

中文引用格式:刘吉庆,庞磊,金龙哲,等. 堆积铝粉与水反应动力学试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 138–145.

英文引用格式:LIU Jiqing, PANG Lei, JIN Longzhe, et al. Experimental study on reaction kinetics of stacked aluminum powder with water[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 138–145.

堆积铝粉与水反应动力学试验研究^{*}

刘吉庆¹, 庞磊^{**1,2,3}教授, 金龙哲^{1,2,3}教授, 钟圣俊^{4,5}副教授,
苑春苗⁶教授, 王亚飞⁷研究员

(1 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2 北京科技大学 大安全科学研究院, 北京 100083; 3 国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室, 北京 100083; 4 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 5 汇乐因斯福环保安全研究院(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000; 6 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 7 北京市科学技术研究院, 北京 100089)

中图分类号:X932;X941

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.1221

资助项目:国家重点研发计划课题项目(2023YFC3010601)。

【摘要】 为推动金属粉尘防爆技术的优化升级和安全防控体系的建立,基于自主研发的堆积金属粉尘与水反应可视化试验平台,系统探究不同粒径和堆积质量条件下铝粉与过量水的反应动力学特性。通过定量表征粒径和堆积质量对最大温度、产气总量、最大氢气体积分数、最大压力、总时间等反应关键参数的影响,揭示铝-水反应的动力学机制。结果表明:固定粒径时,反应特性参数与堆积质量呈正相关;固定堆积质量时,最大温度随粒径增大呈“V”形变化(先降后升),产气量、氢气体积分数及压力呈倒“U”形变化(先增后减),而总反应时间随粒径增大单调递增。反应产物以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 H_2 为主,反应过程分为缓慢析氢、剧烈反应和衰减终止3阶段。

【关键词】 堆积铝粉; 铝水反应; 反应动力学; 粒径; 堆积质量

Experimental study on reaction kinetics of stacked aluminum powder with water

LIU Jiqing¹, PANG Lei^{1,2,3}, JIN Longzhe^{1,2,3}, ZHONG Shengjun^{4,5},
YUAN Chunmiao⁶, WANG Yafei⁷

(1 School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Research Institute of Macro-Safety Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3 NHC Key Laboratory for Engineering Control of Dust Hazard, Beijing 100083, China; 4 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China; 5 Huile Insford Environmental and Safety Research Institute (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou Jiangsu 215000, China; 6 School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China; 7 Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to promote the optimization and upgrading of metal dust explosion-proof technology

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0138-08; 收稿日期:2025-09-14; 修稿日期:2025-11-20

** 通信作者:庞磊(1982—),男,内蒙古乌兰浩特人,博士,教授,主要从事爆炸事故防治等方面的研究。E-mail: panglei0525@163.com。

and establishment of a safety protection and control system, this study systematically investigated the reaction kinetics of aluminum powder with excess water under varying particle sizes and stacking masses, based on the self-developed visualization experimental platform for the reaction between stacked metal dust and water. Through quantitative characterization of the effects of particle size and stacking mass on key reaction parameters-including the maximum temperature, total gas production, maximum hydrogen concentration, maximum pressure, and total reaction time-the kinetic mechanism of the aluminum-water reaction was revealed. The results demonstrate that at a fixed particle size, all characteristic parameters exhibit positive correlations with increasing stacking mass. At a fixed stacking mass, the maximum temperature follows a V-shaped trend (decreasing then increasing) with increasing particle size, while gas production, hydrogen concentration, and pressure show inverted U-shaped trends (increasing then decreasing). Total reaction time increases monotonically with increasing particle sizes. The primary reaction products are $\text{Al}(\text{OH})_3$ and H_2 , and the reaction process comprises three distinct stages: slow hydrogen evolution, violent reaction, and attenuation and termination.

Keywords: stacked aluminum powder; aluminum-water reaction; reaction kinetics; particle size; stacking mass

0 引言

铝粉作为一种高活性金属材料,在航天、化工、军工等领域应用广泛,但其遇湿自燃的特性常引发严重的安全事故。铝粉与水接触发生放热反应,释放大量氢气并伴随温度与压力的急剧升高,易引发自燃甚至爆炸^[1-2]。如 2014 年,昆山某金属制品有限公司发生铝粉尘爆炸事故,造成 97 人死亡和 163 人受伤,凸显了铝粉自燃风险防控的紧迫性^[3]。

针对铝粉与水的反应特性,国内外学者已展开大量研究,主要聚焦于反应机制、热动力学特征及产氢行为等。王鑫阳等^[4-5]研究了水分对抛光铝粉热自燃临界温度和各反应阶段诱导时间的影响。丁东梅^[1]系统研究了铝粉遇水反应的热动力学特性及不同因素对热动力学行为的影响特征。WANG Xinyang 等^[6]研究了不同温度条件下铝颗粒与水接触到反应结束的整个动力学过程和形貌演变。NIE Hongqi 等^[7]研究了不同温度条件下不同粒度铝粉与水反应的放热速率及不同因素对铝粉与水反应的影响特征。庞磊等^[8-9]研究了不同初始温度及压力的铝水反应的产氢机制。MAGUIRE 等^[10]研究了水参与下铝火灾的热力学特征,并提出灭火建议。

