

DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2009.21.026

# 叶片真空灌注工艺管路布置以及孔隙的形成

彭家顺,高建勋

(国电联合动力技术有限公司,北京 100044)

**摘要:** 研究2种不同管路布置方法对风机叶片灌注时间以及灌注效果的影响,并对灌注过程中孔隙的形成进行了分析。实验表明,采用先开启叶片壳体主管道,再开启叶根铺层上方管路的方法,节约壳体灌注时间,同时也避免了叶根白斑的产生。

**关键词:** 真空灌注; 管路布置; 孔隙的形成

**中图分类号:** TB 332;TQ 327.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-4431(2009)21-0098-03

## Piping Layout and Pores Formation in VARTM Manufacture Process of Wind Tube Blade

PENG Jia-shun, GAO Jian-xun

(Guodian United Power Technology Company LTD, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Study the influence of infusion time and infusion effect with two different piping layout in VARTM manufacture process of wind tube blade, as well as the formation of pores in VARTM manufacture process were analyzed. Experiments show that open the main pipelines of the blade shell and then open the pipelines on the blade root layers will save the infusion time but also to avoid the dry spot at the blade root.

**Key words:** vartm; piping layout; pores formation

真空灌注是将纤维增强材料直接铺放到模具上,在纤维增强材料上铺放剥离层和高渗透介质,然后用真空薄膜包覆及密封,利用负压将树脂注入并浸透增强材料的一种成型工艺<sup>[1]</sup>。

大型风机叶片多采用真空灌注工艺。近年来,随着能源危机的日趋严重,风能作为一种清洁可再生的能源日益受到重视,复合材料叶片作为风电机组关键部件之一,使得关于其真空灌注成型工艺方面的研究变得异常活跃。董锋岩<sup>[2]</sup>简述了我国复合材料风机叶片的发展现状,并对叶片材料体系、灌注成型工艺进行了较为详细的论述;李传胜、周利峰、张锦南<sup>[3]</sup>等对真空灌注工艺的技术原理、工艺要求等进行了探讨,提出了影响灌注工艺的几点重要因素;齐大伟、宁荣昌、凌辉<sup>[4]</sup>对于真空灌注工艺的树脂体系研究进展进行了综述;Scott M Rossell<sup>[5]</sup>则通过真空灌注实验测定了3种增强材料一系列不同纤维体积含量下的渗透率,提出了几种混合增强材料叠加渗透率的推算方法,并通过实际叶片灌注予以验证。

文中着重讨论叶片壳体成型中2种不同管路布置的灌注效果以及灌注常见缺陷的原因分析。

## 1 真空灌注孔隙的形成

### 1.1 树脂流动分析

树脂在纤维内的流动可分为树脂在纤维束之间的流动和在纤维束内部纤维单丝之间的流动,即宏观流

动与微观流动<sup>[6]</sup>。纤维束间的孔隙比较大,形成的孔隙称为宏观孔隙;而纤维单丝之间的孔隙较小,形成的孔隙称为微观孔隙。树脂流体在纤维铺层流动中受到2种不同的驱动作用:动压力和毛细压力。纤维束间的流动主要取决于施加的动压力,而纤维束内的流动主要有毛细压力控制<sup>[7]</sup>。

### 1.2 树脂沿纤维轴向流动时孔隙的形成

灌注过程中,当树脂流速较低时,动压力小于毛细压力作用,纤维束内沿纤维方向的流动速度大于纤维束间的流动速度,树脂在纤维束内的流动前沿领先于纤维束间的流动前沿,当领先的树脂前沿遇到编织线或横向纤维时,就会横向汇合,纤维束间就会裹入空气形成宏观孔隙。

当树脂流速较高时,动态压力大于毛细压力作用,纤维束间的流动速度大于纤维束内的流动速度,因而纤维束内树脂的流动前沿落后于纤维束间的流动前沿,当流动前沿横向汇合时,就形成纤维束间的微观空隙<sup>[7,8]</sup>。

### 1.3 树脂沿纤维横向流动时孔隙的形成

树脂沿垂直于纤维方向流动时,其在纤维束间的流动应该是均匀的,当遇到横向排布的纤维束时,树脂首先沿编织线继续流动,所以编织线部分的流动前沿领先,而没有编织线的部分出现流动前沿滞后现象,当沿领先的流动前沿在纤维束内部进行轴向汇合时,便形成微观孔隙。

