二维在线编织拉挤与拉绕工艺之比较

2D Overbraiding PUL

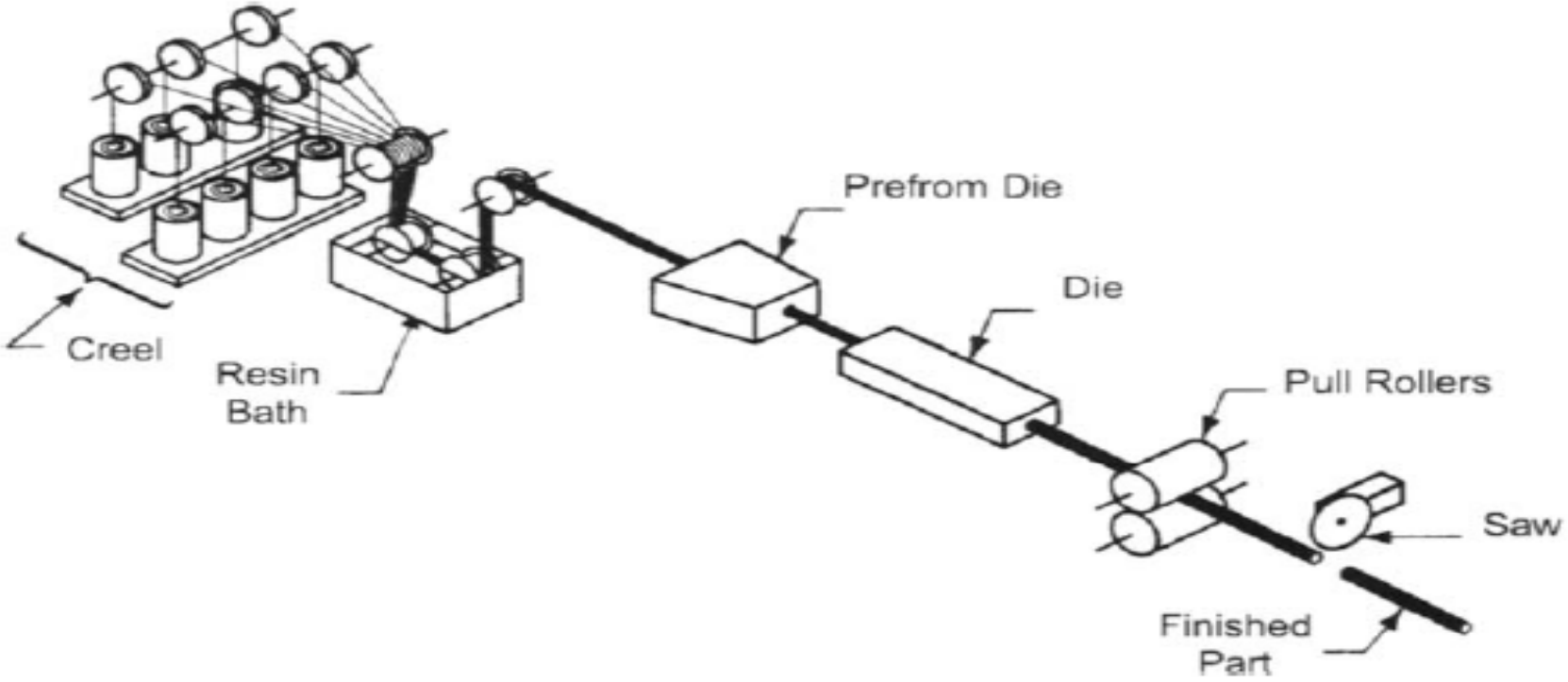
VS

Pullwinding

陈博　Chen Bo

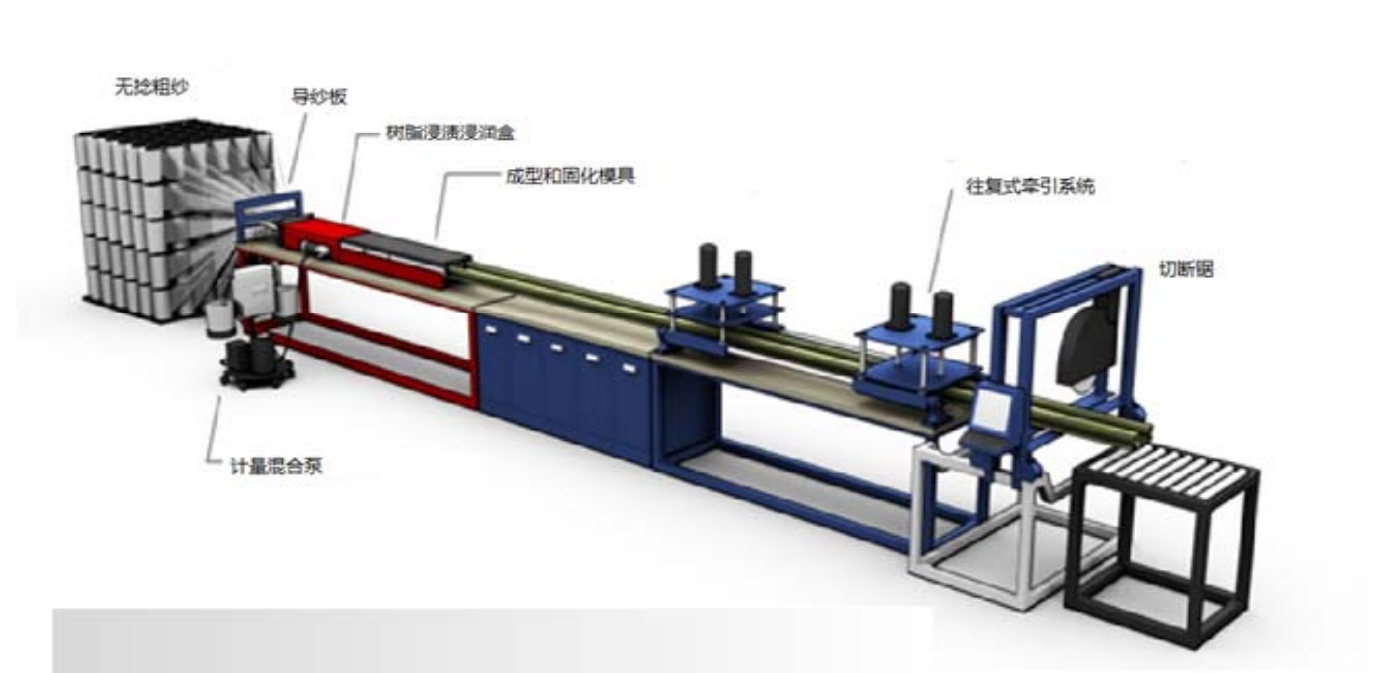
E-mail: cb1940@163.com

拉挤工艺1948年肇始于美国

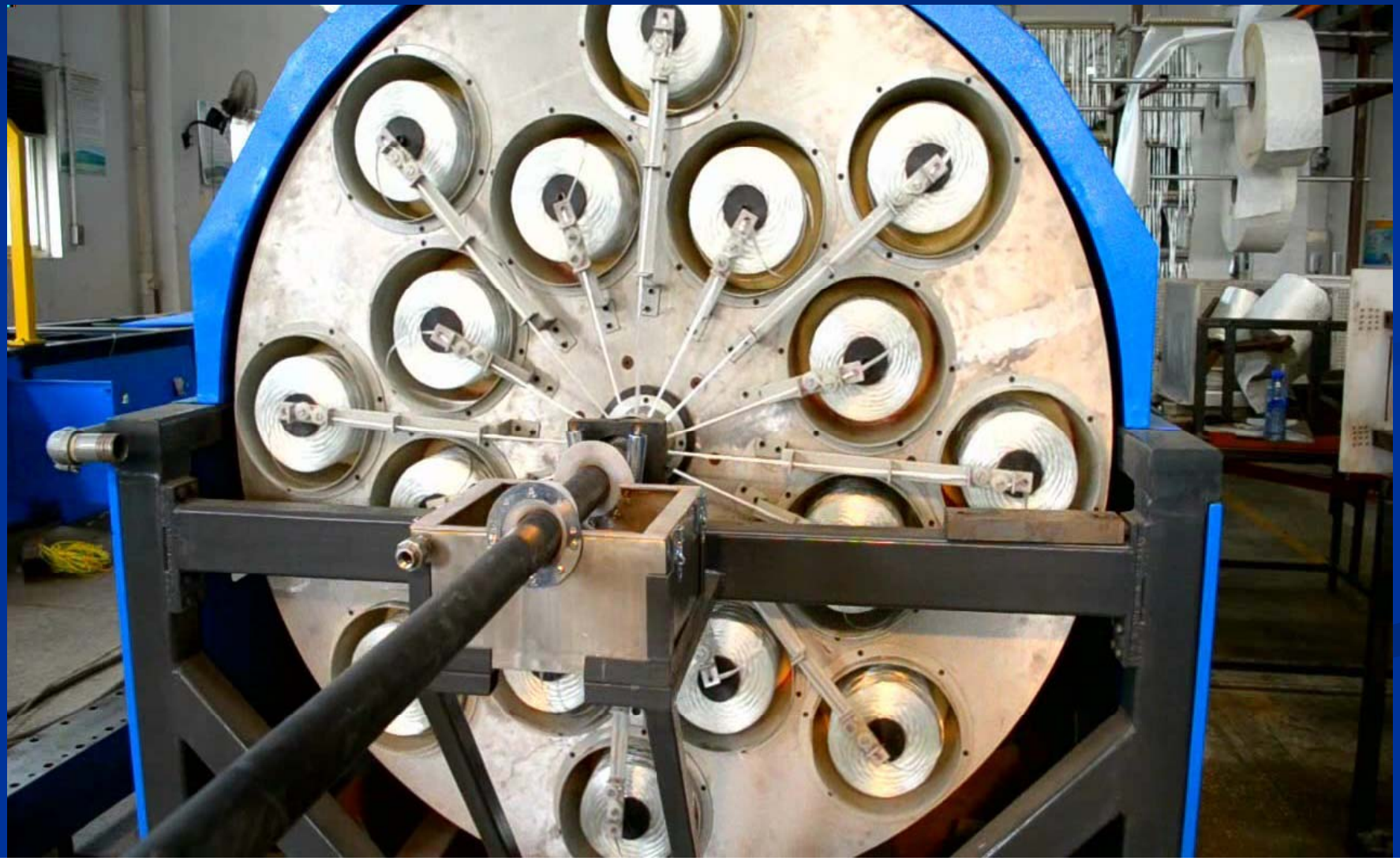


拉绕&编织丰富了拉挤成型工艺

- 为提高拉挤制品的横向性能，在传统工艺中引入缠绕和编织技术元素，形成的拉绕工艺和编织拉挤工艺，使得拉挤制品的性能得到突破，综合性能更加优越



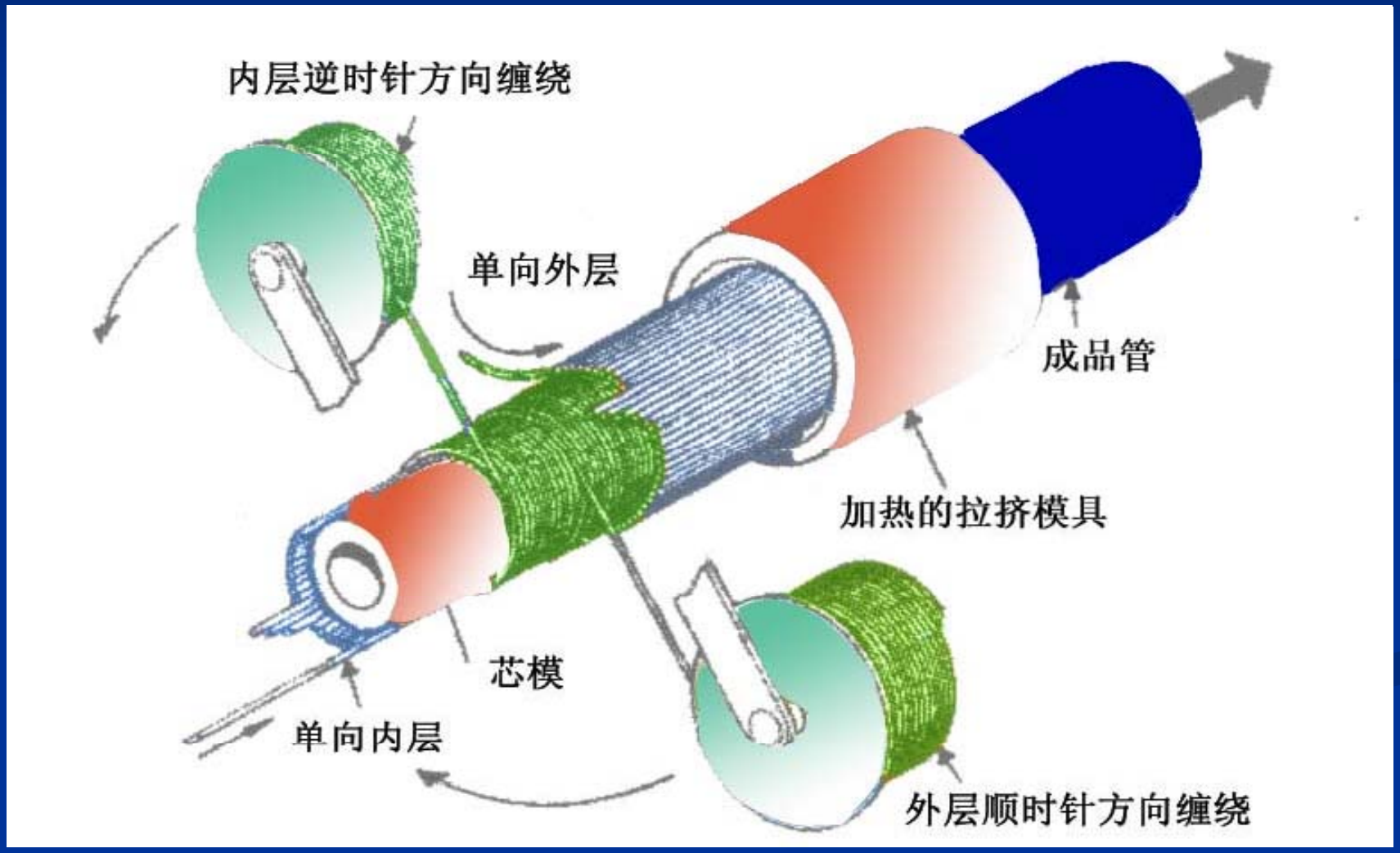
最初，为提高拉挤制品横向力学性能，拉绕工艺在欧美应运而生，且可部份取消连续毡，降低成本



