

DOI: 10.19666/j.rlfld.202507123

退役风电叶片重塑成型工艺 对产品性能影响

江清潘, 周凤翔, 布雨薇, 何发泉, 陈 鸥, 王洪亮
(国能龙源环保有限公司, 北京 100039)

[摘 要] 为优化退役风电叶片粉料与高密度聚乙烯 (HDPE) 混合重塑成型制备再生产品工艺参数, 采用 Six-sigma DoE 方法进行实验设计, 研究各区机筒温度、合流芯温度、模具温度、主机转速等对产品性能的影响; 并以弯曲强度及压缩强度作为再生产品性能评价指标, 结合给定匹配值得到最优重塑成型工艺参数。实验结果表明: 选定弯曲强度 44 MPa 和压缩强度 31 MPa 作为目标匹配值时, 最大化意愿获取最优工艺参数, 即机筒前区温度为 189 °C, 机筒中区温度为 179 °C, 机筒后区温度为 168 °C, 合流芯温度为 158 °C, 模具温度为 156 °C, 主机转速为 4.0 r/min, 在此工艺条件下再生产品的弯曲强度为 43.15 MPa, 压缩强度为 30.73 MPa。

[关 键 词] 风电叶片; 成型工艺; Six-sigma DoE 法; 工艺参数

[引用本文格式] 江清潘, 周凤翔, 布雨薇, 等. 退役风电叶片重塑成型工艺对产品性能影响[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 65-72. JIANG Qingpan, ZHOU Fengxiang, BU Yuwei, et al. Influence of remolding process on properties of decommissioned wind turbine blades[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 65-72.

Influence of remolding process on properties of decommissioned wind turbine blades

JIANG Qingpan, ZHOU Fengxiang, BU Yuwei, HE Faquan, CHEN Ou, WANG Hongliang
(China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: To optimize the process parameters for the preparation of regenerated products by mixing the powder of waste wind turbine blades with high-density polyethylene (HDPE) and remolding, the Six-sigma DoE method was used to design the experiments to study the effects of various process parameters such as barrel temperature in each zone, confluence core temperature, mold temperature, and main engine speed on the performance of regenerated products. The flexural strength and compressive strength were used as the evaluation indexes of the performance of regenerated products, and the optimum remolding process preparation parameters were obtained combined with the given matching value. The experimental results show that when the flexural strength of 44 MPa and the compressive strength of 31 MPa are selected as target matching values, the optimal process parameters obtained by maximizing the preferred parameters are: front zone barrel temperature of 189 °C, middle zone barrel temperature of 179 °C, rear zone barrel temperature of 168 °C, confluence core temperature of 158 °C, mold temperature of 156 °C, and main engine speed of 4.0 r/min. Under this process condition, the flexural strength of the regenerated product is 43.15 MPa, and the compressive strength is 30.73 MPa.

Key words: wind turbine blades; molding process; Six-sigma DoE method; process parameters

我国是全球最大的风电装机国和风电整机装备生产国。由复合材料制成的风电叶片使用寿命一般为 20~30 年^[1-5]。随着早期风电机组的退役及“上

大压小”的需求, 中国将迎来退役叶片报废潮^[6-8]。风电叶片主体材料通常为玻璃纤维与树脂的复合材料, 材料组成复杂。如何规模化处理大宗报

收稿日期: 2025-07-22 修回日期: 2025-08-06 接受日期: 2025-08-11

第一作者简介: 江清潘 (1986), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源固废资源化利用, jqplyhb2010@163.com。

通信作者简介: 何发泉 (1970), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为低碳环保与固废资源化利用, fqh91@sina.com。

废风电叶片仍是当前风电行业和固废领域的挑战之一^[9-11]。将退役风电叶片粉碎后再重塑成型的工艺是目前可实现产业化的方式之一,通过将叶片粉碎至一定粒径,再结合热塑性树脂及其他助剂混料后压力成型,可获取不同性能的再生产品,因其可实现全量化处置,在现阶段已逐渐发展为退役风电叶片循环利用的重要技术手段之一^[12-17]。挤出成型工艺是叶片粉料与树脂混合后的主要成型方式之一,可根据应用场景需求定制不同形状模具及相应的加工工艺^[18-19]。然而,挤出成型工艺涉及的工艺参数较多且相互交叉影响,在实际生产中如何合理控制混料温度、挤出机温度及主机转速等参数是保证再生产品性能的关键^[20-22]。

本文以切割粉碎至一定粒径的退役风电叶片为研究对象,以高密度聚乙烯(HDPE)为基体树脂,探索挤出重塑成型中主要工艺参数对再生产品性能的影响;采用 Six-sigma DoE 方法定制设计实验^[23-25],分析得到各参数对性能的影响;最后给定目标值探索最优重塑成型工艺参数,为再生产品定制生产推广奠定工艺基础。

1 实验部分

1.1 实验原料及设备

退役风电叶片为歌美飒的 BD00S0000,材质为玻璃钢,粒径为 250~425 μm 。树脂采用吉林石化生产的 HDPE,型号为 JHMG100S。混料机型号 SHR-50A,生产厂家为江苏飞鸽友联机械股份有限公司。锥形双螺杆挤出机型号 SJZ51/105,生产厂家为江苏飞鸽友联机械股份有限公司。恒温恒湿箱型号 LHS-250CAY,生产厂家为上海齐欣科学仪器有限公司。万能制样机型号 SD-240,生产厂家为上海松顿仪器制造有限公司。微机控制电子万能材料试验机型号 IS768-20KN,生产厂家为上海松顿仪器制造有限公司。

