

防海水浸蚀超大型玻璃钢管缠绕制备工艺研究

王虎¹ 李波¹ 张英武² 曾严² 丁智远² 刘吉平^{1*}

(1 北京理工大学 北京 100081 2 冀州市中意复合材料有限公司 053200)

目前采用的工艺是将连续纤维经过浸胶后,按照一定规律缠绕到芯模上,然后在加热或常温条件下固化的纤维缠绕成型,根据缠绕时树脂基体所处化学物理状态的不同而选定具体的工艺方法。缠绕成型工艺主要有干法、湿法及半干法三种。

1 纤维缠绕工艺

1) 缠绕成型工艺

(a) 干法缠绕成型工艺 在玻璃纤维往芯模上缠绕前由专用设备制成预浸渍带。然后卷在特制的卷盘上待用。使用时使预浸渍带软化,缠绕在芯模上。干法缠绕工艺制品质量较稳定,可以较严格控制纱带的含胶量和纱带尺寸,可以得到质量较高的制品。干法缠绕可以大大提高缠绕速度,缠绕速度可达 100~200m/min,缠绕设备干净,并容易实现自动化控制。因而这种缠绕方法发展很快。但这种工艺方法,要求使用的固化剂在胶纱烘干时不应升华或挥发。由于胶纱需要烘干和络纱,因此缠绕设备比较复杂,投资较大。

(b) 湿法缠绕成型工艺 湿法缠绕是将玻璃纤维经集束,浸胶后在张力控制下直接缠绕在芯模上,然后固化成型的工艺方法。此法所需设备比较简单,对原材料要求不严,便于选用不同材料,且比较经济。由于纱带浸胶后马上缠绕,对纱带的质量不易控制和检验,同时胶液中尚存在大量的溶剂,在固化时易产生气泡,缠绕过程的张力也不易控制。这种方法的最大缺点是缠绕过程的各个环节如浸胶辊,张力控制辊等经常需要人工维护,不断刷洗,使之保持良好状态。一旦在各辊上发生纤维缠结,就将影响整个缠绕过程的正常进行。

(c) 半干法缠绕成型式工艺 半干法工艺与湿法相比,增加了烘干工序。与干法相比,半干法缩短了烘干时间,降低了胶纱的烘干程度,使缠绕过程可以在室温下进行。这样既除去了溶剂,又提高了胶纱缠绕速度。减少了设备,提高了制品质量。

2) 3 种缠绕成型工艺特性的比较

*通讯联系人: Email-liujp@bit.edu.cn

根据我们所制管道的需求，选用干法缠绕工艺，同时为了兼顾今后的发展，所选用的缠绕设备还应具有湿法缠绕之特点。缠绕玻璃钢除具有一般玻璃钢制品的优点外，与其他工艺方法生产的玻璃钢制品比较，具有以下特性。

a、比强度高 缠绕玻璃钢的比强度可以超过钛合金。一般来说，玻璃纤维缠绕压力容器重量比同体积的钢质容器轻 40%~60%。纤维缠绕玻璃钢的拉伸强度可达 392MPa 以上，这样高的强度主要由缠绕玻璃钢的结构和工艺决定。

① 玻璃纤维本身强度高，且应用无捻粗纱直接缠绕成型，减少了退并捻纺等工序，因而使玻璃纤维的强度大大减少。

② 缠绕成型避免了布纹的交织点和短玻璃纤维末端的应力集中，对制品强度有利。

③ 缠绕成型的纤维方向可自由决定，只要适当选择玻璃纤维的取向和数量，产品可实现等强度结构，充分发挥材料的效率。

④ 缠绕成型玻璃钢的玻璃纤维含量可高达 80%。玻璃纤维的含量高，则玻璃钢强度高。

b、质量轻, 可靠性好 近年来的研究表明，材料固有的韧性或缺口敏感性限制了材料的可靠性。金属的韧性随强度的提高而降低。减轻质量（就必须增加强度）和改善可靠性（就必须增加韧性）是互相矛盾的两方面，缠绕玻璃钢适当地平衡它们。

c、缠绕玻璃钢质量高而稳定，且生产率高，便于大批量生产，这是因为缠绕工艺容易实现机械化和自动化。缠绕成型是目前玻璃钢制品成型方法中机械化、自动化程度较高的方法之一。

d、成本低 缠绕玻璃钢所用增强材料，大多是连续纤维、无捻粗纱和无纬带等材料。

虽然在优化的缠绕工艺条件下能制造出性能优良的缠绕制品，但缠绕玻璃钢及缠绕工艺有其局限性。

① 缠绕玻璃钢的弹性模量低，约为钢的十分之一，制品刚度低，易变形。

② 层间剪切强度低。

③ 各向异性，纤维缠绕结构通常是设计成沿主应力方向缠绕纤维的。但是，常常由于实际纤维缠绕轨迹不是沿主应力方向，缠绕线型不稳定，以及由扭转、弯曲、振动、热变形等所产生的非轴向应力等原因，造成缠绕结构的应力并不常

常在纤维轴线上。所有这些附加应力，引起纤维周围未增强的树脂区受到过大应力，从而使纤维缠绕结构过早出现层间剪切破坏。为了避免上述破坏的发生，可掺加晶须作为纤维缠绕结构的补充增强。即在湿法缠绕过程中，在纤维缠绕前把晶须加入到树脂中，用以填充未有纤维支撑区域。用干法缠绕时，可将晶须撒在应力特别高的区域。晶须不仅增强了纤维间隙，同时也使树脂基体的弹性模量和强度得到提高。

④ 缠绕玻璃钢的延性小，消除开孔或开口周围应力集中的能力较小。为了连接配件或开口而进行的切割、钻孔或开槽都会使纤维缠绕结构的强度受到损失。因此结构设计要合理，在制品固化后，尽量不再进行切割和钻孔等破坏性机械加工。在切口或连接处，必须用模压塑料或金属等嵌入物进行局部加强。或者在高剪切应力区采用晶须增强，以弥补切口或钻孔的不利影响。

⑤ 目前缠绕工艺通常只适应于制造圆柱体、球体及某些正曲率回转体产品，对负曲率回转体因纤维在其表面易滑动，一般不易采用缠绕法制造。对于非回转体制品，缠绕规律及缠绕设备比较复杂。

⑥ 纤维缠绕必须借助缠绕机才能实现，因而缠绕成型的投资较大。为了提高纤维缠绕制品的强度和精度，降低成本，必须实现成型工艺机械化和自动化，并要求有高精度缠绕机、高质量芯模、专用固化炉等。

(2) 缠绕工艺流程

如前所述，纤维缠绕工艺有干法、湿法及半干法三种。对于具体制品空间采用哪种成型工艺方法，要根据制品设计要求、设备情况、原材料性能及产品批量等确定。缠绕工艺过程，一般由下列各工序组成：芯模或内衬制造、胶液配制、纤维烘干和热处理、浸胶、胶纱烘干、缠绕、固化、检验、修正等。

