

# 肥料崩解剂的作用机制、在矿物源土壤调理剂中的应用效果与市场前景分析

朱思博<sup>1</sup>, 王 军<sup>2</sup>, 李 霞<sup>2</sup>, 王晓宇<sup>3</sup>

(1. 辽宁东辉新材料有限公司, 辽宁 盘锦 124000; 2. 中国无机盐工业协会中微肥及新特肥分会, 北京 100010;  
3. 中华合作时报社, 北京 100070)

**[摘要]** 在化肥产业向高效环保转型的背景下, 崩解剂对于解决部分矿物源及有机源土壤调理剂等肥料施入土壤后崩解迟缓、肥效难以释放的问题具有重要价值。系统阐述肥料崩解剂通过吸水膨胀、产气推动及毛细管渗透等物理化学机制促使肥料颗粒快速分散的核心作用, 并将其分类为吸水型、膨胀型、吸水膨胀型、产气型及复合型。以崩解特性差的钙镁硅基土壤调理剂为对象, 通过实验评估了不同类型崩解剂的性能。结果表明, 复合型崩解剂(交联聚维酮与微晶纤维素质量比1:2)效果最优, 在0.5%添加量下, 可使颗粒在水中1 min内完全崩解, 在模拟土壤环境中30 d内充分分散。研究进一步指出, 崩解剂的应用需依据肥料原料特性进行精准选型与添加量优化, 并适用于工业化造粒工艺。最后, 结合市场趋势, 分析崩解剂在化肥助剂行业及缓控释肥、专用肥等高端产品发展中的协同作用与市场潜力, 并对其未来向高效、环保、多功能复合化方向发展进行了展望。

**[关键词]** 肥料崩解剂; 土壤调理剂; 应用效果; 化肥助剂; 吸水膨胀; 崩解机制; 养分释放

**[中图分类号]** TQ449<sup>+</sup>.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0051-06

## Action mechanism, application effect in mineral source soil conditioners, and market prospect analysis of fertilizer disintegrants

ZHU Sibo<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, LI Xia<sup>2</sup>, WANG Xiaoyu<sup>3</sup>

(1. Liaoning Donghui New Material Co., Ltd., Panjin 124000, China; 2. Medium & Trace Elements Fertilizer and New Special Fertilizer Branch of China Inorganic Salts Industry Association, Beijing 100010, China; 3. China Cooperation Times Press, Beijing 100070, China)

**Abstract:** In the context of the transformation of the fertilizer industry towards high efficiency and environmental protection, disintegrants are of great value in solving the problem of slow disintegration and difficulty in releasing fertilizer efficiency of some mineral and organic source soil conditioners and other fertilizers applied to the soil. The system elucidates the core role of fertilizer disintegrants in promoting rapid dispersion of fertilizer particles through physical and chemical mechanisms such as water absorption swelling, gas generation pushing, and capillary permeation, and classifies them into water absorption type, swelling type, water absorption swelling type, gas generation type, and composite type. The application effect of different types of disintegrants in calcium magnesium silicon-based soil conditioners with poor disintegration characteristics is evaluated through experiments. The results show that the composite disintegrant (cross-linked polyvinylpyrrolidone to microcrystalline cellulose mass ratio of 1:2) has the best effect. At a dosage of 0.5%, the particles can completely disintegrate in water within 1 minute and be fully dispersed in simulated soil environment within 30 days. Further research indicates that the application of disintegrants requires precise selection and optimization of addition amounts based on the characteristics of fertilizer raw materials, and is suitable for industrial granulation processes. Finally, based on market trends, the synergistic effect and market potential of disintegrants in the development of high-end products such as fertilizer additives, slow-release fertilizers, and specialty fertilizers are analyzed, and their future development towards high efficiency, environmental protection, and multifunctional composite direction is discussed.