此外,一些研究将关注点扩展至粉体特性及复合体系的产氢特征。NISHIWAKI 等^[11]研究了粒径、比表面积等粉末特性对镁粉与水反应性的影响特征。SACELEANU 等^[12]研究了纳米和微米铝颗粒与水在大气压下制氢的动力学机制和反应过程。刘

聪聪等^[3]研究了铝切屑、含油铝污泥、铝打磨粉尘等在不同质量、含水率下氢气的产量和铁对铝水产氢的影响机制。王延瞳等^[13]系统研究了不同铝水质量比、温度对氢气产生量及最大产氢速率的影响。邢婧等^[14]研究了粒径、温度对铝粉、合金铝粉与水反应程度的影响及产氢特征。盖卫卓^[15]系统研究了铝粉与水反应的产氢特征及水中微量物质和初始气压等因素对产氢特征的影响。然而,现有研究大多仅针对“粒径”或“堆积质量”单一因素展开分析,尚缺乏对两者耦合作用下反应行为的系统性研究。

鉴于此,笔者拟选取 3 种粒径铝粉,并结合不同堆积质量开展系统试验,重点解析铝粉粒径与堆积质量对铝-水反应最大温度、产气总量、最大氢气浓度、最大压力、总时间的影响特征及铝水反应的动力学机制,以期推动金属粉尘防爆技术优化升级。

1 堆积铝粉与水反应试验概况

1.1 铝水反应试验材料

选用 3 种铝粉开展试验,成分见表 1。利用激光粒度分析仪进行粒径测定,如图 1 所示。由图 1 可知:3 种铝粉中位径(D_{50})分别为 5.24、15.36 和 25.76 μm 。

表 1 铝粉成分分析

Table 1 Aluminum powder composition analysis %				
成分	Al	Fe	Si	其他
含量	≥99.8	<0.1	<0.08	<0.02

