

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

氢气爆炸诱导沉积氢化镁粉尘参与二次爆炸特性及机理研究

刁守通^{1,2}, 李海涛^{1,2}, 余明高^{1,2}, 王佳辰^{1,2}, 姚艺豪^{1,2}, 胡格格^{1,2}, 魏成才^{1,2}(¹ 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400030; ² 重庆大学国家储能技术产教融合创新平台, 重庆 400030)

摘要: 为揭示氢气初次爆炸诱导沉积氢化镁粉尘卷扬及二次爆炸的演化规律, 依托水平可视化受限管道实验平台, 研究了不同氢气体积分数及障碍物条件下氢气/沉积氢化镁两相体系的爆炸压力、火焰传播、粉尘卷扬和流场结构特征。结果表明: 随氢气体积分数增加, 体系最大爆炸压力、最大压升速率及粉尘卷扬高度显著提高, 压力峰值出现时间明显提前。其中, 无障碍物条件下 $\lambda = 0.30$ 时最大爆炸压力达到 603 kPa, 粉尘峰值卷扬高度达到 71 mm。沉积氢化镁粉尘卷扬经历初始抬升和强化卷吸两个阶段, 传播火焰进入悬浮粉尘区后可诱发二次爆炸。障碍物通过增强剪切、回流和尾迹旋涡作用, 进一步促进粉尘再悬浮、火焰加速和局部强化燃烧, 显著提高体系危险性。研究结果可为镁基固态储氢材料储运过程的风险评估与安全防护提供依据。

关键词: 氢气爆炸; 氢化镁; 沉积粉尘; 安全; 二次爆炸

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-16

Study on the characteristics and mechanisms of secondary explosions involving deposited magnesium hydride dust induced by hydrogen explosions

DIAO Shoutong^{1,2}, LI Haitao^{1,2}, YU Minggao^{1,2}, WANG Jiachen^{1,2}, YAO Yihao^{1,2}, HU Gege^{1,2}, WEI Chengcai^{1,2}(¹ School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; ² National Innovation Center for Industry—Education Integration of Energy Storage Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To clarify the evolution of dust entrainment and secondary explosions induced by an initial hydrogen explosion, a horizontal visualized confined duct was established to investigate the pressure response, flame propagation, and entrainment behavior of a hydrogen/deposited MgH_2 two-phase system under different hydrogen volume fractions and obstacle conditions. The results show that as the volume fraction of hydrogen increases, the maximum explosion pressure, the maximum pressure rise rate and the dust lofting height of the system increase significantly, and the time when the pressure peak appears is obviously advanced. Among them, under the condition without obstacles, when $\lambda = 0.30$, the maximum explosion pressure reaches 603 kPa, and the peak height of dust lofting reaches 71 mm. The entrainment of deposited MgH_2 dust was not instantaneous, but developed through two successive stages, namely initial lifting near the wall and subsequent intensified entrainment accompanied by interfacial instability and gas-solid mixing. After the propagating hydrogen flame entered the suspended dust

收稿日期: 2026-04-20 修回日期: 2026-05-18

通信作者: 李海涛 (1988—), 男, 博士, 副教授, li.haitao@cqu.edu.cn

第一作者: 刁守通 (1997—), 男, 博士研究生, diaoshoutong@163.com

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTB2024NSCQ-MSX0512); 国家重点研发计划项目 (2024YFC3016500, 2024YFC3016503); 国家自然科学基金项目 (52104181, 52174164)

引用本文: 刁守通, 李海涛, 余明高, 王佳辰, 姚艺豪, 胡格格, 魏成才. 氢气爆炸诱导沉积氢化镁粉尘参与二次爆炸特性及机理研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–16

Citation: DIAO Shoutong, LI Haitao, YU Minggao, WANG Jiachen, YAO Yihao, HU Gege, WEI Chengcai. Study on the characteristics and mechanisms of secondary explosions involving deposited magnesium hydride dust induced by hydrogen explosions[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–16

region, the entrained MgH_2 dust cloud was ignited, resulting in a gas-particle secondary explosion. Under obstacle conditions, the local flow field was strongly altered by blockage, shear-layer development, separation flow, and wake recirculation, which promoted dust resuspension, intensified flame distortion and local combustion, and consequently increased the explosion severity. These findings indicate that the hazard evolution of the hydrogen/deposited MgH_2 system is essentially a chain-coupled process involving primary gas-phase explosion, deposited dust entrainment, unsteady gas-solid mixing, and secondary ignition. The study provides experimental support for risk assessment and safety protection in the storage, transportation, and application of magnesium-based solid-state hydrogen storage materials.

Keywords: hydrogen explosion; magnesium hydride; settled dust; safety; secondary explosions

引 言

近年来,在双碳目标推动和能源结构转型需求不断增强的背景下,氢能因来源广泛、清洁高效和应用场景丰富,被认为是未来能源体系的重要组成部分^[1-6]。与此同时,氢气也存在密度低、储运效率受限、易泄漏、点火能低和爆炸极限范围宽等特点,尤其在储存、运输及装卸过程中面临较为突出的安全风险^[7,8]。为提高储氢密度并改善储运条件,固态储氢因具有体积储氢密度高、储存压力相对较低和安全性较好等优势,近年来受到广泛关注^[9-11]。在众多固态储氢材料中,氢化镁(MgH_2)因储氢容量高、资源丰富、成本较低且可逆储放氢性能较好,被认为是最具应用潜力的镁基储氢材料之一^[12-16]。然而, MgH_2 在非理想环境下仍具有显著的反应活性和潜在燃爆危险。一方面,在潮湿环境中, MgH_2 易与水汽发生反应并释放氢气。另一方面,在高温条件下, MgH_2 又容易发生脱氢分解,生成氢气和高活性固相颗粒。因此,在储运或事故扰动过程中, MgH_2 可能由单一储氢介质转变为含氢可燃气体与活性颗粒共存的气-固两相混合体系。该类体系不仅兼具氢气燃烧爆炸和粉尘燃爆的双重危险特征,而且在外部扰动、障碍物作用或初次爆炸诱导下,还可能发生沉积粉尘卷扬并进一步触发更为复杂的二次爆炸过程。

近年来,针对 MgH_2 粉尘本征燃爆行为的实验研究开始明显增多。Tsai等人^[17]通过比较预混 Mg/H_2 混合物与合成 MgH_2 粉尘云,研究了 MgH_2 基储氢材料的粉尘云爆炸特性与机理,结果表明,微量 H_2 即可显著提高 Mg 粉尘爆炸烈度,而合成 MgH_2 粉尘的爆炸强度明显高于预混 Mg/H_2 体系和单独 Mg 粉,说明 MgH_2 的爆炸风险与其储氢量和脱氢温度密切相关。Wu等人^[18]对 MgH_2 、 TiH_2 和 ZrH_2 三种典型金属

氢化物的点火敏感性和爆炸烈度进行了比较,结果表明, MgH_2 的最小点火能更低、爆炸压力及压力上升速率更高,其整体危险性强于 TiH_2 和 ZrH_2 。Zhang等人^[19]利用高速摄影和双色测温技术研究了不同粒径 MgH_2 粉尘云的自由传播火焰特性,结果表明,较小粒径 MgH_2 粉尘具有更快的火焰传播速度、更强的振荡强度以及更均匀的温度分布。同时,脱氢释放的 H_2 会强化颗粒点火与燃烧,使 MgH_2 粉尘的爆炸威力明显高于纯镁粉。Mao等人^[20]研究了半封闭空间内 MgH_2 粉尘爆炸火焰传播特性,结果表明,随着粉尘浓度增加,火焰由点火发展至稳定传播所需时间、预热区宽度、火焰亮度及传播速度均呈现先增大后减小的变化规律,并在约 800 g/m^3 附近表现出较优燃烧状态。此外, MgH_2 粉尘爆炸反应以 MgH_2 燃烧为主,同时伴随 MgH_2 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 分解以及 Mg 和 H_2 氧化等多步反应。Wang等人^[21]进一步考察了不同粒径 MgH_2 粉尘的爆炸超压及火焰传播行为,结果表明,随着粒径增大, MgH_2 粉尘的最大爆炸压力、最大压升速率、火焰亮度、结构连续性及传播速度均逐渐降低,说明粒径对其爆炸危险性具有显著影响。此外,Reding和Shiflett^[22]对金属粉尘爆炸危险性进行了综述,结果表明,金属粉尘因燃烧温度高、辐射传热强以及与水异常反应等特征,通常表现出更高的爆炸敏感性和破坏性。Ji等人^[23]研究了氢气/镁粉混合体系的爆炸超压与火焰传播特性,结果表明,当氢气浓度高于10%时,体系爆炸压力和压升速率显著增加,且平均火焰传播速度随氢气浓度升高而持续增大,表明可燃气体与活性金属粉尘之间存在明显的协同促进作用。因此,现有研究主要围绕 MgH_2 粉尘云的本征燃爆特性及其与可燃气体的协同爆炸行为展开,已在火焰传播、爆炸压力及耦合增强效应等方面取得了较多认识。然而,在实际储运和使用过程中, MgH_2 粉尘并非始终以悬浮状态

存在,其更常见的形态是沉积于设备内壁、管道表面或操作环境中,并在外部气流扰动、冲击波作用及障碍物诱导下发生卷扬,进而形成可燃粉尘云并参与后续燃爆过程。由此可见,沉积粉尘是连接初始危险源与二次爆炸演化过程的关键环节。

