◆提质增效产品创制技术◆

低养分粒状磷铵崩解性研究

陈德高，龚　颖，黄金龙

（瓮福（集团）有限责任公司 瓮福化工公司，贵州 福泉　550501）

［摘　要］选取7种具有代表性的磷酸二铵（DAP）产品进行静水释放实验、土柱间歇淋溶实验，并结合比表面积、孔隙率、强度、水接触角、SEM-EDS和XRD等物理测试，系统研究其养分释放规律与结构特征之间的关系。结果表明，DAP产品的氮磷释放速率与溶解崩散速度之间成正相关；7种DAP样品中大部分DAP样品的初始水接触角在0.5 s时在34.805°～45.042°，表现出较好的亲水性，有利于与水接触后迅速溶解，有助于肥效释放；大部分样品呈现颗粒状或不规则块状结构，颗粒分布相对均匀，表面结构较为致密；大多数样品的比表面积在较低水平，颗粒结构较致密、稳定；安徽某化工公司57%崩解型DAP与其他DAP产品相比，强度最低，比表面积、孔隙率均远高于其他DAP产品，同时亲水性最强，表现出最优的崩解性能。提出崩解性能改善的核心思路是降低颗粒内部黏结力、创造水分渗透通道、优化颗粒结构。

［关键词］低养分磷铵；磷酸二铵；崩解性能；孔隙结构；水接触角

［中图分类号］TQ442.14　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）07-0056-08

Study on the disintegration properties of low-nutrient granular phosphate ammonium

CHEN Degao, GONG Ying, HUANG Jinlong

(*Wengfu Chemical Company*, *Wengfu* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Fuquan* 550501, *China*)

Abstract: The relationship between the nutrient release pattern and the structural characteristics of DAP products is explored from aspects such as static water release experiments, intermittent soil column leaching experiments, and physical tests such as specific surface area, porosity, strength, water contact angle, SEM-EDS, and XRD. The results show that the nitrogen and phosphorus release speed of DAP products is proportional to the dissolution and disintegration speed; For most of the 7 DAP samples, the initial contact angle of most samples is 34.805° - 45.042° at 0.5 s, demonstrating good hydrophilicity, which is conducive to rapid dissolution after contact with water and helps the release of fertilizer efficacy; Most samples present granular or irregular block-like structures, with relatively uniform particle distribution and a relatively dense surface structure; The specific surface area of most samples is at a low level, and the particle structure is relatively dense and stable; Compared to other DAP products, 57% disintegrated DAP from a chemical enterprise in Anhui has the lowest strength, and much higher specific surface area and porosity, strongest hydrophilicity, showing the optimal disintegration performance. The core idea for improving disintegration performance is to reduce the internal adhesion force of the particles, create water penetration channels, and optimize the particle structure.

Key words: low nutrients granular ammonium phosphate; diammonium phosphate (DAP); disintegration performance; porosity structure; water contact angle

0　引言

磷酸二铵（DAP）作为一种高效磷肥，其溶解性直接关系到施肥效果与农作物养分吸收效率。瓮福（集团）有限责任公司现有低养分DAP主要生产原料为萃余酸[1-2]，根据市场反馈该产品崩解缓慢，溶解困难。本研究围绕贵州某化工公司64% DAP、57%DAP与市场上具有代表性的DAP产品系统开展化学组成分析、静水释放、土柱间歇淋溶及多项表征实验，旨在明确不同肥料品种的溶解情况、形态变化及其养分释放规律，为优化肥料产品

收稿日期：2026-06-05

作者简介：陈德高（1980—　），男，贵州石阡人，高级工程师，从事磷复肥生产技术管理及新产品研究。

通信作者：龚　颖，女，贵州福泉人，工程师，长期从事质量检查与检查方法开发工作。

结构和提升施肥效率提供理论依据和数据支持[3-4]。

1　研究材料与方法

1.1　肥料样品来源

本次研究共收集了7种具有代表性的DAP产品，编号为DAP-1（贵州某化工公司64%DAP）、DAP-2（贵州某化工公司57%DAP）、DAP-3（甘肃某化工公司64%DAP，包裹）、DAP-4（甘肃某化工公司64%DAP，未包裹）、DAP-5（安徽某化工公司崩解57%DAP）、DAP-6（云南某化工公司64%DAP）、DAP-7（云南某化工公司57%DAP），样品均为完整颗粒，用于下述实验（以下均以编号叙述）。

1.2　土壤采集与前处理

购买具有代表性的土壤，采样深度0～20 cm，风干去除土中杂物，研磨过1 mm筛，测定土壤样品的理化性质。土壤理化性质测定结果：pH 6.20、w（有机质）99.4 g/kg、w（全磷）0.335 g/kg、w（全氮）0.709 g/kg、w（硝态氮）2.50 mg/kg、w（铵态氮）2.99 mg/kg、w（有效磷）10.5 mg/kg、w（速效钾）154 mg/kg。

