

# 过氧酸分解影响因素及助稳措施

陈浩文<sup>1,2\*</sup>

(1. 化学品安全全国重点实验室, 山东 青岛 266104;  
2. 中石化安全工程研究院有限公司, 山东 青岛 266104)

**摘要:** 为了提升实际生活中过氧酸在生产、储存以及运输领域的安全可靠, 针对常见造成过氧酸分解的敏感因素进行研究, 总结出过氧酸一类物质最易受温度和金属离子等杂质的干扰, 酸碱度、光照、接触介质同样也是不可忽视的重要因素。基于以上存在问题, 围绕存储条件、生产工艺以及稳定剂几个方面系统地阐述了应对过氧酸分解需采取的助稳措施, 其中添加稳定剂相较其他措施又可作为方案灵活且效果良好的助稳手段。对过氧酸分解机理进行充分且深刻的研究, 开发出新型高效成本低廉的稳定剂, 是未来提升过氧酸产业本质安全化的关键所在, 也是今后过氧酸领域的重要研究方向。

**关键词:** 过氧酸; 分解; 稳定性; 稳定剂; 工艺安全

**中图分类号:** TQ031

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2026)S1-0055-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.010

## Influencing factors and stabilizing measures of peroxy acid decomposition

CHEN Hao-wen<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key laboratory of Chemical Safety, Qingdao 266104, China;  
2. SINOPEC Research Institute of Safety Engineering Co., Ltd., Qingdao 266104, China)

**Abstract:** In order to improve the safety and reliability of peroxy acid in the field of production, storage and transportation, the sensitive factors that commonly cause the decomposition of peroxy acid are studied, and it is concluded that the peroxy acid is the most susceptible to the influence of temperature and impurities such as metal ions while pH, light and contact medium are also important factors that can not be ignored. Based on the problems above, the stabilizing measures to cope with the decomposition of peroxy acid are systematically described from the aspects of storage conditions, production process and stabilizer, among which adding stabilizer can be a flexible and effective stabilizing means compared with other measures. To fully and profoundly study the decomposition mechanism of peroxy acid and develop a new type of efficient and low-cost stabilizer is the key to improve the intrinsic safety of peroxy acid industry in the future, and is also an important research direction in the field of peroxy acid in the future.

**Key words:** peroxy acid; decomposition; stabilization; stabilizer; process safety

过氧酸(peroxy acid), 简称过酸, 是分子内部含有过氧基(—O—O—)的酸类, 通常可分为无机过氧酸和有机过氧酸。无机过氧酸一般由过氧化氢与其对应的正酸(或酸酐、盐)相互作用而制得, 例如过一硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>5</sub>)在工业上广泛用于纸浆的漂白剂和采矿业中氧化物的解毒剂<sup>[1]</sup>。有机过氧酸则一般指在过氧化反应中有机酸中—OH被—OOH替换后所形成的化合物。最常见的有机过氧酸为过氧羧酸, 通式为R—C(O)—O—OH, 例如过氧甲酸(HCOOOH)、过氧乙酸(CH<sub>3</sub>COOOH)、过氧三氟乙酸(CF<sub>3</sub>COOOH)与过氧丙酸(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>COOOH)等。有机过氧酸是一类重要的化工原料, 由于过氧基的存在其本身具备强氧化性, 在多种领域中均有用途。过氧甲酸<sup>[2]</sup>与过氧乙酸<sup>[3]</sup>经加工处理可作为高效杀菌消毒的广谱消毒剂; 三氟过氧乙酸可通过Baeyer-Villiger反应氧化环己酮制备ε-己内酯, 后者主要

用于自聚合合成聚己内酯及相关酯类共聚高分子<sup>[4]</sup>; 间氯过氧苯甲酸作为一种常用的氧化剂可与烯烃发生Prilezhaev反应生成相应的环氧烷烃, 反应具有高度的立体专一性<sup>[5]</sup>。不难看出, 有机过氧酸是一类具有广泛应用前景的化工产品。