沉积粉尘卷扬与再悬浮是二次爆炸形成的关键前置过程。总体来看,现有颗粒再悬浮研究普遍认为,沉积颗粒能否从壁面脱离并重新进入气流,本质上取决于气动力、附着力、表面粗糙度、颗粒粒径、湿度以及颗粒间相互作用等多种因素之间的竞争关系^[24-27]。关于沉积粉尘诱发的二次爆炸,Taveau^[28]对二次粉尘爆炸事故及其防控措施进行了综述,指出沉积粉尘在初次爆炸冲击作用下被卷扬形成粉尘云,是造成事故扩大和灾害升级的关键原因之一。已有研究还通过数值模拟和实验分析了煤尘二次爆炸的传播过程,结果表明,初次爆炸所形成的冲击气流能够促使沉积粉尘再次卷扬,并在局部氧气补给、湍流强化和高温火焰作用下诱发更强烈的后续爆炸反应^[29]。Wei等人^[30]研究了甲烷-沉积煤尘-甲烷连续爆炸过程中冲击波强度对二次煤尘卷扬的影响,结果表明,压力波与湍流的协同作用会显著强化煤尘二次卷扬,进而形成高反应活性的气固混合物并触发链式爆炸。Lin等人^[31]研究了甲烷/空气和甲烷/煤尘/空气爆炸后的残余气体可燃性,结果表明,煤尘参与后爆炸产物中仍可能保留更高比例的可燃组分,从而增加后续二次爆炸风险。Cheng等人^[32]在真实巷道尺度下开展了气体/沉积煤尘爆炸实验,结果表明,随着沉积煤尘不断被卷扬并参与反应,爆炸波能量和火焰传播强度会在传播过程中持续增强,二次爆炸对灾害放大的作用十分显著。总体而言,现有研究已从颗粒再悬浮机理、沉积粉尘卷扬行为以及二次爆炸传播特征等方面积累了较多认识。但针对氢气与沉积 MgH_2 粉尘共存条件下的卷扬与二次爆炸问题,尤其是不同氢气体积分数和障碍物存在条件下的耦合作用机制,仍缺乏系统研究。

基于上述研究现状,围绕氢气/沉积 MgH_2 粉尘体系开展卷扬与二次爆炸机理研究具有重要的理论意义与工程价值。对于该类气-固耦合危险体系而言,氢气体积分数直接影响初次爆炸反应活性、火焰传播速度及超压发展过程,而障碍物的存在则会显著改变传播空间内的流场结构和湍流强度,进而影响沉积 MgH_2 粉尘的卷扬行为及二次爆炸的形

成条件。因此,亟需系统揭示不同氢气体积分数及障碍物条件下,初次氢气爆炸对沉积 MgH_2 粉尘卷扬的驱动作用,以及卷扬后形成的氢气/ MgH_2 气固混合体系在点燃、火焰加速和超压演化过程中的耦合增强规律。基于此,本文以氢气体积分数和障碍物存在为主要控制因素,重点研究沉积 MgH_2 粉尘的卷扬形成特征及其二次爆炸响应机制,以期对镁基固态储氢材料相关装置和工艺过程的风险评估与安全防护提供理论依据。

1 实验装置与材料

1.1 实验装置

本研究所采用的实验系统如图1所示。为研究长距离约束空间内氢气初次爆炸诱导沉积 MgH_2 粉尘卷扬及二次爆炸的传播特性,搭建了一套水平可视化燃爆实验平台。该实验平台主要由三段可拼接式矩形管道、点火系统、配气系统、障碍物模块、压力采集系统、高速摄像系统以及同步控制系统组成。与悬浮粉尘实验不同,本研究不设置粉尘分散单元, MgH_2 粉尘以预置沉积层的形式布置于管道内部,用以模拟实际储运或事故场景中粉尘沉积后在爆炸扰动作用下发生卷扬并参与二次燃爆的过程。三节管道在实验时依次通过法兰连接形成完整传播通道,每节管道截面尺寸均为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,长度为 714 mm ,因此系统总物理长度为 2142 mm 。每节管道前后均设置有可视化视窗,单节有效可视化长度为 510 mm ,用于火焰传播过程的直接观测与图像采集,三节管道总有效可视化长度为 1530 mm ,其余连接段为非可视区域。点火系统布置于管道上游起始端附近,点火位置距离左侧端面 110 mm ,用于引燃预先配制好的氢气/空气混合气。点火系统输出点火能量为 0.2 J ,持续时间为 100 ms ,以保证初始点火的稳定性和重复性。

为模拟沉积粉尘在初次爆炸作用下的再悬浮行为并保证初始沉积状态的一致性,每次实验前将 2 g MgH_2 粉尘在第三节管道中部底壁可视区域内均匀铺展为连续薄层,铺设区域与纹影观测区域保持对应。本文选择 2 g 作为固定沉积质量,主要是为了在保证可视化观测清晰度的同时形成可识别的沉积粉尘卷扬和二次燃烧响应。同时,为保证各组实验初始沉积状态的一致性,实验前采用相同称量质量、相同铺设区域和相同铺设方式进行粉尘预置;

铺设完成后尽量减少外界扰动,并立即封闭管道进行抽真空和配气操作。各组实验均按照相同流程完成粉尘铺设、管道封闭、配气和点火,以降低初始沉积状态差异对实验结果的影响。该布置方式使氢气火焰和压力波在到达沉积粉尘区域前具有一定的发展距离,从而有利于研究初次氢气爆炸产生的冲击波、诱导气流及回流结构对沉积 MgH_2 粉尘卷扬的触发作用,以及卷扬后形成的气-固两相混合物对后续二次爆炸的影响。对于障碍物工况,在距离点火位置 1666 mm 处设置单个障碍物,障碍物高度为 60 mm,阻塞比为 0.4,沉积的 2 g MgH_2 粉尘布置于障碍物后方。障碍物的设置可增强局部流场扰动、湍流强度及剪切作用,从而为考察障碍物对火焰加速、沉积粉尘卷扬及二次爆炸强度的影响提供条件。实验过程中,高频动态压力传感器(上海铭控传感技术有限公司,量程 0–4 MPa,精度 $\pm 0.25\%$ F.S.)位于管道末端,以 100 kHz 的采集频率记录燃爆过程中的瞬态压力变化。相关信号经数据采集系统(北京阿尔泰科技发展有限公司,USB2871)记录并传输至上位机,用于后续分析爆炸压力、压力上升速率等关键特征参数。采用一台高速摄像机(千眼狼、NEO25)以 5000 fps 的拍摄速度对火焰传播过程进行记录。此外,为了更清晰地揭示沉积 MgH_2 粉尘区域内冲击波传播、诱导气流演化以及粉尘卷扬初始阶段的流动结构变化,本文在沉积粉尘所在区域布置了纹影可视化子系统。该纹

影系统(扬州市鹭威工业科技发展有限公司、Luftvis-200)由两块抛物面反射镜组成,单块反射镜直径为 200 mm,焦距为 2000 mm,通过构建 Z 型光路实现测试区域内密度梯度变化的可视化观测。纹影观测区域主要覆盖第三节管道中部沉积 MgH_2 粉尘所在位置,用于捕捉初次氢气爆炸冲击波到达后局部流场扰动、剪切层发展以及沉积粉尘起始卷扬的动态过程。

实验所用气体由氢气(重庆仪廷气体销售有限公司,纯度 99.999%)和空气组成,采用道尔顿分压法进行配制。本文采用 λ 表示管道内点火前氢气/空气预混气体中的初始氢气体积分数。无障碍物工况下, λ 分别设置为 0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30;障碍物工况下, λ 分别设置为 0.15、0.20 和 0.25。实验前,首先利用真空泵对管道系统抽真空,以排除残余气体并减小前次实验对当前工况的影响。随后,在完成障碍物安装及沉积 MgH_2 粉尘预置后,按照目标氢气体积分数依次向系统中充入高纯氢气和空气,各组分分压由设定工况确定。待气体混合均匀后实施点火,引发氢气初次爆炸,并进一步考察其对下游沉积 MgH_2 粉尘卷扬及二次爆炸行为的影响。为实现火焰图像与压力信号的同步采集,点火系统、压力采集系统及高速摄像系统均由可编程逻辑控制器(西门子,S7-200 smart)统一进行时序触发。为保证实验结果的可靠性,每组工况重复进行 3 次。

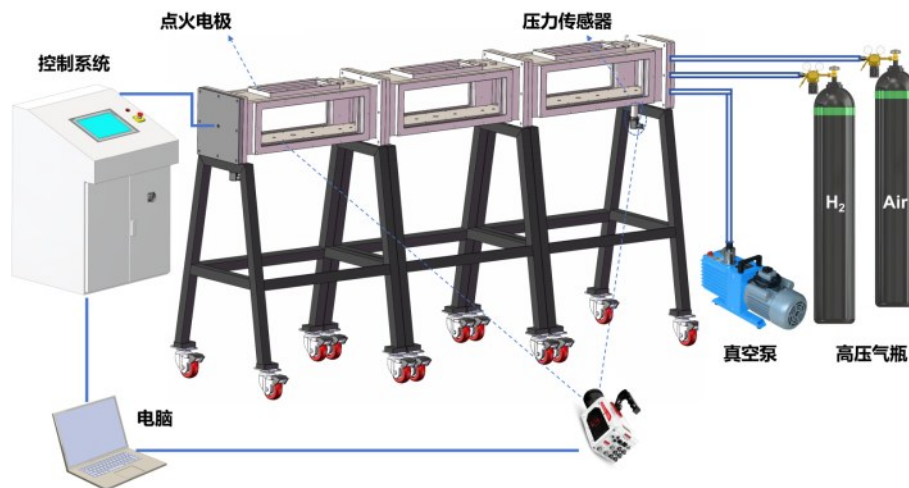


图1 实验装置示意图

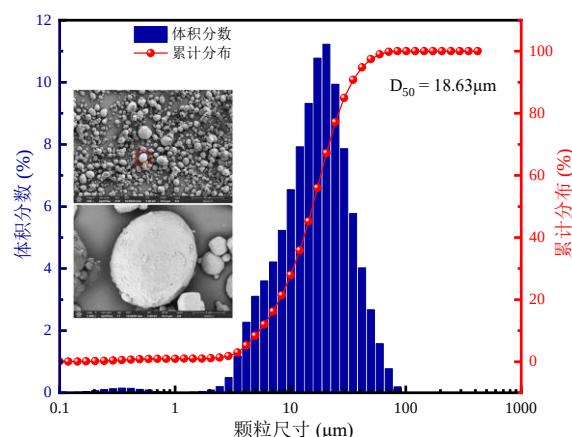
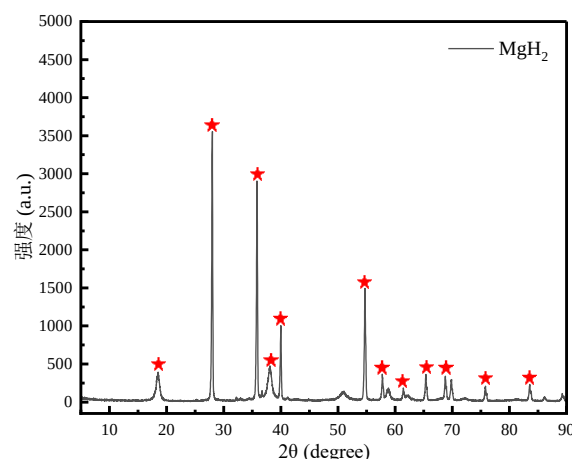
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

