

等极孔气瓶的扩孔缠绕工艺

陈东方¹, 郭松¹, 张恒¹, 任俊伟¹, 崔启玉²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 2. 北京创联智软科技有限公司, 北京 100027)

摘要 本文通过纤维缠绕基础理论公式和数值模拟仿真方法, 研究纱宽直径比 k_1 、极孔直径比 k_2 对于螺旋缠绕角度 α 的影响变化规律, 研究摩擦系数 f 、稳定偏差角 $\Delta\alpha$ 对于非测地线螺旋缠绕角度 α 的影响变化规律, 使得工程师可以根据摩擦系数 f 快速计算出稳定偏差角 $\Delta\alpha$ 。基于等极气瓶稳定偏差角的适用范围, 给出扩孔缠绕工艺选择路线, 即全测地线扩孔缠绕、非测地线扩孔缠绕、等角扩孔缠绕工艺。根据渐次扩孔直径计算出螺旋缠绕角, 进行全测地线扩孔缠绕工艺的缠绕轨迹设计; 根据渐次扩孔直径与最大摩擦系数计算出非测地线螺旋缠绕角, 进行非测地线扩孔缠绕的缠绕轨迹设计; 根据渐次扩孔直径对应螺旋扩孔缠绕角与螺旋切根缠绕角计算出稳定偏差角和摩擦系数, 经过调整摩擦系数方法进行等角扩孔缠绕工艺的缠绕轨迹设计。

关键词 纤维缠绕; 工艺仿真; 稳定偏差角; 扩孔缠绕工艺

Poles Expansion Winding for Equal – Poles Pressure Vessels

CHEN Dongfang¹, GUO Song¹, ZHANG Heng¹, REN Junwei¹, CUI Qiyu²

(Crcr Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao 266111;

Beijing Intelligent United Innovation Technology Co., Ltd., Beijing 100027)

ABSTRACT This article uses the basic theoretical formulas and numerical simulation methods of filament winding process, to study the influence of the fiber – width/diameter ratio and the pole/diameter ratio on the helical winding angle, to study the influence of the friction coefficient and the stable deviation angle on the non – geodesic helical winding angle. This enables engineers to quickly calculate the stable deviation angle based on the friction coefficient. Based on the applicable range of stable deviation angle for equal poles pressure vessels, provide route selection for the poles expansion winding. They are full geodesic poles – expansion winding, non – geodesic poles – expansion winding, and equal – angle poles – expansion winding. The helical (geodesic) winding angle calculate based on the gradual expansion diameter, design the winding paths for full geodesic poles – expansion winding. The non – geodesic helical winding angle calculate based on the gradual expansion diameter and maximum friction coefficient, design the winding paths for non – geodesic poles – expansion winding. Calculate the stable deviation angle based on the helical winding angle corresponding to the gradually expansion diameter and the poles helical winding angle, and then calculate the friction coefficient, design the winding paths of the equal – angle poles – expansion winding by adjusting the friction coefficient method.

KEYWORDS filament winding; process simulation; stable deviation angle; poles expansion winding

通讯作者: 崔启玉, 男, 技术工程师。研究方向为纤维缠绕工艺数值仿真软件。E – mail: jack.cui@iuitgroup.com

1 引言

新能源车载储气瓶、轨道车辆风缸、空间电推贮能氩气瓶^[1]等碳纤维增强复合材料(CFRP)压力容器以轻量化、耐疲劳、耐腐蚀、强度高等优点,大量应用在储气储能^[2]、新能源汽车、轨道交通、航天器控制、深空探测和载人航天等各领域。