1.2 铝水反应试验装置

利用堆积金属粉尘与水反应可视化试验平台开

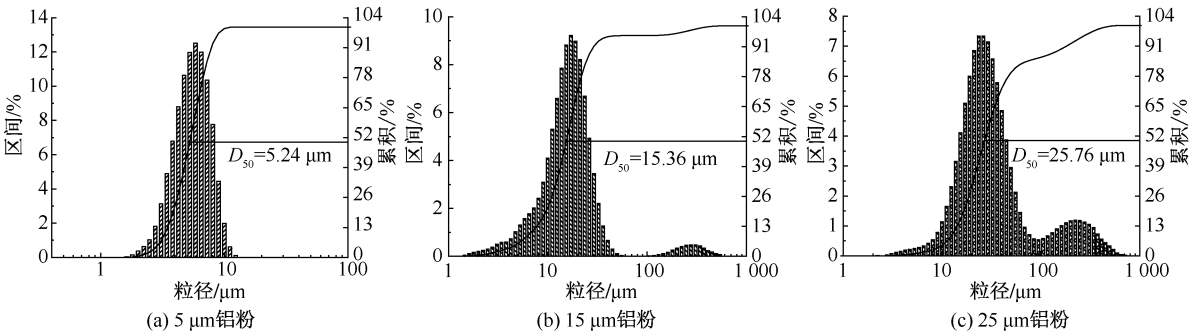


图 1 铝粉粒径分布

Fig. 1 Aluminum powder particle size distribution

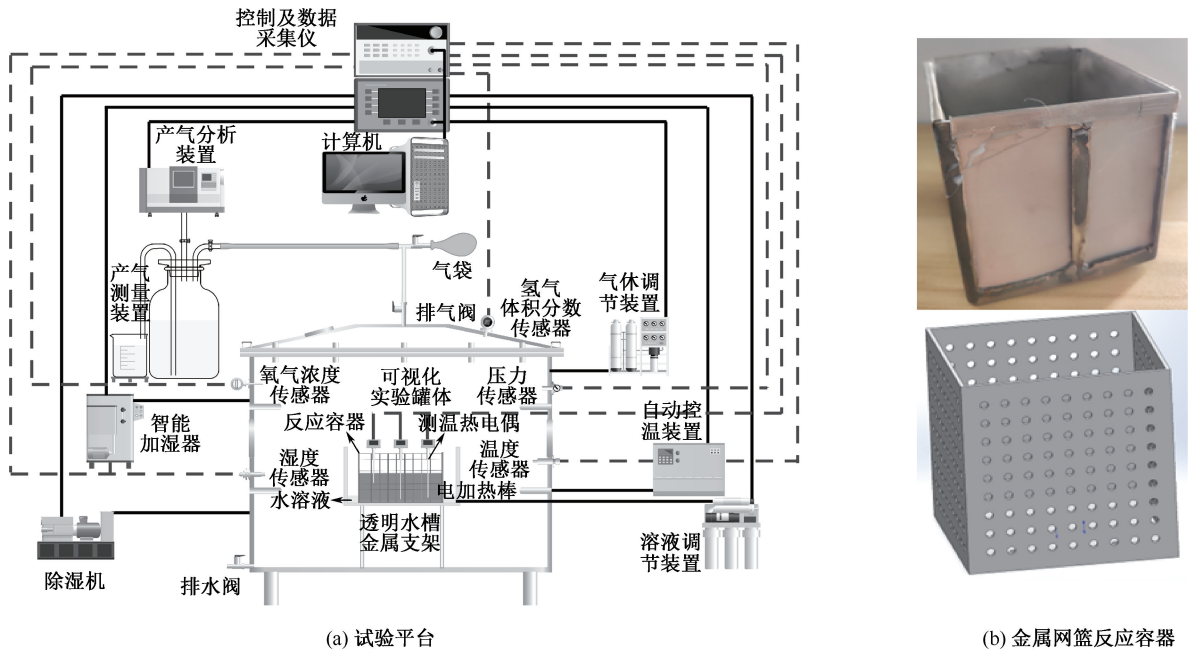


图 2 堆积金属粉尘与水反应可视化试验平台

Fig. 2 Visualized experimental platform for reaction between stacked metal dust and water

展试验研究,如图 2 所示,其中,金属网篮反应容器如图 2b 所示。试验前,将铝粉放入 60 ℃ 真空环境中干燥 6 h。试验时,首先,将一定质量的铝粉装入金属网篮反应容器,并将反应容器置于透明刻度水槽内;然后,通过自动控温装置、湿度调节装置、气体调节装置等调节试验罐体内部的环境参数;最后,在与反应容器配套使用的透明刻度水槽内添加一定质量的水溶液开始试验;开启控制及数据采集装置和计算机监测堆积铝粉内部温度、试验罐体顶部氢气浓度、试验罐体内部压力等时程数据。

1.3 堆积铝粉与水反应试验方案

利用图 2 的试验平台,重点考虑表 2 中的粒径、堆积质量等,开展堆积铝粉与水反应试验。

表 2 影响因素特征参数

Table 2 Characteristic parameters of influencing factors				
试验编号	铝粉粒径/ μm	堆积质量/g	添加水量/g	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$
A1	5.24	5	128	40
A2		10		
A3		15		
B1	15.36	5	128	40
B2		10		
B3		15		
C1	25.76	5	128	40
C2		10		
C3		15		

2 堆积铝粉与水反应动力学特性分析

2.1 铝粉与水反应温度演化分析

不同粒径、堆积质量条件下铝粉与水反应过程中粉尘内部达到的最大温度,如图3所示,由图3可知:铝粉粒径相同时,随着铝粉堆积质量的增加,铝粉与水反应过程中粉尘内部达到的最大温度呈逐渐增大的趋势。铝粉堆积质量相同时,随着铝粉粒径的增大,铝粉与水反应过程中粉尘内部达到的最大温度整体呈先减小后增大的趋势,其主要原因是:铝粉粒径增大,比表面积减小,导致反应速率下降,最大温度降低;但当粒径进一步增大时,堆积孔隙变大,改善了水渗透和反应均匀性,热积累更有效,最大温度回升。当铝粉粒径为5.24 μm、堆积质量为15 g时,内部达到的最大温度最高,达到106.07℃。当堆积质量为5 g、粒径为15.36 μm时,内部达到的最大温度最低,仅为43.76℃。其主要原因是:铝粉粒径较小时,铝水实际接触的面积较大,铝水反应更容易发生且程度更剧烈;随着堆积质量增加,铝水反应过程中放出的热量越多,粉尘内部热量积聚所能达到的最大温度越高。

