

树脂基体种类对三维中空夹芯织物复合材料力学性能影响的研究

罗超 曹海建 黄晓梅* 金博伦 王洪

(南通大学纺织服装学院,南通 226019)

摘要 以不饱和树脂和环氧树脂为基体,与三维中空织物分别复合成中空夹芯织物复合材料,利用万能材料试验机分别对 2 种复合材料的拉伸、压缩和弯曲性能进行测试,研究了树脂种类对复合材料力学性能的影响规律。结果表明:不饱和树脂与固化剂质量比为 100:2,固化温度为 70℃ 时,复合材料具有最佳的拉伸、弯曲和压缩性能。环氧树脂基复合材料的弯曲和压缩性能远优于不饱和树脂基复合材料,而拉伸性能则相差不大。

关键词 三维中空夹芯织物复合材料,不饱和树脂,环氧树脂,拉伸性能,弯曲性能,压缩性能

Influences of type of resin matrix on mechanical property of 3D hollow sandwich fabric composite

Luo Chao Cao Haijian Huang Xiaomei Jin Bolun Wang Hong

(College of Textile and Apparel, Nantong University, Nantong 226019)

Abstract Unsaturated resin and epoxy resin were used as matrix to be combined with 3D hollow sandwich fabric into 3D hollow sandwich fabric composite materials respectively. The universal testing machine was used to test the tensile, bending and compressive properties of above composites. The influence of resin type on the mechanical properties of 3D composites was studied. The results showed that the unsaturated resin based 3D composites had the best tensile, bending and compressive properties when the ratio of unsaturated resin to curing agent was 100:2 and the oven temperature was 70℃. The bending and compressive properties of composites were much larger than those of unsaturated resin-based composites, but the tensile properties were not big between these two.

Key words 3D hollow sandwich fabric composite, unsaturated resin, epoxy resin, tensile property, bending property, compressive property

三维中空夹芯织物复合材料具有强度高、模量高、耐冲击、耐腐蚀、隔音、隔热等特点,可以用作蜂窝和泡沫等夹层结构的替代品,在交通、汽车、建筑、船舶等领域已得到广泛应用^[1-4]。

三维中空夹芯织物复合材料于 20 世纪 90 年代末研发成功并实现产业化,国内外学者对该复合材料进行了大量研究:曹海建等^[5]研究了三维中空夹芯织物复合材料的低速冲击性能;匡宁等^[6]研究了复合材料的拉伸、压缩、剪切和弯曲性能;周光明等^[7]研究对比了复合材料的经纬向性能,并分析了复合材料的失效方式;Park 等^[8]探讨了厚度不同的复合材料的低速冲击性能;Hosur 等^[9]探讨了材料

的复合工艺,研究了不同的面板材料对低速冲击性能的影响。

上述三维中空夹芯织物复合材料基本都是使用环氧树脂作为树脂基体进行理论研究,而实际生产中,低成本、性能优异的不饱和树脂使用得更加广泛。本研究将重点分析环氧树脂、不饱和树脂对三维中空夹芯织物复合材料力学性能(拉伸、弯曲、压缩等)的影响规律。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

三维中空夹芯织物(由 1200tex 的 E-Glass 纤

基金项目:江苏省政策引导类计划(BY2016053-02);江苏省高校自然科学研究项目(16KJA430009、16KJB540001);南通市应用基础研究—工业(GY12016026);南通大学引进人才科研启动费项目(15R08);南通大学大学生创新创业训练计划项目(2017126)

作者简介:罗超(1994-),男,硕士研究生,研究方向为纺织材料的制备。

联系人:黄晓梅(1968-),女,教授,主要从事功能纺织品制备及性能研究工作。

纤维束织造), 织物间隔高度 10mm, 南京玻璃纤维研究设计院; 环氧树脂 E51、固化剂 H023, 南通星辰成材料有限公司; 不饱和树脂 191、促进剂、固化剂, 常州桦立柯新材料公司。环氧树脂、不饱和树脂的力学性能如表 1 所示。

万能材料试验机 (Instron 5969H 型), 美国 Instron 公司; 电热鼓风干燥箱 (101A-4S 型), 南京沃尔科技有限公司。

表 1 环氧树脂与不饱和树脂的力学性能

项目	环氧 树脂	不饱和树脂 (树脂与固化剂 质量比 100:1)	不饱和树脂 (树脂与固化剂 质量比 100:2)
拉伸强度/MPa	68	48	50
弯曲强度/MPa	103	76	80
压缩强度/MPa	82	68	71

