

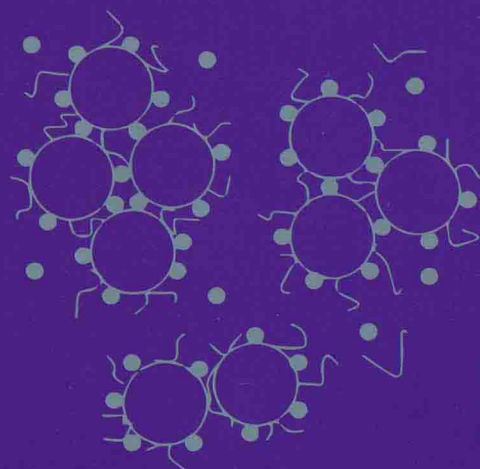


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

复合高分子 絮凝剂

Composite Polymer Flocculant

高宝玉 岳钦艳 王燕 李倩 著



化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

复合高分子 絮凝剂

Composite Polymer Flocculant

高宝玉 岳钦艳 王燕 李倩 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书首次全面论述了复合高分子絮凝剂的絮凝基础理论、制备工艺和应用技术,内容包括:复合高分子絮凝剂的发展;无机复合高分子絮凝剂(包括聚硅氯化铝高分子絮凝剂、聚合硅铝铁高分子絮凝剂等)的制备、分子量分布、形貌结构、形态分布及转化规律、作用机理和应用效果;无机-有机复合高分子絮凝剂(包括聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合高分子絮凝剂、聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合高分子絮凝剂、聚合铝-聚环氧氯丙烷胺复合高分子絮凝剂、铁盐-聚环氧氯丙烷胺复合高分子絮凝剂)的制备、形态分布、结构形貌、无机与有机组分之间的相互作用、絮体特性、絮凝动力学、絮凝机理、絮凝行为和应用效果;生物复合高分子絮凝剂的絮体特性、絮凝效果、絮凝行为和作用机制等。

本书具有较强的技术性和工程应用性,适于从事水和废水处理、絮凝剂生产及应用、应用化学、环境化学等方面的研究及生产实践科技人员参考,也供高等学校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

复合高分子絮凝剂/高宝玉等著. —北京:化学工业出版社, 2015.9
ISBN 978-7-122-24920-3

I. ①复… II. ①高… III. ①高分子化学-絮凝剂
IV. ①TQ047.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 188023 号

责任编辑:刘兴春
责任校对:王素芹

文字编辑:汲永臻
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17 1/4 字数433千字 2016年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究

混凝-沉淀/气浮是水和废水处理流程中应用最普遍的操作单元之一，而絮凝剂的品质是影响其水和废水处理效果和处理成本的决定性因素。絮凝剂的种类主要有无机絮凝剂、有机絮凝剂、微生物絮凝剂以及近几年来发展起来的复合絮凝剂，每一类絮凝剂都有其优缺点和应用范围。大量的工程实践证明，若把两种（类）或两种（类）以上的絮凝剂通过分别投加而进行复配使用或在一定条件下通过混合或反应形成一种复合絮凝剂产品应用，则可实现优势互补，可提高水和废水的絮凝处理效果、拓宽应用范围和降低处理成本。目前，在水和废水处理中，两种或两种以上絮凝剂进行复配使用已有大量的工程实践和应用实例，且已取得了良好的应用效果。而把两种（类）或两种（类）以上的絮凝剂在一定条件下通过混合或反应研发复合絮凝剂并应用到工程实践中去，则是最近十几年来发生的事情。由于复合絮凝剂能克服使用单一絮凝剂的许多不足，在降低水处理成本的同时可提高絮凝性能，所以，复合絮凝剂的研发和应用就成为当前水和废水处理领域的热点问题之一，也是新型、高效和经济的絮凝剂的主要发展方向。我国在“十一五”期间专门设立了国家科技支撑计划课题“小城镇饮用水处理药剂与材料研制”和国家高技术研究发展计划（863计划）课题“生物复合絮凝剂的制备和应用关键技术与工程示范”，在这些课题中，都把多功能复合型系列水处理药剂和生物复合絮凝剂的研发作为主要的研究内容。

复合絮凝剂是将两种或多种单组分絮凝剂通过某些化学反应，形成大分子量的共聚复合物，这样既克服了单一絮凝剂的不足，也充分发挥了多种絮凝剂的协同作用，产生显著的增效互补作用。实践证明，复合絮凝剂表现出优于单一絮凝剂的絮凝性能。基于复合絮凝剂的化学组成，复合絮凝剂可分为无机-无机复合高分子絮凝剂、无机-有机复合高分子絮凝剂、有机-有机复合高分子絮凝剂和微生物复合絮凝剂等。

无机复合高分子絮凝剂主要是铝盐、铁盐及硅酸盐的复合。可以通过先羟基化聚合后再加以混合，或者先混合再羟基化聚合，但最终总要形成羟基化的、有更高聚合度的形态，这样才能具有良好的絮凝效果。

众所周知，无机絮凝剂具有价格低廉、最佳投药范围宽等优点，但存在吸附架桥能力弱，投药量较多等缺点。而有机絮凝剂虽然具有吸附架桥能力强、投药量少和产品稳定性好等优点，但同时存在水处理成本高、难生物降解、有些还存在一定的毒副作用等缺点。鉴于两类絮凝剂各自的优缺点及两者在性能和价格上的互补性，对无机-有机复合高分子絮凝剂的研究逐渐成为热点。目前，国内外对基于聚二甲基二烯丙基氯化铵（PDMDAAC）和聚环氧氯丙烷-二甲胺[P（EPI-DMA）]有机高分子絮凝剂研发的铝（铁）盐-PDMDAAC和铝盐-

P (EPI-DMA)无机-有机复合高分子絮凝剂及其在水和废水处理中的应用有较多报道,发现上述无机-有机复合高分子絮凝剂较复合前的单一无机或有机絮凝剂具有更好的除浊、除藻、脱色和除磷效果,具有更宽泛的应用范围。

有机-有机复合高分子絮凝剂以其品种多样化,性能多元化而在水和废水处理及污泥脱水处理中具有重要的地位。在有机-有机复合高分子絮凝剂中,淀粉-聚丙烯酰胺接枝共聚物的研究日渐引起人们的重视,并取得了一定研究进展,是一类有良好应用前景的新型絮凝剂。