1.2 实验材料表征

实验所用 MgH_2 粉尘由辽宁库克生物科技有限公司提供。为明确实验粉体的形貌特征与粒径分

布,对 MgH_2 粉尘进行了扫描电子显微镜(SEM)和激光粒度分析(XRD),结果如图2所示。从SEM图像可以看出,样品颗粒粒径分布较宽,整体以近球形

和椭圆形颗粒为主。高倍图像显示,颗粒表面整体较为致密和平整,但局部仍可观察到少量细微凸起和附着结构。这些表面微观特征可能与加氢过程形成的残余微晶结构有关,也可能与储存和转移过程中发生的轻微表面氧化有关。总体而言,颗粒形貌较为完整,未见明显破碎或严重团聚现象。粒径分布结果表明, MgH_2 粉尘主要集中在约5~50 μm 范围内,呈现单峰分布特征。累积分布曲线显示其中位粒径 D_{50} 为18.63 μm ,即50%的颗粒粒径小于18.63 μm 。与此同时,累积分布曲线在主要粒径区间内上升较快,说明该样品粒径分布相对集中。该结果与SEM观察结果相一致,表明所用 MgH_2 粉尘以微米级颗粒为主,这种粒径特征有利于粉尘在爆炸扰动作用下发生卷扬并形成可燃气体-固两相混合体系。为进一步确定样品的物相组成,采用Cu K α 射线($\lambda = 0.15406 \text{ nm}$)对 MgH_2 粉尘进行了X射线衍射分析,结果如图3所示。图中在 2θ 约为 27.8° 、 35.7° 、 39.1° 、 54.6° 、 58.8° 、 69.2° 、 72.0° 、 75.4° 和 79.4° 处均出现了较为明显的特征衍射峰,这些衍射峰与四方相 MgH_2 标准卡片(JCPDS No. 12-0697)吻合较好,说明样品主要由晶态 MgH_2 组成。其中,位于 27.8° 和 35.7° 附近的衍射峰强度较高,分别对应 MgH_2 的(110)和(101)晶面,表明这两个晶面对衍射图谱贡献较为显著。在仪器检测限内,未见明显金属Mg或 MgO 杂相衍射峰,说明实验所用粉体在测试前具有较高的相纯度。这也表明氩气保护储存及手套箱转移处理在一定程度上有效抑制了 MgH_2 粉末的氧化与水解。考虑到 MgH_2 对空气和水汽较为敏感,实验过程中样品在使用前采用密封保存,并尽量减少称量、转移和铺设过程中与空气接触的时间。实验期间环境相对湿度为40%~50%,各组实验均在相近环境条件下完成,以降低环境湿度差异对实验结果对比的影响。结合XRD结果未见明显Mg或 MgO 杂相可知,本文所用样品在测试前整体仍保持较高物相纯度。综合上述表征结果可知,本研究所采用的 MgH_2 粉尘具有微米级粒径、较规则的颗粒形貌以及较高的物相纯度,可为后续氢气/沉积 MgH_2 粉尘体系卷扬与二次爆炸行为研究提供可靠的材料基础。

图2 MgH_2 粉末的SEM图像和粒径分布Fig. 2 SEM images and particle size distribution of MgH_2 powder图3 MgH_2 粉末的X射线衍射图谱Fig. 3 X-ray diffraction pattern of MgH_2 powder

2 实验结果与讨论

2.1 氢气/沉积 MgH_2 两相体系爆炸压力特性

图4给出了不同氢气体积分数下的氢气/沉积 MgH_2 两相体系爆炸压力特征。该图表明,在无障碍物条件下,氢气/沉积 MgH_2 两相体系的爆炸压力响应对氢气体积分数高度敏感。随着氢气体积分数由 $\lambda = 0.10$ 增至 $\lambda = 0.30$,最大爆炸压力与最大爆炸压力上升速率均显著增加,且压力峰值出现时间明显提前。从图4(a)可见,不同氢气体积分数下的压力曲线可分为两类型响应模式。对于较高氢气体积分数工况,即 $\lambda = 0.25$ 和 $\lambda = 0.30$,压力在点火后极短时间内迅速升高,并在40 ms至60 ms范围内达到主峰,峰值分别为532 kPa和603 kPa。此后曲线进入衰减阶段,但在较长时间内仍维持较高压力水平,同时伴随一定幅度的高频波动。这说明高氢

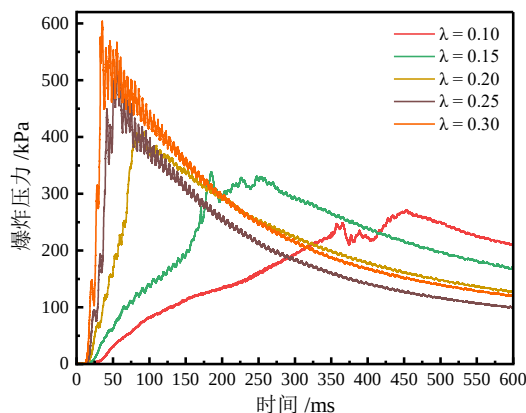
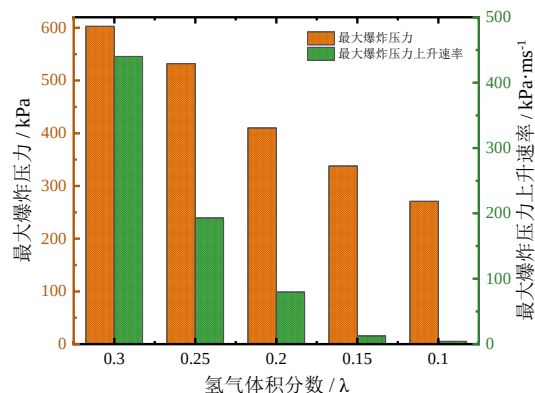
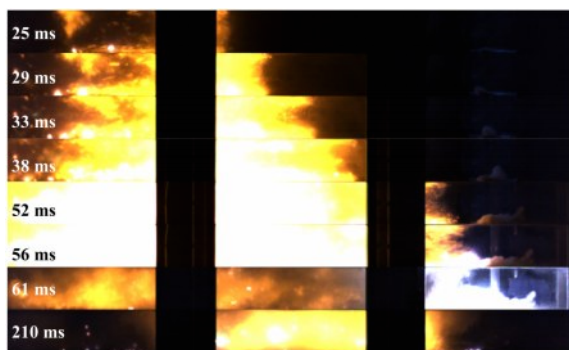
气体积分分数条件下,前期氢气爆炸释能高度集中,形成较强冲击压缩和高速流场,从而快速卷扬并点燃沉积 MgH_2 粉尘,使两相耦合燃烧在较短时间内完成强化发展。相比之下,较低氢气体积分数工况的压力建立过程明显滞后。 $\lambda = 0.10$ 和 $\lambda = 0.15$ 条件下,压力曲线前期上升较缓,主峰分别出现在 450 ms 和 190 ms 附近,对应最大压力为 271 kPa 和 338 kPa。对于 $\lambda = 0.10$ 工况,虽然压力峰值出现时间明显滞后,但该峰值主要仍由气相氢气爆炸过程引起,而非粉尘后期阴燃的单独贡献。由于 10% H_2 条件下气相燃烧强度较低,火焰传播速度和压力增长速率均较小,初次爆炸产生的超压、冲击波强度和后随诱导气流较弱,对沉积 MgH_2 粉尘层的扰动能力有限,导致粉尘卷扬高度、卷扬范围和粉尘云连续性均受到限制。因此,该工况下 MgH_2 粉尘难以形成强烈、快速的二次爆炸过程,对压力峰值的直接强化作用相对较弱。后续氢气火焰仍可能引燃局部被卷扬的 MgH_2 粉尘,使部分颗粒发生氧化燃烧或受热脱氢并参与后续反应。该过程主要表现为后期局部持续燃烧、压力衰减变缓、压力曲线宽化或弱波动增强,而不是形成主导最大压力峰值的强烈二次爆炸。 $\lambda = 0.20$ 工况则处于过渡区间,其最大压力为 410 kPa,峰值时间为 80 ms,表明当前期氢气含量增加到一定程度后,系统已具备较强的初始升压能力,但整体响应仍保留一定的中后期持续放热特征。图 4(b)对这一规律进行了进一步量化,随着氢气体积分数从 $\lambda = 0.10$ 增加到 $\lambda = 0.30$,最大爆炸压力由 271 kPa 增至约 603 kPa,增幅超过一倍。最大爆炸压力上升速率则由 $4.2 \text{ kPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 迅速提高至约 $440.0 \text{ kPa} \cdot \text{ms}^{-1}$,增长更为显著。说明氢气体积分数对压力增长速率的影响比对峰值压力本身更为敏感。从机理上分析,氢气体积分数升高对两相体系爆炸压力特性的强化作用主要体现在三个方面。其一,较高氢气体积分数提高了前期气相爆炸反应速率,使火焰传播更快、释能更集中。其二,更强的初始爆炸会产生更高幅值的冲击波和更强的后随诱导气流,从而显著增强沉积 MgH_2 粉尘的卷扬和抬升能力。其三,卷扬后的粉尘能够更早进入高温反应区并参与燃烧,进一步促进压力快速积聚。因此,图 4 中峰值压力的提高与峰值时间的提前,本质上反映了氢气爆炸与 MgH_2 粉尘二次燃烧之间协同增强作用的不断加强。进一步而言, MgH_2 区别于惰性沉积粉尘和普通金属粉尘的重要特征在于其受

