

文章编号:1003-1545(2020)06-0060-07

# PVC 泡沫夹芯结构复合材料固化芯材变色对结构性能的影响

温 锋, 刘 辉, 王 磊, 王新文, 吴 双

(洛阳双瑞风电叶片有限公司, 河南 洛阳 471039)

**摘要:** 风电叶片固化过程放热常常出现 PVC 芯材变色问题, 为研究 PVC 芯材变色对复合材料力学性能的影响, 特别制备了 4 种程度变色不同的 45 mm 厚 PVC 芯材变色夹芯结构试板, 开展夹芯结构四点弯曲试验, 对比不同变色程度 PVC 夹芯结构的弯曲破坏载荷、极限剪切强度和极限疲劳性能。结果表明, 严重变色 PVC 夹芯结构试样与未变色正常试样相比, 平均弯曲破坏载荷和剪切强度最大降幅为 7.3%; 严重变色 PVC 夹芯结构与正常 PVC 夹芯结构的弯曲疲劳性能与正常试样的持平或优于正常试样的。剖开变色 PVC 夹芯泡沫, 用电镜观察, 没有发现明显结构塌陷现象。

**关键词:** PVC 泡沫; 夹芯结构; 芯材变色; 四点弯曲

中图分类号: TB332 文献标识码: A

## Effect of PVC Foam Discoloration of Solidified Sandwich Structure Composite on Structural Properties

WEN Feng, LIU Hui, WANG Lei, WANG Xinwen, WU Shuang

(Luoyang Sunrui Wind Turbine Blade Co. Ltd, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** The discoloration of PVC core material often occurs during the curing process of wind power blades. In order to study the effect of PVC core material discoloration on the mechanical properties of composite materials, four kinds of 45 mm thick PVC sandwich structured test panels with different degrees of discoloration are prepared, and four-point bending tests on sandwich structure are carried out to compare the bending failure load, ultimate shear strength and ultimate fatigue performance of PVC sandwich structure with different discoloration degrees. The results show that the average bending failure load and shear strength of the severely discolored PVC sandwich structure are reduced by 7.3% compared with those of the normal PVC sandwich structure without discoloration. The bending fatigue performances of the severely discolored PVC sandwich structure and the normal PVC sandwich structure are equal to or better than that of the normal sample. No obvious structural collapse is found inside the discolored PVC sandwich foam by electron microscope.

**Keywords:** PVC foam; sandwich structure; core material discoloration; four point bending

PVC 泡沫作为风力发电机叶片的夹芯材料, 主要应用在叶片壳体和腹板中形成夹芯结构, 不仅可以提高叶片的结构刚度, 还可以减轻叶片的重量<sup>[1]</sup>, PVC 结构泡沫和纤维增强材料通过环氧树脂作为基体材料, 交联固化后形成叶片壳体结构。随着风电叶片市场竞争日益加剧, 要求叶片生产通过提升效率来降低成本。目前, 主要措施是提高环氧树脂的基础固化温度、缩短环氧树

脂的固化时间来提高叶片生产效率, 但这样往往会造成固化过程中环氧树脂剧烈放热, 一旦 PVC 芯材超过 120 °C 就会造成变色<sup>[2]</sup>, 被判为不合格。目前叶片企业均存在这个问题, 急需研究 PVC 芯材变色对结构性能的影响。

通过文献资料得知, PVC 泡沫芯材在 120 °C 颜色开始变化, 温度超过 150 °C PVC 泡沫芯材会降解脱 HCl 而变色发黑, 且有氧环境会加速其降

收稿日期: 2020-01-13

作者简介: 温锋, 男, 1973 生, 高级工程师, 从事树脂基复合材料开发及应用研究。Email: wenfeng271@sina.com

解<sup>[3-7]</sup>。王桂花研究发现, PVC 泡沫中存在着过氧结构、氨基结构以及碳碳双键结构等多种弱结构<sup>[8]</sup>, PVC 泡沫在 160 ℃恒温 10 min 后加速分解出 HCl, 到 20 min 后又趋于平稳<sup>[9]</sup>, PVC 的热氧降解主要与不稳定的氯原子(特别是链内烯丙基氯)有关, 在给定温度下, 脱 HCl 的速率随着不稳定氯原子数的增加而加快<sup>[10-12]</sup>。潘贵英等研究发现, 聚氯乙烯热降解过程形成的共轭烯烃能够通过分子重排、环化形成芳香族化合物<sup>[13]</sup>。

