

# 泡沫芯材开槽打孔方式对风电叶片轻量化的影响

杨蕾<sup>1</sup>, 李天凯<sup>2</sup>, 谭伯杨<sup>1</sup>, 赵虎<sup>1</sup>

(明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** 风电叶片的大型化对叶片质量及成本提出更高的要求, 在保证叶片质量的同时降低叶片重量, 成为近年来叶片行业降本增效的重要方向。对腹板平板及壳体轮廓板泡沫芯材采用不同的开槽打孔方式, 并对其灌注固化后吸胶量、密度及剪切性能进行计算测试。研究发现, 增大十字开槽、打孔的间距及采用一字开槽、打孔方式可有效降低芯材吸胶量及密度, G13 方向芯材剪切性能均满足要求, G23 方向一字槽轮廓板剪切性能较弱; 腹板平板主要受到点阵增强柱的影响, 40 mm×40 mm 双面十字浅槽及打孔试样吸胶后密度最低, 减重最多, 壳体轮廓板受到点阵增强及板格结构的交互作用, 40 mm×40 mm 十字深槽间距、20 mm×20 mm 孔间距试样剪切性能符合要求, 减重效果较好。

**关键词:** 风电叶片; 泡沫芯材; 开槽打孔; 剪切性能; 轻量化

**中图分类号:** TQ330.8

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2024)03-0044-06

**DOI:** 10.13520/j.cnki.rpte.2024.03.010

随着风电叶片向着 10 MW 级以上发展, 叶片的重量更大, 所受载荷更多, 其不仅对气动、结构提出更高的刚度及强度等要求, 而且对材料、工艺的技术要求愈发严格; 叶片的发电量与叶片长度的平方成正比, 而其长度与叶片重量成 3 次方关系, 因此提高发电量的同时, 设法降低叶片重量及成本, 成为设计、材料、工艺均需考虑的重要议题<sup>[1-2]</sup>。

目前, 行业内对叶片轻量化的研究主要集中在材料迭代、新材料的引入及设计优化方面, 如碳纤维由于密度小、强度大、模量高, 在叶片中使用可充分发挥其高强轻质的优点, 应用于叶片主梁、前缘梁及尾缘梁等处, 可减轻叶片重量, 提高叶片刚度及抗疲劳性能<sup>[3-5]</sup>。有研究表明, 碳纳米管的引入对叶片聚合物的增强效应更加明显, 其质量更轻, 强度、韧性及耐久性比传统材料制备的叶片高很多<sup>[6-7]</sup>; 王子文等基于弯扭耦合叶片相比于非弯扭耦合叶片外部载荷、内应力更小的特点, 通过减少铺层厚度使叶片轻量化, 并经过强度及模态校核发现, 叶片安全可靠<sup>[8]</sup>; 朱杰等基于拓扑与尺寸优化设计相结合的方法, 调整梁帽、腹板等结构的位置及结构尺寸, 将叶片质量减轻了 12.4%, 减重效果较好<sup>[9]</sup>。

影响叶片重量的因素很多, 随着百米级叶片的发展, 当前材料的迭代与设计的优化已接近瓶颈, 如目

前广泛使用的 E- 玻璃纤维逐渐不能满足高强度、高模量的要求, S- 玻璃纤维及碳纤维价格高昂, 使用范围有限, 无法大面积推广<sup>[10]</sup>; 另一方面, 随着叶片大型化, 对生产过程中工艺及材料的把控、优化变得至关重要, 大叶片玻纤、芯材、粘接胶、树脂等用量大幅增加, 生产过程中很容易引入余量, 导致叶片重量增加, 现有研究较少涉及工艺材料方式变化对叶片轻量化的影响, 这对大叶片的减重非常不利<sup>[11-15]</sup>。

本文着眼于腹板及壳体泡沫芯材的开槽打孔方式, 设计不同的槽孔尺寸, 聚焦灌注后芯材吸胶量及密度的变化, 并对相关剪切性能进行检测, 分析不同的槽孔方式对剪切性能的影响, 找出最优的开槽打孔方式, 减少叶片树脂用量, 降低叶片重量, 以期实现大叶片降本增效的目的, 增强大叶片的可持续性发展。