缠绕工艺流程如图 1 所示：

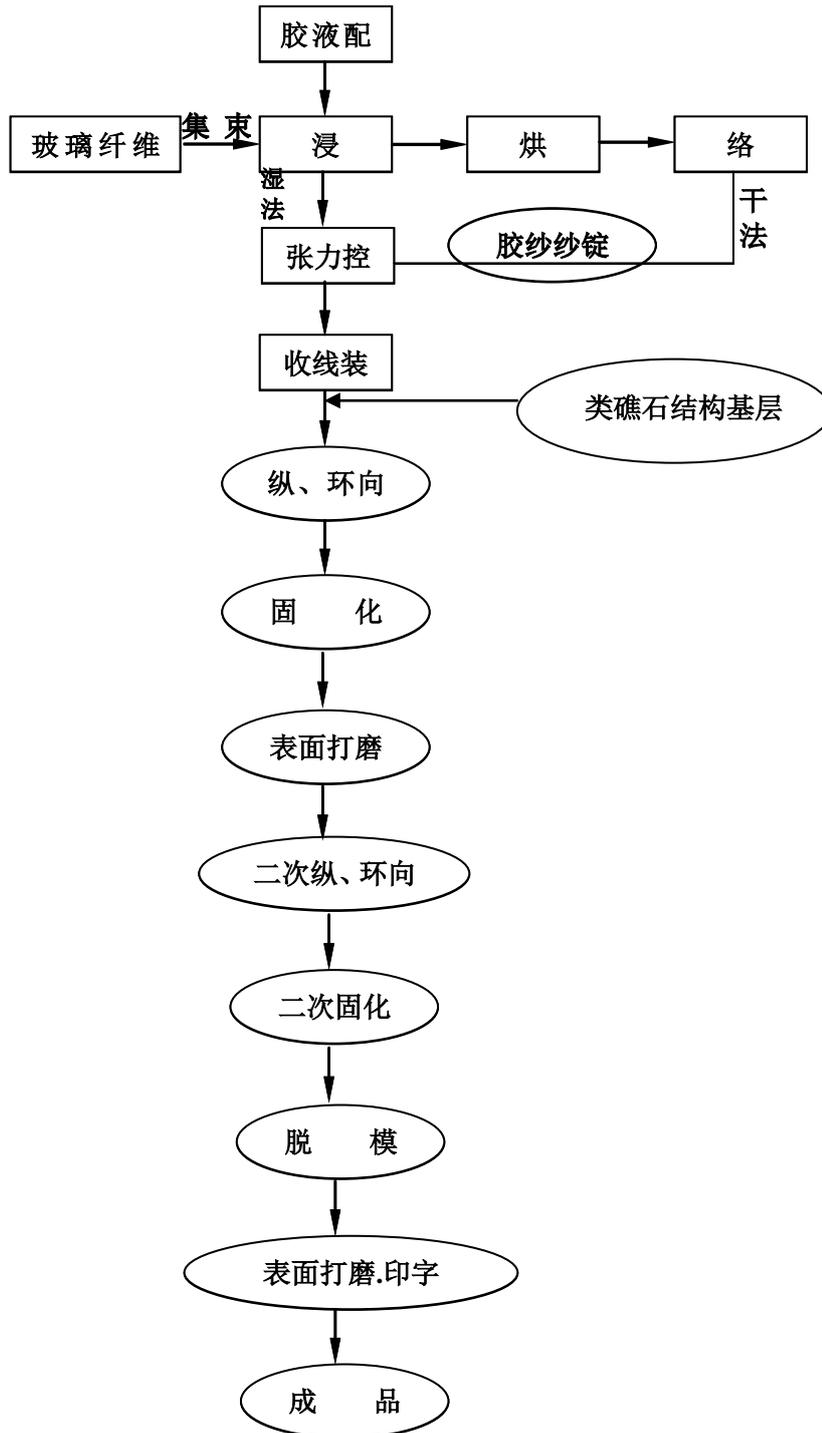


图1 ND3200mm~9000mm 玻璃钢管缠绕工艺流程图

(3) 缠绕工艺参数选择

选择合理的缠绕工艺参数是充分发挥原材料特性、制造高质量缠绕玻璃钢制品的重要条件。影响缠绕玻璃钢制品性能的主要工艺参数有：玻璃纤维的烘干和热处理；玻璃纤维浸胶，胶液含量及分布，胶纱烘干；缠绕张力制度；纱片缠绕

位置及纱片宽度的变化；固化制度；缠绕速度；环境温度等。把每一个参数孤立出来研究是很困难的，这些因素多半是紧密地联系在一起。

1) 纤维的烘干和热处理 玻璃纤维表面含有的大量水分，不仅影响树脂基体与玻璃纤维的粘合，同时将引起应力腐蚀，并使微裂纹等缺陷进一步扩展，从而使制品强度和耐老化性能下降。因此，玻璃纤维在使用前最好经过烘干处理。在湿度较大的地区和季节烘干处理更为必要。纤维的烘干制度视含水量和纱锭大小而定。通常，无捻纱在 60~80℃烘 24h 即可。

当用石蜡乳剂型浸润剂浸润的玻璃纤维缠绕玻璃制品时，使用前需除去润滑油，以提高纤维与树脂基体的粘接力。

2) 原纱浸胶情况、胶液含量及分布和胶纱烘干 含胶量的高低及分布对玻璃钢制品性能影响很大，一方面直接影响对制品质（重）量和厚度的控制。另一方面含胶量过高，玻璃钢制品的复合强度降低。含胶量过低，制品空隙率增加，将使制品气密性、防老化性能及剪切强度下降，同时也影响纤维强度的发挥。此外，胶液含量变化过大会引起不均匀的应力分布，并在某些区域引起破坏。因此，纤维浸胶过程必须严格控制。含胶量的大小，须根据制品的具体使用要求而定。缠绕玻璃钢的含胶量一般为 17%~25%（质量分数）。制品爆破强度随树脂含量变化情况见表 1。从该表可看出，最佳树脂含量（质量分数）约为 20%。

表 1 爆破压力与树脂含量关系

树脂质量含量/%	15	17.5	20	25
复合材料应力/MPa	-	-	1.37~1.40	1.12~1.30
环向应力/MPa	-	-	3.15~3.36	2.63~3.05
纵向应力/MPa	2.38~2.56	2.80	2.98~3.12	2.42~2.80

纤维含胶量是在纤维浸胶过程中进行控制的。浸胶过程可分为两个阶段：首先是将胶液涂敷在增强材料表面；之后胶液向增强材料内部扩散和渗透。这两个阶段常常是同时进行的。在缠绕工艺中通常采用浸渍法和胶辊接触法两种浸胶方法。

浸渍法是通过挤胶辊压力大小来控制含胶量。胶辊接触法是通过调节刮刀与胶辊的距离，以改变胶辊表面胶层厚度来控制含胶量。

在浸胶过程中，影响纤维含胶量的因素很多：纤维规格、胶液粘度、胶液浓

度、缠绕张力、缠绕速度、刮胶机构，操作环境温度及胶槽液面高度等。上述影响因素中，以胶液粘度、缠绕张力及刮胶机构最重要。

为了保证玻璃纤维浸渍透彻，树脂含量必须均匀并使纱片中的气泡尽量逸出，要求粘度低，通常控制在 $0.35\sim 1.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ 范围内。加热和加入稀释剂可以有效控制胶液粘度。但这些措施都带来一定的副作用，提高温度会缩短树脂胶液的使用期；加入溶剂，若在成型时溶剂去除不净会在制品中形成气泡，影响制品强度。

玻璃纤维浸胶后，要经过烘干工序。烘干的目的，一方面是除去树脂系统中的溶剂，使在缠绕成型过程中不起泡，保证制品质量另一方面又可使树脂初步凝胶，部分地变为“B阶”。烘干工序对于干法缠绕是必不可少的。对于湿法缠绕，进行一定程度的“烘干”也是有益的。胶纱经烘干后，可以提高缠绕制品强度。其下表的实验结果就说明这种情况。