张星启等研究发现, PVC 连续脱去 HCl 形成的共轭多烯结构是 1 个色基团<sup>[14]</sup>, 当共轭双键数大于 6 时, 出现显色效应, 超过 10 h, 颜色为黄色<sup>[14]</sup>。随着共轭双键数量的进一步增加, 颜色随之加深, 其显色顺序为白色→淡黄色→黄色→橘黄色→棕色→黑色<sup>[15]</sup>。

结合 PVC 变色研究文献资料, 本研究拟模拟叶片壳体 PVC 夹芯结构, 采用 PVC-MC80 芯材设计夹芯结构试板, 在不同温度控制下固化, 然后加工得到 4 种不同变色程度的 PVC 泡沫夹芯结构试样。参照 ASTM C393/C393M-11 测试方法, 通过四点弯曲静力试验, 得到破坏载荷, 再依据静力破坏载荷设计疲劳载荷, 开展四点弯曲疲劳性能测试。对测试结果进行对比分析, 研究不同变色程度 PVC 夹芯结构对结构力学性能的影响情况。

## 1 试验部分

### 1.1 材料和设备仪器

#### 1.1.1 材料准备

PVC 芯材: 采用 45 mm 厚 PVC-MC80(MC80)芯材, 开槽打孔方式为: 孔径 2 mm, 孔距 20 mm×20 mm; 正面开槽规格为 30 mm×30 mm, 槽宽 0.9 mm; 背面一字浅槽尺寸为 2 mm×2 mm。

双轴玻纤: 采用 2AX-0800-0440 双轴玻纤布, 批号为 E18-12-390-031, 浸润剂为环氧型。

环氧树脂: 选用灌注环氧树脂和环氧固化剂, 批号均为 L19A180E01, 且二者配比(重量)为 100 : 32。

#### 1.1.2 设备和仪器

试验设备: 真空脱泡烘箱、真空泵、温控玻璃

钢平板模具、双锯片加工锯床等。

试验仪器: 红外测温枪、数显热电偶、卡尺、直尺等。

测试设备: MTS311-1000kN 电液伺服疲劳试验机。

### 1.2 试样制备

#### 1.2.1 试样制作参数

试样制作中铺层结构、真空灌注和固化参数见图 1、表 1、表 2、表 3。

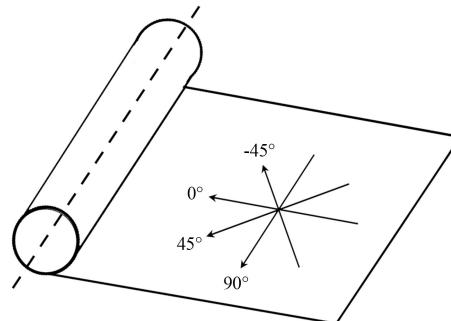


图 1 双轴布纤维方向

Fig. 1 Fiber orientation of biaxial cloth

表 1 夹芯结构铺层说明

Table 1 Description of sandwich construction

铺层序号	材料类型	铺设角度 / (°)	厚度 / mm
1	2AX-0800-0440	0	0.6
2	2AX-0800-0440	45	0.6
3	PVC MC80	—	45.0
4	2AX-0800-0440	45	0.6
5	2AX-0800-0440	0	0.6

表 2 灌注工艺参数

Table 2 Perfusion parameters

树脂温度 / °C	真空度 / MPa	实验台温度 / °C
20	-0.1	40

表 3 固化参数

Table 3 Curing parameters

加热速率 / (°C/min)	固化温度 / °C	固化时间 / h	T <sub>g1</sub> / °C	T <sub>g2</sub> / °C
3	70	8	>65	>70

#### 1.2.2 试板制备过程

泡沫板规格测量确认和玻璃布按规定方向

划线裁剪;模具均匀涂脱模剂;依次铺设脱模布—2 层双轴布—PVC 芯材—2 层双轴布—脱模布—隔离膜—导流网,在试板 PVC 泡沫内放置监测热电偶,建立真空导入系统,模具 40 ℃升温盖棉被保温,按 100 : 32 混合环氧树脂和固化剂,抽真空脱泡 15 min 后灌注试板铺层;控制试