热脱氢行为。在初次氢气爆炸产生的高温火焰、热辐射和冲击压缩共同作用下,卷扬过程中的 MgH_2 颗粒可能发生表面预热和局部脱氢,生成的 H_2 会与管内未反应气体及空气继续混合,并在火焰到达后参与燃烧。因此,压力峰值的升高并不能简单归因于初始氢气浓度增加,而应理解为初次气相爆炸增强、 MgH_2 粉尘再悬浮、颗粒热分解释氢以及粉尘/氢气协同燃烧共同作用的结果。受限于现有实验手段,本文尚不能直接定量区分脱氢释氢对压力峰值的独立贡献,但从高氢气体积分数下压力峰值提前、火焰亮度增强和粉尘卷扬高度提高等现象可以推断,脱氢与燃爆之间存在明显的协同强化效应。

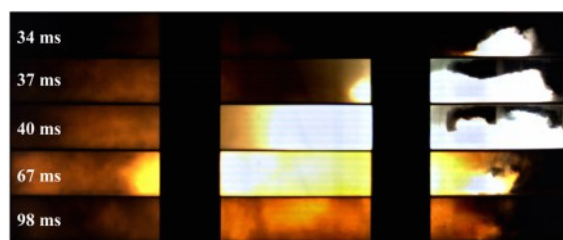
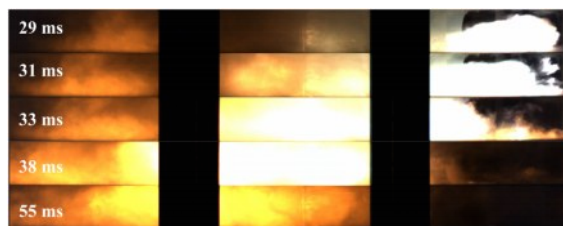
2.2 氢气爆炸冲击波作用下的粉尘卷扬与火焰传播特性

图 5 给出了 20% 氢气条件下氢气/沉积 MgH_2 粉尘两相体系火焰传播形态的时序演变。由图可见,前期氢气爆炸形成的火焰、冲击波及诱导气流沿管道向下游传播,并对最后一节管道中部沉积的 MgH_2 粉尘产生显著扰动作用。25 ms 至 38 ms 期间,氢气火焰在前两段观测区域内快速推进,中部区域火焰前缘在管壁约束、压力波反射及局部回流的影响下出现典型郁金香火焰结构。52 ms 至 56 ms,最后一节管道内可观察到明显的粉尘卷扬抬升现象,表明沉积 MgH_2 粉尘在冲击波和气流波动作用下进入悬浮状态并形成局部粉尘云。61 ms 时,传播而来的氢气火焰与悬浮粉尘云接触后引发气体/粉尘两相燃烧,火焰亮度显著增强。由于 MgH_2 粉尘燃烧发光强烈,实验中使用的高速相机在该时刻开启二次曝光功能,从而获得了更清晰的粉尘火焰边界。210 ms 时,由于 MgH_2 粉尘燃烧具有一定持续性,管内仍存在持续发光区域。总体上,20% 氢气条件下,前期氢气爆炸通过卷扬抬升作用促使沉积 MgH_2 粉尘形成悬浮云团,随后氢气火焰点燃粉尘云并触发二次爆炸,体现出氢气爆炸与沉积粉尘燃烧之间显著的耦合增强作用。

图 6 给出了氢气火焰与沉积 MgH_2 粉尘接触后,在二次曝光条件下获得的火焰形态演变图像。由图可见,在 $\lambda = 0.25$ 和 $\lambda = 0.30$ 两种工况下,沉积粉尘区均首先出现局部强发光火焰核,随后高亮火焰向相邻观测区迅速扩展,并伴随明显的边界卷曲和后期余燃现象,此时氢气火焰已成功引燃卷扬形成的 MgH_2 粉尘云,进而触发气体/粉尘两相二次爆炸。相比于 $\lambda = 0.25$ 工况, $\lambda = 0.30$ 时高亮火焰出现更

(a) 氢气/沉积 MgH_2 两相体系爆炸压力曲线(b) 氢气/沉积 MgH_2 两相体系最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率图4 不同氢气体积分数下的氢气/沉积 MgH_2 两相体系爆炸压力特征Fig. 4 Explosion pressure characteristics of a hydrogen/ MgH_2 two-phase system at different hydrogen volume fraction图5 氢气/沉积 MgH_2 两相体系火焰传播形态演变Fig. 5 Evolution of flame propagation patterns in a two-phase system of hydrogen and deposited MgH_2

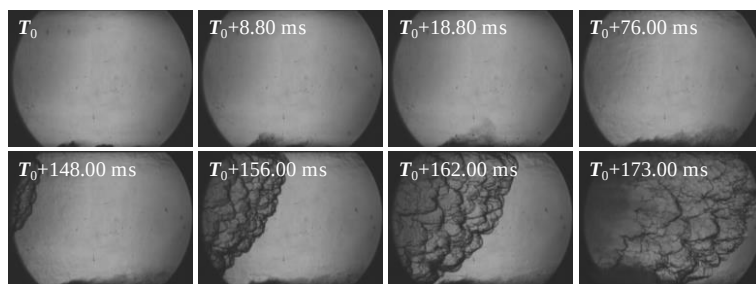
早、扩展更快、充满观测区域所需时间也更短。这表明提高氢气体积分数可显著增强前期爆炸对沉积粉尘的卷扬和预热作用,并促进氢气火焰与悬浮粉尘云之间的耦合燃烧。整体上,较高氢气体积分数有利于二次爆炸的提前触发和快速发展,从而使体系表现出更强的燃烧剧烈程度和更高的瞬态能量释放水平。

(a) $\lambda = 0.25$ (b) $\lambda = 0.30$ 图6 氢气爆炸引燃沉积 MgH_2 粉尘火焰形态演变Fig. 6 Evolution of flame morphology in a hydrogen explosion igniting deposited MgH_2 dust

为进一步揭示氢气爆炸冲击波及其后随高速气流对沉积 MgH_2 粉尘卷扬行为的作用规律,并识别粉尘云形成与后续点燃之间的关键前置过程,本研究在沉积粉尘所在区域布置了纹影成像系统进行局部放大观测。纹影方法对流场中的密度梯度变化具有较高敏感性,能够清晰捕捉冲击波经过后粉尘层边界的起伏、卷吸、界面失稳以及与周围气体之间的混合演化过程,因此特别适用于表征沉积粉尘由静止状态向悬浮云团转变的瞬态动力学过程。结合图7可知,不同氢气体积分数条件下沉积 MgH_2 粉尘的卷扬过程大致可分为两个阶段。第一阶段为初始线性增长阶段。在这一阶段,氢气爆炸产生的冲击波首先到达沉积粉尘区,随后在高速气流对粉尘层施加拖曳和升力作用,使底部粉尘开始脱离壁面并向上抬升。已有相关研究指出^[33],冲击波通过后,粉尘层后方的高速流动区是驱动粉尘起动和卷扬的关键动力来源。需要说明的是,本文纹影图像中的 T_0 定义为沉积 MgH_2 粉尘层开始发生可辨识移动的时刻。该定义能够更直接反映沉积粉尘对爆炸扰动的实际响应,并便于比较不同工况下粉尘起动、卷扬及后续火焰作用过程。从图7(a)和图7(b)可以看出,在较低氢气体积分数条件下,粉尘卷扬高度整体有限,抬升后的暗色粉尘区主要集中在底部附近,向主流区扩展的空间范围较小,界面上缘也相对平缓。这说明在 $\lambda = 0.15$ 和 $\lambda = 0.20$ 时,前期氢气爆炸所产生的冲击压缩与诱导气流强度仍然偏弱,只能促使部分沉积粉尘发生近壁抬升,尚不足以在短时间内形成范围较大、浓度较高且具有良好空间连续性的有效粉尘云。低氢气体积分数下虽然已经出现卷扬现象,但其卷扬程度和云团完整性都较为有限,对后续二次爆炸的支撑作用相对较弱。第二阶段为界面失稳与强化卷吸阶段。当氢气体积分数继续升高时,前期爆炸强度明显增大,

冲击波后的高速气流和局部剪切作用显著增强,粉尘卷扬高度增大,粉尘云前缘和上边界逐渐出现明显的卷曲和失稳结构。图7(c)和图7(d)显示,在 $\lambda = 0.25$ 和 $\lambda = 0.30$ 条件下,粉尘在更短时间内即被快速抬升至更高位置,粉尘云沿轴向和径向的扩展范围都明显增加,尤其在后期图像中可以观察到更加显著的层状卷吸结构和大尺度界面波动。这表明随着氢气体积分数增加,卷扬过程已由单纯的底部掀起发展为更强烈的非稳态卷吸与混合过程。参照已有研究中对粉尘卷扬后期阶段的分析^[33],这一阶段虽然不一定表现为持续线性增高,但会伴随更强的表面不稳定性 and 更大的边界起伏。因此,从纹影结果可以认为,较高氢气体积分数通过增强爆炸强度,提高了沉积 MgH_2 粉尘的起动能力、卷扬高度和界面扰动强度,使粉尘更容易形成大范围悬浮云团,从而为后续火焰侵入和二次爆炸发展创造了更有利条件。

图7(d)显示,在较高氢气体积分数条件下,当火焰传播至沉积粉尘所在位置后,火焰前缘出现了明显的层叠状螺旋结构。值得注意的是,该类结构仅在高氢气体积分数工况下观察到,在较低氢气体积分数条件下未见同样清晰且持续发展的卷涡形态。该结构初期表现为火焰边界处的螺旋状突起,随后迅速演化为连续的卷曲条纹和大尺度卷涡团。其形成说明高温燃烧产物与未燃含尘混合物之间存在显著的速度梯度和密度梯度,界面在强剪切作用下发生了明显的卷吸失稳。同时, MgH_2 颗粒的非均匀点燃及局部强放热进一步增强了火焰前缘的起伏和卷曲,促使螺旋结构快速发展。该类卷涡化火焰前缘能够显著增大反应界面面积,强化热量与活性组分向未燃区的传递,并促进颗粒的连续点燃与火焰加速传播,因此可视为高氢气体积分数条件下二次爆炸进入强化发展阶段的重要形态特征。



(a) $\lambda = 0.15$ ($T_0 = 21.00$ ms)