值得一提的是, 过氧酸在创造巨大效益的同时, 所带来的危险性也不容小觑。过氧酸中的过氧键属于高能键, 分解可释放大量能量。过氧键键长长且结合能力弱, 仅需吸收少部分能量便可发生断裂, 因此对热、振动、冲击或是摩擦都十分敏感<sup>[6]</sup>。这使得过氧酸在生产、储存和运输过程中存有潜在的风险, 一旦发生超温超压等现象, 反应热若不能及时移除, 过氧酸分解会进一步失控, 期间放出的CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>会引起火灾和爆炸等严重后果, 危害财产和人身安全。以过氧乙酸为例, 李祥茜<sup>[7]</sup>根据差示扫描量热仪(DSC)测试结果以及有关动力学参数测得过氧

乙酸的 TD24 为  $-1.4^{\circ}\text{C}$ , 意味着过氧乙酸体系在该温度下只需 24 h 便可达到最大失控反应速率, 也在常温下过氧乙酸有着非常高的分解风险。孙峰等<sup>[8]</sup>则针对过氧丙酸体系进行有关热分析实验, 结果表明过氧丙酸分解时的绝热温升可达  $250^{\circ}\text{C}$ , 系统压力最高可至 7.85 MPa, 充分说明了过氧丙酸反应失控后具有严重的破坏性。由此可见, 过氧酸是一类极易分解且分解失控后危险性极高的物质。为此, 深入了解过氧酸性质, 分析导致过氧酸分解的可能原因, 采取相对应的助稳措施, 从源头上有效防止过氧酸分解失控意义重大。

## 1 过氧酸分解原因分析

在分析过氧酸分解原因之前, 有必要认识过氧酸分解机理。通常来说, 过氧酸分解遵循自由基反应机理<sup>[9]</sup>, 即在特定条件下过氧酸会产生游离的自由基, 后者又能进一步对过氧酸产生作用, 诱使更多自由基产生, 如此循环往复形成自由基链反应, 直至体系中所有自由基被消耗殆尽, 因此过氧酸的分解是一个可持续且不可逆的过程。而加剧过氧酸分解的因素很多, 光照、温度、接触介质、杂质和 pH 等因素都能在一定程度上影响过氧酸的稳定性。故而在日常生产、储存和运输过程中要避免或是减缓这些因素对于过氧酸的影响。

### 1.1 温度

从动力学角度来说, 温度高低直接关系到过氧酸能否具有足够的能量来活化自身过氧键, 较高的温度不仅会使得过氧键发生断裂, 且温度越高断裂速率也越快。绝大部分过氧化物的分解反应均为放热反应, 因此在过氧酸分解过程中常常伴随着体系温度的不断升高, 分解速率进一步提升, 在不受外界干扰情况下最终达到反应失控。过氧酸热分解机理较为复杂, 以过氧乙酸为例, 其在酸性介质中发生热分解过程如图 1<sup>[10]</sup>所示。

图 1 中, 过氧乙酸首先在  $\text{H}^+$  作用下发生质子化, 生成 2 种存在共振结构的中间体(步骤 1), 随后在水分子与氢离子的多次进攻下, 不断产生新的活性中间体, 直至过氧乙酸达到分解平衡, 主要产物为醋酸和过氧化氢分子。上述步骤中反应温度直接影响到每一步反应里活性中间体的生成, 较高的温度会使得反应速率大幅提升, 导致过氧乙酸分解加剧。由此可见, 在研究过氧酸的过程中, 温度是不可忽视的一个关键参数。

