

科研与开发

酵母菌转化生产天然香料 2-苯乙醇的研究

王成涛, 孙宝国, 曹雁平, 王 静, 张 慧

(北京工商大学化学与环境工程学院, 北京 100037)

摘要:研究了酵母菌催化转化制备天然香料 2-苯乙醇的方法。从 45 株酵母菌中筛选出一株产 2-PE 的酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) HJ, 通过单因素和正交设计实验优化其培养基, 同时建立了反相高效液相色谱同时测定发酵液中底物和产物方法。采用油酸和 PPG-1500 原位产物转移发酵技术, 2-PE 的产量达到 2.21 g/L, 比单水相发酵摩尔转化率提高了 8.6%, 部分克服了高浓度 2-PE 对酵母细胞的毒性作用。

关键词: 2-苯乙醇; 酵母菌; 生物转化; 产物原位转移技术

中图分类号: TQ923

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)08-0038-04

Biosynthesis of natural 2-phenylethanol by yeast cells

WANG Cheng-tao, SUN Bao-guo, CAO Yan-ping, WANG Jing, ZHANG Hui

(College of Chemical and Environmental Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China)

Abstract: 2-Phenylethanol(2-PE), a natural aroma compound, is prepared by yeast cells presented in this paper. A strain of *Saccharomyces cerevisiae* HJ, having a high production of 2-PE from *L*-Phe, is screened out from 45 industrial yeast strains of the lab collection. Through the orthogonal test, the optimum composition of medium is obtained and the RP-HPLC method is established for the separation and determination of *L*-Phe and 2-PE. The fermentation combined with insitu product removal is applied to the production of 2-PE, and 2.21 g/L of 2-PE can be produced with a conversion rate of 55.5%, which can partly overcome the toxicity of high 2-PE to yeast cells.

Key words: 2-phenylethanol; *Saccharomyces cerevisiae*; bioconversion; insitu product removal

2-苯乙醇(2-phenylethanol, 2-PE)是一种具有玫瑰香味的芳香醇,存在于玫瑰、茉莉等多种植物精油中,是多种发酵食品的主要风味物质^[1-3],广泛应用于食品、化妆品、烟草、药品和日化用品等领域。目前 2-苯乙醇主要采用苯-环氧乙烷法或氧化苯乙烯加氢法等化学合成方法生产^[4],尽管化学合成法成本廉价,但存在诸如原料毒性高、合成过程污染大等弊端。随着食品生产越来越倾向使用天然添加剂,特别是在我国苯丙氨酸产业进入年产千吨级水平之时更具有深度开发 2-PE 的价值。美国和欧盟等规定标有“天然”的香料必须用物理法、酶法或微生物法处理自然资源生产^[3],因而天然 2-PE 的市场价格也是化学合成的近 300 倍。多种酵母菌具有合成 2-苯乙醇的能力^[5-11],但酵母菌从头合成 2-PE 浓度一般较低(400~500 mg/L),在培养基中加入前体物 *L*-苯丙氨酸(*L*-Phe)可大大提高 2-PE 的产量。但高浓度 2-PE 对微生物细胞有一定毒性,要达到

高产 2-PE 工艺,必须考虑解除 2-PE 和乙醇对酵母细胞的毒性作用^[6,9]。笔者筛选产 2-苯乙醇的酵母菌,优化 *L*-Phe 转化 2-PE 的发酵培养基及条件,并探讨油酸和聚丙二醇 1500(PPG-1500)原位产物转移技术(ISPR)对 2-PE 发酵的影响。

1 材料与方法

1.1 主要试剂和菌种

L-Phe, 医药级; 2-PE, 分析纯, Sigma; 油酸, 北京华瑞新成科技有限公司; 甲醇, 色谱纯; 其他试剂均为分析纯。PPG-1500, 浙江杭州久灵化有限公司; 超纯水为自制三蒸水。