表 2 烘干温度对环形试件性能的影响

烘干温度/ ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)	弯曲强度/MPa	树脂含量/%	密度 (g/cm^3)	试件破坏情况
140 $^{\circ}\text{C}/\sim 36\text{s}$	678	23.3	2.02	分层破坏
160 $^{\circ}\text{C}/\sim 36\text{s}$	835	21.6	2.03	部分分层破坏
180 $^{\circ}\text{C}/\sim 36\text{s}$	1016	23.1	2.06	正常破坏
200 $^{\circ}\text{C}/\sim 36\text{s}$	1007	22.0	2.08	正常破坏
220 $^{\circ}\text{C}/\sim 36\text{s}$	951	20.6	2.00	正常破坏

某些树脂系统的固化剂在高温下升华现象严重（例如邻苯二甲酸酐），用这种树脂系统浸渍过的胶纱不适于烘干处理。否则将由于固化剂的升华损失，很难保证树脂系统各组分之间的配比，烘干后会造成制品强度下降。

烘干温度，随树脂系统不同而异，必须恰当选取，若温度过低，溶剂不易挥发；温度过高，将使树脂凝胶过快。当溶剂挥发所需时间小于树脂凝胶时间时，溶剂来不及除去，树脂就已凝胶，这样也达不到烘干目的。

3) 缠绕张力 缠绕张力，是缠绕工艺的重要参数，张力大小、各束纤维间张力的均匀性，以及各缠绕层之间纤维张力的均匀性，对制品质量影响极大。缠绕张力是指纤维缠绕到内衬上以前的实际张力，因此张力大小的测定装置应距内衬最近的地方安装。

a、对制品机械性能的影响 研究表明，玻璃钢制品的强度和疲劳性能与缠绕张力有密切关系。张力过小，制品强度低，内衬所受压缩应力较小，因而

内衬在充压时的变形较大，其疲劳性能就差。张力过大，则纤维磨损增大，使纤维的强度损失加大，制品强度下降。此外，过大的缠绕张力还可能造成内衬失稳。

缠绕张力能使树脂产生预应力，从而可提高树脂抵抗开裂的能力。纤维缠绕内压力容器承压后，开裂都首先在垂直纤维方向的树脂基体开始。因为垂直纤维方向的允许变形（破坏变形约为 0.1%~0.25%）比顺纤维方向的允许变形（破坏变形约为 2%）约低十倍。预加张力的螺旋缠绕纤维可使与其相邻的环向缠绕纤维间的树脂产生预应力，而环向缠绕纤维同样亦可使螺旋缠绕纤维间的树脂基体产生预应力。从而提高了垂直纤维方向的树脂基体的拉伸强度。亦即提高了垂直纤维方向的允许变形，故增强树脂基体抵抗开裂的能力。缠绕张力与树脂开裂性能以及试体强度的关系见表 3 和表 4 所示。

表 3 预加张力与开裂点的关系

张力/%（占纤维破坏荷载的百分数）	起始开裂时刻	
	压力/MPa	垂直纤维方向变形/%
5	0.8	0.12
10	1.2	0.18
18	1.75	0.24

表 4 缠绕张力对环形试件性能的影响

张力/N	弯曲强度/MPa	拉伸强度/MPa	树脂含量/%	密度/(g/cm ³)
90	9.37	870	22.6	2.07
60	925	821	23.9	1.96
10	825	791	34.3	1.84

各束纤维之间张力的均匀性，对制品性能影响也很大。假如纤维张紧程度不同，当承受荷载时，纤维就不能同时承力，而可能招致各个击破，使纤维强度的发挥和利用大受影响。从表的数据可以看出，各纤维束所受张力的不均匀性越大，制品强度越低。因此，在缠绕玻璃钢制品时，应尽量保持束间、束内纤维间张力均匀。为此，应尽量采用低捻度、张力均匀的纤维，并应尽量保持纱片内各束纤维的平行。

为了使制品各缠绕层不至于在缠绕张力作用下出现内松外紧现象，应使张力逐层有规律地递减，以使内外各层纤维的初始应力状态相同，从而在容器充压后，内外层纤维能同时承受荷载。张力逐层有规律的递减常称张力制度。

表 5 缠绕张力的均匀性对环形试件弯曲强度的影响

张力/N	弯曲强度/MPa	张力/N	弯曲强度/MPa
16 根纤维中, 8 根均匀受力共 30N, 8 根均匀受力共 5N	579	16 根纤维中, 8 根均匀受力共 15N, 8 根均匀受力共 5N	638
		16 根纤维中, 全部均匀受力共 8N	704

b、对制品密实程度的影响 缠绕在曲面上的玻璃纤维, 在缠绕张力 T_0 作用下, 将产生垂直于芯模表面的法向力 N , 在工艺上称为接触成型压力。其值可由下式求得:

$$N = T_0 \sin^2 a / \gamma$$

式中: T_0 ——缠绕张力, kN/cm ;

γ ——芯模半径, cm ;

a ——缠绕角。

可见, 使制品致密的成型压力与缠绕张力成正比, 与制品曲率半径成反比。成型压力 (N) 与体积密度 (H_0) 的关系。

根据 H_0 的预定值通过 $N \sim H_0$ 曲线可确定出所需的成型压力值, 进而可求得缠绕张力:

$$T_0 = N_r / \sin^2 a$$

可以看出, 对于干法生产, 为了生产密实的制品, 必须控制缠绕张力。对于湿法生产, 树脂粘度对所需预定密实度 H_0 的结构采用的成型压力有很大影响。粘度越小, 所需要的成型压力就越小。或者说, 在固定的成型压力 N 下, 可使玻璃钢制品具有较高的密度 H_0 。因此, 为了确定成型接触压力的有效值, 可根据实验曲线求出树脂胶液稠度的校正数, 即 $N = N_0 K_\mu$ 。

另外, 纤维缠绕钢的空隙率是影响其性能的重要因素, 通过实验得到剪切强度与空隙率的关系式:

$$\tau = 9600 - 785V$$

式中: τ ——层间剪切强度;

V ——空隙率。

空隙率是随缠绕张力而变化的。张力增大, 空隙率降低。这也是增大缠绕张力可以提高制品强度的一个重要原因。

c、对含胶量的影响 缠绕张力对纤维浸渍质量及制品含胶量的大小影响非常大。随着缠绕张力增大，含胶量降低。表 6 的实验数据说明这一点。

表 6 缠绕张力对含胶量影响

单纱张力/g	含胶量/%	单纱张力/g	含胶量/%
0~5	33.88	15~20	26.20
5~10	30.38	25~30	24.05

在多层缠绕过程中，由于缠绕张力的稜向分量——法向压力 N 的作用，外缠绕层将对内层施加压力。胶液因此将由内层被挤向外层，因而将出现胶液含量沿壁厚不均匀——内低外高的现象。采用分层固化或预缠绕，可减轻工中避免这种现象。

此外，如果在浸胶前施加张力过大，将使胶液向增强材料内部空隙扩散渗透增加困难，从而使纤维浸渍质量不好。

最佳缠绕张力并非一成不变的，它依芯模结构、增强材料强度、胶液粘度及芯模是否加热等具体情况而定，一般其极限值为 0.11~0.45kg/股。

d、施加张力的有关问题 纤维张力可在纱轴或纱轴与芯模之间某一部位施加。前法比较简单但在纱团上施加全部缠绕张力会带来如下困难：对湿法缠绕来说，纤维的胶液浸渍情况不好，且在浸胶前施加张力，将使纤维磨损严重而降低其强度。张力越大，纤维强度降低越多。对于干法缠绕来说，如果预浸纱卷装得不够精确，施张力后，易使纱片勒进去。一般认为，湿法缠绕宜在纤维浸胶后施加张力，而干法宜在纱团上施加张力。

在纤维通过张力辊的时候，最好用梳子将各股纤维分开，以免打捻、发皱、曲折和磨损，张力辊直径太小会引起纤维磨损，降低机械强度，张力辊最小直径约为 50mm。张力辊过多，纤维要多次弯曲，也会降低强度。

4) 纱片宽度的变化及缠绕位置 纱片宽度不均匀会使纱片间隙的地方成为富树脂区，从而形成结构上的薄弱点。精确控制纱片宽度是很难做到的。它主要随缠绕张力而变化。纱片宽度通常为 15~35 mm.