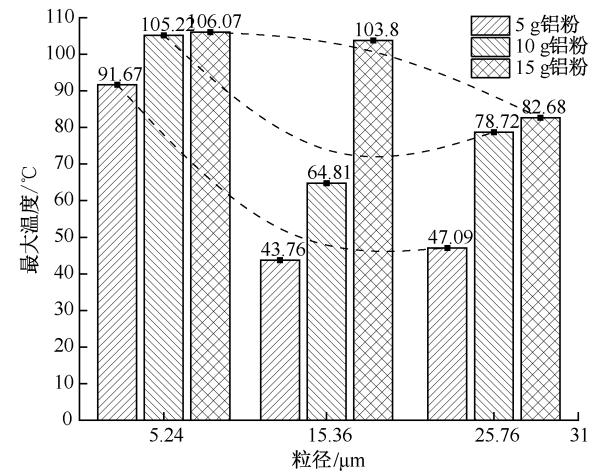


图3 堆积铝粉内部最大温度
Fig.3 Maximum temperature inside stacked aluminum powder

图4为不同堆积质量条件下5.24 μm铝粉与水发生反应,堆积铝粉内部温度演化曲线。从图4可以看出,初始温度相同,堆积质量为5 g时,随着水的加入,铝粉内部温度呈现出平稳波动、急剧上升、急剧下降、最后趋于稳定的演化趋势;而堆积质量为10、15 g时,随着水的加入,铝粉内部温度呈现出缓慢下降、急剧上升、急剧下降、最后趋于稳定的演化趋势。其主要原因是:堆积质量较小时,水的吸热效

应显著,抑制了反应初期温度上升;而在堆积质量较大时,铝水反应释放热量集中且迅速,反应放热快速主导过程,温度仅短暂下降后即急剧上升。

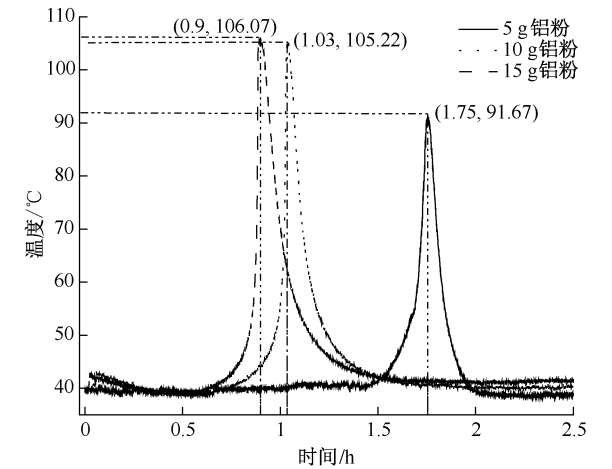


图4 不同堆积质量条件下铝水反应温度演化曲线
Fig.4 Evolution curve of aluminum-water reaction temperature under different stacking mass conditions

当铝粉堆积质量分别为5、10、15 g时,随着堆积质量的增加,堆积粉尘内部所能达到的最大温度越高,而所需要的时间却逐渐缩短。其主要原因是:随着铝粉堆积质量的增加,同一时间参与铝水反应的铝颗粒越多,铝水反应速率越快且放出的热量越多,堆积铝粉内部所能达到的温度也就越高^[4]。

2.2 铝粉与水反应产气分析

不同粒径、堆积质量条件下铝粉与水反应过程中产生气体的量,如图5所示。

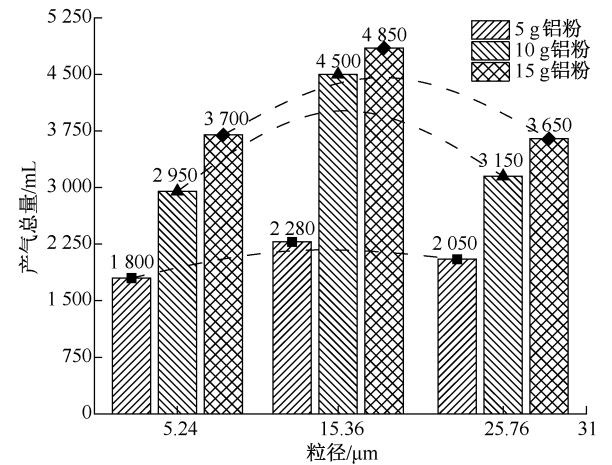


图5 铝水反应产气总量
Fig.5 Total gas production from aluminum-water reaction

从图5可以看出,铝粉粒径相同时,随着铝粉堆积质量的增加,铝粉与水反应过程中产生气体的量呈逐渐增大的趋势;铝粉堆积质量相同时,随着铝粉

粒径的增大,铝粉与水反应过程中产生气体的量呈先增大后减小的趋势。当铝粉粒径为 5.24 μm 、堆积质量为 5 g 时,铝水反应产气体量仅为 1 800 mL。而当粒径为 15.36 μm 、堆积质量为 10 g 时,铝水反应气量达到 4 850 mL。其主要原因是:铝粉粒径较小时,铝粉与水接触更容易发生反应且反应程度更剧烈,但随着温度的升高相当一部分铝粉发生氧化反应生成了氧化铝,影响了气体的生成;铝粉粒径适中时,铝粉与水充分接触,主要发生铝水反应同时生成大量氢气;铝粉粒径较大时,铝粉与水接触面积偏小,铝水反应不够充分,气体生成受到影响。