## 1 试验部分

### 1.1 材料及设备

(1) 主材: 恒石 ±45° 双轴玻纤布, 惠柏环氧树脂, 维赛 PVC 泡沫芯材, 试样尺寸均为 500 mm×600 mm×25 mm, 具体槽孔设计如表 1 所示: 其中 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>

作者简介: 杨蕾 (1992-), 男, 工程师, 硕士, 主要工作方向为风电叶片新工艺及材料的开发应用。

收稿日期: 2023-10-09

试样为叶片腹板所用平板泡沫,采用浅开槽及贯穿性打孔方式,孔径、槽宽及槽深均为2 mm,4<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>试样为叶片壳体所用轮廓板泡沫,采用深开槽及贯穿性打孔的方式,孔径2 mm,槽宽0.8~1.2 mm,留厚为1~2 mm,具体槽间距及开槽打孔方式如下表1及图1所示。

表1 芯材的孔槽间距及加工方式

试样	槽间距/mm	开槽方式	孔间距/mm	打孔方式
1 <sup>#</sup>	30	双面十字浅槽	30	贯穿孔
2 <sup>#</sup>	20	双面一字浅槽	20	贯穿孔
3 <sup>#</sup>	40	双面十字浅槽	40	贯穿孔
4 <sup>#</sup>	30	十字深槽	30	贯穿孔
5 <sup>#</sup>	30	一字深槽	30	贯穿孔
6 <sup>#</sup>	40	十字深槽	20	贯穿孔

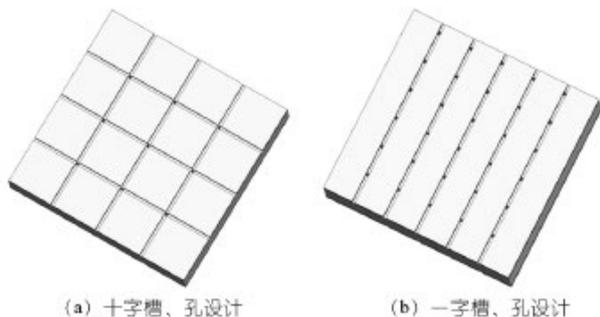


图1 芯材槽孔设计

(2) 辅材:尼龙脱模布、易撕导流网、注胶管、真空袋膜、密封胶条等。

(3) 设备:明阳水加热腹板模具成型平台,真空抽气泵,万能试验机(CMT5105,100kN)、HS系列恒定湿热试验箱,千分表等。

### 1.2 试验方法

(1) 试验按照真空辅助成型工艺(VARI)技术执行,模具预热40℃,铺设玻纤布、有孔隔离膜及芯材,密封真空袋膜,真空保压合格后进行灌注,灌注完成,待放热峰过后升温至70℃,保温6h以完成固化,自然冷却至室温状态,脱模后修边,完成试样块的制作,试验平台如图2所示;

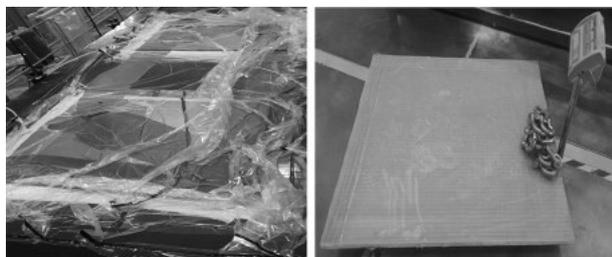


图2 VARI 试验及称重

(2) 吸胶量计算:  $m_1$  为称重试验前芯材重量,单

位 kg, 分别为  $L$ 、 $W$ 、 $H$  测量芯材灌注前的尺寸长度、宽度、厚度,单位 mm;  $m_2$ 、 $m_3$  分别为灌注后测量玻璃钢层合板的重量及芯材、树脂、玻纤重量;  $R$  为计算芯材吸胶量:

$$R = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{L \times W \times H}$$

(3) 剪切样品按照标准规定的尺寸进行激光线切割,长250mm×宽50mm×厚25mm,本文选择G13叶片轴向及G23叶片弦向的取样检测方向,如图3所示,其中1方向为叶片长度方向,2方向为叶片弦长方向,3方向为叶片厚度方向;