纱片缠绕位置是缠绕机精度和芯模制造精度的函数。容器上敏感的部分是封头筒体连接处和封头部分。对于测地缠绕的等张力封头，由于普通环链式缠绕机

精度不够，封头缠绕的纤维路径不是测地线，即使不滑线也难于实现封头缠绕的等张力状态。而对于其他形式的封头缠绕如平面缠绕，则可能由于滑线，致使纤维偏离理论位置而破坏了封头的等张力状态。

如果纱带缠绕轨迹不是封头曲面的测地线，则纱带在缠绕张力作用下，一方面要被拉成曲面上两点间最短的线，一方面要向测地曲率不为零的方向滑动，这就是滑线的原因。增大曲面的摩擦力，如采用预浸纱缠绕，因有粘性，可减少滑线的可能性。

5) 缠绕速度 缠绕速度通常是指纱线速度，应控制在一定范围。纱线速度过小，生产率低；纱线速度过大，受到下列因素限制：

对湿法缠绕，纱线速度受到纤维浸胶过程的限制。当纱线速度很大时，芯模转速很高，树脂胶液在离心力作用下会从缠绕结构中向外迁移和溅洒。纱线速度最大不宜超过 0.90m/s。

对干法缠绕，纱线速度主要应保证预浸纤维的树脂通过加热装置后能熔融到所需粘度和避免被吸入玻璃钢结构中的可能性。

此外，由纱线速度、芯模速度及小车速度（丝嘴装在小车上）所构成的速度矢量三角形中，可看出小车速度 $V_{车}=V_{纱}\cos\alpha$ 是有限制的。因为小车是往复运动的，小车在行程两端点处加速度最大，因而惯性冲击必定很大，特别小车重量较大时更甚，同时，车速过大，运行不稳，易产生颠簸振动，影响缠绕质量。小车速度最大不宜超过 0.75m/s。

6) 环境温度 树脂系统的粘度随温度降低而增大。为了保证胶纱在制件上进一步浸渍，要求缠绕制品周围温度高于 15℃。用红外线灯加热制件表面，使其温度在 40℃左右。这样可有效提高产品质量。

7) 固化温度 玻璃钢制品的固化，有常温固化和加热固化两种。这里讨论的是加热固化制度，包括加热的温度范围、升温速度、恒温温度及保温时间。固化制度是保证制品充分固化的重要条件，直接影响玻璃钢制品的物理性能和机械强度。

a、加热固化 随着聚合（固化）过程的进行，聚合物的分子量增大，分子运动困难，因此加加热到较高温度下有利于反应。加热固化可使固化反应较为完全，加热固化比常温固化的制品强度至少可提高 20%~25%。此外，加热固化可提高化学反应速度，缩短固化时间，缩短生产周期，提高生产力。

b、保温 保温一段时间，可使树脂充分固化，产品内部收缩均衡。保温时间不仅与树脂系统的性质有关，而且还与制品质量、形状、尺寸及构造有关。一般制品热容量大，保温时间要长。

c、升温速度 升温阶段要平稳，升温速度不应太快。升温速度太快，由于化学反应激烈，溶剂等低分子物质急剧逸出而形成大量气泡。

当低分子变成高分子或液态转变成固态时，体积要收缩。如果升温快，由于玻璃钢热导率小，各部分温差必然很大，因而各部位的固化速度和程度亦必然不一致，收缩不均衡，产生的内应力会使制品变形或开裂，形状复杂的厚壁制品更甚。通常采用的升温速度为 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

d、降温冷却 降温冷却要缓慢均匀。在玻璃钢结构中，顺纤维方向与垂直纤维方向的线膨胀系数相差近 4 倍，因此，制品从较高温度若不缓慢冷却，各部位各方向收缩就不一致，特别是垂直纤维方向的树脂基体将承受拉应力（温度应力），而玻璃钢垂直纤维方向的拉伸强度比纯树脂还低，当温度应力大于玻璃钢强度时，就发生裂破坏。

e、固化温度的确定 一般来讲，树脂系统在一定时间内不可能达到 100% 的固化，通常固化程度超过 85% 以上就认为制品已经固化完全，可以满足力学性能的使用要求。但制品的耐老化性能、耐热性等尚未达到应有的指标，在此基础上，提高玻璃钢的固化程度，可以使玻璃钢的耐化学腐蚀性、热变形温度、电性能和表面硬度提高，但是冲击强度、弯曲强度和拉伸强度稍有下降。因此，对不同性能要求的玻璃钢制品，即使采用相同的树脂系统，固化程度也不应完全一样。如要求高温使用的制品，就应有较高的固化度；要求高强度的制品，有适宜的固化度即可。固化程度太高，反而会使制品强度下降。考虑兼顾制品的其它性能如耐腐蚀、耐老化等，固化程度也不应太低。

对各种树脂配方没有一个广泛适用的固化温度，只能根据不同树脂配方、制品的性能要求，并考虑到制品的形状、尺寸及构造情况，通过实验确定出合理的固化温度，才能得到高质量的制品。

从工艺角度看，随容器壁厚增加，内外质量不均匀性增大。特别是湿法缠绕。由于缠绕张力的作用，胶液将由里向外迁移，因而使树脂含量沿壁厚不均匀，在大约 6 mm 厚的容器上含胶量变化可高达 8%。同时内层树脂系统中的溶剂向外挥发困难，易形成大量气泡。采用分层固化，纤维在容器中的位置能及时得到固定，

不致使纤维发生皱褶和松散。树脂也不会层间流失，从而减缓了树脂含量沿壁厚不均的现象，并有利于溶剂的挥发，保证了容器内外质量的均匀性。

(4) 缠绕成型玻璃钢应用

由于缠绕玻璃钢具有许多优点，因此，在工业、军工产品中获得了比较广泛的应用。特别是一些压力容器，大部分采用缠绕工艺生产。

a、玻璃钢化工管道 纤维缠绕玻璃钢管用于油田、炼油厂和一般化工厂，用来输送石油、水、天然气和其他化工流体。它可部分替代不锈钢用。具有防腐、轻便、持久和维修方便的特点。

b、玻璃钢大型贮罐和铁路罐车 玻璃钢大型贮罐和槽车来贮动酸类、碱类、盐类及油类介质，它具有重量轻、耐腐蚀和维修方面等优点。

c、玻璃钢压力容器 纤维缠绕玻璃钢压力容器是从 1950 年开始使用的，压力容量有受内压的（如各种气瓶）和受外压的（如鱼雷）两种。目前压力容器应用很广泛，如火箭、飞机、舰艇等运载工具，以及医疗等方面都有应用。

d、军用产品 用玻璃纤维缠绕成型火箭发动机壳体、火箭发射管及雷达罩等产品。

2 ND3200mm 玻璃钢管缠绕成型模具

玻璃钢缠绕制品，尤其是大口径结构尺寸的管道，在其成型过程中，为使产品获得一定的结构尺寸及成型工艺的要求，必须采用一个与内腔尺寸一样的芯模。具有内衬的产品，当它有足够刚度和强度以满足缠绕工艺要求时，就不必另加芯模。