本书作者历年所在的研究团队与我国复合高分子絮凝剂的研发和成长同步。自20世纪80年代末以来,承担了20余项国家级和省部级相关研究课题,在复合高分子絮凝剂的基础研究、产品开发、生产工艺和工程应用等诸多方面,都进行了全方位的研究。在复合高分子絮凝剂研究领域已培养多名博士和硕士,发表研究论文400余篇,申请国家发明专利20余项(其中已授权10余项),有多项研究成果获得了国家级和省部级奖励。本书最主要的目的是把历年研究成果加以汇集,出版一本较为系统的复合高分子絮凝剂专著,求得有关同行专家的指正与讨论。本书首次全面论述了复合高分子絮凝剂的絮凝基础理论、制备工艺和应用技术,希望本书的出版能对我国复合絮凝剂的研制、开发和应用有所帮助。

本书共有8章,分别介绍了无机复合高分子絮凝剂(包括聚硅氯化铝高分子絮凝剂、聚合硅铝铁高分子絮凝剂等)的制备、分子量分布、形貌结构、形态分布及转化规律、作用机理和应用效果;无机-有机复合高分子絮凝剂(包括聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合高分子絮凝剂、聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合高分子絮凝剂、聚合铝-聚环氧氯丙烷胺复合高分子絮凝剂、铁盐-聚环氧氯丙烷胺复合高分子絮凝剂)的制备、形态分布、结构形貌、无机与有机组分之间的相互作用、絮体特性、絮凝动力学、絮凝机理、絮凝行为和应用效果;生物复合高分子絮凝剂的絮体特性、絮凝效果、絮凝行为和作用机制等。在每章后面都分别列入了参考文献,以方便查阅原始内容。

本书著者有高宝玉、岳钦艳、王燕、李倩和赵艳侠等,全书最后由高宝玉统稿、定稿。本书是作者所在研究团队近二十多年来和数十位研究生在复合高分子絮凝剂领域从基础研究到制备工艺和水及废水处理应用全方位的科技活动和研究成果的总结,期望本书的出版对我国絮凝剂的发展研究能起到借鉴促进作用。

限于作者的水平和学识,书中难免有疏漏和不足之处,敬请专家和读者不吝指正,以便今后有机会时修订。

著者

2015年10月

1 复合高分子絮凝剂的发展

1

1.1 水和废水混凝处理, 混凝剂与絮凝剂	1
1.1.1 水和废水的混凝处理	1
1.1.2 混凝剂与絮凝剂	2
1.2 复合高分子絮凝剂的发展	3
1.2.1 无机-无机复合高分子絮凝剂	3
1.2.2 无机-有机复合高分子絮凝剂	6
1.2.3 微生物复合絮凝剂	8
参考文献	9

2 聚硅氯化铝高分子絮凝剂

13

2.1 硅酸及活化硅酸	13
2.1.1 硅酸化学的基本概念	13
2.1.2 活化硅酸的生产工艺, 在水处理中的应用及研究进展	14
2.2 聚硅酸铝盐絮凝剂	17
2.2.1 向聚硅酸中引入铝盐制备聚硅酸铝盐絮凝剂	17
2.2.2 采用高剪切工艺, 用硅酸钠、铝酸钠和硫酸铝等作原料制备 PASS 絮凝剂	18
2.3 聚硅氯化铝的制备、Al(Ⅲ)水解-聚合历程及铝硅作用特性	19
2.3.1 聚硅氯化铝的制备方法	20
2.3.2 Al(Ⅲ)水解-聚合反应过程特征	20
2.3.3 聚硅氯化铝与聚合氯化铝的酸解作用	23
2.4 聚硅氯化铝的颗粒大小及分子量分布	24
2.4.1 激光光散射用于测定 PASC 及 PAC 的颗粒大小分布的原理 及方法	24
2.4.2 激光光散射技术测定聚硅氯化铝与聚合氯化铝的颗粒大小分布	24
2.4.3 超滤法测定聚硅氯化铝与聚合氯化铝的分子量分布	26
2.5 聚硅氯化铝的形态分布及其转化规律	27
2.5.1 Al-Ferron 逐时络合比色法测定原理、方法与测定结果	28
2.5.2 Al-Ferron 逐时络合比色法测定方法	29
2.5.3 Al-Ferron 逐时络合比色法的测定结果	30
2.5.4 ²⁷ Al-NMR 法测定原理	33
2.5.5 ²⁷ Al-NMR 法测定方法	35

2.5.6	^{27}Al -NMR 法测定结果	35
2.5.7	Al-Ferron 逐时络合比色法与 ^{27}Al -NMR 法测定结果的比较分析	38
2.6	聚硅氯化铝的电动特性	41
2.6.1	Zeta 电位和流动电流 (SC) 的测定方法	42
2.6.2	高岭土悬浊液及高岭土和腐植酸混合液的电动特性与 pH 值的关系	42
2.6.3	聚合氯化铝与聚硅氯化铝的 SC 值比较	43
2.6.4	聚合氯化铝与聚硅氯化铝水解产物的 SC 值与溶液 pH 值的关系	45
2.6.5	聚合氯化铝与聚硅氯化铝在浑浊水中的 SC 特征	46
2.6.6	聚合氯化铝与聚硅氯化铝的水解沉淀物的电泳特征	47
2.6.7	SC 与 zeta 电位的相关关系	49
2.7	利用透射电镜观察研究聚硅氯化铝的结构形貌	49
2.7.1	碱化度 (B) 对聚合氯化铝和聚硅氯化铝结构形貌的影响	50
2.7.2	Al/Si 摩尔比对聚硅氯化铝结构形貌的影响	51
2.7.3	制备工艺对聚硅氯化铝结构形貌的影响	52
2.8	聚硅氯化铝的絮凝效果	54
2.8.1	实验材料与方法	54
2.8.2	聚硅氯化铝絮凝处理模拟水的效果	54
2.8.3	絮凝处理后聚硅氯化铝在水体中的残留铝含量	58
2.8.4	聚硅氯化铝絮凝处理地表水的效果	60
2.8.5	聚硅氯化铝絮凝处理实际废水的效果	64
2.9	聚硅氯化铝的絮凝机理	66
2.9.1	SiO_2 颗粒形状与大小	67
2.9.2	搅拌对混凝作用的影响	67
2.9.3	PASC 的投量对混凝作用的影响	68
	参考文献	69