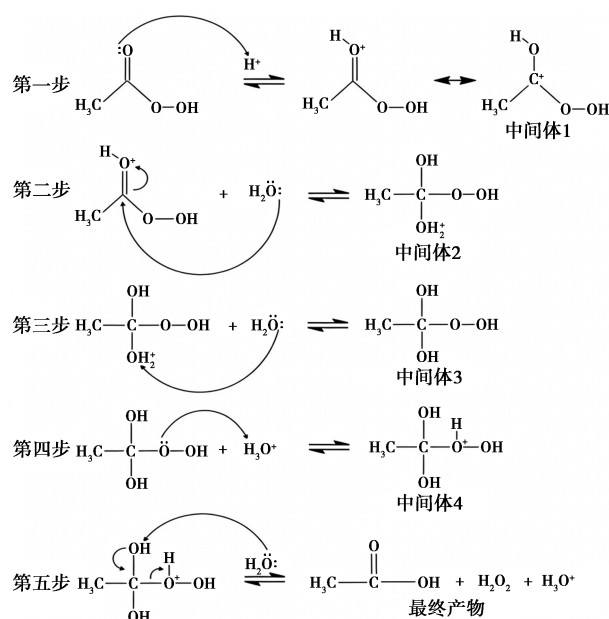


图 1 过氧乙酸热分解机理

吴海涛等<sup>[11]</sup>在开发过氧乙酸生产工艺中对合成过氧乙酸的反应温度与维持过氧乙酸稳定性的稳定温度均进行了考察。实验结果表明, 过氧乙酸的反应温度从  $5^{\circ}\text{C}$  升高至  $25^{\circ}\text{C}$  期间, 过氧乙酸浓度逐渐升高, 当反应温度高于  $25^{\circ}\text{C}$ , 过氧乙酸开始发生分解; 而对于特定浓度的过氧乙酸溶液, 在低于  $40^{\circ}\text{C}$  的温度下储存时, 分解量微乎其微, 当温度达到  $80^{\circ}\text{C}$  后, 平均每日分解率高达 64.25%。马静<sup>[12]</sup>对 2 种不同浓度过氧乙酸在不同温度下的分解速率常数与半衰期进行了测定, 结果表明, 对于浓度为 19% 的浓过氧乙酸而言, 在  $5^{\circ}\text{C}$  环境中的半衰期约为 60.8 d, 而当温度设定为  $40^{\circ}\text{C}$  时, 该溶液半衰期缩短至 6 d。类似的, 对于浓度为 1% 的过氧乙酸, 在  $5^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$  下的半衰期分别为 28.2、1.88 d, 前后相差 14 倍。李连峰等<sup>[13]</sup>对过氧甲酸制备过程中的活性氧转化及稳定性进行研究, 其中反应温度对于体系内过氧化物活性氧含量影响显著, 当反应温度大于  $45^{\circ}\text{C}$  后, 过氧甲酸活性氧含量会随着温度升高而降低。在温度为  $95^{\circ}\text{C}$  的条件下反应 1 h 后, 过氧甲酸活性氧含量降低至 0, 表明其全部分解, 意味着高温严重影响了过氧甲酸稳定存在。江佳佳等<sup>[14]</sup>在对间氯过氧苯甲酸(m-CBPA)热分解动力学实验中发现, 其热分解温度约为  $94^{\circ}\text{C}$ , 但在绝热条件下的初始放热温度仅为  $56.98^{\circ}\text{C}$ , 绝热温升约为  $41.69^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{TMR}_{ad}$  为 24 h 时所对应的绝热温度更低, 约为  $50.9^{\circ}\text{C}$ , 说明其贮存、运输和使用过程中容易发生热分解并导致热失控, 造成火灾甚至爆炸的风

险较大。

结合上述例子不难看出,对于过氧酸而言,无论是制备过程还是日常储存中,环境温度均不能超过某一特定值,一旦温度偏离合理范围,过氧酸的分解速率便会显著提高。

## 1.2 金属离子

相比温度而言,金属离子对过氧酸分解影响更为显著。过氧酸在常温条件下即可与 Fe、Mn、Cu 等金属化合发生分解反应,且反应较为剧烈,尤其是当过氧酸与变价过渡金属离子发生接触后,在极短时间内过氧酸完成分解。这是因为金属离子在过氧酸体系中可充当催化剂的角色,如图 2<sup>[15]</sup> 反应机理所示。

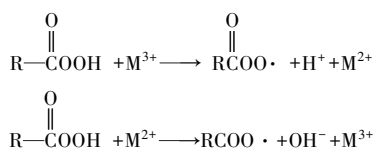


图 2 过氧酸在金属离子作用下的分解机理

在图 2 中,金属离子接触过氧酸后会诱导活泼自由基产生,使得分解速率加快,在此过程中金属离子不会被消耗,而是通过不断的价态变化使得反应持续进行,因此根据该机理可知,即便体系中仅存在微量的金属离子,过氧酸也会发生明显分解。