收稿日期: 2026-02-02

作者简介: 朱思博(1997—), 男, 天津人, 衡水东辉生物科技有限公司副总经理, 辽宁东辉新材料有限公司总经理。

**Key words:** fertilizer disintegrants; soil conditioners; application effect; fertilizer additives; water absorption swelling; disintegration mechanism; nutrient release

## 0 引言

化肥是保障全球粮食安全的物质基础,但其不合理的施用也带来了养分利用率低、环境污染等一系列问题。化肥容易溶解在灌溉水或土壤水分中,当土壤的养分过量时会通过地表径流、淋溶和挥发等途径对环境造成危害<sup>[1]</sup>。在此背景下,发展高效、环保的新型肥料及配套技术成为农业可持续发展的必然选择。化肥助剂,作为添加到肥料中用以改善或赋予其特定性能的一类物质,正成为提升传统肥料效能、实现产品差异化与高端化的关键技术突破口。

化肥助剂是一个涵盖防结块剂、包裹剂、造粒改良剂、缓/控释材料、崩解剂等多品类的高技术细分行业,其发展直接受下游化肥行业需求驱动。当前,化肥行业正从单纯增加产量向提高质量、提升效率、减少环境足迹转型<sup>[2]</sup>。这要求化肥助剂不仅能解决基础的生产和储存问题,更要能赋予肥料更优越的农学性能和环境特性。

肥料崩解剂是化肥助剂中的一种,其核心功能是促使肥料颗粒在接触土壤水分后迅速裂解成细小碎片,从而加速养分与土壤的接触和初始释放速率,扮演着“效能释放启动器”的角色。这一功能对于某些物理性状特殊的肥料产品至关重要。例如,部分以膨润土、风化煤、矿渣等为原料的矿物源或有机源土壤调理剂,由于其原料本身吸水性和膨胀性极差,制成的颗粒肥料施入土壤后可能长期保持颗粒形态,难以分散并发挥作用,严重影响了其改良土壤的时效性<sup>[3]</sup>。崩解剂的应用,正是解决此类难崩解现象的有效技术方案。肥料崩解剂在土壤调理剂、有机-无机复混肥、部分功能性复合肥等产品中的价值日益凸显。它确保了这些产品中的有效成分(如腐植酸、微量元素、有益微生物等)能够从物理束缚中及时释放,从而在作物需要时发挥作用,避免了“有肥效不出”的资源浪费。

尽管崩解剂在制药等行业已有成熟应用,但在肥料领域的系统研究与实践相对较少。目前,国内外的研究热点更多集中于肥料缓/控释技术以延缓养分释放<sup>[4]</sup>,而对于如何通过物理化学方法实现肥料的“快速启动”即崩解过程的关注相对不足。然而,在农业实际生产中,大多数肥料(尤其是基施的土壤调理剂和部分复合肥)既需要后期稳定的供

应,也需要在作物生长初期实现养分的快速有效释放,以满足作物关键生育期的需求<sup>[5]</sup>。因此,崩解剂的研究与应用,构成了调控养分释放动力学过程“起始阶段”的重要一环,与缓控释技术协同可能催生出更具智能化特色的肥料产品。

基于此,本文旨在对肥料崩解剂的功能、应用和种类等进行系统性梳理与研究。首先,深入介绍其作用机制与主要产品类型;其次,结合具体实验案例,量化分析其在改善土壤调理剂崩解性能中的应用效果与关键技术参数;再次,将崩解剂置于更广阔的化肥助剂及新型肥料产业格局中,探讨其市场定位与发展前景;最后,总结当前面临的技术挑战并对未来研究方向进行展望,为肥料崩解剂领域的科学研究与产业实践提供参考。

## 1 肥料崩解剂的作用机制与主要类型

### 1.1 作用机制

肥料颗粒的崩解,本质上是外界水分侵入颗粒内部,破坏其内部聚结结构,致使颗粒整体碎裂分散的过程。崩解剂的核心作用在于显著增强并加速这一过程。其作用机制主要通过以下几种物理和化学途径实现。