3 聚合硅铝铁高分子絮凝剂

74

3.1	聚合硅铝铁的制备	74
3.1.1	聚合硅铝铁的制备原理	74
3.1.2	聚合硅铝铁的制备方法	74
3.2	聚合硅铝铁的结构表征	75
3.2.1	红外光谱法	75
3.2.2	X 射线衍射法	77
3.3	聚合硅铝铁的水解-聚合历程及电动特性研究	78
3.3.1	聚合硅铝铁的水解-聚合历程	78
3.3.2	聚合硅铝铁的电动特性	79
3.4	聚合硅铝、铁的形态分布及转化	82
3.4.1	聚合硅铝铁中铝的形态分布及转化	82
3.4.2	聚合硅铝铁中铁的形态分布及转化	84
3.5	聚合硅铝铁的结构形貌及分子量分布	87
3.5.1	聚合硅铝铁的结构形貌	87

3.5.2 聚合硅铝铁的分子量分布	89
3.6 聚合硅铝铁的混凝效果	91
3.6.1 聚合硅铝铁的混凝除浊和脱色效果	91
3.6.2 聚合硅铝铁在处理水样中的残余铝含量	94
3.6.3 聚合硅铝铁的混凝除油效果	96
参考文献	97

4 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合高分子絮凝剂

98

4.1 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合絮凝剂的制备及电动特性	98
4.1.1 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合絮凝剂的制备原理及方法	98
4.1.2 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合絮凝剂的电动特性	99
4.2 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的形态分布及相互作用	101
4.2.1 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的形态分布及影响因素	101
4.2.2 聚合铝与二甲基二烯丙基氯化铵均聚物之间的相互作用	103
4.3 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝效果及混凝机理	104
4.3.1 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的残余铝含量及影响因素	104
4.3.2 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝脱色效果	106
4.3.3 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的除浊效果	108
4.3.4 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝除油效果	109
4.3.5 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物处理城市纳污水的效果	110
4.3.6 聚合铝-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝机理	111
参考文献	112

5 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物复合高分子絮凝剂

114

5.1 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物 (PFC-PDMDAAC) 的水解聚合特征、Fe (Ⅲ) 水解形态	114
5.1.1 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的水解聚合特征	114
5.1.2 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物中 Fe (Ⅲ) 水解形态	115
5.2 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的电荷特性、结构形貌及粒度分布	121
5.2.1 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的电荷特性	121
5.2.2 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的结构形貌	125
5.2.3 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的粒度分布	127
5.3 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝动力学及絮体形成过程	131
5.3.1 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝动力学	131
5.3.2 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的絮体形成过程	136
5.4 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的絮体物理特性	139
5.4.1 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的絮体强度及恢复能力	140
5.4.2 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的絮体分形	141
5.5 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物与传统混凝剂的对比	142

5.5.1 不同投加方式下混凝效果对比	143
5.5.2 不同投加方式下絮体沉降性能对比	144
5.5.3 不同投加方式下 Fe (III) 在混凝过程中水解形态对比	144
5.5.4 不同投加方式的混凝机理分析	145
5.6 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝效果及机理	148
5.6.1 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物处理模拟水和废水的效果及 影响因素	148
5.6.2 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物处理实际废水的效果	151
5.6.3 聚合铁-二甲基二烯丙基氯化铵均聚物的混凝机理	160
参考文献	163

6 聚合铝-聚环氧氯丙烷胺复合高分子絮凝剂 167

6.1 聚环氧氯丙烷胺的结构形貌及电荷特性	167
6.1.1 聚环氧氯丙烷胺及其复合混凝剂的结构形貌	167
6.1.2 聚环氧氯丙烷胺及其复合混凝剂的电荷特性	171
6.2 聚环氧氯丙烷胺的混凝脱色效果及机理	173
6.2.1 聚环氧氯丙烷胺的混凝脱色效果及机理	173
6.2.2 影响聚环氧氯丙烷胺混凝脱色效果的因素	178
6.3 聚合铝-聚环氧氯丙烷胺的混凝脱色性能及机理	180
6.3.1 聚合铝-聚环氧氯丙烷胺的混凝脱色性能	180
6.3.2 影响聚合铝-聚环氧氯丙烷胺混凝脱色效果的因素	184
6.4 混凝剂的絮体形成及特性	185
6.4.1 聚环氧氯丙烷胺的絮体形成及特性	186
6.4.2 聚合铝-聚环氧氯丙烷胺的絮体形成及特性研究	193
参考文献	196

7 铁盐-聚环氧氯丙烷胺复合高分子絮凝剂 198

7.1 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的制备、水解聚合形态和形貌结构	198
7.1.1 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的制备	198
7.1.2 铁盐-聚环氧氯丙烷胺中 Fe (III) 水解聚合形态	198
7.1.3 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的形貌结构	200
7.2 铁盐-聚环氧氯丙烷胺中铁盐与聚环氧氯丙烷胺的相互作用	200
7.2.1 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的电荷特性及影响因素	200
7.2.2 铁盐-聚环氧氯丙烷胺中铁的形态分布	201
7.3 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的絮体特性	202
7.3.1 采用二乙烯三胺作为交联剂时复合高分子絮凝剂的絮体特性	202
7.3.2 采用三乙烯四胺作为交联剂时复合高分子絮凝剂的絮体特性	204
7.3.3 采用乙二胺作为交联剂时复合高分子絮凝剂的絮体特性	206
7.3.4 絮凝剂的投加方式对絮体特性的影响	207
7.3.5 聚合氯化铁的碱化度对絮体特性的影响	209
7.3.6 聚环氧氯丙烷胺中交联剂的种类对絮体特性的影响	210

7.3.7 铁盐与聚环氧氯丙烷胺的质量比对絮体特性的影响	211
7.3.8 铁盐-聚环氧氯丙烷胺形成絮体的絮体强度及破碎后恢复能力	212
7.4 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的混凝效果	213
7.4.1 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的混凝脱色效果与影响因素	213
7.4.2 铁盐-聚环氧氯丙烷胺的混凝除油效果及影响因素	221
参考文献	224

