

气流展纤工艺中不同压差和送丝速度对碳纤维展宽的影响

牛雪娟^{1,2} 徐妍慧¹

(1 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

(2 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

文 摘 为探究气流展纤工艺中不同出口压差和送丝速度对碳纤维丝束展宽效果的影响,依据Venturi原理,搭建气流展纤试验平台,并记录大丝束碳纤维展宽过程,计算不同工艺参数下碳纤维丝束在不同阶段的展宽率和展宽均匀程度。研究表明:通过搭建的气流展纤试验台,能获得展宽率高于400%,展宽均匀程度在90%以上的碳纤维丝束,得到的碳纤维丝束的展宽率与出口压差呈正相关,与送丝速度呈负相关;碳纤维丝束的展宽均匀程度与出口压差呈负相关,与送丝速度呈正相关。

关键词 气流展纤,碳纤维束,气压差,送丝速度

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.04.015

The Influence of Different Pressure Difference and Feeding Speed on the Expansion of Carbon Fiber in the Process of Air Flow Spreading

NIU Xuejuan^{1,2} XU Yanhui¹

(1 College of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

(2 Key Laboratory of Modern Mechanical and Electrical Equipment Technology, Tianjin 300387)

Abstract In order to explore the influence of different outlet pressure difference and feeding speed on the expansion effect of carbon fiber bundles in the air spreading process, an air spreading platform was established according to Venturi principle. The process of carbon fiber broadening was recorded, and the ratio and uniformity of carbon fiber broadening at different stages were calculated under different technological parameters. The results show that the carbon fiber bundles with a broadening rate of more than 400% and a broadening uniformity of more than 90% can be obtained by the air flow spreading test platform. The expansion rate of the carbon fiber bundle is positively correlated with the outlet pressure difference and negatively correlated with the feeding speed. The evenness of the expansion of the carbon fiber bundle is negatively correlated with the outlet pressure difference and positively correlated with the wire feeding speed.

Key words Air fiber spreading technology, Carbon fiber bundles, Pressure difference, Feeding speed

0 引言

复合材料被广泛运用于航空航天、交通运输、建筑桥梁以及新能源技术等多个领域^[1]。其中,碳纤维复合材料是一种具有质轻、高强高模等优异性能的新一代增强材料。大丝束碳纤维更是碳纤维中最具发展潜力和前景的品种^[2]。在实际应用中,需要通过展纤工艺将碳纤维丝束展宽展薄,以得到物理性能偏差小、力学性能更佳的复合材料。

传统的机械展纤方法,由于存在机械摩擦,会导致

纤维表面磨损,甚至出现断丝。因此近年来,研究人员开始逐渐尝试气流展纤法,以应对有高表面质量和高机械性能要求的应用^[3]。日本开发了气流控制丝束辊压方法,能够精确控制气流,充分展宽纤维束^[4]。陈金良等^[5]通过设计高温射流冲击试验装置,以研究大丝束碳纤维在射流冲击作用下的展宽效果。CHEN等^[6]设计了一种高效的碳纤维气动铺展系统。

本文搭建气流展纤试验平台^[5-6],分析不同出口压差以及送丝速度对碳纤维丝束展宽率以及展宽均

收稿日期:2021-08-18;修回日期:2021-10-28

基金项目:天津市自然科学基金面上项目(No: 18JCYBJC89000)

第一作者简介:牛雪娟,1977年出生,副教授,博士,主要从事机电一体化研究工作。E-mail:niuxuejuan@tiangong.edu.cn

匀程度的影响, 以期为气流展纤工艺的进一步优化和改进提供思路。

1 气流展纤机理

气流展纤器的工作基于 Venturi 效应, 即: 当流体在通过小断面时, 出现流速增大的现象, 同时在高速流动流体的附近会产生低压区域, 从而造成吸附作用。在气流展纤器中, 展纤通道内的气流通过气流间隙时, 就会产生 Venturi 效应, 具体展纤机理如图 1 所示。其中图 1(a) 为碳纤维束刚进入气流场时的初始状态。气流间隙相对展纤通道为小断面, 因此气流间隙处的气流速度高于展纤通道中央的气流速度, 即 $V_1 < V_2$, 在 Venturi 效应影响下, 气流间隙附近会产生低压区, 即 $P_2 > P_1$ 。在低压区的作用下, 碳纤维逐渐向两侧展宽, 最终状态如图 1(b) 所示。