1.3　静水释放实验

称取颗粒完整的肥料样品（称准至0.01 g）10.00 g，放入孔径为0.149 mm（100目）的尼龙纱网做成的小袋中，封口；将其放入盛有200 mL蒸馏水的500 mL烧杯中，用封口膜密封后将烧杯置于25 ℃生化恒温培养箱中培养；取出尼龙网袋，用水冲洗3次；将冲洗水倒入烧杯中，再移入250 mL容量瓶中，定容，供磷素释放分析。然后将尼龙网袋放入另一个500 mL烧杯中，再向瓶中注入200 mL水，加盖密封后放入培养箱中继续培养至下一次取样，测定养分含量，并计算肥料养分磷素释放率[5]。

1.4　土柱间歇淋溶实验

土柱淋溶装置直径2.65 cm，高30 cm。在淋溶器底部放置2层0.75 mm纱布，底部装入石英砂10 g，其上装入风干土（30 g）与土壤肥料（18 g）混匀的土肥混合物，土柱上面加石英砂10 g覆盖，以防加水时扰乱土层。以不加肥料的土柱作为对照，每个处理重复3次。第1次先加14.5 mL蒸馏水使土壤水分接近饱和，分别在1、3、7、14、21、28 d用15 mL蒸馏水进行土柱淋溶，底部用三角瓶收集淋溶液，测定淋溶液中养分含量，计算养分磷素释放率和氮素释放率（铵态氮和硝态氮）[6]。

磷素释放率=（溶出的磷养分量/样品中磷养分总量）×100%；　（1）

氮素释放率=（溶出的氮养分量/样品中氮养分总量）×100%。　（2）

1.5　实验仪器及设备

实验所使用的主要仪器、设备如表1所示。

表1　实验所使用的仪器及设备

Table 1　Instruments and equipment used in the experiment

设备名称	规格型号	生产厂家	用途
电子天平	TD2002B	余姚市金诺天平仪器有限公司	称量
标准套筛		新乡市康达新机械有限公司	筛分分析
电热鼓风干燥箱	101-4	北京科伟永兴仪器有限公司	干燥
精密pH计	PHS-3C	上海雷磁仪器厂	测pH
高性能全自动压汞仪	AutoPore V 9600	麦克默瑞提克(上海)仪器有限公司	测孔隙率
接触角/表面张力测量仪	SZ-CAMC32	上海轩准仪器有限公司	测接触角
全自动比表面及孔隙度分析仪(BET)	ASAP 2460	麦克默瑞提克(上海)仪器有限公司	测比表面积
颗粒强度测定仪	KC-3数显颗粒强度	泰州市奥普特分析仪器有限公司	测颗粒强度
X射线衍射仪	X'Pert Pro MPD	荷兰Nalytical公司	测晶型
扫描电子显微镜	Hitachi SU8010	广州仪德精密科学仪器股份有限公司	测外观及元素分布
电感耦合等离子体质谱仪	NexION 2000	珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司	元素分析

2　实验内容与结果

2.1　肥料样品组成

7种肥料样品分析检测结果如表2所示。由表2可知，除了DAP-5产品的pH在5.98，显弱酸性，其余产品pH均在7左右，显中性。产品的水溶磷、有效磷和总氮含量均符合产品规格和国标要求。在无机磷及结合态磷组成方面，w（无机磷）总体较高，在20.85%～23.69%，其中以DAP-4（23.69%）和DAP-3（23.58%）最高，表明其磷源活性较强；w（铝结合态磷）（Al-P）与w（铁结合态磷）（Fe-P）在所有产品中普遍存在，其中DAP-3和DAP-4的w（Al-P）分别高达7.12%和6.52%，表明其磷酸盐在铝环境中更易结合，可能影响生物可利用性，而产品的w（铁结合态磷）在1.83%～2.60%，说明DAP产品铁矿物结合程度较高；在钙磷形式方面，w（自生钙磷）在DAP-6与DAP-7中

较高，分别为4.22%和2.84%，可能与其自身晶体结构中磷酸钙沉积有关，有利于后期缓释性能，而DAP–7的w（碎屑钙磷）最高，为1 936 mg/kg，说明其颗粒结构较紧凑或结晶性较好。

7种DAP产品元素分析检测结果见表3。由表3可知，在中微量元素方面，7款产品w（Mg）均在1%以上，其中DAP–2的镁含量最高，w（Mg）为2.01%。w（Ca）均比较低，除DAP–7外，均在1%以下。DAP–6和DAP–7的w（Fe）比较高，分别为1.00%和1.40%，其余DAP产品的w（Fe）均小于1%。7种DAP产品w（Al）在0.87%～1.53%，Na元素在DAP–2和DAP–7中显著偏高，可能影响其在盐敏感作物上的应用，Cu在7种DAP产品中的含量较低，DAP–6、DAP–7产品Mn和Zn的含量较高，其中DAP–6的w（Zn）高达409 mg/kg，DAP–7为338 mg/kg，w（Mn）分别为1 392、1 667 mg/kg，远高于其他样品，DAP–6、DAP–7产品可能额外添加了Zn、Mn元素。