为此,已有学者针对金属离子对过氧酸稳定性的影响开展了一系列实验。郑建美<sup>[16]</sup>以过氧乙酸为研究对象,考察了 Cr<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>、Hg<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Ag<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>等多种金属离子对其稳定性影响情况。结果表明,Cr<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>这 4 种金属离子会导致过氧乙酸快速分解,浓度约为 20% 的过氧乙酸在与上述金属离子共存达 28 d 后,分解率分别达到 95.64%、96.26%、88.68% 与 94.29%,这些离子的存在一方面会按照图 2 中的反应机理发挥作用,同时也会使体系内过氧化氢迅速分解,影响过氧乙酸与过氧化氢之间的平衡状态,加速前者分解为乙酸和过氧化氢。Hg<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>则会导致过氧乙酸缓慢分解,分解率均在 10%~15% 范围内。相反的,Mg<sup>2+</sup>和 K<sup>+</sup>则因为起到电子型助剂的作用而使得过氧乙酸稳定存在。Dutka 等<sup>[17]</sup>则对过氧癸酸受不同金属离子催化分解的反应速率和反应活化能进行了深入研究,得出金属离子对过氧酸分解的催化活性按如下顺序排列:Mn<sup>2+</sup>>Co<sup>2+</sup>>Ce<sup>3+</sup>>Cr<sup>3+</sup>>Ni<sup>2+</sup>>Cu<sup>2+</sup>,过氧癸酸分解对应的表观活化能处于 45.9~88.0 kJ/mol,金属离子种类都能明显影响反应的表现速率常数和活化能。

除了金属离子类型,过氧酸对于金属离子的浓度也十分敏感。郑建美等<sup>[18]</sup>针对性地选取了几种金属离子,将其浓度范围控制在 10<sup>-6</sup>~10<sup>-3</sup> mol/L,令其与浓度为 20% 的过氧乙酸长周期接触。实验数据表明,高浓度的金属离子对过氧乙酸的稳定性影响较大,当浓度为 10<sup>-3</sup> mol/L 时,Co<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>等金属离子可在 10 d 内将过氧乙酸迅速分解,当离子浓度逐渐降低,这些金属离子依然能对过氧酸分解起正向作用。有趣的是,对于 Hg<sup>2+</sup>而言,当其浓度为 10<sup>-4</sup> mol/L 并与过氧乙酸接触 50 d 后,过氧乙酸浓度在接下来的 50 d 内保持不变,说明此时的 Hg<sup>2+</sup>浓度恰好能维持过氧乙酸的分解反应平衡,Hg<sup>2+</sup>既能起到催化分解还能起到催化合成作用。由此可见,不同种类金属离子及其不同浓度会对过氧酸的分解历程产生影响。

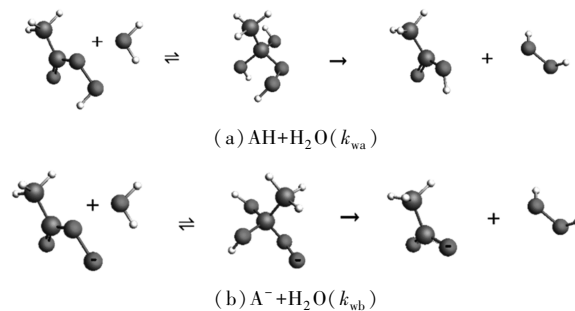
根据上述分析可知,过氧酸很难与大多数金属离子妥善共存,一旦向过氧酸中引入微量的金属离子便会导致催化分解反应的发生,从而降低过氧酸浓度,因此必须严格控制过氧酸合成或储存过程中的金属离子含量,才能有效防止其分解。