1.2 制备方法

三维中空夹芯织物复合材料的制备方法见参考文献[10]。环氧树脂与织物复合制备三维中空夹芯复合材料的方法见参考文献[11]。不饱和树脂与织物复合制备三维中空夹芯复合材料的方法见参考文献[11]。不饱和树脂与织物复合制备三维中空夹芯复合材料的工艺参数如下: 固化温度 60℃、树脂与固化剂质量比为 100:1; 固化温度 70℃、树脂与固化剂质量比为 100:2。

1.3 性能测试

制备经纬向三维中空夹芯织物复合材料试样, 试样规格 250mm×25mm, 按照 GB/T 1447—2005《夹层结构拉伸性能测试方法》测试试样拉伸性能, 测试速度 2mm/min。

制备经纬向三维中空夹芯织物复合材料试样, 试样规格 170mm×60mm, 按照 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能测试方法》测试试样弯曲性能, 测试速度 5mm/min。

按照 GB/T 1453—2005《夹层结构或芯子压缩性能试验方法》测试复合材料试样压缩性能, 试样规格 60mm×60mm, 测试速度 2mm/min。

采用单反相机 (NikonD7200, 日本尼康公司) 对所制复合材料断裂面、表面破坏形貌进行分析表征。

2 结果与讨论

2.1 三维中空夹芯织物复合材料力学特性分析

2.1.1 拉伸特性

三维中空夹芯织物复合材料试样的拉伸载荷-位移曲线见图 1。由图可以看出: 实验开始时复合

材料试样的拉伸载荷随位移增加呈线性增加趋势, 此时试样中部表层与芯层接触处逐渐发白, 表面有树脂逐渐开裂; 随着位移的进一步增加, 实验过程中陆续听到树脂的破裂声和纤维的断裂声, 试样中部表面的树脂破裂严重, 内部纤维逐渐断裂。当位移达 4mm 时, 突然发出响亮的爆鸣声, 纤维彻底断裂, 拉伸载荷达到最大值 2532.37N, 随后拉伸载荷迅速下降, 试样完全被破坏。

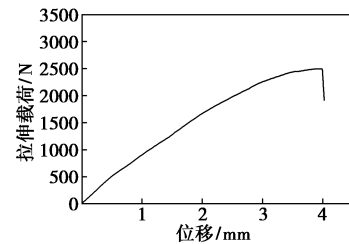


图 1 三维中空夹芯织物复合材料试样
拉伸载荷-位移曲线

不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料试样拉伸破坏形貌如图 2 所示。可以看出 2 种树脂基复合材料试样的经向断面均是平直的, 且位于两排芯柱之间, 如图 2(a) 和图 2(c) 所示; 而 2 种复合材料试样纬向断面则有一定的倾斜, 如图 2(b) 和图 2(d) 所示。

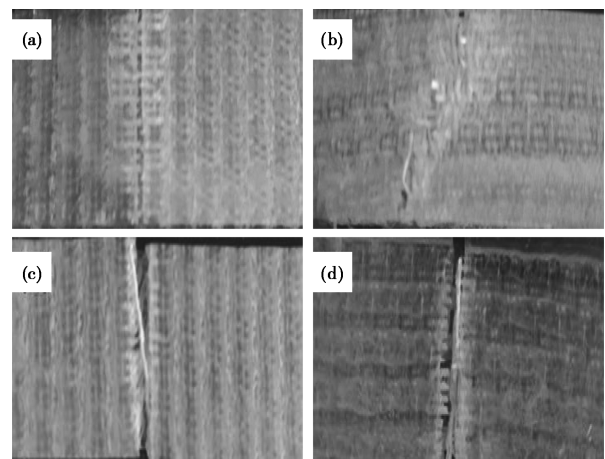


图 2 不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料
试样拉伸破坏形貌图

[(a)经向不饱和树脂基复合材料;(b)纬向不饱和树脂基复合材料;(c)经向环氧树脂基复合材料;(d)纬向环氧树脂基复合材料]

