

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.02.006

某增材制造用铝镁合金粉遇湿热行为的研究*

薄晨琦^① 林建^② 孙华^② 肖秋平^② 商照聪^①

①上海化工研究院有限公司(上海,200062)

②上海化工院检测有限公司(上海,200062)

[摘要] 用于制造增材的铝镁合金粉遇湿易发生爆炸事故。为探究含水铝镁合金粉发生热失控的危险性,对铝镁混合体系的起始放热温度、比放热量以及在绝热条件下的放热行为与产氢特性开展实验。结果表明:镁质量分数为9%的铝镁混合体系反应存在2个放热峰;放热峰I的起始温度随含水率的增大而提升至100℃;含水率大于17%时,放热峰II的最小放热量超过800 J/g,失控反应的严重度等级为灾难性的;由于镁元素的添加,混合体系热失控严重度最大提升了200%;绝热条件下,66%含水率的混合体系氢气最大比产气量达到8.71 mol/kg,30%含水率的混合体系发生失控反应的严重度最高,最大比放热量为1 878.69 J/g,修正后绝热升温为930.10 K。揭示了铝镁合金粉遇湿引发热失控的机理,为铝/水反应热失控理论模型的建立提供了有力依据。

[关键词] 铝/水反应;严重度;热失控;反应热动力学

[分类号] TQ560.7

Thermal Behavior of Aluminum Magnesium Alloy Powder Used for Manufacturing a Certain Additive When Exposed to Humid Environments

BO Chenqi^①, LIN Jian^②, SUN Hua^②, XIAO Qiuping^②, SHANG Zhaocong^①

① Shanghai Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd. (Shanghai, 200062)

② Shanghai Research Institute of Chemical Industry Testing Co., Ltd. (Shanghai, 200062)

[ABSTRACT] Aluminum magnesium alloy powder used for additive manufacturing may cause explosion accidents in humid environments. In order to investigate the danger of thermal runaway of water containing aluminum magnesium alloy powder, experiments were carried out on the onset temperature of exothermic peak, specific exothermic capacity, exothermic behavior and hydrogen production characteristics under adiabatic conditions of the mixed system. The results show that there are two exothermic peaks in the reaction of the mixed system of aluminum magnesium alloy powder with 9% magnesium content. The onset temperature of exothermic peak I increases to nearly 100 °C with the increase of water content. When the mass fraction of water is greater than 17%, the minimum heat release of exothermic peak II exceeds 800 J/g, and the severity level of the uncontrolled reaction is catastrophic. Due to the addition of magnesium, the severity of thermal runaway in the mixed system increased by up to 200%. Under adiabatic conditions, the specific hydrogen production of the mixed system with a water mass fraction of 66% reaches the maximum value of 8.71 mol/kg, while the mixed system with a water mass fraction of 30% has the highest severity of runaway reactions, with a maximum specific heat release of 1 878.69 J/g and a revised adiabatic temperature rise of 930.10 K. It revealed the mechanism of thermal runaway caused by moisture exposure of aluminum magnesium alloy powder, providing a strong basis for the establishment of a theoretical model of thermal runaway in aluminum/water reactions.

[KEYWORDS] aluminum/water reaction; severity; thermal runaway; reaction thermodynamic

* 收稿日期:2024-11-27

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3010605)