表2 磷酸二铵产品的化学组成分析结果

Table 2 Chemical composition analysis results of diammonium phosphate products

产品	pH	w（水溶磷）/%	w（有效磷）/%	w（总氮）/%	w（硫酸根）/%	w（铝结合态磷）/%	w（铁结合态磷）/%	w（无机磷）/%	w（自生钙磷）/%	w（碎屑钙磷）/（mg·kg^{-1}）
DAP–1	7.34	42.20	47.95	16.54	3.76	4.85	2.55	22.16	0.16	17.5
DAP–2	7.09	36.56	42.61	14.92	6.84	3.74	1.83	20.85	0.46	328.0
DAP–3	7.59	42.69	48.03	16.81	2.46	7.12	1.98	23.58	0.29	36.4
DAP–4	7.60	42.91	48.13	17.11	2.86	6.52	2.60	23.69	0.22	10.2
DAP–5	5.98	36.32	43.99	14.58	6.64	1.59	2.46	22.60	0.99	539.0
DAP–6	7.54	42.32	47.24	16.89	5.38	2.82	2.11	23.14	4.22	1 077.0
DAP–7	7.00	36.13	42.02	15.10	3.69	3.10	1.95	21.94	2.84	1 936.0

表3 磷酸二铵产品的元素质量分数

Table 3 Elemental mass fraction of diammonium phosphate products

产品	w(Mg)/%	w(Ca)/%	w(Fe)/%	w(Al)/%	w(Na)/%	w(Cu)/（mg·kg^{-1}）	w(Zn)/（mg·kg^{-1}）	w(K)/（g·kg^{-1}）	w(Mn)/（mg·kg^{-1}）
DAP–1	1.04	0.24	0.40	0.91	0.22	2.470	79.5	3.19	417
DAP–2	2.01	0.89	0.61	1.53	0.49	0.373	108.0	5.18	762
DAP–3	1.15	0.27	0.62	1.11	0.20	16.900	45.8	2.79	620
DAP–4	1.06	0.18	0.54	1.04	0.15	15.700	45.4	2.38	626
DAP–5	1.03	0.59	0.79	1.18	0.37	4.070	73.1	4.91	632
DAP–6	1.49	0.15	1.00	0.87	0.12	11.600	409.0	1.51	1 392
DAP–7	1.24	1.15	1.40	1.02	0.47	11.200	338.0	5.61	1 667

2.2 磷素释放率

按照1.3节的方法对7种DAP产品进行静水释放实验。实验过程中，通过定期采集溶液并测定其磷浓度，计算样品在静水条件下的磷素释放率，如表4所示；同时，依据不同时间点水样中可见溶解状态的变化，拍照记录其形貌，用于评价其溶解速度与效果。

从表4磷累计释放率数据可以看出，各产品在0.007 d至25 d内的磷素释放表现存在明显差异。DAP–5在释放初期（<1 d）释放速率最快，0.810 d内磷素释放率达到约41%，随后趋于平稳，说明其颗粒结构更利于水解或溶出。DAP–1和DAP–6前期释放速率较快，但随后释放趋于平台，表明可能

表4 不同磷酸二铵静水培养磷累计释放率

Table 4 Cumulative phosphorus release rate of diammonium phosphate static water cultures

时间/d	磷累计释放率/%						
	DAP–1	DAP–2	DAP–3	DAP–4	DAP–5	DAP–6	DAP–7
0.007					20.118		
0.014	16.765	9.58	15.328	14.37		17.244	9.101
0.038	26.345				30.177	25.866	
0.063	32.572				35.446	30.656	
0.083	32.764	21.076	27.782	23.471	39.278	32.093	18.681
0.810	32.955	23.471	30.177	25.387	40.715	34.967	19.429
3.000		23.95	30.656	25.866	40.907		21.387
8.000		24.429	30.991	26.201			22.345
20.000		24.716	31.230	26.393			23.776
25.000		24.956	31.375	26.489			23.824

存在一定的表面易溶层与内部致密层结构差异。DAP-2、DAP-3和DAP-4释放速率相对温和，且在第25 d仍呈缓慢上升趋势，具备一定的缓释特性。DAP-7释放速率最慢，25 d累计释放率未超过24%，可能与其颗粒表面致密性或亲水性差有关。

不同静水溶解时间下各磷酸二铵的溶解状态：DAP-5在第7 min出现明显溶解现象，至第10 min基本解离成粉末；DAP-1与DAP-6在51 min内表现出显著溶解，分别在90 min和2 h大部分颗粒已解离为粉末状；而DAP-2、DAP-3、DAP-4和DAP-7在18 d内仅表现出表面部分解离，整体溶解程度较低。

综合上述可知，DAP-5可以快速（7～10 min）在静水中溶解崩散，而DAP-1和DAP-6在51 min内大部分溶解，分别在90 min和2 h完成全部溶解崩散。其余的产品在18 d内仍保持颗粒状，溶解极为缓慢。同时结合静水培养磷累计释放率可知，溶解崩散的速度越快，磷的释放速率越快。

2.3　磷素和氮素（铵态氮和硝态氮）释放率

按照1.4节的方法对7种DAP产品进行土柱间歇淋溶实验。实验过程中，通过定期收集淋溶液，测定淋溶液中养分含量，计算养分磷素释放率和氮素（铵态氮和硝态氮）释放率结果如图1、图2所示。

