

## 工艺·设计

# 玻璃钢细长管缠绕工艺的研究

娄小杰 张维军 周晏云 陈光烈

(哈尔滨玻璃钢研究所, 150036) (哈尔滨斯达玻璃钢有限公司)

**摘要** 通过对玻璃钢细长管缠绕工艺的研究, 提出了“双绕丝嘴缠绕”的缠绕模式及进行“双绕丝嘴缠绕”的条件; 对缠绕规律进行了研究, 提出了精确缠绕线型的设计方法。

**关键词** 玻璃钢细长管, 缠绕, 双绕丝嘴缠绕

**ABSTRACT** Winding pattern and condition for “Double Eye Filament Winding” is presented in this paper based on our study on slender pipe winding process. The winding principle and calculation method for accurate winding pattern are also given.

## 1 前言

玻璃钢细长管是指直径小于50mm, 且长径比(长度与管径的比值)大于100的缠绕管, 这类玻璃钢管以其灵活的可设计性、优异的电绝缘和耐腐蚀等特性在广阔的领域发挥着独特作用。

但这类缠绕玻璃钢细长管在成型工艺中有许多难点, 传统缠绕成型工艺中, 一般采用单绕丝嘴进行缠绕成型, 但这一方法并不适合细长管的缠绕。由于缠绕纱片的缠绕张力的存在, 使得缠绕模具产生较大的径向挠度, 造成缠绕线型的精度下降, 严重时甚至无法进行缠绕成型。在玻璃钢细长管的缠绕中, 纱条数较少, 缠绕纱片对制品表面的平整性影响较大, 需要对缠绕线型进行精确控制等。

为此, 我们对玻璃钢细长管缠绕成型中的芯模、芯模在缠绕机上的安装方式及缠绕线型进行了研究, 提出了“双绕丝嘴缠绕”的缠绕模式, 对精确缠绕规律进行了简明扼要的描述, 对“双绕丝嘴缠绕”的缠绕条件进行了讨论。

## 2 芯模制造

在玻璃钢缠绕工艺中芯模除了具备一定的强度外, 还要具备足够的轴向抗弯刚度和抗轴向扭曲刚度, 这一点对于玻璃钢细长管芯模尤为重要; 玻璃钢细长管芯模从应用角度上可分为两种: 一种是可重复使用的, 即经过缠绕、固化工艺后, 可拆卸下来的

芯模, 经表面清洁处理后可再次使用; 另一种是不可重复使用的, 即经过缠绕、固化工艺后, 芯模不必拆卸, 芯模将作为产品的一部分存在于产品之中。

玻璃钢细长管芯模的结构一般在筒段采用以玻璃钢细长管内径为直径的筒状结构, 在芯模两端的结构可根据缠绕机和固化炉的连接方式灵活设计, 为了避免在芯模的一些尺寸突变处出现应力集中而造成芯模断裂, 在该处要采用圆角过度的方法减轻应力集中的影响; 考虑到机械加工能力和制作成本, 玻璃钢细长管芯模大多采用实心结构。芯模材质应选择轴承钢、工具钢及30CrMnSi等刚度高的材料。

## 3 芯模的受力分析

在常规缠绕中, 缠绕管状产品一般采用两轴缠绕机即可。缠绕机的两轴指芯模以芯模中轴线为轴进行的转动运动和缠绕丝嘴沿芯模轴线进行的往复直线运动两个运动自由度, 二者按一定缠绕规律运动, 将纤维缠绕在芯模表面上。采用的是单绕丝嘴; 芯模在缠绕机上的装卡形式大多引用车床的装卡方式, 即床头端用床头三爪卡盘将芯模的一端卡牢, 另一端用尾座顶尖顶住芯模的端部顶尖孔; 常规缠绕模式如图1所示。

在这种常规缠绕中, 芯模主要承受芯模的自身重量、缠绕机床头端三爪卡盘的弯矩、床头卡盘及尾座顶尖所施加的轴向力及支撑力、缠绕纤维束纱带

的缠绕张力以及缠绕纤维束纱带和床头卡盘对芯模施加的扭矩。在上述载荷中, 芯模的自身重量是唯一不变的载荷, 其他几项载荷的大小、方向都随丝嘴的往复直线运动而不断变化。芯模受力如图 2 所示。