## 1.3 其他因素

除了温度与金属离子(杂质)这 2 种因素会显著破坏过氧酸的稳定性外,仍有其他一些影响因素会促使过氧酸发生分解。

### 1.3.1 pH

过氧酸体系中的酸和碱都能在一定程度上加快其分解速率,尤其是在接触强酸强碱时,体系内氢离子会攻击过氧酸的过氧键,使得自由基产生速率加快,同时产生大量的热量,不管是在酸性环境或碱性环境下,过氧酸均有可能遵循不同的反应历程发生分解,如图 3 所示。Deary<sup>[19]</sup>首次发现硼酸对过氧酸水解具有催化作用,硼酸分子可作为 Lewis 酸催化剂,降低过氧酸离去基团的 pKa,促使过氧酸分解为对应羧酸和一过氧硼酸盐。依照实验结果可知,当硼酸浓度为 0.1 mol/L 时,过氧乙酸和间氯过氧苯甲酸的水解速率均提高了约 12 倍,2 种过氧酸最大水解速率对应的 pH 分别为 9.0 和 8.4。



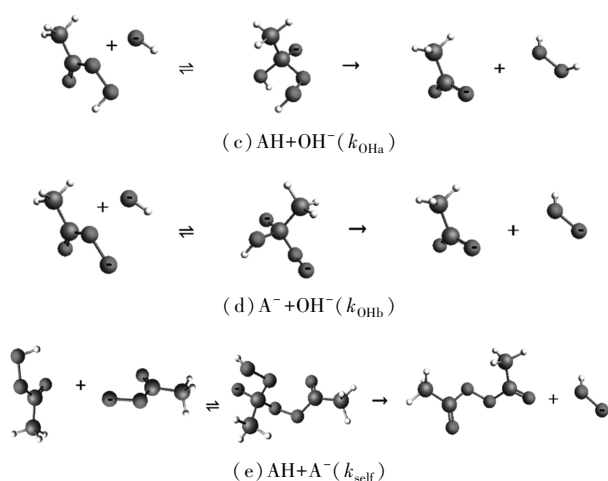


图 3 过氧乙酸从弱酸性到碱性环境下的分解机理

### 1.3.2 光照

与过氧化氢性质类似,过氧酸会由于光照导致自由基的产生,引发后续链反应,导致自身分解。基于此,张春泉<sup>[20]</sup>对过氧乙酸在不同光照条件下的稳定性情况进行了考察,将相同浓度的过氧乙酸依次分装在白色、棕色与黑色广口瓶中,放置 1 周后分解率分别为 44.56%、34.05% 和 28.27%,表明避光条件能有效防止过氧乙酸的分解。

### 1.3.3 接触介质

由于自身的强氧化性与腐蚀性,过氧酸对储存设备材质也具有一定要求。以金属组分(尤其是铁基)为主要成分的材料在与过氧酸接触过程中,不可避免地会发生腐蚀现象,释放至体系中的金属离子便会成为导致过氧酸迅速分解的原因。另外接触介质的表面结构可能在一定程度上也会对过氧酸的分解做出贡献,例如部分材料的表面粗糙度较高,致使其具有较高的过氧酸接触面积,长时间接触发生腐蚀的概率要高于表面平滑的材料,并且在此类高表面粗糙度的材料中,其所存在的尖端效应使其顶点或边缘区域具有更高的表面能,诱使在此处的过氧酸分解产生自由基,最终导致浓度下降。目前有关该部分研究较少,仍需采取更多的实验来考察与过氧酸更适配的接触介质。

## 2 过氧酸助稳措施

经上述对过氧酸的分解原因进行充分分析后,需要对过氧酸的稳定生产、合成及运输提出相对应的助稳措施。

### 2.1 存储方式

由于过氧酸与双氧水性质类似,具有强氧化性且分解反应十分剧烈,尤其是在密闭空间中过氧酸

一旦分解失控,会迅速导致设备超温超压,严重时发生爆炸,造成人员伤亡和财产损失。故在存储过氧酸时,应当选取对过氧酸呈惰性的材质作为容器,例如塑料或是耐腐蚀性能良好的不锈钢,并且在选用不锈钢材料作为容器时,应当对该材料进行一定预处理,例如清水冲洗、化学钝化和过氧化氢钝化等,这些过程可使不锈钢表面更为清洁,去除表面潜在的催化性杂质并且形成化学惰性保护层以阻止金属材料与过氧酸发生反应。另外,若有必要时,还可对部分储存容器进行表面抛光和退火处理,以期在宏观或微观尺度上改变材料表面特性。例如对材料表面进行抛光处理,可有效降低材料表面粗糙度,也即降低材料与溶液的实际接触表面积,从而实现稳定性的提升<sup>[21]</sup>。

