

# CO<sub>2</sub>氛围下Mg对nAl着火及燃烧过程的影响

周宇<sup>1</sup>,魏凌刚<sup>2</sup>,彭文国<sup>2</sup>,马清旺<sup>1</sup>,林其钊<sup>3\*</sup>

(1.六盘水师范学院 物理与电气工程学院,贵州 六盘水 553004;

2.六盘水市红果开发区龙鼎工贸有限公司,贵州 六盘水 553513;

3.中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230026)

**摘要:**铝(Al)和镁(Mg)是目前应用最广泛的航空发动机固体推进剂。然而,Al在空气中燃烧时很容易形成氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),并在颗粒表面形成薄膜,严重阻碍燃料颗粒与氧化剂的混合,导致燃烧不完全。原位资源利用(In-situ resource utilization, ISRU)被认为是太空探索计划所需的关键技术,充分利用火星大气中丰富的CO<sub>2</sub>作为航空发动机动力能源,对降低深空探索成本具有重大意义。为此,通过热重分析(TGA)和燃烧实验,对CO<sub>2</sub>氛围下Mg掺混纳米铝(nAl)混合样品的热增重过程和燃烧过程进行实验,并结合X射线衍射技术、扫描电子显微镜和能谱仪对燃烧产物的微观形貌及晶体结构进行分析,探究Mg对nAl燃烧行为的调控机制。研究结果表明:nAl与Mg单独燃烧时表现出显著差异,掺混质量分数内20%~30%的Mg可显著改善nAl的着火性能,使其着火延迟时间缩短47.88%,燃烧持续时间提升51.47%。然而,Mg的掺混对nAl的缓慢氧化过程无明显促进作用,仅在800~860℃范围内且Mg的掺混比例大于30%时才表现出微弱协同效应,其他条件下则呈现相互抑制作用。此外,燃烧产物的团聚现象未因Mg的掺混而改善,表明Mg对nAl燃烧行为的调控作用具有局限性。

**关键词:**纳米铝;Mg;CO<sub>2</sub>氛围;掺混燃烧

**中图分类号:**TK16 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-055X(2026)01-0026-13

**收稿日期:**2025-05-30

**基金项目:**国家重点研发计划“火电行业率先碳达峰关键技术标准研究”(2021YFF0601004);贵州省科技厅科学技术基金“低热值煤层气掺混二甲醚扩散燃烧特性及其互换性研究”(黔科合基础-ZK[2021]一般280)。

**作者简介:**周宇,男,贵州盘州人,工学博士,副教授,主要从事多源固废协同处置及煤系共伴生资源综合利用研究;魏凌刚,男,贵州盘州人,主要从事矿山机械研究;彭文国,男,贵州盘州人,主要从事矿山机械研究;马清旺,男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事煤矸石资源化利用研究;林其钊,男,安徽阜阳人,工学博士,教授,主要从事燃烧技术研究。

**\*通信作者:**林其钊

Al和Mg具有能量密度高、燃烧产物无毒、易获取、成本低等特点<sup>[1]</sup>,是目前应用最广泛的航空发动机固体推进剂<sup>[2-3]</sup>。然而,尽管已经开展了大量基础研究,但因其燃烧的复杂性,Al的燃烧过程尚未完全了解<sup>[4]</sup>。Al在空气中燃烧时很容易形成氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>[5-6]</sup>,并在颗粒表面形成薄膜,严重阻碍燃料颗粒与氧化剂的混合。此外,Al与空气中氮气(N<sub>2</sub>)发生反应会生成氮化铝(AlN)和氮氧化铝(AlON),促进了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的生成<sup>[7-8]</sup>。火星探测是我国深空探测的关键环节,原位资源利用(In-situ resource utilization, ISRU)作为一项颠覆性技术,能够有效降低任务成本和风险,被列为载人深空探测优先发展的核心技术之一<sup>[9]</sup>。火星大气中含有96%的CO<sub>2</sub><sup>[10]</sup>,充分利用火星大气中的CO<sub>2</sub>作为航空发动机动力能源,对降低深空探索成本具有重大意义。

目前,大部分研究集中于Al粉在空气或N<sub>2</sub>中的燃烧,对Al在CO<sub>2</sub>氛围中的燃烧研究相对较少。Yuasa等<sup>[11]</sup>对Al在CO<sub>2</sub>氛围中的着火和燃烧进行了实验研究,结果表明气态Al与CO<sub>2</sub>反应生成了AlO,CO和致密的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。Assovskii等<sup>[12]</sup>对Al在CO<sub>2</sub>中燃烧时凝聚相的形成机理进行了研究,结果表明,Al在富能材料中的使用效率往往会因为燃烧产物中凝聚相质量分数的增加而降低。Rossi等<sup>[13]</sup>、Glumac等<sup>[14]</sup>对Al颗粒在CO<sub>2</sub>中自由下落的燃烧进行了实验研究,测量了不同粒径Al颗粒的燃烧时间和燃烧温度。Sarou-Kanian等<sup>[15]</sup>、Sarou等<sup>[16]</sup>研究了Al液滴在干燥和潮湿CO<sub>2</sub>中的燃烧,结果表明,Al液滴在干燥的CO<sub>2</sub>中燃烧时,表面会形成氧化帽,而在潮湿的CO<sub>2</sub>中并未形成,因为水蒸气的存在,燃烧过程中产生了氢气,促进了氧化帽的分解。还有研究表明,与纯Al颗粒相比,合金颗粒可能具有更高的热量值<sup>[17-18]</sup>和更好的点火燃烧性能<sup>[19-20]</sup>,通过掺混其他金属颗粒还能减缓Al的团聚效应<sup>[21-22]</sup>。然而,关于金属掺杂改善铝燃烧性能的作用机制与适用范围,目前仍存在争议<sup>[23-24]</sup>。本文通过热重分析和燃烧实验,对CO<sub>2</sub>氛围下Mg掺混nAl混合样品的热增重过程和燃烧过程进行研究,结合X射线衍射技术、扫描电子显微镜和能谱仪对燃烧产物的微观形貌及晶体结构进行分析,探究Mg对nAl燃烧行为的调控机制。