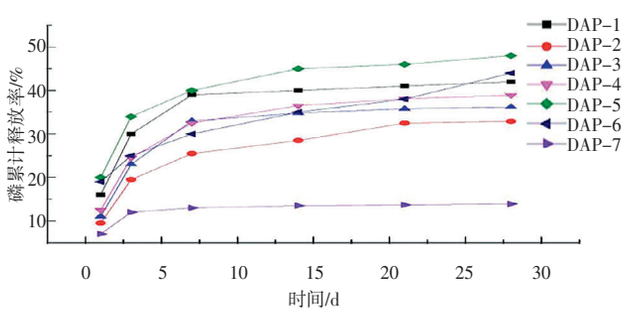


图1　不同磷酸二铵土柱间歇淋溶实验磷累计释放率

Fig. 1　Cumulative release rate of phosphorus from intermittent leaching of different diammonium phosphate soil columns

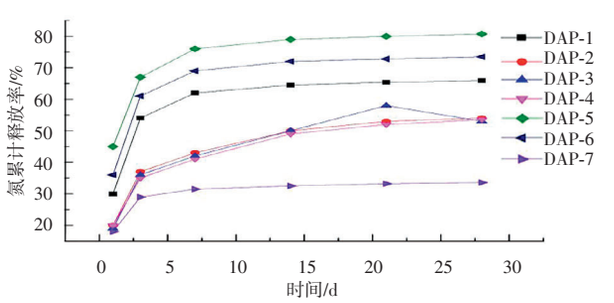


图2　不同磷酸二铵土柱间歇淋溶实验氮累计释放率

Fig. 2　Cumulative release rate of nitrogen from intermittent leaching of different diammonium phosphate soil columns

从图1数据可以看出，7种DAP产品的磷释放曲线趋势较为一致，磷素3 d初次释放率大小为DAP-5>DAP-6>DAP-1>DAP-4>DAP-3>DAP-2>DAP-7，28 d累计磷释放率大小为DAP-5>DAP-6>DAP-1>DAP-4>DAP-3>DAP-2>DAP-7。

从图2数据可以看出，7种DAP产品的氮释放曲线趋势较为一致，3 d初次氮（铵态氮和硝态氮）释放率大小为DAP-5>DAP-6>DAP-1>DAP-2=DAP-3=DAP-4>DAP-7，28 d氮累积释放率大小为DAP-5>DAP-6>DAP-1>DAP-2=DAP-3=DAP-4>DAP-7。

综上所述，进一步说明了DAP产品在土壤中氮、磷的释放速度与DAP产品的溶解速度成正比，溶解崩散越快，氮、磷等养分在土壤中释放就越快。结合静水实验的数据，DAP-5的静水崩解最快，氮磷在土壤中的释放也是最快的，其次是DAP-1和DAP-6，在静水崩解较快，氮、磷在土壤中的释放也较快。

2.4　磷酸二铵的结构性质表征

为深入探讨影响7种DAP产品溶解性能的关键因素，综合采用比表面积、孔隙率、颗粒强度、水接触角、XRD及SEM-EDS等多种表征技术，对其理化特性进行系统分析。

2.4.1　比表面积测定

7种DAP产品比表面积的测定结果见表5。

表5　不同磷酸二铵产品的比表面积

Table 5　Specific surface area of different diammonium phosphate products

产品	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	产品	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)
DAP-1	0.141 9	DAP-5	1.041 9
DAP-2	0.205 5	DAP-6	0.295 9
DAP-3	0.135 7	DAP-7	0.271 5
DAP-4	0.323 0		

从表5数据可以看出，大多数样品的比表面积在较低水平，颗粒结构较致密、稳定。其中DAP-5的比表面积显著偏高（比表面积达1.041 9 m^2/g），与其高孔隙率、低颗粒强度一致，说明其颗粒结构疏松、多孔，易溶解但稳定性差；相比之下，DAP-3的包裹处理有效降低了比表面积（包裹样0.135 7 m^2/g和未包裹样0.323 0 m^2/g），有助于提升颗粒致密性和控释性能；此外，不同厂家相同养分含量产品的比表面积差异不大，表明养分含量对其影响有限，颗粒结构更多取决于加工工艺。

2.4.2　孔隙率测定

7种DAP产品进行孔隙率测定结果见表6。

表6 不同磷酸二铵产品的孔隙率

Table 6 Porosity of different diammonium phosphate products

产品	样品实际压进汞体积/mL	样品体积/mL	孔隙率/%
DAP-1	0.024 1	0.786 8	3.067 7
DAP-2	0.031 5	0.801 6	3.925 6
DAP-3	0.018 6	0.876 8	2.119 6
DAP-4	0.023 3	0.832 2	2.798 5
DAP-5	0.099 4	0.832 7	11.934 5
DAP-6	0.034 7	0.979 0	3.541 8
DAP-7	0.030 1	0.988 3	3.041 0

从表6数据可以看出：（1）7种DAP产品整体孔隙率较低，差异明显。大多数样品的孔隙率在2.1%～3.9%，但DAP-5的孔隙率为11.934 5%，远高于其他产品，表明其颗粒结构更为疏松，内部孔隙发达。（2）包裹处理降低了产品孔隙率。相同来源的甘肃某化工公司DAP样品中，包裹处理的DAP孔隙率为2.119 6%，明显低于未包裹的DAP（2.798 5%），说明包裹工艺有助于提高颗粒致密性，减少孔隙。（3）相同厂家不同养分含量对孔隙率影响有限。如云南某化工公司64%与57% DAP样品的孔隙率分别为3.54%和3.04%，变化不大；贵州某化工公司64%与57% DAP样品的孔隙率分别为3.07%和3.93%，略有差异，表明养分含量变化对孔隙率影响相对较小。（4）DAP-5的孔隙率高出其他样品2～5倍，可能与其颗粒结构疏松或压实工艺有关，需要进一步关注其物理稳定性和肥效释放行为。