横向流动孔隙形成的另一种机理是:当纤维束间的流动前沿到达纤维束时,由于纤维束间渗透率较高,流体绕过纤维束,然后在毛细压力作用下浸润纤维束,如果纤维束内的空气没有完全排出,就很容易在纤维束内形成微观孔隙。

## 2 灌注实验

### 2.1 材料体系

材料选用体系见表1。

### 2.2 辅助材料与管路布置

叶片的铺层是由所受的外载荷决定的,无论是弯矩、扭矩和离心力都是从叶尖向叶根逐渐递增的,所以叶片结构厚壁也是从叶尖向叶根逐渐递增的<sup>[9]</sup>。兆瓦级叶片壳体为中有大梁,两边为泡沫或者巴萨木的薄壁夹芯结构,并在后缘用单线纤维增强,大型叶片壳体常见铺层结构如图1。

结合叶片铺层机构,分别按照图2、图3 2种方法进行辅助材料铺设与管路布置。第1种布置方案为6个注胶点,其中1号注胶管路为Ω管与螺旋溢流管组成的环形管路,螺旋溢流管置于叶根纤维铺层中心,按照叶根→主管路→后缘→前缘的顺序。第2种布置方案减少为5个注胶点,按照主管路→后缘→前缘→叶根的顺序。2种方案中导流网布置也有所变化。

模具温度:35℃;树脂温度:25℃;真空度≤20 mbar。注胶规则为由低处到高处依次开管,当一个注胶点的流动前锋超过下一个管路10 cm距离以上时(叶根部分除外),打开下一个注胶点,管路开启顺序如上图注胶口编号所示。

表1 材料体系

名称	型号规格	备注
灌注树脂体系	RIM235/RIMH235	HEXION (MGS)
多轴向玻璃纤维	/	SAINT-GOBAIN
芯材套料	/	Sino Composite
脱模布	/	上海沥高
带孔隔离膜	WL3900	AIRTECH
导流网	VI160	上海沥高
Ω管	Φ 30	/
螺旋溢料管	Φ 16×Φ 12	/
进胶管	Φ 32×Φ 26	/
密封胶条	AT-199	上海沥高
真空袋膜	400Y	上海沥高