此外,当铝水反应结束后,通过可视化试验罐体顶部的排气阀采集试验罐体内部气体。对采样气体进行质谱检测,如图 6 所示,成分占比见表 3。由于采样气体收集的是铝水反应产生气体和空气混合气,因此,在质谱检测时以空气作为标样气体。从图 6 可以看出,采样气体中主要存在氢气、氮气、氧气和少量水蒸气,标样空气中主要存在氮气、氧气和少量水蒸气。结合表 3 可以发现,采样气体中氢气占 30.5%,而标定空气中氢气仅占 0.17%。因此,充分证明了本批次试验用铝粉与水反应过程只产生了氢气,且有铝粉与氧气结合发生了氧化反应。

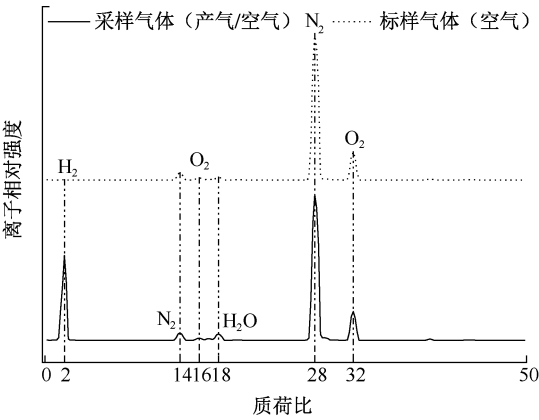


图 6 采样气体质谱

Fig. 6 Mass spectrum of sampled gas

表 3 采样气体成分

Table 3 Composition of sampled gas %

气体	H ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
采样气体	30.5	55.95	11.2	2.36
标定空气	0.17	82.25	16.1	1.49

2.3 铝粉与水反应氢气体积分数变化分析

不同粒径、堆积质量条件下铝粉与水反应过程中罐体顶部达到的最大氢气体积分数,如图 7 所示。从图 7 可以看出,铝粉粒径相同时,随着铝粉堆积质

量的增加,铝粉与水反应过程中罐体顶部达到的最大氢气体积分数呈逐渐增大的趋势;铝粉堆积质量相同时,随着铝粉粒径的增大,铝粉与水反应过程中罐体顶部达到的最大氢气体积分数呈先增大后减小的趋势。当铝粉粒径为 5.24 μm 、堆积质量为 5 g 时,铝粉与水反应罐体顶部达到的最大氢气体积分数最小,仅为 8.22%。而当粒径为 15.36 μm 、堆积质量为 10 g 时,铝粉与水反应罐体顶部达到的最大氢气体积分数最大,达到 25.89%。可知:铝水反应过程中罐体顶部最大氢气体积分数的变化趋势与产生气体量的变化趋势一致,都受到粒径和堆积质量耦合作用的影响^[3]。

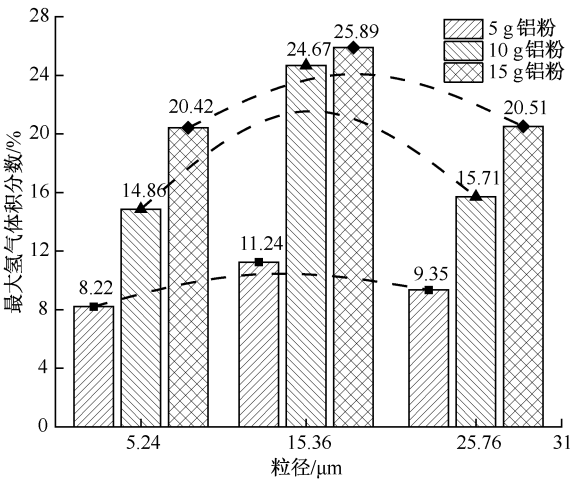


图 7 罐体顶部最大氢气体积分数

Fig. 7 Maximum hydrogen concentration at tank top

图 8 为不同粒径下 15 g 铝粉与水反应,罐体顶部氢气体积分数变化曲线。由图 8 可知:粒径对铝水反应过程中罐体顶部氢气体积分数有着明显的影响,不同粒径铝粉都存在急剧产氢和缓慢产氢的反应过程,且粒径越小铝水反应急剧产氢所需要的时间越短,罐体顶部氢气体积分数达到最大值的时间也越短^[13]。

2.4 铝粉与水反应压力变化分析

不同粒径、堆积质量条件下铝粉与水反应过程中罐体内部达到的最大压力,如图 9 所示。

由图 9 可知:铝粉粒径相同时,随着堆积质量增加,铝粉与水反应过程中罐体内部达到的最大压力呈逐渐增大的趋势;铝粉堆积质量相同时,随着铝粉粒径的增大,铝粉与水反应过程中罐体内部达到的最大压力呈先增大后减小的趋势。同时,铝水反应过程中罐体内部最大压力的变化趋势与产生氢气的总量及罐体顶部达到的最大氢气体积分数相一致。