板固化表面温度,按小于 65 ℃、小于 85 ℃、小于 95 ℃、小于 130 ℃分别制备 4 种试板,同时用热电偶监测记录 PVC 泡沫内部放热温度。PVC-MC80 夹芯结构 1#~4#试样的固比控制情况见表 4。

表 4 PVC~MC80 夹芯结构试样 1#~4#试样固化控制情况表  
Table 4 PVC~MC80 sandwich structure specimen 1#~4# curing control

试 样 编 号	环境 温 度 /℃	环境 湿 度 /%	模 具 温 度 /℃	树 脂 温 度 /℃	铺 层 上 表 温 度 /℃	铺 层 下 表 温 度 /℃	灌 注 用 时 间 /min	灌 注 完 到 放 热 峰 用 时 间 /min	放 热 峰 芯 材 内 温 度 /℃	试 板 上 芯 材 内 部 温 度 /℃	后 固 化 温 度 /℃	后 固 化 时 间 /h	试 样 情 况
1#	20	20	40	23	28	40	20	240	80	65	70	8	良好
2#	20	20	40	23	28	40	20	190	150	85	70	8	良好
3#	20	20	40	23	28	40	20	170	175	95	70	8	良好
4#	20	20	40	23	28	40	20	150	190	130	70	8	表面泛白

试验发现,大于 45 mm 厚 PVC 泡沫芯材夹芯复合材料结构成型固化过程中,表面温度过高,如达到 130 ℃时,PVC 泡沫内部温度可达到 190 ℃,复合材料蒙皮会出现过热泛白现象;若试板固化表面温度不超过 95 ℃,复合材料蒙皮外观正常。

### 1.2.3 试样加工

考虑到芯材蒙皮与泡沫界面容易造成加工损伤,试样加工采用下面小锯片和上面大锯片切割,在严格控制锯切速度情况下,得到较为理想试样。

#### 1.2.4 试样说明

试样按固化控制温度不同,形成 4 组试样,试样变色程度和缺陷情况见表 5 和图 2。

表 5 试样组号及缺陷程度描述  
Table 5 Discoloration and defect degrees of sample groups

试样组	试样变色程度和缺陷说明
1#	正常样,泡沫颜色正常;模具 40 ℃恒温过放热峰,表面控制不超过 60 ℃
2#	芯材轻度变色样;模具 40 ℃恒温过放热峰,表面控制不超过 85 ℃
3#	芯材较严重变色样;模具 40 ℃恒温过放热峰,表面控制不超过 95 ℃
4#	芯材严重变色样;模具 40 ℃恒温过放热峰,表面控制不超过 130 ℃,蒙皮过热泛白

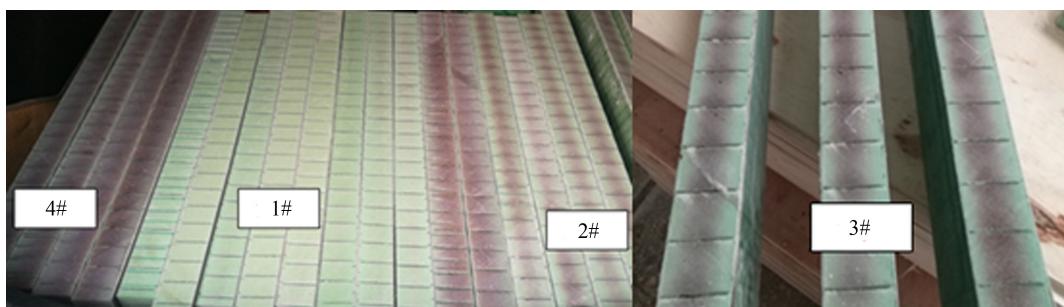


图2 试样准备

Fig. 2 Sample preparation

### 1.3 试样测试

#### 1.3.4 测试方法

试验参考 ASTM C 393/ASTM C 393-11el 标准进行, 使用 MTS311-1000kN 电液伺服材料试验机, 试样下支撑跨距  $S_1 = 550 \text{ mm}$ , 上加载跨距  $S_2 = 380 \text{ mm}$ 。弯曲试验采用位移控制模式, 加载速率为  $2 \text{ mm/min}$ , 直至试样断裂。