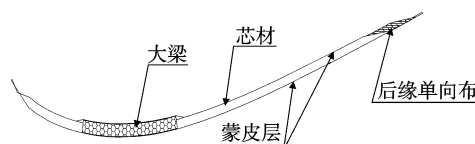


图1 常见叶片铺层结构

## 3 结果分析

### 3.1 灌注时间对比

从图4可以看出,2种布置方案中,第2种方案注胶时间比第1种方案短,其前后缘以及叶根几部分注胶时间交叉比较长,从而节省了充模时间。

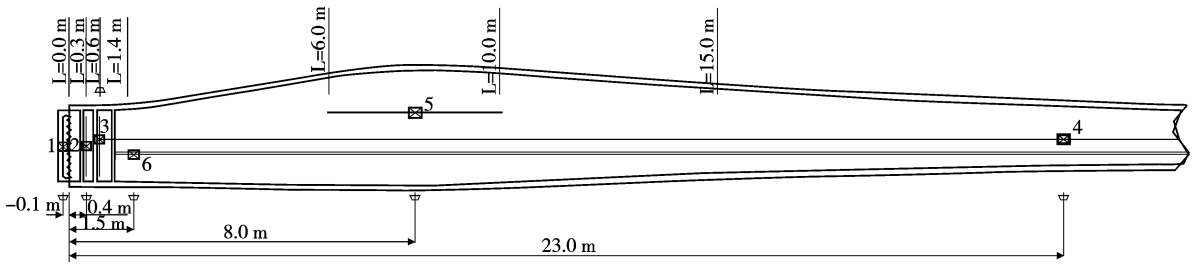


图2 管路布置方案一

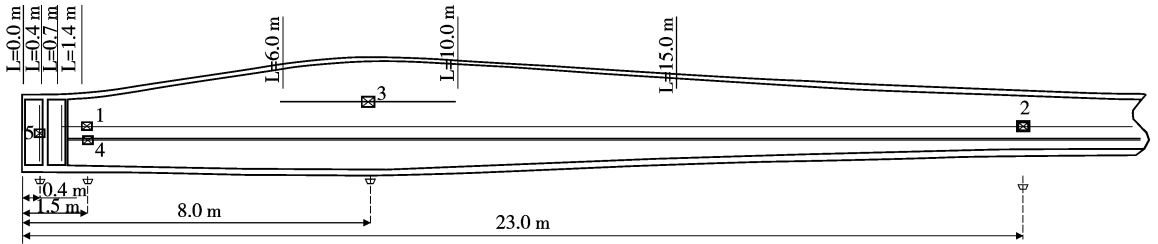


图3 管路布置方案二

### 3.2 灌注效果对比

采用方案一布置方法,1号注胶管由叶根铺层端面进胶,表层裹集气泡,形成一系列0°方向的白斑,见图6,方案二中,由叶根铺层上方进胶,叶根端面布置抽真空管路,成型壳体无缺陷,灌注效果优异,见图7。

分析原因:叶根纤维积层最厚,在方案一中,当打开1号注胶口时,由于积层上表面有导流网,树脂进胶速度较快,而紧贴模具的铺层中树脂流动速度较慢,毛细压力大于动压力,加之灌注时树脂中的气泡涌入,在树脂由叶根向叶尖方向流动时,气泡不易排出,纤维束内流动的树脂前沿横向汇合将气泡包裹,从而造成了纤维束间的孔隙。当打开2号注胶口时,树脂流速相对增大,动压力与毛细压力相互协调,白斑消失;方案二中,打开2号注胶口时,1号注胶口的树脂前沿已经漫过2号管路,2号注胶口的开启,相对增加了紧贴模具铺层中树脂流速,另外叶根端面的真空源使积层中气泡随树脂灌注过程能够很好地排出,避免了白斑的产生。

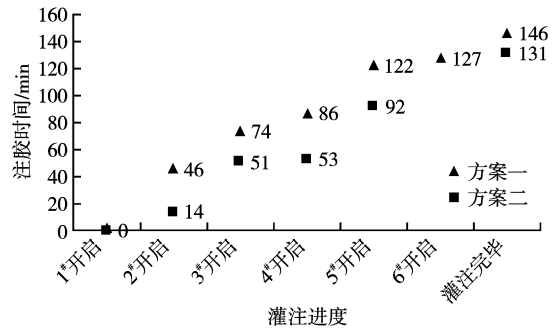


图4 2种布置方案灌注时间对比

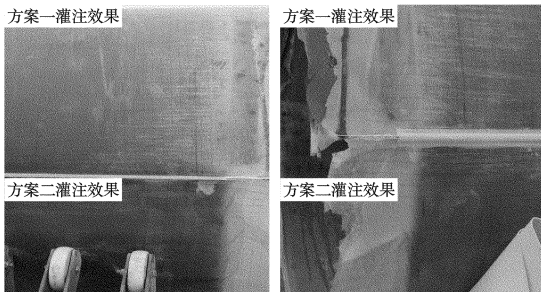


图5 2种方案灌注的叶片根部PS面、SS面

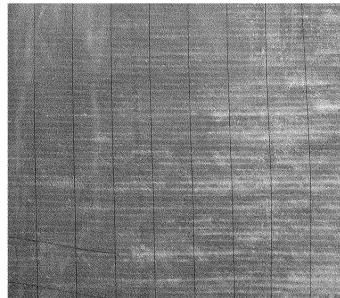


图6 方案一灌注效果PS面

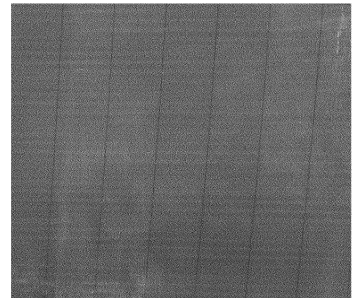


图7 方案二灌注效果SS面

## 4 结语

国内各厂家关于叶片真空灌注的具体方案不尽相同,各有优缺点。由于兆瓦级风机叶片制造技术在我国尚处起步阶段,相互之间缺乏交流与沟通。采用粗进胶管,灵活设计多做实验,采取最佳的管路、辅材铺设方法,在生产过程中严格注重工艺的每一个细节才是提高生产效率和避免一系列缺陷的有效途径。

### 参考文献

[1] 王 武.干涉对复合材料疲劳性能的研究[J].绝缘材料,2006,39(4):45-47.