8 生物复合高分子絮凝剂

225

8.1 生物絮凝剂与铝盐复配使用的混凝效果、混凝机理及絮体特性	225
8.1.1 生物絮凝剂与铝盐混凝剂储备液的制备	225
8.1.2 生物絮凝剂与铝盐复配处理模拟水样的混凝效果、影响因素及 混凝机理	225
8.1.3 生物絮凝剂与铝盐复配处理模拟水样的絮体特性及影响因素	230
8.1.4 生物絮凝剂与铝盐复配处理实际地表水样的混凝效果、影响 因素及混凝机理	238
8.1.5 生物絮凝剂与铝盐复配处理实际地表水样的絮体特性及影响 因素	243
8.2 生物絮凝剂与四氯化钛复配使用的混凝效果、混凝机理及絮体特性 ..	249
8.2.1 混凝效果及机理	249
8.2.2 絮体特性研究	252
8.3 生物絮凝剂与非离子型和阴离子型聚丙烯酰胺的复合絮凝剂及其混凝 效果	256
8.3.1 复合型絮凝剂的制备方法	256
8.3.2 复合型絮凝剂对高岭土模拟水样的混凝效果	258
8.3.3 复合型絮凝剂对腐植酸模拟水样的混凝效果	260
8.4 生物絮凝剂的改性与混凝效果	264
8.4.1 生物絮凝剂接枝丙烯酰胺絮凝剂 (CBF-AM) 的制备方法与 混凝效果	264
8.4.2 生物絮凝剂接枝丙烯酰胺及二甲基二烯丙基氯化铵絮凝剂 (CBF-AM-DMDAAC) 的制备方法与混凝效果	268
参考文献	271

1

复合高分子絮凝剂的发展

1.1 水和废水混凝处理，混凝剂与絮凝剂

1.1.1 水和废水的混凝处理

工农业的迅速发展，人口剧增，人类赖以生存的水资源日渐贫乏，水资源危机日趋加剧。目前，水污染以及缺水问题越来越成为制约经济发展的重要因素。为了节约水资源，提高水的利用率，减轻和消除水污染对人类和环境造成的危害，必须加强水处理工作。在水污染控制、给水净化处理、污（废）水深度处理回用以及污泥脱水处理工艺技术中，混凝技术是应用最普遍的处理技术单元。混凝过程的行为和效果决定着后续水和废水处理流程的运行工况、出水水质和成本费用。

混凝过程是指在水处理过程中向水中投加药剂，进行水与药剂的混合，使水中稳定分散的胶体和其他微细的污染物质通过压缩双电层、吸附点中和作用、吸附架桥、网捕或卷扫作用而脱稳并且聚集成便于与水分离的絮体的过程。在水处理中，混凝技术最早主要是用于除浊和脱色，目的是解决水质的观感问题。随着新型高效混凝剂的研发和应用、混凝技术的发展和强化混凝技术的应用，混凝不但可有效去除水体中产生浊度和色度的胶体和其他微细的污染物质，而且对水体中的藻类物质、天然有机物质、纳米污染物、细菌病毒、重金属、染料、油脂及石油等具有良好的去除效果。

强化混凝技术是指在地表水常规处理工艺流程中，加入高效能的混凝剂或在合适的水处理条件下提高原水中有机污染物的去除率。强化混凝有两个目的：第一是提高有机物的去除率；第二是充分去除消毒副产物（DBPs）的前驱物质，使得当用氯气作消毒剂且在配水系统中维持一定的余氯量时，各种 DBPs 的三卤甲烷类（THMs）的最大含量（MCL）值不超标。

在混凝过程中，人们经常把混凝与絮凝混用。混凝（coagulation）通常指使用的是无机混凝剂（coagulant），而絮凝（flocculation）通常指使用的是有机高分子絮凝剂（flocculant）。一般而言，混凝指的是加入带正电的混凝剂去中和水体中颗粒表面的负电，使颗粒“脱稳”。于是，颗粒间通过碰撞、表面吸附、范德华引力等作用，互相结合变大，

以利于从水中分离。混凝过程中采用的混凝剂是分子量低而正电荷密度高的水溶性聚合物，多数为液态，主要是铝盐、铁盐及其聚合物。絮凝则指的是聚合物的高分子链在水体中悬浮的颗粒与颗粒之间发生架桥的过程。“架桥”就是聚合物分子上不同链段吸附在不同颗粒上，促进颗粒与颗粒聚集。絮凝过程中采用的絮凝剂为有机聚合物，多数分子量较高，并有特定的电性（离子性）和电荷密度（离子度）。在实际混凝过程中，混凝机理十分复杂，要明确区分开混凝与絮凝是非常困难的，二者经常混用。在本书中也难免有时加以混用。

1.1.2 混凝剂与絮凝剂

混凝过程中投加的药剂称为混凝剂或絮凝剂，而混凝处理的效果关键取决于混凝剂的品质。表 1-1 列出了各种混凝剂、絮凝剂的分类及种类。传统的混凝剂通常是指铝盐和铁盐，如硫酸铝、三氯化铝、三氯化铁和硫酸铁等，而絮凝剂通常指的是在传统铝盐和铁盐混凝剂基础上发展起来的聚合铝盐和聚合铁盐等无机高分子药剂，以及天然的或人工合成的水溶性有机高分子聚合物。有机高分子絮凝剂因价格较高或因不能完全消除其合成单体所具有的毒性，而不能完全替代无机混凝剂或无机高分子絮凝剂，往往是作为助凝剂使用。

无机高分子絮凝剂（inorganic polymer flocculants, IPFs）是自 20 世纪 60 年代研制开发出的产品，如聚合氯化铝（polyaluminum chloride, PAC）、聚合硫酸铁（polyferric sulfate, PFS）、聚合氯化铝铁（polyaluminium ferric chloride, PAFC）、聚硅氯化铝（polyaluminium silicate chloride, PASC）等。无机高分子絮凝剂是 Al（Ⅲ）、Fe（Ⅲ）、Si（Ⅳ）的羟基多核络合物或者羟基聚合物。一般而言，无机高分子絮凝剂的单元分子量在几千道尔顿，较有机高分子絮凝剂的分子量要低得多。不过无机高分子的结构比较容易排列成有规则微晶型，自组装成为链状和分支状，也可以发挥比传统无机混凝剂更强的吸附架桥作用^[1]。