2.4.3 颗粒强度测定

7种DAP产品颗粒强度测定结果见表7。

表7 不同磷酸二铵产品的颗粒强度

Table 7 Particle strength of different diammonium phosphate products

产品	强度平均值/N	产品	强度平均值/N
DAP-1	80.75	DAP-5	55.02
DAP-2	79.85	DAP-6	80.47
DAP-3	79.68	DAP-7	80.27
DAP-4	77.00		

从表7可以看出：（1）颗粒强度整体较高，除DAP-5外，其余6种产品的平均颗粒强度在77.00～80.75 N，表现出较好的物理稳定性。（2）DAP-5平均强度为55.02 N，显著低于其他产品，说明其颗粒结构松散，抗压性差。（3）不同企业产品间差异有限。贵州某化工公司64% DAP和云南某化工公司64% DAP的强度相近（分别为80.75 N和80.47 N），云南某化工公司57%DAP表现也稳定（80.27 N）。（4）包裹处理对强度略有提升作用。甘肃某化工公司DAP中，包裹64% DAP（79.68 N）的颗粒强度略高于未包裹64% DAP（77.00 N），说明包裹工艺有助于提升颗粒结构的紧密度和强度。（5）同一企业不同含量产品的强度差异不大，表明养分含量变化不是影响颗粒强度的主导因素。

2.4.4 水接触角测定

7种DAP产品水接触角测定结果见表8。

表8 不同磷酸二铵产品的水接触角

Table 8 Water contact angles of different diammonium phosphate products

产品	不同时间(s)的水接触角/(°)			
	0.5	1.0	3.0	5.0
DAP-1	44.997	39.729	32.739	29.39
DAP-2	45.042	39.293	29.389	28.105
DAP-3	66.504	51.071	47.843	45.034
DAP-4	44.991	38.928	31.453	
DAP-5	34.805	32.245	28.886	
DAP-6	44.975	41.349	30.673	
DAP-7	74.995	71.388	67.024	52.329

注：颗粒状液滴无法直接测试，压片后进行了测试，压片条件为20 MPa，保压1 min。

从表8可以看出，水接触角是衡量磷酸二铵表面润湿性的关键指标，数值越大表示越疏水，越小表示越亲水。整体来看，大多数磷酸二铵样品的初始水接触角（0.5 s）在34.805°～45.042°，表现出较好的亲水性，有利于与水接触后迅速溶解，有助于肥效释放；但云南某化工公司57%DAP的接触角显著偏高：初始值高达74.995°，即使至5 s仍为52.329°，远高于其他样品，表现出明显的疏水性，表明其颗粒表面具有较强的拒水特性。甘肃某化工公司包裹64%DAP的水接触角较高：初始值为66.504°，至5 s仍为45.034°，说明其包裹层具有一定的防水性，能够延缓水分接触，有助于实现延时溶解和持续释放。其他样品亲水性良好、水接触角下降迅速：如贵州某化工公司DAP、甘肃某化工公司未包裹64% DAP、安徽某化工公司崩解57% DAP、云南某化工公司64%DAP等样品，初始水接触角34.805°～45.042°，至5 s降至30°左右，说明其表面润湿性好，溶解速率快。

2.4.5 XRD测试分析

对7种DAP产品进行XRD分析，结果如图3所示。

从图3可以得出，DAP-1、DAP-2、DAP-3、DAP-4、DAP-5、DAP-6样品均呈现出清晰且一致的主晶相，主要包括DAP、MAP、硫酸铵、磷酸亚铁铵水合物，说明这些样品成分结构较一致，晶型