(4) 剪切测试:①在23±2℃,50±10%的温湿度环境下调节试样16h以上;②利用激光切割的方式切割样品,切好后进行表面打磨清洁处理,并与夹具粘接固定;③安装千分表至夹具上,开始试验,试验速度为1mm/min,当试样的剪切强度下降至最大剪切强度的90%时停止试验,测试按照ISO 1992标准执行。

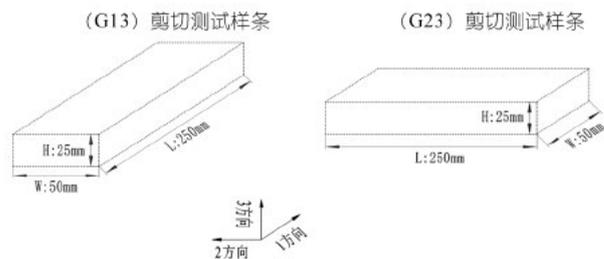


图3 剪切测试取样方向

## 2 结果与讨论

### 2.1 芯材吸胶量及对减重的影响

对试验前后PVC泡沫芯材,树脂用量进行称重,计算单位体积树脂含量,统计各试样吸胶量及密度变化如图4(a)所示;可知芯材的开槽打孔方式对吸胶量的影响很大,1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>腹板平板泡沫中,1<sup>#</sup>(30×30mm槽、孔间距,双面十字浅槽)泡沫芯材吸胶量最多,芯材吸胶后密度最高,2<sup>#</sup>(20mm×20mm槽、孔间距,双面一字浅槽)泡沫芯材次之,3<sup>#</sup>(40mm×40mm槽、孔间距,双面十字浅槽)泡沫芯材吸胶量最少,吸胶后密度为118kg/m<sup>3</sup>;壳体轮廓板4<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>深开槽试样中,4<sup>#</sup>(30mm×30mm槽、孔间距,十字深槽)泡沫芯材吸胶量最多,吸胶后芯材密度最大,5<sup>#</sup>(30mm×30mm一字深槽及孔间距)吸胶量最少,6<sup>#</sup>(40mm×40mm十字深槽间距、20mm×20mm孔间距)试样吸胶量及吸胶后密度介于4<sup>#</sup>及5<sup>#</sup>之间。

根据不同槽孔方式下泡沫芯材吸胶后密度的变化,以明阳某百米级叶片为例,计算不同开槽打孔方式下,泡沫芯材在腹板及壳体中的减重量如图4(b)所示,可知3#试样在腹板中的减重最明显,可达186 kg,1#及2#试样减重效果同样可观;壳体泡沫中,减

重量由大到小依次为5#、6#及4#试样,5#试样减重量高达460 kg,6#试样减重185 kg;由上可知,在现有开槽打孔的基础上,增大孔槽间距或改为一字开槽的方式,可有效降低泡沫芯材树脂含量及灌注后密度,减轻叶片重量。

