

文章编号: 1004-5929(2025)02-0159-13

同步辐射小角 X 射线散射方法研究粉尘爆炸的挑战与潜力

武海娟^{1, 2}, 刘家豪^{1, 3}, 吉校兰^{1, 4}, 李志宏^{1*}

- 中国科学院高能物理研究所, 北京同步辐射装置, 北京, 100049;
- 中国科学院大学, 核科学与技术学院, 北京, 100049;
- 北京化工大学, 化工资源有效利用全国重点实验室, 北京, 100029;
- 太原科技大学, 化学工程与技术学院, 山西太原, 030024)

摘要: 粉尘爆炸是一种高危工业事故, 其微观结构变化在爆炸过程中起着重要作用。然而, 传统实验方法难以捕捉爆炸过程中的动态变化, 导致对粉尘爆炸机制的理解存在局限性。本文探讨了同步辐射小角 X 射线散射(SAXS)方法在粉尘爆炸研究中的应用优势, 利用高时间分辨率(毫秒至纳秒)和纳米尺度的结构探测能力, 实时解析粉尘爆炸过程中的微观结构变化; 介绍了该方法研究粉尘爆炸的挑战和攻关进展; 展望了该方法在风险评估、防爆抑爆中的潜在应用价值。

关键词: 粉尘爆炸; 同步辐射; 小角 X 射线散射(SAXS); 微观结构; 孔隙结构; 时间分辨; 爆炸机制

中图分类号: O434 **文献标志码:** A **doi:** 10. 13883/j. issn1004-5929. 202502002

Synchrotron radiation small-angle x-ray scattering method: challenges and potential in dust explosion research

WU Haijuan^{1, 2}, LIU Jiahao^{1, 3}, JI Xiaolan^{1, 4}, LI Zhihong^{1*}

(1. *Beijing Synchrotron Radiation Facility, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;*

2. *College of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*

4. *College of Chemical Engineering and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

Abstract: Dust explosion is a high-risk industrial accident, where microstructural changes play a critical role during the explosion process. However, conventional experimental methods struggle to capture the dynamic changes during explosions, which leads to limitations in understanding the mechanisms of dust explosions. This paper explores the advantages of applying synchrotron radiation small-angle X-ray scattering (SAXS) in dust explosion research. By leveraging its high temporal resolution (millisecond to nanosecond) and nanoscale structural probing capabilities, SAXS can provide real-time analysis of microstructural changes during dust explosions. The challenges and recent breakthroughs in using this method for dust explosion research are discussed. Furthermore, the potential applications of this

收稿日期: (2025-03-25), 修改日期: (2025-04-26)

基金项目: 爆炸科学与安全防护国家重点实验室(北京理工大学)开放课题(KFJJ24-14M)、国家自然科学基金(U1910206)、IHEP 创新计划(E35457U210)、煤炭转化国家重点实验室基金(J23-24-612)

作者简介: 武海娟(1997-), 女, 博士研究生在读; 研究方向: 同步辐射 SAXS 时间分辨方法在粉尘爆炸研究中的应用; E-mail: wu-haijuan@ihep.ac.cn

通讯作者: 李志宏(1967-), 男, 研究员, 研究方向: 主要从事小角 X 射线散射及其应用。E-mail: lzh@ihep.ac.cn

method in risk assessment and explosion prevention are also envisioned.

Keywords: Dust explosion; Synchrotron radiation; Small-angle x-ray scattering; Microstructure; Pore structure; Time resolution; Explosion mechanism

1 引言

粉尘爆炸作为一种严重的工业灾害^[1, 2],其研究的难度和复杂性源于多种因素,尤其是粉尘的微观结构变化与爆炸强度之间的关系。传统的粉尘爆炸研究多依赖于静态或较慢的表征技术,如扫描电子显微镜(SEM)^[3]、透射电子显微镜(TEM)^[4]、比表面积分析(BET)^[5]、热重(TG/DTG)等^[6],这些方法通常只能提供爆炸前后的粉尘形态变化、比表面积数据和较慢的热力学数据,难以有效捕捉爆炸过程中的动态微观结构变化。粉尘爆炸是一个极为快速且复杂的物理化学过程,粉尘颗粒在爆炸过程中经历的粒子扩散、分解、聚集、解离、孔隙尺寸分布、比表面、分形维数等变化,直接影响其燃烧行为和爆炸强度。因此亟需一种能够提供高时间分辨率和空间分辨率的技术手段来揭示爆炸过程中的微观特征和机制。

为了研究材料结构快速变化过程,近年来同步辐射小角 X 射线散射(SAXS)技术逐渐成为理想的研究工具^[7-9]。SAXS是一种基于 X 射线与物质相互作用的物理表征方法,可以在纳米尺度上实时观察样品的结构(初级粒子或孔隙的尺寸分布、比表面积、分形维数、孔隙率等)变化^[10, 11]。同步辐射作为 SAXS 的光源,提供了更高的时间和空间分辨率^[12-14]。同步辐射 SAXS 在材料结构变化的原位研究中得到了广泛应用^[15-17],也已应用于炸药爆炸的快速过程研究中^[18-21]。但其在粉尘

爆炸研究中的应用仍处于起步阶段^[22-24],存在着设备需求、实验方法及数据处理等多种挑战。

本文简要综述同步辐射 SAXS 技术在粉尘爆炸研究中的挑战与潜力。接下来将回顾现有的粉尘爆炸研究方法和技术,分析它们的局限性;阐述同步辐射 SAXS 方法的优势,尤其是在高时间分辨率、非破坏性分析以及极端环境下的应用优势;针对该方法在粉尘爆炸研究中面临的相关挑战进行攻关的进展;最后展望该方法的发展方向和在防爆抑爆中的潜在应用。

2 粉尘爆炸的危害

粉尘爆炸是指可燃性粉尘在空气中达到一定浓度后,与氧气混合形成粉尘云,在遇到点火源时迅速发生氧化反应(闪燃),释放可燃气体并引发连锁反应,产生高温高压,最终导致爆炸的现象(图 1)^[25]。粉尘粒径通常在数百纳米至数百微米之间^[26]。其中,粒径越小,悬浮性越好,爆炸风险越大。粉尘爆炸的危害包括高温高压和冲击波破坏设备、引发火灾、释放有毒有害气体、造成人员伤亡、污染环境以及造成经济损失。爆炸的强度与粉尘的化学性质、粉尘粒径及分布、粉尘浓度、孔隙结构、粉尘的水分含量、氧气浓度、环境温度和湿度、点火能量、湍流和气流状态、容器或空间的几何形状、静电和电荷积累等诸多因素密切相关^[27]。

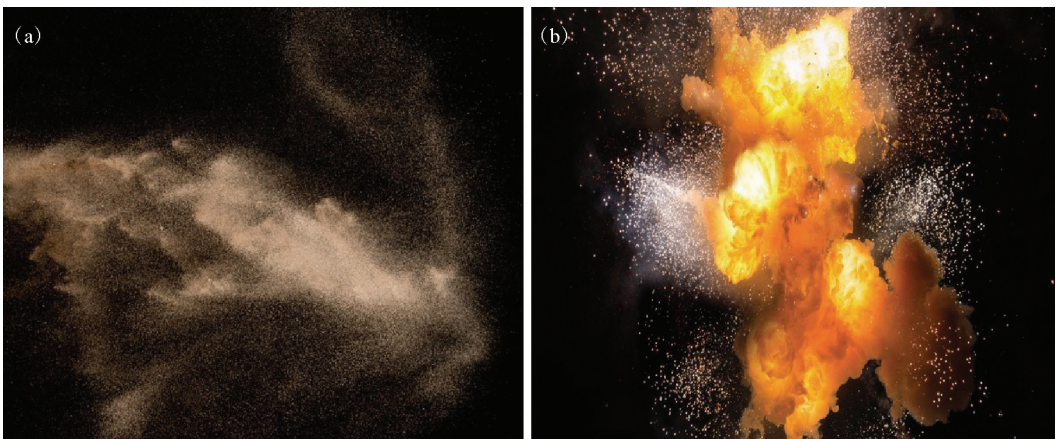


图 1 粉尘爆炸示意图^[25] (a)粉尘云;(b)燃烧爆炸。

Fig. 1 Schematic diagram of dust explosion^[25] (a) Dust cloud; (b) Combustion and explosion.

