

# 甜菜碱类复合缓蚀泡排剂的制备与性能研究

吴秋伯<sup>1,2</sup>, 郭东红<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院采油采气工程研究所, 北京 100083;

2. 中国石油集团采油采气重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**针对气田开发中后期面临出水 and 腐蚀两大问题, 气田现用泡排剂和缓蚀剂配伍性较差, 排水采气和缓蚀效果均受到影响。以十二烷基二甲基羟丙基磷酸酯甜菜碱作起泡组分主剂, 有机膦类缓蚀剂和气田现场缓蚀剂作缓蚀组分, 制备出一种甜菜碱类复合缓蚀泡排剂配方体系。结果表明, 当甜菜碱类复合缓蚀泡排剂质量分数为 0.31% 时, 200 mL 溶液初始起泡体积为 710 mL, 析液半衰期为 420 s, 泡沫半衰期 6 h 以上, 腐蚀速率为 0.065 9 mm/a, 可满足现场对缓蚀泡排剂起泡性能和腐蚀速率的要求。

**关键词:**甜菜碱表面活性剂; 复合缓蚀泡排剂; 发泡性能; 排水采气; 腐蚀速率

中图分类号: TE37

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)02-0186-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.02.035

## Preparation and properties of betaine-based corrosion inhibition-foaming drainage compound agent

WU Qiu-bo<sup>1,2</sup>, GUO Dong-hong<sup>1,2\*</sup>

(1. Department of Oil & Gas Production Engineering, Research Institute of Petroleum Exploration &

Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Oil & Gas Production,

China National Petroleum Corporation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A gas field in its middle and late development stages often faces with two major problems such as water production and corrosion. The compatibility between foam draining agent and corrosion inhibitor currently used in gas field is often poor, which affects both drainage gas production and corrosion inhibition effect. Using dodecyl dimethyl hydroxypropyl phosphate betaine as the main component of foaming agent, organic phosphine corrosion inhibitor and gas field existing corrosion inhibitor as the corrosion inhibition components, a kind of betaine-based corrosion inhibition-foaming drainage compound agent is prepared. It is discovered that the initial foaming volume of 200 mL solution is 710 mL, the half-life of drainage is 420 s, the half-life of the foam exceeds 6 h, and the corrosion rate of the system is 0.065 9 mm per year when the mass concentration of the compound agent is 0.31%. The betaine-based corrosion inhibition-foaming drainage compound agent can meet the requirements in foaming performance and corrosion rate in gas field.

**Key words:** betaine surfactant; corrosion inhibition foaming drainage compound agent; foaming performance; drainage and gas production; corrosion rate

气井出水会严重影响气田的稳产和采收率, 排水采气是维护气田稳产的主体工艺<sup>[1-3]</sup>。其中泡沫排水采气由于设备简单、工艺实施方便和成本低而成为排水采气的主体工艺。部分气田由于含有硫化氢、二氧化碳等酸性气体以及高矿化度地层水而造成井筒腐蚀和结垢, 对安全生产造成影响<sup>[4-5]</sup>。为了达到排水采气以及缓蚀的双重效果, 需要同时加入泡排剂和缓蚀剂<sup>[6-7]</sup>, 但二者往往存在配伍性差的问题, 使得泡沫排水和井筒缓蚀效果都受到影响<sup>[8]</sup>。

甜菜碱类两性表面活性剂在高温、高矿化度、高含凝析油、强酸强碱条件下性能稳定<sup>[9-10]</sup>, 同时具有用量少、配伍性好、生物降解性良好的特点<sup>[11]</sup>, 近年来, 甜菜碱两性表面活性剂在泡沫排水采气工艺上

已经有所应用<sup>[12-14]</sup>。在对油气田用缓蚀剂的研究中, 有机膦类缓蚀剂常作为助剂使用, 并取得了一定的效果<sup>[15-16]</sup>。