酿酒酵母(HJ、AS2.399、AS2.308、F724、R12、1.300、K01、K021、B8、900、905、906、909、910、984、3001等); 罗轮隐球酵母 301、假丝酵母 302、掷孢酵母 313、汉逊德巴利酵母 315、荧光威克酵母 316、柠檬型克勒克酵母 318、异常汉逊氏酵母 321、路德类

收稿日期: 2008-05-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”项目)(2007CB707802)资助

作者简介: 王成涛(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品生物技术, wet5566@163.com; 孙宝国(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为香料化学, 通讯联系人, sunbg@btbu.edu.cn。

酵母 322、汉逊德巴利酵母 323 等,共计 45 株,均为本实验室收藏保存。

1.2 培养基的配制

斜面培养基:麦芽汁琼脂培养基。

基础培养基(g/L): KH_2PO_4 5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1, 酵母提取物 1, 121℃ 灭菌 20 min。

发酵培养基(g/L):果糖 100, *L*-Phe 6, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1, KH_2PO_4 5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5, 酵母提取物 1, pH = 5.5, 121℃ 灭菌 20 min。

1.3 产2-苯乙醇的菌株筛选

发酵培养液 50 mL 于 250 mL 三角瓶中分别接种各酵母菌株,于 200 r/min、28℃ 条件下,培养 72 h,各菌株发酵液分别经 6 000 r/min 离心 10 min,上清液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,高效液相色谱分析测定、比较各菌株发酵液产生 2-苯乙醇的量。

1.4 正交实验设计优化培养基组成及培养条件

在单因素实验的基础上,选择对 2-PE 产量影

表 1 正交设计实验因素水平表 $L_9(3^4)$

因素水平	果糖质量 浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<i>L</i> -Phe 质量 浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 质量 浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	发酵液 pH
1	80	4	1.0	5.0
2	100	6	1.5	5.5
3	120	8	2.0	6.0

(上接第 37 页)

- [29] Lai Z, Bonilla G, Diaz I, *et al.* Microstructural optimization of a zeolite membrane for organic vapor separation[J]. *Science*, 2003, 300(5618): 456 - 460.
- [30] Lai Z P, Tsapatsis M, Nicolich J P. Siliceous ZSM-5 membranes by secondary growth of b-Oriented seed layers[J]. *Adv Funct Mater*, 2004, 14(7): 716 - 729.
- [31] O'Brien-Abraham J, Kanezashi M, Lin Y S. A comparative study on permeation and mechanical properties of random and oriented MFI-type zeolite membranes [J]. *Micropor Mesopor Mater*, 2007, 105(1/2): 140 - 148.
- [32] Jeong H K, Krohn J, Sujaoti K, *et al.* Oriented molecular sieve membranes by heteroepitaxial growth[J]. *J Am Chem Soc*, 2002, 124(44): 12966 - 12968.
- [33] Ha K, Lee Y J, Lee H J. Facile assembly of zeolite monolayers on glass, silica, alumina, and other zeolites using 3-halopropylsilyl reagents as covalent linker[J]. *Adv Mater*, 2000, 12(15): 1114 - 1117.
- [34] Chun Y S, Ha K, Lee Y J. Diisocyanates as novel molecular binders for monolayer assembly of zeolite crystals on glass [J]. *Chem Commun*, 2002, 17: 1846 - 1847.
- [35] Kulak A, Lee Y J, Park Y S, *et al.* Orientation-controlled monolayer as-

sembly of zeolite crystals on glass and mica by covalent linkage of surface-bound epoxide and amine groups[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2000, 39(5): 950 - 953.