粉尘爆炸的危害严重^[28],尤其在煤炭、化工及粮食加工等行业中,粉尘爆炸的风险尤为显著。2000-2023年我国大陆生产型单位发生的互联网公开报道的26起煤炭粉尘爆炸事故中,共造成1120人死亡、301人受伤。其中,我国在2005年一年内就发生了三起粉尘爆炸事故,伤亡最严重的一起导致214人死亡(辽宁阜新孙家湾煤矿,瓦斯-煤尘爆炸)。这些事故暴露了粉尘爆炸防控技术的不足,迫切需要创新突破。

3 粉尘爆炸研究的局限

3.1 微观结构变化对粉尘爆炸的重要性

粉尘爆炸的强度、传播速度以及反应速率与粉尘颗粒的微观结构密切相关^[29-31]。粉尘微观结构的变化,特别是颗粒的粒径、孔隙率、比表面积和表面特性,对爆炸烈度起着至关重要的作用^[32]。研究表明,粉尘颗粒的粒径较小、表面粗糙度较大或比表面积较大时,粉尘的反应性会显著增强,从而提升爆炸强度^[33-36]。这些微观特性使得粉尘颗粒能够在短时间内与氧气充分接触,迅速启动燃烧反应。特别是孔隙结构的变化,不仅影响颗粒间的热传递效率,还会改变颗粒在燃烧过程中的反应速率。例如,当孔隙膨胀时,颗粒表面积增加,燃烧反应速率加快,从而增强爆炸。

尽管上述微观结构对爆炸烈度的影响已经得到一些研究,但现有的传统研究方法往往难以实时捕捉微观结构变化与爆炸烈度之间的精确关系。因此,发展能够实时监测粉尘微观结构演变的技术手段,对于深入理解粉尘爆炸机理、优化防爆措施和提高安全性具有重要意义。

3.2 粉尘爆炸的空间和时间分辨率需求

如前所述,粉尘粒径通常在数百纳米至数百微米之间^[27],进入了“宏观”研究范围。因为宏观是由微观决定的,大的粒子团聚体可能是由小的粒子聚集吸附、粘连而成的二次或更多次粒子,而初级一次粒子往往处于纳米尺度。粒子越小,比表面越大,表面自由焓越高,与空气的接触面积越大,爆炸危险性越高^[37]。粉尘在纳米尺度上的扩散、聚集、解聚是宏观爆炸过程的微观基础,无疑是粉尘爆炸的关键科学问题之一。因此,纳米级的空间分辨能力是研究初级一次粒子/孔隙“微观”结构变化的基本需求。在原子/分子尺度上的空间分辨能力则是研究化学反应的更“微观”的需求。

同时,粉尘爆炸从点火到最大压力的时间通常只有数十至数百毫秒。不同的粉尘在不同的实验条件下,结构变化的速度和持续时间通常是不同的。在探测器数据存储能力有限的条件下,时间分辨能力越高,每帧图像所覆盖的过程越精细,便于观察快速结构变化,但整体记录时长会减少;反之,时间分辨能力越低,更适合观察过程的整体演变趋势,但瞬时结构变化会因曝光积分效应而被平均,导致细节模糊。因此,可以利用不同的时间分辨率记录不同速度和持续时间的结构变化。比如,对于煤炭粉尘,爆炸持续时间通常在数百毫秒,在毫秒级时间分辨率下,可捕捉煤尘微观结构的整体演化趋势;微秒级条件下可解析粒子聚集、解聚及孔隙塌陷等快速结构演化过程;而纳秒级时间分辨率则有望揭示瞬态重组与超快反应行为的细节。

目前,粉尘爆炸研究中所采用的技术难以满足微观结构的动态变化研究需求,急需发展新的微观快速研究手段。同步辐射小角 X 射线散射(SAXS)技术,具备纳米尺度的空间分辨和毫秒至纳秒甚至皮秒级的时间分辨能力,有望成为粉尘爆炸研究的新型强力手段。

3.3 静态表征技术无法捕捉粉尘爆炸过程中的微观结构动态变化

现有粉尘爆炸研究主要依赖 SEM、TEM、BET、TG/DTG 等离线表征技术。这些技术虽然可分析爆炸前后的粉尘结构变化,但它们大多局限于静态分析或只能捕捉较慢的过程变化。例如,Hong 等人^[36]对比分析了煤尘初次爆炸与二次爆炸的行为差异及残留物微观特性,发现二次爆炸后粉尘的孔隙率增加。Lu 等人^[38]利用 BET 分析 NaHCO₃ 抑爆剂的封堵效应,发现添加 NaHCO₃ 可提高煤尘热分解温度,降低最大爆炸压力和压力上升速率。Huang 等人^[39]利用半封闭垂直管道和同步热分析仪(STA),揭示了超细 Mg(OH)₃ 对玉米淀粉粉尘爆炸的抑制机理,发现纳米级 Mg(OH)₃ 因表面效应和小尺寸效应,吸热和自由基吸附能力优于微米级。然而,这些方法未基于爆炸过程中孔隙塌陷、吸附变化等关键动态机制进行分析,导致仅基于静态假设设计的抑爆剂在动态爆炸过程中的抑爆效率不理想,而同步辐射时间分辨 SAXS 有望成为粉尘爆炸研究的新型强力手段。表 1 示例粉尘爆炸若干表征技术的对比。

表 1 粉尘爆炸若干表征技术的对比

Table 1 Comparison of several characterization techniques for dust explosions

技术	优势	劣势	在粉尘爆炸研究中的应用
SEM(扫描电子显微镜)	高分辨率成像;提供详细的表面形貌信息	仅能分析静态样本,无法捕捉爆炸过程中的动态变化	用于分析爆炸前后颗粒形态的变化
TEM(透射电子显微镜)	高空间分辨率;可分析颗粒的内部结构和缺陷	需要复杂的样本准备;静态图像,无法观察动态过程	用于分析爆炸前后颗粒的内部结构
BET(比表面积分析法)	可测量比表面积和孔隙率	过程较慢;不能测量动态结构变化;仅适用于小样本的静态分析	用于分析爆炸前后粉尘颗粒的比表面积变化
TG/DTG(热重/热重差分析法)	可测量样本随温度变化的质量损失或增益;提供热稳定性和成分信息	无法捕捉爆炸过程中实时的热解信息	用于分析粉尘在爆炸过程中材料分解和热行为的变化
SAXS(同步辐射小角 X 射线散射)	高时间分辨率(毫秒至纳秒级);纳米尺度的结构探测能力;非破坏性分析;能在极端环境下提供高空间和时间分辨率数据	需要同步辐射源(设备有限);设备昂贵,操作成本高	实时观察粉尘爆炸过程中微观结构的变化,如孔隙结构变化等