在确认合适的存储过氧酸材质后,过氧酸还应储存在阴凉通风处,远离火种热源,必要时还应存放在冰柜冰箱等低温环境中,与可燃(易燃物质)、还原剂、活性金属粉末等物质分开存放,尽可能避免分解反应的发生。

### 2.2 工艺条件

生产过氧酸时的工艺条件同样是影响其稳定性的重要因素。一般情况下,过氧酸需要在偏离常温常压的状态下才能顺利合成,较高的反应温度在提高反应速率、加快反应进度的同时,也同样增加了过氧丙酸热分解的可能性,因而在工业实际生产中,必须要确保生产过程中温控系统的正常运行,即使在短时间内系统温度因局部反应过快而偏高,也能迅速控制,避免设备进一步超温使过氧酸快速分解。

工艺生产所采用的设备对控制过氧酸稳定合成也有着举足轻重的作用。传统过氧酸合成多为釜式合成,物料堆积量大,混合效率受此制约,从而不可避免地存在传热不均匀的情况。鄢冬茂等<sup>[22]</sup>利用微反应器强化醋酸与过氧化氢的混合效果,使得反应物浓度和温度分布均匀,减少副反应或不稳定中间体的生成,一方面提升整体收率,另一方面还可降低因副产物累积而导致的风险。

### 2.3 添加稳定剂

目前,过氧化物常采用注入稳定剂的形式来提高稳定性。以过氧化氢为例,在双氧水漂白工艺中,过氧化氢极易受到重金属离子的影响而发生分解,造成漂白剂失效与纤维损伤,因此需要加入缓冲剂或是稳定剂来缓解或是避免高温和重金属离子对  $H_2O_2$  的无效分解<sup>[23]</sup>。类似的,过氧酸同样可以通过添加稳定剂来减缓自身的分解趋势。从本质上来

说,稳定剂的存在都是为了消除过氧化物体系中金属离子的影响,依据稳定剂结合金属离子的机理不同,通常可将过氧化物稳定剂分为吸附型稳定剂和络合型稳定剂。

### 2.3.1 吸附型稳定剂

吸附型稳定剂主要通过自身高分子胶团借助静电或氢键吸附金属离子从而使金属离子失去催化能力。吸附型稳定剂中最为常用的是硅酸钠溶液,由双氧水漂白工艺发展而来。硅酸钠是具有晶体结构的胶体,比表面积大,还有较强的吸附能力,能够吸附亚铁离子并且稳定  $\text{HOO}\cdot$ ,一方面使亚铁离子不再对双氧水起催化作用,同时还能抑制  $\text{HO}\cdot$  的生成与分解<sup>[24]</sup>。此外还有硅酸镁稳定剂、脂肪酸镁盐表面活性剂、聚丙烯酰胺稳定剂等多种稳定剂可用于稳定过氧化物。例如赵梦奇等<sup>[25]</sup>利用  $N,N$ -亚甲基双丙烯酰胺作为交联剂,马来酸酐(MA)和丙烯酰胺(AM)作为单体,合成了 MA-AM 交联共聚物用于对重金属离子的吸附,其中通过调节合成物料比、体系 pH 及温度等条件,将该材料对  $\text{Fe}^{3+}$  的饱和吸附量优化至 98 mg/g,对过氧化物体系中铁离子的定向吸附具有潜在的应用价值。