2 结果与讨论

2.1 HPLC 测定 2-苯乙醇含量的条件确定

测定了流动相(水与甲醇)的不同配比和紫外检测波长对底物 *L*-Phe 和产物 2-PE 的 Sunfire Waters C18 柱的分离和检测效果。将 *L*-Phe、2-PE 及其混合物分别溶解于三蒸水与甲醇的溶液(体积比 40:60),在 200 ~ 400 nm 波长范围内进行紫外光全波长扫描。图谱显示 *L*-Phe 和 2-PE 分别在 210 nm 和 260 nm 有 2 个较大紫外吸收峰。以甲醇/水体积比 40:60 为流动相,发酵液在 260 nm 波长检测时其他杂质干扰较大,而 210 nm 波长检测时色谱图基线平稳、峰形良好,且发酵液中 2 种物质能很好的同时检测,故选择 210 nm 作为检测波长。

经多次实验确定反相高效液相色谱同时测定发酵液中底物 *L*-Phe 和产物 2-PE 的条件是:色谱柱为 Sunfire Waters C18(150 mm \times 4.6 mm, 5 μm);流动相为甲醇/水体积比 2:3,流速 1 mL/min,紫外检测波长 210 nm,柱温 30℃,进样量 10 μL 。此时发酵液中 2 种物质能同时检测,简单、快速、定量准确和重复性好。

- sembly of zeolite crystals on glass and mica by covalent linkage of surface-bound epoxide and amine groups[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2000, 39(5): 950 - 953.
- [36] Lee G S, Lee Y J, Ha K, *et al.* Orientation-controlled monolayer assembly of zeolite crystals on glass using terephthalaldehyde as a covalent linker[J]. *Tetrahedron*, 2000, 56(36): 6965 - 6968.
- [37] Choi S Y, Lee Y J, Park Y S, *et al.* Monolayer assembly of zeolite crystals on glass with fullerene as the covalent linker [J]. *J Am Chem Soc*, 2000, 122(21): 5201 - 5209.
- [38] Park J S, Lee G S, Park Y S, *et al.* Organization of microcrystals on glass by adenine-thymine hydrogen bonding[J]. *J Am Chem Soc*, 2002, 124(45): 13366 - 13367.
- [39] Lee G S, Lee Y J, Yoon K B. Layer-by-layer assembly of zeolite crystal on glass with polyelectrolytes as ionic linker[J]. *J Am Chem Soc*, 2001, 123(40): 9769 - 9779.
- [40] Kulak A, Park Y S, Lee Y J, *et al.* Polyamines as strong molecular linkers for monolayer assembly of zeolite crystal on flat and curved glass [J]. *J Am Chem Soc*, 2000, 122(38): 9308 - 9309.
- [41] Park J S, Lee Y J, Yoon K B. Marked increase in binding strength between the substrate and the covalently attached monolayers of zeolite microcrystals by lateral molecular cross-linking between the neighboring microcrystals[J]. *J Am Chem Soc*, 2004, 126: 1934 - 1935. ■

2.2 产2-苯乙醇菌株的筛选

将45株酵母菌接种于发酵培养液,于200 r/min、30℃条件下,培养72 h, HPLC分析各菌株发酵液产生2-PE量。结果发现18株酵母菌都具有转化L-苯丙氨酸产生2-苯乙醇的能力,其中以酿酒酵母(*S. cerevisiae*) HJ的转化能力最强,达到1.68 g/L,其次为*S. cerevisiae* AS2.399,产量为1.25 g/L,所以选择*S. cerevisiae* HJ进行后续实验。

2.3 单因素水平实验对2-苯乙醇产量的影响

2.3.1 碳源对2-苯乙醇发酵的影响

碳源是构成菌体和合成2-PE的能量和碳素骨架来源。实验了葡萄糖、果糖、蔗糖、可溶性淀粉等不同碳源的培养基(100 g/L糖+6 g/L L-Phe+基础培养基)对2-苯乙醇产量的影响, HPLC法检测发酵上清液2-PE的含量。从表2可知,*S. cerevisiae* HJ以果糖为碳源时,2-PE产量最高为1.70 g/L;葡萄糖、蔗糖(或废糖蜜)、果葡糖浆(淀粉水解糖)也是较好碳源,而可溶性淀粉几乎不产生2-PE。