3.4 宏观实验方法难以揭示微观结构变化对爆炸特性的影响

传统宏观爆炸特性研究依赖哈特曼管^[40-42]、20 升爆炸球罐^[43-45]、1 立方米爆炸容器^[46, 47]等,以及一些研究者自制装置^[48-50]。使用这些装置可测量最大爆炸压力、火焰速度等宏观爆炸特征参数。Hosseinzadeh 等人^[42]通过哈特曼管测定了六种具有不同粒径和特性粉尘的最小点火能(MIE),开发出一个理论模型来预测粉尘的最小点火能(MIE)。Krietsch 等人^[44]利用利用 20 升球形装置研究总结了纳米粉尘(铝、铁、锌、钛和铜)的燃烧和爆炸行为。Medina 等人^[46]使用 ISO 标准 1 立方米爆炸容器,测试不同初始比表面积和孔隙率的煤尘和生物质粉尘的爆炸强度,揭示粉尘爆炸的基本特性,王成等人^[50]使用瓦斯爆炸实验管研究了管内不同障碍物对瓦斯爆炸超压的影响。然而,这些实验无法直接观测孔隙膨胀和塌陷的微观现象。

粉尘爆炸原位宏观数据采集通常使用高速摄影机^[51, 52]、纹影仪^[53, 54]和红外成像仪^[55]监测火焰传播。Chanut 等人^[51]用高速摄像机(Vision Research Phantom V2512 和 V711)记录火焰发光,观察到铝粉火焰脉动,还用于确定火焰位置并算速度。胡洋等人^[54]搭建“Z”字型高速激光纹影测试系统,测试瓦斯/空气预混气体爆燃流场的变化信息。赵晨阳等人^[54]使用美国 Mikron 公司的 MCS640 红外热像仪,记录 3 kg 固体云爆药剂爆炸时火球温度。以上研究中高速摄影和纹影成像虽然可记录火焰传播和湍流特征,但分辨率不足,难以解析粉尘微观结构的动态变化及其对燃烧行为的具体作用。

3.5 数值模拟简化微观结构,预测误差较大

现有的 CFD-DEM 耦合模型及反应流模型通

常采用均质球体或固定分形维数的简化方式,无法精准描述粉尘微观结构的复杂变化^[56-58]。例如, Ashok Dastidar 基于静态孔隙率的抑爆模型^[59],未考虑爆炸过程中的动态变化情况,因此预测误差较大。现有数值模拟由于缺乏实验数据支撑,这些模型在预测孔隙动态变化及均相燃烧与非均相燃烧转换阶段时,精度受到限制。

4 同步辐射小角 X 射线散射(SAXS)方法的优势

小角 X 射线散射(SAXS)是一种用于研究材料在纳米尺度上的结构变化的物理表征手段^[60]。通过测量 X 射线穿过样品后的散射强度分布, SAXS 能够提供关于样品微观结构的信息,如纳米尺度颗粒和孔隙的形状、大小、分布、孔隙率及比表面积等^[61, 62]。

同步辐射是通过高能电子在磁场中加速产生的高亮度 X 射线光源,具有高通量、高准直性和宽能谱的特点^[63]。与传统表征方法相比,以同步辐射为 X 射线源的 SAXS 在时空分辨率、非破坏性和高温高压等极端环境方面具有显著优势^[64-66],成为研究快速变化过程的理想工具,也是研究粉尘爆炸微观机制的潜在重要手段。

5 同步辐射 SAXS 研究粉尘爆炸的挑战与攻关

长期以来,同步辐射 SAXS 未在粉尘爆炸的研究中得到应用,这是因为面临多种挑战。近期研究在相关关键难题的攻关中取得了初步突破,使得同步辐射 SAXS 在粉尘爆炸研究中的应用得以起步,未来有望进一步发展。

5.1 设备需求:高通量同步辐射源和快速探测器
随着同步辐射光源和探测器技术的发展,同

步辐射光源提供的高强度 X 射线^[67, 68]和快速探测器^[69-71]能够满足粉尘爆炸过程中的高时间分辨率需求。这些设备的结合使得可以在毫秒至纳秒

级别的时间分辨率上捕捉到爆炸过程中的微观结构变化,如图 2 所示系统。

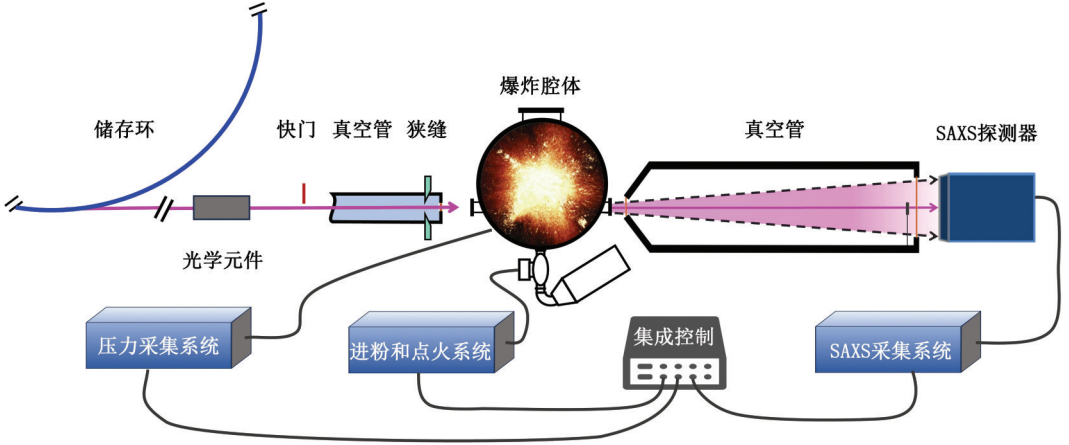


图 2 粉尘爆炸的同步辐射时间分辨 SAXS 实验装置、控制和数据采集系统集成示意图。

Fig. 2 Integrated schematic diagram of the synchrotron radiation time-resolved SAXS experimental setup, control and data acquisition system for dust explosion.

5.2 与同步辐射 SAXS 集成的爆炸罐

为了与 SAXS 技术高效结合,我们于近期初步开发了专门的爆炸罐系统,即图 2 中的爆炸腔体,其详细组件见图 3。系统在类似传统的 20 升 Siwek 球上开两个对称的小窗口,用耐压且透 X 光性能较好的单晶金刚石片密封,并开发爆炸罐与 SAXS 仪器的集成时序控制和数据采集系统。这种集成装置能够同时提供高分辨率的时间分辨数据和爆炸过程中的压力、温度等重要参数。该设备已在北京同步辐射装置(BSRF)成功测试和初步应用,验证了其安全性和可行性。该技术在即将建成的高能光子源(HEPS)上使用,有望获得更高的时间分辨率,得到更粗细的结构变化信息^[22]。