(1) 吸水膨胀机制:这是最为经典且应用最为广泛的机制。崩解剂自身具备极强的亲水性以及极高的吸水倍率(通常为自身质量的数十倍至数百倍)。当肥料颗粒接触到水时,崩解剂会优先且大量地吸收水分,其自身的体积会发生剧烈膨胀。这种由内而外产生的强大膨胀应力,足以克服肥料颗粒内部粒子间的结合力(如范德华力、盐桥等),从而将颗粒撑裂、崩解。例如,一些交联聚丙烯酸盐、改性淀粉、纤维素衍生物等都是典型的吸水膨胀型材料<sup>[3]</sup>。

(2) 产气推动机制:这类崩解剂通常由两种或多种遇水发生化学反应并产生气体的物质复合而成,常见的如碳酸盐(如碳酸氢钠)与酸类(如柠檬酸、酒石酸)的组合。当肥料颗粒与水接触时,崩解剂组分快速发生反应,产生大量二氧化碳等气体,气体在颗粒内部密闭空间内积聚,压力急剧升高,最终从颗粒的薄弱处突破,依靠气压将颗粒崩碎。该机制崩解速度极快,但成本相对较高<sup>[3]</sup>。

(3) 毛细管与渗透压机制:某些崩解剂能在肥料颗粒内部形成密集的亲水微孔道网络或具有极强

的渗透压，水分通过毛细管作用被迅速吸入颗粒内部，同时高渗透压促使外部水分持续向内渗透。这个过程不仅湿润了整个颗粒，更重要的是水分作为润滑剂和溶剂，削弱了颗粒内黏结剂的作用，溶解了部分可溶性盐碱，从而降低了颗粒的整体强度，使其在轻微外力或自身重力作用下即可崩解。

在具体肥料生产中，一种崩解剂有可能同时借助多种机制协同发挥功效。例如，一些高性能的崩解剂既具有超强吸水性，其吸水后形成的水凝胶网络又能产生显著的膨胀力并改变颗粒内部的孔隙结构。

## 1.2 主要类型

根据上述作用机制，肥料崩解剂可分为以下几种主要类型。

(1) 吸水型崩解剂：以快速、大量吸收水分并形成凝胶为主要特征，其崩解力主要源自凝胶的膨胀和润滑作用。

(2) 膨胀型崩解剂：吸水后体积膨胀倍率极高，崩解力主要来源于物理膨胀产生的机械应力。

(3) 吸水膨胀型崩解剂：兼具优异的吸水能力和高膨胀倍率，是目前在肥料领域应用效果最为显著的一类，能综合发挥吸水 and 膨胀的双重优势<sup>[3]</sup>。

(4) 产气型崩解剂：借助化学反应产生气体，以气体膨胀产生的压力作为主要崩解动力。

(5) 复合型崩解剂：将上述不同类型崩解剂的功能性组分进行物理混合或化学改性，旨在实现更快速、更彻底、更适应不同肥料体系的崩解效果。

## 2 崩解剂在土壤调理剂中的应用研究

某矿物源土壤调理剂产品在实际应用中暴露出现象级问题：田间监测发现，施入土壤1年后挖取样方，仍可见大量完整颗粒，其改良土壤的预期功能基本丧失。前期探索性试验表明，通过深度烘干，将颗粒 $w(\text{H}_2\text{O})$ 从常规出厂的17.5%降至1.5%以下时，颗粒在水中的崩解时间可缩短至3~5 min。然而，这一技术路径在工业化生产中难以落地。主要原因有二：其一，现有大型滚筒烘干设备的热效率与物料停留时间匹配性有限，难以将整批次物料均匀干燥至如此低的水含量，局部过度干燥或干燥不足的现象难以避免；其二，若强行通过延长烘干时间或提高热风温度来实现，将大幅度增加能耗成本。根据生产线实测数据推算，仅烘干工序的燃料与电力成本将增加30~50元/t，较常规烘干成本上升40%~60%。对于土壤调理剂这类附加值较低的产品而言，这一成本增幅影响了市场售价。因此，