## 1 材料与方法

实验材料主要为nAl和Mg,均来自阿拉丁试剂(上海)有限公司。nAl和Mg的宏观、微观形貌及热物理参数分别如表1和表2所示。

表1 nAl的宏观、微观形貌及热物理参数




宏观形貌	微观形貌	纯度/%	夯实密度/(g/cm <sup>3</sup> )	疏松密度/(g/cm <sup>3</sup> )	粒径/nm
		>99.5	0.232	0.145	100

表2 Mg的宏观、微观形貌及热物理参数

宏观形貌	微观形貌	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点和沸点/ $^{\circ}\text{C}$	粒径/ $\mu\text{m}$
		1.74	648/1 090	10

实验主要仪器为瑞士 METTLER TOLEDO 公司生产的专业型 GA/DSC 3+同步热分析仪,荷兰 Philips 公司生产的型号为 X'Pert MPD 的 X 射线衍射仪,德国 ZEISS 公司生产的型号为 GeminiSEM 500 的扫描电子显微镜,英国 Oxford Instruments 公司生产的型号为 Aztecne 的能谱仪。燃烧实验平台主要包括立式加热炉、燃料输送系统、温度控制系统、气流控制系统和数据采集与处理系统。 $\text{CO}_2$  气体经质量流量控制器和气体稳流室进入立式加热炉,提供可控稳定的  $\text{CO}_2$  氛围。燃料粉末平铺于石英玻璃片上,通过步进电机以一定的速度送至燃烧室中央。燃烧室温度通过热电偶及温度控制器进行控制,燃烧过程通过高速相机记录并保存,如图 1 所示。

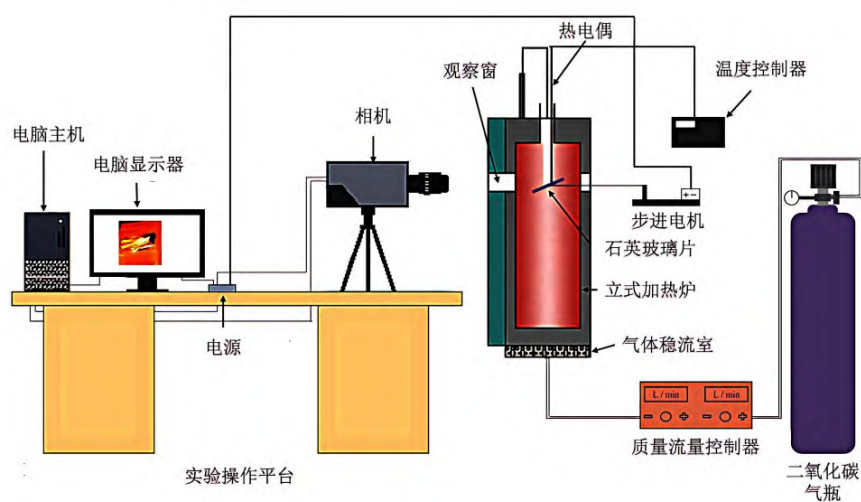


图1 燃烧实验平台

## 2 结果与分析

### 2.1 热重分析

在  $\text{CO}_2$  氛围下,以  $50 \text{ mL}/\text{min}$  的流速和  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的加热速率,将  $(4\pm 0.5) \text{ mg}$  样品从  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  加热至  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  开展热重实验。正式实验前进行空白实验以校正气体热膨胀导致的浮力变化,每组实验设置 3 个平行样本以保证结果的可靠性。在数据处理阶段,若发现异常数据,则进行重复测试直至 3 条热重(TG)曲线的标准差控制在 5% 以内,最终取符合要求的测试结果的平均值作为实验数据。

### 2.1.1 nAl/Mg热增重过程分析

nAl、Mg及nAl分别掺混10、20、30、40%Mg混合样品的TG和DTG曲线,如图2所示。

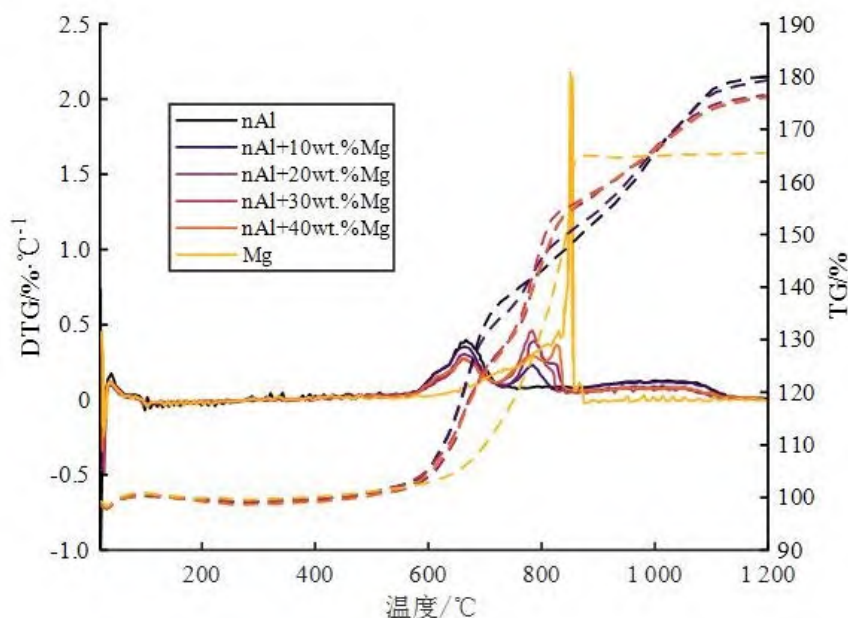


图2 nAl及其掺混不同比例Mg混合样品的TG和DTG曲线

从图2可以看出,CO<sub>2</sub>氛围下nAl和Mg的热增重过程均可以分为3个阶段,但存在明显区别:第一阶段为初始氧化阶段,分别发生在30~530℃和30~650℃,主要是nAl中少量水分的挥发及无定型Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的生成和Mg的缓慢氧化;第二阶段为剧烈燃烧阶段,无定型Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>逐渐成长为致密的γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Mg氧化生成MgO,样品的质量分别在530~758℃和650~873℃快速增加;随后各自进入燃尽阶段,对nAl燃烧过程产生的大量Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>覆盖在燃料颗粒表面,阻碍其与氧化剂的接触,燃烧速率下降,导致样品质量增加缓慢。而Mg样品的质量基本保持不变,因为在剧烈燃烧阶段已经被完全氧化。