偏差。另外,透射光通常由单厚度吸收体衰减后再测量^[72],存在高次谐波干扰等问题,从而导致系统偏差。

5.3 散射光和透射光同步测量

SAXS 的数据归一化需要同时测量散射光和透射光的强度。然而,传统的透射光与散射光测量由不同的探测系统完成,如图 4 所示,散射信号由 SAXS 探测器收集,而透射信号由光电二极管等收集。这两套测量系统的动态范围不同,也难以做到真正同步。对于曝光时间较长的常规实验来讲,这两套系统可以胜任,但对于高时间分辨率实验,透射光测量系统(如光电二极管等)可能跟不上散射光测量系统的速度,导致透射光数据的缺失,只好假定测量过程透射光强度不变,这样近似的归一化方法会降低信噪比,带来额外的系统

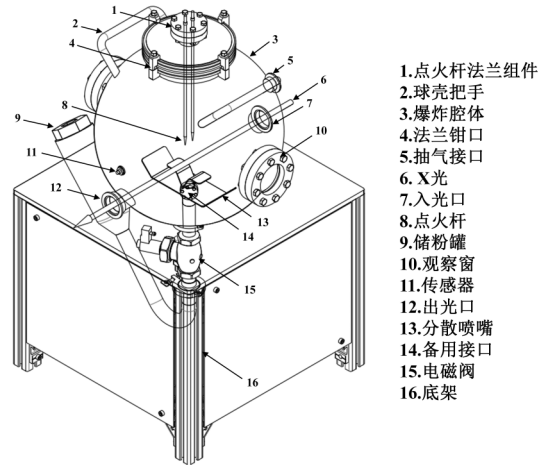


图 3 用于同步辐射时间分辨 SAXS 实验的爆炸装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the explosive device for synchrotron time-resolved SAXS experiments

近期我们创造性地开发了双厚度半透明束流衰减器技术^[23],采用散射信号探测器同时探测梯度衰减后的透射信号,如图 5 所示,解决了透射光与散射光同步测量难题。同时推导出了从梯度衰减的透射信号中分离高次谐波的公式,显著提升了时间分辨 SAXS 数据归一化精度和信噪比,为爆炸过程等长时间分辨率原位监测奠定了技术基础。

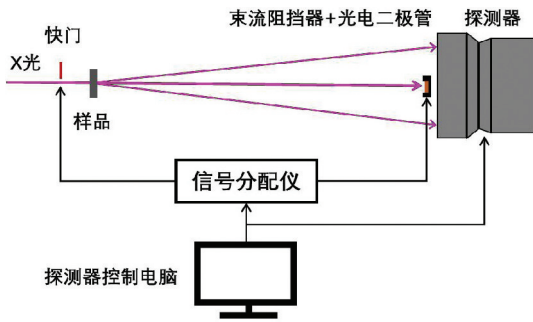


图 4 SAXS 实验中的控制信号流程图

Fig. 4 Flowchart of control signals in SAXS experiments

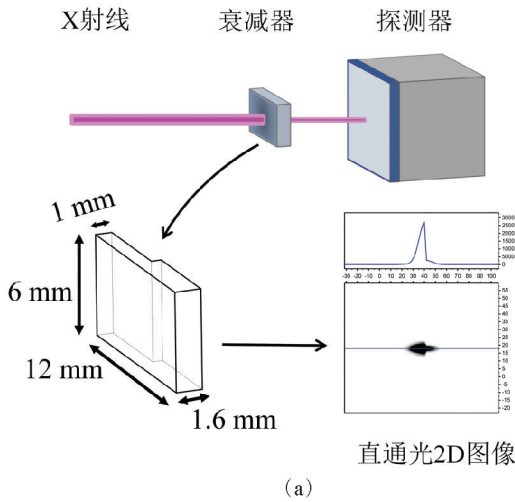


图 5 新型半透明双厚度束流衰减器在 SAXS 中的应用示意图。(a) 双厚度吸收片示意图；(b) 在北京同步辐射装置(BSRF) 1W2B 束线 SAXS 实验站采集的玻璃碳 SAXS 图像。

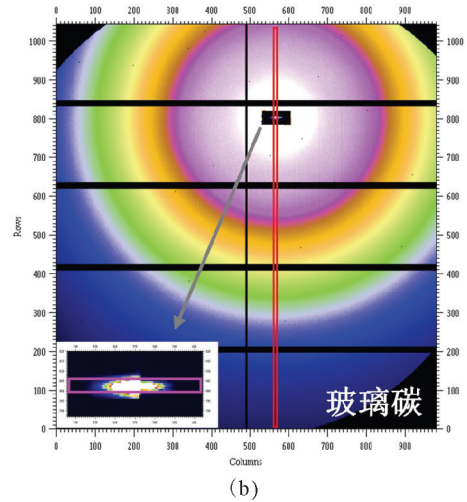
Fig. 5 Schematic diagram of the application of the new semi-transparent double-thickness beam attenuator in SAXS. (a) Schematic diagram of double-thickness absorption sheet. (b) SAXS image of glassy carbon collected at the SAXS experimental station on the 1W2B beamline at the Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF).

5.5 绝对散射强度标定

在 SAXS 中, 计算与样品电子密度差相关的物理量如孔隙率等需要绝对散射强度, 常用标准样品进行标定。鉴于标准样品(如玻璃碳)难以放进爆炸罐里, 我们近期研究提出了一种新的 SAXS 绝对强度标定方法^[73], 突破了传统上要求标准样品与实验样品在相同位置测量的限制。推导了相对强度与绝对强度之间的关系, 并给出了公式。当样品放置在不同位置时(如图 7 所示), 通过测量标准样品在不同位置的相对强度, 并根据推导的公式进行转换, 可以计算出样品的绝对散射强度。通过标定因子和不同位置的相对强度, 研究者能够准确评估样品的绝对散射强度, 公式推导中考虑了样品位置的变化对测量结果的影响, 确保了实验的可靠性。

5.4 样品的模糊散射效应处理

粉尘爆炸研究, 罐体体积较大, 例如 20 升爆炸球内样品分散厚度可达 300 mm 左右。爆炸罐中的粉尘样品属于“厚”而“稀”的样品。在粉尘爆炸过程中, 样品的厚度和颗粒密度的变化会引起模糊散射效应, 即样品的特征散射指纹变得模糊不清, 如图 6 所示。通过蒙特卡罗模拟, 可以消除模糊效应, 确定样品的等效位置和厚度, 实现“厚”而“稀”的样品的精确数据解析^[21]。



5.6 SAXS 技术适用性的局限与边界

尽管同步辐射 SAXS 技术在时间分辨率、空间分辨率和非破坏性表征方面具有显著优势, 但其在粉尘爆炸研究中的应用仍存在若干内在限制和挑战。

首先, 时间分辨能力方面, SAXS 高度依赖于高通量的同步辐射光源与高帧频探测器的协同。随着时间分辨率的提升, 数据量倍增, 探测器的存储和读出能力成为瓶颈。单一探测器难以在高时间分辨条件下实现长时间过程的全时域覆盖, 亟需发展高帧率与长记录窗口兼具的新型探测技术, 如多通道探测器或缓冲区优化算法。