我国拉绕成型发展历程

- 1989.10.上海玻璃钢研究所从美国PTI公司引进UZSTAR2408型拉挤机，带有缠绕部件，惜开发之产品以纯拉生产，FW未用
- 2003年迄今，拉绕工艺及装备有较大发展，济南、南京、津、京、石家庄、锦州、大连、吉林等地多有建树

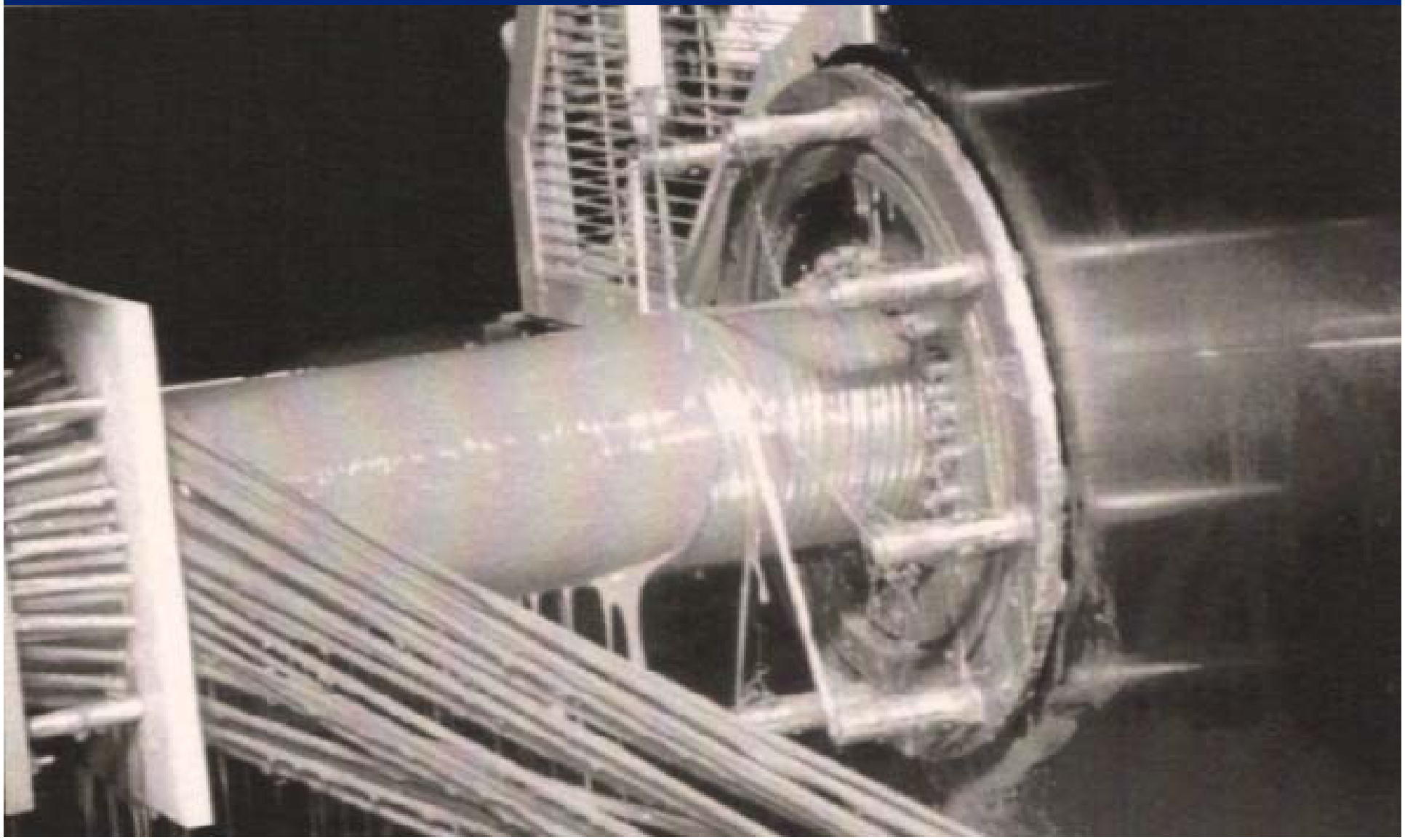
拉绕工艺原理图
Principle of Pullwinding process



拉绕工艺纤维排序

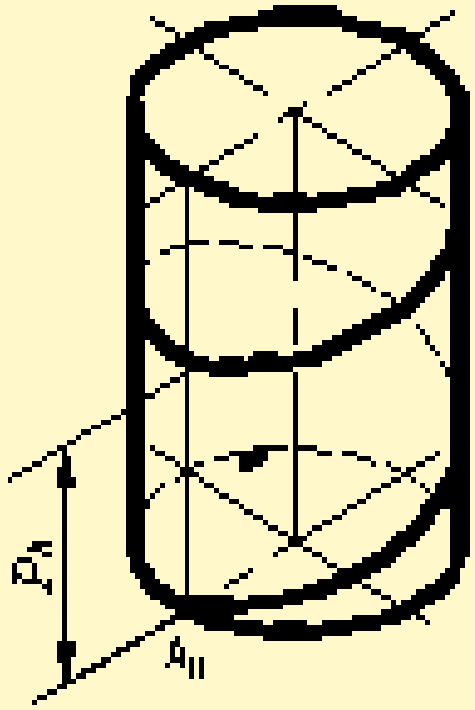
- 管状产品使用条件系管内无流体介质时，拉绕过程中的纤维排列顺序，宜将纤维布置在产品的内外壁，即直接与芯模外表面/拉挤模内腔表面接触，以减少拉挤过程中的摩擦阻力；
- 如此布置，产品的内、外表面质量亦远较环向缠绕为佳