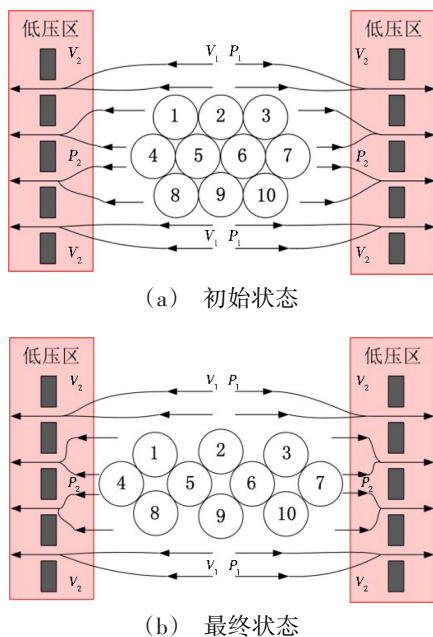


图 1 气流展纤原理图

Fig. 1 Schematic diagram of airflow expansion fiber

2 试验

2.1 原材料

选取沧州中丽新材料科技有限公司定制生产的 48K 碳纤维丝束进行实验。该型号为无捻纤维, 展纤前无须解捻。碳纤维丝束原始宽度为 16 mm, 单丝直径为 7 μm , 丝束表面包裹有上浆剂。

2.2 试验台

搭建气流展纤试验台如图 2 所示。其中, I 为放卷装置; II 为铝制加热箱; III 为预展纤热风枪; IV 为传送辊组; V 为张力检测装置; VI 控制面板; VII 为气流展纤器; VIII 为收卷装置。

气流展纤器为对称结构, 是气流展纤试验平台的核心部分, 其详细几何参数如图 3 所示。纤维入口宽 20 mm, 纤维出口宽度 100 mm。展纤通道由相对对称面分布的隔板围成, 宽 100 mm, 长 300 mm。隔板上分布有 9 个气流间隙, 沟通展纤器的内外流场。气流间隙宽度均为 5 mm, 相邻两气流间隙的间距为 20 mm。最右侧气流间隙至碳纤维出口的距离为 24 mm。

气流展纤器的 3 维模型如图 4 所示。用无影胶粘接透明亚克力板制成气流展纤器, 并检测其气密性, 如图 5 所示。

碳纤维丝束从纤维入口进入展纤通道, 在气压差作用下展开后, 从纤维出口离开展纤通道。而气流在离心风机的作用下, 从气流入口 1 和气流入口 2 进入展纤通道。通过气流间隙后, 从气流出口离开气流展纤器。展纤通道正下方放置有 4 个 ESP32-CAM, 用于拍照记录碳纤维展开的情况。展纤器的两个气流出口通过一个 Y 型接头与变频离心风机相连接, 可通过调节风机频率改变气流出口压差。