亟须探索更为经济可行的技术路径。

为深入量化研究崩解剂的实际应用效果，以钙镁硅为主要原料的矿物肥料为研究对象，考察不同崩解剂的应用效果。

### 2.1 实验材料

钙镁硅为主要原料的矿物肥料：供试肥料取自国内某土壤调理剂生产线，产品设计用于酸性土壤改良。经检测，其主要功效成分氧化钙(CaO)质量分数为25.8%、氧化镁(MgO)质量分数为10.3%、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)质量分数为21.5%，另含少量铁、锰、锌等微量元素。该肥料呈灰白色颗粒状，粒径分布集中在2~4 mm，单颗粒抗压强度实测为16~22 N。物料特性分析显示，该颗粒自身的最大饱和吸水率仅为4%，饱和吸水后的体积膨胀率约为3%。值得注意的是，该生产线下线产品的实测水含量(以质量分数计)高达17.5%，这意味着颗粒内部的孔隙和毛细管通道已被水分完全填充。将此类颗粒施入土壤后，外部水分难以进一步侵入颗粒内部产生有效的膨胀驱动力，因而颗粒无法自行崩解分散。该现象在前期田间试验中得到证实：施用1年后挖取样方观察，相当比例的颗粒仍保持原始形态。

肥料崩解剂：本研究选用5类崩解剂进行对比实验。(1) 吸水型崩解剂，采用羧甲基淀粉钠(CMS-Na)，以其强亲水性实现水分快速吸入，样品购自山东恒诺纤维素有限公司。(2) 膨胀型崩解剂，选用低取代羟丙基纤维素(L-HPC)，遇水后体积可显著膨胀，样品购自山东聊城阿华制药股份有限公司(即原“聊城阿华”)。(3) 吸水膨胀型崩解剂，以交联羧甲基纤维素钠(CCMC-Na)为代表，兼具前述两类特性，样品购自山东御龙纤维素科技有限公司。(4) 产气型崩解剂，按柠檬酸与碳酸氢钠质量比1.0:1.5自行配制，遇水发生中和反应释放二氧化碳，柠檬酸购自苏州亦宸化工科技有限公司，碳酸氢钠购自连云港巨佳化工科技有限公司。(5) 复合型崩解剂，将交联聚维酮(PVPP)与微晶纤维素(MCC)按质量比1:2物理混合，以期发挥PVPP的高膨胀性与MCC的毛细管导水协同效应。其中PVPP购自博爱新开源医疗科技集团股份有限公司，MCC购自山东御龙纤维素科技有限公司。

### 2.2 实验方法

崩解剂采用内添加的方法添加在颗粒内部：称取定量钙镁硅基土壤调理剂和实验设计比例(0.1%~1.0%)的崩解剂，同时置于小型转鼓混合

机中，以 30 r/min 转速混合 10 min，使崩解剂均匀分散在调理剂颗粒内部。

崩解性能测试：准确称取 10 g 待测样品，投入盛有 200 mL 蒸馏水 ((25 ± 1) °C) 的 250 mL 烧杯中，静置观察。以颗粒接触水瞬间为计时起点，记录其完全分散为细小碎屑所需时间。当视野内无明显完整颗粒、体系呈均匀浑浊态时判定为崩解终点。每组样品平行测定 3 次，结果取算术平均值。

### 2.3 实验结果

#### 2.3.1 崩解剂类型的优化筛选

固定崩解剂添加量为 0.5% 条件下，不同类型崩解剂的应用效果如表 1 所示。

表 1 不同类型崩解剂对土壤调理剂崩解时间的影响

Table 1 Effect of different types of disintegrants on the disintegration time of soil conditioners