笔者通过对含不同基团的甜菜碱型表面活性剂和缓蚀剂进行配伍性评价, 研制出一种以两性甜菜碱表面活性剂为主要起泡成分、有机膦类缓蚀剂和某气田现场用缓蚀剂作缓蚀组分的复合缓蚀泡排剂, 达到泡排和缓蚀的双重效果。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

十二烷基二甲基羟丙基磷酸酯甜菜碱 (F605, 40%)、十四烷基二甲基羟丙基磷酸酯甜菜碱

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2022-11-29

基金项目: 中国石油勘探与生产分公司资助项目 (2022KT1902)

作者简介: 吴秋伯 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为提高油气田采收率, wuqiubo@cnpc.com.cn; 郭东红 (1965-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为油气开采用表面活性剂, 通讯联系人, gdh@petrochina.com.cn。

(F632,35%)、十四烷基酰胺丙基羟丙基磺基甜菜碱(50%)、芥酸酰胺丙基羟磺基甜菜碱 EHSB(40%)、十六烷基磷酸酯甜菜碱(40%)、双酯基磺丙基甜菜碱(40%),上海诺颂实业有限公司生产;辛癸酰胺丙基甜菜碱(ODAB,40%)、十二烷基二甲基甜菜碱(BS-12,40%)、月桂酰胺丙基羟磺基甜菜碱(LHSB,35%),临沂市绿森化工有限公司生产;芥酸酰胺丙基甜菜碱(EAB)、油酸酰胺丙基甜菜碱(OAB)、全氟烷基醚丙烯酸脂型非离子氟碳表面活性剂(F016、F14L,40%),上海银聪新材料科技有限公司生产;十二烷基羟丙基磺基甜菜碱(40%),上海德俊化工科技有限公司生产;起泡剂 YH,淄博涌泓新材料有限公司生产;羟基乙叉二磷酸(HEDP)、磷酸三乙醇胺(P-TEA,80%),临沂市绿森化工有限公司生产;氨基三亚甲基膦酸(ATMPA)、聚环氧琥珀酸(PESA)、乙二胺四甲叉膦酸钠(EDTMPS)、2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸(PBTCA),50%,山东孚迈斯新材料有限公司生产;二乙烯三胺五甲叉膦酸(DTPMP),50%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;某气田现场用缓蚀剂(Y-3、D-3);石油醚,(AR)、无水乙醇(99.5%)、盐酸(37%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;Q235 腐蚀挂片,扬州科力环保设备有限公司生产。

某气田地层水,其水质特征如表 1 所示,  $\text{CaCl}_2$  水型,矿化度超过 127 000 mg/L,同时由于含有少量  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$ ,使其呈弱酸性,因此存在井筒结垢和腐蚀的可能。

表 1 某气田产水并水质特征

井型	产水井
pH	5.2
$\rho(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	19158.51
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	24874.73
$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2548.87
$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	80679.55
总矿化度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	127748.83
水型	$\text{CaCl}_2$

LB20E 型 Waring Blender, Waring commercial 生产; FED115 型干燥箱, BINDER GmbH 生产; 分析精密天平(0.1 mg), 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司生产; 游标卡尺(0.01 mm), 三丰精密量仪(上海)有限公司生产; 自制缓蚀性能评价装置。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 泡沫性能评价方法

在地层水中加入起泡剂,配制出所需质量浓度的起泡剂溶液,将 200 mL 溶液加入 Waring Blender 中,以 7 000 r/min 的转速搅拌 60 s 后,迅速将泡沫倒入 1 000 mL 的量筒中,记录初始泡沫体积( $V_0$ ),析出 100 mL 液体的时间即为析液半衰期( $t_d$ ),泡沫体积减少到初始泡沫体积一半的时间即为泡沫半衰期( $t_v$ ),同时每 10 min 记录 1 次泡沫体积。