第一作者:薄晨琦(1999—),男,硕士研究生,主要从事化工安全的研究。E-mail:a18538057129@163.com

通信作者:肖秋平(1984—),男,正高级工程师,硕导,主要从事工业安全的研究。E-mail:xqp@ghs.cn

0 引言

金属铝及铝合金具有优异的物理化学性能,已成为工业用轻质金属材料不可或缺的一部分,被广泛应用于汽车工业、航空航天、粉末冶金等领域。铝及铝合金制品在传统机加工过程当中会产生大量废屑粉尘,极易引发粉尘云爆炸事故^[1]。2014年,某公司发生一起特别重大的粉尘爆炸事故,造成146人死亡,直接经济损失3.51亿;该企业采用干式布袋除尘器吸收轮毂打磨抛光过程中产生的铝粉尘;由于集尘桶破损,铝粉尘受潮发生氧化放热反应,开启除尘器后在料仓内形成粉尘云,继而引发爆炸^[2]。据不完全统计,在我国近几年发生的粉尘爆炸事故当中,金属粉尘爆炸事故占比达到了45.24%;而金属粉尘爆炸中,镁铝粉尘爆炸引起的事故又远多于其他金属粉尘^[3]。传统机加工作业的铝粉尘往往来自于生产工艺后端除尘系统。上述爆炸事故发生后,相关行业开始推行湿法除尘来减少金属粉尘云的产生,机械加工工艺安全得到了有效保障。采用湿法除尘既提高了除尘效率,又避免了粉尘云爆炸。然而,由于铝、镁的性质活泼,可与水发生反应并产生大量热和氢气^[4],使得湿法除尘存在热累积与潜在气体爆炸风险,近年来同样发生过燃爆事故。如2019年,某公司发生一起镁合金废屑遇湿爆炸事故,造成7人死亡^[5]。

2023年,某增材制造设备车间发生一起铝镁合金粉遇湿爆炸事故,造成3人死亡^[6]。事故调查显示,作业人员更换滤芯时采用湿法处理,对充满铝镁合金粉的滤芯加水,导致发生反应热失控,继而引发爆炸事故。该起爆炸事故与上述机加工过程的粉尘爆炸存在不同之处,主要体现在:1)金属增材制造工艺全程采用氮气保护;2)有别于传统机加工工艺,该工艺采用微米级金属粉作为生产原料;3)与工业用铝镁合金中镁的质量分数(2%)不同,事故中样品的镁元素质量分数(9%)较高;4)与湿法除尘不同,该起事故是在更换滤芯时采用湿法处理。

以往大量研究集中于铝/水混合体系的产气抑制和促进方面^[7],针对铝镁合金粉遇湿发生爆炸的研究较少。为研究该起事故发生的根本原因,将以含镁质量分数9%的铝镁合金粉为研究对象,探究铝镁合金粉与水混合体系(后文统称铝镁混合体系)的放热起始温度、混合体系发生失控反应的严重程度、镁元素的存在对混合体系反应失控的影响以及混合体系的产氢特性。

1 实验

1.1 实验材料

研究对象采用与文献[6]中金属增材制造粉尘爆炸事故样品成分一致的铝镁合金粉(镁元素质量分数9%);还采用相同中位径的铝粉作为对照进行实验。实验前,采用激光粒度仪(Mastersizer 3000)和扫描电镜(Merlin Compact)对2种样品的粒度和外观进行测试分析。2种样品的中粒径均为30 μm左右。扫描电镜显示,二者均为表面光滑、致密的球形粉末。

粒度结果见图1、图2;外观见图3。

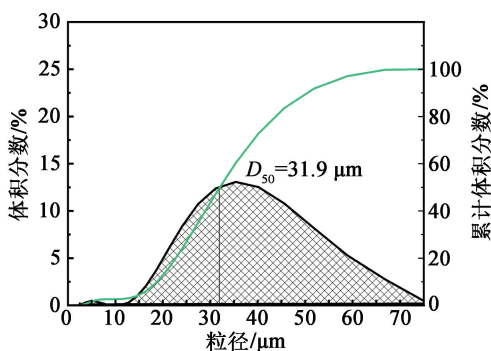


图1 铝镁合金粉的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of aluminum-magnesium alloy powder

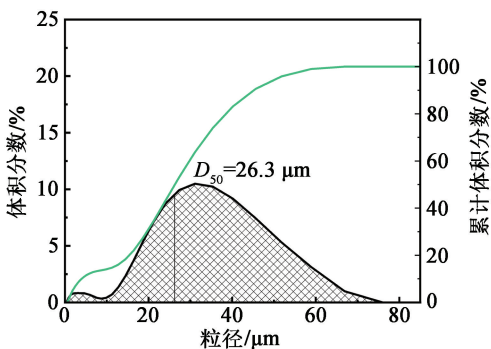
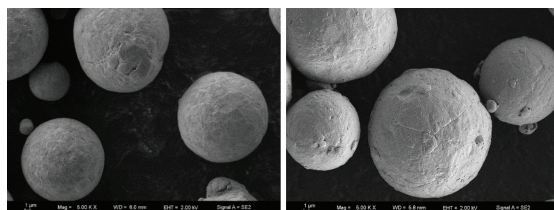