崩解剂类型	崩解时间/min	关键备注
空白(不添加)	不崩解	作为对照基准
吸水型	15.0	有效,但崩解较慢
膨胀型	60.0	崩解速率最慢
吸水膨胀型	2.0	兼具吸水与膨胀特性
产气型	1.5	崩解快,但成本较高
复合型	1.0	兼具以上产品优点,但需要合理复配

结果表明，针对钙镁硅基土壤调理剂吸水膨胀性极差的特性，添加复合型崩解剂的效果最佳，能在 1 min 内实现土壤调理剂颗粒在水中的完全崩解。产气型崩解剂虽能达到相近的崩解速度，但考虑到其更高的原料成本，复合型崩解剂更具性价比优势。

#### 2.3.2 崩解剂用量

进一步针对效果最优的复合型崩解剂开展添加量梯度实验，结果见图 1。由图 1 可知，随着添加量由 0.1% 提升至 0.5%，崩解时间大幅度缩短；而当添加量超过 0.5% 后，崩解时间的改善效果逐渐趋于平稳。因此，综合技术效果与经济成本两方面因素考

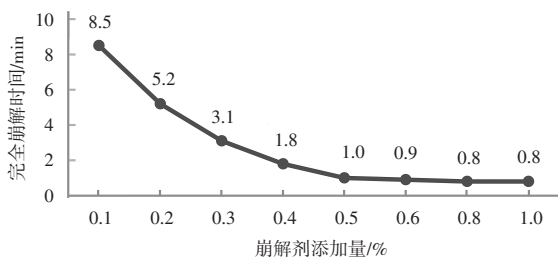


图 1 复合型崩解剂添加量对崩解时间的影响

Fig. 1 Effect of composite disintegrant dosage on disintegration time

虑，确定复合型崩解剂添加量 0.5% 为最优选择。

#### 2.4 生产验证与综合效果

将筛选出的方案（添加 0.5% 的复合型崩解剂）进行小试生产（批次规模 500 kg，采用圆盘造粒机，造粒时间 15 min，干燥温度 60 °C，干燥后颗粒  $w(\text{H}_2\text{O})$  降至 3% 以下）。所得产品效果验证结果：(1) 在实验室水中，颗粒在 1 min 内完全崩解（参照 2.2 节实验方法测定）；(2) 在模拟土壤环境中（将颗粒埋入相对湿度为田间持水量 60% 的壤土中，置于 25 °C 恒温培养箱，每 5 d 取样观察），颗粒在 30 d 内完全崩解分散，满足农艺使用要求。这一案例充分证明了崩解剂在解决特定肥料崩解难题上的有效性和工业化可行性。

### 3 讨论

#### 3.1 效能结果与机制的关联性分析

实验数据显示，复合型崩解剂（PVPP 与 MCC 质量比 1:2）在 0.5% 添加量下可使钙镁硅基土壤调理剂颗粒于 1 min 内完全崩解，其效果显著优于各单一类型崩解剂。这一差异可从崩解剂的作用机制层面获得解释。

复合型崩解剂的优势源于组分间的功能互补。崩解剂的作用途径主要包括毛细管导水、体积膨胀、产气推动等。本研究采用的复合体系中，MCC（微晶纤维素）因其制备工艺而保有丰富的微孔结构，类似海绵的吸水特性，遇水后能快速形成毛细管网络，将水分引入颗粒内部；而 PVPP（交联聚维酮）常被归为高效崩解剂类别，其特点是在水中迅速溶胀且不形成高黏度凝胶层，吸水后体积可大幅度扩张，产生显著的膨胀应力。二者复合后，MCC 构筑的导水通道确保了水分向颗粒深层的快速渗透，为 PVPP 的充分膨胀创造了条件；PVPP 膨胀产生的机械应力则沿 MCC 形成的孔隙网络均匀传递，促使崩解作用从颗粒内部向外同步展开，形成“内外协同”的崩解效应。