1.2 实验方案

退役风电叶片重塑成型主要的工艺参数包括混料温度、混料转速、給料转速、机筒温度、合流芯温度、模具温度、主机转速、机头压力、冷却水温度、牵引转速等。通过 Six-sigmaDoE 法确定性筛选,选定机筒前区温度、机筒中区温度、机筒后区温度、合流芯温度、模具温度、主机转速 6 个参数作为研究对象。这 6 个参数系统性覆盖了从物料准备到最终成型的关键控制节点。其中,机筒中区温

度和主机转速为最核心的参数,直接决定了熔体质量;模具温度对产品最终定型至关重要;机筒前区温度保证了熔体进入关键区域前的稳定性;合流芯温度对纤维增强效果有显著影响;机筒后区温度是工艺稳定运行的保障。

Six-sigma DoE 定制设计方法模型采用主效应和各参数的二次交互作用模式,设计 28 组实验。根据前期实验成果,各参数的取值范围见表 1。

表 1 工艺参数取值范围
Tab.1 Value ranges of the process parameters

因素	取值范围
机筒前区温度 $Y_1/^{\circ}\text{C}$	172~192
机筒中区温度 $Y_2/^{\circ}\text{C}$	164~184
机筒后区温度 $Y_3/^{\circ}\text{C}$	152~174
合流芯温度 $Y_4/^{\circ}\text{C}$	145~170
模具温度 $Y_5/^{\circ}\text{C}$	147~175
主机转速 $Y_6/(\text{r min}^{-1})$	3.5~5.5

1.3 试样制备

叶片粉料与 HDPE 的质量比越高,具有流变性的热塑性树脂占比越低,试样的融合性较差,相应的成型效果越差。将退役风电叶片经切割、破碎、球磨至 250~425 μm 颗粒,与 HDPE 按 2:1 的质量比混合,加入适量 KH-550 偶联剂、填料及其他助剂,在高速混合机中共混均匀,其后将共混物料输送至螺杆挤出机进料口,按 28 组实验设计工艺参数制备样品。

1.4 性能测试

按《塑料 弯曲性能的测定》(GB/T 9341—2008)测试试样的弯曲强度,试样规格为 80 mm×10 mm×4 mm;按《塑料 压缩性能的测定》(GB/T 1041—2008)测试试样的压缩强度,试样规格为 10 mm×10 mm×4 mm。采用万能制样机将试样切割成相应的规格,以微机控制电子万能材料试验机按照相关标准测试性能。

2 建立数学模型

根据上述工艺条件,进行了 28 次实验,结果如表 2 所示。根据性能实验数据,采用标准最小二乘法获得数学模型为:

$$p_1 = 43.882 + 0.112 2Z_1 - 1.196 4Z_2 - 0.034 2Z_3 - 1.132 3Z_4 - 1.586 Z_5 + 0.255 2Z_6 + Z_1 \times Z_2 \times 1.747 9 - Z_1 \times Z_3 \times 1.948 6 - Z_1 \times Z_4 \times 0.811 7 - Z_1 \times Z_5 \times 0.726 - Z_1 \times Z_6 \times 0.455 7 - Z_2 \times Z_3 \times 0.187 3 - Z_2 \times Z_4 \times 0.697 1 - Z_2 \times Z_5 \times 0.008 1 +$$

$$\begin{aligned} &Z_2 \times Z_6 \times 0.321\ 2 - Z_3 \times Z_4 \times 3.026\ 9 - Z_3 \times Z_5 \times \\ &0.070\ 6 - Z_3 \times Z_6 \times 2.470\ 2 - Z_4 \times Z_5 \times 0.196\ 5 + \\ &Z_4 \times Z_6 \times 0.736\ 5 - Z_5 \times Z_6 \times 0.368\ 3 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &Z_1 \times Z_6 \times 0.566\ 8 + Z_2 \times Z_6 \times 1.631\ 6 + Z_2 \times Z_4 \times \\ &1.811\ 7 + Z_2 \times Z_5 \times 0.462\ 3 - Z_2 \times Z_6 \times 1.708\ 3 + \\ &Z_3 \times Z_4 \times 4.460\ 6 - Z_3 \times Z_5 \times 4.488\ 5 - Z_3 \times Z_6 \times \\ &2.961\ 8 + Z_4 \times Z_5 \times 0.158\ 3 - Z_4 \times Z_6 \times 1.728\ 1 + \\ &Z_5 \times Z_6 \times 0.396\ 5 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} P_2 = &21.163\ 9 + 3.281\ 1 \times Z_1 + 0.318\ 2 \times Z_2 + \\ &1.446\ 2 \times Z_3 - 0.84 \times Z_4 - 6.073\ 9 \times Z_5 - \\ &4.418\ 2 \times Z_6 + Z_1 \times Z_2 \times 2.037\ 5 - Z_1 \times Z_3 \times \\ &1.014\ 2 + Z_1 \times Z_4 \times 2.755\ 6 + Z_1 \times Z_5 \times 0.128\ 0 + \end{aligned}$$