疲劳试验采用载荷控制, 载荷范围根据弯曲试验静态结果 35% 确定, 应力比  $R = 0.1$ , 频率  $f = 6 \text{ Hz}$ , 循环次数  $N = 5 \times 10^6$  次, 循环达到  $N = 5 \times 10^6$  次或试样断裂则试验终止。

对试验数据进行处理, 平均值按式(1)计算, 标准差按式(2)计算, 变异系数按式(3)计算。

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i)/n \quad (1)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - nx^2)/(n-1)} \quad (2)$$

$$CV = 100 \times S_{n-1}/\bar{x} \quad (3)$$

## 2 试验结果和分析

### 2.1 静态四点弯曲试验结果和分析

PVC80 夹芯结构四点弯曲试验共有 4 组 12 个试样, 弯曲试验结果见表 6, 静力破坏典型形貌见图 3。

表6 静态弯曲破坏试验测试结果

Table 6 Test results of static bending failure test

试样编号	厚度 /mm	宽度 /mm	长度 /mm	破坏载荷 /kN	芯材剪切 /MPa	芯材剪切强度统计			备注
						平均值 /MPa	标准差	变异系数 /%	
1-1	46.7	120.1	656	12.99	1.18				断裂
1-2	47.2	120.1	656	14.89	1.35	1.24	0.090	7.44	断裂
1-3	47.1	120.4	654	13.18	1.19				断裂
2-1	46.4	120.3	653	13.79	1.26				断裂
2-2	46.7	120.5	653	15.50	1.41	1.28	0.126	9.85	断裂
2-3	46.3	120.1	653	12.70	1.16				断裂
3-1	47.1	120.1	651	12.78	1.16				断裂
3-2	47.0	120.0	650	12.40	1.12	1.17	0.054	4.66	断裂
3-3	47.3	120.0	650	13.62	1.23				断裂
4-1	46.9	120.1	650	14.43	1.31				断裂
4-2	47.8	120.2	650	11.15	1.00	1.15	0.154	13.32	断裂
4-3	47.6	120.3	653	12.78	1.15				断裂



图 3 静力弯曲试验试样破坏状态

Fig. 3 Failure state of static bending test specimen

依据设计文件材料性能要求,PVC80 剪切强度要求大于 0.9 MPa,可见不同程度变色芯材剪切强度均满足设计要求;测试试样不足 5 件,标准差第 2 组和第 4 组离散较大超过 10%,变异系数除第 4 组超过 10% 外,其它组平均值的离散程度较小;从剪切强度平均值可知,变色程度越严重,芯材剪切强度越低,降幅为 7.3%。

## 2.2 疲劳试验结果和分析

对编号 1-4、1-5、1-6、3-4、3-5 和 4-4 试样

进行疲劳实验。试样加载如图 4 所示,支撑跨距  $S_1 = 550$  mm, 加载跨距  $S_2 = 380$  mm。疲劳试验采用载荷控制,载荷范围根据弯曲试验正常样的 35% 确定,应力比  $R = 0.1$ ,频率  $f = 6$  Hz, 试验要求循环达到  $N = 5 \times 10^6$  次或试样断裂时试验终止。