2.1.2 弯曲特性

三维中空夹芯织物复合材料试样的弯曲载荷-位移曲线见图 3。由图可知, 实验开始时复合材料试样的弯曲载荷随位移的增加呈快速上升趋势, 此时试样中部上表面和下表面逐渐出现发白现象, 小

部分树脂出现开裂和碎屑脱落现象;随着实验的进一步深入,伴随断断续续的树脂破裂声和纤维断裂声,内部芯柱逐渐被挤压变形,上表面树脂破裂严重,内部纤维逐渐断裂;当位移达 6.2mm 时,试样上表面与测试机器压头接触处的树脂和纤维彻底断裂,复合材料试样弯曲载荷达到最大值 576.48N;随后弯曲载荷迅速下降;位移在 10~65mm 之间时复合材料试样弯曲载荷趋于平缓,说明三维中空夹芯织物复合材料完全被破坏。

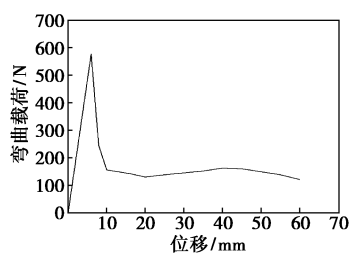


图 3 三维中空夹芯织物复合材料试样的弯曲载荷-位移曲线

实验过程中三维中空夹芯织物复合材料试样上表面被压断,内部芯材被压扁,下表面被拉伸破坏。不同树脂基复合材料试样弯曲破坏形貌如图 4 所示。无论是不饱和树脂基复合材料,还是环氧树脂基复合材料,试样经向断面均是平直的,如图 4(a)和图 4(c)所示;而试样纬向断面则有一定的弯曲,如图 4(b)和图 4(d)所示。

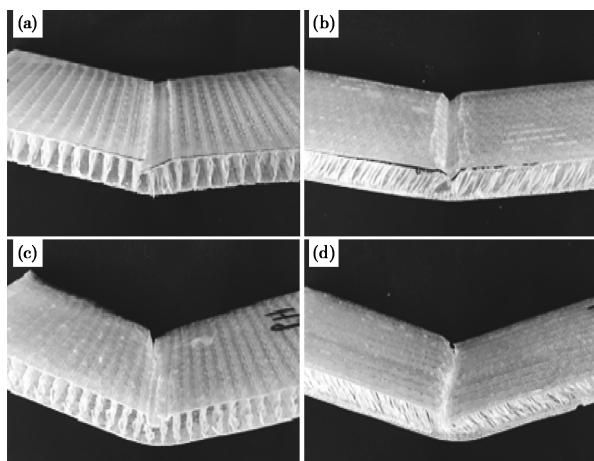


图 4 不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料试样弯曲破坏形貌图

[(a)经向不饱和树脂基复合材料;(b)纬向不饱和树脂基复合材料;(c)经向环氧树脂基复合材料;(d)纬向环氧树脂基复合材料]

2.1.3 压缩特性

三维中空夹芯织物复合材料试样的压缩载荷-位移曲线见图 5。由图可知,实验开始时复合材料

试样压缩载荷随位移增加呈线性增加趋势,此时芯柱与上下面板接触部位的树脂基体逐渐发白破裂,实验中听到咔嚓咔嚓的破碎声;随着实验的继续,当位移达 1mm 时曲线上出现第一个峰值,此时内部芯材与面板接触部位的纤维均出现不同程度的断裂,芯材逐渐被压扁,树脂基体破裂现象严重,试样上下面板沿着芯柱的方向错位,发出响亮的爆鸣声;继续加压,复合材料试样压缩载荷随着位移的增加而下降,直至芯材纤维完全被压扁,上下面板贴合;实验最后阶段,复合材料试样压缩载荷随着位移的增加又开始逐渐上升,试样的上下面板紧密地贴合在一起,试样变成实心结构,彻底被破坏。

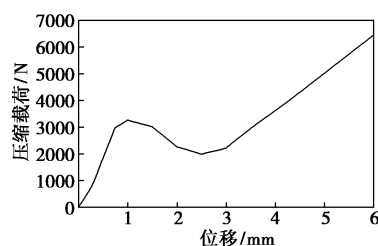


图 5 三维中空夹芯织物复合材料试样的压缩载荷-位移曲线

三维中空夹芯织物复合材料试样压缩前后的形貌如图 6 所示。由图可以看出,压缩前复合材料试样的高度明显高于压缩后材料的高度,且压缩后的试样上下面板沿着芯柱方向错位,芯材与面板接触部位的树脂破碎,纤维断裂。