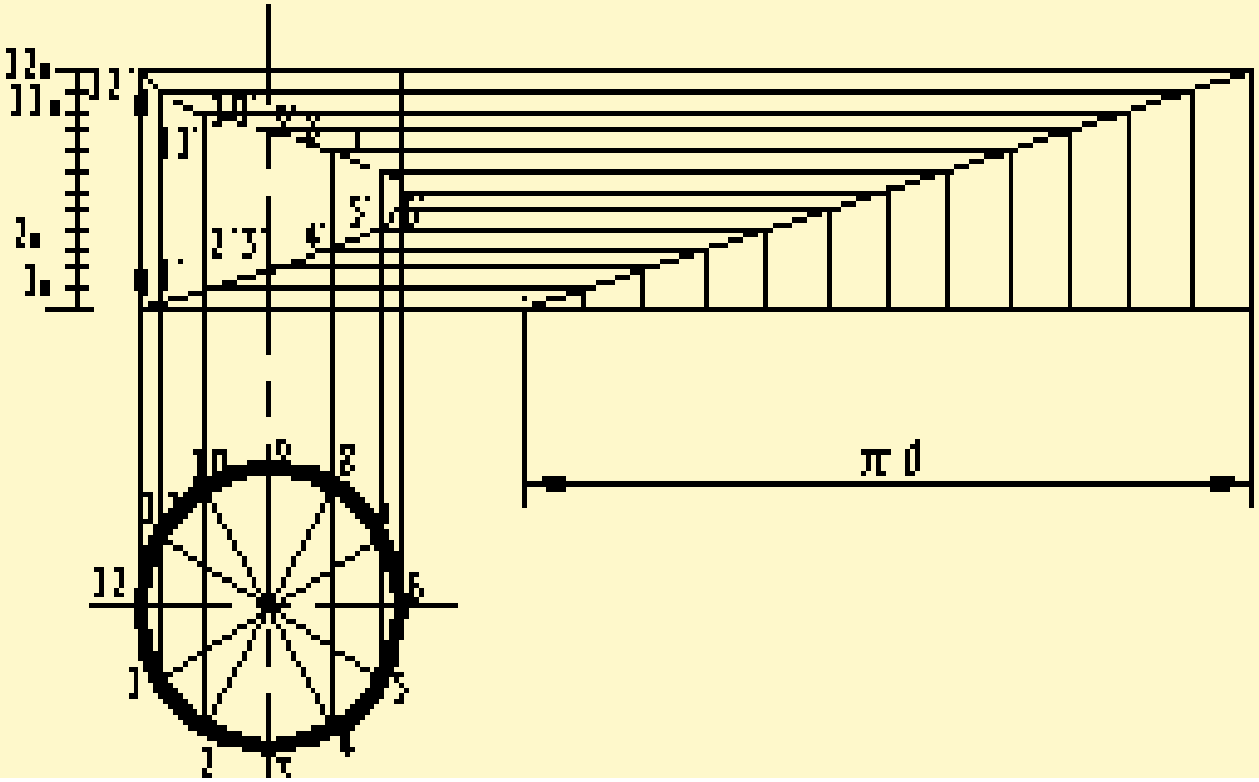
拉绕局部



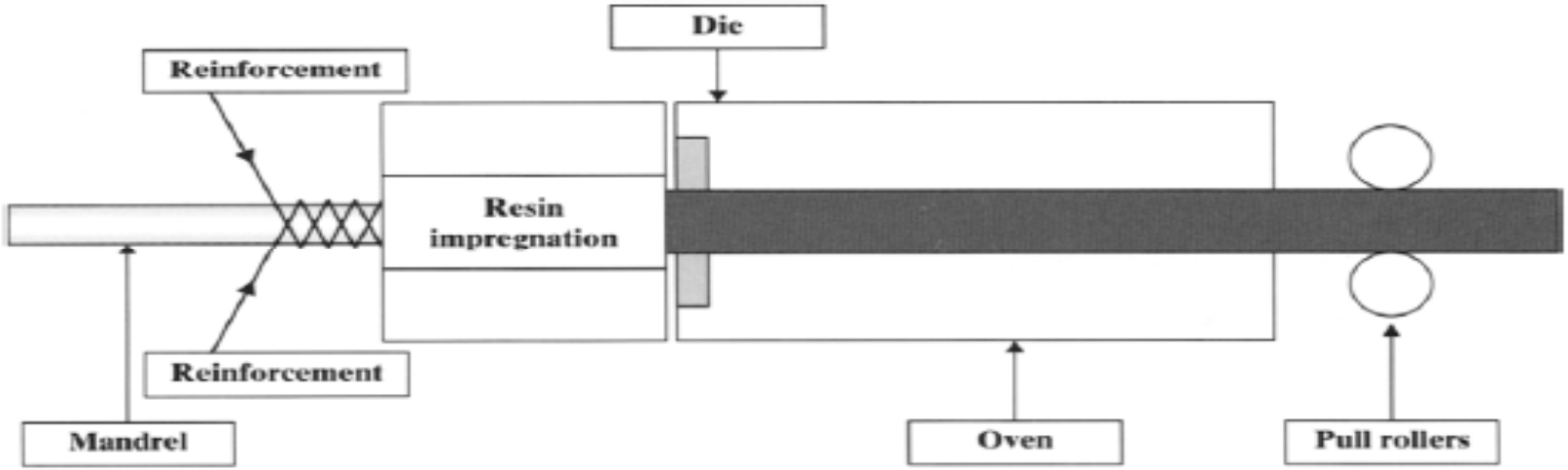
为什么是2D？

- 圆柱螺旋线展开即为平面，设备无法向运动，所缠纤维在圆柱面上，层间法向无纤维





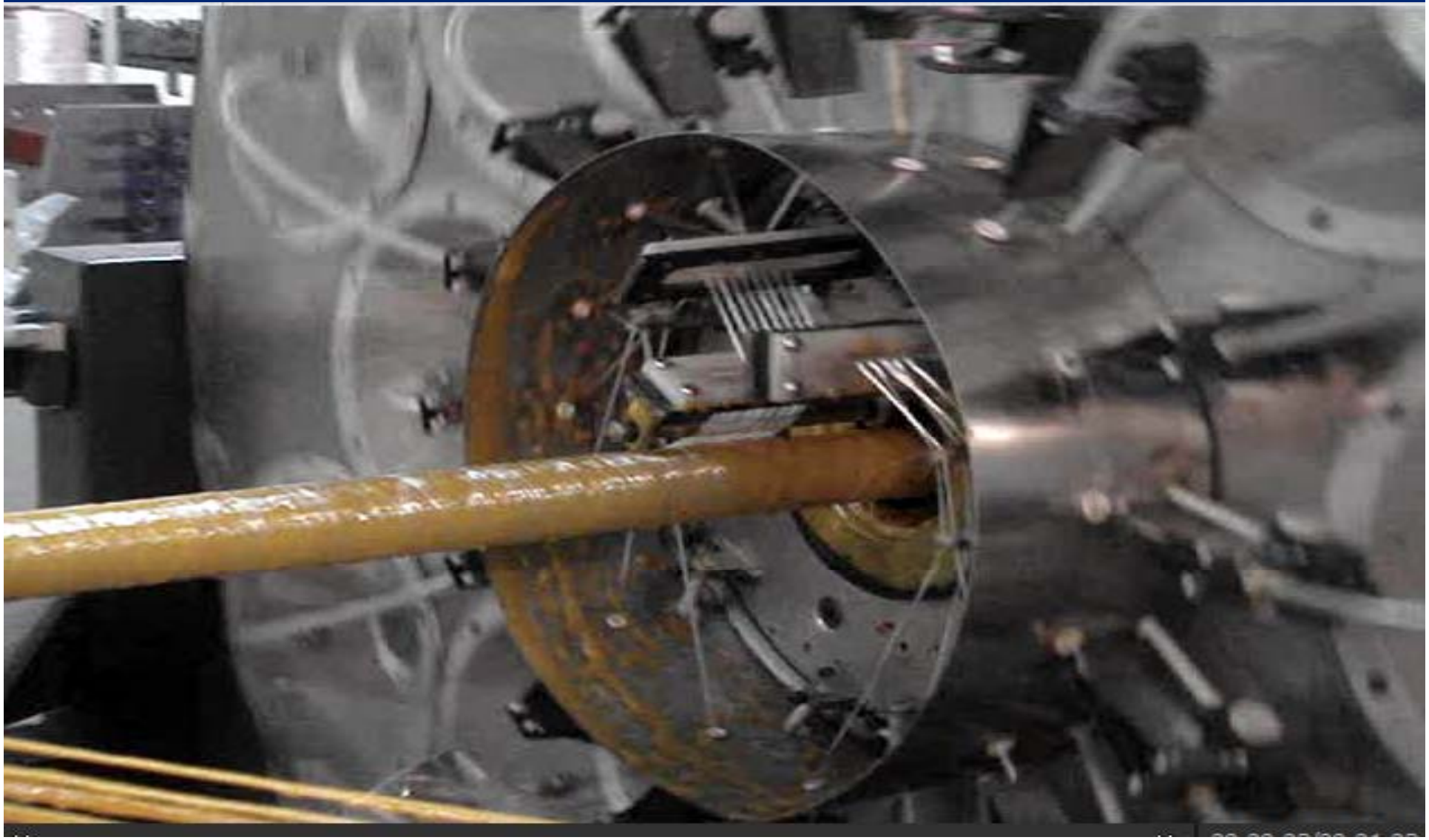
拉绕机传动系统计算原理



拉绕机传动系统计算原理

- 装有多锭纱团的公转转盘每转一转，纵向牵弋1宁螺距。螺距大小视强度与工艺要求而定。与FW工艺不同，拉绕可不考虑相邻纱束间的重叠系数

注意：心轴及其上的制件从纱锭大转盘的轴承内径轴套孔中穿过



拉绕管环向强度的计算

- 当另有小缠绕角时用此公式
- 未计表面毡的强度
- 环向层数K的计算公式

$$K = R(2 - tg^2\alpha)P/2Nmf$$

式中　R－产品内孔半径

α－缠绕角

P－产品极限内压力　Kg/cm2

N－轨道盘上纱锭数

m－环向缠绕纱束密度　条/cm

f－每束纤维的平均强力　Kg/束

拉绕管环向强度的计算

- 未计表面毡的强度
- 环向层数K的计算公式

$$K = RP/Nmf$$

式中　R－ 产品内孔半径

P－产品极限内压力　Kg/cm2

N－公转转盘上纱锭数

m－环向缠绕纱束密度　条/cm

f －每束纤维的平均强力　Kg/束

拉绕的优点

- 可连续化生产
- 劳动成本低
- 利于采用混杂纤维增强材料
- 可直接采用无捻粗纱筒，其单重16-20Kg，换筒间隔长，又不需从新退绕、络纱，工人劳动强度低
- 国内制造的拉绕机转盘双向置无捻粗纱筒达32个，南玻院更有576锭的缠绕机，利于提高生产率与制品质量的稳定
- 可生产大截面和厚壁制品