疲劳试验结果见表 7,疲劳破坏典型形貌见图 4。

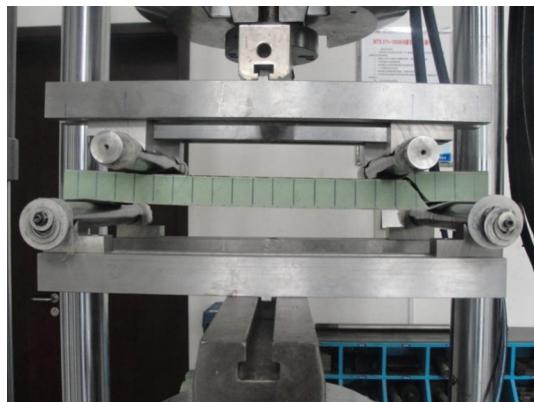


图 4 疲劳试验典型破坏形貌

Fig. 4 Typical failure morphology of fatigue test

表 7 疲劳试验结果

Table 7 Fatigue test results

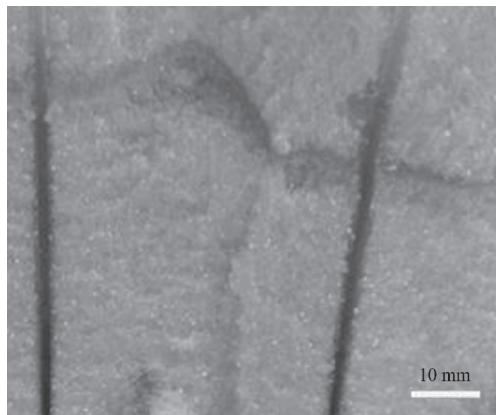
试样编号	载荷范围 /kN	频率 /Hz	循环次数 /cycle	断裂位置
1-4	-0.48~-4.79	6	1 738 567	压辊与支承辊之间
1-5	-0.48~-4.79	6	3 470 490	压辊与支承辊之间
1-6	-0.48~-4.79	6	2 636 147	压辊与支承辊之间
3-4	-0.48~-4.79	6	4 004 405	压辊与支承辊之间
3-5	-0.48~-4.79	6	4 129 295	压辊与支承辊之间
4-4	-0.48~-4.79	6	3 090 139	压辊与支承辊之间

按照叶片疲劳载荷为极限载荷 35% 的关系,依据夹芯结构静力实验,芯材剪切破坏强度制定为疲劳试验应力峰峰值 4.79 MPa;第 3 组和第 4 组试样不足 3 件,但第 3 组试样离散性较好,第 4 组仅一个试样,无法分析离散性,第 1 组试样离散性较差,标准差为 86.6;对变色程度较严重样件开展 2 次疲劳四点弯曲试验,试验结果达到

350 万次,能够持平或超过正常试样,严重变色芯材仅完成一次疲劳试验,循环次数达到 300 万次,超过正常试样平均值,分析原因可能由于变色试样变色为中央区域,变色导致结构刚度降低,但没有影响与玻璃钢的截面粘接性能,结构抗疲劳性能有所提高。

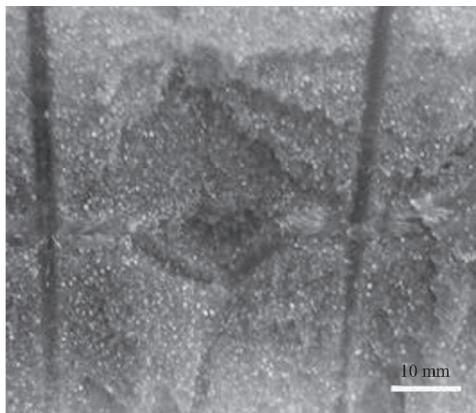
### 2.3 试样破坏形貌观察和分析

将经试验破坏后的 PVC 泡沫结构试样剖

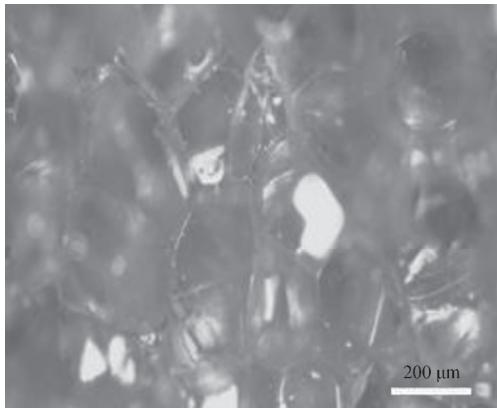


(a) 1#-4#正常泡沫断面形貌

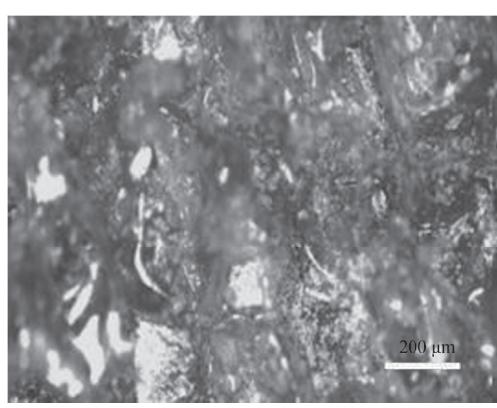
开, 经过电镜 50 倍和 100 倍放大, 观察泡沫芯材的内部状态和形貌, 见图 5。