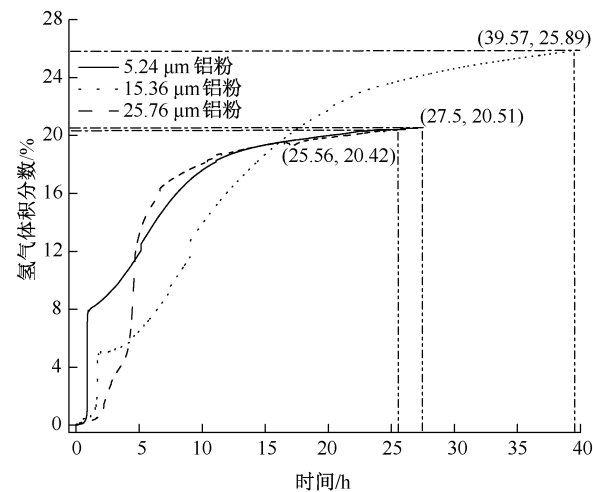


图 8 不同粒径条件铝水反应氢气体积分数变化曲线
Fig. 8 Variation curve of hydrogen concentration in aluminum-water reaction under different particle sizes

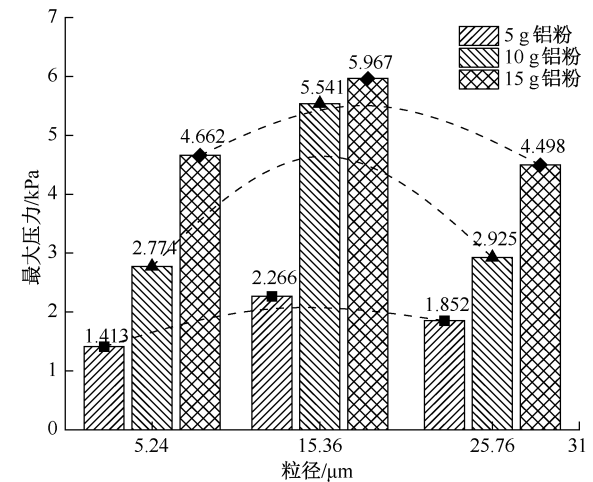


图 9 罐体内部最大压力
Fig. 9 Maximum pressure inside tank

图 10 为不同堆积质量条件下 5.24 μm 铝粉与水发生反应,罐体内部压力变化曲线。由图 10 可知:当铝粉堆积质量为 5 g 时,铝水反应 3.58 h 时,最大压力达到 1.413 kPa;当堆积质量为 10 g 时,铝水反应 1.07 h 时,最大压力达到 2.774 kPa;当堆积质量为 15 g 时,铝水反应 0.91 h 时,最大压力达到 4.662 kPa。随着铝粉堆积质量的增加,铝水反应达到的最大压力越大,所需要的时间越短。其主要原因是:随着堆积质量的增加,反应容器内实际参与铝水反应的铝颗粒越多,铝水反应过程中产生氢气的量越多;且铝水反应放出的热量引起罐体内部气体体积膨胀,进一步提高罐体内部压力。

2.5 铝粉与水反应时间分析

综合考虑铝-水反应后期各特性参数的恒定状

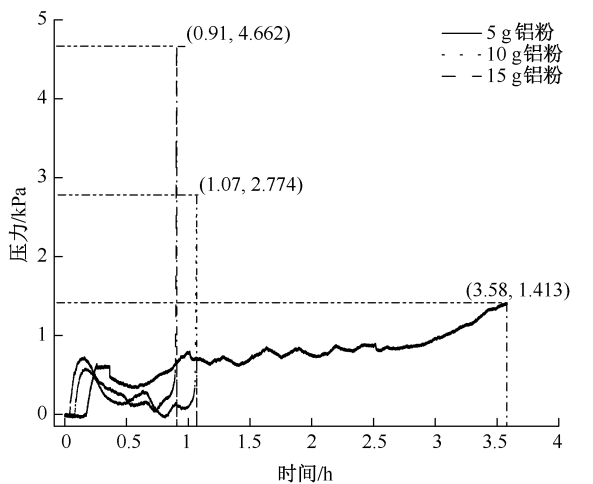


图 10 不同质量条件铝水反应压力变化曲线
Fig. 10 Change curve of aluminum-water reaction pressure under different stacked mass conditions

态,进而确定铝水反应的总时间^[4]。不同粒径、堆积质量条件下铝水反应的总时间,如图 11 所示,从图 11 可以看出,铝粉粒径相同时,随着铝粉堆积质量的增加,铝粉与水发生反应的时间越长;铝粉堆积质量相同时,随着铝粉粒径的增大,铝粉与水反应的时间也逐渐变长。当铝粉堆积质量为 5 g 时,5.24 μm 铝水反应时间最短,仅为 17.5 h。当堆积质量为 10 g 时,25.76 μm 铝水反应时间较长,达到 28 h。而当堆积质量为 15 g 时,25.76 μm 铝水反应间最长,达到 40 h。总的来说,当少量铝粉与过量水发生反应时,铝水反应需要消耗大量时间,虽然反应可以放出热量、生成氢气,但在一定程度上抑制了铝粉自燃的发生、为湿式除尘技术改进提供参考。