表2 不同碳源对2-苯乙醇产量的影响 g/L

碳源	葡萄糖	果糖	半乳糖	木糖	蔗糖
2-PE产量	1.60	1.70	0.80	0.90	1.65
碳源	乳糖	麦芽糖	甘油	果葡糖浆	可溶性淀粉
2-PE产量	1.10	0.40	0.60	1.58	0.10

2.3.2 L-Phe浓度对2-PE产量的影响

L-Phe浓度对2-PE的影响见图1。

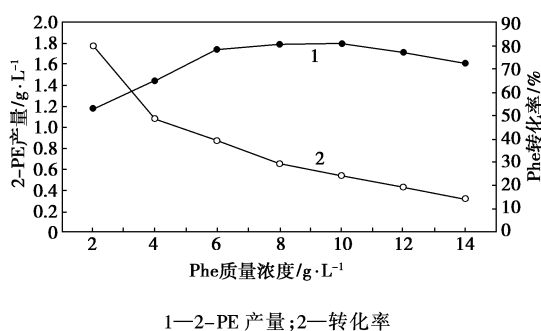


图1 不同浓度L-Phe时2-PE转化率

由图1可知,随着培养基中L-Phe浓度增大,2-PE产量逐渐提高,但发酵液L-Phe质量浓度在6~10 g/L时,2-PE的产量为1.74~1.80 g/L,2-PE产量相差不大,而L-Phe的摩尔转化率从39.2%降低为24.3%,其转化率明显降低,发酵液残留L-Phe浓度明显增加。因此从提高L-Phe利用率及经济成本的角度考虑,培养基中初始L-Phe质量浓度为6 g/L时较为合理,此时2-PE产量达为1.74 g/L,

L-Phe摩尔转化率为39.2%。

在酵母细胞中,L-phe的降解转化和2-PE生物合成有艾氏途径、苯丙酮酸途径、肉桂酸途径等多种^[3,11],其中艾氏途径是L-Phe转化为2-PE的主要途径,2-PE合成走哪一条途径取决于培养基中氮源种类,也决定L-Phe转化率。只有在L-Phe作为唯一氮源时,艾氏途径才可能占优势^[3,11]。酵母菌也可通过肉桂酸途径降解为3-酮基乙二酸而进入TCA循环,而且这条降解途径不能完全被抑制,所以任何条件下,L-Phe不能完全转化为2-PE,但适当的发酵条件有利于提高L-Phe转化率。

2.3.3 铵盐浓度对2-苯乙醇发酵的影响

铵盐是酵母细胞快速利用的氮源,且价格便宜,若培养基中少量添加仅供其菌体生长阶段氮源之所需,有利于减少L-Phe用量,提高其转化率。由图2可知,当培养基中同时含有L-Phe(6 g/L)和(NH₄)₂SO₄ 2种氮源时,(NH₄)₂SO₄的存在表现出两面性。当(NH₄)₂SO₄质量浓度在2 g/L以内,(NH₄)₂SO₄主要用于生长阶段的菌体合成之所需,L-Phe主要用于转化为2-PE,有利于提高L-Phe的转化率;但当(NH₄)₂SO₄质量浓度超过2 g/L时,环境中存在更容易利用的(NH₄)₂SO₄为氮源,即使培养基中存在较高浓度L-Phe,2-PE转化率也将明显降低。这验证了只有在L-Phe作为唯一氮源时艾氏途径才能占优势的报道^[11]。

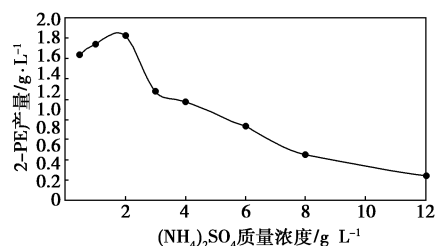


图2 不同(NH₄)₂SO₄质量浓度对β-苯乙醇产量的影响

2.3.4 初始pH对发酵结果的影响

配制初始pH分别为3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、7.0的发酵培养液,接种后于200 r/min摇床、转速28℃摇瓶培养48 h, HPLC测定发酵液中2-PE的含量。*S. cerevisiae* HJ在pH=3.0~7.0条件下均能转化L-Phe生成2-PE(图3),但在pH 5.5时发酵液中2-PE产量最高,达到1.81 g/L。