传统无机混凝剂和无机高分子絮凝剂都是 Al（Ⅲ）、Fe（Ⅲ）盐类水解时趋向氢氧化物沉淀的中间产物^[2]。它们的根本差异在于：传统无机混凝剂是投入水中后进行自发水解并且在过饱和条件下容易转化为沉淀物；无机高分子絮凝剂则是在人工特定条件下进行强制水解制备的产品，它的形态在水中相对比较稳定，对继续水解呈惰性稳态而保持已有形态，能够发挥最优的凝聚絮凝作用。这对于聚合铝盐的聚十三铝（Al₁₃）形态表现得最为明显^[3,4]。

无机高分子絮凝剂的优点在于它比传统絮凝剂效能更优异，比有机高分子絮凝剂价格低廉。但与有机高分子絮凝剂相比，无机高分子絮凝剂的分子量以及絮凝架桥能力相差很大^[5]，单独使用具有投加量大和产生的污泥量多等缺点^[6]。无机高分子絮凝剂的品种仍在不断发展中且趋向于序列化，无论是形态结构、行为和作用机理方面，还是在制作工艺技术、效果和作用特征等方面，还存在诸多未能阐明的问题，有待于进一步研究和实践。目前在混凝技术领域，研制开发新型高效、无毒、价廉的混凝剂、絮凝剂成为一项迫切的任务。

表 1-1 各种混凝剂、絮凝剂的分类及种类

无机类	阳离子金属盐	铝盐系列	凝聚剂絮凝剂	硫酸铝(简称 AS)、三氯化铝(AC)、硫酸铝钾等 聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铝(PAS)
		铁盐系列	凝聚剂絮凝剂	硫酸铁(FS)、三氯化铁(FC)、氯化亚铁等 聚合硫酸铁(PFS)、聚合氯化铁(PFC)
		钙镁盐系列	凝聚剂	氢氧化钙、碳酸钙、氢氧化镁、碳酸镁等(主要起助凝作用)
	阴离子型硅酸盐(助凝剂)			活化硅酸(PSA)

续表

无机类	复合系列	无机复合系列	聚合硫酸铝铁(PFAS)/聚合氯化铝铁(PFAC)、聚合硫酸氯化铁(PFSC)/聚合硫酸氯化铝(PASC)、聚合铝硅(PASi)/聚合铁硅(PFSi)、聚合硅酸铝(PSA)/聚合硅酸铁(PSF)、聚合氯化磷酸铝等
		有机复合系列	聚合铝/铁-聚丙烯酰胺、聚合铝/铁-甲壳素、聚合铝/铁-天然有机高分子、聚合铝/铁-其他合成有机高分子等
有机类	合成	阳离子型	聚丙烯酰胺、聚二甲基二烯氯化胺、聚乙烯吡啶盐酸胺及其共聚盐等
		阴离子型	聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钠、马来酸共聚物等
		非离子型	聚丙烯酰胺、聚氧乙烯等
	天然	阳离子型	硅藻阮酸钠、改性淀粉、改性腐植酸、甲壳素等
		阴离子型	淀粉、腐植酸、天然植物等
生物类	天然	阳离子型	酶菌、细菌、放线菌、酵母菌等均具有絮凝作用；目前发现最好三类型生物絮凝剂菌种是酱油曲霉菌(<i>Aspergillus</i>) AJ7002；拟青霉菌(<i>Paecilomyces</i> sp.) 和红平红球菌(<i>Rhodococcus erythropolis</i>)

1.2 复合高分子絮凝剂的发展

对于上述提到的诸多混凝剂与絮凝剂，每一类产品都有其优缺点和应用范围。大量的工程实践表明，若把两种（类）或两种（类）以上的混凝剂或絮凝剂通过分别投加而进行复配使用，或在一定条件下通过混合或反应形成一种复合絮凝剂产品应用，则可实现优势互补，可提高水和废水的混凝处理效果、拓宽应用范围和降低处理成本。目前，在水和废水处理中，两种或两种以上混凝剂或絮凝剂进行复配使用已有大量的工程实践和应用实例，且已取得了良好的应用效果。而把两种（类）或两种（类）以上的混凝剂或絮凝剂在一定条件下通过混合或反应研发复合絮凝剂并应用到工程实践中去，则是 20 世纪 90 年代发生的事情。由于复合絮凝剂能克服使用单一絮凝剂的许多不足，在降低水处理成本的同时可提高絮凝性能，所以，复合絮凝剂的研发和应用就成为当前水和废水处理领域的热点问题之一，也是新型、高效和经济的絮凝剂的主要发展方向。我国在“十一五”期间专门设立了国家科技支撑计划课题“小城镇饮用水处理药剂与材料研制”和国家高技术研究发展计划（863 计划）课题“生物复合絮凝剂的制备和应用关键技术与工程示范”，在这些课题中，都把多功能复合型系列水处理药剂和生物复合絮凝剂的研发作为主要的研究内容。

基于复合絮凝剂的化学组成，复合絮凝剂主要分为无机-无机复合高分子絮凝剂、无机-有机复合高分子絮凝剂和微生物复合絮凝剂等。本书就近年来国内外研究人员对上述复合絮凝剂的主要研究成果和进展进行综述，并分析其存在的主要问题和提出今后研究工作建议。希望本书能为我国复合絮凝剂的研制、开发和应用有所帮助。

1.2.1 无机-无机复合高分子絮凝剂

铝盐和铁盐一直是水和废水处理中广泛应用的无机絮凝剂，其产品主要有硫酸铝、硫酸亚铁、硫酸铁、PAC 和 PFS 等。这些产品及水解聚合产物带有正电荷，主要是通过吸附电中和及卷扫作用机理对水体中荷负电的胶体污染物质发生凝聚作用的，但其对水体中的胶体污染物质的吸附架桥能力较弱，往往需要较高的投量才能取得良好的絮凝效果。为了进一步