式中： $Z_1=(Y_1-182)/10$ ； $Z_2=(Y_2-174)/10$ ； $Z_3=(Y_3-163)/11$ ； $Z_4=(Y_4-157.5)/12.5$ ； $Z_5=(Y_5-161)/14$ ； $Z_6=Y_6-4.5$ 。

表 2 不同工艺参数实验结果
Tab.2 Experimental results of different process parameters

序号	机筒前区温度 Y ₁ /℃	机筒中区温度 Y ₂ /℃	机筒后区温度 Y ₃ /℃	合流芯温度 Y ₄ /℃	模具温度 Y ₅ /℃	主机转速 Y ₆ /(r min ⁻¹)	弯曲强度/MPa	压缩强度/MPa
1	192	164	162	145	175	5.5	41.3	16.7
2	184	184	174	170	175	5.5	33.4	9.1
3	190	184	174	145	147	5.5	46.8	22.3
4	188	170	168	164	175	3.5	38.1	20.9
5	192	184	174	145	175	3.5	49.2	17.0
6	192	184	152	170	147	5.5	53.7	19.1
7	173	173	152	167	175	5.5	46.9	12.8
8	192	164	152	170	147	3.5	46.9	22.3
9	172	164	152	145	175	5.5	42.2	19.7
10	174	171	169	145	175	4.5	45.8	13.9
11	192	164	152	170	175	5.5	46.6	15.4
12	172	167	165	159	147	5.5	47.7	19.6
13	192	170	168	145	147	3.5	49.6	24.2
14	172	169	167	170	175	3.5	44.3	14.6
15	178	178	154	145	147	5.5	45.1	24.3
16	192	184	152	145	147	3.5	46.3	28.8
17	192	175	173	152	175	5.5	40.4	7.8
18	172	164	152	148	147	3.5	40.0	29.9
19	192	164	152	145	147	5.5	46.8	32.6
20	192	184	152	170	175	3.5	42.0	28.5
21	192	184	152	145	175	5.5	45.2	23.8
22	192	164	152	145	175	3.5	40.7	23.6
23	192	175	173	169	147	5.5	39.0	34.0
24	180	180	152	166	147	3.5	39.9	17.8
25	182	182	172	162	147	3.5	44.9	45.4
26	179	179	152	150	175	3.5	38.5	17.6
27	184	174	161	157	161	4.5	43.4	16.8
28	184	174	161	157	161	4.5	46.1	15.6

由数学模型可以看出，弯曲强度影响因素强弱顺序为机筒中区温度、合流芯温度及模具温度。压缩强度影响因素强弱顺序为机筒前区温度、模具温度及主机转速。

图 1 为弯曲强度和压缩强度模拟值、实验值。

由图 1 可见：弯曲强度和压缩强度的决定系数 R^2 分别为 0.98 和 0.96，说明模型拟合度极佳，模拟结果准确可靠；弯曲强度和压缩强度 P 值分别为 0.001 6 和 0.013 1，均小于 0.05，证实影响因素与结果存在显著关联。

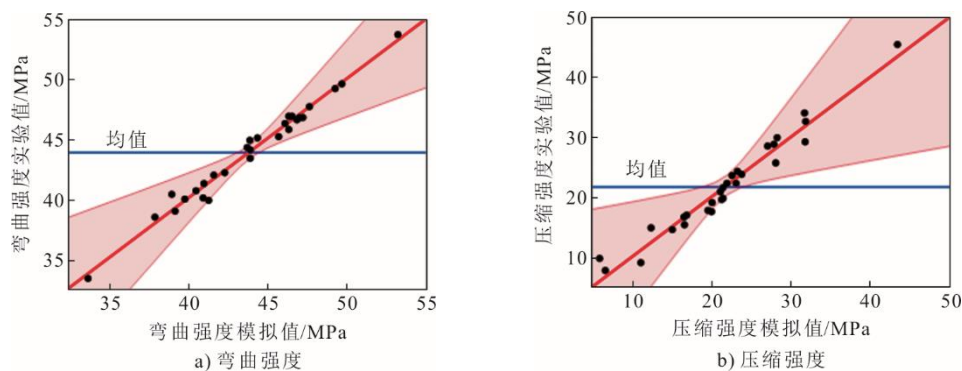


图1 弯曲强度和压缩强度模拟值-实验值

Fig.1 The simulated-experimental values of flexural strength and compressive strength

3 实验及模拟结果分析

3.1 影响因素分析

3.1.1 挤出工艺前端温度较低

挤出工艺前端温度包括机筒前区温度、机筒中区温度、机筒后区温度，这3个变量均取固定较低

值，采用 JMP 软件分析其余工艺参数对性能的影响，结果如图2和图3所示。由图2和图3可知：弯曲强度随合流芯温度 Y_4 和主机转速 Y_6 的提升而提升，随模具温度 Y_5 的提升而降低；压缩强度随 Y_4 、 Y_5 和 Y_6 的提升而降低。