2.4 正交设计实验结果

根据以上单因素条件实验结果,对果糖、L-Phe、(NH₄)₂SO₄以及发酵液初始pH 4个因素进行

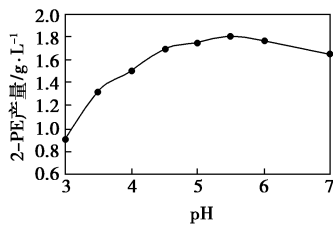


图3 不同初始 pH 对 2-苯乙醇产量的影响

正交设计实验,结果显示影响 2-PE 产量的各因素的主次顺序是:果糖浓度 > *L*-Phe 浓度 > pH > (NH₄)₂SO₄ 浓度。确定 2-PE 发酵优化培养基为 (g/L):果糖 100, *L*-Phe 6, (NH₄)₂SO₄ 1, KH₂PO₄ 5, MgSO₄·7H₂O 0.5, 酵母提取物 1, pH = 5.5。利用此优化培养基,在 250 mL 三角瓶中装液量 50 mL,于 200 r/min 转速,28℃ 摇瓶培养 48 h,发酵液中 2-PE 产量达到 2.08 g/L, *L*-Phe 摩尔转化率为 46.9%。

2.5 原位产物转移技术发酵 2-苯乙醇

发酵液中高浓度的 2-苯乙醇和乙醇对酵母菌细胞有一定毒性,且它们的复合毒性作用比各自毒性作用累加更高^[3,6]。在发酵体系中加入油酸、PPG-1500 等有机相,可将产生的 2-PE 抽提进入有机相,克服发酵体系中 2-PE 和乙醇对酵母细胞的毒性作用^[9,11]。

在上述优化的培养基和不同量油酸(或 PPG-1500)进行原位产物抽提发酵,发酵结束后检测水相、油酸相、PPG-1500 相中 2-PE 的含量(见表 3)。*L*-Phe 质量浓度为 6 g/L 时,20 mL 油酸原位产物转移发酵中 2-PE 产量比单水相发酵提高 0.13 g/L,摩尔转化率提高 8.6%;*L*-Phe 质量浓度为 10 g/L 时,20 mL 油酸原位产物抽提发酵中 2-PE 产量比单水相发酵提高 0.53 g/L,达到 2.45 g/L,摩尔转化率提高 8.8%。

表 3 单独水相发酵与原位产物分离技术发酵效果对比

	2-PE 产量/g·L ⁻¹	
	200 r/min	250 r/min
50 mL 水相(无油酸、无 PPG-1500)发酵	2.08	2.12
(30 mL 水相 + 20 mL 油酸)发酵	2.18	2.25
(30 mL 水相 + 30 mL 油酸)发酵	2.13	2.20
(30 mL 水相 + 20 mL PPG-1500)发酵	2.20	2.30
(30 mL 水相 + 30 mL PPG-1500)发酵	2.18	2.24

注:250 mL 三角瓶加入 50 mL 发酵培养基(*L*-Phe 6 g/L),28℃ 摇瓶培养 48 h。

表 3 结果还表明,应用 PPG-1500 与油酸原位

产物抽提的效果接近,且发酵条件相同条件下,增加摇瓶转速或减少油酸(或 PPG-1500)的用量,可提高 2-苯乙醇产量,但这种作用是有限的。分析其原因可能受两方面因素的影响:①该酵母菌株对 *L*-Phe 的转化能力有限,在这种情况下,即使加入更多 *Phe*,2-PE 也不会再有相应提高;②发酵体系中加入油酸(或 PPG-1500)后,由于它们覆盖在水相体系表面,影响了发酵液的溶氧(OD)值,进而使酵母细胞利用氧气的的能力受到很大限制,酵母细胞无法得到持续氧气补充,直接影响细胞的生长和代谢,生长速率降低导致 2-PE 转化率无法进一步提高。250 r/min 比 200 r/min 摇瓶转速时 2-PE 产量提高,也正说明此问题的存在。下一阶段需要研究利用发酵罐提升发酵体系的溶氧量,进而提升体系中 2-苯乙醇的产量和转化率。