拉绕的缺点

- 制品外径受到拉绕机转盘轴承内径轴套孔径大小的限制
- 树脂含量精确控制，较纯拉有些难度
- 缠绕纤维从纱筒到缠到心轴，其间张力控制均匀性不易把握

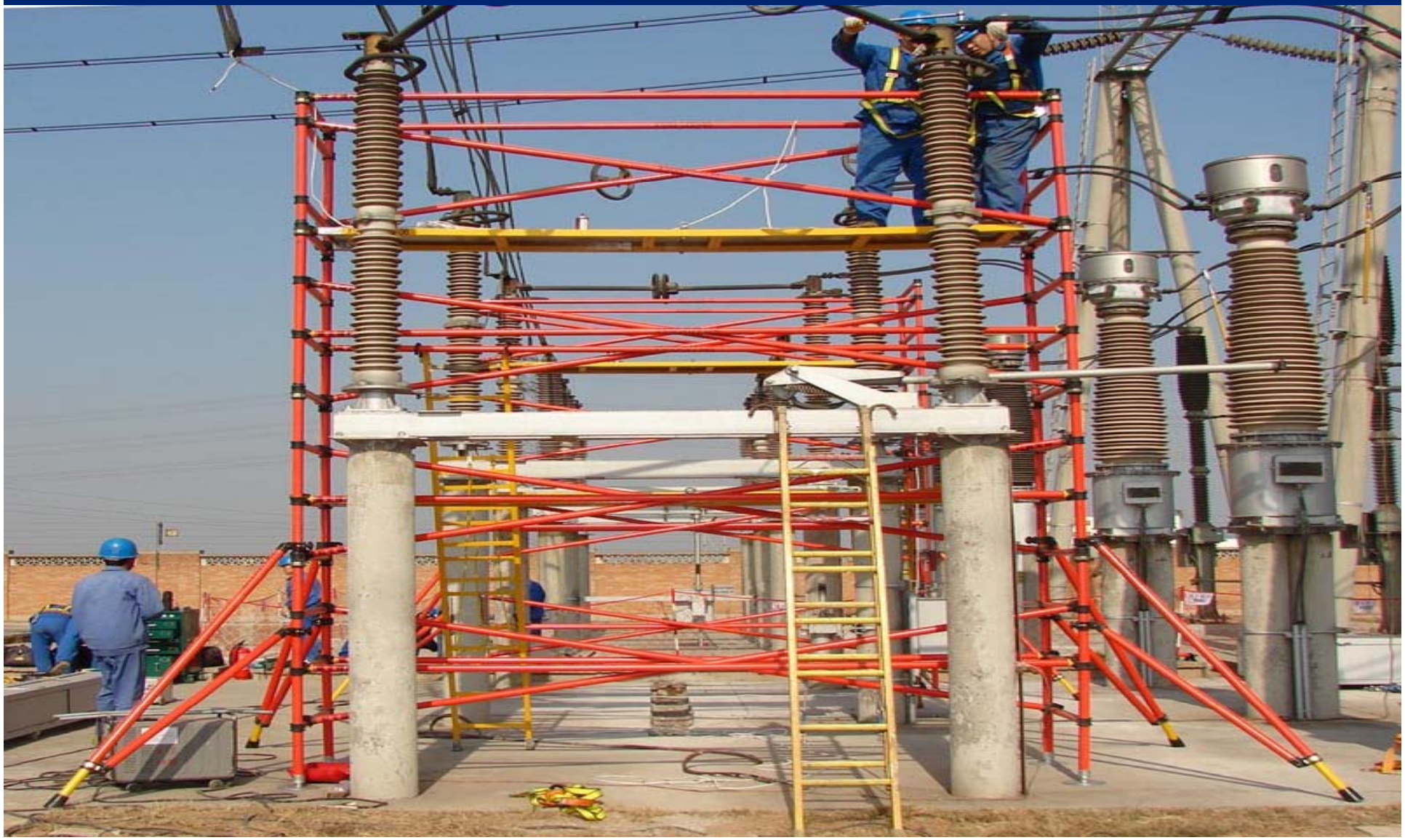
拉绕机设计制造注意点

- 根据预计制品外径开发系列产品，避免大马拉小车，设备结构细节处理亦易优化
- 大转盘要做静平衡，因其转速不高，一般可不做动平衡
- 考虑缠绕纱合理的浸渍树脂方式及其结构

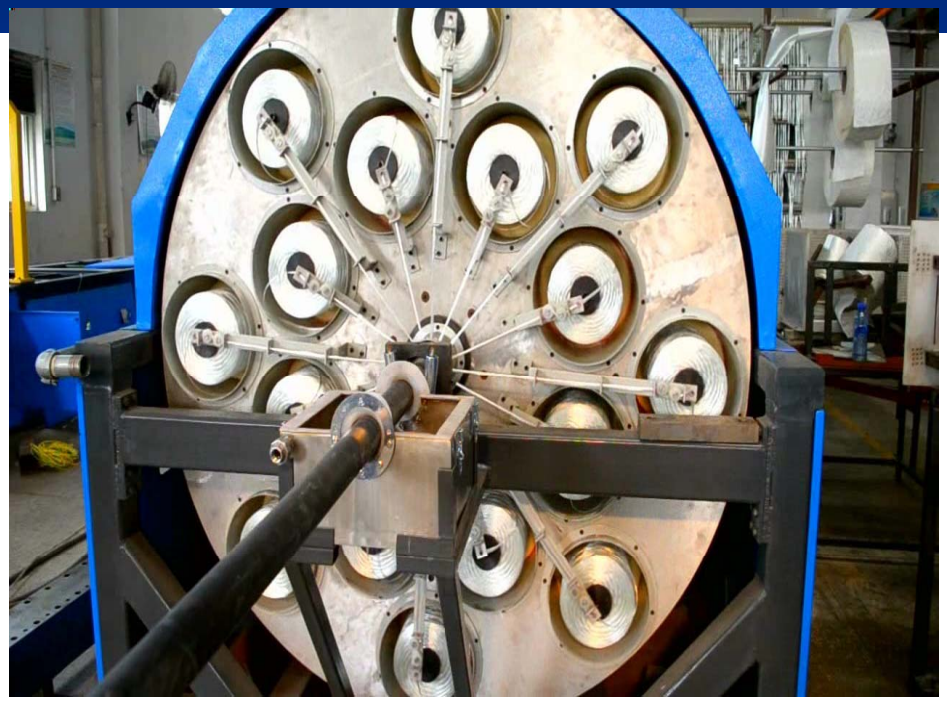
2014.4.山东胜利新大集团以拉绕法生产的碳纤维复合材料防偏磨连续抽油杆通过鉴定

CFRP连续抽油杆生产线

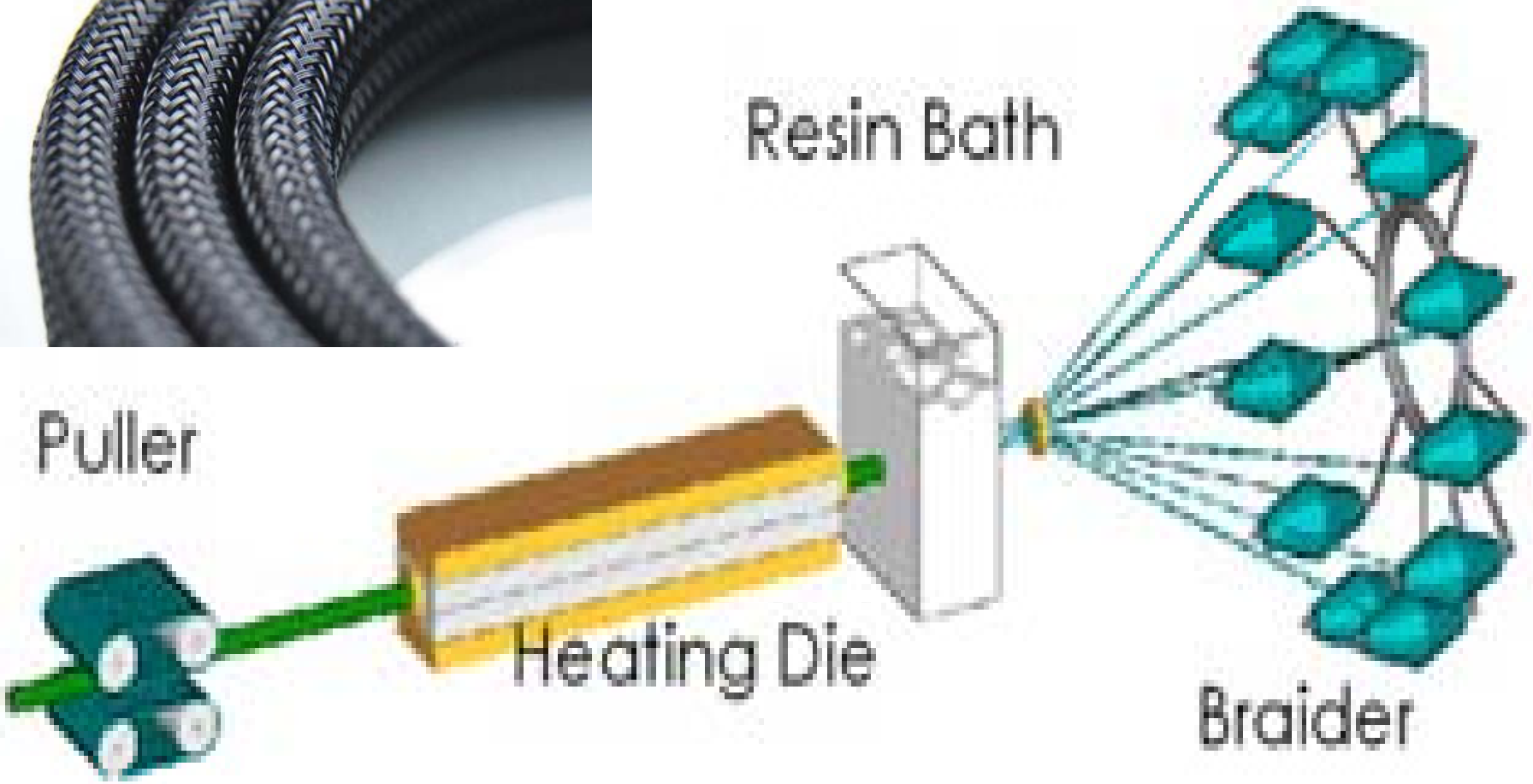
石家庄飞翔公司以拉绕法制造之变电站用脚手架玻璃钢管质量优于舶来品



我拉绕制品与拉绕生产线已出口俄罗斯、阿塞拜疆、印度



在线编织拉挤的概念



<braiding Pultrusion>

在线编织-拉挤工艺发展历程

History of braiding on line – pultrusion process

- 编织工艺18世纪在德国和法国出现
- 20世纪中叶FRP拉挤工艺诞生于美国
- 2005年笔者和武汉理工大学分别提出了在线编织-连续拉挤成型的工艺原理
- 2006年，在线编织-拉挤成型薄壁环氧玻璃钢管研发成功
- 2007年产品已通过UL认证，出口国外
- 2009年获两项国家发明专利
- 现京、津、河北、大连、吉林、山东已用此工艺生产FRP制品