Mg掺混后nAl/Mg混合样品的DTG曲线可以观察到2个峰,位于674℃和800℃附近,分别是由nAl和Mg的氧化造成的。随着Mg掺混比例的增加,674℃附近的峰逐渐降低,800℃左右的峰逐渐向高温区移动。从混合样品的TG和DTG角度看,Mg的掺混对nAl的缓慢氧化过程并没有明显的改善。

参照燃烧过程的分析,引入可燃性指数*C*和燃烧综合指数*S*<sup>[25]</sup>来分析CO<sub>2</sub>氛围下Mg的掺混对nAl热重过程的影响,计算方法见式(1)和式(2):

$$C = \frac{D_{TGmax}}{T_i^2} \quad (1)$$

$$S = \frac{D_{TGmax} \times D_{TGave}}{T_i^2 \times T_b} \quad (2)$$

式中： $C$ 表示可燃性指数( $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-3}$ )； $S$ 表示综合燃烧指数( $\%^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-5}$ )。可燃性指数和燃烧综合指数越高，表明燃烧性能越佳<sup>[26]</sup>。 $D_{\text{TGmax}}$ 、 $D_{\text{TGave}}$ 分别表示最大质量损失率和平均质量损失率，其值分别为DTG曲线峰值和平均值( $\% / ^\circ\text{C}$ )； $T_i$ 、 $T_p$ 、 $T_b$ 分别表示初始氧化温度、峰值温度和燃尽温度，根据TG-DTG外推法<sup>[27]</sup>获得，即在DTG曲线峰值温度处作TG曲线的切线，与失重开始时平行线交点对应的温度为初始氧化温度，与失重结束时平行线交点对应的温度为燃尽温度，峰值温度即DTG曲线峰值处对应的温度。峰值温度与初始氧化温度越小，说明反应所需能量越低，样品反应性越强。

$\text{CO}_2$ 氛围下Mg掺混nAl热重过程特征参数如表3所示。

表3  $\text{CO}_2$ 氛围下Mg掺混nAl热重过程特征参数

样品	$T_i$	$T_p$	$T_b$	$DTG_{\text{max}}$	$DTG_{\text{ave}} 10^{-2}$	$C 10^{-6}$	$S 10^{-10}$
nAl	615	677	1 100	0.40	6.05	1.06	0.58
nAl+10 % Mg	613	672	1 108	0.37	6.92	0.98	0.61
nAl+20 % Mg	621	789	1 100	0.41	6.67	1.06	0.64
nAl+30 % Mg	612	786	1 104	0.47	6.68	1.25	0.76
nAl+40 % Mg	614	832	1 103	0.39	6.68	1.03	0.63
Mg	829	856	861	2.18	5.75	3.17	2.12

从表3可以看出，随着Mg掺混比例的变化，样品的可燃性指数和燃烧综合指数均没有发生较大的变化，再次说明Mg的掺混对nAl的缓慢氧化过程没有明显改善。

### 2.1.2 nAl/Mg热增重过程中的相互作用分析

为了进一步考察二元混合燃料热增重过程中nAl和Mg之间的相互作用，引入质量剩余百分数理论值( $TG_{\text{theory}}$ )与实验值( $TG_{\text{exp}}$ )的偏差 $\delta_{\text{TC}}$ 进行分析<sup>[28-29]</sup>。其计算见式(3)和式(4)：

$$T_{\text{Gtheory}} = x \times T_{\text{GnAl}} + (1 - x) \times T_{\text{GMg}} \quad (3)$$

$$d_{\text{TG}} = (T_{\text{Gexp}} - T_{\text{Gtheory}}) / T_{\text{Gtheory}} \quad (4)$$

式中： $x$ 表示nAl的质量分数( $\%$ )； $TG_{\text{nAl}}$ 、 $TG_{\text{Mg}}$ 分别表示nAl和Mg单独燃烧时剩余质量百分比的实验值( $\%$ )。

理论上，如果nAl和Mg之间不存在相互作用，共燃时样品剩余质量百分比的变化规律应该遵循单独燃烧时各自剩余质量百分比变化规律的加权平均<sup>[30]</sup>，即 $\delta_{\text{TC}}=0$ 。 $\delta_{\text{TC}} > 0$ 则说明nAl和Mg之间存在协同作用，反之则存在抑制作用。