3 结语

从 45 株酵母菌中筛选出产 2-PE 能力最高的 *S. cerevisiae* HJ,正交实验设计优化确定其培养基组成,并建立了反相高效液相色谱同时检测发酵液中底物和产物方法。采用油酸(或 PPG-1500)原位产物转移发酵技术,可部分克服发酵液中高浓度 2-苯乙醇对酵母细胞的毒性作用,但加入油酸(或 PPG-1500)后,发酵液溶氧量会影响 *L*-Phe 的转化和 2-PE 的产生,提高溶氧量是解决问题的关键因素。

(致谢:北京工商大学化工学院食品 2003 级伍成同学参与部分工作)

参考文献

- [1] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京:化学工业出版社,2003:95-99.
- [2] 孙宝国,何坚. 香料化学与工艺学[M]. 北京:化学工业出版社,2004:1-10.
- [3] 杨霄,崔志峰. 酵母生物转化生产 2-苯乙醇的研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(1):140-144.
- [4] 刘丽琴,郭廷翹,左宏,等. 玫瑰型香料 β-亚甲基苯乙醇的合成[J]. 精细化工,2000,17(5):257-259.
- [5] Etschmann M M W, Sell D, Schrader J. Screening of yeasts for the production of the aroma compound 2-phenylethanol in a molasses-based medium[J]. Biotechnology Letters, 2003, 25:531-536.
- [6] Stark D, Munch T, Sonnleitner B, et al. Extractive Bioconversion of 2-phenylethanol from *L*-Phenylalanine by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Journal of Biotechnology Progress, 2002, 18:514-523.
- [7] Lomascolo A, Lesage-Meessen L, Haon M, et al. Evaluation of the potential of *Aspergillus niger* species for the bioconversion of *L*-phenylalanine into 2-phenylethanol [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2001, 17(1):99-102.

(下转第 43 页)

BAE的质量比分别为5:0、5:0.5、5:1、5:1.5、5:3,分别编号为A1[#]、A2[#]、A3[#]、A4[#]、A5[#]。

1.2.2 水溶性 GE 对 PEI 的改性

在三口烧瓶中加入适量水和 PEI,搅拌下滴加 GE,使其反应。当黏度达到要求时加入适量盐酸和蒸馏水,即可得到 pH 为中性的淡黄色透明液体。产品中 PEI 和 GE 的质量比分别为 5:0、5:1、4:1、3:1、1:1,分别编号为 B1[#]、B2[#]、B3[#]、B4[#]、B5[#]。

1.3 改性 PEI 的应用

按照理论定量为 80 g/m² 称取一定量的全漂白硫酸盐桉木浆,加水浸泡数小时后用 JJ-2 型捣碎匀浆机打浆,时间 5~10 min,加入湿强剂、助留剂,在 ZQJ-B 型 Φ 200 mm 标准纸页成形系统上进行抄片。将手抄片放置于 120℃ 的烘箱内热处理 5 min,经 24 h 恒温、恒湿处理后备用。

纸张抗张强度在 TS20002S 型多功能材料试验机(台湾高铁科技股份有限公司)上测量;纸张耐折度在 DCP-MIT135A 型电脑测控耐折度仪(四川长江造纸仪器有限责任公司)上测量;纸张环压强度在 DCP-KY3000 型电脑测控压缩实验仪(四川长江造纸仪器有限责任公司)上测量。