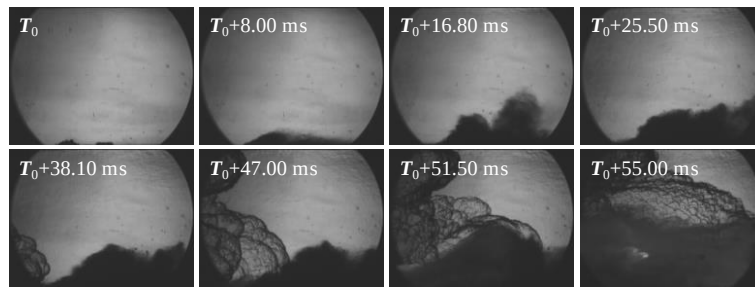
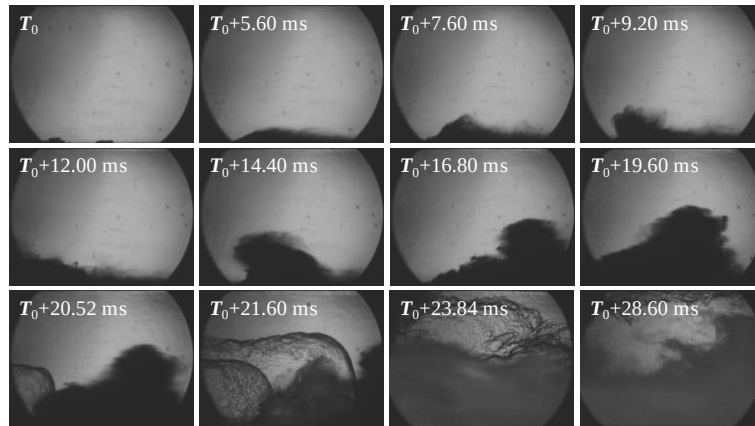
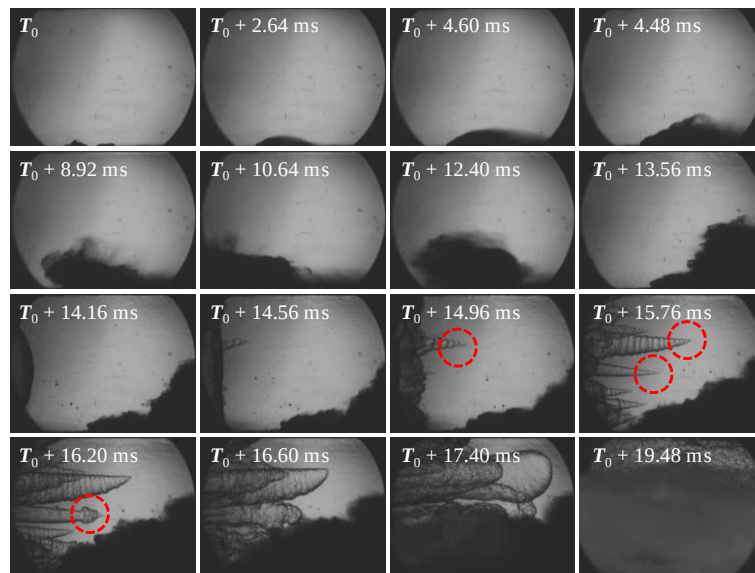
(b) $\lambda = 0.20$ ($T_0 = 18.90$ ms)(c) $\lambda = 0.25$ ($T_0 = 16.00$ ms)(d) $\lambda = 0.30$ ($T_0 = 10.80$ ms)图7 氢气爆炸冲击波与流场扰动下 MgH_2 粉尘卷扬过程与火焰纹影图像Fig. 7 The process of MgH_2 dust entrainment and flame schlieren images under hydrogen explosion shock waves and flow field disturbances

图8对不同氢气体积分数条件下沉积 MgH_2 粉尘卷扬高度的时间演化进行了定量表征。本文中粉尘卷扬高度定义为沉积粉尘云上边界相对于管道底部初始沉积位置的垂直距离,即以管道底壁处沉积粉尘初始表面作为零高度基准。具体提取过

程中,根据纹影图像中暗色粉尘云区域与背景区域之间的灰度差异识别粉尘云上边界,并结合人工复核确定每一时刻粉尘云的最高可辨识位置。像素与实际尺寸之间的转换依据管道截面高度 150 mm 进行标定。整体来看,随着氢气体积分数由 $\lambda =$

0.15 增至 $\lambda = 0.30$, 粉尘卷扬过程表现出十分明确的强化规律, 即卷扬高度增长速率显著增大, 峰值卷扬高度明显提高, 同时达到峰值所需时间明显缩短。这说明氢气体积分数的提高增强了前期气体爆炸的冲击作用和后随高速气流扰动能力, 从而显著提升了沉积粉尘的起动、抬升与分散水平。具体而言, $\lambda = 0.15$ 时粉尘卷扬高度最大仅为 28 mm, 且出现时间较晚。 $\lambda = 0.20$ 时峰值高度提高至 52 mm。 $\lambda = 0.25$ 和 $\lambda = 0.30$ 时卷扬过程明显加快, 峰值分别增加至 62 mm 和 71 mm。整体上, 高氢气体积分数条件下沉积粉尘在更短时间内被卷扬至更高位置, 该现象表明前期氢气爆炸产生的冲击波及后随高速气流对粉尘层的抬升作用显著增强。同时, 高氢气体积分数下曲线在后期出现更明显的波动特征, 第二阶段中的界面失稳、卷吸混合及非稳态扰动更为强烈。图 8 的定量结果表明, 提高氢气体积分数有利于形成高度更大、范围更广的悬浮粉尘云, 并为后续二次爆炸发展创造更有利条件。

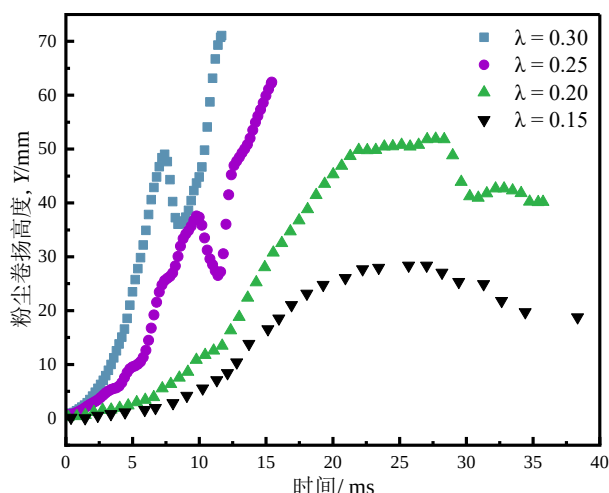


图 8 不同氢气体积分数下 MgH_2 粉尘卷扬高度随时间的变化曲线

Fig. 8 Time histories of MgH_2 dust entrainment height under different hydrogen volume fractions.

2.3 障碍物影响下的粉尘卷扬与火焰传播特性

对于氢气与沉积 MgH_2 粉尘构成的两相体系而言, 障碍物的存在一方面可能强化前期冲击波和诱导气流对沉积粉尘的抬升作用, 促进悬浮粉尘云形成。另一方面又可以通过增强火焰前缘扰动、延长高温产物停留时间以及诱发局部回流燃烧, 进一步加剧火焰传播和二次爆炸发展。因此, 为揭示复杂管道条件下局部构件对沉积粉尘卷扬和火焰传播的影响, 本研究进一步考察了障碍物存在条件下氢

气/沉积 MgH_2 两相体系的火焰传播行为和压力演变。图 9 给出了障碍物诱导下氢气/沉积 MgH_2 两相体系火焰传播形态的时序演变。由图可见, 在火焰传播前期, 火焰前缘依次经历了指形火焰、平面火焰和郁金香火焰的演化过程。25 ms 时, 前缘呈现较为典型的指形结构; 至 27 ms 时, 火焰前缘逐渐展平并转变为近平面结构; 到 35 ms 时, 火焰前缘进一步演化为郁金香火焰, 表明火焰已受到压力波反射、局部流场回卷及界面失稳的共同影响, 传播进入明显的非稳态阶段。随着火焰持续向下游推进, 障碍物附近的流动扰动显著增强。40 ms 至 58 ms 期间, 障碍物所在区域周围逐渐出现高亮发光区和复杂边界结构, 说明火焰在接近障碍物后, 其传播过程受到局部阻塞效应影响。障碍物会使来流在其前方形成压缩区, 在绕流过程中形成高速剪切层, 并在其后方产生分离和涡旋结构。这种流动重构会明显增强对沉积 MgH_2 粉尘的卷扬和再分散作用, 使原本沉积于障碍物后方的粉尘更容易进入悬浮状态。同时, 障碍物附近的局部高温区与粉尘云接触后, 更容易形成亮度更高的两相燃烧区。火焰传播至 64 ms 时, 由于 MgH_2 粉尘引燃造成的高亮火焰, 触发高速相机的二次曝光功能开启。二次曝光开启后, 可以更清楚地观察到障碍物周围的粉尘火焰形态。由右侧观测区可见, 火焰在障碍物附近出现明显的局部强化燃烧, 并沿障碍物周边形成不规则高亮发光区。此时的高亮火焰反映了氢气火焰与卷扬 MgH_2 粉尘共同参与的耦合燃烧过程。66 ms 至 84 ms 阶段, 图中可观察到较为明显的粉尘火焰回流现象。障碍物后方形成的低速回流区和大尺度旋涡, 会将部分高温燃烧产物及已点燃粉尘卷吸回上游, 从而在局部形成逆向卷回的火焰运动轨迹。这种回流作用会显著延长颗粒在高温区内的停留时间, 增强火焰对未燃粉尘的持续点燃能力, 并提高局部热量积聚程度。

为进一步揭示障碍物后方沉积 MgH_2 粉尘的再悬浮行为及其与火焰传播的耦合特征, 本研究在障碍物后方布置了纹影观测窗口, 并将沉积粉尘设置在障碍物背风侧区域。由于障碍物会致使冲击波反射、绕流加速、边界层分离及尾迹回流等复杂流动现象, 其后往往形成明显的低压回流区和强剪切层, 因此该区域是沉积粉尘卷扬、聚集、再分散以及后续局部点燃最敏感的位置之一。图 10 给出了障碍物后方 MgH_2 粉尘卷扬与火焰传播的纹影演化