nAl与Mg共燃过程中其质量剩余百分数理论值与实验值偏差的计算结果如图3所示。

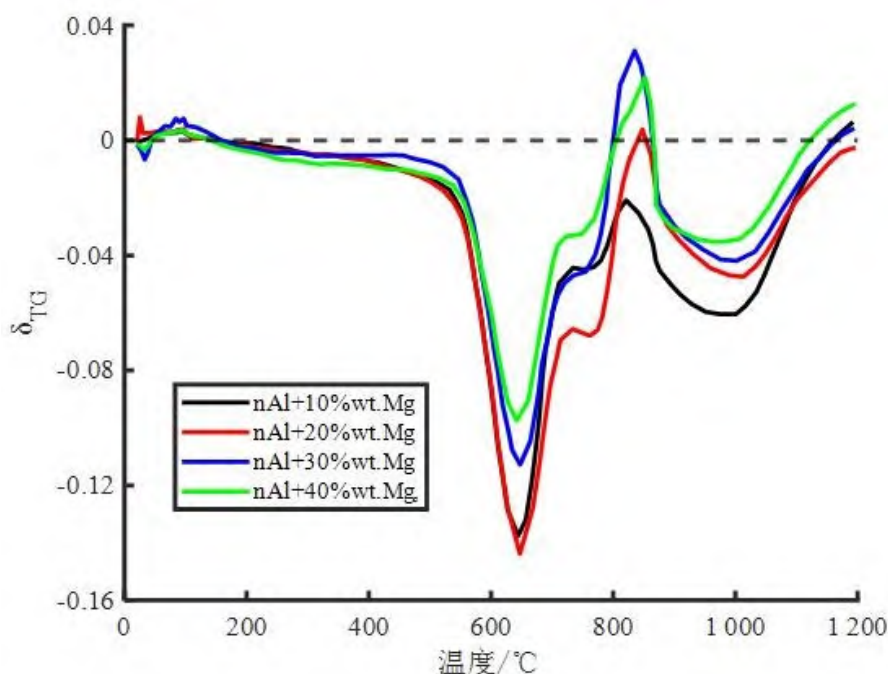


图3 共燃过程中nAl和Mg相互作用强度

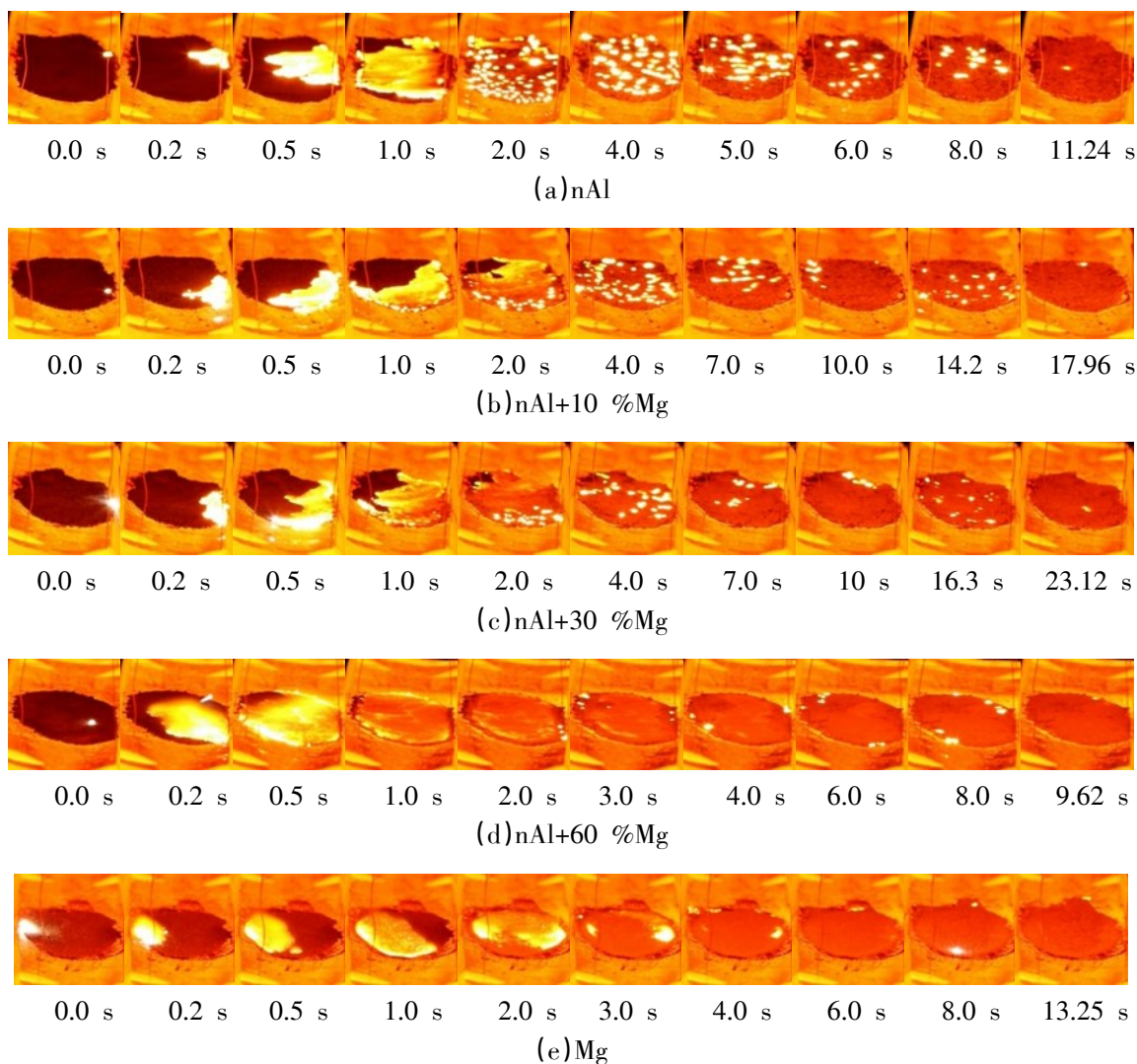
从图3可以看出,nAl与Mg仅在800~860℃范围内且Mg的掺混比例超过30%时存在相互促进作用,其余情况均存在相互抑制作用。nAl+20%Mg样品虽然也存在 $\delta_{TG} > 0$ 的区域,但存在的温度范围太窄,且相互促进作用强度很弱,可以忽略不计。这可能是因为Mg沸点较低,在高温下易气化,但在掺混比例较低或温度不足时,Mg主要以固态或液态存在,难以显著改变nAl的燃烧行为。同时,Mg可能干扰nAl颗粒的热传递和氧化过程,并与nAl竞争CO<sub>2</sub>作为氧化剂,削弱nAl的氧化速率,导致相互抑制。这些因素共同使得nAl与Mg的相互作用在多数情况下表现为抑制效应,仅在特定温度和掺混比例下才表现出促进作用。此外,通过图中出现的两个峰可以看出,随着Mg掺混比例的增加,nAl和Mg之间的相互抑制强度逐渐减弱,甚至可以在部分条件下转变为相互促进作用,如800~860℃内Mg的掺混比例超过30%时。这可能是因为较高比例的Mg掺混增加了Mg与CO<sub>2</sub>的反应放热( $Mg + CO_2 \rightarrow MgO + C$ ),通过提升局部温度和促进Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜的破坏,加速了nAl的燃烧反应,从而使两者作用从抑制转为促进。