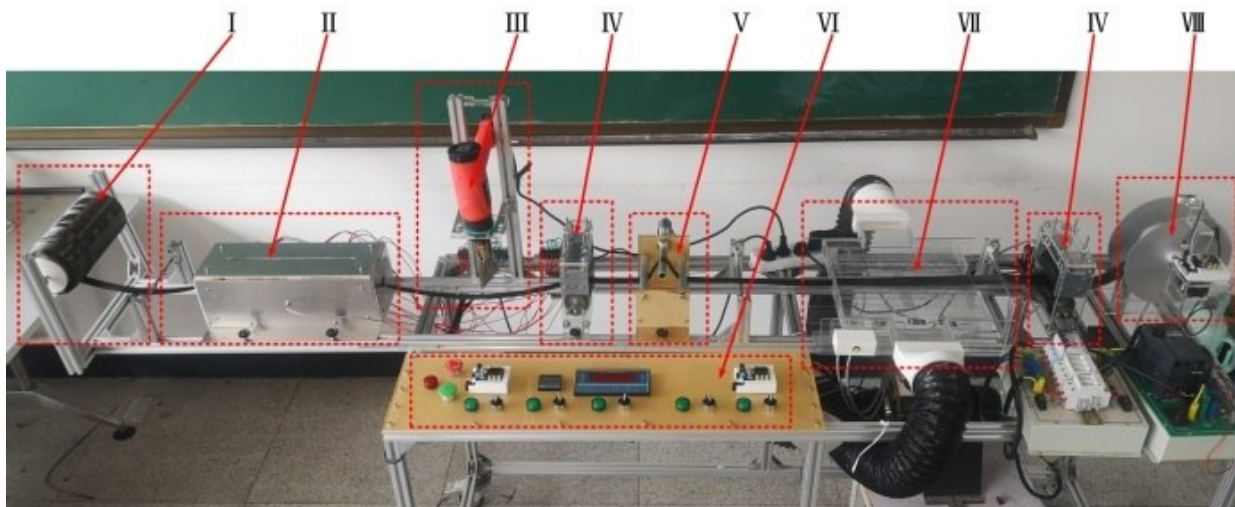
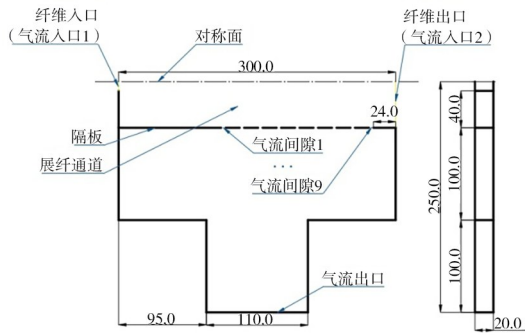
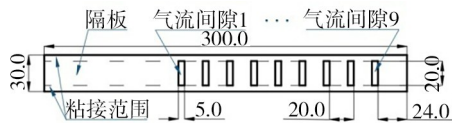


图 2 气流展纤试验台

Fig. 2 Air spread fiber test bench



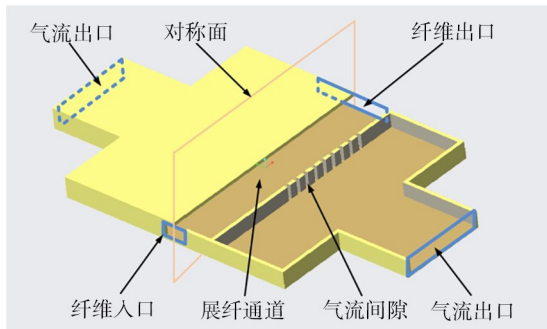
(a) 气流展纤器半几何平面图



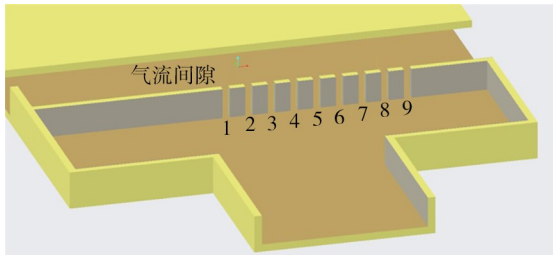
(b) 气流展纤器隔板平面图

图3 气流展纤器几何信息图

Fig. 3 Geometrical information diagram of air spreader



(a) 气流展纤器整体图



(b) 气流展纤器局部放大图

图4 气流展纤器3维模型

Fig. 4 3D model of air spreader

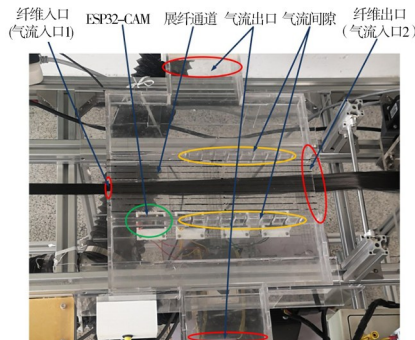
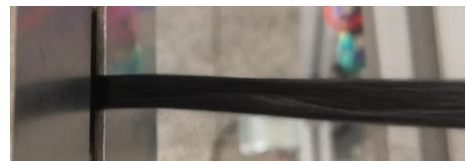