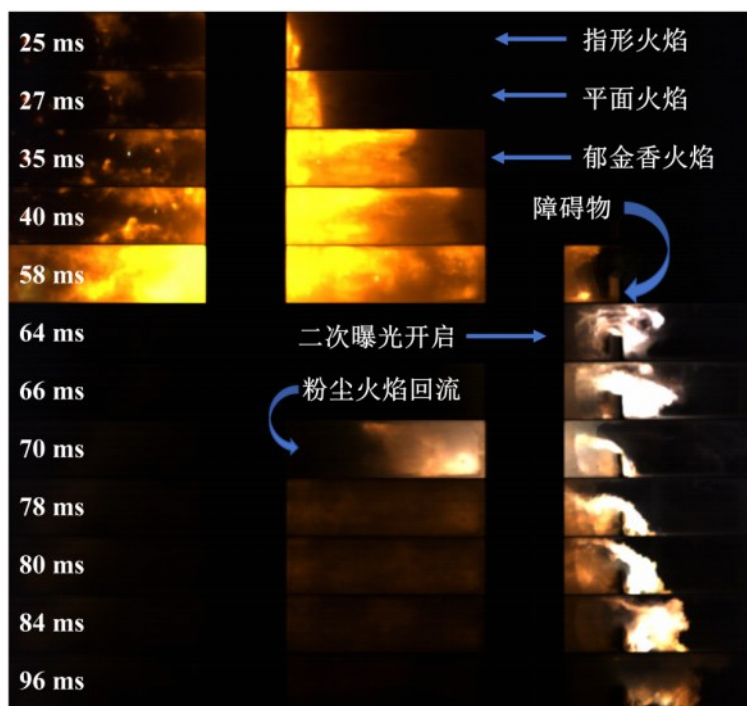


图9 障碍物诱导氢气/沉积 MgH_2 两相体系火焰传播形态演变

Fig. 9 Evolution of flame propagation morphology in the hydrogen/deposited MgH_2 two-phase system induced by the obstacle

图像。整体上看,该区域的演化过程可分为两个阶段,即爆炸冲击作用下的粉尘卷扬阶段,以及氢气火焰与卷扬粉尘相互作用阶段。在粉尘卷扬阶段,障碍物后方沉积粉尘的发展明显受尾迹流场控制。对于 $\lambda = 0.20$ 工况, T_0 至 $T_0+7.50$ ms内粉尘仍主要附着于障碍物后方壁面附近;至 $T_0+11.08$ ms和 $T_0+14.96$ ms,粉尘层前缘开始被掀起并沿障碍物后缘向上卷升,说明冲击波通过后形成的诱导气流已在背风侧建立起有效的卷吸作用;到 $T_0+18.92$ ms以后,粉尘云边界逐渐卷曲,并在 $T_0+23.28$ ms出现较为典型的螺旋状回卷结构;在 $T_0+28.48$ ms和 $T_0+32.24$ ms,卷扬后的粉尘云在障碍物后方持续扩展,但整体仍保持较强的局部性和不均匀性。相比之下, $\lambda = 0.25$ 工况下障碍物后方粉尘卷扬明显加快。 $T_0+8.00$ ms至 $T_0+10.52$ ms,粉尘云在障碍物后方迅速抬升并形成大尺度弯曲界面,表明更高氢气体积分数下前期爆炸强度更大,冲击波后诱导高速气流和障碍物绕流效应更强;至 $T_0+14.00$ ms和 $T_0+18.00$ ms,粉尘云进一步向主流区扩展,并出现更明显的卷吸和团聚结构;到 $T_0+21.28$ ms,障碍物后方区域已被大范围卷扬粉尘占据。由此可见,随着氢气体积分数提高,障碍物后方粉尘的卷扬速度增大,尾迹旋涡对粉尘的卷吸和输运作用也更强,更容易在障碍物后方形成范围较大、浓度较高的悬浮粉

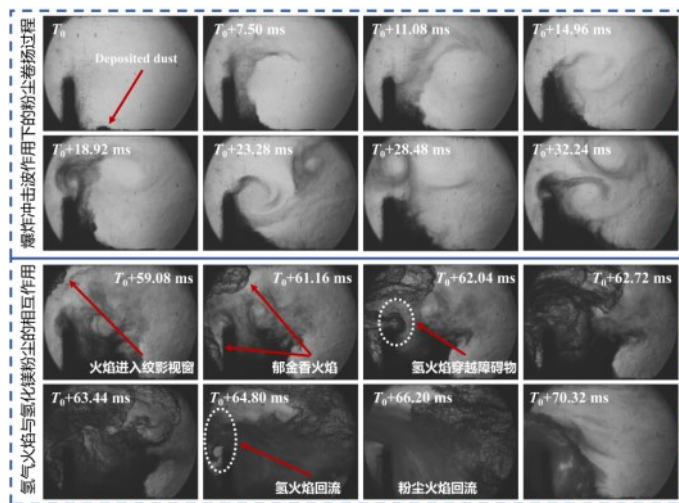
尘云。

在火焰与卷扬粉尘相互作用阶段,障碍物后方的火焰传播呈现出显著的局部强化和回流特征。对于 $\lambda = 0.20$ 工况, $T_0+59.08$ ms时火焰进入纹影视窗, $T_0+62.04$ ms时可观察到氢火焰穿越障碍物,随后在 $T_0+64.80$ ms观察到氢火焰回流,而在 $T_0+66.20$ ms则进一步出现粉尘火焰回流,表明障碍物后方回流区已将高温燃烧产物与已点燃颗粒重新卷吸至局部区域,形成持续的局部再燃烧过程。对于 $\lambda = 0.25$ 工况,这一耦合燃烧过程明显提前且更剧烈。 $T_0+22.80$ ms时火焰即已进入纹影视窗,较 $\lambda = 0.20$ 工况大幅提前, $T_0+23.04$ ms和 $T_0+23.44$ ms时,火焰前缘在障碍物后方形成明显的旋涡卷曲结构,并伴随氢火焰穿越障碍物,至 $T_0+23.84$ ms,局部已形成尺度更大的回卷燃烧结构;在 $T_0+24.24$ ms以后,障碍物后方出现明显的高温通道和卷吸带,至 $T_0+25.72$ ms已演化为高速粉尘火焰回流现象。

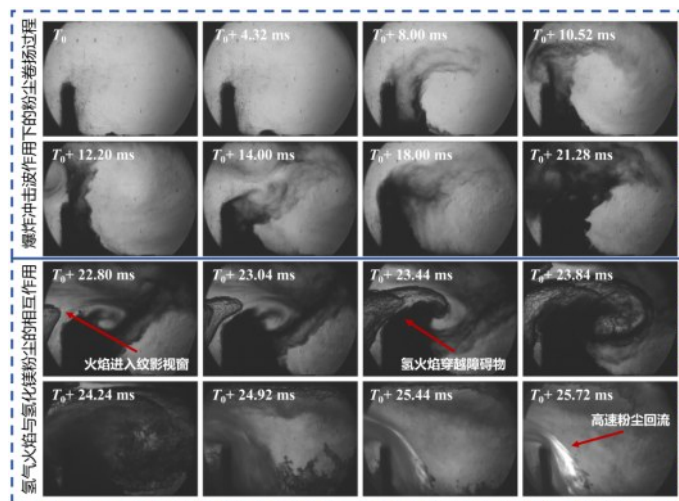
综合两种工况可以看出,障碍物后方沉积 MgH_2 粉尘的演化规律具有鲜明的流动控制特征。首先,障碍物背风侧的分离流和回流涡是驱动粉尘卷扬、回卷和聚集的主要动力来源。其次,随着氢气体积分数提高,前期爆炸强度增大,尾迹区内的剪切作用、卷吸作用及旋涡强度均显著增强,从而使粉尘卷扬更早发生、悬浮粉尘云形成更快。再次,当氢

气火焰进入该区域后,障碍物尾迹结构进一步促使火焰穿越障碍物并在局部形成回流燃烧,使障碍物后方成为氢气火焰与卷扬粉尘耦合反应最活跃的区域之一。综合图像演化特征可以认为,障碍物对氢气/沉积 MgH_2 两相体系的影响主要体现在三个方面。其一,障碍物增强了冲击波后流场的非均匀性,提高了沉积粉尘的卷扬和再分散能力。其二,

障碍物前后形成的局部加速区、剪切层和回流区促进了火焰前缘失稳及局部高亮燃烧区形成。其三,障碍物诱导的粉尘火焰回流使高温产物和活性颗粒在局部区域内停留更久,从而强化了二次爆炸发展过程。因此,障碍物工况下氢气爆炸与沉积 MgH_2 粉尘燃烧之间的耦合作用更强,火焰传播呈现出更显著的局部强化、回流燃烧和持续放热特征。



(a) $\lambda = 0.20$ ($T_0 = 20.00$ ms)



(b) $\lambda = 0.25$ ($T_0 = 8.00$ ms)

图 10 障碍物后方 MgH_2 粉尘卷扬与火焰传播纹影图像

Fig. 10 Schlieren images of MgH_2 dust entrainment and flame propagation downstream of the obstacle

图 11 给出了障碍物条件下不同氢气体积分数的氢气/沉积 MgH_2 两相体系爆炸压力特征。由图可见,在障碍物存在条件下,体系的压力响应同样对氢气体积分数高度敏感,且相较于无障碍物工况,压力峰值整体进一步提高,峰值出现时间明显提前,曲线峰后振荡也更加显著,说明障碍物诱导的

流场扰动、火焰加速及沉积粉尘卷扬对爆炸过程具有明显强化作用。由图 11(a)可见,当氢气体积分数为 $\lambda = 0.25$ 时,压力在点火后极短时间内迅速上升,并在 40 ms 附近达到主峰,最大爆炸压力达到 685 kPa。峰后压力虽逐渐衰减,但伴随明显的高频振荡特征,表明障碍物使火焰在传播过程中发生了显