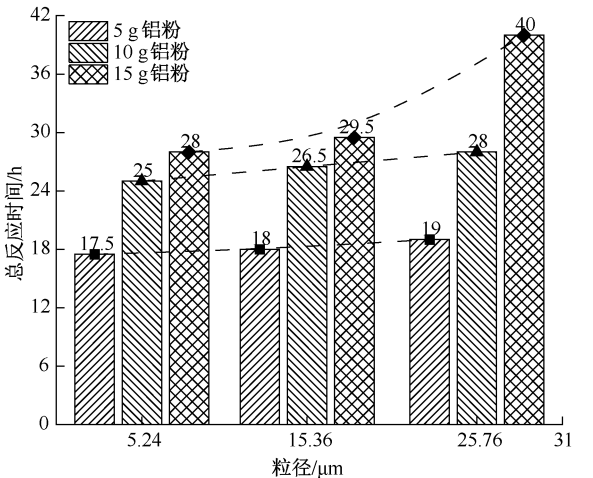


图 11 铝水反应的总时间
Fig. 11 Total time of aluminum-water reaction

2.6 铝粉与水反应动力学机理分析

利用 X-射线衍射仪 (X-ray Diffraction, XRD) 对铝粉和铝水完全反应产物进行分析,如图 12 所示。结合表 1 中铝粉成分参数,并与 04-0787 铝 (Al) 标准卡片进行对照,由图 12a 可以证实试验样粉的准确性。通过与 20-0011 氢氧化铝 (Al(OH)₃) 标准卡片进行对照,由图 12b 可知:铝水完全反应产物的衍射峰与 Al(OH)₃ 标准卡片的特征峰基本吻合,进而确定铝水完全反应产物的成分主要为氢氧化铝。

铝粉与水反应动力学机制,如图 13 所示。在一定条件下,受表面氧化膜的影响,铝颗粒与水接触发生缓慢析氢反应,释放出少量氢气和一定热量;随着反应的进行和温度的升高,铝颗粒逐渐被水腐蚀,颗粒表面产生坑洞甚至发生破裂,铝颗粒与水充分接触发生剧烈的置换反应,同时引起温度、氢气体积分数、压力等参数的急剧变化;随着反应的进行,当铝

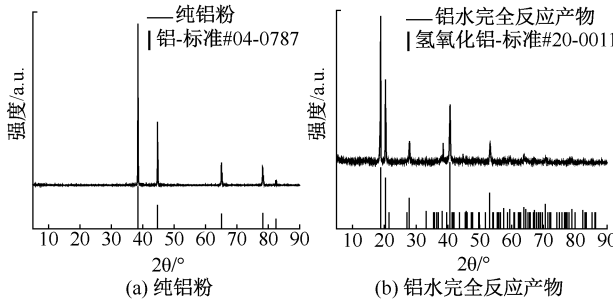


图 12 铝粉和铝水完全反应产物的 XRD

Fig. 12 XRD of aluminum powder and aluminum-water complete reaction product

水反应放出的热量不足以维持整个反应体系的温度时,铝颗粒与水的反应逐渐减缓直至反应结束^[13]。因此,可将铝水反应过程分为 3 个阶段:缓慢析氢阶段、剧烈反应阶段和衰减终止阶段,主要化学方程为: $2\text{Al}+6\text{H}_2\text{O}\rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3+3\text{H}_2\uparrow$ 。

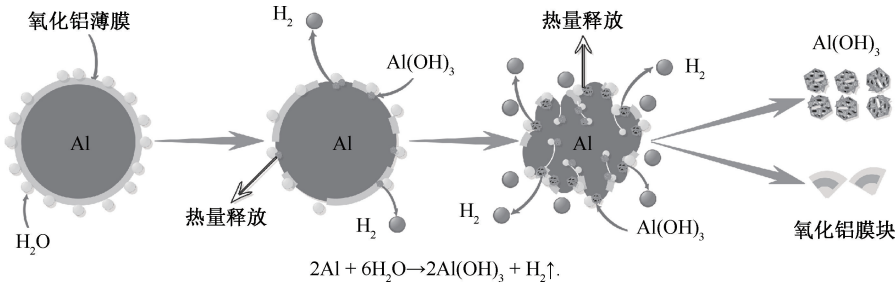


图 13 铝粉与水反应动力学机制

Fig. 13 Reaction kinetic mechanism between aluminum powder and water

3 结 论

- 1) 在所选铝粉粒径与堆积质量条件下,15.36 μm 铝粉的产气量、氢气体积分数及压力均达峰值,反应强度最高。
- 2) 铝-水反应遵循 3 阶段路径:缓慢析氢→剧烈反应→衰减终止,表征分析证实反应产物为 Al