图5 气流展纤器实物

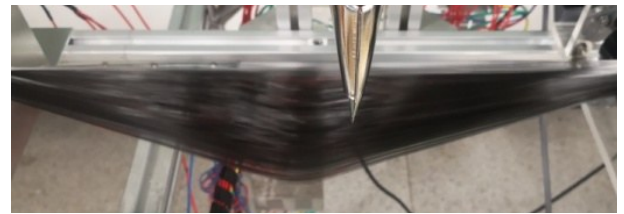
Fig. 5 Real air spreader

2.3 展纤流程设计

碳纤维丝束在传送辊组的牵引作用下,通过加热箱,使保护丝束的上浆剂融化,有利于后续展宽。根据上浆剂的树脂体系,试验中将加热箱内温度设置为180~230℃。为使丝束中单丝充分向两侧分散,在气流展纤试验台中设置预展纤工序,如图6所示。采用固定温度(400℃)和风速(4 m/s)的热风枪对碳纤维丝束进行吹拂,气流方向与纤维束面垂直。预展之后的碳纤维丝束绕过张力监测装置,实时监测,以确保张力稳定在一定区间内。碳纤维丝束进入展纤通道后,因受到来自两侧气流间隙的气流造成的压力差而展宽。收卷装置带有超声测距传感器,通过反馈调节电机的转速,以确保收卷的线速度不变。展宽后的碳纤维丝束缠绕于收卷筒上。



(a) 热风枪吹拂前



(b) 热风枪吹拂后

图6 热风枪吹拂前后丝束形态对比

Fig. 6 Comparison of tow shape before and after heat gun blowing

2.4 试验参数

利用YYT-2000B倾斜式微压计测量并计算离心风机频率与气流出口压差之间的关系,如表1所示。

表1 离心风机频率与气流进出口压差对照表

Tab. 1 Comparison table of centrifugal fan frequency and air flow inlet and outlet pressure difference

离心风机频率/Hz	气流出口压差/Pa
21.5	50
23	60
25	70
27	80
28.5	90
30	100
31.5	110

同时,分别在气流展纤器出口压差为50、60、70、80、90、100和110 Pa,以及送丝速度为40、60和80 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下进行碳纤维丝束展宽试验。试验序号及参数如表2和表3所示。

表2 试验方案参数表1

Tab. 2 Test scheme parameter of table 1

试验编号1	送丝速 $V/\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$
A-	40
B-	60
C-	80

表3 试验方案参数表2

Tab. 3 Test scheme parameter of table 2

试验编号2	气流进出口压差 P/Pa
a	50
b	60
c	70
d	80
e	90
f	100
g	110

3 结果与讨论

待碳纤维丝束展宽状态稳定后,打开ESP32-CAM拍照记录。碳纤维丝束刚进入气流展纤器时,宽度变化不明显。因此只取后三个ESP32-CAM拍摄的图像进行处理并组合,从左到右分别记为第一阶段、第二阶段和第三阶段。图7所示为碳纤维丝束展宽至失效的情况。不同气流出口压差及送丝速度参数下,碳纤维丝束的正常展宽情况如图8所示,碳纤维丝束未展宽,或已展宽至失效的情况未在其中。