相比之下，单一类型崩解剂的作用机制较为简单，难以应对本研究所用高水含量 ( $w(\text{H}_2\text{O})$  17.5%)、低孔隙度钙镁硅基土壤调理剂颗粒的物理特性。吸水型崩解剂 (CMS-Na) 主要依靠亲水性吸水，但其膨胀能力有限，崩解驱动力不足，故需 15 min 方能完成崩解。膨胀型崩解剂 (L-HPC) 虽具备极高的膨胀率 (可达 500% 以上)，但外部水分难以快速渗入颗粒内部，膨胀作用无法有效启动，导致崩解时间长达 60 min。吸水膨胀型崩解剂 (CCMC-Na) 兼具吸水与膨胀双重功能，崩解时间

缩短至2 min,但其吸水形成的凝胶层有时会减缓水分向颗粒更深层的迁移。产气型崩解剂(柠檬酸+碳酸氢钠)通过酸碱反应快速生成二氧化碳,借助气压推动实现在1.5 min内崩解,但其气体生成多集中于颗粒近表层部位,且原料成本偏高。

上述机制分析也与农药及医药领域的崩解剂应用经验相互印证。在农药泡腾制剂的研发中,行业共识表明单一崩解机制往往难以满足快速崩解要求,需将产气、溶胀、毛细管等作用进行系统整合<sup>[6]</sup>。在药肥颗粒的开发实践中,通过将崩解材料与其他功能性填料复配,可实现颗粒的快速崩解与均匀分散。本研究结果进一步证实,针对吸水膨胀性差的矿物源土壤调理剂体系,单一崩解机制难以克服其物理结构障碍,而通过复合设计将毛细管导水与高倍膨胀两种机制有机结合,是实现快速、彻底崩解的有效技术路径。

### 3.2 崩解剂在农药与肥料领域的跨学科应用比较与启示

在农药制剂领域,崩解剂被明确定义为能够使片剂或粒状剂型在水中或其他液体介质中迅速崩解,从而促进有效成分悬浮、溶解与释放,以达到最佳稳定性和药效的助剂。其核心作用在于消除黏合剂的黏合力与压制过程中形成的机械力,使制剂迅速解离为细小颗粒乃至粉末,并加速有效成分的溶出。这一概念与肥料崩解剂“促进颗粒分散、加速养分释放”的核心功能高度同源,均致力于解决“有效组分从固态载体中高效释放”这一关键问题。然而,两者的作用场景和目标存在明确分野。

**作用对象与环境:** 农药崩解剂作用于水体或叶面液膜,旨在使有效成分快速分散形成均匀、稳定的悬浮液或溶液,以便于喷雾施用或直接溶解;而肥料崩解剂主要作用于成分复杂的土壤水环境,目标是促进养分与土壤颗粒接触,并兼顾对土壤结构的影响。

**剂型载体:** 农药崩解剂主要应用于水分散粒剂(WG)和泡腾片剂等需要快速崩解、分散的剂型。例如,在水分散粒剂中,崩解剂能加速颗粒在水中崩解,确保制剂具有良好的悬浮率和分散性;在泡腾片剂中,除崩解剂外还需加入酸碱系统(泡腾崩解剂),遇水产生二氧化碳气体,实现快速崩解与溶解<sup>[6]</sup>。肥料崩解剂则主要应用于颗粒肥料、土壤调理剂颗粒等,其崩解速度需与作物根系生长和养分需求规律相匹配,并非一概求快。