提高无机絮凝剂的絮凝效果和降低产品用量,通过大量研究和应用实践发现:若把铁盐和铝盐在一定条件下通过共聚反应,或把具有絮凝或助凝作用的无机成分加入到铁盐、铝盐或铁盐/铝盐溶液中并进行反应,通过形成具有更高分子量的产品或通过协同增效作用可制备出具有更好絮凝效果的无机-无机复合絮凝剂产品。目前,人们研发出了多种无机-无机复合絮凝剂产品,主要包括聚合硫酸氯化铝 (polyaluminum chloride sulfate, PACS)、PAFC、聚合硅酸硫酸铝 (polyaluminum silicate sulfate, PASS)、聚合硅酸氯化铝 (polyaluminum silicate chloride, PASiC) 和聚合硅酸硫酸铁 (polyferric silicate chloride, PFSiS)、聚合硅酸氯化铝铁 (polyaluminum ferric silicate chloride, PAFSiC) 等。

在制备 PAC 过程中通过引进少量的 SO_4^{2-} , 可制备出带有 SO_4^{2-} 的 PACS 产品。 SO_4^{2-} 的引入影响聚合铝的结构和储存稳定性^[4~6], 一般当 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 为 4 左右时, PACS 既具有良好的混凝效果又有良好的储存稳定性。通过对 PACS 的进一步研究, 发现当 $\text{Al}^{3+}/\text{SO}_4^{2-}$ 摩尔比为 16 左右时混凝效果较好^[7,8]。PACS 自 20 世纪 60 年代以来一直为日本的主导产品, 目前国内生产的 PAC 中大多都含有不同量的 SO_4^{2-} , PACS 在水和废水处理中已得到了广泛的应用。

铁盐和铝盐通过加碱部分水解共聚可制备出 PAFC 絮凝剂。该复合絮凝剂既有聚合铝盐絮凝剂盐基度高、对原水适应性强的特点, 又有聚合铁盐絮凝剂密度大、絮体沉降快的优点。PAFC 产品中 Fe/Al 摩尔比不同, 则产品的性能、效果和应用范围有所不同^[9]。在 PAFC 产品中, 铁盐和铝盐的水解共聚作用导致其可稳定储存的产品的碱化度介于 PAC 的碱化度和聚合氯化铁 (PFC) 的碱化度之间, 具体值取决于 PAFC 产品中 Fe/Al 摩尔比。PAFC 絮凝剂的制备方法很多且制备工艺比较成熟, 制备出的产品已在水和废水处理中得到了广泛的应用。PAFC 絮凝剂既可由 AlCl_3 和 FeCl_3 通过加碱部分水解制备, 亦可以煤矸石、铝酸钙粉或氧化铝厂赤泥等为原料通过添加一定量的铝盐在一定条件下反应制备, 也可以用酸洗废液或其他含有铁盐成分的工业废液在制备 PFC 的过程中通过加入铝盐复合制备。关于 PAFC 絮凝剂的制备及应用研究多见国内报道, 而国外有关报道则较少。

聚合硅酸硫酸铝 (PASS) 絮凝剂是在硫酸铝絮凝剂和活化硅酸助凝剂的基础上按照两条不同的制备方法发展起来的。一种方法是为了提高活化硅酸的稳定性和絮凝效果, 将硫酸铝溶液与活化硅酸在一定条件下通过混合反应制备 PASS 产品。采用这种方法研发 PASS 絮凝剂的思路是基于带有负电荷的活化硅酸具有较高的分子量, 对水体中的胶体物质具有很强的吸附架桥能力; 而硫酸铝在水溶液中通过水解形成的系列荷正电的铝水解缩聚产物对水体中的胶体物质具有较强的电中和能力。若把硫酸铝与活化硅酸在一定条件下通过反应可形成一种同时具有电中和作用及吸附架桥能力的新型无机高分子复合絮凝剂。日本率先开展了采用上述方法制备 PASS 复合絮凝剂的研究^[10,11], 且研制出的产品已应用到给水处理中。我国在采用上述方法研制 PASS 絮凝剂方面也开展了大量的研究工作^[12], 研发出的产品在水和废水处理中得到了应用。通过大量研究发现, 采用上述方法制备出的 PASS 絮凝剂, 铝离子及水解聚合产物与聚硅酸有键合作用, 该键合作用可提高活化硅酸的储存稳定性^[12], PASS 的分子量高达 $10^5 \sim 10^6$ Da, 比 PAC 的分子量高出 2 个数量级^[11]。通过控制 Si/Al 摩尔比, 可制备出既具有较高分子量又具有较好储存稳定性且荷正电的 PASS 絮凝剂。另一种方法是为了提高聚合硫酸铝 (PAS) 的稳定性和混凝效果, 在高剪切工艺条件下将硅酸盐引入到硫酸铝溶液中研发出的 PASS 产品。加拿大 Handy 化学品公司首先发表了 PASS 研究

成功的报道^[13],研发出的产品已在给水处理中得到了推广应用^[14],结果发现该产品特别适合于低温和低浊水的处理。采用后一种方法制备出的 PASS 产品是一种碱式多核羟基硅酸硫酸铝复合物,其平均化学组成为 $\text{Al}_A(\text{OH})_B(\text{SO}_4)_C(\text{SiO}_x)_D(\text{H}_2\text{O})_E$,其中 $A=1.0$, $B=0.75\sim 2.0$, $C=0.30\sim 1.12$, $D=0.05\sim 0.1$, $0\leq x\leq 4.0$, $E>8$ (产品为水溶液)或 $E<8$ (产品为固体),产品的碱化度范围为 $25\%\sim 66\%$,液体产品中 Al_2O_3 含量为 $7\%\sim 14\%$,固体产品中 Al_2O_3 含量为 $24\%\sim 31\%$ 。由于后一种制备 PASS 产品的生产工艺比较复杂,且 PASS 中 SiO_2 含量少,产品的分子量较低,所以其研究较少。