图2 铝粉的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of aluminium powder



(a) 铝镁合金粉

(b) 铝粉

图3 扫描电镜图

Fig. 3 SEM images

1.2 实验方法

起始放热温度与反应放热研究使用梅特勒托利多公司的 DSC3 型差示扫描量热仪。采用密闭金坩埚作为测试样品池,容积 30 μL ,耐压 15 MPa。在手套箱(氮气气氛)中进行称样(8 mg 以内),吹扫气流速度为 50 mL/min,采用移液枪添加水分,升温速率为 10 K/min,温度范围在 25 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$ 。

在绝热条件下的放热与产气特性研究使用耐驰公司的 ARC254 型绝热加速度量热仪。为保证样品混合均匀,分别将铝粉、铝镁合金粉与水在手套箱(氮气气氛)中进行搅拌 5 min,称取适量样品(0.5 g 以内)装入样品球。采用“加热-等待-搜索”(简称 H-W-S)加热模式,检测灵敏度为 0.02 K/min,等待时间为 15 min。测试样品池为 10 mL 的哈氏合金球,温度范围在 30 ~ 300 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 铝镁混合体系的起始放热温度及比放热量

为研究铝镁混合体系的起始放热温度与比放热量,对含水率(水的质量分数)在 0 ~ 75% 之间,共计 12 组的铝镁混合体系进行动态差示扫描量热(DSC)实验。DSC 测试结果如图 4 所示;放热结果见表 1。

从图 4 可以看出:当含水率为 6% 时,仅有 1 个放热峰,在 400 $^{\circ}\text{C}$ 附近出现;当含水率大于 8% 时,在 100 $^{\circ}\text{C}$ 和 350 $^{\circ}\text{C}$ 左右分别出现 2 个明显的放热峰,分别为峰 I 和峰 II。反应起始温度的变化趋势显示,当含水率大于 50%,峰 I 的起始温度从 85 $^{\circ}\text{C}$ 左右升至 100 $^{\circ}\text{C}$ 附近。这是由于含水率增大后,反应放出的一部分热量被水分吸收汽化,说明在水分不足的情况下更低的温度就能引发热失控。含水率大于 8%,峰 II 的起始温度在 300 ~ 320 $^{\circ}\text{C}$ 之间。

表 1 不同含水率下 DSC 测试的峰温

Tab. 1 Peak temperature measured by DSC with different moisture contents

含水率/ %	峰 I		峰 II	
	起始 温度 / $^{\circ}\text{C}$	比放 热量/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	起始 温度 / $^{\circ}\text{C}$	比放 热量/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
0	—	—	—	—
6	—	—	388.93	369.42
8	82.33	348.91	416.56	488.41
10	82.28	534.90	305.36	600.60
15	83.81	572.26	320.14	633.31
17	85.64	637.15	327.13	834.58
20	85.50	650.56	321.78	1 422.01
30	81.55	451.36	281.04	1 902.37
50	88.16	309.15	296.34	3 932.08
60	97.43	109.12	298.01	4 398.04
66	106.82	102.67	278.37	4 903.91
75	97.32	111.61	298.66	2 801.56

从反应热量的角度分析,随着含水率的增加,峰 I 的比放热量呈现出先增大、后降低的趋势;峰 II 比放热量的变化趋势与峰 I 类似,在达到铝/水反应化学计量比时,峰 II 的比放热量最大为 4 903.91 J/g;含水率大于 66%,由于一部分热量用于水汽化吸热,峰 I、峰 II 的比放热量开始降低。此外,当含水率大于 15%,峰 II 的比放热量均大于 800 J/g,根据安全失控反应严重度准则,表明该反应一旦发生,反应热失控的严重度将是灾难性的^[8]。

DSC 实验结果表明,含水率在 8% ~ 75% 时,铝镁混合体系存在 2 个不同阶段的反应。铝粉表面具有一层氧化铝薄膜,在与水接触时会先发生水合反应,见式(1);生成的水合膜又会重新与铝反应,并重新生成氧化铝薄膜,伴随氢气的产生,见式(2);过量的氢气引发水合膜破裂后,铝与水直接接触发