### 1.2.2 缓蚀性能评价方法

选择标称尺寸为 50 mm×13 mm×3 mm 的 Q235 钢作为腐蚀试片(在一端距边线 10 mm 处打一半径 2 mm 的小孔),用游标卡尺测量腐蚀试片的尺寸,精确到 0.01 mm。将试片用滤纸擦干,放入石油醚中,用脱脂棉去除油脂,再放入无水乙醇中脱油脱脂,用滤纸擦干并包好,放入干燥箱中干燥 1 h 后称量,精确到 0.1 mg。将 3 片腐蚀试片挂在装有 400 mL 配置好的目标溶液的烧杯中,试片间距 1 cm 以上,试片距液面上端 3 cm 以上。用耐温保鲜膜覆盖烧杯,在 65℃ 恒温干燥箱中放置 72 h。取出之后观察记录试片腐蚀形态,用清水冲洗擦干后依次采取以下措施:用石油醚清洗试片、用酸清洗液浸泡以除去试片表面腐蚀产物和用无水乙醇脱水<sup>[17]</sup>。在干燥箱中干燥 1 h 后称量。根据 SY/T 5273—2014 油田采出水用缓蚀剂性能指标及评价方法计算腐蚀速率<sup>[17]</sup>:

$$r_c = [8.76 \times 10^4 \times (m - m_1)] / (S \cdot t \cdot \rho) \quad (1)$$

式中: $r_c$  为均匀腐蚀速率,mm/a; $m$  为实验前试片质量,g; $m_1$  为实验后的试片质量,g; $S$  为试片的总面积, $\text{cm}^2$ ; $\rho$  为试片材料的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $t$  是实验时间,h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 起泡组分研究

#### 2.1.1 起泡剂主剂优选

在地层水条件下,选择 12 种甜菜碱起泡剂、2 种氟碳起泡剂以及 YH 等起泡剂,在 0.5% 质量分数下测定其泡沫性能,结果如表 2 所示。

从表 2 可知,起泡剂 F605 与地层水配伍性好,初始起泡体积、析液半衰期优于大多数甜菜碱类起泡剂,泡沫半衰期达到 150 min,因此选择 F605 作为起泡组分的主剂。同时,实验过程中发现起泡剂 YH 的泡沫半衰期超过 720 min,因此,选择其作为起泡组分的辅剂。

表 2 不同起泡剂起泡稳泡效果对比

起泡剂	初始泡沫体积/ mL	析液半衰期/ s	泡沫半衰期/ min
十二烷基二甲基羟丙基磷酸酯甜菜碱 F605	832.5	795	150
十四烷基二甲基羟丙基磷酸酯甜菜碱 F632	757.5	610	180
辛癸酰胺丙基甜菜碱 ODAB	775	515	14.5
十二烷基羟丙基磺基甜菜碱	653	375	150
芥酸酰胺丙基甜菜碱 EAB	181	—	35
油酸酰胺丙基甜菜碱 OAB	500	285	90
十四烷基酰胺丙基羟丙基磺基甜菜碱	518	224	10
芥酸酰胺丙基羟磺基甜菜碱 EHSB	175	—	—
十六烷基磷酸酯甜菜碱	665	263	90
双酯基磺丙基甜菜碱	620	230	28
十二烷基二甲基甜菜碱 BS-12	770	440	48
月桂酰胺丙基羟磺基甜菜碱 LHSB	710	510	24
全氟烷基醚丙烯酸脂型非离子氟碳表面活性剂 F016	700	565	51
全氟烷基醚丙烯酸脂型非离子氟碳表面活性剂 F14L	745	670	—
起泡剂 YH	553	295	720