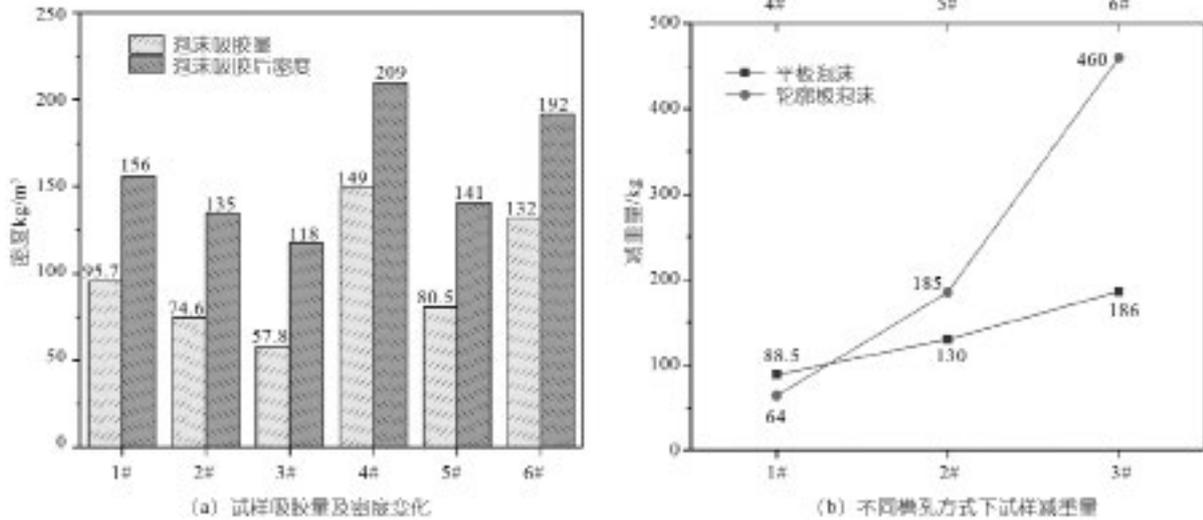


图4 不同槽孔方式下芯材吸胶量及减重量的变化

## 2.2 不同槽孔方式下芯材的剪切性能

对不同槽孔方式下的泡沫芯材做剪切测试,如表2、表3所示,可知泡沫芯材的剪切强度、模量及应变随开槽打孔方式的不同而变化。在腹板平板泡沫试样中,2#(20 mm×20 mm 双面开一字浅槽、打孔)试样剪切强度及模量最高,这主要与2#试样打孔密度更高有关;孔中树脂加热固化后,分子间交联形成网状结构,刚度大、硬度高,类似一个个柱状增强体,对芯材起到点阵增强的作用<sup>[16-17]</sup>,如图5(a)所示,因此,孔密度的增大提高了相关剪切性能;1#(30 mm×30 mm 双面开十字浅槽、打孔)及3#(40 mm×40 mm 双面开十字浅槽、打孔)试样的剪切强度及模量相对较低,两者相差不多,但均大于设计指标;另外,可发现剪切应变的表现相反,2#试样的剪切应变最小。

表2 平板泡沫 G13 方向剪切性能对比

项目	1#	2#	3#	设计指标
剪切强度 /MPa	0.84	0.98	0.83	0.8
剪切模量 /MPa	26.93	32.73	27.28	25
剪切应变 /%	17.97	13.94	16.6	4

壳体轮廓板试样中,4#(30 mm×30 mm 开十字深槽、打孔)试样的剪切模量最高,大于5#(30 mm×30 mm 开一字深槽、打孔)及6#(40 mm×40 mm 开十字深槽、20 mm×20 mm 十字打孔)试样,但

剪切强度表现相反,6#试样的剪切强度最大,4#最小,这种剪切模量与强度的差异主要与芯材打孔及深开槽的交互作用有关;轮廓板试样不仅受孔中树脂的点阵增强作用,而且受深开槽带来的影响,十字深开槽固化树脂在芯材中形成了格栅结构,类似于加强筋板的作用<sup>[18]</sup>,对芯材的剪切性能起到增强的作用,如图5(b)所示,因此板格密度更高的4#试样剪切模量更高;而对于剪切强度的变化,主要是孔中增强柱的影响所致,6#试样增强柱更密,因此其剪切强度更大,应变更小,但均大于设计要求。

表3 轮廓板泡沫 G13 方向剪切性能对比

项目	4#	5#	6#	设计指标
剪切强度 /MPa	1.35	1.38	1.42	1.03
剪切模量 /MPa	102.2	94.59	90.49	46
剪切应变 /%	8.66	7.23	6.89	4

对2#及5#一字开槽试样 G23 方向进行取样,并对该方向的剪切性能进行测试,如表4所示,可知对于2#平板试样,20 mm×20 mm 双面开一字浅槽、打孔的方式对其 G23 方向的剪切性能影响不大,剪切性能均满足设计要求,且与 G13 方向剪切性能相近;但对于30 mm×30 mm 开一字深槽、打孔的5#轮廓板试样,其剪切强度及模量相比 G13 方向下降厉害,且小于设计指标,这说明深开槽形成的板格结构对轮廓板