## 2.2 燃烧实验分析

燃烧实验在燃烧实验平台上完成,燃烧室温度控制为900℃,以1.0 m/s的速度将0.5 g样品送至燃烧室中央,燃烧过程通过高速相机透过观察窗进行记录,实验结束后通过X射线衍射仪、扫描电子显微镜等对燃烧产物进行微观形貌观察和晶体结构检测。

### 2.2.1 燃烧过程分析

nAl及其掺混不同比例Mg样品燃烧过程随时间变化的图像如图4所示。



注:图像下方的数字表示时间。

图4 nAl及其掺混不同比例Mg样品的燃烧过程

从图4可以看出,nAl的燃烧过程表现出分散、不连通的形式,而Mg则呈现出连续燃烧的形式,燃烧过程中不仅发出灼热的白光,表面还出现薄薄的一层淡黄色火焰。当Mg的掺混比例低于60%时,混合样品的燃烧现象与nAl单独燃烧几乎没有差别;而当Mg的掺混比例超过60%时,燃烧现象与Mg单独燃烧极其相似;当Mg的掺混比例介于10%~40%时,样品燃烧过程中会出现许多近乎熄灭但随后又越发明亮的火焰,如nAl+10%Mg、nAl+30%Mg燃烧过程到第10s时,燃烧区域变得很小,但随着燃烧的继续,燃烧区域又显著增大,这可能是由于nAl和Mg的不同步燃烧造成的。因此,图4仅给出10、30、60%3种掺混比例下样品燃烧过程图像。

### 2.2.2 着火延迟时间与燃烧持续时间分析

为方便量化,引入着火延迟时间与燃烧持续时间,并分别定义为自样品到达炉膛至出

现明显燃烧现象和自燃烧现象出现至燃烧现象消失之间的时间间隔。用相机记录混合样品的着火延迟时间与燃烧持续时间的数据,如图5所示。

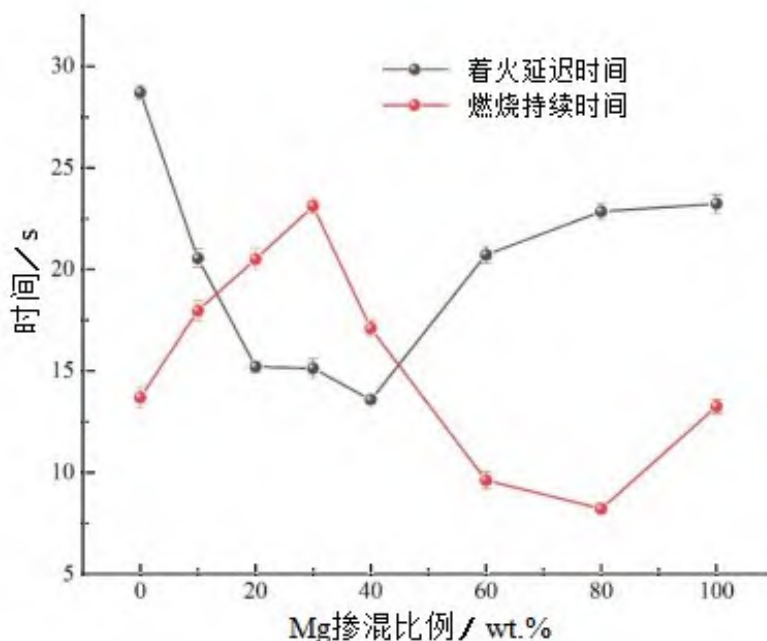


图5 混合样品着火延迟时间与燃烧持续时间

从图5可以看出,混合样品的着火延迟时间随着Mg掺混比例的增加先下降后升高,临界值为40%。少量Mg的掺混可以改善nAl的着火性能,掺混比例宜控制在20%左右,因为超过20%后随着掺混比例的继续增加着火延迟时间的下降已经变得很缓慢。混合样品的燃烧持续时间随着Mg掺混比例的增加,先升高后下降,临界值为30%。少量Mg的掺混可以延长燃烧持续时间,促进燃烧,掺混比例宜控制在20%~30%左右——在此范围内,nAl的着火延迟时间显著缩短了47.88%,燃烧持续时间提升了约51.47%。

误差棒反映了不同Mg掺混比例(0~100%)下混合样品着火延迟时间和燃烧持续时间的实验数据离散程度。对于着火延迟时间,在中等Mg掺混比例区间(如40%~60%)误差棒较短,表明该范围内实验结果具有较高的可重复性,这可能源于该比例区间内燃烧状态较为稳定。而在高Mg比例(大于80%)下,误差棒明显变宽,说明实验不确定性增大,可能是由于燃料富集条件下混合不均匀或点火过程不规律所致。对于燃烧持续时间,误差棒随Mg比例增加呈现逐渐扩大的趋势,表明随着燃料组成的变化,反应动力学的离散程度增大。这一现象可能与Mg氧化动力学和放热速率之间的复杂作用有关,在高Mg含量条件下,燃烧过程对实验参数的微小变化(如颗粒分散度、局部氧气浓度等)更为敏感。