注：“—”代表该项不存在或无法测量。

### 2.1.2 起泡剂主剂浓度的确定

在地层水条件下,测定不同质量分数下起泡剂 F605 的泡沫性能,结果如表 3 所示。

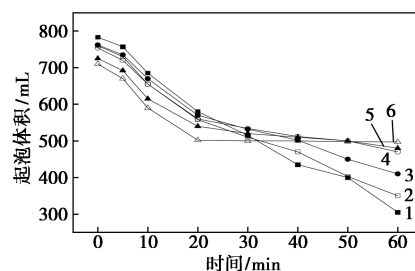
表 3 F605 的质量分数对起泡性能的影响

F605 质量分数/%	初始泡沫体积/mL	析液半衰期/s	泡沫半衰期/min
0.1	685.0	635	50
0.3	770.0	665	51
0.5	832.5	795	>120
0.7	867.5	785	>120
0.9	887.5	792	>120

从表 3 中可以看出,起泡体积从质量分数 0.3% 开始趋于平缓,这是由于起泡剂在达到临界胶束浓度之前,随着浓度的增加会使分子在气液界面的密度增加,从而增加起泡体积;达到临界胶束浓度之后,过饱和的分子不再能增加泡沫性能,而且会使液体流失增加,降低携液能力<sup>[26]</sup>。综合考虑性能与成本因素,选择 0.3% 作为起泡剂主剂质量分数。

### 2.1.3 起泡剂配方体系的确定

为了增加起泡剂体系的泡沫稳定性能,在保持体系质量分数为 0.3% 的条件下,将起泡剂 F605 与起泡剂 YH 按不同质量比进行复配,评价其泡沫性能,结果如图 1 和表 4 所示。



1—1:0;2—19:1;3—9:1;4—4:1;5—2:1;6—1:1

图 1 F605 与 YH 不同质量比复配下的泡沫体积变化

表 4 F016 与 YH 复配后的泡沫半衰期和析液半衰期

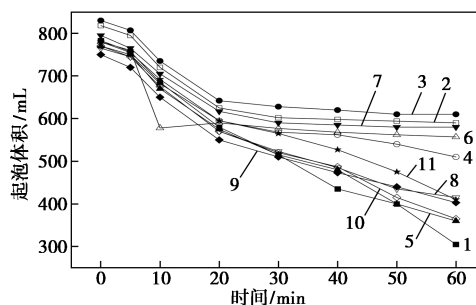
F016 与 YH 质量比	泡沫半衰期/min	析液半衰期/s
1:0	51	665
19:1	55	650
9:1	65	655
4:1	>120	635
2:1	>120	640
1:1	>120	540

从图 1 中可以看出,当 F605 与 YH 质量比为 4:1 时,初始泡沫体积适中,中后期泡沫稳定性较好。从表 4 中可以看出,当 F605 与 YH 质量比为 4:1 时,泡沫半衰期超 2 h,析液半衰期无明显减少。综合考虑初始起泡体积、泡沫半衰期和析液半衰期 3 个因素,确定起泡组分质量比为 4:1,配方组成为 0.24% F605+0.06% YH。

## 2.2 缓蚀组分研究

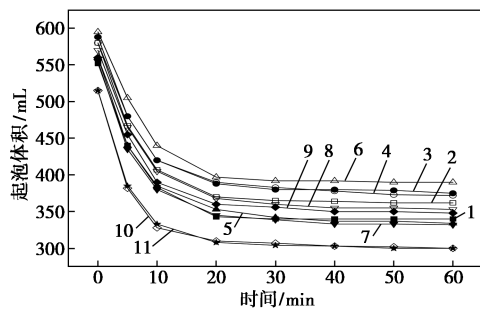
### 2.2.1 缓蚀剂的初步筛选

为了明确泡沫剂配方体系中起泡剂 F605 和起泡剂 YH 单独存在时与油气田常见缓蚀剂的配伍性,在起泡剂质量分数为 0.3% 的情况下,分别添加 100 mg/L (0.01%) 的不同缓蚀剂,评价其泡沫性能,结果如图 2、图 3 和表 5 所示。