其次, SAXS 实验对于实验环境与样品状态有较高要求。实验必须实现粉尘均匀分布、稳定点火以及光路精准对准, 同时还要保证腔体密封、窗

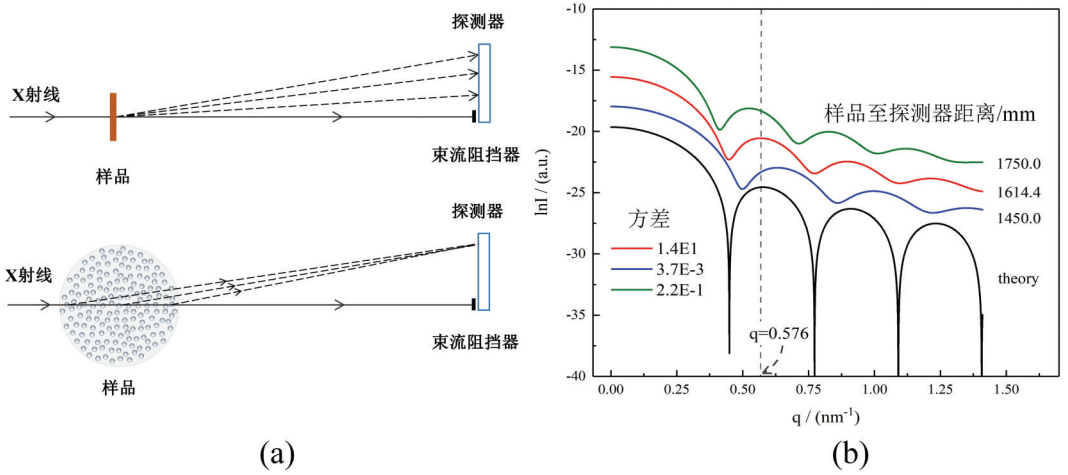


图 6 SAXS 中厚样品的模糊散射效应。(a)常规 SAXS 实验中的理想厚度样品(上)和粉尘爆炸 SAXS 实验中的非理想厚样品(下)示意图;(b)假设入射 X 射线能量为 12 keV,样品为半径 10 nm 的稀疏单分散球形碳粒子体系,穿过爆炸腔体中粉尘样品的光程(即样品厚度)为 300 mm,在设定不同等效样品位置的情况下,样品模拟散射曲线与理论散射曲线的比较。其中黑色垂直虚线表示假定样品为理想薄片时的散射曲线峰值位置^[21]。

Fig. 6 Schematic diagram of the fuzzy scattering effect of medium-thick samples in SAXS. (a) Ideal thickness samples in the conventional SAXS experiment (upper) and non-ideal thickness samples in the dust explosion SAXS experiment (lower); (b) Comparison of the sample simulated scattering curves with the theoretical scattering curve under the conditions of setting different equivalent sample positions, assuming that the incident X-ray energy is 12 keV, the sample is a sparse monodisperse spherical carbon particle system with a radius of 10 nm, and the optical path (i. e., the sample thickness) passing through the dust sample in the explosion chamber is 300 mm. Among them, the black vertical dotted line represents the peak position of the scattering curve when the sample is assumed to be an ideal thin slice^[21].

口材料对 X 射线的高透性及耐压强度,这些条件限制了 SAXS 在实际复杂工况下的推广应用。此外,SAXS 只能提供散射图像和曲线,需要借助模型反演才能获得结构参数,在动态爆炸系统中如何选择合适模型并排除外界干扰仍须进一步研究。

最后,实验重现性与结构解析的可靠性尚需提升。爆炸过程的高度随机性、样品状态的不可控性及瞬态过程的非线性特征,都会影响 SAXS 数据的可重复性与结构拟合的准确性,尤其是在厚样品、低密度粒子体系中,模糊散射与统计误差问题尤为突出。

因此,SAXS 虽为突破粉尘爆炸微观研究瓶颈的有力工具,但其仍需在实验优化、探测系统升级及数据解析算法方面持续迭代,方可实现更广泛、更可靠的实际应用。

6 同步辐射 SAXS 研究粉尘爆炸的潜力

6.1 典型案例分析

基于近期初步构建的粉尘爆炸同步辐射时间分辨 SAXS 研究系统,我们在北京同步辐射装置

(BSRF)1W2B 束线生物大分子实验站对一种无烟煤粉尘爆炸过程中的纳米级孔隙结构动态变化进行了初步分析^[22]。实验样品为来自中国山西省大同市的无烟煤,将其研磨至 500 目以下,干燥后称取 5 克用于爆炸实验。粉尘在爆炸腔中的浓度约为 $250 g/m^3$ 。

实验中,同步辐射光源的电子束能量为 2.5 GeV,电流为 250 mA,X 射线波长为 0.103 nm,样品到探测器的距离为 1230 mm,光束通量约为 10^{11} phs/s。实验通过触发 X 射线快门、SAXS 探测器和喷粉电磁阀,延迟 84 ms 后点燃粉尘,化学点火能量为 5 kJ。SAXS 信号由 EIGER 1M 探测器记录,帧频为 100 Hz,帧间等待时间为 200 μs ,单幅图像的曝光时间为 10 ms,时间分辨率 10 ms。帧频是综合考虑光束通量和数据统计性来设定的。

爆炸过程中压力变化曲线表明,粉尘进入爆炸腔后压力逐渐上升,点火后压力上升速率显著增加,最终达到最大压力 P_{max} 为 0.44 MPa^[22]。通过 SAXS 数据分析,得出了粉尘孔隙在爆炸过程中的尺寸分布变化,发现尺寸主要分布在 100 nm 以内,最可几的尺寸范围为 3~12 nm。爆炸过程

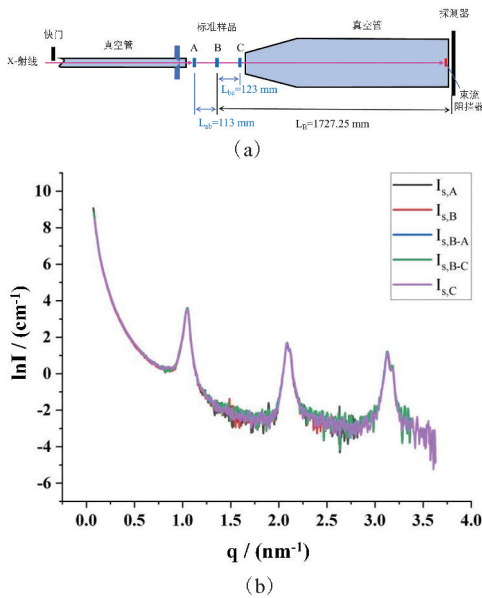


图 7 SAXS 中绝对散射强度的异位标定方法 (a) 标准样品和实验样品异位测量示意图^[73]; (b) 由 (a) 图中 A、B 和 C 处测得的山嵛酸银样品的绝对强度随散射矢量变化的散射曲线 ($I_{s,A}$ 、 $I_{s,B}$ 和 $I_{s,C}$) 和用提出的转换公式由 B 位置散射曲线 $I_{s,B}$ 计算得到的 A 位置的散射曲线 $I_{s,B-A}$ 与 C 位置的散射曲线 $I_{s,B-C}$ 的比较图^[73]。

Fig. 7 Off-site calibration method for absolute scattering intensity in SAXS (a) Schematic diagram of off-site measurements for standard and experimental samples; (b) Comparison of the absolute intensity scattering curves ($I_{s,A}$, $I_{s,B}$, and $I_{s,C}$) of the silver behenate sample measured at positions A, B, and C in panel (a) as a function of the scattering vector, with the scattering curves at position A ($I_{s,B-A}$) and position C ($I_{s,B-C}$) calculated from the scattering curve $I_{s,B}$ at position B using the proposed conversion formula.