1) ND3200mm 玻璃钢管输水管芯模设计和结构特点

芯模设计必须根据产品在整个成型过程中的要求、制作工艺及退模方式、经济性和生产可行性而定，应达到如下要求。

(1) 芯模在工作期间要承受各种荷载。如自重荷载、缠绕张力、固化过程中的热应力及机加工过程中的荷载。在这些荷载作用下，要求芯模能够保证产品的结构尺寸及满足成型性能的要求。因此，芯模要有足够的强度和刚度。

(2) 当缠绕尺寸要求严格时，对具有回转曲面的产品，芯模对轴线的同心度，直线段对母线的直度以及各截圆的椭圆度等，必须满足产品对芯模提出的精度要求。

(3) 芯模成型式工艺要简单，周期短，材料来源广，价格便宜。

(4) 当产品制成后, 要求芯模能顺利地清除干净, 不影响或较小影响产品质量。另外, 有时缠绕工艺对芯模有特殊要求, 如干法缠绕要求芯模预热, 因而在芯模里要预埋加热元件。

芯模根据其结构特点可分为: 整体易碎芯模、整体易熔芯模及可卸式组合芯模。在缠绕 ND3200 mm 输海水玻璃钢管拟采用可卸式组合钢芯模。

2) 芯模结构形式和材料的选取

可用于制作芯模的材料较多, 制作方法及结构形式也多种多样。芯模的取材和结构形式必须满足产品对芯模的主要要求, 同时兼顾其他方面, 生产输海水管道和各种配件可用到如下材料结构的芯模。

(1) 隔板式石膏空心芯模 隔板式空心石膏芯模是由芯轴、预制石膏封头、预制石膏隔板、空心筒及石膏面层等组合而成。其优点: ① 结构轻巧, 设备简单; ② 成型工艺比较简单; ③ 较易拆除; ④ 能满足较高的精度要求, 特别对不宜进行机加工的大型制品更为适宜; ⑤ 材料来源广, 价格低廉。要想满足高的强度要求, 隔板必须增多, 芯模封头、空心管及隔板必须加强, 连接亦必须加强。要达到更高的精度要求必须进行切削加工。其缺点: ① 加工周期长, 重复使用次数少; ② 加热固化时, 石膏脱水对产品质量有一定的影响。

这种芯模的使用范围: ① 固化温度 $<250^{\circ}\text{C}$; ② 用于精度要求较高的大中型玻璃钢制品; ③ 用于内形较为复杂的玻璃钢制品。

此芯模可用于制取输海水管道的弯头和三通以及海水淡化时的各类节门等。

(2) 金属组合芯模 当玻璃钢制品批量较大, 采用金属组合芯模较为合宜。其优点: ① 可反复使用; ② 固化温度不受限制, 固化时金属芯模温度均匀, 有利于提高玻璃钢制品的质量; ③ 制品内表面致密光滑。这种芯模对于不收口的管形、环形等制品最为适用。对于有封头的玻璃钢容器, 芯模机械加工量大, 特别是对于高精度的产品, 芯模加工困难, 装配复杂, 拆模须格外小心。

这类芯模在国内众多工厂均可加工, 河北中意、华成等厂加工的芯模能达到 ND3200mm 输海水管道缠绕成型工艺要求。

(3) 聚乙烯醇掺砂子组合芯模 在圆筒表面涂聚乙烯醇掺砂子。其比例通常采用: 聚乙烯醇 1g, 砂 1g, 水 10mL。芯模封头曲线用样板刀来保证。烘干制度必须根据表面砂层厚度而定。但烘干温度不得超过 160°C , 否则聚乙烯醇开始脱水导致制品成型完毕后, 难以用水溶解, 脱换困难。其优点: 结构简单、尺寸

变动灵活，强度刚度较好，脱模较易。缺点：精度较差，面层制作较困难。这种芯模适用于固化温度 $<150^{\circ}\text{C}$ 的中小型缠绕件。

(4) 木-玻璃钢组合芯模 对于强度和精度要求不高的大型制品，采用这种芯模较为适宜，一般用方木和胶合板作成筒体，采用手糊法制成玻璃钢封头。此封头作为玻璃钢制品的一部分。

(5) 金属-玻璃钢芯模 芯模的支撑是用金属制作，封头和筒体表面用玻璃钢制成。然后装配而成。这种芯模适用于强度和精度要求不高的制品。

(6) 石膏-砂芯模 将石膏与砂按 1: 8 的配比混合，加入 20%的水，混合均匀，然后注入模子内。待水分干燥后得到坚硬的芯模。当产品制成后，灌入水搅拌，即可将石膏和砂清除。

(7) 蜡芯模 当缠绕网格结构的制件及有助加强的夹层结构制件时，可用蜡芯模。这种蜡是用蜂蜡和石蜡混合而成，熔点为 74°C ，制作过程：在产品内壳缠好后，先安置加强肋。然后把熔化的蜡倒入内壳上，待整个内壳装满后，即可缠绕外壳。当产品缠绕完毕并固化后，加热，蜡便融化从预留开孔处淌出。这种芯模适用于不宜机械脱模，精度要求不高，常温固化的小型制品。

根据我们所生产的输水管的特点，拟选用钢模具。具有稳定的结构尺寸能保证缠绕精度要求。并选用隔板式石膏空心模具以缠绕弯头和三通等。

3 缠绕玻璃钢的原材料选择

缠绕玻璃钢所用的原材料，主要有玻璃纤维及其织物和粘结剂系统两大类。原材料优劣及工艺性能的好坏，将会直接影响制品的质量。因此必须根据输海水管既要防海水的腐蚀又要防藻类的粘附等特点要求，选择相应的原材料。

(1) 玻璃纤维及其织物

玻璃纤维及其织物是缠绕制品的主要承力材料，制品的强度主要取决于纤维的强度，缠绕制品对纤维的选用原则：具有较高的强度和弹性模量；对粘结剂有较好的浸润性和结合力；有良好的工艺性，在缠绕成型中不起毛、不断头，同一束玻璃纤维中各股之间的张紧程度均匀，具有良好的贮存稳定性等。

用于输海水的大型玻璃钢缠绕工艺的玻璃纤维，选用无捻纤维。对应力环的强度来讲，无捻纱优于有捻纱。虽然无捻纱较差，使用中易发生松散、起毛、张力控制困难，不利于成型等工艺控制方面带来一定难度，但可控，且生产成本较低。

(2) 粘结剂系统

缠绕输海水用玻璃钢管树脂，对玻璃纤维应具有良好的粘结力和浸润性；具有较高的机械强度和弹性模量，伸长率应比玻璃纤维略高；具有良好的工艺性，如有较适宜的使用期及初始粘度，不太高的固化温度，溶剂易排除、毒性小等；具有一定的耐温性和良好耐老化性能；来源广泛，价格便宜等。可用于缠绕输海水管道的树脂，选用乙烯基树脂作为内层树脂；选取 196 树脂和 153, 154 树脂作中间层树脂，选取间苯基树脂作外层防护层树脂。