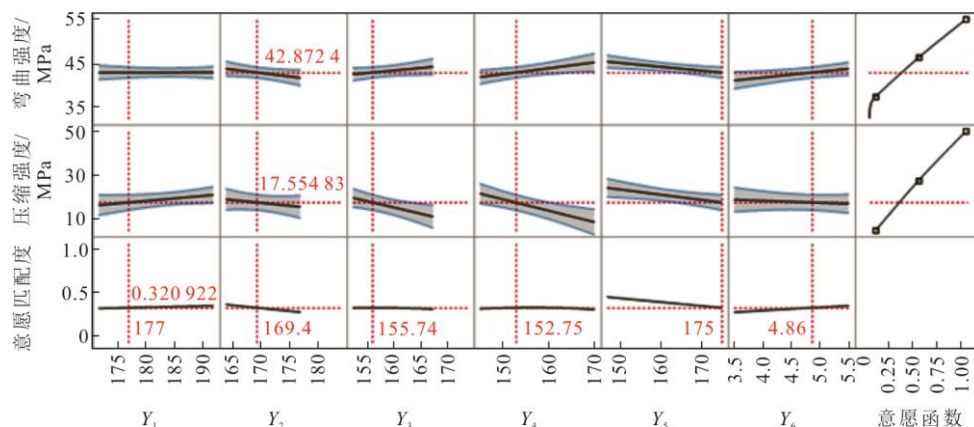
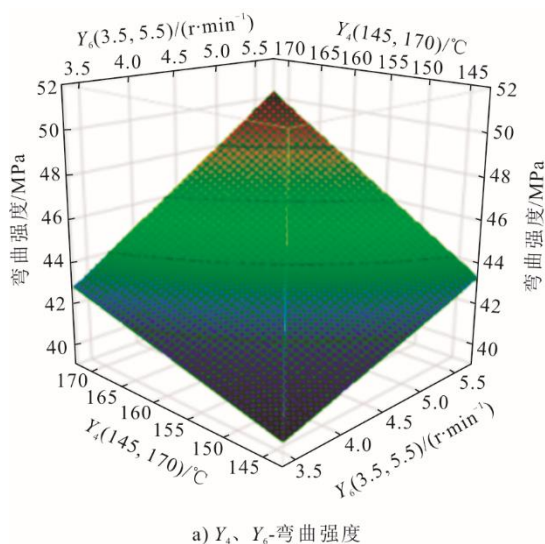
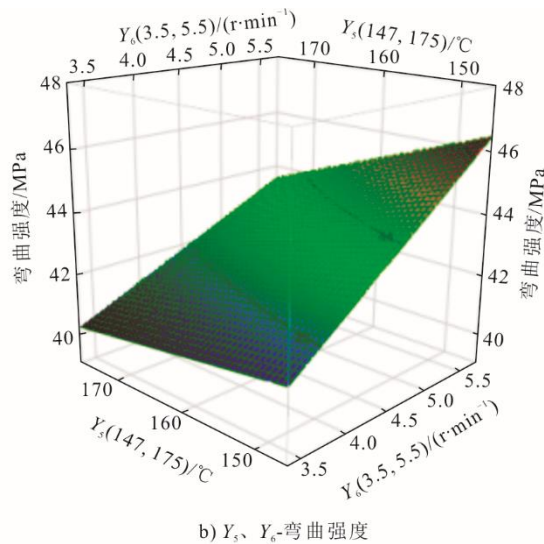


图2 前端低温性能模拟结果

Fig.2 Simulation results of the front-end low-temperature performance

a) Y_4 、 Y_6 弯曲强度b) Y_5 、 Y_6 弯曲强度

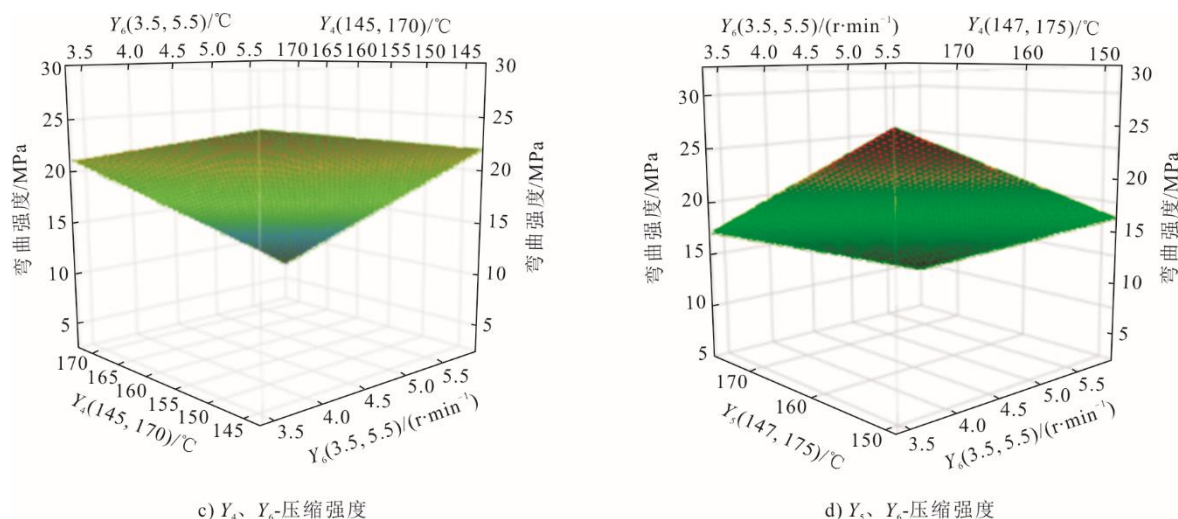


图 3 前端低温弯曲强度、压缩强度变化曲面

Fig.3 Change surface of the front-end low-temperature flexural strength and compressive strength