的影响很大,相比于开十字深槽,开一字深槽的方式对轮廓板的增强作用较弱,5<sup>#</sup>试样的槽孔方式不能作为减重的选项。

表4 一字开槽平板及轮廓板 G23 方向剪切性能

项目	2 <sup>#</sup>	平板设计指标	5 <sup>#</sup>	轮廓板设计指标
剪切强度 /Mpa	0.97	0.85	0.86	1.17
剪切模量 /Mpa	33.32	25	28.92	46
剪切应变 /%	16.82	4	11.94	4

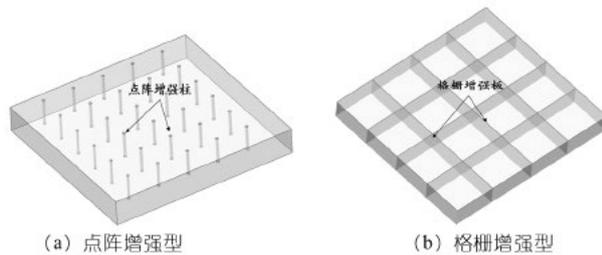


图5 芯材中不同的增强方式

### 3 结论

本文研究了风电叶片中腹板平板及壳体轮廓板用 PVC 泡沫,不同开槽打孔方式下芯材吸胶量及密度的变化,并对其至关重要的剪切性能进行测试,以找出最优减重的槽孔方式,对大叶片轻量化有一定的借鉴指导意义,具体研究结果如下:

(1) 芯材的槽、孔间距变化会引起其树脂用量及密度的变化,造成叶片重量的变化,腹板平板为浅开槽、贯穿孔的方式,主要受到孔间树脂固化后点阵增强的作用,对叶片减重效果最大为 40 mm×40 mm 双面开十字浅槽、打孔(3<sup>#</sup>)的方式,且其剪切性能符合相关设计要求;

(2) 壳体轮廓板为深开槽、贯穿孔的方式,受到深槽及贯穿孔树脂固化后格栅增强及点阵增强的双重影响,减重量最大为 30 mm×30 mm 开一字深槽、打孔(5<sup>#</sup>)的方式,但其 G23 方向剪切性能低于设计值,40 mm×40 mm 开十字深槽、20 mm×20 mm 打孔(6<sup>#</sup>)的方式减重量明显,剪切性能良好,可作为叶片减重的选项。

### 参考文献

- [1] 王同光. 风力机叶片结构设计 [M]. 科学出版社, 2015.
- [2] Cox K, Echtermeyer A. Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade[J]. Energy Procedia, 2012, 24: 194–201.
- [3] 于海宁, 高长星, 王艳华. 碳纤维增强树脂基复合材料的应用及展望 [J]. 合成纤维工业, 2020,43(01):55–59.
- [4] Loos M R, Yang J, Feke D L, et al. Enhancement of fatigue life of polyurethane composites containing carbon nanotubes [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44(1): 740–744.
- [5] 牟书香, 陈淳, 邱桂杰. 等. 碳纤维复合材料在风电叶片中的应用 [J]. 新材料产业, 2012(02):25–29.
- [6] Ma P C, Zhang Y. Perspectives of carbon nanotubes/polymer nanocomposites for wind blade materials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 651–660.
- [7] Kausar A, Rafique I, Muhammad B. Review of applications of polymer/carbon nanotubes and epoxy/CNT composites[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2016, 55(11):1 167–1 191.
- [8] 王子文. 大型风力机叶片弯扭耦合特性研究及轻量化设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] 朱杰, 马东方, 张家亮. 等. 基于拓扑与尺寸优化的风力机叶片轻量化设计 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2021,34(06):67–73.
- [10] 许经纬. 碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用 [D]. 苏州大学, 2019.002822.
- [11] 李沛欣, 周高飞, 周文明. 等. 泡沫芯材在风电叶片中的研究及应用进展 [J]. 中国胶粘剂, 2022, 31(12):7.
- [12] 吉祥, 秦志文, 冯威. 等. 槽孔尺寸对芯材力学性能的影响 [J]. 复合材料科学与工程, 2022 (9): 62.
- [13] 聂义, 熊杰, 王建东. 等. 风电叶片腹板芯材加工方式对设计和制造的影响 [J]. 复合材料科学与工程, 2021 (6):102.
- [14] 高峰, 方海, 刘伟庆. 等. 界面增强型复材夹层板泡沫芯材的剪切性能试验 [J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2018, 40(1):121–126.
- [15] 刘志强, 吉祥, 高翔. 等. 孔/槽结构对灌注芯材力学性能的影响 [J]. 纤维复合材料, 2023, 40(1):85–91.
- [16] 周志伟. 含点阵增强柱和空腔的复合夹芯板水下声振计算方法及性能研究 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [17] 王兵. 纤维柱增强复合材料夹芯结构的制备工艺及力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 复合材料与结构研究所, 哈尔滨工业大学, 2009.
- [18] 石昌, 王继辉, 朱俊. 等. 梯形格栅结构增强泡沫夹芯复合材料平压性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(2):590–600.