以下主要介绍缠绕玻璃钢所用的一种原材料，即无纬胶带原材料。

(1) 玻璃纤维 选用无碱玻璃纤维，支数和股数要根据产品要求而定。现采用的有 40^s、80^s 无捻粗纱。

一般认为玻璃纤维直径越小，其强度越大。但采用平行纤维制成的玻璃钢强度并非如此。曾以 40s、80s 两种纤维作对比，单丝强度 80s 大于 40s。但采用同样条件制成玻璃钢后，40s 纱缠绕制成的玻璃钢反而大于 80s 纱缠绕制成的玻璃钢。这可能是由于纤维直径加大，单位面积中纤维根数减少，各纤维平行情况较好，容易同时承载，因而单纤维的总强力被充分利用，因此对于平行玻璃纤维的缠绕玻璃钢制品，其强度与纤维直径成反比（在 3~15 μm 范围内），受纱集束状况及浸胶与张力的影响。据资料介绍，采用 14~15 μm 的纤维制成的玻璃钢，其总强度利用率可接近 100%；而使用直径 5~7 μm 的玻璃纤维时，只达到 40%。显然采用较粗纤维有利于降低成本，提高产品质量。

玻璃纤维在浸胶前应进行除湿处理。水分的存在将破坏玻璃表面状态，产生应力腐蚀，降低制品强度。玻璃纤维还需进行表面处理，以增强玻璃纤维和树脂的粘结性能。从而可充分发挥玻璃纤维的高强特性。

(2) 树脂 制造预浸渍无纬带目前主要用聚酯树脂和环氧树脂。其他类型如酚醛、有机硅等，均因需加压成型而不太适用。树脂的选用要考虑制品的性能和工艺等因素外，树脂胶液最好有明显的“B 阶段”，使纱带浸胶后不散不裂不粘，即成带性好。

聚酯-B 采用 308、307、304、3193 等聚酯单独或同 184 聚酯混用，选用过氧化二异丙苯作引发剂和少量的过氧化苯甲酰，以保证聚酯在较低温度下部分聚合。不饱和聚酯一般用苯乙烯作为交联剂，但在干法成型生产预浸渍无纬带工艺中，由于苯乙烯挥发性很大，耐热性差，多改为 DAP 作为交联剂。胶液配方如表

7 所示。

表 7 聚酯-B 胶液配方

3200mm	质量百分比%	组 分	质量百分比%
3200mm	50	过氧化二异丙苯 (DPO)	2
3200mm	50	过氧化苯甲酰 (BPO)	0.1~0.5
3200mm	20 (按树脂量计)		

(3) 无纬胶带的优点

① 预浸无纬带可以直接使用，使缠绕过程简单，并可在缠绕前对缠绕材料的质量严格控制（如含胶量、挥发分及均匀浸透等），从而使制品质量稳定可靠。

② 在缠绕过程中，树脂含量不受缠绕张力的影响。树脂向缠绕外层的迁移，和树脂沿壁厚不均匀的现象也可消除。

③ 纱带在芯模表面不易滑移，使纤维方向准确，因而协调了纤维强度和载荷的需要。

④ 可做到在不同的缠绕层准确地控制张力以得到最佳强度和刚度结构。

⑤ 不易断纱，保持纤维增强材料的连续性。

⑥ 可进行高速缠绕，从而可大大提高生产率。

⑦ 因为预浸纱的性能可在缠绕前测定，所以可较准确地预知最后制品在实用条件的性能。

无纬带具有极高的单向强度。所制成的玻璃钢制品，其拉伸强度高达 1000MPa 以上。如采用 S-高强玻璃纤维，玻璃钢强度可在 1300MPa 以上。

无纬带除用于缠绕高压容器、火箭发动机壳体外，目前国内较多用于电机工业上，选用不同树脂系统，可制成不同耐热等级的玻璃钢制品，一般均可在 130℃ 下长期使用，特殊的可以在 180℃ 以上使用，具制品具有耐瞬时高温的特点。此外，无纬带也用于制造化工压力管道。

4 纤维缠绕线型

纤维缠绕有三种基本线型，即螺旋缠绕、纵向缠绕（又称平面缠绕）和环向缠绕。实际生产中，通常采用以下三种缠绕线型多循环螺旋缠绕；平面缠绕与环向缠绕的组合；小缠绕角多循环螺旋缠绕与环向缠绕的组合。

螺旋缠绕与平面缠绕线型各具特点。螺旋缠绕纤维排布在等张力线或测地线上，因此纤维受力均匀，且位置稳定不易滑线；螺旋缠绕适应性大，容器或管道的长短粗细皆不受限制。但是，螺旋缠绕线型纤维交叉程度大，因而易产生应力集中和树脂含量偏高而使强度降低；当缠绕两封头不等极孔容器时，将因两封头不能以理论缠绕角进行缠绕而使重量增加。平面缠绕线型是以完整的缠绕层依次逐层重叠，没有纤维交叉，且缠绕张力稳定，强度设计的灵活性较大，只要改变各方向上玻璃纤维的数量就可独立调整纵向和环向强度，适用于两封头不等极孔容器的缠绕。平面缠绕的适应性较小，能够调整的长径比是有限制的。

(1) 螺旋缠绕

螺旋缠绕是通过芯模作转动，绕丝头按一定速度沿芯模轴线作往返运动来实现的。不同规律线型的实现是通过事先确定的速比来完成的，否则就不能达到纤维均匀密排的目的。

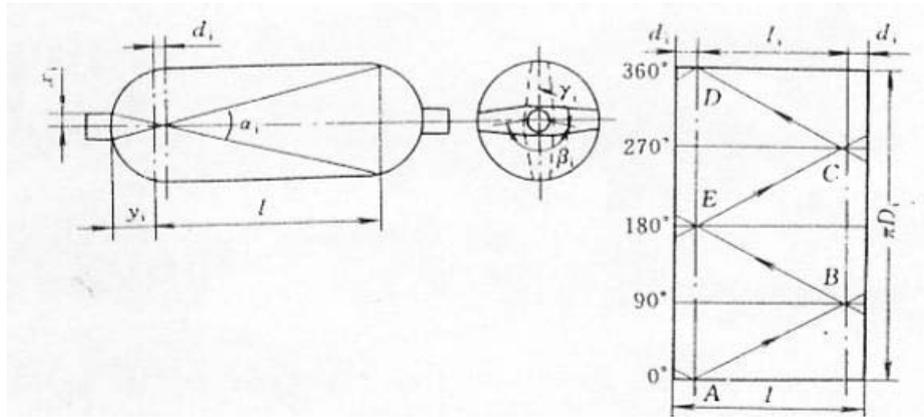


图 2 螺旋缠绕图

缠绕过程中各参数之间的关系如下：

纤维在整个筒体的缠绕角为：

$$\operatorname{tga}_i = \pi D_i \gamma_i / 360 l_i = (K/n) \pi D_i / (l - 2d_i)$$

或 $a_i = \arctg[(K/n) \pi D_i / (l - 2d_i)]$

式中：n=2, 3, 4, ……K=1, 2, 3, ……。

有以下几种情况：

1) 头部缠绕纤维在同一平面内，则在头部与筒体连接处，头部纤维与子午线夹角 ϕ 为：

$$\operatorname{tg} \phi = x_i / (d_i + y_i) \text{ 或 } \phi = \operatorname{arctg}[x_i / (d_i + y_i)]$$