挤出机前端温度低时，物料前端塑化不足，提高合流芯温度和主机转速可以显著改善塑料基体的塑化程度，降低熔体黏度，从而极大地促进塑料对叶片粉料的浸润，强化界面结合，改善叶片粉料分散度。良好的界面结合是弯曲强度提升的主要驱动力，增加的剪切热和剪切作用增强了塑化和混合，提升了取向度，因此提高合流芯温度和主机转速主要解决了塑化不足和界面结合差这个主要矛盾，从而提升了弯曲强度。但提高主机转速会导致产品密度降低，因此压缩强度随着主机转速的提升出现轻微的下降趋势。而在挤出机前端温度低的特定条件下，低温熔体本不致密，合流芯温度升高虽能改善流动性，但会削弱分子间作用力，形成微孔洞，导致压缩强度降低。

挤出机前端温度较低时，提高模具温度会导致挤出物冷却速率过慢，使得在模腔内形成的特别是

沿挤出方向的分子链和纤维取向结构发生松弛（解取向），从而削弱了弯曲强度。同时，冷却速率过慢可能导致更明显的后收缩，降低材料致密性和压缩强度。

弯曲强度对界面结合和取向结构非常敏感，低温熔体需适度升温以改善流动性以利取向；而压缩强度对材料的密度更为敏感，低温熔体基础致密性差，升温会进一步弱化分子间作用力。

3.1.2 挤出工艺前端温度较高

挤出机前端温度高时，物料前端塑化充分，熔体黏度较低。将机筒前区温度、机筒中区温度、机筒后区温度取固定较高值，分析其余工艺参数对性能的影响，结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知：弯曲强度随合流芯温度 Y_4 、模具温度 Y_5 和主机转速 Y_6 的升高而降低；压缩强度随 Y_5 和 Y_6 的升高而降低，随 Y_4 的升高而增大。