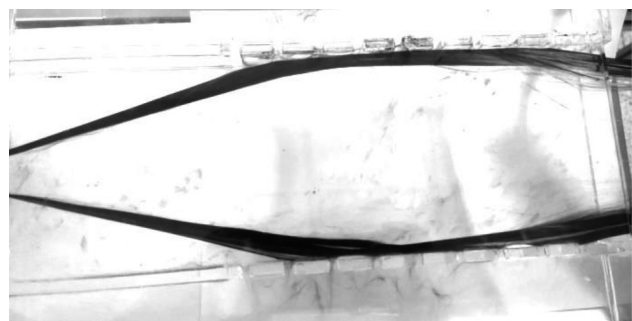


图7 碳纤维丝束展宽至失效图

Fig. 7 Drawing of a carbon fiber tow stretching to failure

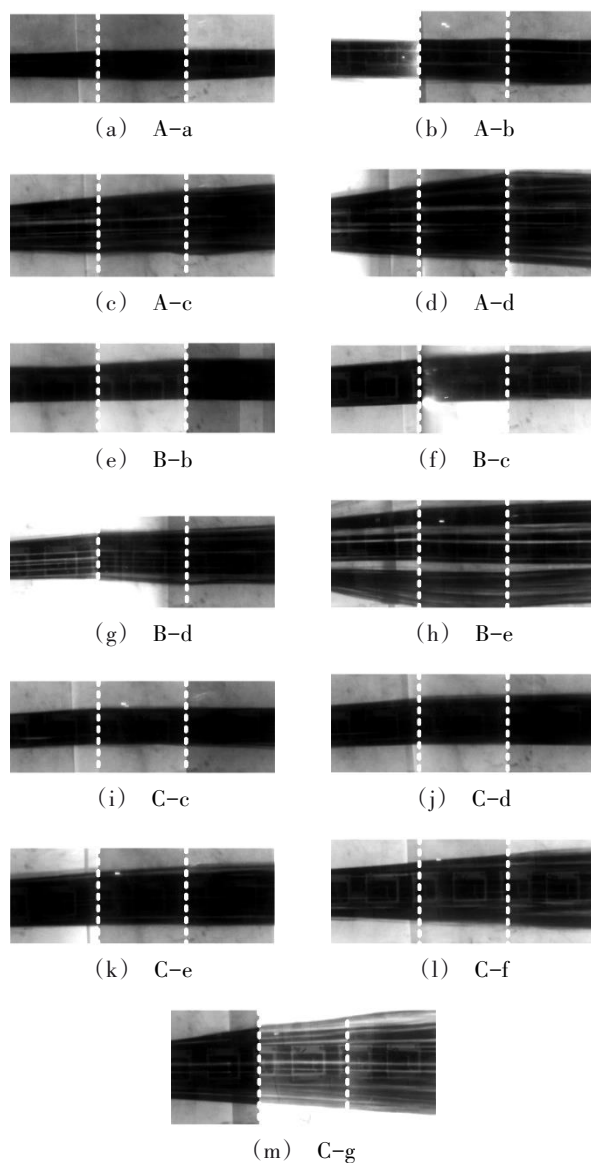


图8 碳纤维丝束展宽情况

Fig. 8 The stretching of carbon fiber tow

3.1 展宽率分析

在展纤器的纤维出口上方放置直尺,读取纤维出口处的主体碳纤维丝束宽度,忽略两侧散乱碳纤维单丝的影响。各试验参数情况下,碳纤维丝束经过气流展纤后的宽度如表4所示。其中B-a、C-a和C-b试验参数下,碳纤维丝束未有明显展宽,A-e、A-f、A-g、B-f和B-g试验参数下碳纤维丝束展宽至失效。

碳纤维丝束原始宽度为16 mm。计算纤维丝束的展宽率,公式如下:

$$R_b = \frac{w_b}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_b 为展宽率, w_b 为经过气流展纤后碳纤维丝束的宽度, w_0 为碳纤维丝束的原始宽度。各试验参数下,碳纤维丝束经过气流展纤后的展宽率如图9所示。

表4 碳纤维丝束展宽宽度

Tab. 4 The width of a carbon fiber bundle

试验编号2	试验编号1		
	A-	B-	C-
a	19	-	-
b	29	22	-
c	43	38	25
d	63	50	36
e	-	72	45
f	-	-	55
g	-	-	75