### 2.2.3 燃烧产物分析

在CO<sub>2</sub>氛围下,nAl及其掺混不同比例Mg混合样品燃烧产物的XRD检测结果如图6所示。

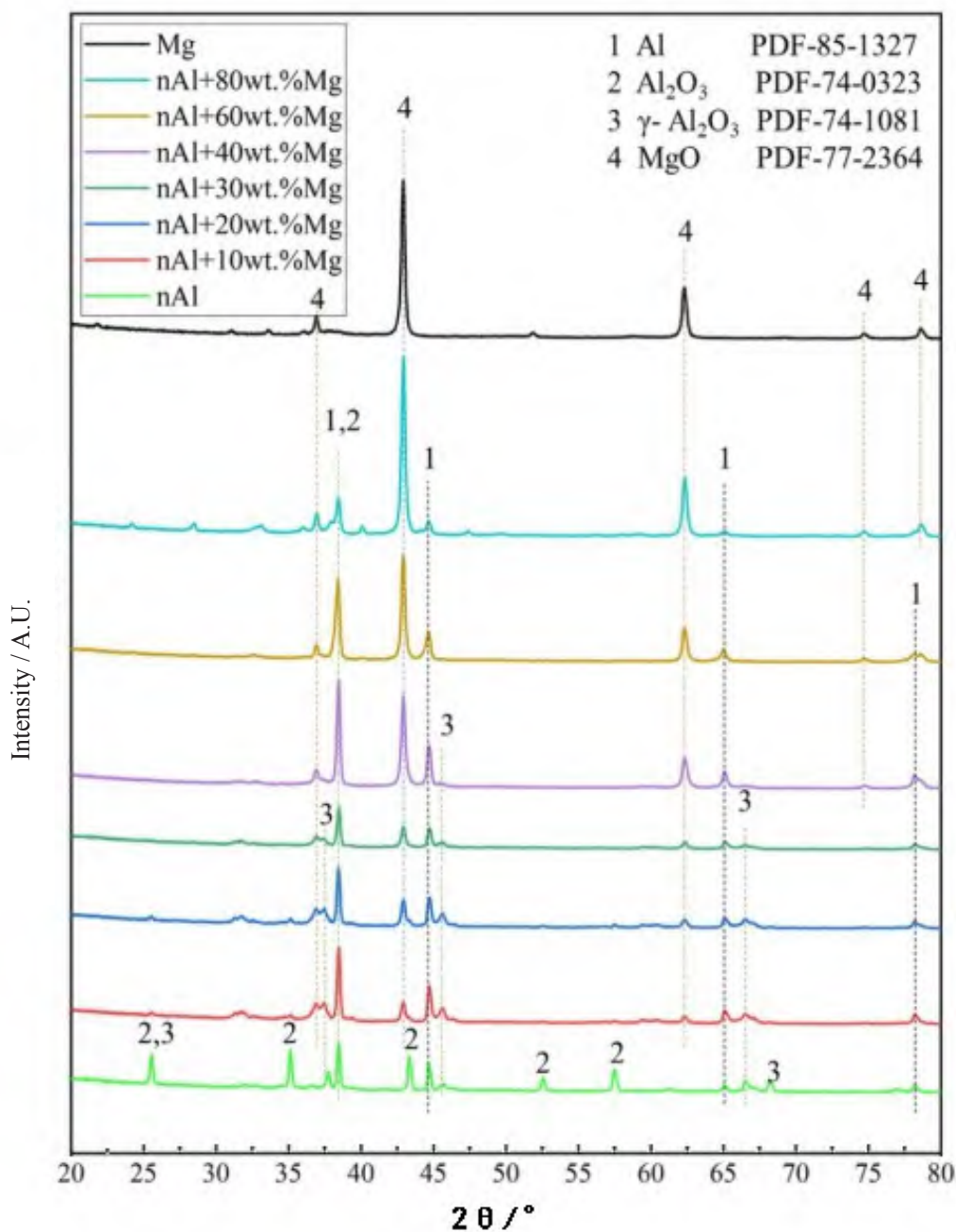
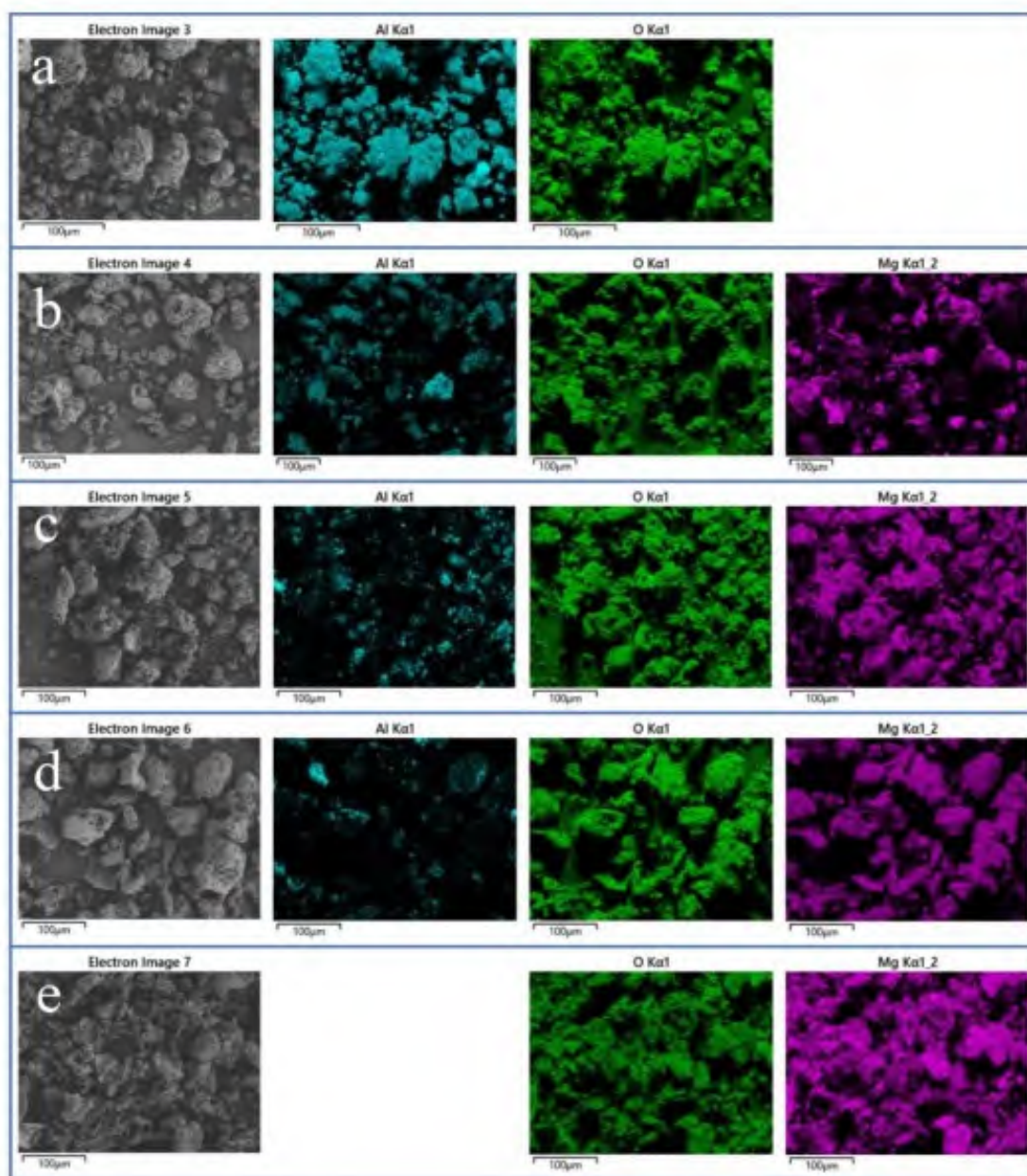