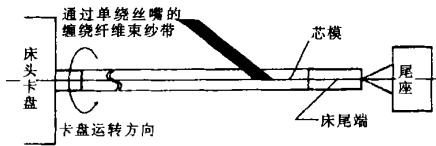


图 1 常规缠绕模式示意图



图 2 芯模受力示意图

## 4 芯模受力状态的改善

如何计算芯模所受各项作用力的大小及芯模各点的挠度不是本文研究的主要内容, 在此不作深入讨论。本文研究的内容是寻求减小芯模在缠绕过程中出现较大轴向弯曲变形的方法, 解决这一问题的思路就是改善芯模在缠绕过程中的受力状态, 加强一些有益的受力约束条件。

### 4.1 双绕丝嘴缠绕模式

引起芯模产生轴向弯曲变形的径向作用力有纤维缠绕张力在径向的分力和芯模自重均布载荷; 在这些径向作用力中, 芯模自重均布载荷是不可改变的, 主要由芯模自身的刚度和强度来承担; 纤维缠绕张力在径向的分力是造成芯模产生轴向弯曲变形的主要因素, 缠绕小车在芯模中间段运动时这一径向分力是相对稳定的, 该分力的大小和方向都不会发生变化; 缠绕小车在芯模两端进行转向运动时, 由于纤维缠绕角的变化是先由筒身缠绕角增加至 90°, 然后又从 90° 减小到筒身缠绕角, 所以纤维缠绕张力在径向的分力在芯模两端的变化是由小变大, 然后再由大变小; 虽然此处径向分力发生较大变化, 但由于床头卡盘和尾座的约束, 此时的纤维缠绕张力在径向的分力对芯模的弯曲变形的影响不会很大。本文将着重考虑消除这一径向分力的措施和方法。

在常规缠绕中, 是采用一个绕丝嘴的, 这一绕丝嘴在芯模的一侧沿芯模轴线方向作往复运动, 缠绕纤维束纱带通过绕丝嘴缠绕到芯模上。这种单绕丝嘴的缠绕模式决定了缠绕张力在径向的分力存在的

必然性。为了消除缠绕张力在径向的分力, 提出了双绕丝嘴缠绕模式, 如图 3 所示。

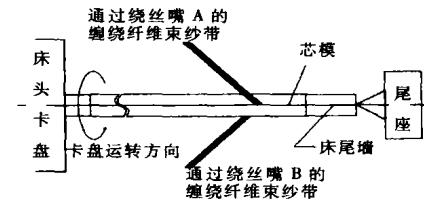


图 3 双绕丝嘴缠绕模式示意图

在双绕丝嘴缠绕中, 采用了两个绕丝嘴, 这两个绕丝嘴分别排布在缠绕芯模两侧, 且受同一缠绕小车的控制; 将原来用于单绕丝嘴的缠绕纤维束纱带均匀分为两束, 分别通过双绕丝嘴缠绕中的两个绕丝嘴缠绕在芯模上。通过两绕丝嘴纤维缠绕张力在径向的分力大小相等、方向相反, 彼此相互抵消, 这样就彻底消除了纤维缠绕张力在径向的分力对芯模轴向弯曲的影响。

### 4.2 双绕丝嘴的具体结构形式

一般的绕丝嘴由两部分组成, 一部分是绕丝嘴分纱梳, 另一部分为展纱辊。缠绕纤维束纱带从浸胶槽浸胶后, 首先到达绕丝嘴的分纱梳, 分纱梳将缠绕纤维束纱初步分成预定宽度的纱片, 然后通过展纱辊, 展纱辊通过对缠绕纤维束纱带的挤压, 使相邻纤维束间的间隙缩小, 纱片进一步得到展平; 展纱辊对展平后的缠绕纤维束纱带进行导向, 缠绕到芯模上。绕丝嘴展纱辊的形状一般采用半圆形, 这种半圆形展纱辊在缠绕芯模两端时, 能使缠绕纤维束纱带实现较为平稳、圆滑的转向运动; 但对于细长管缠绕, 这点不是最为重要的; 细长管需要解决的是筒段排线问题, 在缠绕中, 采用与芯模轴线相平行的圆柱形展纱辊较为合适; 另外改型后的绕丝嘴将分纱梳与展纱辊的功能合二为一, 即将绕丝嘴分纱梳组装在圆柱形展纱辊上; 缠绕纤维束纱带通过绕丝嘴分纱梳后, 将在圆柱形展纱辊的四分之一弧长范围内进一步得到展平, 这样可以使绕丝嘴的结构更为简洁, 加工更为方便。