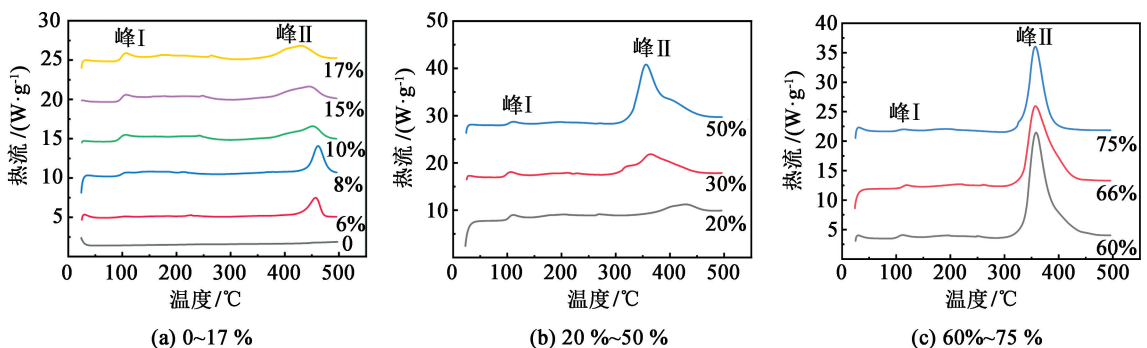
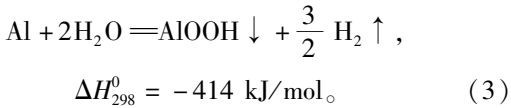
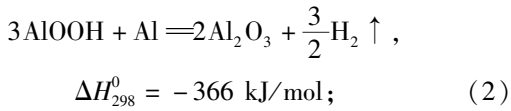
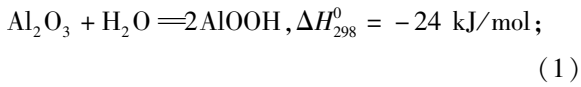


图 4 不同含水率下铝镁合金粉的 DSC 曲线

Fig. 4 DSC curves of aluminum-magnesium alloy powder with different moisture contents

生反应,见式(3)^[9]。



较小放热峰(峰 I)归因于水合反应;而较大的放热峰(峰 II)则由水合膜的增长、以及含水膜破裂后铝和水的直接反应产生。

在实际工业中,是直接将滤芯浸没在水槽中。因此,过量水(含水率大于 66%)和少量水(含水率小于 17%)条件下,铝镁混合体系安全系数相对较高;而含水率在 17%~66% 之间的铝镁混合体系一旦发生失控,反应严重度为灾难性的。

2.2 铝镁含量对放热行为的影响

为研究镁元素对失控反应严重度的影响,对比相同粒径下含水率分别为 15%、30%、66%(铝/水反应化学计量比)和 75% 的含水铝粉体系的热稳定性(表 2)。含水铝粉体系的 DSC 曲线见图 5。

表 2 比放热量比较

Tab. 2 Comparison of specific heat release results

含水率/ %	铝镁混合体系		含水铝粉体系	
	峰 I	峰 II	峰 I	峰 II
15	572.26	633.31	256.94	275.10
30	451.36	1 902.37	236.25	556.20
66	102.67	4 903.91	82.14	2 644.81
75	111.61	2 801.56	64.34	2 440.52

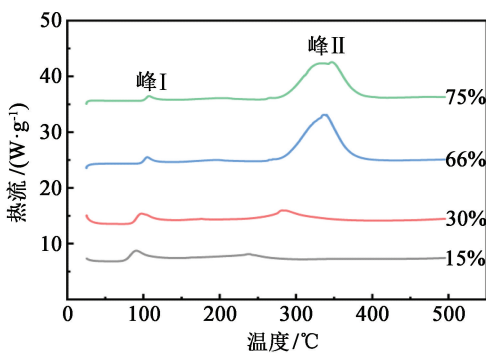


图 5 含水铝粉体系的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves of aluminum powder containing water

作为活泼金属,镁同样可以与水发生反应,放出热量。



铝镁混合体系的 DSC 测试中会先后出现 2 个不同的放热峰^[10];随着镁元素含量的增大,铝与金属之间的相互作用降低了铝镁合金与水反应的活化能^[11]。

对比两种混合体系的放热结果,在含水率相同时,铝镁混合体系的放热峰 I 与放热峰 II 均大于含水铝粉体系;此外,峰 II 的最大增幅超过了 200%;随着含水率的增大,两种混合体系峰 I 的比放热量都逐渐降低,峰 II 的比放热量则是先增大、后减小,均在铝/水反应化学计量比(含水率 66%)时达到最大。表明镁元素的添加增大了混合体系的反应失控严重度。