1—不添加;2—HEDP;3—ATMPA;4—PESA;5—EDTMPs;  
6—PBTCA;7—DTPMP;8—P-TEA;9—LAD;10—Y-3;11—D-3

图 2 不同缓蚀剂对 0.3% 起泡剂 F605 起泡性能的影响



1—不添加;2—HEDP;3—ATMPA;4—PESA;5—EDTMPS;  
6—PBTCA;7—DTPMP;8—P-TEA;9—LAD;10—Y-3;11—D-3

图3 不同缓蚀剂对0.3%起泡剂YH  
起泡性能的影响

表5 缓蚀剂对0.3%起泡剂F605和起泡剂YH  
起泡性能的影响

缓蚀剂	F605				YH			
	初始 泡沫 体积/ mL	析液 半衰 期/s	泡沫半 衰期/ min	是否 产生 沉淀	初始 泡沫 体积/ mL	析液 半衰 期/s	泡沫半 衰期/ min	是否 产生 沉淀
不添加	783	51	665	否	552	>240	270	否
HEDP	818	>120	640	否	580	>240	272	否
ATMPA	830	>120	635	否	588	>240	305	否
PESA	770	>120	695	是	580	>240	310	是
EDTMPS	770	54	660	是	560	>240	480	是
PBTCA	780	>120	600	否	595	>240	355	否
DTPMP	795	>120	670	否	555	>240	295	否
P-TEA	765	83	725	是	570	>240	305	是
LAD	750	70	610	否	560	>240	300	否
Y-3	770	55	660	否	515	>240	210	否
D-3	780	62	710	否	515	>240	210	否

从图2和表5中可以看出,起泡剂F605与大部分缓蚀剂配伍性好,表现出良好的协同效应。与不添加缓蚀剂相比,F605在分别加入HEDP、ATMPA时初始起泡体积分别增加35 mL和47 mL;在分别加入D-3和P-TEA时析液半衰期增加30 s和60 s;与所有缓蚀剂复配后泡沫半衰期均增长,其中HEDP、ATMPA、PESA、PBTCA、DTPMP均超过120 min。

从图3和表5中可以看出,YH与缓蚀剂配伍性良好,并表现出较好的协同效应,其中以EDTMPS和PBTCA较为明显,析液半衰期分别增加210 s和85 s。

考虑到沉淀可能导致井筒堵塞,因此排除掉会与地层水和起泡剂体系产生沉淀的缓蚀剂,再综合

考虑不同缓蚀剂对F605和YH泡沫性能的影响,选择有机磷酸类缓蚀剂中的ATMPA、PBTCA和现场用缓蚀剂Y-3等进行缓蚀效果评价。

### 2.2.2 缓蚀剂种类及浓度优化

对于上述初步筛选的3种缓蚀剂,测定其对Q235钢的缓蚀效果及相应的腐蚀速率,结果如表6所示。

表6 单缓蚀剂缓蚀效果评价结果

配方	缓蚀组分质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )
不添加	0	0.1561
Y-3	50	0.0660
	100	0.0619
	200	0.0638
ATMPA	50	0.1016
	100	0.1247
	200	0.2309
PBTCA	50	0.0628
	100	0.0684
	200	0.2247

从表6中可以看出,在2种有机磷酸类缓蚀剂中,PBTCA缓蚀效果更好,但由于其本身具有一定酸性,使用量不应超过100 mg/L。同时,现场用缓蚀剂Y-3的缓蚀效果较好。因此选择PBTCA和Y-3进行复合泡排剂体系的研发。

### 2.2.3 复合缓蚀泡排剂体系的缓蚀性能测定

在确定的起泡配方0.24% F605+0.06% YH中分别加入缓蚀剂PBTCA和缓蚀剂Y-3,测定复合缓蚀泡排剂配方对Q235钢的腐蚀速率,结果如表7所示。

表7 复配配方的缓蚀效果评价结果

序号	配方体系	缓蚀组分质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )
1	PBTCA+起泡组分	100	0.0970
2	Y-3+起泡组分	100	0.1256
3	PBTCA+Y-3+起泡组分	50+50	0.0659