2) 头部纤维是测地线缠绕，并与孔边相切时，在头部与筒体连接处，头部纤维与子午线的夹角 ϕ 为：

$$\sin \phi = x_0 / R \text{ 或 } \phi = \operatorname{arcsin}(x_0 / R)$$

显然，纤维是连续的，否则就会引起打滑，在筒体与头部连接处，必须满足：

$$\phi|_{y=0} = a|_{y=0}$$

而 a 为常数，因此，在 $y = d_i$ 处 $\phi|_{y=d_i} = a|_{y=d_i}$

对于第 1) 种情况，头部纤维在同一平面，

$$d_i = [lx_i - (K/n)\pi D_i y_i] / [2x_i + (K/n)\pi D_i]$$

对于第 2) 种情况，头部纤维位于测地线，

$$d_i = \{l - (K/n)\pi D_i / \operatorname{tg}[\operatorname{arcsin}(x_0 / R)]\} / 2$$

完成“标准线”缠绕，容器转过的角度 ω 为：

$$\begin{aligned} \omega &= j(\beta + \gamma) = j\{[180 - 2d_i(360/2\pi)\operatorname{tga}_i] + [2d_i(360/2\pi)\operatorname{tga}_i + 360(K/n)]\} \\ &= j[180 + 360(K/n)] \end{aligned}$$

式中， j 为绕丝头完成“标准线”缠绕所往返的总次数，也是“标准线”与两孔边相切的总次数。

由此可见，不论何种缠绕规律，都必须满足下式：

$$\beta + \gamma = 180 + 360(K/n)$$

从几何意义上讲，当“基准线”和头部与筒身的交线重合时 ($d_i=0$)，包角 β 与进角 γ 与气瓶的几何尺寸无关，即：

$$\beta = 180^\circ$$

$$\gamma = 360K/n$$

利用公式便可分别求出 d_i, a, β, γ 来。

如果采用手工缠绕时， x, y 的值是已知的。当选定一种缠绕规律时，即 K/n 确定之后，便可利用上述公式计算出 d_i 来，在筒体上进行划线（即等分圆周，确定基准线的位置），缠绕出符合要求的“标准线”，然后进行该循环缠绕。

要实现某一种缠绕规律，可通过速比的确定来实现。所谓速比“ i ”即完成“标准线”缠绕，筒体主轴的转数 N 与绕丝头往返的次数 $j/2$ 的比值。即：

$$\begin{aligned} i &= N/(j/2) = (\omega/360)/(j/2) \\ &= j[180 + 360(K/n)]/360(j/2) \\ &= (n + 2K)/n \end{aligned}$$

在具体缠绕机设计时，仅需在 ω 角中加入错纱（即纤维带的宽度）所对应的圆周角即得实际所需的速比。

① 纵向平面缠绕及环向平面缠绕可视为螺旋缠绕的特例，在公式 $\beta + \gamma = 180 + 360(K/n)$ 中，当 $K=1/b$ 时则为环向缠绕。当 $n = \pi D/(b/\cos a)$ 时，则为纵向平面缠绕，式中 b 为纤维带的宽度。

② K/n 值决定缠绕角 a 的大小，比值越大，缠绕角越大，反之亦然。

③ 不论 n, K 各为何值，当 $n=K$ 时具有同一的规律； K/n 比值相同，规律也相同。

④ 当 $2K/n$ 为整数时，通称为 ∞ 字缠绕，其 ∞ 字的个数即等于 $2K/n$ 的数值。

根据公式， n 可取 2, 3, 4……； K 可取 1, 2, 3……。因此缠绕规律可有许多，下面只举几种常用规律用图 3~5 加以说明。

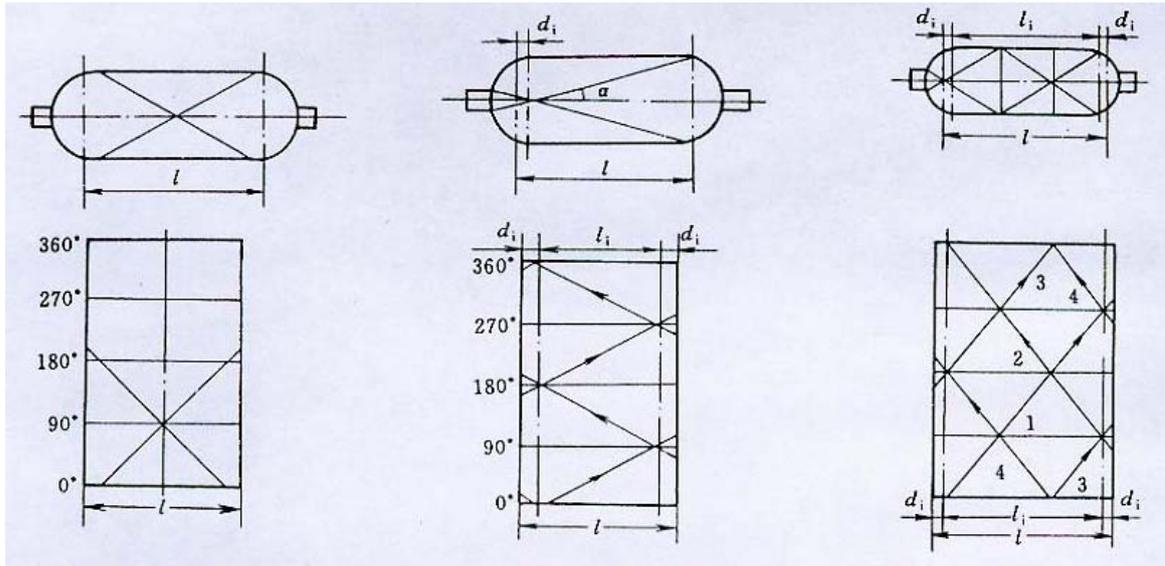


图3 螺旋缠绕标准线及展开图
K=2, n=4(单“∞”字)

图4 螺旋缠绕标准线及展开图
K=1, n=4

图5 螺旋缠绕标准线及展开图
K=3, n=4

(2) 纵向平面缠绕

早期的固体火箭发动机壳体和压力容器都选用平面缠绕线型和干法工艺,后来扩大到湿法上。特别是球形压力容器,都采用湿法工艺和平面缠绕。传统的平面缠绕,通常只有两个运动机构。一个是绕丝嘴围绕芯模做圆周运动(y轴);另一个是芯模自转(x轴)。绕丝嘴转一圈,芯模转过一个纱片宽度。这就带来一个问题:每次铺放到芯模上的纱片,其两边或纱片两边与其中间部分,同芯模曲线外型贴实的松紧程度不同。这必然影响复合材料结构性能。纱片越宽,问题越突出。减少纱片宽度或同时采用多个纱团,可以减轻由此造成的影响。但是,前者使纤维堆积问题加剧,后者带来张力不均匀问题,同样降低结构性能。在绕丝嘴的传动机构上增添一个沿其旋转轴做间隙式前进和后退的机构,即可圆满解决这个问题。这就是所谓的“窄纱片—宽纱带缠绕”的基本原理。一般来讲,纱带最大宽度 可以做到缠绕直径的 1/10。