著加速,同时诱发了更强的压力波反射和局部非稳态燃烧过程。对于 $\lambda = 0.20$ 工况,压力曲线仍表现出较快的建立过程,其主峰出现在74 ms附近,最大爆炸压力为434 kPa,随后进入缓慢衰减阶段,说明该条件下体系已具备较强的前期释能能力,但其耦合强化程度仍低于高氢气体积分数工况。相比之下, $\lambda = 0.15$ 时压力建立过程明显滞后,曲线前期缓慢上升,并在180–200 ms范围内出现较宽的压力峰,最大爆炸压力为339 kPa,表明在较低氢气体积分数下,尽管障碍物能够增强局部流场扰动,但前期氢气爆炸强度仍然有限。图11中插图进一步表明,随着氢气体积分数由 $\lambda = 0.15$ 增至 $\lambda = 0.25$,最大爆炸压力由约339 kPa增至约685 kPa,最大爆炸压力上升速率则由约45.0 kPa·ms⁻¹增至约295.0 kPa·ms⁻¹,增长幅度更为显著。与无障碍物工况相比,障碍物对爆炸烈度的放大作用可以通过 $\lambda = 0.25$ 工况进一步量化。无障碍物条件下,该工况最大爆炸压力为532 kPa,而障碍物条件下最大爆炸压力提高至685 kPa,增幅约为28.8%。这说明障碍物不仅改变了火焰传播形态,而且通过剪切层、尾迹涡和回流区强化沉积MgH₂粉尘再悬浮、气固混合及局部持续燃烧过程,从而显著放大了二次爆炸超压响应。

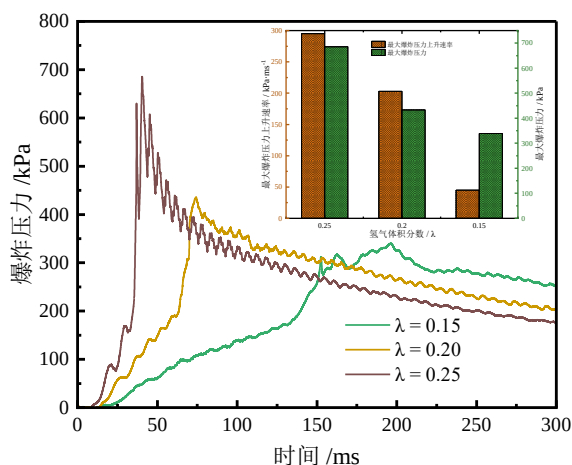


图11 障碍物条件下氢气/沉积MgH₂粉尘爆炸压力特性

Fig. 11 Explosion pressure characteristics of hydrogen/deposited MgH₂ dust under obstacle conditions

2.4 氢气爆炸诱导沉积MgH₂粉尘卷扬与二次爆炸机理分析

为进一步概括不同工况下氢气/沉积MgH₂两相体系的演化过程,图12给出了无障碍物和含障碍物条件下氢气爆炸诱导沉积MgH₂粉尘卷扬及二次爆

炸的机理示意。结合前文的爆炸压力、火焰传播和纹影结果可以看出,沉积MgH₂粉尘的卷扬与二次爆炸并非瞬时发生,而是一个由初次氢气爆炸触发、粉尘再悬浮发展、气固混合强化以及二次点燃逐步耦合形成的连续演化过程。在无障碍物条件下,点火后预混氢气/空气混合物首先发生一次爆炸,火焰与压力波沿管道向下游传播。当前驱压力波到达沉积MgH₂粉尘区域后,冲击压缩作用及其后随高速气流对近壁粉尘层产生明显的拖曳和抬升作用,使沉积粉尘逐步脱离壁面并进入主流区。随着流动进一步发展,卷扬后的粉尘云由初始近壁抬升阶段逐渐转入界面失稳与强化卷吸阶段,粉尘云边界出现明显波动和卷曲,表明局部剪切和非稳态混合不断增强。随后,传播而来的氢气火焰进入悬浮粉尘区域,在高温环境及活性自由基作用下点燃卷扬形成的MgH₂粉尘云,进而诱发气体/粉尘两相二次爆炸。由此可见,初次氢气爆炸不仅为沉积粉尘的启动和卷扬提供了动力条件,也为后续点燃提供了高温火焰源,是推动沉积粉尘由静止状态向可燃悬浮云团转化的主导因素。从机理上看,无障碍物条件下二次爆炸的发展程度主要取决于前期氢气爆炸强度以及粉尘云的形成质量。一方面,氢气体积分数较高时,气相反应速率更快,冲击波强度和后随诱导气流作用更强,因而能够显著提高沉积粉尘的卷扬高度、卷扬范围和空间分散程度;另一方面,粉尘卷扬越充分,形成的可燃气固混合区越大,火焰侵入后越容易形成连续传播的二次反应区域。因此,氢气体积分数升高不仅增强了初次爆炸本身,还通过促进MgH₂粉尘再悬浮和混合均匀化,提高了二次爆炸的触发可能性和发展强度。这与前文中高氢气体积分数条件下压力峰值升高、峰值出现提前以及火焰亮度增强的实验结果相一致。

在含障碍物条件下,障碍物显著改变了局部流场结构,使体系演化表现出更强的非均匀性和局部强化特征。当前驱冲击波和诱导气流传播至障碍物附近时,障碍物前方形成局部压缩区,绕流过程中产生高速剪切层,而其后方则形成分离流、尾迹涡及低压回流区。这些流动结构明显增强了障碍物后方沉积MgH₂粉尘的启动、卷吸和再分散能力,使粉尘卷扬由无障碍物条件下相对平缓的整体抬升,转变为受局部旋涡控制的快速卷扬和集中聚集过程。尤其是在障碍物背风侧区域,粉尘不仅更易被卷起,而且更容易在回流作用下形成局部浓度较

高、停留时间较长的悬浮云团。与此同时,障碍物还会改变火焰传播形态。火焰在接近并穿越障碍物过程中,前缘出现明显褶皱、卷曲及局部加速现象,局部湍流强度显著提高。当火焰与障碍物后方卷扬形成的 MgH_2 粉尘云接触后,局部高温区、回流燃烧区与高浓度粉尘云之间发生更强的耦合作用,使该区域成为二次爆炸最活跃的位置之一。尤其是障碍物后方出现的火焰回流现象表明,高温燃烧产物和已点燃颗粒可在尾迹旋涡作用下被重新卷吸,并持续与未燃粉尘接触,从而延长局部反应停留时间,增强持续点燃和热量积聚效应。因此,含障碍物工况下体系通常表现出更高的局部火焰亮度、更明显的回流燃烧特征以及更强的压力波动和超压响应。

综合图 12(a)和图 12(b)可以看出,氢气爆炸诱导沉积 MgH_2 粉尘卷扬与二次爆炸,本质上是初次气相爆炸、粉尘再悬浮、非稳态混合以及二次点燃耦合作用共同驱动的结果。其中,氢气体积分数决定了初次爆炸的反应活性和卷扬驱动力,而障碍物则通过重构局部流场、强化湍流和回流作用,进一步加剧粉尘卷扬及火焰传播的不稳定性。与无障碍物工况相比,障碍物条件下粉尘云形成更快、局部混合更强、火焰回流更明显,因而更易诱发强烈的二次爆炸。上述结果表明,在镁基固态储氢材料的储运和应用过程中,沉积粉尘并非静态危险源,而是在氢气初次爆炸、障碍物扰动和空间约束共同作用下,能够迅速转化为高活性二次爆炸介质的关键环节。

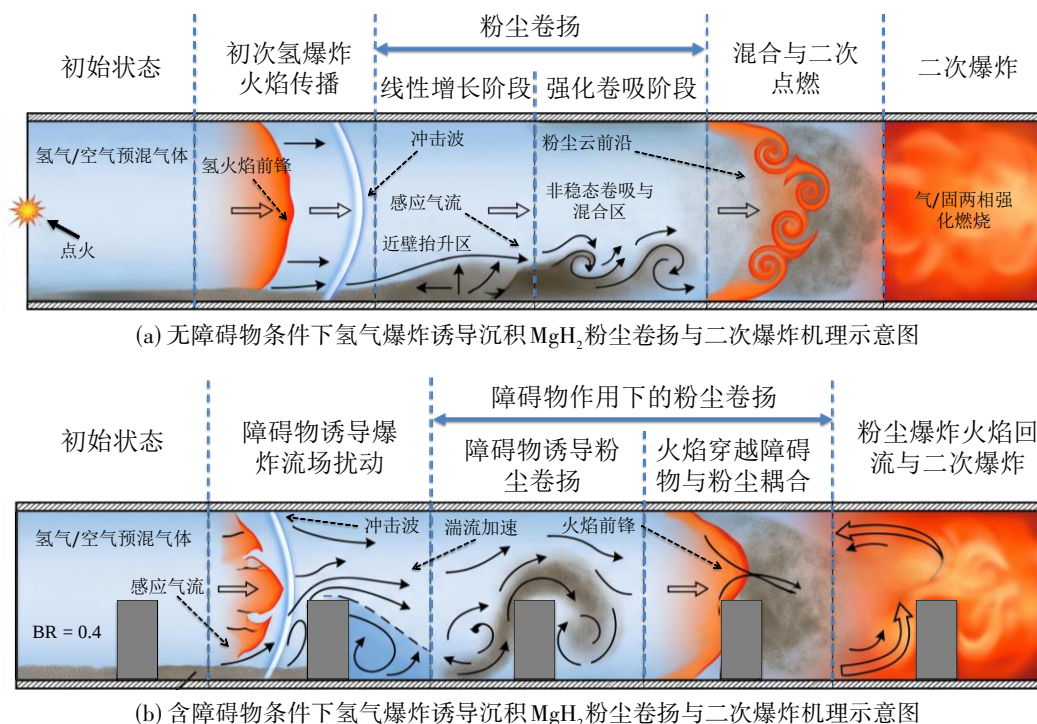


图 12 氢气爆炸诱导沉积 MgH_2 粉尘卷扬与二次爆炸机理示意图

Fig. 12 Schematic diagram illustrating the mechanism of dust entrainment and secondary explosion caused by hydrogen explosion-induced deposition of MgH_2 powder