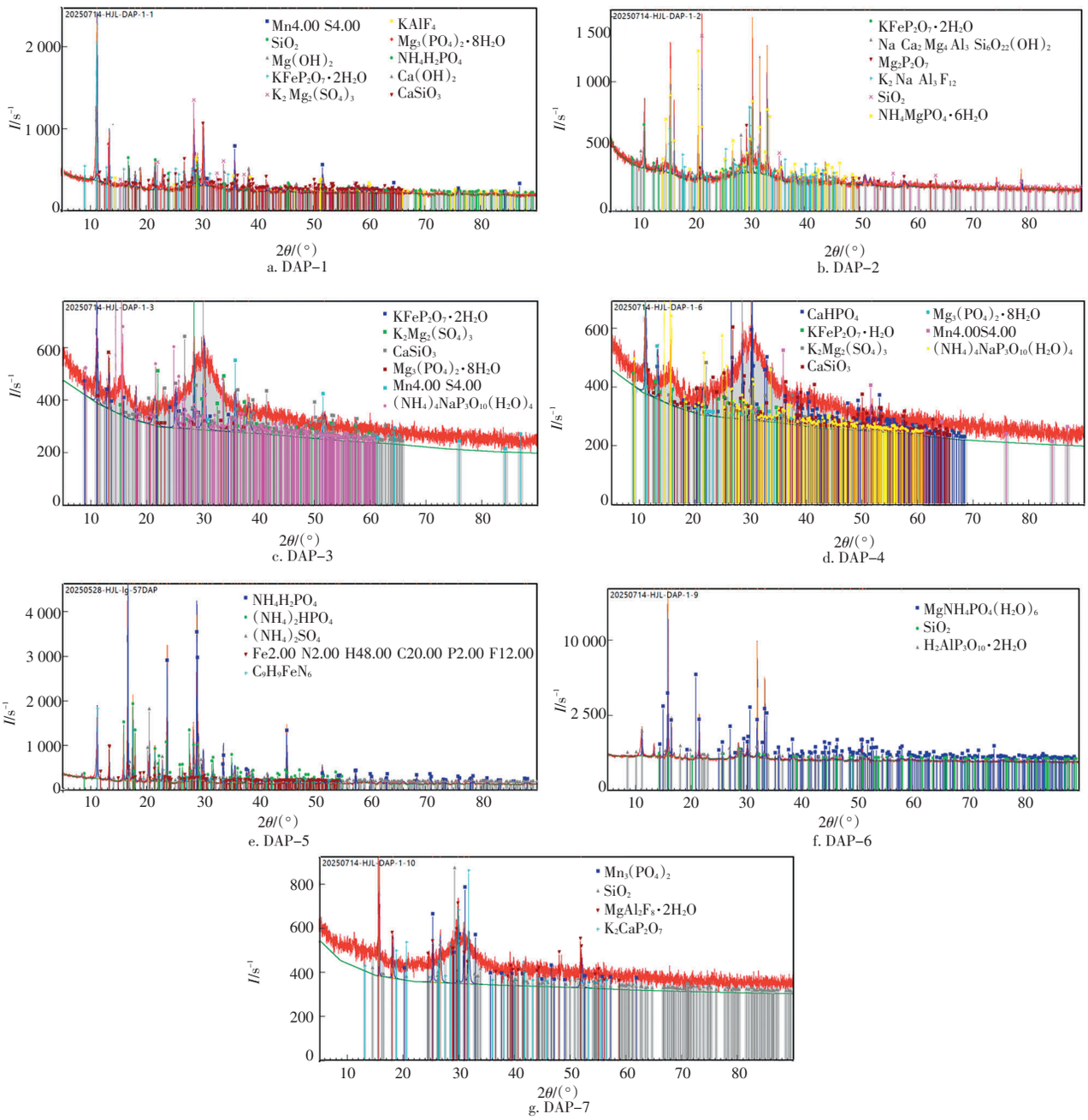


图3　不同磷酸二铵的XRD图谱

Fig. 3　XRD patterns of different diammonium phosphate

清晰，杂质少。值得注意的是，DAP-1（贵州某化工公司64%DAP）和DAP-7（云南某化工公司57% DAP）在XRD图谱中除主要成分外，还检测到额外物相。其中，DAP-1中可能存在微量杂质离子引起的晶格缺陷，而DAP-7中则检测到Ca、S、O的特征峰。此外，对静水释放实验中残留的不溶物进行了XRD测试分析，结果显示其溶解后的物相组成较原始样品更加复杂，表明其在溶解过程中可能发生了成分变化，需进一步开展相关分析以明确其成因。

2.4.6　SEM-EDS测试分析

对7种DAP产品进行扫描电子显微镜-能谱（SEM-EDS）联合测试分析，结果如图4、图5所示。

从图4可以得出，各样品的表面形貌存在一定差异。总体而言，大部分样品呈现颗粒状或不规则块状结构，颗粒分布相对均匀，表面结构较为致密。其中，DAP-5和DAP-6表面相对粗糙，存在明显的多孔结构。图5 EDS元素分析结果表明，各样品的主要元素包括N、P、O、S，以及少量的