2.3 铝镁混合体系绝热环境下的放热与产氢效应

2.3.1 绝热条件下的放热效应

为研究铝镁混合体系在绝热条件下的放热与产氢特性,在 15%、30%、66%、75% 4 种含水率下,分别对 2 个体系进行绝热(ARC)实验,并对实验结果进行分析。绝热量热结果见表 3。温度-压力曲线如图 6、图 7 所示。

表 3 铝镁合金粉绝热量热结果

Tab. 3 Adiabatic thermal results of aluminum-magnesium alloy powder

含水率/ %	热惯量 φ	绝热升温 $\Delta T_{ad}/\text{K}$	比放热量/ $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	修正后绝热 升温/K
15	5.42	65.20	484.22	353.38
30	12.62	73.70	1 878.69	930.10
66	6.24	86.50	1 711.13	539.76
75	3.69	67.10	908.99	247.60

在绝热实验中,样品释放的热量有一部分不可避免地用来加热坩埚或量热容器,仅以实验结果来表征实际工况中发生的意外情况,显然并不够有说服力。因此,需要引入热惯量 φ 对绝热量热参数进行修正。根据反应安全风险评估准则中对于失控反应严重度的规定,绝热升温为 200 K 或 200 K 以上时,将会导致剧烈反应;绝热升温超过 400 K 的失控反应严重度为灾难性的^[8]。修正后,体系失控反应的严重度明显上升。其中,30% 含水率的铝镁混合体系的比放热量与修正后绝热升温在 4 种含水率下均为最大,分别为 1 878.69 J/g 和 930.10 K,表明在绝热环境下,较低的含水率更容易引发发热失控。

在 4 种含水率下的两种混合体系,反应一段时间后,温度与压力均出现了同步快速上升阶段;比放热量也随着含水率升高呈现出先增大、后减小的趋势。此外,容器内压力在温度上升至 200 °C 左右时,