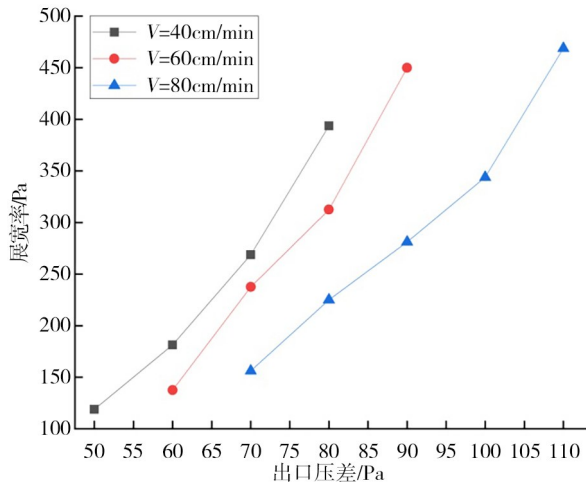


图9 碳纤维丝束展宽率

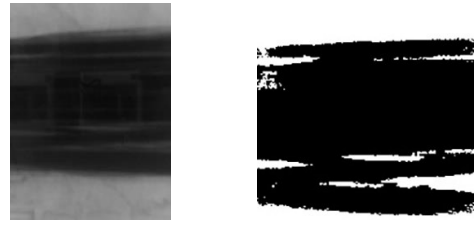
Fig. 9 Elongation of carbon fiber tow

从图9可得,当送丝速度一定时,随着出口压差增大,碳纤维丝束的展宽率呈现一定的正加速增长。直至由于出口压差过大,碳纤维丝束展宽至失效。且随着送丝速度增快,能使碳纤维丝束展宽的最低出口压差随之增大,碳纤维丝束在展宽至失效前能达到的最大展宽率也随之增大。在送丝速度为40 cm/min时,碳纤维丝束的最大展宽率为393.75%,而当送丝速度为60和80 cm/min时,碳纤维丝束的最大展宽率分别为450%和468.75%。可以看出碳纤维丝束的最大展宽率逐渐趋于稳定。其原因是,碳纤维丝束的最大展宽率受到展纤通道宽度的限制。

3.2 展宽均匀程度分析

利用MATLAB对图8进行灰度化和归一化处理。在此基础上,设置合理阈值进行二值化处理,使二值化处理图接近碳纤维照片,如图10所示。二值图由黑色和白色的像素点构成,其示意图如图11所示。

图11中红色方框内黑色像素点的占比表示碳纤维展宽的均匀程度。红框的横向范围从第j-2列至第j+2列,纵向范围从第i_A行至第i_B行。展宽越均匀,



(a) 碳纤维照片 (b) 二值化处理图

图10 照片与二值化图对照

Fig. 10 Comparison between a photo and a binary image

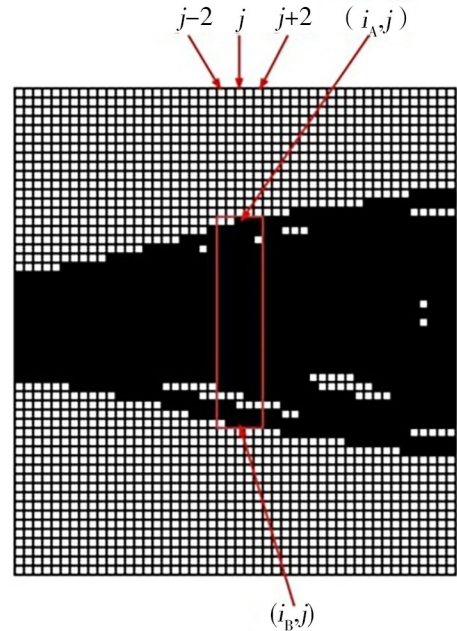


图11 二值图像素点示意图

Fig. 11 A diagram of the pixel points of the binary map

碳纤维单丝间白色缝隙越少,照片中碳纤维所在区域内的颜色越接近,二值化处理,黑色像素点占比越高。因此,计算所得数值越大,均匀程度越好。计算公式如下:

$$R_U = \frac{C_b}{(i_A - i_B) \times [(j+2) - (j-2)]} \times 100\% \quad (2)$$

式中, R_U 为展宽均匀程度, C_b 为红框内黑色像素点的数量, j 为图像中间列像素点纵坐标, i_A 为第j列第一个黑色像素点的行坐标, i_B 为第j列最后一个黑色像素点的行坐标。

分别计算不同出口压差和送丝速度下的碳纤维丝束展宽均匀程度,结果如图12所示。

从图12可得,试验中碳纤维丝束的展宽均匀程度基本保持在90%以上。在送丝速度为40 cm/min时,碳纤维丝束的展宽均匀程度随着出口压差的增大明显逐渐降低。在送丝速度为和80 cm/min时,碳纤维丝束的展宽均匀程度首先保持在一个较高的范围内。随着出口压差的进一步加大,呈现逐渐降低