图6 nAl及其掺混不同比例Mg混合样品燃烧产物的XRD检测结果

从图6可以看出,随着Mg掺混比例的增加,MgO的含量和洁净度越来越高。 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 仅在Mg掺混比例小于等于40%时检测到,超过40%后对应的峰消失。同时产物中Al、 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量也越来越低。一方面是因为样品中Al含量的降低,另一方面也说明当Mg的掺混超过一定比例后,可以使nAl的燃烧更充分。此外,20%、30%Mg掺混比例下,所有燃烧产物的峰均较低且晶体粒度和洁净度也较小,20~30°扫描角度区间 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 对应的峰消失。

CO<sub>2</sub>氛围下nAl及其掺混不同比例Mg混合样品燃烧产物微观形貌与表面元素分布,自上而下(a~e)分别为nAl、nAl+20% Mg、nAl+40% Mg、nAl+60% Mg和Mg,如图7所示。



注:图中空白为nAl单独燃烧不检测Mg元素,Mg单独燃烧不检测Al元素。

图7 nAl及其掺混不同比例Mg混合样品燃烧产物微观形貌与表面元素分布

从图7可以看出,Mg单独燃烧的产物粒度较nAl更小,燃烧生成的MgO更不容易发生团聚。然而,nAl掺混不同比例Mg混合样品燃烧产物团聚现象仍然很严重,产物表面并不规则,团聚形成的团块粒度大小不一,最大的可以达到50 µm左右。此外,随着Mg含量

的增加,紫红色所占据的面积越来越大,Al的占比逐渐降低直至消失,O元素的变化并不明显。因此,Mg的掺混对nAl燃烧过程中的团聚并没有起到明显的改善作用。

### 3 研究结论

基于原位资源利用技术,采用热重分析和燃烧实验相结合的方法,系统研究了CO<sub>2</sub>氛围下镁(Mg)掺杂纳米铝(nAl)复合燃料的热增重特性及燃烧行为。通过同步热重分析仪记录混合样品在程序升温过程中的质量变化规律,并结合燃烧实验观测其燃烧特性,在此基础上,综合利用X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)及能谱分析(EDS)等,对燃烧产物的物相组成、微观形貌及元素分布进行多尺度表征。通过对比分析纯nAl与Mg/nAl复合体系的燃烧产物特征差异,重点探讨了金属Mg对nAl在CO<sub>2</sub>气氛中燃烧过程的调控作用机制,为新型铝基复合燃烧剂的优化设计提供理论依据。

首先,nAl与Mg单独燃烧时表现出显著差异,掺混20%~30%的Mg可显著改善nAl的着火性能,使其着火延迟时间缩短47.88%,燃烧持续时间提升51.47%。其次,Mg掺混对nAl的缓慢氧化过程无明显促进作用,仅在800~860℃内且Mg的掺混比例大于30%时表现出微弱协同效应,其他条件下则呈现相互抑制作用。最后,燃烧产物的团聚现象未因Mg的掺混而改善,Mg对nAl燃烧行为的调控作用具有局限性。

### 4 参考文献

- [1] Liu Lu, Ao Wen, Wen Zhan, et al. Modifying the ignition, combustion and agglomeration characteristics of composite propellants via Al-Mg alloy additives[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111926.
- [2] Qin Zhao, Yi Jianhua, Pang Weiqiang, et al. Effect of spherical Al-Mg-Zr on the combustion characteristics of composite propellants[J]. *FirePhys Chem*, 2022, 2(1): 14-19.
- [3] Pang Weiqiang, Deluca L T, Fan Xuezhong, et al. Combustion behavior of AP/HTPB/Al composite propellant containing hydroborate iron compound[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 220: 157-167.
- [4] Jiang Chunlong, Bi Haobo, Ni Zhanshi, et al. Study on combustion characteristics of nano-aluminum in different gas atmospheres and environment temperatures[J]. *Fuel*, 2023, 344(13): 1-12.
- [5] Law C K. A simplified theoretical model for the vapor-phase combustion of metal particles[J]. *Combustion Science & Technology*, 1973, 7(5): 197-212.
- [6] Bucher P, Yetter R A, Dryer F L, et al. PLIF species and ratio metric temperature measurements of aluminum particle combustion in O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O oxidizers, and comparison with model calculations[J]. *Symposium on Combustion*, 1998, 27(2): 2421-2429.
- [7] Edward L D. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion[J]. *Combustion & Flame*, 1999, 117(4): 841-850.
- [8] Prentice J L, Nelson L S. Differences between the combustion of aluminum droplets in air and in an oxygen-argon mixture[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1967, 115(8): 809-812.

