] 罗宏昌. 粉尘爆炸及“杂混合物”对其特性的影响[J]. *交通部上海船舶运输科学研究所学报*, 2000, 23(1): 21–26.
- [16] 毕明树, 杨国刚. 气体和粉尘爆炸防治工程学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 88–99.
- [17] 靳鑫. 氧浓度对粉尘点燃特性的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [18] 尹同山. 乙烯氛围下的聚乙烯热解动力学研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2014.
- [19] HAN O S, LEE J S. Pyrolysis characteristic and Ignition Energy of high-density polyethylene powder[J]. *Journal of The Korean Institute of Gas*, 2014, 18(3): 31–37.
- [20] 马小明, 周可. 不饱和聚酯树脂扣粉尘静电爆炸敏感性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(3): 149–154.
- [21] IAROSI I, AMYOTTE P R, KHAN F I, et al. Explosibility of polyamide and polyester fibers[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6): 1627–1633.
- [22] BENEDETTO A D, RUSSO P. Thermo-kinetic modelling of dust explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4/5/6): 303–309.
- [23] BENEDETTO A D, RUSSO P, AMYOTTE P, et al. Modelling the effect of particle size on dust explosions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(2): 772–779.
- [24] GAO W, YU J L, MOGI T, et al. Effects of particle thermal characteristics on flame microstructures during dust explosions of three long-chain monobasic alcohols in a half-closed chamber [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 32: 127–134.
- [25] GAO W, DOBASHI R, MOGI T, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(6): 993–999.
- [26] ZHANG X Y, YU J L, YAN X Q, et al. Flame propagation behaviors of nano-and micro-scale PMMA dust explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 101–111.
- [27] GAO W, MOGI T, SUN J H, et al. Effects of particle size distributions on flame propagation mechanism during octadecanol dust explosions[J]. *Powder Technology*, 2013, 249: 168–174.
- [28] 刘静平, 赵金刚, 潘峰, 等. 硬脂酸粉尘爆炸过程中火焰传播试验及数值模拟[J]. *爆破器材*, 2016, 45(5): 11–16.
- [29] ADDAI E K, GABEL D, KAMAL M, et al. Minimum ignition energy of hybrid mixtures of combustible dusts and gases[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 102: 503–512.
- [30] NIFUKUA M, TSUJITAB H, FUJINO K, et al. A study on the ignition characteristics for dust explosion of industrial wastes [J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(6-10): 455–462.
- [31] 刘义, 赵东风, 路帅, 等. 可燃性气体对 PE 粉体静电放电点火的影响[J]. *合成树脂及塑料*, 2008, 25(1): 20–26.
- [32] 吕岳, 王信群, 徐海顺, 等. 甲烷含量对塑料粉尘空气混合物爆炸特性的影响[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(5): 35–40.
- [33] 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.
- [34] ADDAI E K, GABEL D, KRAUSE U. Experimental investigation on the minimum ignition temperature of hybrid mixtures of dusts and gases or solvents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301, 314–326.
- [35] ADDAI E K, GABEL D, KRAUSE U. Experimental investigations of the minimum ignition energy and the minimum ignition temperature of inert and combustible dust cloud mixtures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 307: 302–311.
- [36] AMYOTTE P R, PEGG M J, KHAN F I, et al. Moderation of dust explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4/5/6): 675–687.
- [37] CHOI K, CHOI K, NISHIMURA K. Experimental study on the influence of the nitrogen concentration in the air on the minimum ignition energies of combustible powders due to electrostatic discharges[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 34: 163–166.
- [38] 孙中心, 张毅, 赵旭, 等. 一种氮气循环超高分子量聚乙烯蒸汽管回转干燥方法: 中国, 1515393[P]. 2004–07–28.
- [39] TAN F, SONG W, GONG H. Research on the static electricity of petrochemical powder pneumatic conveying and prevention of dust electrostatic explosion [C]// *Journal of Physics: Conference Series* 418. Dalian University of Technology, Dalian, 2013, 418: 1–9.
- [40] 黄健聪. 关于塑料粉尘料仓爆破片设计的探讨[J]. *广东化工*, 2016, 43(13): 233–234.