农药崩解剂按其结构和性质主要分为:淀粉及

其衍生物,如淀粉、羧甲基淀粉钠(CMS-Na)、羟丙基淀粉等,依赖遇水膨胀特性发挥作用;纤维素类,如低取代羟丙基纤维素(L-HPC)、微晶纤维素(MCC),吸水性强,易于膨胀,其中MCC因其多孔管状结构,毛细管作用显著;表面活性剂,如吐温-80、十二烷基硫酸钠(SDS)等,主要作为辅助崩解剂,通过改善体系润湿性,促进水分渗透;泡腾混合物,专用于泡腾片剂,由碳酸盐(如碳酸氢钠)和有机酸(如酒石酸、柠檬酸)组成,通过产气实现崩解。按溶解性能可分为水溶性崩解剂(如泡腾混合物、羧甲基纤维素钠)和水不溶性崩解剂(如淀粉、聚维酮(PVP))。

农药制剂中一些经典的崩解剂品种,其特性对肥料领域具有重要借鉴意义:(1)羧甲基淀粉钠(CMS-Na),对疏水性辅料体系崩解效果佳,适用于难溶药物,但需注意其与酸及多价金属离子的相容性问题。此特性提示在肥料领域应用时,需考虑其与土壤酸性环境或中微量元素肥料的相互作用。(2)交联羧甲基纤维素钠(CCMC-Na)与聚维酮(PVP),二者皆为“超级崩解剂”,吸水膨胀倍率较高,且不会形成高黏度凝胶,保水性能良好,能够持续将水分引入颗粒内部,崩解效率远高于普通淀粉。这为肥料领域研发高效崩解剂指明了方向。(3)微晶纤维素(MCC),虽自身吸水膨胀性不强,但其独特的海绵状多孔结构赋予其极佳的毛细管作用和液体吸附能力,常与其他膨胀型崩解剂协同使用。这一特性使其在吸附液体原药或制备高载液量肥料颗粒领域具备一定潜力。(4)泡腾崩解剂,提供了一种基于化学反应(产气)的快速崩解方案,在需要肥料或土壤改良剂迅速起效的特殊场景(如作物急救、田间快速调酸调碱)中可能存在应用价值。

农药制剂对崩解剂的选择和加入方式有着极为精细化的要求,这套方法论对提升肥料崩解剂的应用水平具有重要参考价值。例如,在制造兼具快速启动和持续供肥功能的肥料时,可以借鉴“内外加法”原理,将崩解剂与缓释材料分别置于颗粒的不同空间位置,实现对养分释放曲线的精准控制。

通过对崩解剂在农药与肥料两大领域应用的比较,可以得出以下结论与启示:

(1)两大领域“吸水膨胀”“产气推动”“毛细管渗透”等基本崩解机制相同,但因其最终作用场景(叶面/土壤)、受体(病虫/作物根系)及效能评价标准(悬浮率/长期肥效)不同,在崩解速度、

强度以及与环境相容性要求上产生分化。

(2) 淀粉类、纤维素类等天然高分子材料及其改性产物是通用的基础材料库。然而, 农药制剂更早、更广泛地应用了交联PVP、CCMC-Na等高效合成崩解剂, 并发展了完整的泡腾体系。肥料领域则可从汲取灵感, 开发适合土壤环境、成本可控的高效专用崩解剂。

(3) 农药制剂在崩解剂的筛选、复配、空间分布设计及工艺实现上已形成高度精细化的方法论。肥料行业, 特别是传统复合肥生产, 在此方面尚有提升空间。引入设计思维, 将崩解剂的应用从解决有无问题提升至调控释放动力学的层面, 是未来的升级方向。

(4) 两者的交叉点可能催生新型多功能产品。例如, 借鉴农药水分散粒剂技术开发高度均匀、快速分散的水溶性肥料颗粒; 或利用泡腾崩解技术开发用于灌溉系统的快速溶解调酸/调碱土壤改良剂; 或者在包膜肥料中, 利用崩解剂技术设计“开关机制”, 响应特定的土壤湿度或pH触发快速释放。

综上所述, 崩解剂作为连接“固态制剂”与“功能释放”的关键桥梁, 其在农药领域的深厚积累为肥料行业的技术创新提供了丰富的跨学科滋养。未来, 打破领域壁垒, 促进知识融合与再创新, 将有助于开发出高效、智能、成本更低、对环境友好的新一代农业投入品<sup>[7]</sup>。