- [9] 赵健楠,张诗琪,耿志卿,等. 火星资源赋存状况及其原位利用技术研究进展与展望[J]. 地质学报,2024,98(2):611-622.
- [10] 王启昌. 铝粉在二氧化碳气氛中的燃烧机理研究[D]. 合肥:安徽工业大学,2019:1.
- [11] Saburo Y, Sakurako S, Hiroshi I. Ignition and combustion of aluminum in carbon dioxide streams[J]. Symposium on Combustion, 1992,24(1):1817-1825.
- [12] Assovskii I G, Streletskii A N, Kolesnikov Svinarev V I. Mechanism of formation of the condensed phase in aluminum combustion in carbon dioxide[J]. Doklady Physical Chemistry, 2005, 405(1-3): 235-239.
- [13] Sergio R, Edward L D, Chung K L. Combustion of aluminum particles in carbon dioxide [J]. Combustion Science & Technology, 2001, 164(1):209-237.
- [14] Nick G, Herman K, Tim B, et al. Temperature measurements of aluminum particles burning in carbon dioxide[J]. Combustion Science & Technology, 2005, 177(3):485-511.
- [15] Kanian S V, Rifflet J C, Millot F, et al. Aluminum combustion in wet and dry CO<sub>2</sub>: consequences for surface reactions [J]. Combustion & Flame, 2006, 145(1-2): 220-230.
- [16] Olsen S E, Beckstead M W. Burn time measurements of single aluminum particles in steam and CO<sub>2</sub> mixtures[J]. Journal of Propulsion & Power, 2011, 12(4): 662-671.
- [17] Qian Jiawei, Liu Lu, Wei Kangting, et al. Ignition and Combustion Characteristics of Micro-Aluminum and Nano-Aluminum Mixture[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2025, 50(7): 115-123.
- [18] Feng Chaojie, Jin Xiao, Wang Zhangtao, et al. Ignition and combustion characteristics of micro/nano-Al and Al@ Ni alloy powders at elevated pressures [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 55: 104169.
- [19] Filippo M, Francesco Z. Combustion of nanoaluminum and magnesium in fuel - rich propellants [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(5): 724-729.
- [20] Rahimian S, Keshavarz M H. Boron as a combustion enhancer for aluminum nanoparticles in solid fuels[J]. Fuel, 2019, 241:644-652.
- [21] Liao Xueqin, Pei Jiangfeng, Xie Peini, et al. Aluminum particle agglomeration characteristics and suppression method during the combustion of aluminum - based solid propellants: a review [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2023, 49(1):1-13.
- [22] Dreizin E L, Shoshin Y, Chernenko K. Agglomeration suppression in metal combustion by mechanical alloying [J]. Combustion and Flame, 2022, 235: 111689.
- [23] Bazyn T, Krier H, Glumac N. Trade-offs in metalized energetic materials: dilution vs. reactivity [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3):3423-3430.
- [24] Gao Huanhuan, Xu Tuanwei, Hu Bozhi, et al. A fundamental study on ignition dynamics and combustion characteristics of Al-Mg alloys with varied magnesium content [J]. Combustion and flame, 2025, 281:114429.
- [25] 刘敬勇,傅杰文,孙水裕,等. 不同来源污泥混燃特性及其综合燃烧性能评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3):940-952.

- [26] 周宇,林其钊. 污泥掺混湿垃圾共燃特性研究及人工神经网络预测[J]. 热科学与技术, 2024, 23(6):541-550.
- [27] 齐佳楠,张瑛华,蓝海鹏,等. 污泥水热炭与生活垃圾混燃特性和交互作用研究[J]. 热力发电, 2025, 54(2):154-160.
- [28] Bi Haobo, Ni Zhanshi, Tian Junjian, et al. Influence of biomass on multi-component reaction model and combustion products of coal gangue[J]. Combustion and Flame, 2022, 240: 111999.
- [29] Sun Guang, Zhang Gang, Liu Jingyong, et al. (Co-) combustion behaviors and products of spent pot-lining and textile dyeing sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 224:384-395.
- [30] Chen Jianbiao, Mu Lin, Cai Jingcheng, et al. Thermal characteristics and kinetics of refining and chemicals wastewater, lignite and their blends during combustion[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 100:201-211.

## Effect of Mg on Ignition and Combustion Process of nAl in CO<sub>2</sub> Atmosphere

Zhou Yu<sup>1</sup>, Wei Linggang<sup>2</sup>, Peng Wenguo<sup>2</sup>, Ma Qingwang<sup>1</sup>, Lin Qizhao<sup>3\*</sup>

- (1. School of Physics and Electrical Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China;  
2. Liupanshui Hongguo Development Zone Longding Industry and Trade Co., Ltd., Liupanshui 553513, China;  
3. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Aluminum (Al) and magnesium (Mg) are widely used in solid propellants for aerospace engines. However, Al readily forms alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) during combustion in air, creating a film on the particle surface that severely hinders mixing between fuel particles and oxidizer, leading to incomplete combustion. In-situ resource utilization (ISRU) is considered a critical technology for space exploration programs. Utilizing the abundant CO<sub>2</sub> in the Martian atmosphere as a power source for aerospace engines holds significant importance for reducing the costs of deep-space exploration. In this study, thermogravimetric analysis (TGA) and combustion experiments were conducted to investigate the thermal weight gain and combustion processes of Mg-blended nano-aluminum (nAl) mixed samples in a CO<sub>2</sub> atmosphere; the microstructure and crystal structure of combustion products were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS) to elucidate the regulatory mechanism of Mg on nAl combustion. The results showed that nAl and Mg exhibited significantly distinct combustion behaviors when burned individually. Blending 20 % -30 % Mg significantly improved the ignition performance of nAl, reducing its ignition delay time by 47.88% and increasing its combustion duration by 51.47%. However, Mg blending showed no significant promoting effect on the slow oxidation process of nAl. A weak synergistic effect was only observed within the temperature range of 800 °C to 860 °C and when the Mg blending ratio exceeded 30 %, whereas mutual inhibition dominated under other conditions. Furthermore, the agglomeration phenomenon of combustion products was not alleviated by Mg blending, suggesting that the regulatory effect of Mg on nAl combustion has inherent limitations.

**Keywords:** Nano-aluminum (nAl); Magnesium (Mg); CO<sub>2</sub> atmosphere; Blended combustion

[责任编辑:杨 洪 江 伟]