(OH)₃ 和 H₂, 化学反应动力学机制符合 $2\text{Al}+6\text{H}_2\text{O}\rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3+3\text{H}_2\uparrow$ 。

- 3) 小粒径大堆积质量铝粉 (5.24 μm/15 g) 在 0.9 h 内可使反应系统温度升高到 106 ℃、产生大量氢气,显著增加自燃爆炸风险;大粒径铝粉 (25.76 μm) 40 h 反应周期为湿式除尘提供安全时间窗口。

参 考 文 献

[1] 丁东梅. 铝粉遇水反应热动力学行为研究[D]. 上海:上海应用技术大学, 2020.
DING Dongmei. Study on the thermodynamics of aluminum powder in water [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.

[2] 葛双优. 抛光铝粉热自燃机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
GE Shuangyou. Study on the mechanism of auto ignition of aluminum dust from polishing process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

[3] 刘聪聪, 许开立, 王雪, 等. 铝合金加工废物遇湿产氢规律研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(4): 495-498.
LIU Congcong, XU Kaili, WANG Xue, et al. Study on hydrogen production law of aluminum alloy processing waste when

- wet[J]. *Fire Science and Technology*, 2023, 42(4): 495–498.
- [4] 王鑫阳, 李刚. 水分促使抛光铝粉热自燃临界温度和诱导时间[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2022, 43(10): 1 492–1 498.
- WANG Xinyang, LI Gang. Critical temperature and induction time of spontaneous combustion of polished Al powder induced by water[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2022, 43(10): 1 492–1 498.
- [5] 王鑫阳, 崔铁军, 王子健. 微米级铝粉产氢动力学试验及微观形貌变化规律研究[J]. *有色金属:中英文*, 2025, 15(3): 368–375.
- WANG Xinyang, CUI Tiejun, WANG Zijian. Experimental study on hydrogen production kinetics and microscopic morphology change of micron-sized aluminum powder[J]. *Nonferrous Metals*, 2025, 15(3): 368–375.
- [6] WANG Xinyang, LI Gang, ECKHOFF R K. Kinetics study of hydration reaction between aluminum powder and water based on an improved multi-stage shrinking core model[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(67): 33 635–33 655.
- [7] NIE Hongqi, SCHOENITZ M, DREIZIN E L. Calorimetric investigation of the aluminum-water reaction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(15): 11 035–11 045.
- [8] 庞磊, 李超, 钟圣俊, 等. 铝、镁及其合金粉遇湿反应动力学机理及产氢规律[J]. *北京理工大学学报*, 2025, 45(11): 1 185–1 193.
- PANG Lei, LI Chao, ZHONG Shengjun, et al. Reaction kinetics mechanism and hydrogen production law of aluminum, magnesium and alloy powders upon exposure to moisture [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2025, 45(11): 1 185–1 193.
- [9] PANG Lei, LI Chao, LIU Jiqing, et al. Study on the hydrogen production law and reaction kinetics mechanism of aluminum powder oxidation under different moisture content conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 100: 319–329.
- [10] MAGUIRE J, WOODCOCK L V. Thermodynamics of tower-block infernos: effects of water on aluminum fires[J]. *Entropy*, 2019, 22(1): DOI:10.3390/e22010014.
- [11] NISHIWAKI Y, SATO Y. Exothermic reaction of fine and coarse magnesium powders with water[J]. *Science and Technology of Energetic Materials*, 2022, 83(1): 20–27.
- [12] SACELEANU F, VUONG T V, MASTER E R, et al. Tunable kinetics of nanoaluminum and microaluminum powders reacting with water to produce hydrogen[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(13): 7 384–7 396.
- [13] 王延瞳, 许开立, 李力, 等. 铝颗粒与水反应产氢影响因素及抑制[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2018, 39(5): 731–735.
- WANG Yantong, XU Kaili, LI Li, et al. Influencing factors and inhibition of hydrogen produced by aluminum and water reaction[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2018, 39(5): 731–735.
- [14] 邢婧, 毕跃, 崔瀚. 铝粉遇水燃烧爆炸危险性的实验研究[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2022, 32(2): 185–188.
- XING Jing, BI Yue, CUI Han. Experimental study on risk of combustion and explosion of aluminum powder in water[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2022, 32(2): 185–188.
- [15] 盖卫卓. 纯铝粉体与水反应产氢及其相关影响因素的研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- GAI Weizhuo. Hydrogen-generation by the reaction of pure Al powder with water and the related influencing factors[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.



作者简介: 刘吉庆 (1997—),男,河南开封人,博士研究生,主要研究方向为粉尘爆炸与事故防控。E-mail: liujq1025@163.com。