根据《排水采气用起泡剂技术规范》Q/SY 1815—2015中对泡排剂的相关要求<sup>[18]</sup>,腐蚀试片的腐蚀率应小于0.076 mm/a。从表7中可以看出,配方3能达到标准要求。同时,配方3腐蚀后溶液相对澄清,不溶的腐蚀产物较少,能够满足气田现场要求。

根据上述实验结果,确定复合缓蚀泡排剂的配方组成是:0.24% F605 + 0.06% YH + 0.005%

ATMPA+0.005% Y-3。通过对此配方进行泡沫性能评价和腐蚀速率测试,200 mL 溶液初始起泡体积为 710 mL、析液半衰期为 420 s、泡高半衰期大于 6 h、腐蚀速率为 0.065 9 mm/a,满足现场对泡排剂和缓蚀剂性能的要求。

### 3 结论

(1)以十二烷基二甲基羟丙基磷酸酯甜菜碱为主剂制备出复合缓蚀泡排剂,其质量配比为:0.24% F605+0.06% 起泡剂 YH+0.005% ATMPA+0.005% Y-3。

(2)复合缓蚀泡排剂体系在 0.31% 质量分数下,200 mL 溶液初始起泡体积为 710 mL,析液半衰期为 420 s,泡沫半衰期为 6 h 以上,腐蚀速率为 0.065 9 mm/a,可满足气田相关标准要求。