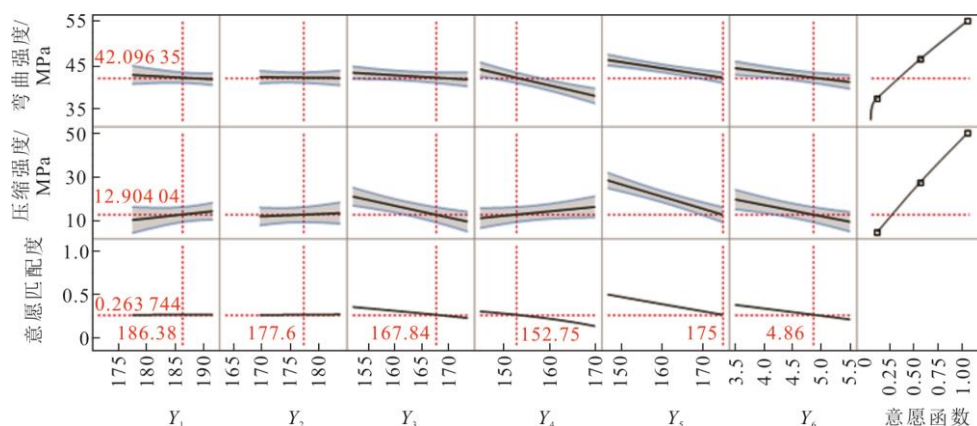


图 4 前端高温性能模拟结果

Fig.4 Simulation results of the front-end high-temperature performance

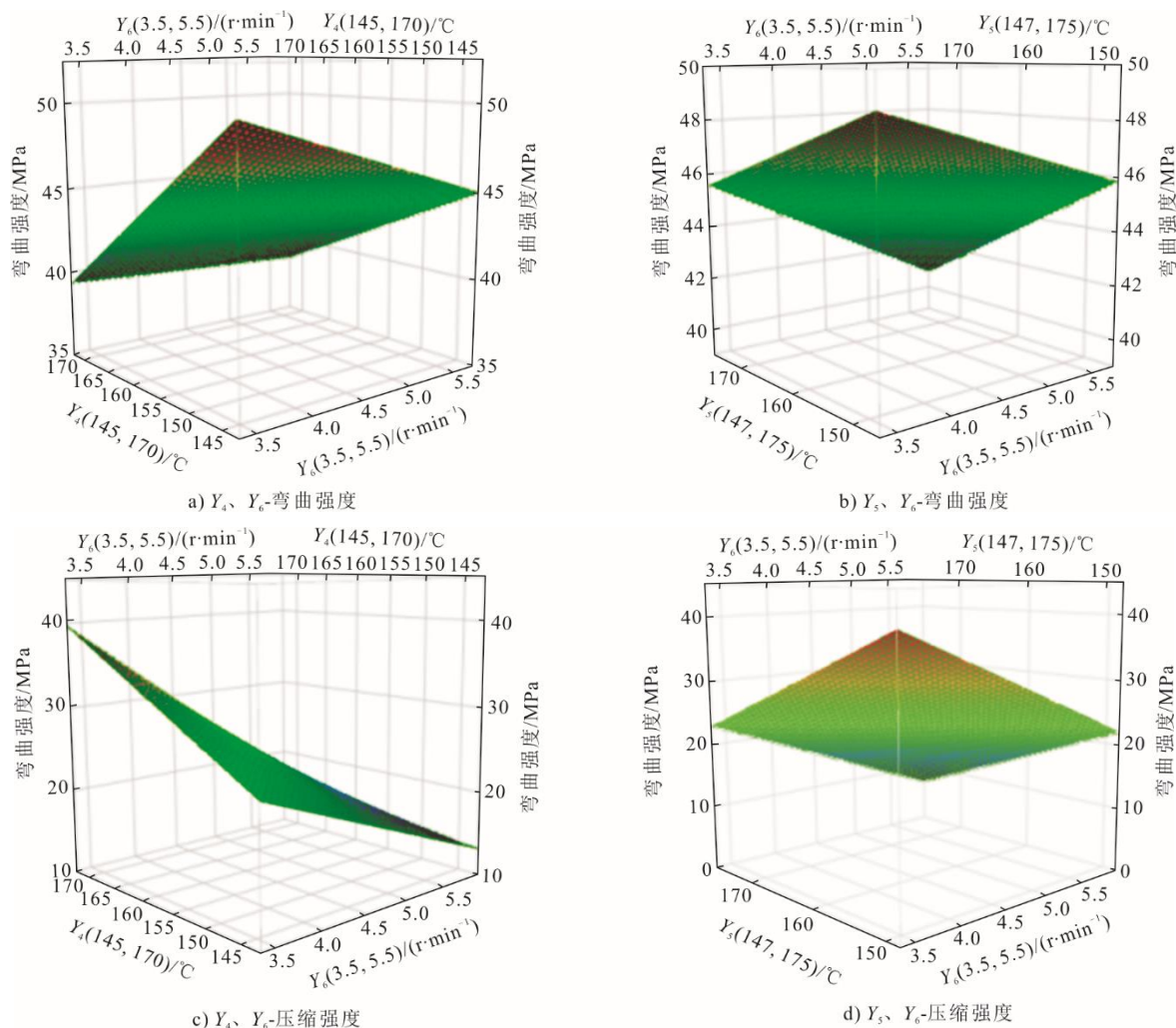


图5 前端高温弯曲强度、压缩强度变化曲面

Fig.5 Change surface of the front-end high-temperature flexural strength and compressive strength

合流芯温度 Y_4 提升后加剧分子链热运动,使挤出过程中形成的分子链取向结构(增强刚性的关键)快速松弛解离,削弱材料刚性,进而降低弯曲强度。合流芯温度提升后熔体流动性增强,促进分子链渗透和缠结,可起到以下3个作用:1)消除内应力,松弛螺杆剪切积累的残余应力,减少内部缺陷;2)改善分散均匀性,使填料/助剂分布更均一,减少应力集中点;3)优化结晶前体,均一的熔体结构有利于后续形成更细密的晶体网络。因此,合流芯温度的适当提升有助于提高压缩强度。

模具温度 Y_5 提升能减缓熔体冷却速度,延长分子链在高温下的松弛时间,进一步破坏取向结构,降低弯曲强度。同时,缓慢冷却使得半结晶聚合物(PE)形成大尺寸球晶,而大球晶界面结合力弱,易成为应力集中点,弯曲时引发裂纹扩展,受压时晶界易滑移或开裂,导致弯曲强度和压缩强度同时降低;另外,缓慢冷却可能导致更明显的后收缩,

降低材料致密性和压缩强度。尽管模具温度高有负面影响,但均质熔体的基础作用更强,挤出机前端高温背景下,合流芯的均质化效果超过了模具冷却速率过慢的负面影响,因此一定范围内合流芯温度的提升有助于提高压缩强度。

挤出机前端温度高时,主机转速 Y_6 增大后物料停留时间缩短,分子链来不及形成稳定取向,高剪切速率产生更多热量同时叠加前端高温,加剧解取向,降低弯曲强度。而且高温下快速挤出,停留时间短,高速剪切引发局部过热降解,熔体塑化不均产生弱界面,形成疏松结构,会降低压缩强度。

压缩强度受益于缺陷修复,高温下适度升温可促进分子链重排,填充微孔洞提升致密性;而弯曲强度受制于解取向,高温熔体无法维持取向结构而降低刚性。

3.2 参数优化

根据弯曲强度和压缩强度的分布区间,在实际

应用中弯曲强度大于 35 MPa 时再生产品抵抗弯曲变形和断裂的性能优异, 故弯曲强度选取 33~50 MPa, 选定目标值 44 MPa; 压缩强度大于 20 MPa

时再生产品性能优异, 压缩强度选取 20~40 MPa, 选定目标值 31 MPa。弯曲强度和压缩强度的意愿权重为 1:1, 最大化意愿获取工艺参数结果如图 6 所示。