相关成型工艺比较
Comparison of corresponding Processes

- 纤维缠绕法

FW法外径光洁度与公差无法保证，若经磨削加工，成本增加，且破坏纤维

- 拉绕法

其工作原理是先拉，形成单向里层；环向缠绕，增加径向强度；单向拉挤，形成较光滑的外壁。

- 成品纤维套管拉挤法

此法无一般拉挤FRP管所需要的芯模支座，此法芯模是悬于模外。

- 在线针织纤维套管拉挤法

一般针织物（Knitted fabric）具有弹性和延伸性，易变形、尺寸不稳定，不宜用于拉挤工艺

- 在线编织-拉挤成型法

成品纤维套管拉挤法模具原理图

Mold illustration for pultrusion with fiber pipe

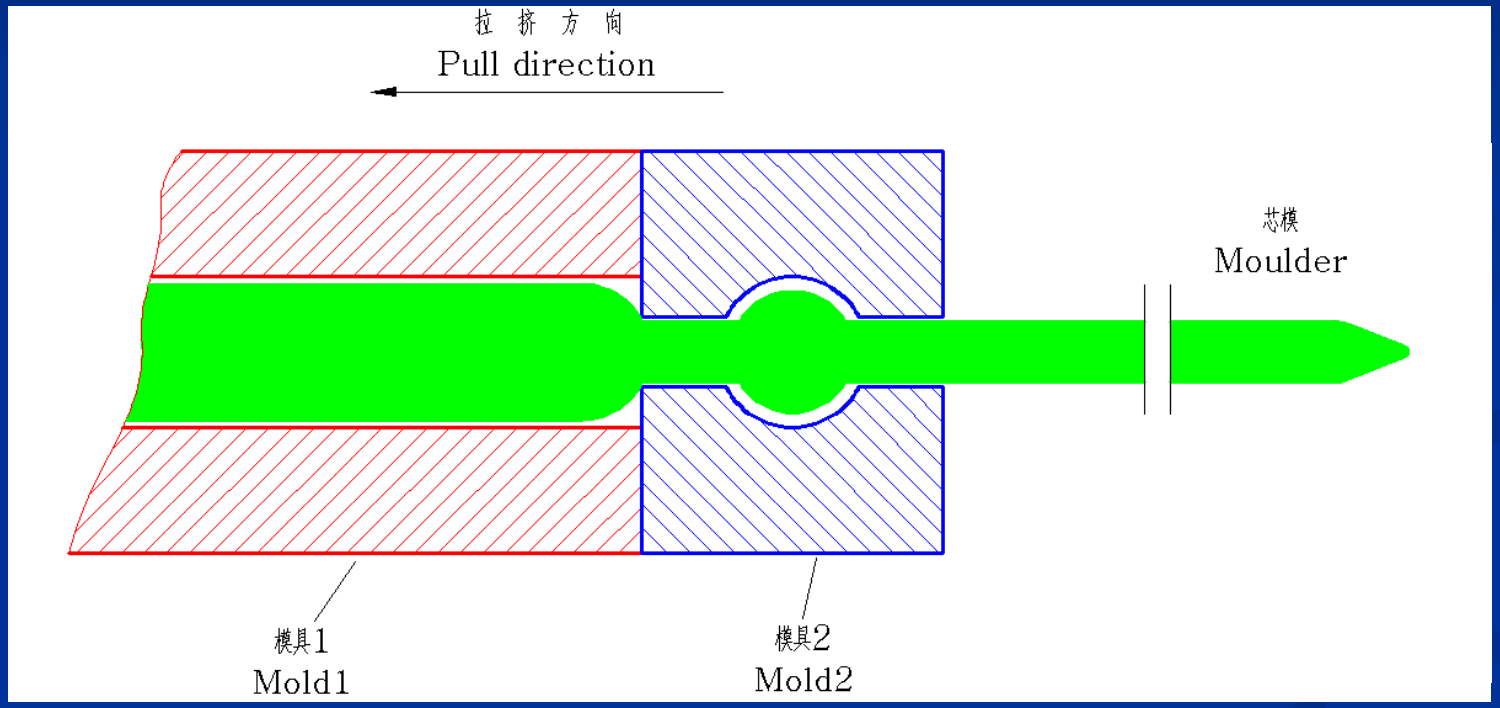


图3 拉挤模具示意图

法国Spiraltex编织机

编织工艺原理图

Principle of braiding process

- 编织过程中，纤维的运动轨迹为螺旋线。选择合理的纤维角度可调节成品管材径向强度与轴向强度的比例；选择适宜的纤维排列密度可满足强度与外观的要求。

图4 编织原理

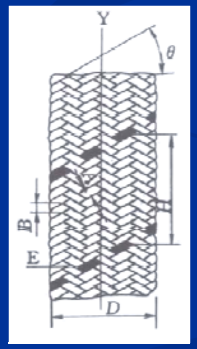
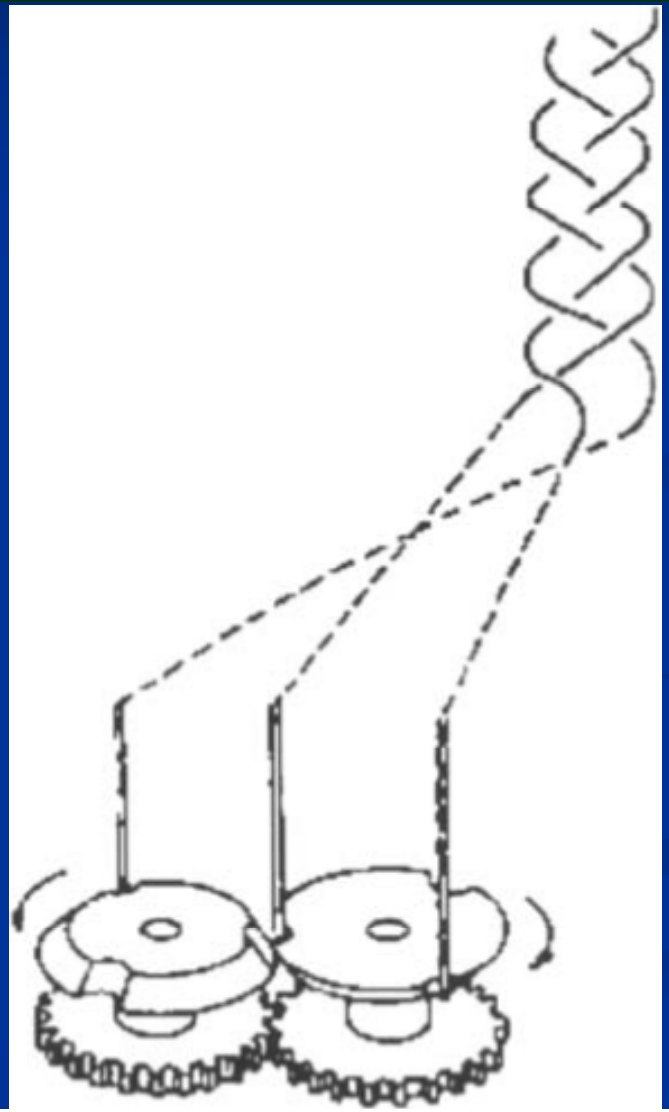
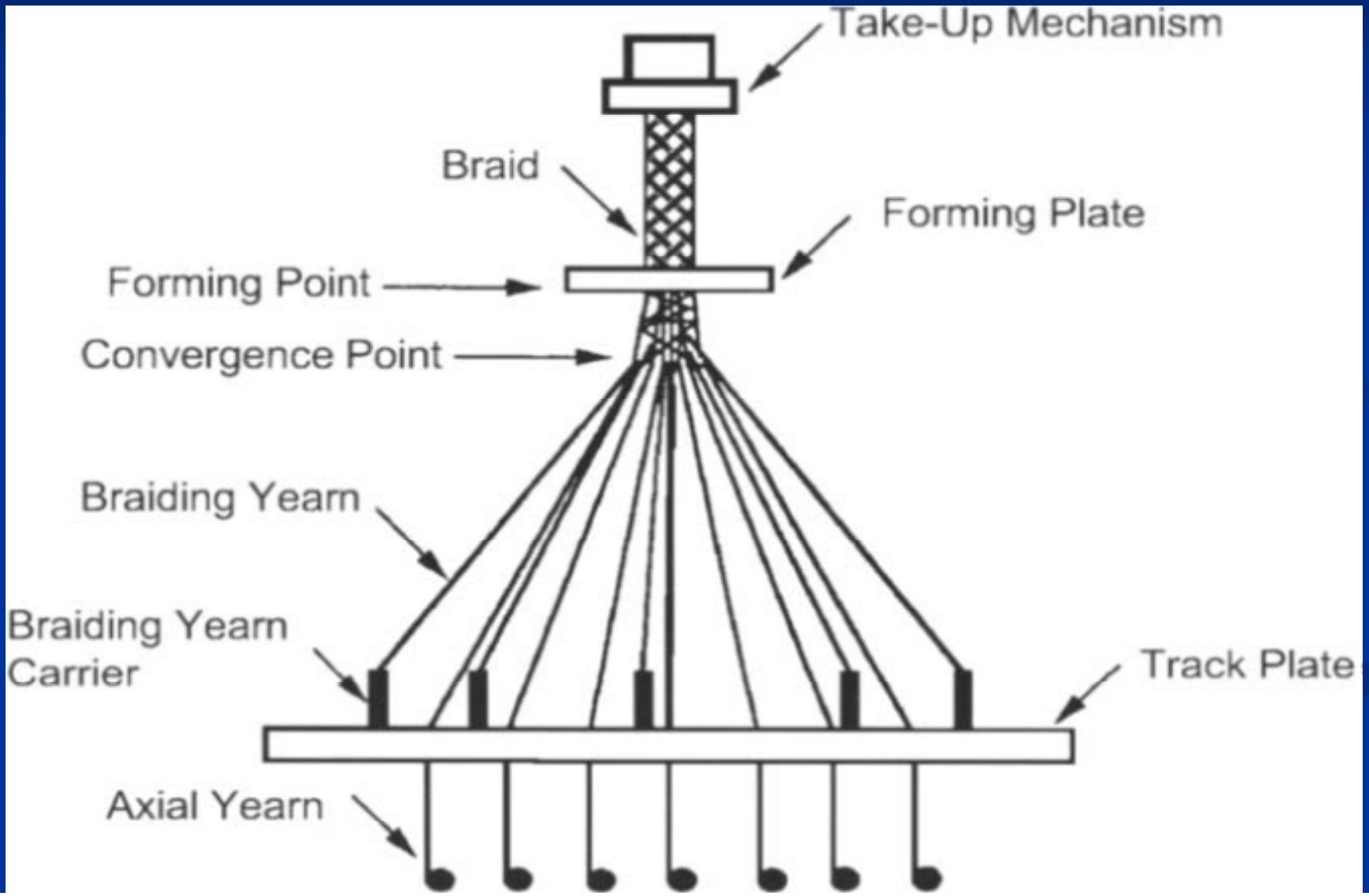


图5 套管编织

锭子-纱线之运动原理
单根纤维束的轨迹为圆柱螺旋线

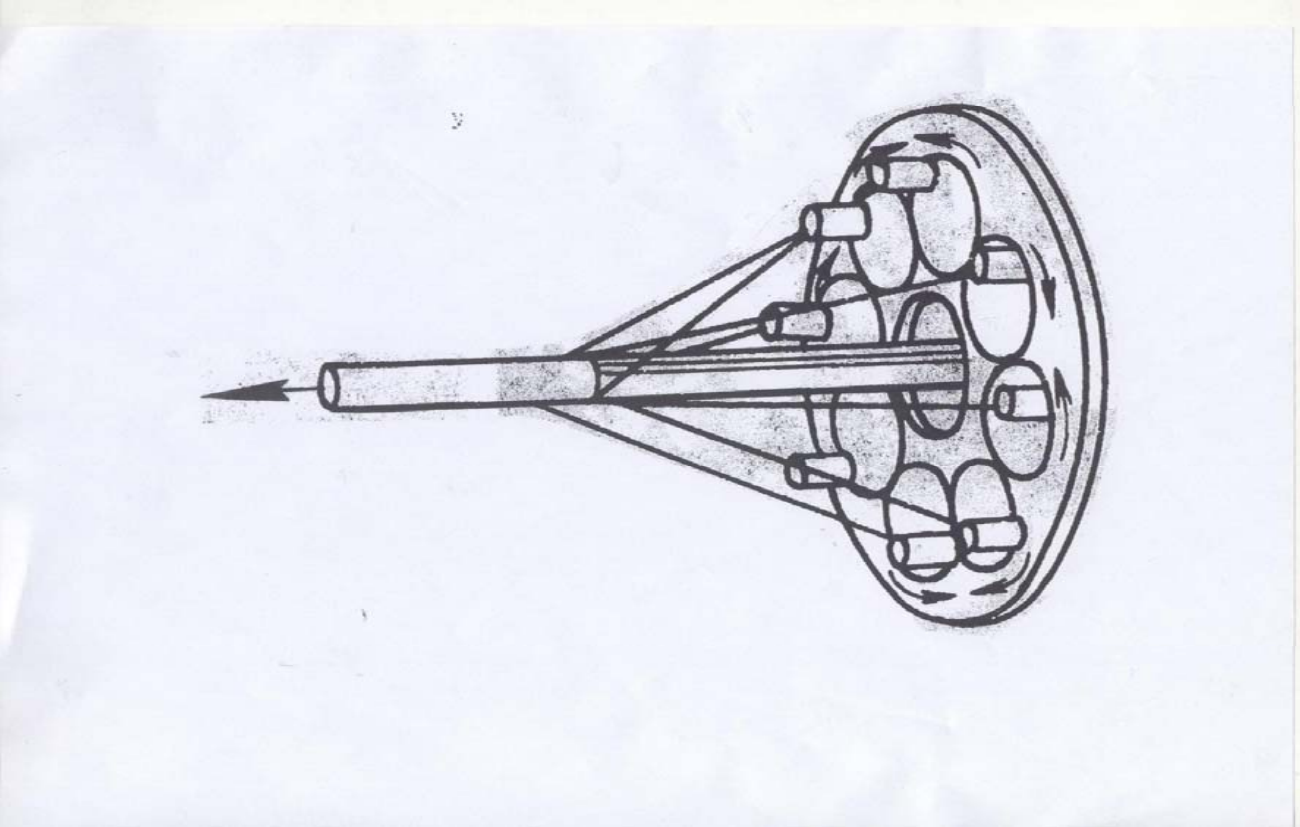


原始编织机布局


Take-Up Mechanism
Braid
Forming Plate
Forming Point
Convergence Point
Braiding Yearn
Braiding Yearn
Carrier
Track Plate
Axial Yearn