图 6 三维中空夹芯织物复合材料试样压缩前后的形貌图

2.2 三维中空夹芯织物复合材料力学性能分析

2.2.1 拉伸性能

不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料的拉伸性能如图 7 所示。由图可知,不饱和树脂基复合材料的拉伸性能比环氧树脂基复合材料拉伸性能差。不饱和树脂基复合材料的纬向拉伸载荷最大为 2532.37N,经向拉伸载荷为 2045.95N[见图 7(a)];环氧树脂基复合材料的纬向拉伸载荷为 3109.44N,经向拉伸载荷为 2591.59N[见图 7(b)]。

影响三维中空夹芯织物复合材料拉伸性能的主要因素是内部织物的增强材料,但因为 2 种复合材

料的内部织物相同,所以拉伸性能就取决于树脂基体。不饱和树脂固化后强度比环氧树脂低,所以用其制成复合材料影响了材料的拉伸强度,因此不饱和树脂基复合材料的拉伸性能比环氧树脂基复合材料的拉伸性能差。同时,由于承受作用力的内部芯材是相同的,所以拉伸性能差距不是很大^[12]。

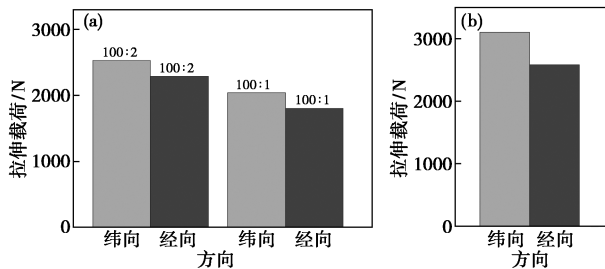


图7 不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料的拉伸性能

[(a) 不饱和树脂基复合材料; (b) 环氧树脂基复合材料]

由图7还可以看出,2种复合材料的经向拉伸性能均小于纬向拉伸性能。因为纬纱排列紧密,伸直状态较好,对复合材料的支持力强,同时芯层纤维和纬纱形成一定角度,也会承担一定的载荷;而经纱弯曲较大,不利于承受拉伸载荷,因此复合材料的纬向拉伸性能大于经向的拉伸性能^[13]。当固化温度为70℃,不饱和树脂与固化剂质量比为100:2时,不饱和树脂基复合材料具有最佳的拉伸性能,其纬向拉伸载荷为2532.37N,经向拉伸载荷为2045.95N;当固化温度为70℃,不饱和树脂与固化剂质量比为100:1时,不饱和树脂基复合材料的纬向拉伸载荷为2289.61N,其经向拉伸载荷为1808.33N。这是因为当树脂与固化剂质量比为100:2时,不饱和树脂固化成型的强度更高,从而使复合材料的拉伸性能更佳。

2.2.2 弯曲性能

不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料的弯曲性能如图8所示。由图可知,不饱和树脂基复合材料的弯曲性能比环氧树脂基复合材料弯曲性能差。不饱和树脂基复合材料的纬向弯曲载荷最大为192.40N,经向弯曲载荷为148.43N[见图8(a)];环氧树脂基复合材料的纬向弯曲载荷为576.48N,经向弯曲载荷为297.25N[见图8(b)]。2种复合材料使用相同的内部织物,因此影响复合材料弯曲性能的主要因素就是树脂基体,同时不饱和树脂弯曲强度远小于环氧树脂的弯曲强度,从而导致不饱和树脂基复合材料的弯曲性能远低于环氧树脂基复合材料的弯曲性能^[14]。