纸样微观形貌的观测使用 KYKY-1000B 型扫描电子显微镜(中科院仪器厂),工作电压 30 kV。

2 结果与讨论

2.1 水乳性 BAE 改性 PEI 对纸张强度的影响

2.1.1 PEI 与 BAE 不同质量比对纸张强度的影响

在 PEI 与 BAE 反应体系中,当改性 PEI 的添加量(质量分数,下同)为 1.0%、助留剂 CPAM 添加量为 0.2‰ 时,BAE 含量对纸张强度的影响如表 1 所示。可知改性物中 BAE 用量不断增加时,干抗张指数、湿抗张指数、湿强度及环压指数均有不同程度的提高,当进一步增加 BAE 的用量,纸张的抗张指数和湿强度开始降低,耐折度呈下降的趋势。这是由于:①增加 BAE 含量,可以使 PEI 分子中具有更强的阳离子性和反应活性,增加了与纸纤维的反应活

性点,进而提高纸张的干湿抗张指数和湿强度;②BAE 的增加有助于纸张刚性的增强而降低了纸张的柔韧性;③BAE 用量增加过多,使得部分 BAE 无法留着,进而影响纸张强度。当 $m(\text{PEI}):m(\text{BAE})=5:1.5$ 时,产品性能达到最佳。

表 1 PEI 与 BAE 不同质量比对纸张强度的影响

$m(\text{PEI}):m(\text{BAE})$	5:0	5:0.5	5:1	5:1.5	5:3
干抗张指数/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	22.20	22.83	23.55	24.76	24.73
湿抗张指数/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	3.21	4.19	4.82	5.36	5.23
湿强度/%	14.46	18.35	20.47	21.65	21.15
环压指数/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	8.36	9.82	10.68	11.89	11.98
耐折度/双次	109	106	101	100	98

2.1.2 BAE 改性 PEI 不同添加量对纸张强度的影响

对于改性 PEI 而言,较佳的添加量既能避免产生树脂障碍又能获得理想的性价比。以 A4[#] 产品为研究对象,不同添加量时纸张强度的变化如表 2 所示,其中助留剂 CPAM 的添加量为 0.2‰。随着改性物添加量的增加,纸张干抗张指数、湿抗张指数、湿强度也呈现出先增加后降低的趋势,但耐折度却随着添加量的增加而减小,这与 BAE 分子结构中的刚性基团有直接关系。综合考虑各项强度指标,选择改性 PEI 添加量为 1.0% 较适宜。

表 2 BAE 改性 PEI 不同添加量对纸张强度的影响

添加量/%	0.2	0.5	0.8	1.0	1.2
干抗张指数/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	17.89	21.00	22.61	24.76	25.30
湿抗张指数/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	2.63	3.23	4.12	5.36	5.43
湿强度/%	14.70	15.38	18.22	21.65	21.46
环压指数/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	8.46	9.02	10.56	11.89	11.88
耐折度/双次	111	108	105	100	93

2.1.3 CPAM 对纸张湿强度的影响

当增强剂(A4[#])添加量为 1.0% 时,助留剂 CPAM 的添加方式及添加量对纸张性能的影响如

(上接第 41 页)

- [8] Etschmann M M W, Sell D, Schrader J. Medium optimization for the production of the aroma compound 2-phenylethanol using a genetic algorithm[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2004, 29(1): 187-193.
- [9] Etschmann M M W, Schrader J. An aqueous-organic two-phase bioprocess for efficient production of the natural aroma chemicals 2-

phenylethanol and 2-phenylethylacetate with yeast[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 71: 440-443.

- [10] Banthorpe D V, Branch S A, Poots I, et al. Accumulation of 2-phenylethanol by callus derived from leaf-bud of *Rosa damascene*[J]. Phytochemistry, 1988, 27(3): 795-801.
- [11] Stark D, Zala D, Münch T, et al. Inhibition aspects of the bioconversion of *L*-phenylalanine to 2-phenylethanol by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 32: 212-223. ■