编织机示意图

- 注意：轨道盘与芯轴是静止不动的
- 锭子沿轨道一一交替移动



深圳杨桂设计的编织机
Braiding Machine

卧式编织

未浸渍基体树脂的编织管

在线编织-拉挤工艺的优点

Advantages of braiding on line – pultrusion Process

- 可连续化生产
- 劳动成本低
- 冲击强度优于纤维缠绕（由于纤维交错排列）
- 更换产品时，不受编织机原结构的限制，更换一芯模，或在原芯轴上加一轴套(外径为产品内径)即可
- 可采用2.5D或3D编织，使制品层间剪切强度呈数量级大幅度提高，且可使坯料更接近成品形状

在线编织-拉挤工艺的原理
Principle of braiding on line – pultrusion Process

- 在线编织的坯管由拉挤机的牵引装置弋引。芯模固定不动。坯管沿芯模织好，由芯模前端进入模具，在模具前端的树脂浸渍区内浸渍树脂（树脂系在压力下源源注入模腔），经牵引通过加热的模具（基体树脂在模内胶凝、固化），最终成为FRP管材成品。分析此原理应能制得符合技术性能要求的复合管。这种在线编织拉挤成型（树脂由外注入模具内）的工法，实质就是一种连续树脂传递成型工艺（CRTM）

在线编织-拉挤工艺的示意图

Illustration of braiding on line – pultrusion Process

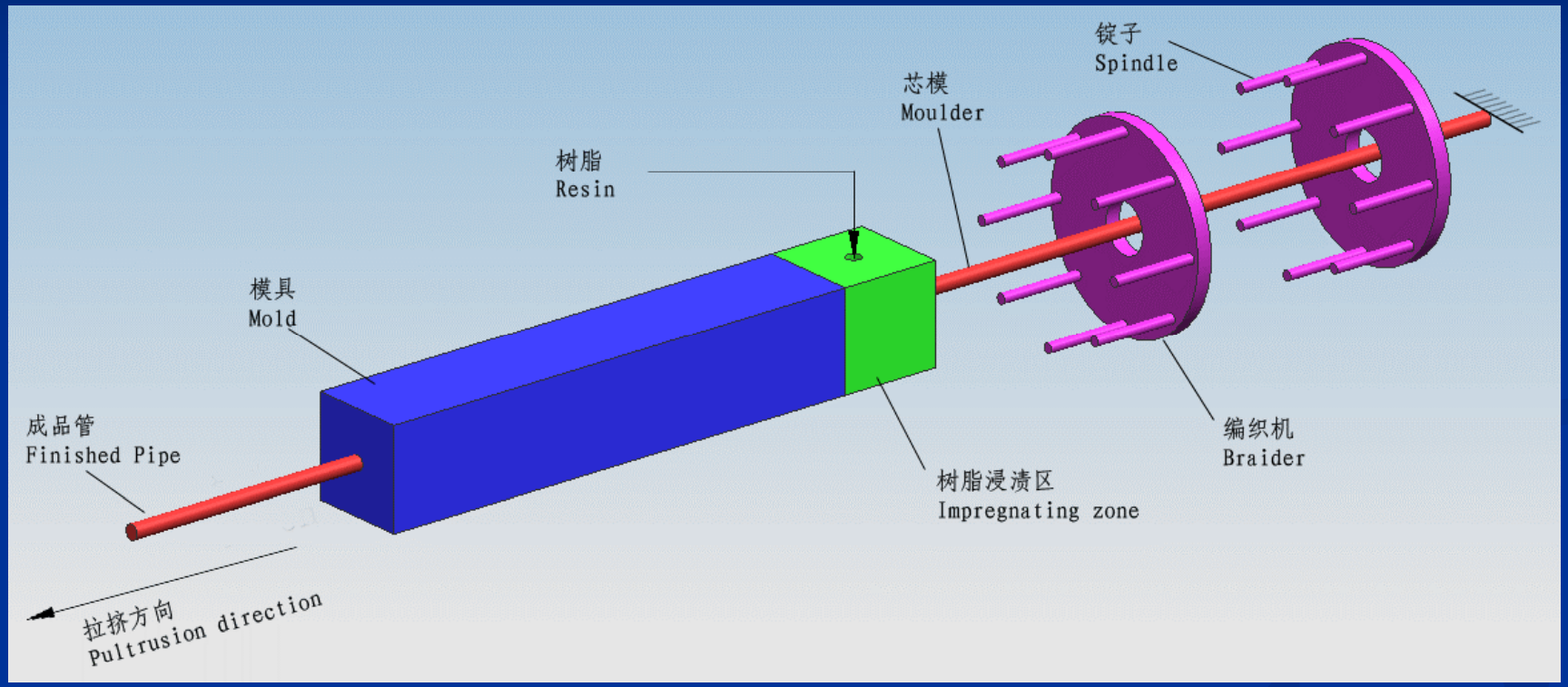
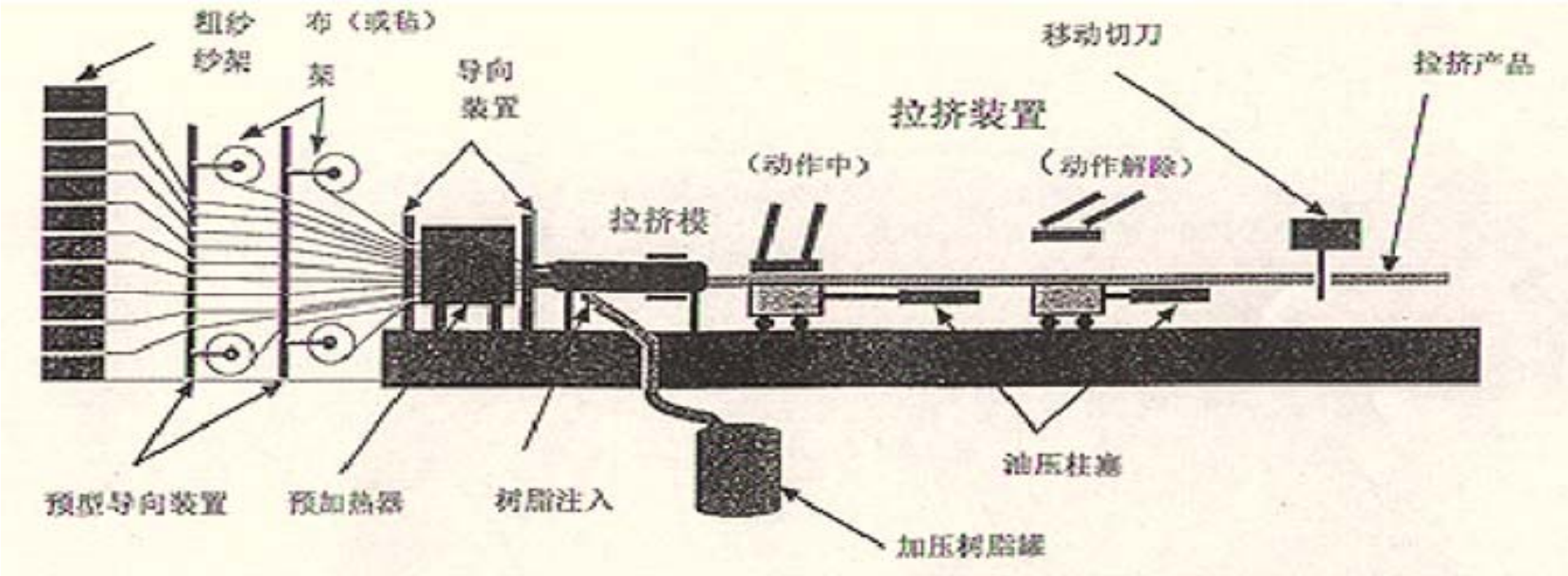


图 8 在线编织拉挤成型示意图

注入浸渍拉挤法

Injection pultrusion process



在线编织拉挤亦可轴向加纤维

	Braided structure	Axial reinforcement	
Type of fibre	Polyester	Glass	Carbon
Linear density [Tex]	110	900	1600
Number of rovings/filaments	6 bobbins with 1 yarn	2	1
	2 bobbins with 4 cables yarn		
Total linear density [Tex]	1540	1800	1600
Polymeric matrix	Vinyl ester resin		

轴向增强后的力学性能

Axial rein-forcement	Ultimate strength [MPa]		Modulus of elasticity (0,2%) [GPa]	
	Tensile	Bending	Tensile	Bending
Glass	454,5	161,0	9,0	5,9
Carbon	685,7	351,7	23,3	20,3