由图8还可以看出,2种复合材料的经向弯曲载荷均小于纬向弯曲载荷。三维中空夹芯织物中纬向纱线呈直线状态,纤维可以充分发挥弯曲强力,而经向纱线呈弯曲状态,纤维不能充分发挥弯曲强力,因此复合材料的纬向弯曲性能大于经向弯曲性能^[15]。固化温度为70℃、树脂与固化剂质量比为100:2时,不饱和树脂基复合材料弯曲性能最好,其纬向弯曲载荷为192.40N,经向弯曲载荷为148.43N;固化温度为70℃,树脂与固化剂质量比为100:1时,不饱和树脂基复合材料的纬向弯曲载荷为169.14N,经向弯曲载荷为122.98N。这是因为当树脂与固化剂的质量比为100:2时,不饱和树脂固化成型的强度更高,从而使复合材料的弯曲性能更佳。

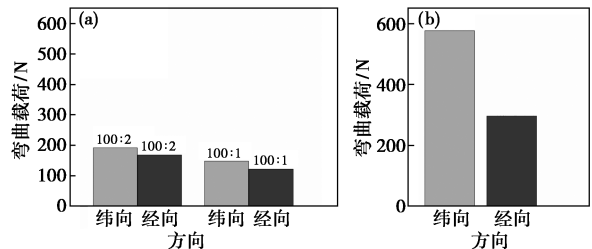


图8 不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料的弯曲性能

[(a) 不饱和树脂基复合材料; (b) 环氧树脂基复合材料]

2.2.3 压缩性能

不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料的压缩性能如图9所示。由图可知,不饱和树脂基复合材料的压缩性能比环氧树脂基复合材料压缩性能差。不饱和树脂基复合材料的压缩载荷最大为1354.67N[见图9(a)],环氧树脂基复合材料的压缩载荷为3255.67N[见图9(b)]。2种复合材料使用相同的内部织物,因此影响复合材料压缩性能的主要因素就是树脂基体。不饱和树脂压缩强度远小于环氧树脂的压缩强度,用其制成复合材料后,不饱和树脂基

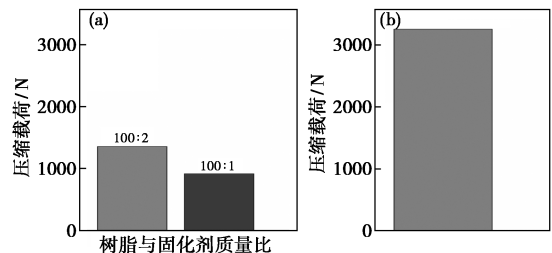


图9 不同树脂基三维中空夹芯织物复合材料的压缩性能

[(a) 不饱和树脂基复合材料; (b) 环氧树脂基复合材料]

复合材料的压缩载荷远小于环氧树脂基复合材料压缩载荷^[16-18]。

由图 9 还可以看出,固化温度为 70℃,树脂与固化剂质量比为 100:2 时,不饱和树脂基复合材料的压缩性能最好,压缩载荷为 1354.67N;固化温度为 70℃,树脂与固化剂质量比为 100:1 时,不饱和树脂基复合材料的压缩载荷为 912.54N。这是因为当树脂与固化剂质量比为 100:2 时,不饱和树脂固化成型的强度更高,从而使复合材料的压缩性能更佳。

3 结论

(1)在树脂与固化剂质量比为 100:2、固化温度为 70℃条件下,不饱和树脂基复合材料的经纬向拉伸载荷分别为 2045.95N、2532.37N,经纬向弯曲载荷分别为 148.43N、192.40N,压缩载荷为 1354.67N;树脂与固化剂质量比为 100:1、固化温度为 70℃时,该复合材料的经纬向拉伸载荷分别为 1808.33N、2289.61N,经纬向弯曲载荷分别为 122.98N、169.14N,压缩载荷为 912.54N。树脂与固化剂质量比为 100:2、固化温度为 70℃时,不饱和树脂基复合材料性能更佳。

(2)环氧树脂基复合材料的经纬向弯曲载荷(297.25N、576.48N)和压缩载荷(3255.67N)大于不饱和树脂基复合材料的经纬向弯曲载荷(148.43N、192.40N)和压缩载荷(1354.67N),而 2 种复合材料的经纬向拉伸性能则相差不大。

参考文献

- [1] 陈东生,赵书经.中空织物及其在复合材料上的应用[J].化工新型材料,1995(6):12-14.
- [2] 郑云.中空夹芯织物复合材料在轨道交通内装上的应用[J].玻璃纤维,2013(4):51-56.
- [3] Shyr T W, Pan Y H. Low velocity impact responses of hollow

core sandwich laminate and inter ply hybrid laminate[J]. Composite Structures, 2004, 64(2): 189-198.