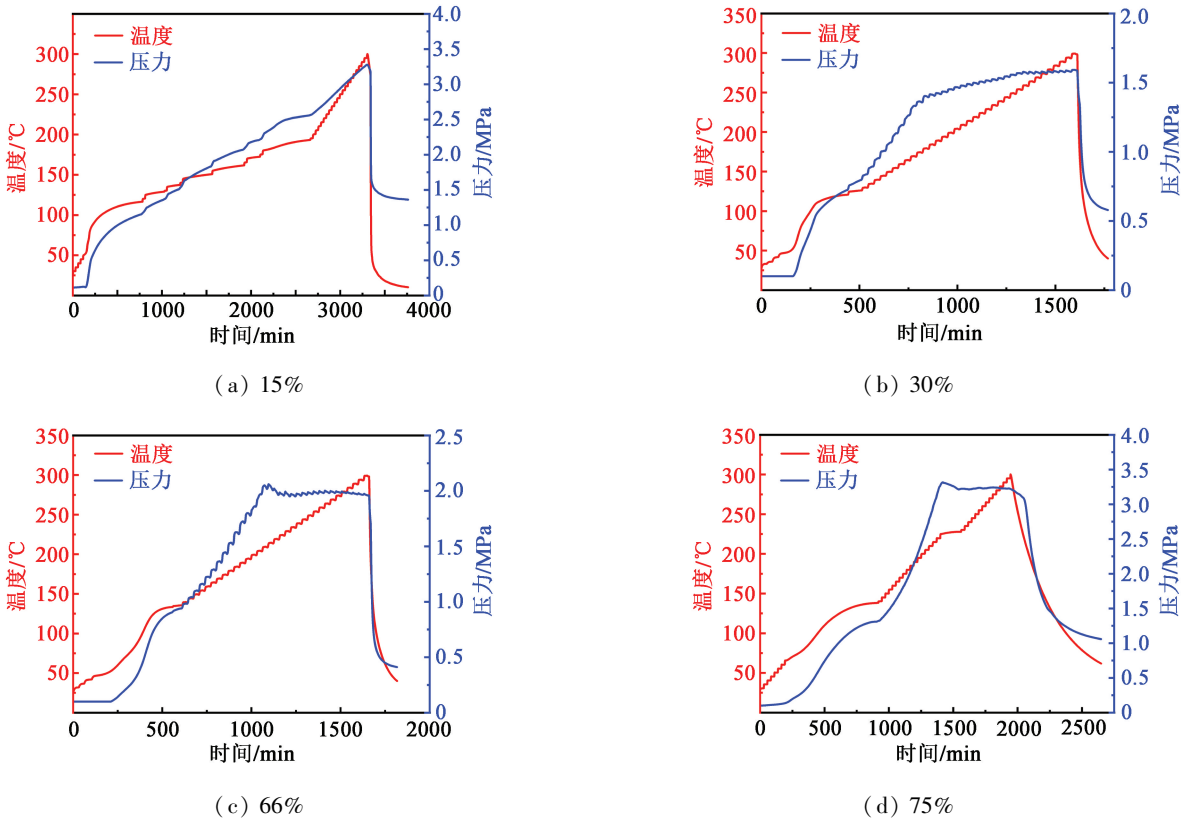


图6 不同含水率下铝镁混合体系的绝热量热曲线

Fig.6 Adiabatic thermal curves of aluminum-magnesium alloy powder mixed system with different moisture contents

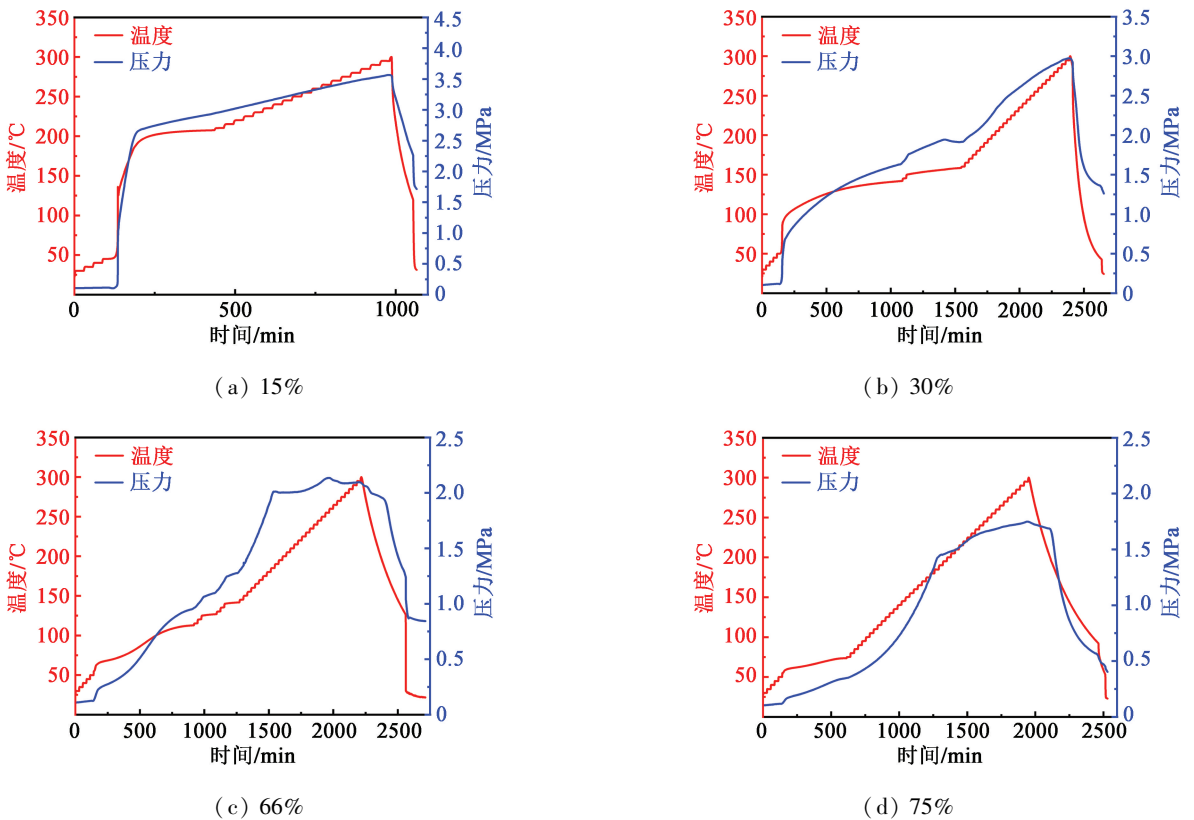


图7 不同含水率下含水铝粉体系的绝热量热曲线

Fig.7 Adiabatic thermal curves of aluminum powder mixed system with different moisture contents