中,颗粒的平均尺寸呈现出“N”型变化趋势,反映了粉尘颗粒在爆炸初期的聚集和随后的解聚过程^[22]。

实验结果初步验证了同步辐射 SAXS 技术在粉尘爆炸微观动力学研究中的适用性,并为后续在光子源(HEPS)平台上开展更高时间分辨率实验提供了技术依据。

6.2 扩展研究对象与实验条件

可燃爆的粉尘很多,如:煤粉尘、木材粉尘、面粉、糖粉尘、塑料粉尘、金属粉尘(如铝粉、镁粉、锌粉等)、纺织粉尘、药品和化学品粉尘、粮食粉尘等。未来研究应扩展 SAXS 的应用范围,探索不

同类型粉尘在爆炸过程中的微观结构演变规律。此外,还应在不同实验条件下(如温度、压力、湿度)开展 SAXS 实验,以模拟实际工况,提高研究结果的适用性。

尽管 SAXS 技术依赖于同步辐射装置,尚不具备在实际工业现场部署的条件,但在同步辐射平台上获取的粉尘爆炸微观结构演化数据,仍具有极高的工业应用参考价值。通过对爆炸过程中孔隙塌陷、粒子聚集与解聚等纳米尺度过程的精确刻画,SAXS 实验揭示了粉尘爆炸中燃烧与反应速率的微观调控机制。这些机制信息可反向嵌入工业安全设计的多尺度建模体系中,显著提升粉尘爆炸风险评估与预测的科学性。例如,不同类型粉尘在爆炸初期结构响应的差异性,可用于工业原料筛选与分级管理;微观结构重组与最大爆炸压力之间的函数关系,有助于改进现有的 CFD 和热解动力学模型。此外,SAXS 所揭示的微观响应规律,也为制定高风险工况下的抑爆剂选择和配方优化提供了数据支撑。因此,虽然 SAXS 尚属“平台型技术”,其所产出的爆炸实验数据有望为工业爆炸防控机制设计提供核心参考依据。

6.3 数值模拟与实验深度结合

SAXS 数据可用于开发粉尘爆炸的数值模拟模型,以提高爆炸风险预测的准确性。例如,基于 SAXS 获得的孔隙演变数据,可用于修正计算流体力学(CFD)模拟中的反应动力学参数,从而实现更真实的爆炸模拟。未来研究可以结合实验数据,构建包含化学反应、热解动力学和流体力学相互作用的多尺度模拟框架,并通过实验验证其准确性。

6.4 大量实验数据的在线处理

随着粉尘爆炸实验中数据量的迅速增加,如何实时在线处理大量实验数据成为一个亟待攻克挑战。尤其是在实验过程中,如何高效筛选、分析和储存这些数据,并从中提取有效的物理信息,仍然是一个技术难题。

6.5 智能化分析

SAXS 数据通常包含大量复杂的信息,包括散射曲线、结构参数和时间序列数据。随着数据量的增加,传统的人工分析方法已无法满足实时、高效的需求。开发智能化分析系统,利用机器学习和人工智能对实验数据进行自动化分析,已成为未来研究的一个重要方向。这将极大提高数据处理的效率和精度,并为粉尘爆炸研究提供更深入

的洞察。例如:深度学习(如卷积神经网络 CNN)可用于自动识别 SAXS 图谱中的特征变化,以预测粉尘爆炸的强度。支持向量机(SVM)和随机森林(RF)可用于分类不同类型粉尘的爆炸行为,以制定个性化的防爆策略。强化学习可用于优化粉尘爆炸实验参数,以提高实验效率并减少风险。

6.6 拓展同步辐射 SAXS 时间分辨能力

时间分辨能力越高,要求光束的通量越高且探测系统的速度越快,以便保证散射数据的足够统计性。对于粉尘爆炸研究,已经证明第一代的北京同步辐射光源(BSRF)的 10^{11} phs/s 光通量下可以实现毫秒级的时间分辨能力,即将建成的第四代高能同步辐射光源(HEPS)的 10^{15} phs/s 光通量下则有望实现纳秒级时间分辨能力,从而开辟粉尘爆炸研究的新纪元。

6.7 应用多种技术拓展粉尘爆炸研究的时空分辨能力

随着技术的不断发展,SAXS 与其它在线监测技术的结合在粉尘爆炸研究中具有重要的前景,尤其是在多尺度分析的应用上。不同尺度的技术结合可以为研究人员提供更全面、更深入的多维度数据,从而推动对粉尘爆炸过程机制的全面理解。

同步辐射 X 射线吸收谱与同步辐射红外光谱(FTIR)可以在原子/分子尺度上提供关于粉尘爆炸过程中分子反应、化学键和物质转化的详细信息,为微观化学机制的研究提供重要支持。如前文所述,同步辐射 SAXS 主要用于纳米尺度的结构变化信息。

同步辐射 X 射线成像(XRM)可以在纳米/微米尺度上揭示粉尘颗粒及其在爆炸过程中的细微结构变化,为研究人员提供更高分辨率的成像数据,帮助分析粒子的动态行为。X 射线吸收光谱(XAS),用于分析高温环境下粉尘颗粒的化学成分变化,以探讨金属氧化物粉尘的爆炸风险。

结合这些不同尺度的技术,可以实现对粉尘爆炸过程的全方位监测,为工业安全监控、实时预警等领域的应用提供更精准的技术支持。随着探测技术和数据分析能力的进一步提升,SAXS 与其它在线监测技术的集成将在粉尘爆炸研究和工业安全领域中发挥越来越重要的作用。

6.8 SAXS 在粉尘爆炸风险评估中的应用

SAXS 技术不仅能揭示粉尘爆炸的微观机理,还可用于制定科学的防爆策略,提高防护措施

精准性与有效性。SAXS 数据可揭示粉尘爆炸时微观结构的关键变化,如孔隙开闭、颗粒膨胀,并预测不同粉尘类型的爆炸风险。例如,散射强度不变量值变化幅度较大的粉尘通常爆炸剧烈,需严格防护;而散射强度不变量值变化较小的粉尘爆炸强度较低。

除了揭示粉尘爆炸的微观机理外,SAXS 技术在工业应用中的实际价值还体现在为风险评估和防爆措施的制定提供科学依据。通过对粉尘颗粒微观结构(如孔隙度、粒子聚集等)的精确量化,SAXS 能够帮助预测不同粉尘类型的爆炸强度,为高风险行业(如煤炭、化工、金属加工等)提供精准的爆炸风险预测,从而制定更科学的防爆和安全保障措施。

6.9 SAXS 在防爆抑爆中的应用

通过时间分辨 SAXS 数据分析,可以评估防爆抑爆添加剂的作用效果,例如它们如何改变粉尘的微观结构,提高热稳定性,降低燃烧速率,并减少可燃性气体的释放。此外,SAXS 还能用于研究抑爆剂在粉尘表面形成的保护层厚度、均匀性及稳定性,从而优化抑爆剂的配方,提高其在不同工况下的适应性。结合 SAXS 技术的动态监测,可指导防爆材料的筛选与改进,使其在工业生产中实现更高效、更精准的粉尘爆炸防护,进一步提升防护措施的科学性和可靠性。

7 结论

同步辐射 SAXS 技术为粉尘爆炸研究架起了从纳米动力学到宏观行为的桥梁,揭示了孔隙塌陷、颗粒解聚等关键微观机制。尽管面临如设备需求、信噪比提升、模糊散射效应校正、绝对强度校准等挑战,通过技术创新与算法优化,其时间分辨率与精度持续提升。未来,随着中国 HEPS 等第四代光源的启用,该技术有望推动防爆策略从“经验性”向“机理化”转型,为工业安全设计提供底层理论支撑。