(b) 3#, 4#变色泡沫断面形貌



(c) 正常PVC泡沫形貌



(d) 变色PVC泡沫形貌

图 5 PVC 泡沫形貌

Fig. 5 Morphology of PVC foam

正常 PVC 泡沫孔隙较为规则, 变色 PVC 泡沫孔隙明显不规则, 观察剖面形貌, 没有发现结构塌陷情况。

## 3 结论

(1) 45 mm 厚 PVC 泡沫夹芯复合材料结构成型过程中, 固化过程表面温度过高(如达到 130 ℃), 复合材料蒙皮会出现过热泛白现象。

(2) 严重变色 PVC 夹芯结构试样与未变色正常试样相比, 平均弯曲破坏载荷和剪切强度最大降幅为 7.3%。

(3) 严重变色 PVC 夹芯结构与正常 PVC 夹芯结构的弯曲疲劳性能与正常试样的持平或优

于正常试样的。

(4) 剖开变色 PVC 夹芯泡沫, 采用电镜放大观察, 内部没有发现明显结构塌陷现象。

### 参考文献:

- [1] 汪鹏.PET 泡沫的性能评估及其在风机叶片上的应用探讨[J].玻璃钢/复合材料,2016,(7):59-62.
- [2] 刘凤花.几种典型废塑料的热分解动力学研究[D].天津:天津科技大学,2008.
- [3] 王雁国.硬质交联 PVC 泡沫塑料的制备[J].工程塑料应用,2014,42(6):13-16.
- [4] 苑会林,廖前程.交联发泡聚氯乙烯板材的研究与制备[J].塑料工业,2010,38(6):68-71.
- [5] 苑会林.交联发泡聚氯乙烯板材的研究与制备[J].塑料工业,2010,38(6):68-71.
- [6] 杜中辉.苯酐改性交联聚氯乙烯泡沫结构与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.

(下转第 69 页)

(4) 豪克能加工能进一步提升 3A 类双相不锈钢铸件精加工表面耐点蚀性能。

#### 参考文献:

- [1] 赵显华, 刘瑞秀. 豪克能 PT 技术在航空抗疲劳制造中的作用 [J]. 航空制造技术, 2012(22): 105-108.
- [2] 杨学军, 潘连新, 石江, 等. 豪克能表面加工技术对零部件表面微观结构的影响 [J]. 金属加工, 2017

(20):46-49.

- [3] 王成龙. 应用豪克能技术提高轧辊耐磨性和抗疲劳性能应用试验 [J]. 现代冶金, 2014(5): 71-74.
- [4] 陈国铮, 陈金花, 胡波, 等. 豪克能技术在汽轮机转子加工中的应用 [J]. 工具技术, 2012(10): 59-60.
- [5] 赵显华. 豪克能消除焊接应力技术在军工产品上的应用 [J]. 电焊机, 2007(9): 112-113.

(上接第 65 页)

- [7] 邓建民. 聚氯乙烯树脂热稳定性探讨 [J]. 中国氯碱, 2009(11): 16-18.
- [8] 王桂花. 优化聚氯乙烯树脂中弱结构与热氧光氧稳定性研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2000.
- [9] 何祚云, 胡兴洲, 潘江庆. 聚氯乙烯结构缺陷和热不稳定性的关系的研究 [J]. 高分子学报, 1992, 24(2): 60-64.
- [10] 朱新生. 添加剂对聚氯乙烯热降解性能的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(1): 149-152.
- [11] 沈德言, 胡兴洲, 英新芳. 聚氯乙烯树脂的不饱和度

和热稳定性的关系 [J]. 高分子学报, 1997, 24(2): 18-21.

- [12] 韩斌. 聚氯乙烯等塑料废弃物热解特性及动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [13] 潘贵英. 聚氯乙烯热降解机理的理论研究 [J]. 分子科学学报, 2019, 35(1): 29-33.
- [14] 张启兴. 热稳定剂在 PVC 塑料制品加工中的应用 [J]. 聚氯乙烯, 2007(7): 1-3.
- [15] 郜涓林, 黄志明, 编. 聚氯乙烯工艺技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.