### 4.3 双绕丝嘴缠绕中绕丝嘴处的空间布局

在双绕丝嘴缠绕中, 各部件的相互位置需要满足下列条件:

(1) A、B 两个绕丝嘴分纱梳中点的连线与芯模轴线相垂直; 这一点是为了保证两个绕丝嘴在轴向运动的一致性。

(2) A、B 展纱辊的出纱点与芯模之间的缠绕纤维束纱带长度相等; 这一点是为了便于缠绕线型控制而定的。

(3) 通过 A、B 两个绕丝嘴的两束缠绕纤维束纱带

带在缠绕到芯模上之前, 需要分别存在于两个相互平行的平面内; 这一点是为了满足两绕丝嘴的纤维缠绕张力在径向的分力方向相反这一要求的。

图4是双绕丝嘴与芯模的相互位置的截面图。

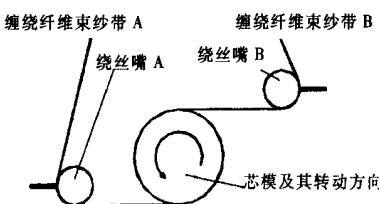


图4 双绕丝嘴与芯模的相互位置图

大多数操作者都习惯于使用右手, 为了便于观察和操作, 将缠绕丝嘴的右侧设计成开放型的结构形式, 将通过前绕丝嘴A的缠绕纤维束纱带靠近左侧的支撑板布置; 缠绕纤维的走向及双绕丝嘴的相互位置如图5所示。

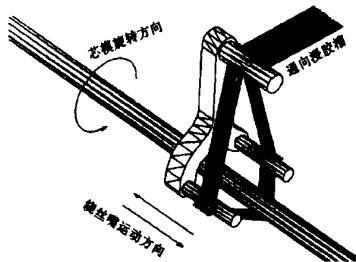


图5 缠绕纤维的走向及双绕丝嘴的相互位置示意图

#### 4.4 双绕丝嘴缠绕的芯模夹持

芯模的夹持方式对细长管的缠绕有很大影响, 双绕丝嘴缠绕模式虽然化解了纤维缠绕张力在径向的分力, 但纤维缠绕张力在轴向的分力依然存在; 当绕丝嘴自床尾向床头运动时, 细长管的细长芯模在此轴向分力的作用下, 有出现轴向压缩失稳现象的可能性。如果轴向压缩失稳现象出现, 在床尾仍采用顶尖支撑, 那么芯模在床尾的一端就有可能脱落。

对于细长管杆件而言, 其轴向的抗拉能力要远胜于抗压能力; 为了解决芯模在缠绕过程中受到的轴向压缩问题, 需要对芯模床尾端的夹持方式进行研究; 目前常用的夹持方式主要有以下两种, 一种是顶尖支撑; 另一种是采用液压系统对芯模保持一定的拉力。后一种夹持方式显然优于前者, 但也有一些缺憾。为此本文提出了尾端卡盘夹持方案; 尾端卡盘除了提供抵消纤维缠绕张力在轴向分力的拉力以外, 还对减小芯模自重挠度具有积极作用。因此本文推崇尾端卡盘夹持方案。

### 5 双绕丝嘴缠绕的缠绕线型

传统的缠绕线型设计方法简练、实用, 但对线型

设计的认识尚有待进一步提高, 其设计方法略显粗糙, 线型不够精确, 造成线型不精确的因素主要来自两方面: 一方面是来自机械装配和传动等客观因素的误差, 另一方面是来自设计思想的误差; 通过采取一些措施, 可以对第一类误差进行一定的减小或消除, 但本文不作研究, 下面主要研究如何消除缠绕线型设计方法中存在的误差, 实现精确缠绕。

#### 5.1 传统的缠绕线型

传统的缠绕线型设计, 是按下面步骤进行的: 首先计算出缠绕速比  $i$ , 然后将  $i$  近似地化为缠绕线型的标准形式; 即:

$$i = M + \frac{k}{n} \pm \frac{b}{n\pi D \cos \alpha} \quad (1)$$

式中:  $i$  为缠绕速比; 其含义为在缠绕小车往返一周所用的时间内, 芯模所转过的圈数; 此数值可以是一小数; 缠绕速比的计算方法在许多文献上均有介绍, 在此不再赘述。