发生了一定程度的下降。这是因为,反应产物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时发生了脱水反应,生成的 Al_2O_3 对水蒸气具有一定的吸附作用^[12],从而导致了压力的下降。

将 DSC 测试与 ARC 测试结果中不同混合体系的放热起始温度进行比较,见表 4。结果显示,在绝热条件下,混合体系 ARC 测试的起始温度低于 DSC 测试的结果。这是因为,ARC 测试能形成一个近似绝热的体系,更能接近实际工业中传热受限的情形,反应放出的热量均用来提高反应体系温度。铝粉、铝镁合金粉在传热受限且含有一定水分时,堆积尺寸越大,发生热失控的温度越低^[13]。以 66% 含水率下的铝镁混合体系为例,ARC 测试发生热失控的温度较 DSC 测试的温度最多下降了 56%。

表 4 不同测试条件下起始温度的比较

Tab. 4 Comparison of starting temperatures under different test conditions

含水率/ %	铝镁混合体系		含水铝粉体系	
	DSC	ARC	DSC	ARC
	°C			
15	83.81	51.20	79.28	45.34
30	81.55	47.01	82.02	50.19
66	106.82	47.00	89.11	61.76
75	97.32	65.57	93.01	58.50

2.3.2 绝热条件下的产氢特性

表 3 中可以看出:随着含水率的增大,比放热量呈现先上升、后下降的趋势。由于反应产生的主要气体为氢气,如果在实际工业生产当中发生热失控,将存在气、粉两相爆炸的潜在危险性。为更准确地计算混合体系在反应中的产气量,通常需要将压力分为 3 部分^[14]:背压 p_i 、蒸气压 p_v 和产气导致的压力 p_g ,表达式为

$$p = p_i + p_v + p_g \quad (5)$$

式(5)中的背压 p_i 套用 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的初始大气压,

$0.979 \times 10^5\text{ Pa}$ 。该体系下蒸气压主要来自水,可通过查阅数据库得知。实验中,所用容器的体积为 10 mL ,加入的样品和水的质量以及结束时的温度均已知,由此可以推算出加入样品后的剩余体积。之后,将气体当作理想气体,即可推算出产气量。

$$n = \frac{(p - p_i - p_v)V_{\text{剩}}}{RT} \quad (6)$$

式中: n 为气体物质的量; R 为理想气体常数,取 $8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{kg})$; T 为降温完成后样品球内温度; p 为降温完成后样品球内的压力; $V_{\text{剩}}$ 为装入样品后剩余的样品球容积。

反应后,样品容器小球内的压力和温度已知。因此,可以根据得到的样品物质的量和总质量求得单位质量的产气量(比产气量):

$$v = \frac{n}{m} \quad (7)$$

式中: m 为实验前样品的总质量。

根据反应方程式,可以计算出理论比产气量。根据表 5 中比产气量的数据可以看出,两种混合体系的比产气量均呈现出先升高、后下降的趋势;此外,两种体系的比产气量均在 66% 含水率时达到最大。事故中所用除尘器的容积约为 50 L 。氢气在空气中的爆炸极限体积分数为 $4.0\% \sim 75.6\%$ 。以实际产气量结果计算, 1 kg 铝镁混合体系含水率为 15% 时的产气量约为 25 L ,很容易达到爆炸浓度下限。

3 结论

对某金属增材制造中铝镁合金粉尘爆炸事故的原因进行分析,以铝镁合金粉作为研究对象,开展了铝镁混合体系和含水铝粉体系的反应放热特性与产氢效应的研究,结果表明:

1) 铝镁混合体系在 DSC 实验中出现了 2 个放热峰。放热峰的起始温度随含水率的变化呈现 2 种

表 5 绝热量热对比结果

Tab. 5 Comparison of adiabatic thermal results

含水率/ %	铝镁合金粉					铝粉				
	绝热 诱导期/ min	比放 热量/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	绝热 升温/ K	实际 比产气量/ ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	理论 比产气量/ ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	绝热 诱导期/ min	比放 热量/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	绝热 升温/ K	实际 比产气量/ ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	理论 比产气量/ ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
15	134	484.22	65.2	3.90	4.87	112	1 205.46	161.7	4.26	4.55
30	116	1 878.69	73.7	4.42	8.21	140	1 264.42	90.6	6.51	8.41
66	138	1 711.13	86.5	8.71	18.18	158	1 436.62	50.1	9.33	18.33
75	198	908.99	67.1	6.67	15.60	160	505.77	15.1	4.49	13.94