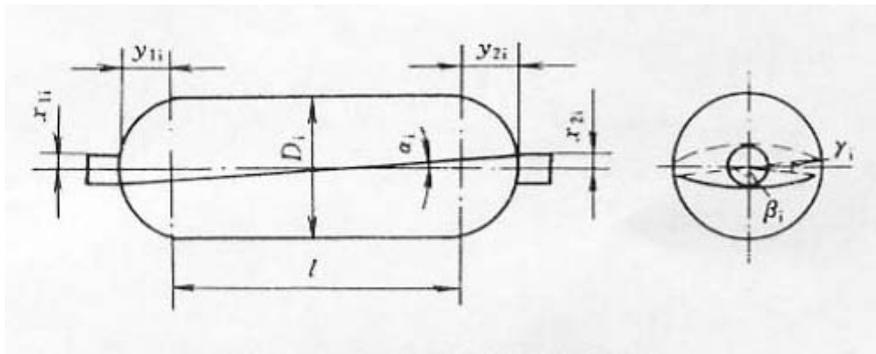


图6 纵向平面缠绕线型图

(3) 环向缠绕

芯模作匀速转动，绕丝头沿筒身轴线方向均匀缓慢地移动。芯模每转一周，绕丝头向前移动一个纤维带的宽度。

环向缠绕的设备简单，质量易保证。在一般缠绕机上，环向缠绕是用丝杠带动绕丝头来实现的。环向缠绕的纤维方向即为筒体的一个主应力方向，很好的利用了纤维的单向强度。因此，管道成型都是采用环向缠绕和纵向缠绕结合的方式。

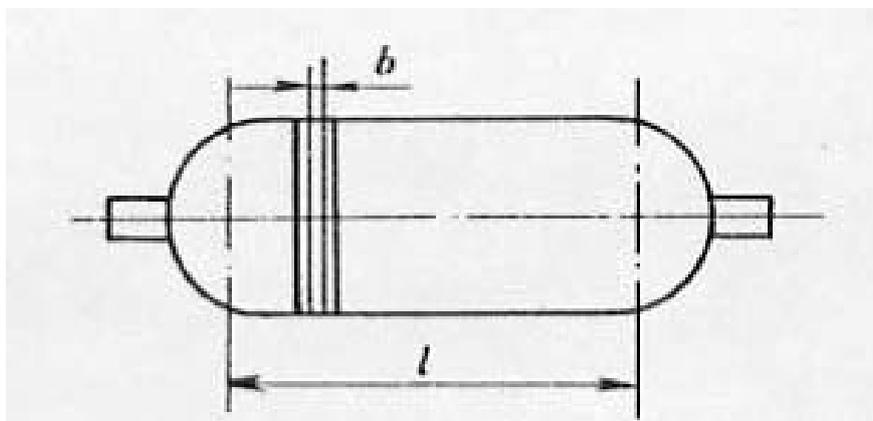


图7 环向平面缠绕线型图

(4) 缠绕线型的选择

输水管道，应采取哪类缠绕，取决于下述因素。

a. 制品的结构形状和几何尺寸 螺旋缠绕应用普遍，对长形管状结构是理想的，纵向缠绕，主要用于球形、扁椭球形以及长径比小于4的筒形容器的缠绕。此外，也适用于两端不等开口容器的缠绕。因为如果采用螺旋缠绕，为保证纱片稳定不滑线，要求在两个极孔不同的封头上都按各处的测地线缠绕，而这种双重缠绕角的实现比较困难和不经济。否则两封头不以测地线缠绕角进行缠绕，就势

必增加重量，这在航空和航天技术设备上受到严格限制的，而纵向缠绕，纤维不必像螺旋缠绕那样按测地线排布，两个极孔不同，关系不大。为防止纤维打滑，通常采用预浸纱缠绕，同时，极孔直径通常不超过筒体直径的 30%。

b. 强度要求 螺旋缠绕纤维交叉通过的程度相当大，从强度观点看是不利的。理由有二点：① 交叉点处的纤维在受力状态下要变直，特别是纤维充分受载情况下，纤维不直就可能产生分层和损坏。② 由于交叉线型，故树脂含量可能偏高。对纵向缠绕，纤维在筒体部分交叉通过，而是以完整的缠绕层依次逐层重叠，排列较好。因此纵向缠绕可望获得高强度并因而减轻了质量。

c. 载荷特性 如果制品受到内压以外的荷载，如火箭发动机的飞行载荷或一般弯曲载荷。纵向和环向组合缠绕的设计灵活性较大，只要改变各方向上玻璃纤维数量就能独立和方便地调整纵向和环向强度。

螺旋缠绕结构，对于不平衡加载的适应性较差。

d. 缠绕设备 纵向缠绕无需小车反向，因此可避免螺旋缠绕时小车在两端点的停止与起动而带来的惯性冲击。可以保持均匀的缠绕速度，同时缠绕张力均匀且易于控制。

究竟采用何种类型缠绕，要根据制品的形状结构，载荷特性、强度要求。使用环境及设备情况综合考虑决定。实际生产中，通常采用以下三种类型缠绕：多循环螺旋缠绕；纵向缠绕与环向缠绕的组合；低缠绕角多循环螺旋缠绕与环向缠绕的组合。

5 ND3200mm 玻璃钢管缠绕线型参数确定

在选定缠绕线型时，应注意以下几个重要问题。

(1) 纤维的测地线缠绕是实现等张力的条件。因此缠绕角应尽量选取等于或拉近测地线缠绕角。过大或过小于测地线缠绕角都是不利的。

(2) 同一个产品，应避免采用单缠绕角进行缠绕，以免形成不稳定的纤维结构以致在复杂应力作用下树脂受过大的应力。

(3) 选择的线型、纤维与封头极孔相切次数（即切点数）应尽量少，切点数目越多纤维交叉次数越多，纤维强度损失也越大。同时也使极孔附近区域的纤维堆积架空现象严重，出现不连续应力和不相等应变。

(4) 极孔包络圆直径应逐渐扩大，使纤维在封头分布较均衡，减轻纤维在

极孔附近为堆积现象。

(5) 根据实践经验，对于湿法缠绕，实际缠绕角应控制在与测地线缠绕角 $\alpha = \sin^{-1}(r/R)$ 的偏离值不超过 $\pm 10^\circ$ ，以保证纤维在缠绕时不滑线。

(6) 在缠绕过程中，螺旋向与环向缠绕应交替进行。

(7) 环链式缠绕机，如缠绕角过小，将使链条长度增大，设备变得大而笨重。同时由于超越长度增大，使缠绕张力难以控制，影响强度。

通过上述计算，我们可以得到将生产的 ND3200mm 玻璃钢管的全部尺寸如下表所示。

表 8 ND3200mm 和 ND6000mm 输水管道可选用的参数

长度	12000mm
内径	3200mm
厚度	53mm
夹砂层厚	31mm
总重	17770kg
夹砂层重	6219.5kg
不饱和树脂重	7108kg
玻璃纤维重	4442.5kg
工作压力	1.6MPa
设计压力	3.1Mpa
使用年限	50 年

6 纤维缠绕工艺控制

纤维缠绕容器的生产过程，一般包括下述几方面：① 产品设计，包括产品、芯模或内衬的结构设计；原材料选择；缠绕线型的确定；强度设计；② 缠绕机及辅助设备的设计（一般情况下选用）；③ 确定缠绕成型工艺及工艺参数；④ 原材料及产品的质量检查。其中与缠绕工艺有关的工艺设计包括：① 明确产品设计和质量指标，包括产品结构形状、尺寸要求、受力情况、技术性能及使用要求等；② 根据产品设计要求及使用条件，选用原材料；③ 根据产品设计要求确定缠绕线型；④ 根据产品的强度要求、原材料性质及选定的缠绕角进行强度设计，计算出缠绕层数及张力递减制度；⑤ 根据所选定的原材料和工艺方法确

定工艺参数和编出工艺流程；⑥ 根据所定的缠绕线型选择设备，或为设备设计提供设计参数。

参考文献：

（略）