### 参考文献

- [1] 郑新权,师俊峰,曹刚,等.采油采气工程技术新进展与展望[J].石油勘探与开发,2022,49(3):565-576.
- [2] 曹光强,姜晓华,李楠,等.产水气田排水采气技术的国内外研究现状及发展方向[J].石油钻采工艺,2019,41(5):614-623.
- [3] 吴秋伯,郭东红,杨晓鹏,等.排水采气用起泡剂研究及应用进展[J].精细与专用化学品,2022,30(3):1-6.
- [4] 裘智超,熊春明,常泽亮,等.CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S共存环境下井筒腐蚀主控因素及防腐对策—以塔里木盆地塔中 I 气田为例[J].石油勘探与开发,2012,39(2):238-242.
- [5] 刘文汇,腾格尔,高波,等.四川盆地大中型天然气田(藏)中H<sub>2</sub>S形成及富集机制[J].石油勘探与开发,2010,37(5):513-522.
- [6] 田伟,惠艳妮,李彦彬,等.长庆气田新型缓蚀型泡排剂的开发与性能研究[J].当代化工,2021,50(12):2788-2792.
- [7] 陈楠.川渝酸性气田泡沫排水用复合缓蚀起泡剂研究与应用[D].成都:西南石油大学,2018.
- [8] Wang D, Liu C, Wu W, et al. Novel surfactants that attain ultra-low interfacial tension between Oil and high salinity formation water without adding alkali salts co-surfactants alcohols and solvents[C]. SPE EOR Conference a Oil & Gas West Asia, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [9] Adsorption behavior of dodecyl hydroxypropyl sulfobetaine on limestone in high salinity water[J]. RSC Advances, 2015, 5(73): 59738-59744.
- [10] 刘子铭,葛际江,师小娟,等.高温高盐油藏空气驱起泡剂研制及性能评价[J].特种油气藏,2022,29(3):118-123.
- [11] 李谦定,卢永斌,李善建,等.新型高效泡排剂 LYB-1 的研制及其性能评价[J].天然气工业,2011,31(6):49-52+126.
- [12] 郭东红,杨晓鹏,孙建峰,等.产水气井高效廉价排水采气技术的研究与应用[J].现代化工,2018,38(10):137-139.
- [13] 孙玉鹏,吴向阳,张颖,等.抗凝析油泡排剂 SH-1 的泡沫性能研究与应用[J].应用化工,2021,50(7):1867-1869+1874.
- [14] 王素芳,李志元,徐慧,等.油田采出水缓蚀剂与阻垢剂的配伍性研究[J].现代化工,2021,41(6):197-200.
- [15] 豆宁辉,何汉平,杨顺辉,等.一种抗氧缓蚀杀菌一体剂其制备方法和应用:CN113999662A[P].2022-02-01.
- [16] 华忠志,吕玉海,刘洋,等.一种抗冻型缓蚀泡排阻垢剂及其制备方法:CN112266774A[P].2021-01-26.
- [17] 国家能源局.SY/T 5273—2014,油田采出水缓蚀剂性能指标及评价方法[S].北京:石油工业出版社,2014-10-15.
- [18] 中国石油天然气集团公司.Q/SY 1815—2015,排水采气用起泡剂技术规范[S].北京:石油工业出版社,2015-08-04.■
- [11] 陈蜜蜜,张蒙蒙,赵凤清.青霉素废菌丝体制备石膏缓凝剂联产活性炭[J].环境工程学报,2017,11(6):3747-3752.
- [12] 欧阳金波,陈建,刘峙嵘,等.生物质源多孔碳制备及其对废水中药物吸附研究进展[J].化工学报,2020,71(12):5420-5429.
- [13] 卜友泉.酶和核酶的词源学研究及现实意义[J].中国生物化学与分子生物学报,2020,36(4):475-480.
- [14] 郑龙,田佳鑫,张泽鹏,等.多肽药物制备工艺研究进展[J].化工学报,2021,72(7):3538-3550.
- [15] 朱惠斌,钱诚,白丽珍,等.基于 Plackett-Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆分散元模型[J].中国农业大学学报,2021,26(12):221-231.
- [16] 查昱,张宗豪,李秀璋,等.PB 试验结合 BBD 响应面法优化冬虫夏草菌菌丝体多糖的提取工艺[J].中国食用菌,2020,39(6):25-31.
- [17] 张妮妮,阮晓惠,陈浩,等.核桃蛋白的酶解工艺优化及产物特性研究[J].中国油脂,2021,46(10):18-23.
- [18] 钟为章,杨珂,洪晨,等.沉淀法分离青霉素菌渣中蛋白质工艺的优化[J].环境工程学报,2021,15(6):2027-2036.
- [19] 冀东,熊强,李元岗,等.电子束辐照对土霉素菌渣理化性质的影响[J].同位素,2021,34(3):265-272.■

(上接第 185 页)

- [3] 艾哈,石鹏,王辉,等.抗生素制药菌渣处理处置技术评价与分析[J].环境工程学报,2016,10(2):906-914.
- [4] 洪晨,杨强,王志强,等.抗生素菌渣与煤混合燃烧特性及其动力学分析[J].化工学报,2017,68(1):360-368.
- [5] Yu Y, Du X G, Jiang X J, et al. Evaluation of cofiring bioferment residue with coal at different proportions: Combustion characteristics and kinetics[J]. Energy Fuels, 2013, 27(10): 6295-6330.
- [6] 张光义,马大朝,彭翠娜,等.水热处理抗生素菌渣制备固体生物燃料[J].化工学报,2013,64(10):3741-3749.
- [7] 吴树洁.典型抗生素菌渣残留价检测方法及其利用的初步研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [8] 张慧.土霉素高产菌株选育的研究[D].石家庄:河北科技大学,2012.
- [9] Lu Q, Dai L C, Li L, et al. Valorization of oxytetracycline fermentation residue through torrefaction into a versatile and recyclable adsorbent for water pollution control[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105397.
- [10] 周保华.土霉素菌渣活性炭的制备及其吸附性能研究[D].天津:天津大学,2014.