鉴于 PAC 较硫酸铝具有水处理效果好和应用范围广等特点,且受上述第一种制备 PASS 复合絮凝剂方法的启发,高宝玉等于 20 世纪末在国内外率先开展了 PASiC 复合絮凝剂的研究工作^[15],研制出的 PASiC 复合絮凝剂在给水和油田含油污水处理中得到了应用。此后,高宝玉等对 PASiC 复合絮凝剂的水解-聚合历程、聚集体大小及粒度分布、各种水解络合形态的分布规律、聚硅酸与铝水解产物间的相互作用、电动特性、结构形貌、混凝机理等进行了深入系统的基础研究,发现在聚硅酸与铝盐共存体系中,存在着铝、硅之间的相互作用,且这种作用受制备工艺、产品碱化度(即 B 值)及 Al/Si 摩尔比的影响^[16];铝、硅之间的相互作用影响 PASiC 复合絮凝剂中铝的形态分布、聚集度、结构形貌和荷电特性,进而影响其絮凝机理和絮凝效果。上述关于 PASiC 絮凝剂系统研究所取得的研究结果为这类复合絮凝剂的研究、开发和应用奠定了理论基础,对于高效、稳定的铝硅复合混凝剂的工业化生产和应用具有指导作用。目前, PASiC 复合絮凝剂的开发和应用仍是国内外水处理领域研究的热点课题之一。

基于研发 PASiC 复合絮凝剂同样的思路,国内外自 20 世纪末开展了 PFSiS 的制备、性能和应用效果等研究工作^[17~20]。研究发现:在 PFSiS 中由于 $\text{Fe}-\text{Si}$ 或 $\text{Fe}-\text{O}-\text{Si}$ 键合作用形成了新的聚合形态, PFSiS 以晶相和稳定性结构存在; PFSiS 的制备方法和 Fe/Si 摩尔比影响其结构形貌、荷电特性、絮凝行为和絮凝效果; PFSiS 较聚合硫酸铁 (PFS) 具有更好的絮凝效果和应用范围。此后,人们为了进一步提高无机高分子絮凝剂的絮凝效果和应用范围,又开展了硅酸盐、铝盐和铁盐等多元复合无机高分子絮凝剂的研究,发现聚合硅酸铝铁复合絮凝剂具有良好的絮凝效果^[21,22]。近年来,也有用硅酸盐与其他金属盐复合研制聚合硅酸金属盐复合絮凝剂的报道^[23]。

高宝玉基于 20 多年来开展聚合硅酸金属盐复合絮凝剂研究的经验认为,适当提高聚合硅酸金属盐复合絮凝剂中硅酸盐的含量将有助于提高其净水效果和扩展其应用范围,但聚合硅酸金属盐复合絮凝剂的储存稳定性将随着硅酸盐含量的提高而下降。到目前为止,还没有发现可延长高硅酸盐含量的聚合硅酸金属盐复合絮凝剂储存稳定性的有效工艺和方法,这是制约经济、高效、稳定的聚合硅酸金属盐复合絮凝剂产业化生产和应用的关键所在。

一般而言,无机-无机复合高分子絮凝剂较单一无机絮凝剂具有更好的絮凝效果和较宽的应用范围。但与有机高分子絮凝剂相比,无机-无机复合高分子絮凝剂仍具有分子量低、对水体中胶体物质的吸附架桥能力弱、投药量高和产生的污泥量大等缺点。尽管有机高分子絮凝剂较无机絮凝剂具有用量少、絮凝速率快和产生的污泥量少等特点,但单独使用有机高分子絮凝剂存在水和废水处理成本高、处理后的水浑浊度较高等缺点。上述问题的存在促使絮凝剂的研究和开发向无机-有机复合型高分子絮凝剂方向发展,近年来,研发新型无机-有机复合高分子絮凝剂已成为当前水和废水处理领域研究的热点问题之一。

1.2.2 无机-有机复合高分子絮凝剂

同时采用无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂两类产品处理水和废水的应用方式有两种：一是无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂分别投加应用；二是把无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂通过复合反应形成一种产品后应用。目前，人们往往不加区别的把上述两种方式应用的无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂统称为无机-有机复合高分子絮凝剂。从严格意义上来说，无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂分别投加应用应该成为复配应用，而后一种方式应用的无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂才可称为无机-有机复合高分子絮凝剂。目前，虽然对于无机-有机复合高分子絮凝剂在理论上尚无严格的定义，但从严格意义上讲，无机-有机复合高分子絮凝剂是指无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂在使用前在一定条件下通过发生物理化学反应改变了原有的成分组成，形成了一种稳定的产品。显然，对这种新型复合絮凝剂，首先要求复配组分能够形成互溶的稳定体系，其次，要求各组分间通过一定的相互作用产生明显的协同增效作用。

目前，国外关于无机絮凝剂和有机高分子絮凝剂复配使用的研究较多^[24~26]，但对于无机-有机复合高分子絮凝剂研究和应用方面的报道较少。近年来，国内在无机-有机复合高分子絮凝剂研究和应用方面已有较多的研究报道，已报道的无机-有机复合高分子絮凝剂主要是铁系或铝系无机絮凝剂与甲壳素、聚丙烯酰胺（PAM）或改性淀粉等有机高分子絮凝剂的复合产品。江霜英等以天然物质甲壳素制备壳聚糖，并用壳聚糖、聚合铝和三氯化铁为原料制成了复合絮凝剂（CAF）^[27]，发现 CAF 净水效果明显优于 PAC、三氯化铁和单独使用壳聚糖的净水效果。张凯松等以天然高分子淀粉和铝盐为原料，通过复合反应制备了一种适于产业化的复合絮凝剂（CAS）^[28]，对中试生产的 CAS 进行了效果实验，发现其对模拟废水、市政污水和造纸废水都具有良好的处理效果。石宝友等选取了四种典型的有机高分子絮凝剂，研究了聚合铝和阳离子型有机高分子和阴离子型有机高分子复合的可行性及其复合絮凝作用特性，探讨了聚合铝与有机高分子絮凝剂在复合絮凝作用过程中的相互影响。结果发现，聚合铝与阳离子型有机高分子复合能够使其絮凝效能相互促进，而聚合铝与阴离子型有机高分子的复合只有在药剂投加量达到一定值时才能对絮凝效能起促进作用^[29]。杨鹭远等将硫酸铝按一定比例加入阳离子聚丙烯酰胺（CPAM）的溶液，调 pH 值后加入自制的分散稳定剂制成了有机-无机复合絮凝剂，该复合产品对于造纸脱墨废水具有良好的处理效果^[30]。范振中等采用 CPAM 和 PAC 研制出了复合絮凝剂 LM-1 并用于处理大庆油田含油污水，现场试验结果表明，含油污水经复合絮凝剂 LM-1 处理后其水质可达到大庆油田回注污水的水质指标要求^[31]。陈仲清等利用 PAM 与硫酸亚铁制备了一种新型复合絮凝剂（PFAM），结果发现 PFAM 对经生化处理后的造纸废水具有良好的处理效果^[32]。王威等以铝盐为基本原料，通过引入羧甲基淀粉制备出了新型无机-有机复合高分子絮凝剂（PASC）^[33]，发现其对硅藻土悬浮液和染料溶液具有良好的絮凝效果。郑雪琴利用无机高分子絮凝剂聚硅氯化铝钙（PSACC）、改性 PAM 和改性淀粉为原料，研制出了一种新型无机-有机高分子复合絮凝剂，发现该产品具有良好的絮凝脱色效果^[34]。池明霞等以氯化铝、双氰胺、甲醛等为原料制备出一种无机-有机复合絮凝剂（OICF），并研究了用于垃圾卫生填埋场垃圾渗滤液预处理的效果，结果表明 OICF 处理垃圾渗滤液的絮凝综合性能明显优于 PAC^[35]。江丽等以三氯化铝、三氯化铁和 CPAM 为原料，在微波辐照下制备出了 PAFC-PAM 复合絮凝剂，研究结果发现 PAFC-PAM 处理印染废水的效果优于 PAFC 和 PAM^[36]。