拉绕与在线编织-拉挤产品示例

Application of braiding on line – pultrusion Process

- 导弹喷管
- 飞机叶片
- 弹 体
- 军用帐篷支架
- 天线
- 桅杆
- 雪橇
- 风力发电机叶片
- 高尔夫球杆
- 曲棍球杆
- 电气绝缘管

在线编织-拉挤工艺的优点

Advantages of braiding on line – pultrusion Process

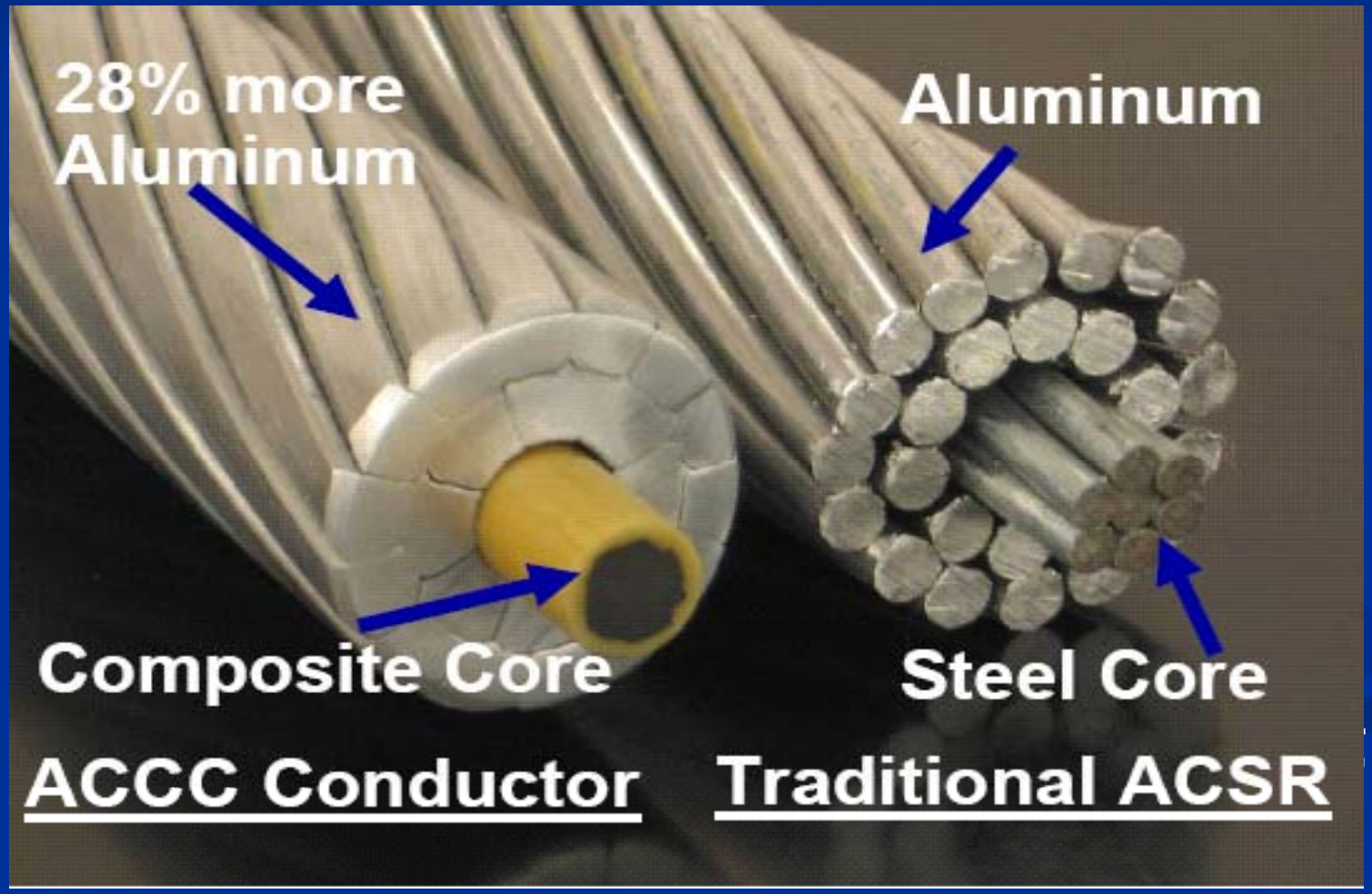
- 可连续化生产
- 劳动成本低
- 冲击强度优于纤维缠绕（由于纤维交错排列）
- 更换产品时，不受编织机原结构的限制，更换一芯模，或在原芯轴上加一轴套(外径为产品内径)即可
- 可采用2.5D或3D编织，使制品层间剪切强度呈数量级大幅度提高，且可使坯料更接近成品形状

在线编织-拉挤工艺的缺点

- 无捻粗纱不能直接用，要退绕，络纱到锭子上，再逐一装到编织机轨道盘上
- 锭子卷张量小，我国编织机锭子卷张量为130～600g/每锭。当制件横截面较大时，换锭作业增加工人劳动强度
- 一般仅适于生产小截面、薄壁的制品。大连圣泉公司采用320锭编织机，配合拉绕，制造直径达200mm管，效率比纤维缠绕还高

以拉绕与编织制造的反渗透管成功用于水处理

输电电缆碳芯(黄色可为编织之GRP)



编织管的设计计算

Calculation of braiding pipe design

D——管径

H——螺距

A——纱束宽度

B——纱束轴向高度

θ——纱束方向与轴线Y的法线所形成的角度

α——缠绕角

$\alpha+\theta=90^{o}$

N——纱束（锭子）数

$B=A/\cos\theta=A/\sin\alpha$ ……(1)

$N=\pi D/A\cos\alpha=\pi D\sin\theta/A$……(2)

式（1）中$A/\sin\alpha$或$A/\cos\theta$为纱束宽A在轴向的投影。

式（2）中的$A\cos\alpha$或$\sin\theta/A$为纱束宽A在圆周上的投影。

$N\geq16$，取偶数值。

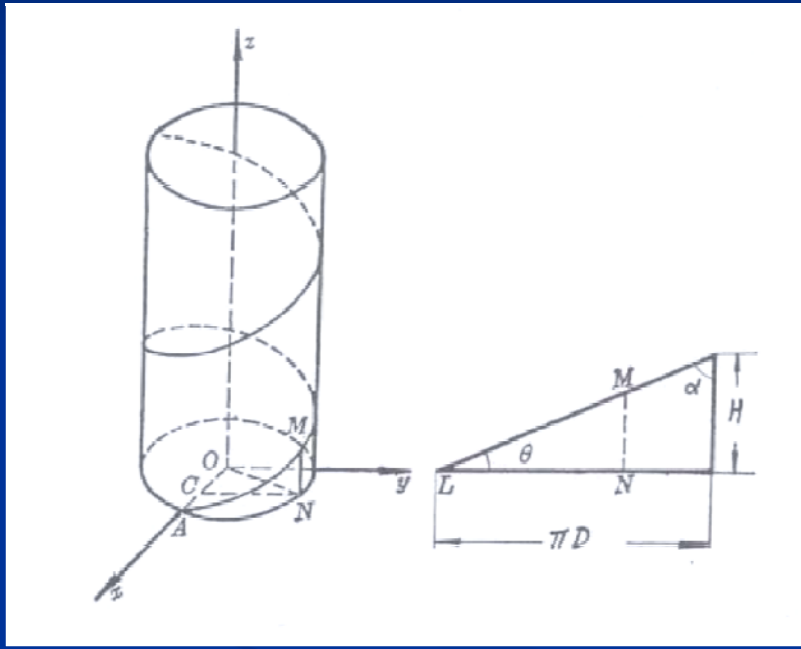


图9 纤维轨迹图

编织管的设计计算

Calculation of braiding pipe design

- 纱束在编织过程中的运动轨迹为圆柱螺旋线，其方程为
  $X=D\cos t/2$ ……(3-1)
- $Y=D\sin t/2$ ……(3-2)
- $Z=Kt$ ……(3-3)
  式中K值取决于拉挤牵引速度，t角度值为纱束所在锭子相对于纤维套管轴线所转过的角度，而非绕锭子轴线所转过的轴线。
- 由图9：$H=\pi D tg\theta$……(4)
- 由图5：$N=2H/B$ ……(5)[1]
- 式（5）中，因编织工艺，故有2倍关系；
- 式（4）与式（5）分别计算出的N值互为参考，最后N值由强度、表观等因素决定之。
- 将式（1）$B=A/\cos\theta$代入式（5）：
- $H=NB/2=NA/2\cos\theta$……(6)
- 式（6）得出了螺距H、纱束宽度、锭子（纱束）数N三参数间的关系；此三参数为编织管的主要参数，锭子数量即决定编织密度。
- 由式（4）与（6）：$H=\pi D tg\theta=\pi D\sin\theta/\cos\theta=NA/2\cos\theta$
- $\pi D\sin\theta=NA/2$
- $\sin\theta.\sin\theta=(NA/2\pi D)2$
- ∵ $\sin2\theta+\cos2\theta=1$
- ∴ $\cos\theta=[1-(NA/2\pi D)2]1/2$ ……(7)
- 将式（7）代入式（6）：
- $H=NA[1-(NA/2\pi D)2]-1/2/2=\pi D[（2\pi D/NA）2-1]-1/2$ ……(8)
- 式（8）表明管径D与螺距H、纱束粗细A、锭子数成正比。

编织管的设计计算

Calculation of braiding pipe design

图10 为纱束应力分析图

A0 ——每束纤维截面积

σf ——每束纤维的应力

AL——轴向面积分量

AH ——径向面积分量

σL—-轴向应力

σH—-径向应力

应用网络理论分析

AL=A/cosα

轴向TL=σH AL=σf A cosα .....(9)

或σH＝σf cos2α .....(10)

径向 TH =σL AH=σf Asinα.....(11)

同理σL＝σf sin2α .....(12)

径向应力与环向应力之比TL/ TH=(12)/(11)=ctg2θ.....(13)

由式（13）可见调节θ角，即可调节管材径、轴向强度比。具体强度计算，可参阅《玻璃钢工艺与性能》，此不赘述。（北京251厂编 中国建筑工业出版社1974年版）

值得一提的是，当强度已满足要求的前提下，取较小的θ角有利于拉挤工艺的顺利进行。

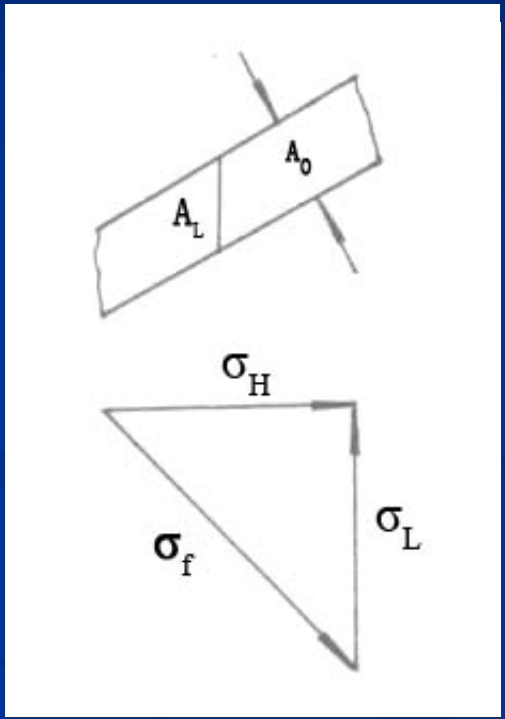


图10 纤维应力分析

设备要求

Requirements of equipments

- 拉挤机

因产品系薄壁，宜采用履带式拉挤机。其牵引履带上应采用聚氨酯橡胶块。橡胶块与所牵引管接触处应有相应的弧形，（弧形直径略大于管外径）。

- 编织机

根据工艺要求，选择立式或卧式编织机。编织机生产企业颇多，如非自行特殊订货，须将原机上的卷取部分——摇柄、蜗轮、卷取盘等取下。原卷取轴改换为相应直径的芯模，此芯模伸入模具内，其外径即为管材内径，故对其须有尺寸精度与光洁度的要求；此轴应牢固固定，不得有抖动。其根部直径可较伸入模具部分段直径略大。