$M$  为缠绕速比  $i$  的整数部分;

$n$  是人为引入的切点数, 称之为传统切点数; 其含义为在按缠绕规律进行缠绕过程中, 缠绕切点第一次出现位置相邻时, 缠绕小车已经往返的次数;

$\frac{k}{n}$  是根据缠绕速比  $i$  的小数部分而确定的真分数;

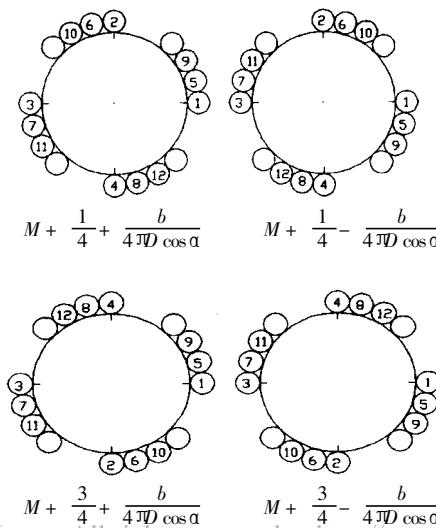
$D$  是芯模的直径;

$b$  是缠绕前进量; 即在缠绕时, 纱片彼此错过的宽度;

$\alpha$  缠绕角度;

$\pm$  指示纱片排布方向;

在研究缠绕线型时, 采用了切点法: 首先将芯模极孔或端部沿圆周方向均匀地分为  $n$  份, 然后根据  $k$  值进行排线研究。例如: 假设传统切点数为 4, 即  $n = 4$ , 则缠绕线型共有下列 4 种:



选定缠绕线型后, 缠绕速比也就确定了; 最后计算纱条数  $N$ , 纱条数是完成一个完整纵向缠绕, 缠绕小车控制的绕丝嘴往返的次数。其值的计算方法是从几何关系推导而来; 计算公式如下:

$$N = \frac{n\pi D \cos \alpha}{b} \quad (2)$$

纱条数为正整数才有实际意义, 因此要通过右侧的计算结果取整; 由此而引起的偏差可以通过缠绕角  $\alpha$  或缠绕前进量  $b$  的微调而得到解决; 这在工程上是允许的。

传统缠绕线型的设计方法, 在纱条数与缠绕线型之间没有建立直接的关系; 其次, 人为引入  $k/n$  项, 在某种意义上会造成不必要的误差; 第三, 玻璃钢细长管的缠绕需要更为精确的缠绕线型; 对于一般的缠绕制品, 传统的缠绕线型是完全满足工程要求的, 但对于玻璃钢细长管的缠绕来说, 由于纱条数较少, 缠绕线型略有变动, 将会对产品的质量有很大影响; 第四, 随着缠绕技术的进步, 进一步深入研究缠绕规律很有必要, 对指导实际工作具有重要意义。

## 5.2 精确缠绕线型

在实际缠绕工艺中, 对于一定直径的缠绕芯模, 当缠绕角一旦确定后, 一团纤维在芯模上的最大展纱宽度也就确定了; 缠绕前进量一般是根据缠绕纤维在芯模表面上的实际展纱宽度而确定的, 缠绕前进量的变动将直接影响到缠绕制品的表面平整性; 纤维缠绕角与缠绕前进量是缠绕中的两个重要工艺参数; 因此在缠绕线型的选择上, 应建立纤维缠绕角与缠绕前进量和缠绕线型的关系。

### 5.2.1 精确缠绕线型缠绕规律描述

通过对传统缠绕规律的研究, 认为对缠绕规律更为准确的描述应该是:

缠绕速比  $i$  必须满足下式:

$$i = M + \frac{K}{N} \quad (3)$$

式中:  $i$  为缠绕速比;

$M$  为缠绕速比  $i$  的整数部分;

$N$  为纱条数; 参阅式(2)进行计算;