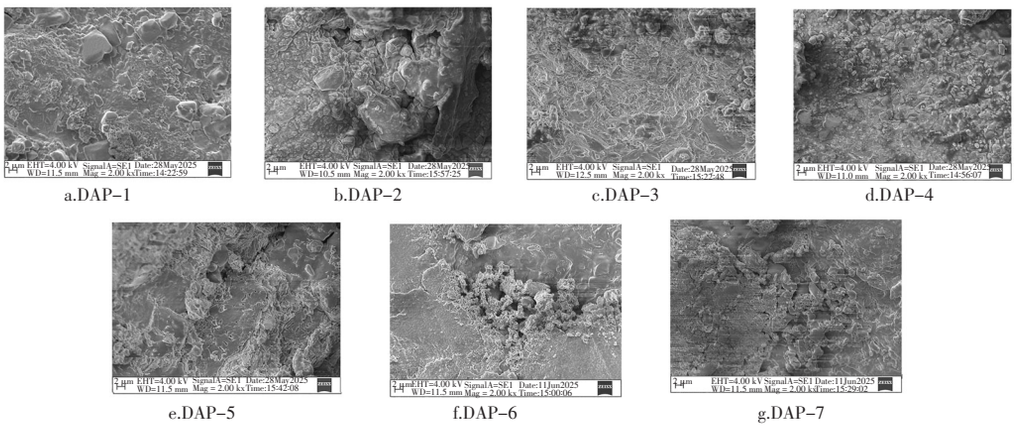


图 4　不同磷酸二铵的 SEM 图

Fig. 4　SEM plots of different diammonium phosphate

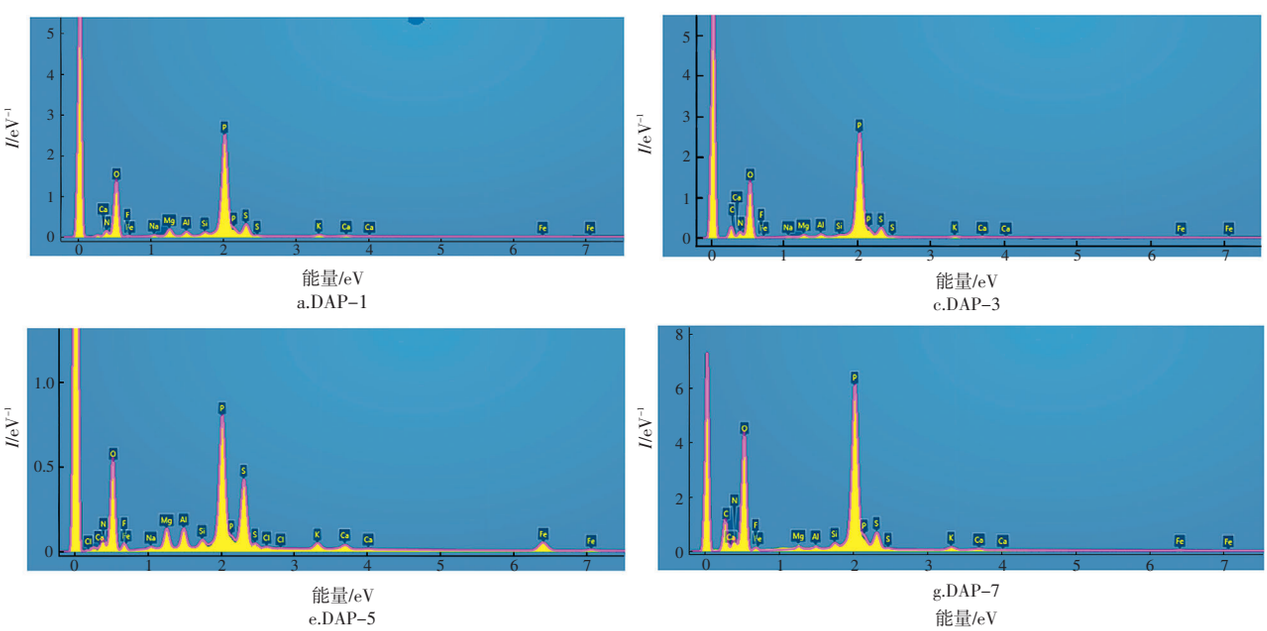


图 5　不同磷酸二铵的 EDS 图

Fig. 5　EDS plots of different diammonium phosphate

Fe、Al、K 和 Ca，符合磷酸二铵及其伴随组分的常见构成。

3　结论与思考

3.1　结论

通过对 7 种具有代表性的 DAP 产品分别从养分结构、静水释放实验、土柱间歇淋溶实验以及 XRD 化学组分分析、孔隙率测试、强度测试、比表面积测试、水接触角测试和 SEM–EDS 表征等进行研究，得到以下结论。

（1）DAP 产品的氮、磷释放速度与溶解崩散速度成正比，溶解崩散速度为安徽某化工公司崩解 57%DAP > 贵州某化工公司 64%DAP=云南某化工公司 64%DAP > 贵州某化工公司 57%DAP =甘肃某化工公司 64%DAP（包裹）=甘肃某化工公司 64%DAP（未包裹）> 云南某化工公司 57%DAP，而氮、磷的释放速度为安徽某化工公司崩解 57%DAP > 云南某化工公司 64%DAP > 贵州某化工公司 64%DAP > 甘肃某化工公司 64%DAP（未包裹）> 甘肃某化工公司 64%DAP（包裹）> 贵州某化工公司 57%DAP > 云南某化工公司 57%DAP，说明溶解崩散越快，氮、磷释放速度就越快。

（2）DAP 产品主要化学组成是磷酸二铵、磷酸一铵、硫酸铵、磷酸亚铁铵水合物等，成分结构较一致，晶型清晰，杂质少。而通过 SEM 观测发现各样品的表面形貌存在一定差异，大部分样品呈现颗粒状或不规则块状结构，颗粒分布相对均匀，表面结构较为致密。其中，安徽某化工公司崩解 57%DAP 和云南某化工公司 64%DAP 表面相对粗糙，存

在明显的多孔结构。大多数样品的比表面积在较低水平，颗粒结构较致密、稳定。但是安徽某化工公司崩解57%DAP的比表面积显著偏高，说明其颗粒结构疏松、多孔，易溶解但稳定性差。相比之下，甘肃某化工公司64%DAP的包裹处理有效降低了比表面积（包裹样0.135 7 m^2/g和未包裹样0.323 0 m^2/g），有助于提升颗粒致密性和控释性能；安徽某化工公司崩解57%DAP颗粒强度远低于其他产品，其平均强度为55.02 N，显著低于其他产品的平均强度（77～80）N，说明其颗粒结构松散，抗压性差。