致谢 本研究得到了爆炸科学与安全防护国家重点实验室(北京理工大学)开放课题(项目编号 KFJJ24-14M)、国家自然科学基金(批准编号 U1910206)、IHEP 创新计划(E35457U210)、煤炭转化国家重点实验室基金(批准号 J23-24-612)的支持。

参考文献

- [1] 张晓蕾,陈刚,徐帅,等.中美粉尘爆炸事故统计和管理体系对比研究[J].安全与环境学报,2023,23

- (8):2769-2779. (Zhang X L, Chen G, Xu S, et al. Comparative study on dust explosion accident statistics and management systems between China and the United States[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(8):2769-2779.)
- [2] 余琴.《中国青年报》近十年来矿难报道研究[J]. 写作, 2006, (17):8-10. (Yu Q. A study on mining disaster reports in China Youth Daily over the past decade[J]. *Writing*, 2006, (17):8-10.)
- [3] Chen X F, Zhang H M, Chen X, et al. Effect of dust explosion suppression by sodium bicarbonate with different granulometric distribution[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49(Part B):905-911.
- [4] Nie B S, Peng C, Wang K D, et al. Structure and Formation Mechanism of Methane Explosion Soot[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(49):31716-31723.
- [5] Hong S M, Jiang E, Dysart A D, et al. CO₂ Capture in the Sustainable Wheat-Derived Activated Microporous Carbon Compartments[J]. *Scientific reports*, 2016, 6(1):34590.
- [6] Zhao J P, Tang G F, Wang Y C, et al. Explosive property and combustion kinetics of grain dust with different particle sizes[J]. *Heliyon*, 2020, 6(3):e03457.
- [7] Park J, Kim H I, Jeong H, et al. Quaternary structures of Vac8 differentially regulate the Cvt and PMN pathways[J]. *Autophagy*, 2020, 16(6):991-1006.
- [8] Zhang S, Shi W X, Wang X. Locking volatile organic molecules by subnanometer inorganic nanowire-based organogels[J]. *Science*, 2022, 377:100-104.
- [9] Liu X X, Chen D Y, Li J L, et al. Atomic-Level Matching Metal-Ion Organic Hybrid Interface to Enhance Energy Storage of Polymer-Based Composite Dielectrics[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(28):2402239.
- [10] 裴光文,钟维烈,岳书彬.单晶、多晶和非晶物质的X射线衍射[M].济南:山东大学出版社,1989. (Pei G W, Zhong W L, Yue S B. *X-ray Diffraction of Single Crystal, Polycrystal, and Amorphous Materials*[M]. Jinan: Shandong University Press, 1989.)
- [11] Glatter O, Kratky O. *Small angle X-ray scattering* [M]. New York: Academic press, 1982.
- [12] Osaka K, Matsumoto T, Taniguchi Y, et al. High-throughput and automated SAXS/USAXS experiment for industrial use at BL19B2 in SPring-8[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1741(1):030003.
- [13] 孙喆,李明.第四代同步辐射光源的光束线站及其应用[J].物理,2024,53(2):80-88. (Sun Z, Li M. Beamlines and applications of the fourth-generation synchrotron radiation light source[J]. *Physics*, 2024, 53(2):80-88.)
- [14] 焦毅,白正贺,李晓.第四代同步辐射光源加速器物理与技术[J].物理,2024,53(2):71-79. (Jiao Y, Bai Z H, Li X. Accelerator physics and technology of the fourth-generation synchrotron radiation light source[J]. *Physics*, 2024, 53(2):71-79.)
- [15] Cui B B, Wang M J, Li Z H, et al. A comprehensive investigation on the structural transformation and dissolution loss reaction of coke during gasification in CO₂ atmosphere [J]. *Fuel*, 2024, 363:130927.
- [16] Cui B B, Wang M J, Li Z H, et al. Heating rate effects on the coking properties evolution for varying rank coals: Insights into volatiles reaction and mass transfer[J]. *Fuel*, 2024, 366:131339.
- [17] Cui B B, Wang M J, Zheng M, et al. In-situ study of the heating rate effects on covalent bonds conversion and pore/carbon microcrystal evolutions of coal molecule during coking [J]. *Fuel*, 2024, 364:131091.
- [18] Bagge-Hansen M, Lauderbach L, Hodgkin R, et al. Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of the high explosive hexanitrostilbene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117:245902.
- [19] Rubtsov I A, Ten K A, Prueel E R, et al. Study of the dynamics of nanoparticle sizes in trinitrotoluene detonation using the VEPP-4M synchrotron radiation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 774:012071.
- [20] Rubtsov I A, Ten K A, Prueel E R, et al. Methods to restore the dynamics of carbon condensation during the detonation of high explosives[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1147:012038.
- [21] Wu H J, Chen R C, Li Z H. Optimization of sample thickness for small angle X-ray scattering (SAXS)[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2022, 51(1):84-98.
- [22] Wu H J, Li W M, Sun Y F, et al. Preliminary development of a dust explosion equipment for time-resolved SAXS experiment with synchrotron radia-

- tion[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2024, 549:165265.
- [23] Wu H J, Li Z H. A new dual-thickness semi-transparent beamstop for small-angle X-ray scattering[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2024, 31(5):1197-1208.
- [24] Watkins E B, Velizhanin K A, Dattelbaum D M, et al. Evolution of Carbon Clusters in the Detonation Products of the Triaminotrinitrobenzene (TATB)-Based Explosive PBX 9502 [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(41): 23129-23140.
- [25] 张志远,高健,王锋,等. 生物质粉尘爆炸及安全防范措施[J]. *当代化工研究*, 2023, (1): 21-23. (Zhang Z Y, Gao J, Wang F, et al. Biomass Dust Explosion and Safety Prevention Measures [J]. *Modern Chemical Research*, 2023, (1):21-23.)
- [26] 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. (Bi M S, Yang G G. *Gas and Dust Explosion Prevention Engineering*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.)
- [27] 靳江红,赵明,贾海江,等. 粉尘防爆技术与安全管理实务[M]. 北京:化学工业出版社, 2023. (Jin J H, Zhao M, Jia H J, et al. *Dust Explosion Prevention Technology and Safety Management Practices* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023.)
- [28] 夏勇. 粉尘爆炸事故的危害及灭火救援对策研究[J]. *水上安全*, 2024, (12):121-123. (Xia Y. Hazards of Dust Explosion Accidents and Fire Rescue Strategies[J]. *Water Safety*, 2024, (12):121-123.)
- [29] Castellanos D, Carreto-Vazquez V H, Mashug C V, et al. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust[J]. *Powder Technology*, 2014, 254:331-337.
- [30] Zhang H M, Chen X F, Zhang Y, et al. Effects of particle size on flame structures through corn starch dust explosions[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2017, 50(Part A):7-14.
- [31] Vianna S S V, Cant R S. Modified porosity approach and laminar flamelet modelling for advanced simulation of accidental explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(1):3-14.
- [32] Zhang J S, Xu P H, Sun L H, et al. Factors influencing and a statistical method for describing dust explosion parameters: A review[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 56:386-401.
- [33] Li Q Z, Wang K, Zheng Y Y, et al. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust[J]. *Powder Technology*, 2016, 292:290-297.
- [34] Yuan C M, Amyotte P R, Hossain M N, et al. Minimum ignition temperature of nano and micro Ti powder clouds in the presence of inert nano TiO₂ powder[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 275:1-9.
- [35] Zhang X Y, Yu J L, Gao W, et al. Effects of particle size distributions on PMMA dust flame propagation behaviors[J]. *Powder Technology*, 2017, 317: 197-208.
- [36] Hong S, Liu Z T, Zhao E L, et al. Comparison of behavior and microscopic characteristics of first and secondary explosions of coal dust [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49:382-394.
- [37] Tomaszewski P, Yu S, Borg M, et al. Machine learning-assisted analysis of small angle X-ray scattering[J]. *IEEE. Swedish Workshop on Data Science (SweDS)*, 2021.
- [38] Lu K L, Chen X K, Luo Z M, et al. The inhibiting effects of sodium carbonate on coal dust deflagration based on thermal methods[J]. *Fuel*, 2022, 315: 123122.
- [39] Huang C Y, Chen X F, Yuan B H, et al. Suppression of wood dust explosion by ultrafine magnesium hydroxide [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 378:120723.
- [40] Sepideh H, Maarten V, Frederik N, et al. Flame propagation and flow field measurements in a Hartmann dust explosion tube[J]. *Powder Technology*, 2018, 323:346-356.
- [41] Janes A, Chaineaux J, Carson D, et al. MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: comparison of measured minimum ignition energy (MIE) [J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 152(1):32-39.
- [42] Hosseinzadeh S, Berghmans J, Degreve J, et al. A model for the minimum ignition energy of dust clouds[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 121:43-49.
- [43] Li Q Z, Lin B Q, Li W X, et al. Explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures in 20 L spherical vessels [J]. *Powder Technology*,