$\frac{K}{N}$  为缠绕速比  $i$  的小数部分;  $K$  为小于  $N$  的整数, 且与  $N$  没有公约数。

只要缠绕速比  $i$  满足(3)式, 缠绕就可以进行; 当缠够纱条数后, 纤维就会均匀地布满芯模表面。

### 5.2.2 传统切点数及纱片排布方向

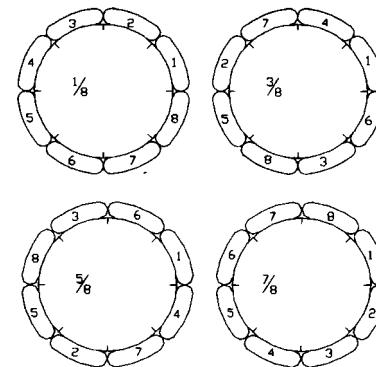
在前面对缠绕规律的描述中没有提及传统切点数和纱片排布方向问题, 可见用传统切点数描述缠绕线型不太确切, 实际意义并不大; 纱片排布方向对

描述缠绕线型也没有太大用处; 但它在缠绕某些形状的容器时却有一定的实际意义; 当容器两个封头的极孔直径不一致时, 对于目前使用的缠绕机而言, 缠绕纤维会在某端封头的肩部出现较大的滑移, 此时研究纱片排布方向将会使纤维的滑移得到缓解。

虽然传统切点数及纱片排布方向对缠绕规律的描述没有直接关系, 但为了进一步认识缠绕规律, 便于同传统的工艺参数指标相比较, 对传统切点数及纱片排布方向的求解就显得重要了。

参照传统的切点法对现在的缠绕线型进行研究; 首先将芯模的任一横截面的圆周分成  $N$  等份,  $N$  为纱条数; 然后根据  $K/N$  进行排列, 就可以将纱条数与传统切点数及纱片排布方向的关系表示出来。

例如:  $N = 8$ , 则有以下四种缠绕线型存在:  $1/8$ 、 $3/8$ 、 $5/8$ 、 $7/8$  纱片排布方式如下:



根据前面对传统切点数  $n$  所下的定义,  $1/8$ 、 $3/8$ 、 $5/8$ 、 $7/8$  缠绕线型的传统切点数  $n$  依次分别为 1、3、3、1。通过对其他类型的缠绕线型的研究, 得出了传统切点  $n$  与纱条数  $N$  的相互关系如下:

$$(1) 1 \leq n < N/2;$$

(2)  $n$  为与  $N$  没有公约数的正整数;

根据上面的两个条件, 对于一定的纱条数  $N$ , 可以判断出可供选择传统切点  $n$  的种类和大小; 从上图中可以看出缠绕的传统切点并不是等分圆周的。

根据传统切点数  $n$  的定义, 可以通过下面模运算公式解出对应于指定的  $K/N$  缠绕线型的确切传统切点数  $n$ , 确定出纱片排布方向:

$$(n \times K) \bmod N = \begin{cases} 1 & \text{方向为} "+" \\ N - 1 & \text{方向为} "-" \end{cases} \quad (4)$$

(4) 式中  $n$  为与  $N$  没有公约数的正整数, 且  $1 \leq n < N/2$ ;

参照传统缠绕线型的标准形式(1)和(2)式; 有下面恒等式:

$$\frac{K}{N} = \frac{k}{n} \pm \frac{1}{nN} \quad (5)$$

根据(5)式可以解出  $k$  值,  $k$  值是正整数。

在(4)、(5)两式中, 纱片排布方向的“±”号是统一的; 但在美国 EnTec 缠绕机的线型设计软件中, (4)式中指示纱片排布方向的“±”号刚好相反, 其他几项指标均相同; 这是由于他们所定义的“+”方向与我们定义的“+”方向相反的缘故, 这也说明美国 EnTec 缠绕机所采用的缠绕线型设计思想是与本文前面提出的精确缠绕线型设计思想是一致的。

### 5.2.3 缠绕前进量 $b$ 的变化趋势

随着缠绕工作的进行, 缠绕制品的壁厚逐渐增加, 芯模表面的线速度也会逐渐增大; 由此导致缠绕角慢慢变大; 缠绕角的变化可用下式计算:

$$\operatorname{tg} \alpha' = [1 + \frac{2t}{D}] \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

式中:  $\alpha'$  为制品壁厚增加后的缠绕角;

$t$  为制品的增加壁厚;

根据(2)式和(6)式, 可以推导出缠绕前进量的变化趋势表达式:

$$b' = \frac{1 + \frac{2t}{D}}{\sqrt{\cos^2 \alpha + (1 + \frac{2t}{D})^2 \sin^2 \alpha}} b \quad (7)$$