（3）7种DAP样品中大部分DAP样品的初始接触角在0.5 s时在34.805°～45.042°，表现出较好的亲水性，利于与水接触后迅速溶解，有助于肥效释放；但云南某化工公司57%DAP的接触角显著偏高，初始值高达74.995°，即使到5 s仍为52.329°，远高于其他样品，表现出明显的疏水性，表明其颗粒表面具有较强的拒水特性。甘肃某化工公司64% DAP（包裹）接触角较高，初始值为66.504°，5 s仍为45.034°，说明其包裹层具有一定的防水性，能够延缓水分接触，有助于实现延时溶解和持续释放。其他样品亲水性良好、水接触角下降迅速，如贵州某化工公司DAP产品、安徽某化工公司崩解57% DAP、云南某化工公司64% DAP等样品，初始接触角34.805°～45.042°，5 s降至30°左右，说明其表面润湿性好，溶解速率快。

（4）通过对比溶解最快的安徽某化工公司57%崩解DAP与其他DAP产品的比表面积、孔隙率、强度和水接触角发现，安徽某化工公司57%崩解DAP的强度最低，比表面积、孔隙率均远高于其他DAP产品，同时亲水性最强。故说明安徽某化工公司57%崩解DAP颗粒结构疏松、多孔，易溶解。进一步论证了安徽某化工公司57%崩解DAP能够快速溶解崩散的原因。

3.2　思考

改善DAP产品崩解性的核心思路是降低颗粒内部黏结力、创造水分渗透通道、优化颗粒结构。

3.2.1　生产环节的改进措施

降低产品的强度，提高产品的比表面积、孔隙率，增加产品的亲水性，可以让DAP产品的颗粒结构疏松、多孔，易溶解；更换水溶性更好、杂质更少的原料有益于提高DAP产品的溶解性；包裹油可以替换为水溶性（亲水型）的，可以提高产品的溶解性[7]。

3.2.2　优化生产工艺参数

调整中和度（pH）：精确控制氨化过程，找到最适合当前原料配比的中和点，避免生成过多导致硬化的杂质盐类。控制反应与造粒温度：适当降低反应温度，避免高温下杂质反应过于剧烈。优化造粒水分：寻找最佳液相量，水分过多，颗粒相对松散，水分过少，颗粒易变大变硬，需通过实验找到平衡点。调整干燥曲线：采用“低温大风量”或“分段式干燥”工艺，避免表面快速硬化结壳（“釉质化”）而内部水分无法逸出。

3.2.3　使用有效的添加剂

崩解剂，在造粒过程中添加少量（如0.5%～2%）崩解剂（无机崩解剂如硫酸铵、硝酸铵、氯化铵等），它们溶于水后能产生渗透压，使颗粒从内部“胀裂”；表面活性剂，某些非离子型表面活性剂，可以降低水的表面张力，使其更容易渗入颗粒微孔；结构改良剂，如添加少量木质素磺酸盐、腐植酸等，它们可以改善颗粒的孔隙结构，使其更疏松；防结块剂，选择疏水性好、成膜性佳的防结块剂（如某些矿物油+表面活性剂复合剂），在颗粒表面形成均匀薄膜，既能防止结块，又不完全阻碍水分渗透[8-9]。

3.2.4　改进造粒技术

确保造粒机（如转鼓造粒机、喷浆造粒机）的工况良好，使颗粒大小均匀、结构相对疏松，可以考虑采用团粒法代替部分涂布法，使颗粒内部更易崩解[10]。

［参考文献］

［1］ 马银堂，金兆杰.磷酸MER值对磷酸二铵产品质量影响分析[J].山西化工，2025，45(10)：76-78.
Ma Yintang, Jin Zhaojie. Analysis of the Impact of Phosphate MER Value on the Quality of Ammonium Phosphate Products [J]. Shanxi Chemical Industry, 2025, 45(10): 76-78.

［2］ 张晓迁，陈清宪，胡曾毅.利用磷酸沉积物生产低养分磷铵的途径[J].磷肥与复肥，2011，26(6)：27.

［3］ 王崴，范丹，谢槟逊，等.湿法磷酸净化副产萃余酸应用现状及展望[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(1)：43-47.
Wang Wei, Fan Dan, Xie Binxun, et al. Situation and prospects for application of residual acid from wet-process phosphoric acid purification [J]. Eco-industry Science and Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(1): 43-47.

［4］ 白海丹.我国磷铵行业现状及发展趋势[J].硫酸工业，2019(7)：1-4.
Bai Haidan. Current situation and development trends of ammonium phosphate industry in China [J]. Sulphuric Acid Industry, 2019(7): 1-4.

［5］ 孙玉翠，王国栋，杨燕.崩解剂用于肥料的实验探究[J].云南化工，2018，45(6)：109-111.
Sun Yucui, Wang Guodong, Yang Yan. Experimental study on application of disintegrating in fertilizers [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(6): 109-111.

（下转第99页）