- [4] Tien W S, Yu H P. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and inter ply hybrid laminate[J]. Composite Structures, 2004, 64(2): 189-198.
- [5] 曹海建,钱坤,魏取福,等.三维整体中空复合材料低速冲击性能[J].纺织学报,2009,30(10):70-74.
- [6] 匡宁,周光明,张立泉,等.整体夹芯中空复合材料的开发与应用[J].玻璃纤维,2007(5):15-20.
- [7] 周光明,王新峰.三维机织复合材料拉伸损伤研究[C].庆祝中国力学学会成立 50 周年暨中国力学学会学术大会 2007 论文摘要集(下),2007.
- [8] Park S J, Park W B, Lee J R. Characterization of the impact properties of three-dimensional glass fabric-reinforced vinyl ester matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(24): 6151-6154.
- [9] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets[J]. Composite Structures, 2004, 65(1): 103-106.
- [10] 高爱君,李敏,王绍凯,等.三维间隔连体织物复合材料力学性能[J].复合材料学报,2008,25(2):87-93.
- [11] 沈浩清,曹海建,黄晓梅,等.三维间隔织物复合材料弯曲性能研究[J].产业用纺织品,2016,34(11):6-9.
- [12] 曹海建,钱坤,盛东晓,等.芯材高度对整体中空复合材料力学性能的影响[J].上海纺织科技,2010,38(9):54-57.
- [13] 匡宁,周光明,张立泉,等.三维中空复合材料力学性能研究[J].材料工程,2007,10(2):117-120.
- [14] 丁长明,张丽.玻璃纤维 3D 复合材料弯曲力学性能的研究[J].山东纺织科技,2008(3):7-9.
- [15] 杨国腾,王巍.复合材料弯曲性能测试的研究[C].2012 航空试验测试技术学术交流会议论文集,2012.
- [16] 钟崇岩,曹海建,李娟,等.组织结构对三维整体中空复合材料压缩性能的影响[J].材料导报,2012,26(20):279-281.
- [17] 张子龙.复合材料压缩试验方法有限元分析[J].航空材料学报,1996,16(4):40-44.
- [18] 贺崇武,蔡昕锁.复合材料压缩性能试验研究[C].复合材料:生命、环境与高技术—第十二届全国复合材料学术会议论文集,2002.

收稿日期:2017-10-27

修稿日期:2018-11-30

(上接第 137 页)

- [7] 王其书,刘峰,孙伟贤,等.丙烯酸-甲基丙烯酸甲酯共聚物囊壁的十四醇相变微胶囊的制备与表征[J].上海纺织科技,2014(12):6-9.
- [8] 童晓梅,闫子英,韩洋.石墨和纳米 SiO₂ 改性 P(MMA-co-AA)/石蜡相变储热微胶囊的制备及性能研究[J].新型建筑材料,2015,42(11):58-61.
- [9] 李军,黄际伟,李庆彪.壁材掺杂碳纳米管的相变微胶囊的制备及热性能研究[J].功能材料,2014,45(S2):110-114.
- [10] Rong M Z, Zhang M Q, Zheng Y X, et al. Structure-property relationships of irradiation grafted nano-inorganic particle filled polypropylene composites[J]. Polymer, 2001, 42(1): 167-183.
- [11] Niu X W, Sun Y M, Ding S N, et al. Synthesis of enhanced urea-formaldehyde resin microcapsules doped with nanotitania

[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(1): 248-256.

- [12] 韩路晖,毕良武,赵振东,等.微胶囊的应用与表征方法研究进展[J].化工新型材料,2013,41(9):178-180.
- [13] Hwang J S, Kim J N, Wee Y J, et al. Factors affecting the characteristics of melamine resin microcapsules containing fragrant oils[J]. Biotechnology & Bioprocess Engineering, 2006, 11(5): 391-395.
- [14] Zhang X X, Fan Y F, Tao X M, et al. Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2005, 281(2): 299-306.
- [15] 甄朝晖,陈中豪.乳化剂对原位聚合蜜胺甲醛树脂微胶囊成囊性的机理研究[J].中国造纸学报,2006,21(1):47-51.

收稿日期:2017-10-31

修稿日期:2018-12-12