3 结论

本研究围绕氢气初次爆炸诱导沉积 MgH_2 粉尘卷扬及二次爆炸问题,构建了水平受限空间可视化实验平台,系统考察了不同氢气体积分数及障碍物条件下氢气/沉积 MgH_2 两相体系的压力响应、火焰传播、粉尘卷扬行为及其耦合机理。主要结论

如下:

(1)在无障碍物条件下,随着氢气体积分数由 0.10 增至 0.30,体系最大爆炸压力由 271 kPa 增至 603 kPa,最大爆炸压力上升速率由 $4.2 \text{ kPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 增至约 $440.0 \text{ kPa} \cdot \text{ms}^{-1}$,且压力峰值出现时间明显提前。结果表明,氢气体积分数升高不仅增强了前期气相爆炸的释能强度,而且显著提高了冲击波及后

随诱导气流对沉积粉尘的驱动能力,从而加快了卷扬、点燃与二次爆炸的发展过程。

(2)纹影结果表明,不同工况下粉尘卷扬均可概括为两个阶段:首先是冲击波通过后近壁粉尘层发生起动和线性抬升,其后进入界面波动增强、卷曲发展和非稳态卷吸强化阶段。随着氢气体积分数由0.15增至0.30,粉尘峰值卷扬高度由28 mm增至71 mm,同时达到峰值所需时间缩短,说明较高氢气体积分数更有利于形成范围更大、连续性更好的悬浮粉尘云。该结果与已有关于冲击波后高速流动区主导沉积颗粒再悬浮的认识相吻合,同时将再悬浮研究进一步拓展到 MgH_2 活性粉尘的爆炸诱导场景。

(3)障碍物的存在会显著强化粉尘卷扬、火焰扰动和局部回流燃烧。通过设置阻塞比为0.4的障碍物后,障碍物前方压缩、绕流剪切、后方分离流及尾迹回流共同重构了局部流场。纹影结果表明,障碍物后方沉积 MgH_2 粉尘更早被掀起并形成卷曲、回卷和聚集结构。火焰传播过程中则出现穿越障碍物后的明显回流燃烧。压力结果进一步表明,在障碍物条件下, $\lambda = 0.25$ 时最大爆炸压力提高至685 kPa,明显高于无障碍物工况,且峰后振荡更加显著。说明障碍物在增强粉尘再悬浮能力的同时放大了二次爆炸风险。

(4)综合压力、火焰、纹影及机理图分析可知,初次氢气爆炸决定卷扬驱动力水平,卷扬过程决定可燃粉尘云的空间形成质量。而障碍物则通过强化流场非均匀性、湍流和回流作用,进一步放大火焰传播与二次爆炸的不稳定性。由此可以得出一个较为明确的结论:在镁基固态储氢材料储运和应用过程中,沉积 MgH_2 粉尘并非静态附属风险,而是在初次氢气爆炸扰动下可迅速转化为主导事故升级的关键二次危险源。从工程防控角度看,应在含镁基固态储氢材料的储运和使用场景中加强沉积 MgH_2 粉尘管理,定期清理管道、容器和设备死角中的沉积粉尘,尽量减少易形成强剪切和回流区的内部构件突变布置。因此,相关装置的安全设计不能仅关注氢气泄漏和一次爆炸风险,还应重点控制沉积粉尘积聚、局部障碍物布置及受限空间内的流动强化效应。

参考文献

[1] 刘暄,刘洋.我国氢能资源开发利用现状及展望[J].石化技术,

2025, 32(12): 280–281, 276.

Liu X, Liu Y. Present situation and prospect of development and utilization of hydrogen energy resources in China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(12): 280–281, 276.

[2] Zhao J G, Zhang N, Huo J F, et al. Advances and challenges in hydrogen production technologies: a critical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, 204: 153164.

[3] Evro S, Jain I P. MXenes for hydrogen energy systems: Advances in production, storage, fuel cells, and safety applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 145: 147–168.

[4] Yao Y Z, Tan L Y, Chen F, et al. Hydrogen energy industry in China: The current status, safety problems, and pathways for future safe and healthy development[J]. Safety Science, 2025, 186: 106808.

[5] 苏佳纯, 欧阳琰. 氢能产业发展现状以及“十五五”规划分析[J]. 能源, 2026(3): 81–88.

Su J C, Ouyang Y. Development status of hydrogen energy industry and analysis of the tenth Five-Year Plan[J]. Energy, 2026 (3): 81–88.

[6] Nebey A H. Recent advancements in hydrogen production from renewable energy sources[J]. Energy Conversion and Management: X, 2026, 30: 101717.

[7] Mirshekarsadeh T, Akbari S, Sharifian M, et al. Physical solutions for hydrogen storage: Technological challenges, safety assessments, and environmental aspects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 230: 116627.

[8] Anekwe I M S, Mustapha S I, Akpasi S O, et al. The hydrogen challenge: addressing storage, safety, and environmental concerns in hydrogen economy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 167: 150952.

[9] Wu Z, Guo T L, Li X X, et al. An overview of swelling stress formation and control of metal hydride for high-safety and high-density hydrogen storage applications[J]. Applied Energy, 2025, 402: 126909.

[10] 刘晓杰, 刘峻, 韩文杰, 等. 储氢技术研究进展及挑战与机遇[J]. 现代化工, 2025, 45(8): 79–84, 89.

Liu X J, Liu J, Han W J, et al. An overview of hydrogen storage technologies: Research progress, challenges, and opportunities[J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(8): 79–84, 89.

[11] Muduli R C, Kale P. Advanced materials for solid-state hydrogen storage: a review on high-surface-area innovations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 170: 151049.

[12] 齐宗尧, 武锦涛, 刘学武, 等. 镁基储氢材料改性研究进展[J]. 化学工程, 2026, 54(2): 1–7.

Qi Z Y, Wu J T, Liu X W, et al. Research progress in modification of magnesium based hydrogen storage materials[J]. Chemical Engineering, 2026, 54(2): 1–7.

[13] Liu Z Y, Wang X S, Du H, et al. Key strategies for hydrogen separation in hydrogen-blended natural gas using magnesium-based solid hydrogen storage materials: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 234: 116851.

[14] Cheng S, Li F, Wang Y Q, et al. Advances in modification approaches for Mg-based hydrogen storage materials[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2026, 54(2): 20250153.

[15] 刘峰, 李少锋, 李党勇, 等. 镁基固态储氢技术研究进展[J]. 广州化工, 2025, 53(21): 7–9, 17.

Liu F, Li X F, Li D Y, et al. Research progress on magnesium

- based solid-state hydrogen storage technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025, **53**(21): 7–9, 17.
- [16] Gao Z Y, Yang X J, Zhuang Z L, et al. Catalytic strategies and mechanisms for enhancing MgH_2 solid-state hydrogen storage[J]. Chem Catalysis, 2026, **6**(4): 101692.
- [17] Tsai Y T, Huang G T, Zhao J Q, et al. Dust cloud explosion characteristics and mechanisms in MgH_2 -based hydrogen storage materials[J]. AIChE Journal, 2021, **67**(8): e17302.
- [18] Wu X L, Xu S, Pang A M, et al. Hazard evaluation of ignition sensitivity and explosion severity for three typical MH2 (M= Mg, Ti, Zr) of energetic materials[J]. Defence Technology, 2021, **17**(4): 1262–1268.
- [19] Zhang Q W, Cheng Y F, Zhang B B, et al. Deflagration characteristics of freely propagating flames in magnesium hydride dust clouds[J]. Defence Technology, 2024, **31**: 471–483.
- [20] 毛文哲, 张国涛, 杨帅帅, 等. 半封闭空间内氢化镁粉尘爆炸火焰的传播特性[J]. 爆炸与冲击, 2024, **44**(6): 172–182.
- Mao W Z, Zhang G T, Yang S S, et al. Characteristics of hydrogenated magnesium dust explosion flame propagating in a semi-enclosed space[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, **44**(6): 172–182.
- [21] Wang Y, Mao W Z, Su Y, et al. Investigation on explosion overpressure and flame propagation characteristics of magnesium hydride dust of different particle sizes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **101**: 438–449.
- [22] Reding N, Shiflett M B. Metal dust explosion hazards: a technical review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, **57** (34): 11473–11482.
- [23] Ji W T, Wang Y, Yang J J, et al. Explosion overpressure behavior and flame propagation characteristics in hybrid explosions of hydrogen and magnesium dust[J]. Fuel, 2023, **332**: 125801.
- [24] Ibrahim A H, Dunn P F, Brach R M. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow: controlled experiments and modeling[J]. Journal of Aerosol Science, 2003, **34**(6): 765–782.
- [25] Ibrahim A H, Dunn P F, Qazi M F. Experiments and validation of a model for microparticle detachment from a surface by turbulent air flow[J]. Journal of Aerosol Science, 2008, **39**(8): 645–656.
- [26] Boor B E, Siegel J A, Novoselac A. Monolayer and multilayer particle deposits on hard surfaces: literature review and implications for particle resuspension in the indoor environment [J]. Aerosol Science and Technology, 2013, **47**(8): 831–847.
- [27] Mukai C, Siegel J A, Novoselac A. Impact of airflow characteristics on particle resuspension from indoor surfaces[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, **43**(10): 1022–1032.
- [28] Taveau J. Secondary dust explosions: How to prevent them or mitigate their effects? [J]. Process Safety Progress, 2012, **31**(1): 36–50.
- [29] Song B C, Li Y C. Study on propagation characteristics of the secondary explosion of coal dust[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2020, **15**(1): 89–96.
- [30] Wei C C, Li H T, Wang J C, et al. Shock wave intensity on secondary coal dust entrainment in methane – coal dust – methane continuous explosions[J]. Powder Technology, 2025, **466**: 121444.
- [31] Lin S, Liu Z T, Qian J F, et al. Flammability and Explosion Risk of Post-explosion CH_4 /air and CH_4 /coal dust/air Mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2021, **193**(8): 1279–1292.
- [32] Cheng C L, Si R J, Wang L, et al. Explosion and explosion suppression of gas/deposited coal dust in a realistic environment [J]. Fuel, 2024, **357**: 129710.
- [33] Chowdhury A Y, Johnston H G, Marks B, et al. Effect of shock strength on dust entrainment behind a moving shock wave[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, **36**: 203–213.