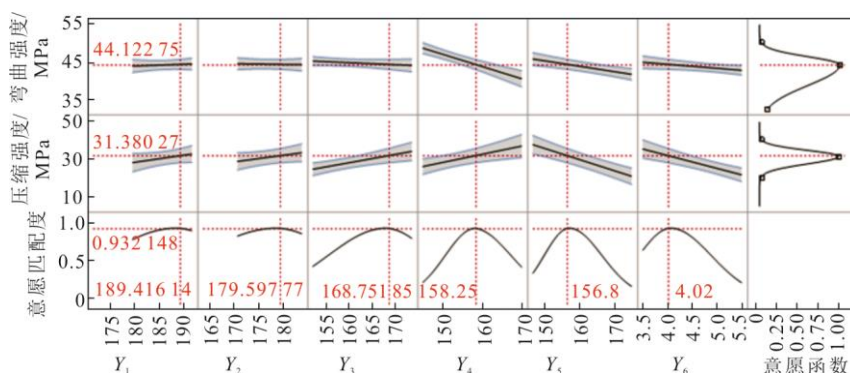


图 6 最大化意愿模拟结果

Fig.6 Simulation results of maximum willingness

根据弯曲强度和压缩强度的目标值 44、31 MPa, 匹配目标值并最大化意愿参数, 获得最优的工艺参数和相应模拟值, 并在此工艺参数条件下制备样品开展挤出成型实验得到实际弯曲强度和压缩强度测试值, 详见表 3。由表 3 可见: 弯曲强度和压缩强度实际值均接近目标值, 再生产品的弯曲强度为 43.15 MPa, 压缩强度为 30.73 MPa; 最优工艺参数为机筒前区温度 189 °C, 机筒中区温度 179 °C, 机筒后区温度 168 °C, 合流芯温度 158 °C, 模具温度 156 °C, 主机转速 4.0 r/min。

表 3 最优工艺参数

Tab.3 The optimal process parameters

项目	取值	项目	取值
$Y_1/^{\circ}\text{C}$	189	弯曲强度模拟值/MPa	44.12
$Y_2/^{\circ}\text{C}$	179	弯曲强度实验值/MPa	43.15
$Y_3/^{\circ}\text{C}$	168	压缩强度模拟值/MPa	31.38
$Y_4/^{\circ}\text{C}$	158	压缩强度实验值/MPa	30.73
$Y_5/^{\circ}\text{C}$	156		
$Y_6/(\text{r min}^{-1})$	4.0		

4 结 论

为优化退役风电叶片粉料与高密度聚乙烯混合重塑成型制备再生产品工艺参数, 采用 Six-sigma DoE 法定制设计实验, 制备不同工艺参数的再生产品, 分析了机筒前区温度、机筒中区温度、机筒后区温度、合流芯温度、模具温度、主机转速 6 个因素对再生产品性能的影响, 得出以下结论。

1) 弯曲强度影响强弱顺序为机筒中区温度、合流芯温度及模具温度。压缩强度影响强弱顺序为机筒前区温度、模具温度及主机转速。弯曲强度依赖分子链取向, 需在熔体刚性状态下通过剪切加快速冷却锁定结构。压缩强度依赖材料致密性, 需平衡熔体流动

性(消除缺陷)与结晶控制(抑制大球晶)。前端温度是调控基点, 决定其他参数的作用方向与敏感性。

2) 为提高弯曲强度, 在前端低温工况下需提高合流芯温度可改善流动性以利取向, 提升主机转速可增强剪切取向, 降低模具温度可快速冷却锁定取向结构; 在前端高温工况下需降低合流芯温度可抑制过度松弛, 降低主机转速可减少剪切热与降解, 降低模具温度可快速冷却防止解取向。

3) 为提高压缩强度, 在前端低温工况下需降低合流芯温度可避免过度塑化而降低致密性, 降低模具温度可抑制大球晶, 降低主机转速可确保熔体均匀性; 在前端高温工况下提高合流芯温度可促进熔体均质化, 修复缺陷, 降低模具温度可限制大球晶生长, 降低主机转速可减少降解风险。

4) 采用挤出工艺法制备退役风电叶片再生产品, 选定弯曲强度 44 MPa 和压缩强度 31 MPa 作为目标值, 获取的最优工艺参数为: 机筒前区温度 189 °C, 机筒中区温度 179 °C, 机筒后区温度 168 °C, 合流芯温度 158 °C, 模具温度 156 °C, 主机转速 4.0 r/min。在此工艺条件下, 再生产品的弯曲强度为 43.15 MPa, 压缩强度为 30.73 MPa。

[参 考 文 献]

- [1] 许淳瑶, 葛立超, 冯红翠, 等. 风力发电现状及叶片组成与回收利用综述[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 29-41. XU Chunyao, GE Lichao, FENG Hongcui, et al. Review on status of wind power generation and composition and recycling of wind turbine blades[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 29-41.
- [2] 许冬梅, 张兴林, 荆涛. 废旧热固性复合材料绿色回收利用关键技术研究: 以风电行业废弃风叶片为例[J]. 环境保护, 2019, 47(20): 54-56. XU Dongmei, ZHANG Xinglin, JING Tao. Research on key technologies of recycling and utilization of waste