式中  $b'$  为制品壁厚增加后的缠绕前进量。

通过对(7)式的分析, 可以推断出随着制品壁厚的增加, 缠绕前进量是变大的。在工件的外层, 缠绕纤维之间会有“分缝”现象出现, 靠简单地增加缠绕纱条数是不能解决问题的。

### 5.2.4 传统缠绕线型的误差

为了更深入认识传统缠绕线型与精确缠绕线型之间的差异, 需要对传统缠绕线型的误差进行讨论; 缠绕速比的误差表示如下:

$$\Delta i = \left| \frac{k}{n} \pm \frac{1}{nN} - \frac{K}{N} \right| \quad (8)$$

在(8)式中, 如果选择的  $n$ 、 $k$ 、“±”满足(5)式, 则  $\Delta i = 0$ ; 否则  $\Delta i \neq 0$ 。所以人为引入切点数会造成人为的误差混入。

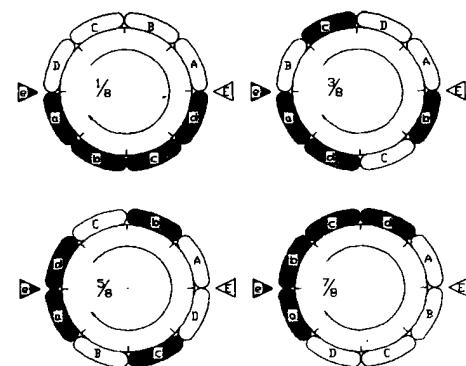
### 5.3 双绕丝嘴缠绕的条件

对于单绕丝嘴缠绕, 完成一个完整的纵向缠绕后, 工件的表面就会被两层缠绕角分别为  $\pm \alpha$  的纵向层所覆盖; 对于双绕丝嘴缠绕, 如果简单仿效单绕丝嘴缠绕的方法, 在一个完整的纵向缠绕完毕后, 就会在工件的表面留下四层纵向层。这样在成型工艺中进行的铺层设计中就多了一些不便。如何使双绕丝嘴缠绕和单绕丝嘴缠绕的铺层层次一致将是本节的研究重点。

首先假定双绕丝嘴与单绕丝嘴采用的缠绕前进量  $b$  是一样的; 第二, 通过双绕丝嘴的两束缠绕纤维

束纱带与芯模表面的初始两个接触点间的相位角相差  $180^\circ$ ; 第三, 相对于单绕丝嘴缠绕模式而言的纱条数  $N$  为偶数; 第四, 在双绕丝嘴缠绕中, 采用的纱条数为  $\frac{N}{2}$ 。当满足上述条件时, 双绕丝嘴缠绕和单绕丝嘴缠绕的铺层层次是一致的。

如:  $N = 8$ , 对于双绕丝嘴缠绕, 有以下四种缠绕线型存在:  $1/8$ 、 $3/8$ 、 $5/8$ 、 $7/8$ , 纱片排布方式如下:



在上图中,  $e$  和  $E$  两个三角形分别代表双绕丝嘴缠绕的两个绕丝嘴,  $a, b, c, d$  与  $A, B, C, D$  分别表示两个绕丝嘴的纱片, 图中的箭头方向表示芯模旋转方向。

## 6 实践结果与结论

为了验证“双绕丝嘴缠绕”方案的可行性, 将美国 EnTec 缠绕机上的单绕丝嘴改造成为双绕丝嘴, 在该缠绕机上对直径为 50mm 的芯模进行了排线试验; 试验结果令人满意。证明“双绕丝嘴缠绕”方案是切实可行的。

通过本文前面对缠绕规律的分析和认识, 有以下几点体会:

- ①缠绕中的传统切点并不是等分圆周的;
- ②人为引入切点数会造成人为的误差混入;
- ③当工件直径增加, 缠绕前进量也在增加, 单靠增加纱条数是不能将纤维均匀布满芯模表面的;
- ④用传统的切点法描述缠绕线型不够确切, 应该舍弃; 对于确定的速比  $i$ , 用纱条数作为描述缠绕线型的特征参数较为确切和简练;
- ⑤精确缠绕线型缠绕规律的描述简明扼要, 较传统的缠绕规律描述更为确切。对简化缠绕线型设计方法具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 玻璃钢工艺学, 北京: 中国建筑工业出版社, 1979
- 2 玻璃钢机械与设备, 北京: 中国建筑工业出版社, 1979
- 3 娄小杰. 纤维复合材料, 1999, 1: 15~18