### 3.3 崩解剂市场前景、挑战

在绿色农业、水肥一体化普及和化肥增效减量的大背景下, 对能提高肥料利用率的功能性添加剂需求持续增长。根据行业研究报告, 中国化肥助剂市场随着化肥产品结构的升级而持续增长。首先, 缓控释肥市场的快速增长为崩解剂提供了协同发展空间。全球控释肥市场预计将以7.72%的年复合增长率增长。值得注意的是, 先进的肥料设计理念并非一味求慢, 而是追求精准释放。例如, 有研究利用农业废弃物(如米糠、菠萝废料)合成的多孔生物降解材料作为缓释载体, 实现了NPK养分的缓慢释放, 且米糠基材料的缓释性能更优、释放动力学符合伪零级模型<sup>[8]</sup>。此外, 机械化学法也被证实可通过简单、环保的球磨工艺制备缓释肥料, 有效控制养分释放速率<sup>[9]</sup>。这表明肥料助剂技术正朝着材料来源可再生、制备工艺绿色的方向发展。在一些包膜控释肥或掺混肥料中, 可能需要一部分速效氮源快速启动, 此时含有崩解剂的速度单元与缓释

单元的配合就尤为重要。另外, 土壤健康与修护产业的兴起直接拉动了土壤调理剂的需求, 而崩解剂作为解决其应用瓶颈的关键技术, 需求随之提升。致力于土壤改良的国家政策导向, 将进一步催化这一市场。最后, 技术发展的趋势是复合化与功能化, 未来的崩解剂可能不仅是物理崩解速度的促进者, 还可能被赋予保水、调节局部pH, 甚至携带微生物菌剂等多重功能。崩解剂作为实现肥料速效或智能释放的关键, 尽管作为肥料助剂中相对细分的产品, 其独立市场规模数据不易精确剥离, 但可以从整体趋势和关联市场中窥见其前景, 市场潜力巨大。

崩解剂的推广应用也面临挑战:(1) 成本敏感性问题, 在竞争激烈的传统肥料市场中, 任何增加成本的因素都需要极高的价值说服力。(2) 工艺适配性, 崩解剂需要与高塔、转鼓、挤压等不同的造粒工艺相容, 且在后续的干燥、冷却过程中保持活性。(3) 效果评价标准, 当前缺少统一且贴合实际情况的应用效果评价方法。并且实验室中的“水中崩解时间”与复杂的土壤环境存在差异, 建立更科学的评价体系是关键。

## 4 结论与展望

本文通过对肥料崩解剂的系统研究, 可以得出以下主要结论:(1) 肥料崩解剂主要通过吸水膨胀、产气推动及毛细管渗透等物理化学机制发挥作用, 可分为吸水型、膨胀型、吸水膨胀型、产气型及复合型等, 其中复合型因其综合效能突出, 在肥料领域应用广泛。(2) 在解决以矿物源为代表的土壤调理剂崩解难题上, 添加崩解剂(特别是复合型崩解剂)被证明是有效的产业化技术路径。案例研究表明, 0.5%的添加量即可实现土壤调理剂颗粒在1 min内于水中完全崩解, 30 d内在土壤中充分分散, 大幅度提升了产品效能。(3) 产业协同性强, 发展前景广阔。崩解剂是化肥助剂产业升级的重要组成部分, 与缓/控释技术协同, 可实现对养分释放动力学的更精细调控。在土壤修复、功能性肥料发展等趋势驱动下, 其市场需求有望持续增长。

肥料崩解剂通过物理或化学机制促进肥料颗粒遇水崩解, 其核心价值在于提升养分释放的时效性与利用率, 并适应精准农业的需求。其产业前景与高效、环保、定制化的肥料发展主流趋势高度契合, 是连接肥料创新与农业增效的重要纽带。

(下转第101页)