- thermosetting composites such as waste wind blades in China's wind power industry[J]. Environmental Protection, 2019, 47(20): 54-56.
- [3] ALBERS H. Recycling of wind turbine rotor blades-fact or fiction[J]. DEWI Magazine, 2009, 34: 32-41.
- [4] MISHNAEVSKY L, BRANNER K. Materials for wind turbine blades: an overview[J]. Materials, 2017, 10: 1-24.
- [5] SANJAY M R, MADHU P, JAWAID M. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: a comprehensive review[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1-10.
- [6] 陈吉朋, 王计安, 张雨秋, 等. 废弃风电叶片材料回收与再制造技术的研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 328-335.
CHEN Jipeng, WANG Ji'an, ZHANG Yuqiu, et al. Progress on recycling methods and remanufacturing technology of waste wind turbine blades[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(5): 328-335.
- [7] 马文静, 张宇彤, 杨春振, 等. 大宗风电退役风电叶片资源化回收利用技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(10): 17-26.
MA Wenjing, ZHANG Yutong, YANG Chunzhen, et al. Research progress on resource recycling technology of retired wind turbine blades in bulk wind power plants[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(10): 17-26.
- [8] BRØNDSTED P, LILHOLT H, LYSTRUP A. Composite materials for wind power turbine blades[J]. Annual Review of Materials Research, 2005, 35(1): 505-538.
- [9] 张建川, 张前峰, 蔡红军. 风力发电复合材料叶片废弃物的几种处理方法分析[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(3): 473-482.
ZHANG Jianchuan, ZHANG Qianfen, CAI Hongjun. Analysis of several treatment methods of composite blade waste for wind power[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2012, 30(3): 473-482.
- [10] 陈天啸. 风力发电叶片回收技术及发展展望[J]. 玻璃纤维, 2022(6): 30-36.
CHEN Tianxiao. Recycling technology and development prospect of wind turbine blades[J]. Fiber Glass, 2022(6): 30-36.
- [11] 安宝山, 王慧军, 孙利. 未来退役风电叶片的回收和利用[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(6): 98-101.
AN Baoshan, WANG Huijun, SUN Li. Future recovery and utilization of retired wind turbine blades[J]. Application of Engineering Plastics, 2011, 39(6): 98-101.
- [12] KOUPARITSAS C E, KARTALIS C N, VARELIDIS P C, et al. Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites[J]. Polymer Composite, 2002, 23: 682-689.
- [13] BEAUSON J, MADSEN B, TONCELLI C. Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2016, 90: 390-399.
- [14] 戴春晖, 刘钧, 曾竟成, 等. 复合材料风电叶片的发展现状及若干问题的对策[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(3): 53-56.
DAI Chunhui, LIU Jun, ZENG Jingcheng, et al. Current development of composite wind turbine blades and proposals to several problems[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(3): 53-56.
- [15] 李成良, 王继辉, 薛忠民. 大型风电叶片材料的应用和发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(4): 49-52.
LI Chengliang, WANG Jihui, XUE Zhongmin. Application and development of materials of large-scale wind turbine blades[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(4): 49-52.
- [16] 罗立善, 杨艳蓬, 唐志才, 等. 挤出工艺对 PA6/PA66 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(9): 70-74.
LUO Lishan, YANG Yanpeng, TANG Zhicai, et al. Influences of extrusion process on properties of PA6/PA66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(9): 70-74.
- [17] 王子健, 周晓东. 连续纤维增强热塑性复合材料成型工艺研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2021(10): 120-128.
WANG Zijian, ZHOU Xiaodong. Research progress on forming process of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Science and Engineering, 2021(10): 120-128.
- [18] 陈灿成, 林卓辉. 生产工艺对 PE 基木塑复合材料性能的影响[J]. 广东化工, 2015, 42(3): 44-45.
CHEN Cancheng, LIN Zhuohui. The effects of manufacturing processes on properties of wood-plastic composite[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(3): 44-45.
- [19] 常燕, 王兆增, 崔元胜, 等. 风电叶片复合材料的研究进展及其应用[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(4): 135-139.
CHANG Yan, WANG Zhaozeng, CUI Yuansheng, et al. Research progress and application of wind turbine blades composites[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(4): 135-139.
- [20] 周润培, 李晗. 复合材料的力学性能[J]. 玻璃钢, 2013(3): 14-21.
ZHOU Runpei, LI Han. The mechanical properties of composite materials[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2013(3): 14-21.
- [21] 邵禹通, 沈晓洁, 卢军. 挤出工艺对玻纤增强 ABS 材料性能的影响[J]. 现代塑料加工应用, 2022, 34(1): 24-27.
SHAO Yutong, SHEN Xiaojie, LU Jun. Effect of extrusion process on properties of glass fiber reinforced ABS material[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2022, 34(1): 24-27.
- [22] 潘燕子, 邓如生, 陈如意, 等. 增强增韧 PA6 复合材料共混工艺与结构性能的研究[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(10): 23-24.
PAN Yanzi, DENG Rusheng, CHEN Ruyi, et al. Study on blending technology and structural property of reinforcing and toughening nylon 6[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10): 23-24.
- [23] 陆艳, 肖小娥. 六西格玛方法在 PBT 塑料材料优化中的应用[J]. 上海塑料, 2024, 52(3): 55-63.
LU Yan, XIAO Xiaoe. Application of Six-sigma method in PBT plastic optimization[J]. Shanghai Plastics, 2024, 52(3): 55-63.
- [24] 冯小军, 张敏, 王震. 六西格玛方法在降低宽厚板质量成本中的应用[J]. 山西冶金, 2023, 46(7): 158-160.
FENG Xiaojun, ZHANG Min, WANG Zhen. Application of six-Sigma method in reducing the quality cost of wide and thick plates[J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(7): 158-160.
- [25] 鲍立, 郑德兵, 余欢庆. 基于六西格玛设计的前纵梁边缘开裂冲压工艺优化[J]. 车辆与动力技术, 2022(1): 6-13.
BAO Li, ZHENG Debing, YU Huanqing. Research on stamping process optimization of edge cracking of front rail based on DFSS[J]. Vehicle & Power Technology, 2022(1): 6-13.

(责任编辑 杨嘉蕾)