- 浸渍部件

图8示 芯模自缝编机尾端直穿入模具，故无传统浸胶槽。树脂通过泵，在压力下注入模具前端的腔内。

- 模具

除前端为浸渍区外，无特殊要求。

增强材料
Reinforcement

- 增强材料
- 我们采用的是800、1200Tex的无碱玻璃纤维直接无捻粗纱，其浸润剂需与所用树脂基体相适应，并符合编织与拉挤工艺的要求。按浸润剂分，属W类。
- 玻纤纱的原始的宽度与厚度及其浸胶后的宽度与厚度无统一标准，各厂迥异。须根据实物测量，取平均值，作为实际的设计参数。
- 据了解，有的玻纤企业的无捻粗纱较扁平，有的企业的纱则相反。如某1200tex的无捻纱的纱片宽2.27mm，浸胶后厚0.4mm。

基体树脂之环氧树脂

Matrix—epoxy resin

- 选用环氧树脂，盖因其黏结力强、与玻纤复合界面剪切强度高、力学性能好之故；其次其固化时无低分子放出，体积收缩率一般为1％－2％，国外已有万分之一收缩率的环氧树脂。（不饱和聚酯树脂体积收缩率为7％－9％），拉挤产品尺寸稳定性好。
- 采用酸酐固化体系，配比为：
- 环氧树脂　100
- 引发剂　甲基四氢邻苯二甲酸酐 80
- 促进剂　季胺盐（苄基三乙基氯化胺） 2
- 实践中亦有以咪唑取代季胺盐者，效果较好。
- 模具长900mm，温度控制分为三段：
- 120℃
- 140℃
- 170℃
  - 为改善工艺性，建议采用高性能低黏度环氧树脂。

环氧树脂浇铸体及玻璃钢性能比较

mechanical properties of different type epoxy casting and FRP

树脂浇铸体及玻璃钢（无碱1:1布）力学性能比较
（固化制度：室温/24h+80℃/4h）

测试项目	浇铸体		玻璃钢	
	美国某公司	武汉理工大学	美国某公司	武汉理工大学
拉伸强度/Mpa	64.56	71.48	349.55	388.43
拉伸模量/Gpa	2.55	2.90	17.02	16.89
断裂伸长率/%	2.55	4.36	2.46	2.20
弯曲强度/MPa	102.59	88.44	335.72	436.04
弯曲模量/Gpa	2.89	3.02	13.41	14.77
压缩强度/Mpa	55.74	103.40	242.85	252.22
冲击韧性/kJ/m^2	16.12	23.08	267.60	339.50
热变形温度/℃	77.8	78.2		
25℃黏度/Pa·s	0.126	0.149		
25℃凝胶时间/min	140	150		
50℃温度下最高放热温度/℃	60	72		
80℃温度下最高放热温度/℃	150	140		

树脂基体之双马树脂

Matrix---BMI

- 625所已故资深研究员赵渠森先生几年前研发的液体双马来酰亚胺树脂价格远低于通常双马来酰亚胺树脂；可采用不饱和聚酯树脂的固化体系，加入固化剂后使用寿命在24h内，其黏度为120mPa·s，固体含量67％的树脂力学性能为：拉伸强度 > 72Mpa
- 弯曲强度 >136Mpa
- 拉伸延伸率 >2.5％
- 热变形温度 >121℃
- 巴氏硬度 55
- 说明其工艺性较一般双马佳。此种树脂在高温环境下耐酸、碱、韧性好，亦可考虑选用。

薄壁环氧玻璃钢绝缘管性能指标

Properties of glass fiber reinforced epoxy thin wall tube

标准容限	公制单位
内径（LD）	±0.025㎜
外径（OD）	±0.13㎜
长度	±0.25㎜
标准TIR同心度	0.10㎜
选用TIR同心度	0.05㎜
物理特性	
压缩强度	137.9MN/㎡
抗拉强度	137.9MN/㎡
剪切强度	44.8MN/㎡
2小时吸水率	0.12%
24小时吸水率	0.16%
电气特性	
绝缘电阻（欧姆/20㎝）	2.38×10^{12}
体积电阻率（欧姆/㎝）	2.41×10^{15}
表面电阻率（欧姆）	3.93×10^{15}
短时间介质强度（伏/米）	7.9MV/m
介电常数（60cps）	4.15

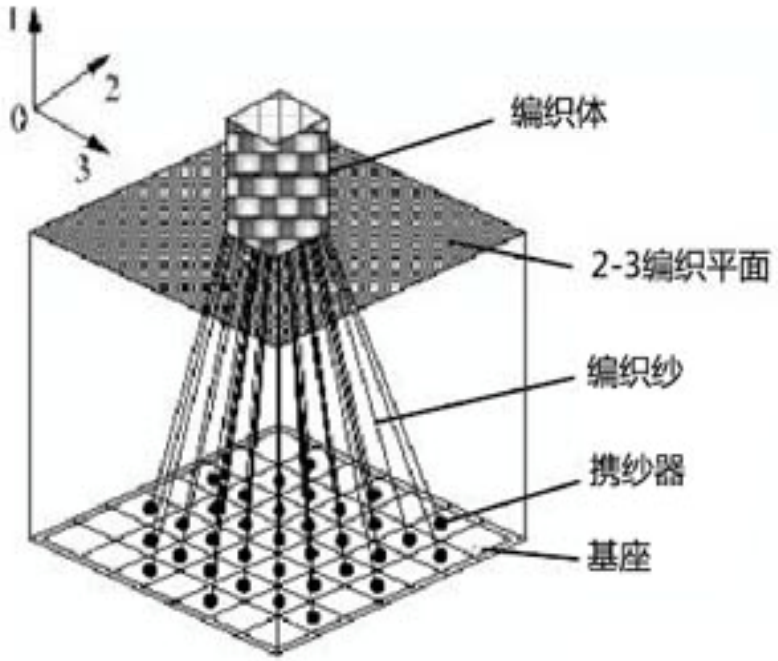
保险商实验室规范
材料类型
AFW-G-10
最小厚度
0.74mm/1.45mm
ANSIFW-G-10类颜色
原色
UL-94可燃性等级
94HB
UL746耐大电流电弧能力引燃电弧数
O.S.14
1.59mmA.S.120以上
UL746热线引燃－
引燃时间（秒）
300以上
ASTMD495耐电弧能力－漏电/引燃（秒）
130
UL746耐高电压电弧能力－漏电/引燃（秒）
180
UL746电弧漏电速度（mm/分钟）
2.34/1.80

关于编织拉挤的几句话
Conclusion

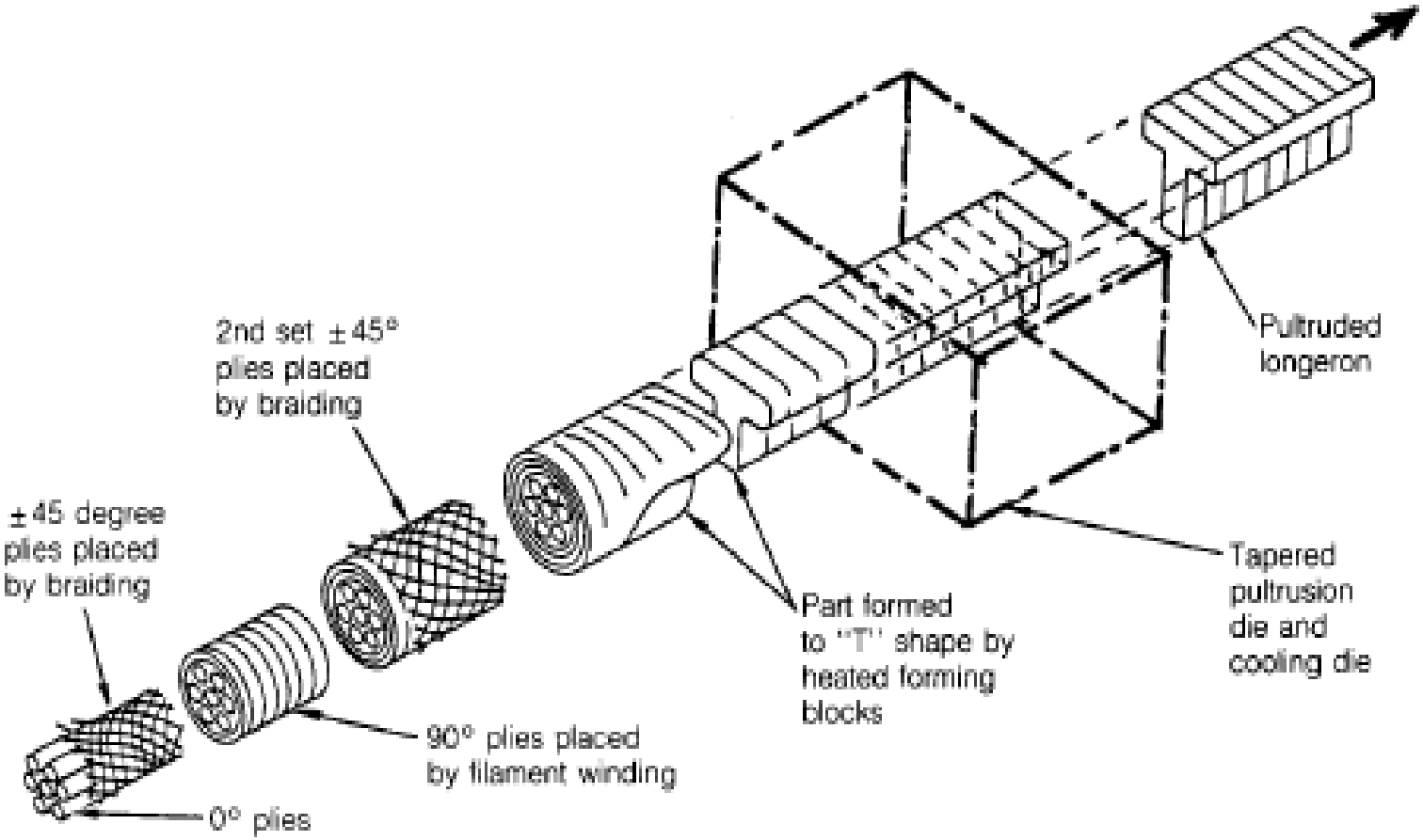
- 据了解，编织工艺在18世纪下半叶已出现，迄今已200多年，而FRP拉挤工艺则出现在上世纪40年代末，迄今也已逾半个多世纪，都是十分传统的工艺了。笔者提出将两种工艺结合起来，在线编织拉挤成型FREPR薄壁管材，也算推陈出新吧。而树脂注射到模腔内，亦可纳入CRTM范畴。本工艺已投入生产，产品经检验，各项技术指标均合格，并已获两项国家发明专利。然后阅英《Thermoset and Composites　Michel Biron》，国外也早有了，只是本人孤陋寡闻而已，也建议“自主创新”勤思考的同时，了解一下国内外的情况。自鸣得意只说明己之无知而已。

在线编织拉挤技术展望

- 变截面编织拉挤成型(参见《Composites Airframe Structures》
- 2.5D/3D编织拉挤



变截面编织拉挤成型


2nd set ±45°
plies placed
by braiding
±45 degree
plies placed
by braiding
90° plies placed
by filament winding
0° plies
Part formed
to "T" shape by
heated forming
blocks
Tapered
pultrusion
die and
cooling die
Pultruded
longeron

谢谢！ Xie xie ！ Thanks！