### 2.3.2 络合型稳定剂

络合型稳定剂能与重金属离子形成配合物,从而降低或消除重金属离子对过氧化物的催化分解,通常来说,络合型稳定剂的稳定效果要比吸附型稳定剂更显著。络合型稳定剂一般可归纳为 3 类:①磷酸盐类,其中又可分为无机磷酸盐类(磷酸三钠、三聚磷酸钠、偏磷酸盐等)与有机磷酸盐类(以氮原子连接亚甲基磷酸为主要特征,如氨基三甲磷酸、乙二胺四亚甲基磷酸等),此类稳定剂可与金属离子形成稳定的环状螯合物;②氨基酸类,主要包括乙二胺四乙酸、二乙胺五乙酸、 $N$ -羟乙基乙二胺三乙酸等结构中通常包含氨基与羧基的化合物;③多羧酸类,主要包含苹果酸、柠檬酸钠、酒石酸、葡萄糖酸、羟基乙叉二磷酸等含单羟基或多羟基的羧酸化合物,这类稳定剂在强碱性环境下可对金属离子有更强的结合能力。

以上 3 类稳定剂各有特点,并且可适用于不同的场景。吴海涛等<sup>[11]</sup>综合对比了尿素、EDTA、水杨酸、磷酸、顺丁烯二酸以及焦磷酸钠等几种稳定剂对过氧乙酸的稳定效果,实验结果表明,过氧乙酸在加入上述物质后,分解率依次降低。郑建美等<sup>[18]</sup>在研究金属离子催化分解过氧乙酸的同时,选取了 8-羟基喹啉、邻二氮菲、酒石酸盐和草酸钠共 4 种络合型

稳定剂研究其致稳作用,其中 8-羟基喹啉和邻二氮菲的稳定效果更高,可归因于这 2 种稳定剂与多种金属离子络合后均具有较大的配合物稳定常数。

### 2.3.3 混合型稳定剂

混合型稳定剂就是将上述 2 类稳定剂机械混合或是自身兼备吸附-络合功能的物质,前者常见于将脂肪酸镁盐和络合剂 EDTA 混合而成的多功能稳定剂,以及聚丙烯酰胺与金属络合剂、阴离子表面活性剂组合得到的新型稳定剂,均可同时对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  等多种离子起到吸附与络合作用。将络合剂与吸附剂按照合理配比配制后,可实现扬长避短的作用,既保留了自身高效处理金属离子的优点,又能克服各自不足,在降低成本的同时有效提升过氧酸稳定性。截至目前,混合型稳定剂仍有巨大的研究价值。

## 3 展望

以过氧酸为例的有机过氧化物,其—O—O—键长而弱,极其不稳定,遇热或是杂质均易快速分解,随即造成温度急剧升高甚至发生反应失控,该类物质危险性很高,因而研究针对其安全生产、存储与运输的相应策略意义重大。

通过研究已经发现,温度、金属离子、酸碱度、接触材质、光照等多因素均可促使过氧酸快速分解,相对应的则需要通过优化工艺路线、提升接触材质兼容性、添加稳定剂、妥善存储等一系列措施来应对。

在未来,过氧酸等大量有机过氧化物仍是工业生产中的重要组成部分,对有机过氧化物危险性的研究也仍需进行下去,只有对有机过氧化物危险性的认识越充分,安全措施储备的越足够,危险工艺本质安全化才能够越深刻。

## 参考文献

- [1] Araujo Karla C F, Dos Santos Elisama, Nidheesh Puthiya V, et al. Fundamentals and advances on the mechanisms of electrochemical generation of persulfate and sulfate radicals in aqueous medium [J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2022, 38: 100870.
- [2] 黄静怡, 吴戈辉, 万琪琪, 等. 过氧甲酸-紫外/过氧甲酸联合消毒灭活真菌的效能与机制 [J/OL]. 中国环境科学, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/11.2201.X.20240619.1438.009>.
- [3] 宁雨阳, 李微, 董紫君, 等. 紫外/过氧有机酸消毒技术在水处理领域的应用及进展 [J/OL]. 环境化学, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20240821.1702.022>.
- [4] 王洪宇. 基于环己酮路线制备  $\epsilon$ -己内酯工艺研究进展及工艺安全分析 [J]. 安全工程与新材料, 2023, 23(10): 1-10.
- [5] Hussain H, Al-Harrasi A, Green I R, et al. Meta-chloroperbenzoic acid (mCPBA): A versatile reagent in organic synthesis [J]. RSC Adv, 2014, 4: 12882-12917.

(下转第 65 页)