- 2011, 212(2):303-309.
- [44] Krietsch A, Scheid M, Schmidt M, et al. Explosion behaviour of metallic nano powders[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36:237-243.
- [45] Manju M. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6):1106-1112.
- [46] Medina C, MacCoitir B, Sattar H, et al. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment[J]. *Fuel*, 2015, 151(1):91-101.
- [47] Proust Ch, Accorsi A, Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 L sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: systematic comparison and analysis of the discrepancies[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4-6):599-606.
- [48] Li L F, Hu Z C, Liang J S, et al. Suitability of electrostatic ignition to determine the explosive characteristics of different types of dust in the 5-L explosion vessel[J]. *Powder Technology*, 2022, 407:117648.
- [49] Huang C, Bloching M, Lipatnikov A N. A vented corn starch dust explosion in an 11.5 m³ vessel: experimental and numerical study[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 75:104707.
- [50] 王成, 回岩, 胡斌斌, 等. 障碍物形状对瓦斯爆炸火焰传播过程的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(7):661-665+676. (Wang C, Hui Y, Hu B B, et al. Effect of Obstacle Shape on Gas Explosion Flame Propagation Process[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(7):661-665+676.)
- [51] Clement C, Frederic H, Pierre L, et al. Visualization of aluminum dust flame propagation in a square-section tube: comparison of schlieren, shadowgraphy and direct visualization techniques[J]. *Journal of Visualization*, 2020, 23(5):885-894.
- [52] Gao W, Mogi T, Yu J L, et al. Flame propagation mechanisms in dust explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36:186-194.
- [53] 蔡卓文. 点火延迟对含尘瓦斯爆炸特性影响实验研究[D]. 安徽理工大学, 2024. (Cai Z W. Experimental study on the effect of ignition delay on the explosion characteristics of dust containing gas[D]. Anhui University of Science and Technology, 2024.)
- [54] 胡洋, 尹尚先, Arntzen J. Bjørn, 等. 矿井瓦斯/空气预混气体爆燃的激光纹影测试系统设计[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5):1045-1051. (Hu Y, Yin S X, Arntzen J B, et al. Design of laser schlieren test system for coal mine gas/air premixed combustion and deflagration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5):1045-1051.)
- [55] 赵晨阳, 冯浩, 黄晓敏, 等. 红外测温技术在爆炸场温度测试中的精度研究[J]. *红外技术*, 2014, 36(8):676-679. (Zhao C Y, Feng H, Huang X M, et al. Research on the Precision of the Infrared Temperature-measuring Technology in Explosion Fields Temperature Test[J]. *Infrared technology*, 2014, 36(8):676-679.)
- [56] Krazinski J L, Buckius R O, Krier H. Coal dust flames: A review and development of a model for flame propagation[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1979, 5(1):31-71.
- [57] Benedetto A D, Russo P, Amyotte P. Modelling the effect of particle size on dust explosions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(2):772-779.
- [58] Khan A U, Salman S, Muhammad K, et al. Modelling coal dust explosibility of khyber Pakhtunkhwa coal using random forest algorithm[J]. *Energies*, 2022, 15(9):3169.
- [59] Dastidar A G, Amyotte P R, Pegg M J. Factors influencing the suppression of coal dust explosions[J]. *Fuel*, 1997, 76(7):663-670.
- [60] Glatter O, Kratky O. *Small angle X-ray scattering*[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [61] 朱育平. 小角 X 射线散射: 理论、测试、计算及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. (Zhu Y P. *Small-Angle X-ray Scattering: Theory, Measurement, Calculation, and Applications*. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.)
- [62] Koch M H, Vachette P, Svergun D I. Small-angle scattering: a view on the properties, structures and structural changes of biological macromolecules in solution [J]. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 2003, 36(2):147-227.
- [63] Tsakanov V M. *Synchrotron Light Facilities and Applications in Life Sciences*. Paper presented at the Biomarkers of Radiation in the Environment[J].

- Springer Netherlands, 2022.
- [64] Brosey C A, Tainer J A. Evolving SAXS versatility: solution X-ray scattering for macromolecular architecture, functional landscapes, and integrative structural biology[J]. *Journal of Current Opinion in Structural Biology*, 2019, 58:197-213.
- [65] Polizzi S, Spinazzi F. Small Angle X-Ray Scattering (SAXS) with Synchrotron Radiation Sources [J]. *Synchrotron Radiation: Basics, Methods and Applications*, 2015, 337-359.
- [66] Jeffries C M, Ilavsky J, Martel A, et al. Small-angle X-ray and neutron scattering [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, 1(1):70.
- [67] Jiao Y, Xu G, Cui X B, et al. The HEPS project [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(6):1611-1618.
- [68] Li Z H, Jia Q J, Li M. Conceptual design of a simple small angle X-ray scattering (SAXS) beamline [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2021, 49(5):560-570.
- [69] Broennimann Ch, Eikenberry E F, Henrich B, et al. The PILATUS 1M detector [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2006, 13:120-130.
- [70] Kishimoto S, Mitsui T, Haruki R, et al. 64-and 128-pixel Si-APD linear array X-ray detectors with 0.5 ns time resolution [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2054(1):060068.
- [71] Pauwels K, Douissard P A. Indirect X-ray detectors with single-photon sensitivity [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2022, 29(6):1394-1406.
- [72] Lyngsø J, Pedersen J S. A high-flux automated laboratory small-angle X-ray scattering instrument optimized for solution scattering [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2021, 54:295-305.
- [73] Fan Y Q, Chen R C, Shang X X, et al. Absolute intensity calibration of samples at variable sample to detector distances in small angle X-ray scattering (SAXS) [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2024, 52(6):702-710.