## Influence of foam core material slotting and drilling methods on lightweight of wind turbine blades

Yang Lei<sup>1</sup>, Li Tiankai<sup>2</sup>, Tan Boyang<sup>1</sup>, Zhao Hu<sup>1</sup>

(Mingyang Smart Energy Group Co. LTD., 528400, Guangdong Zhongshan China)

**Abstract:** The large-scale development of wind turbine blades has put forward higher requirements

for blade quality and cost. Reducing blade weight while ensuring blade quality has become an important direction for cost reduction and efficiency improvement in the blade industry in recent years. The foam core materials of the web plate and shell contour plate are slotted and perforated in different ways, and the adhesive absorption, density and shear properties of the cured foam core materials are calculated and tested. Research has found that increasing the spacing between cross grooves and holes, as well as using straight grooves, can effectively reduce the adhesive absorption and density of the core material. The shear performance of the core material in the G13 direction meets the requirements; The shear performance of the straight groove contour plate in the G23 direction is weak; The belly plate is mainly affected by lattice reinforced columns; The density of the 40 mm × 40 mm double-sided cross shallow groove and perforated sample after adhesive absorption is the lowest, and the weight loss is the highest; The shell contour plate is subjected to lattice reinforcement and the interaction between the plate lattice structure; The shear performance of the sample with a cross groove spacing of 40 mm×40 mm and a hole spacing of 20 mm×20 mm meets the requirements, and the weight reduction effect is good.

**Key words:** wind turbine blades; foam core material; slotting and punching; shear performance; lightweight

(R-03)



## 炭黑价格大跌 40% 还要继续跌

**Carbon black prices have plummeted by 40% and will continue to decline**

据外媒报道：尽管 2023 年 11 月欧洲炭黑价格略有上涨，但由于需求连续第 8 个月疲软，欧洲市场 2023 年末至今年年初，继续保持看跌态势。

在欧洲市场，炭黑的交易价格每吨约为 850 美元；市场报价显示，12 月底的一周内价格下降了 2%，而 12 月份全月累计下跌约 5%，与 2023 年初相比迄今下降了 40%。

产能方面，欧洲的炭黑通常依赖于进口，随着禁止从俄罗斯进口炭黑和弹性体的禁令全面生效，欧洲将增加新的产能，并将从 2024 年年中开始投产。

随着俄罗斯持续通过“影子油轮”以及转运等方式大量出口，11 月欧洲炭黑市场保持稳定，增量需求被供过于求所抵消。

对欧洲炭黑市场作进一步动态分析表明，下游轮胎市场仍然低迷，尤其是替换胎市场。据一位市场参与者透露，目前北欧，特别是鹿特丹港、汉堡港和安特卫普港，由于河流航运受到抑制，供应链中断，导致炭黑的大宗采购活动被迫推迟，尤其是从阿联酋的采购。

国内市场方面，根据监测的数据显示，截至目前，国内 N220 炭黑市场价格在 8 633 元 /t，相较于 2023 年 1 月份 12 050 元 /t 的价格高点，一年来，下滑幅度接近 30%。

据行业机构预测，后市来看，高温煤焦油市场行情或持续弱势，对炭黑成本面支撑不佳；厂家对炭黑原料采购积极性不佳，入市拿货仅维持刚需，市场交投氛围较为冷清。下游终端轮胎行业在市场不景气的情况下，入市拿货多维持刚需，预计短期炭黑弱势盘整运行。

编自“聚胶”

(R-03)