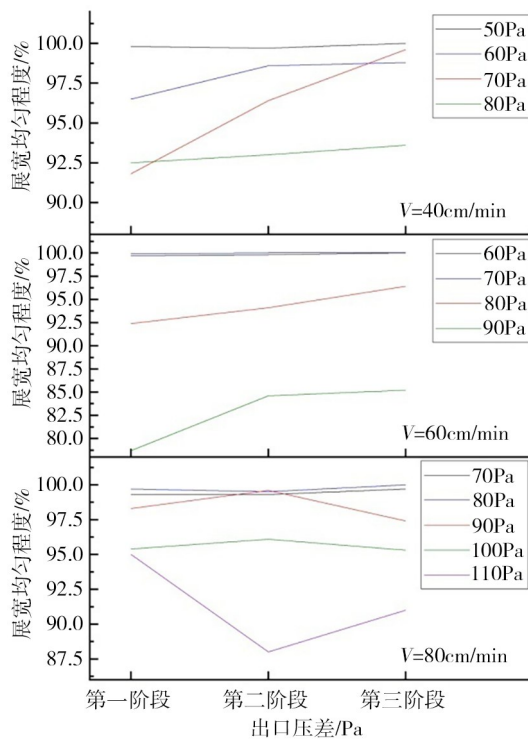


图 12 碳纤维丝束展宽均匀程度

Fig. 12 Distribution uniformity of carbon fiber tow

的趋势。造成这一现象的原因是,随着出口压差增大,碳纤维丝束受到更大的来自低压区的吸力,向两侧展宽的范围也随之增大。由于碳纤维单丝之间的缠绕或交错,形成簇状,难以均匀分布在展宽区域中,造成空白间隙的存在,从而降低了碳纤维丝束的展宽均匀程度。

在同样的 70 Pa 和 80 Pa 出口压差下,随着送丝速度增快,碳纤维丝束的展宽均匀程度有所提高。其原因是,相同出口压差下,送丝速度增快,碳纤维丝束的展宽率降低,单丝之间的缠绕交错没有明显体现,从而展宽均匀程度相对更高。其次,送丝速度越快,碳纤维丝束通过展纤通道所需的时间越短,受到气流的干扰影响越小,也会从一定程度上提高其展宽均匀程度。

4 结论

(1)从气流出口压差对碳纤维丝束展宽情况的影响看:当送丝速度不变时,气流出口压差越大,碳纤维丝束的展宽率越大,但是受到展纤通道宽度的限制,且展宽均匀程度呈加速降低趋势。

(2)从送丝速度对碳纤维丝束展宽情况的影响看:当气流出口压差不变时,碳纤维丝束的展宽率随

着送丝速度的增快而减小,展宽均匀程度越高。

(3)送丝速度越快,能使碳纤维丝束展宽的最低气压差越大。随着出口压差增大,展宽率呈加速增长趋势,展宽均匀程度一开始基本不变,后明显降低。

(4)本文中的气流展纤试验台能够有效将碳纤维丝束展宽。当送丝速度为 80 cm/min,气流出口压差为 100 Pa 时,能够得到均匀程度较好且展宽充分的碳纤维丝束,其展宽率为 343.75%,三个阶段的展宽均匀程度稳定在 95.5% 左右。通过提高送丝速度以及出口压差,展宽率可以达到 450% 甚至更高,但展宽均匀程度会降低至 90%。

参考文献

- [1] 张青,常新龙,张有宏,等. 碳纤维/环氧树脂复合材料微波固化试验[J]. 宇航材料工艺,2018,48(6):58-62.
- [2] 徐爱武,梁燕,蒋玲玲. 大丝束碳纤维发展现状及我国技术瓶颈和发展建议[J]. 合成纤维,2020,49(6):19-23.
- [3] 王思莹,陈明,尹协振. 柔性体与运动流体耦合问题研究进展综述[J]. 力学与实践,2014,36(5):566-573.
- [4] 钟文鑫,马丕波. 高性能纤维束展纤技术的发展现状[J]. 复合材料科学与工程,2015(8):80-85.
- [5] 陈金良,牛雪娟,张准. 高温射流冲击大丝束碳纤维实验与仿真分析[J]. 固体火箭技术,2019,42(6):758-764.
- [6] CHEN J C, CHAO C G. Numerical simulation and experimental investigation for design of a carbon fiber tow pneumatic spreading system[J]. Carbon,2005(43):2514-2529.