孔爱平等以 PAFC 和壳聚糖 (CTS) 为原料研制出了 PAFC-CTS 无机-有机复合絮凝剂, 研究表明 PAFC-CTS 具有良好的除浊、脱色和 COD 去除效果^[37]。Moussas 和 Zouboulis 报道了采用 PFS 和非离子型聚丙烯酰胺 (PAA) 研制出了一种无机-有机复合高分子絮凝剂^[38], 并采用多种仪器分析方法对该复合絮凝剂的性能和效果进行了研究, 发现该复合絮凝剂具有稳定性好和絮凝效果好等优点。

在已报道上述无机-有机复合高分子絮凝剂产品中, 有机成分的含量往往很低, 且复合产品存在稳定性差等缺点, 这限制了其工业生产、商业化推广和应用。出现上述问题的主要原因在于研制无机-有机复合高分子絮凝剂时所采用的有机成分分子量高且大多带有负电荷, 在与无机絮凝剂复合时易于析出或产生沉淀而出现不稳定现象, 二者复合难以制备出均一的产品, 因而复合产品的效能不但得不到强化, 反而带来了产品不能长期储存和性能不稳定等问题。所以, 要制备出高效稳定的无机-有机复合高分子絮凝剂, 应严格控制有机组分的分子量和荷电情况, 有机组分以中低分子量和阳离子型为宜。

基于上述情况, 岳钦艳和高宝玉等在开展聚二甲基二烯丙基氯化铵 (PDMDAAC) 和聚环氧氯丙烷-二甲胺 [P(EPI-DMA)] 有机高分子絮凝剂研制开发的基础上^[39~44], 于 21 世纪初率先开展了铝 (铁) 盐-PDMDAAC 和铝盐-P(EPI-DMA) 等无机-有机复合絮凝剂的研制开发和应用基础研究^[45~47]。开展铝 (铁) 盐-PDMDAAC 和铝盐-P(EPI-DMA) 等无机-有机复合絮凝剂的研究是基于以下理论分析: PDMDAAC 和 P(EPI-DMA) 是具有正电荷和一定分子量的阳离子型有机高分子絮凝剂, 在水处理中由于同时拥有电中和与吸附架桥两种功能, 因而具有良好的水处理效果; 铝盐或铁盐是在水处理中广泛应用的无机絮凝剂, 主要是通过吸附电中和作用取得净水效果的。依据协同增效的原理, 二者在一定条件下通过复合反应形成的复合絮凝剂应具有更强的吸附电中和和吸附架桥能力, 应具有更好的絮凝效果和更广泛的应用范围。鉴于无机-有机复合絮凝剂是多种组分的混合体系, 在其研究开发中应明确无机与有机组分之间存在的相互作用情况以及该相互作用对其形态分布、结构形貌、荷电特性、产品稳定性、絮凝效果、絮凝行为和作用机理等的影响情况。所以, 高宝玉领导的课题组围绕着铝盐、铁盐、PDMDAAC 及 P(EPI-DMA) 等组分之间的不同复合情况, 系统地研究了无机与有机组分之间的相互作用以及铝 (铁) 盐与有机成分之间的配比对铝 (铁) 的形态分布和转化规律, 复合高分子絮凝剂的结构形貌、电性、混凝行为和混凝效果的影响情况^[48~57]。研究发现, 无机-有机复合高分子絮凝剂并非是简单的混合体系, 而是无机与有机组分之间发生了一定的相互作用; 无机-有机复合高分子絮凝剂的结构形貌、荷电特性、铝 (铁) 的形态分布和絮凝行为等与复合前的产品相比都有所不同; 无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂复合后可大幅度提高絮体的生成速度并增大絮体尺寸, 减小絮体大小差异性, 提高絮凝效果; 复合絮凝剂是通过吸附电中和作用与吸附架桥作用机理起絮凝作用的。在上述基础研究成果的基础上, 研制出了有机组分含量高达 14% 且性能稳定的无机-有机复合絮凝剂系列产品, 这些产品已在山东滨州嘉源环保有限责任公司生产多年, 生产出的产品已在水和废水处理以及污泥脱水处理中得到应用, 取得了良好的效果。

到目前为止, 还没有发现国外关于铝 (铁) 盐-PDMDAAC 或铝 (铁) 盐-P(EPI-DMA) 等无机-有机复合絮凝剂研究的报道。国内近年来有很多学者开展了铝 (铁) 盐-PDMDAAC 无机-有机复合絮凝剂的研究和开发应用工作^[58~61], 发现铝或铁盐与 PDMDAAC 复合后形成的复合絮凝剂较复合前的单一无机或有机絮凝剂具有更好的除浊、除藻、脱色和除磷效果, 具有更宽泛的应用范围。