趋势:含水率大于 50% 后,峰 I 的起始温度从 85 °C 升至 100 °C 附近;含水率大于 8%,峰 II 的起始温度从 380 °C 降低至 300 °C 附近。

2) DSC 实验中,铝镁混合体系的含水率大于 17% 后,放热峰 II 的比放热量均大于 800 J/g,反应出现热失控行为的严重度等级为灾难性的;与含水铝粉体系相比,镁元素的存在会明显增大混合体系的热失控效应,峰 II 的比放热量最大增加 200%;绝热条件下,30% 含水率的铝镁混合体系发生热失控的严重度最高,修正后的绝热升温为 910.3 K。

3) 与 DSC 结果的峰 I 相比较,绝热条件下反应发生热失控的起始温度有所下降,最多下降了 56%,表明在实际工况下更低温度时就可能发生热失控。

4) 含水率为 15%、30%、66%、75% 的铝镁混合体系在绝热条件下发生失控反应,压力会明显上升,并伴随着明显的产氢效应。比产气量分别为 3.90、4.42、8.71、6.67 mol/kg。在较短时间内就能达到氢气的爆炸极限。

参 考 文 献

- [1] 卢国菊,于丽雅,高彩军. 铝粉及铝镁混合粉的爆炸特性[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(6): 82-85.
LU G J, YU L Y, GAO C J. Study on the explosion characteristics of aluminium powder and aluminium magnesium mixed powder [J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(6): 82-85.
- [2] LI G, YANG H X, YUAN C M, et al. A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 39: 121-130.
- [3] 多英全,刘垚楠,胡馨升. 2009~2013 年我国粉尘爆炸事故统计分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 186-190.
DUO Y Q, LIU Y N, HU X S. Statistical analysis on dust explosion accidents occurring in China during 2009—2013 [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(2): 186-190.
- [4] CAI J Z, LIANG Y T, JIA R T, et al. Investigating the explosion hazard of hydrogen produced by activated aluminium in a modified Hartmann tube [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(35): 15933-15941.
- [5] 江苏省昆山“3·31”事故省市联合调查组. 昆山汉鼎精密金属有限公司“3·31”较大爆燃事故调查报告[R]. 昆山: 苏州市应急管理局, 2019.
- [6] 上海市人民政府事故调查组. 上海临港汉邦科技公司“9·14”中效净化箱较大爆炸事故调查报告[R]. 上海: 上海市应急管理局, 2024.
- [7] ZHANG Y Y, XU K L, LIU B, et al. Suppression method of industrial Al alloy powder explosion in dry and humid environment: a low-cost intrinsic safety technology [J]. Advanced Powder Technology, 2023, 34(9): 104131.
- [8] STOESSEL F. Thermal safety of chemical processes: risk assessment and process design [M]. John Wiley & Sons, 2021.
- [9] DENG Z Y, FERREIRA J M F, SAKKA Y. Hydrogen-generation materials for portable applications [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(12): 3825-3834.
- [10] 肖秋平. 镁水混合体系热失控致灾演化过程的实验和理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [11] KOZIN L F, VOLKOV S V, GONCHARENKO S G, et al. Kinetics and mechanism of interaction of aluminum and magnesium of Al-Mg-Bi ternary system with water [J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2011, 47(2): 171-180.
- [12] RUBASINGHEGE G, GRASSIAN V H. Surface-catalyzed chlorine and nitrogen activation: mechanisms for the heterogeneous formation of ClNO, NO, NO₂, HONO, and N₂O from HNO₃ and HCl on aluminum oxide particle surfaces [J]. Journal of Physical Chemistry A, 2012, 116(21): 5180-5192.
- [13] 葛双优. 抛光铝粉热自燃机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
GE S Y. Study on the mechanism of auto ignition of aluminum dust from polishing process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [14] 董泽. 反应体系热失控压力泄放的实验及理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
DONG Z. Experimental and theoretical research on the pressure relief of thermal runaway reaction systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.