纤维缠绕等极孔气瓶(或等开口气瓶)的纵向螺旋缠绕层,因封头极孔处缠绕层较厚而采用螺旋扩孔缠绕工艺^[3]。经过科研工作者研究探索和工程实践,纤维缠绕等极孔气瓶的铺层结构设计和扩孔缠绕工艺多有论述,然而涉及扩孔缠绕工艺路线方面说明较少。本文基于纤维缠绕基础理论和纤维缠绕工艺数值仿真软件,结合等极孔气瓶芯模直径、极孔直径几何结构参数和扩孔直径工艺参数,讨论分析工艺纱宽取值原则、给出螺旋缠绕角修正公式和速算公式、稳定偏差角速算公式和非测地线螺旋缠绕角速算公式。

本文基于稳定偏差角、摩擦系数与扩孔直径的关系,给出等极孔气瓶扩孔缠绕工艺三种方法,即全测地线扩孔缠绕、非测地线扩孔缠绕、等角扩孔缠绕工艺。

2 研究内容

纤维缠绕等极孔缠绕气瓶,广泛应用于各个领域。根据缠绕气瓶承压力学要求,等极孔缠绕气瓶的主要缠绕工艺包括环向缠绕工艺如图1所示、螺旋切根缠绕工艺如图2所示;因气瓶肩部环向强度不足采用的肩部补强缠绕工艺包括环向肩部补强缠绕工艺如图3所示、螺旋肩部补强缠绕工艺如图4所示、螺旋肩部局部缠绕工艺如图5所示;因极孔缠绕堆积而采用的螺旋扩孔缠绕工艺如图6所示。每一种缠绕工艺都有其特定的缠绕条件,本文主要讨论螺旋扩孔缠绕的工艺路线选择问题。

2.1 气瓶的缠绕工艺

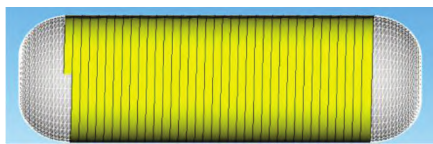


图1 筒身环向缠绕工艺(湿法缠绕)

环向肩部补强缠绕工艺与螺旋肩部局部缠绕工艺采用湿法缠绕时较难实现,而采用干法缠绕时可

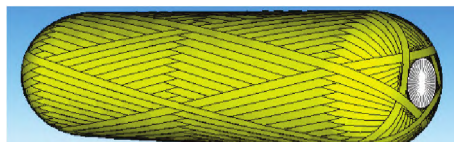


图2 螺旋切根缠绕工艺(湿法缠绕)

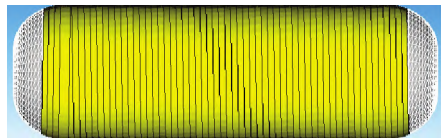


图3 环向肩部补强缠绕工艺(干法缠绕)

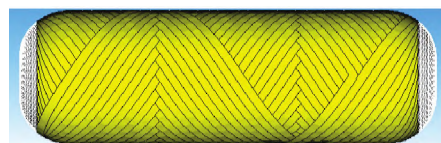


图4 螺旋肩部补强缠绕工艺(湿法缠绕)

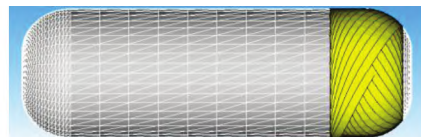


图5 螺旋肩部局部缠绕工艺(干法缠绕)

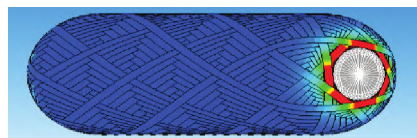


图6 螺旋扩孔缠绕工艺(湿法缠绕)

实现。因湿法缠绕的缠绕层间摩擦系数较小,摩擦系数 f 通常在 $0.1 \sim 0.14$ 之间;而干法缠绕的缠绕层间摩擦系数较大,摩擦系数 f 通常在 $0.3 \sim 0.37$ 之间。图3的环向肩部补强缠绕工艺(干法缠绕),摩擦系数设置为 0.37 ,缠绕角 89° 。图5的螺旋肩部局部缠绕工艺,摩擦系数设置为 0.37 ,缠绕角 60° 。

如果要应用好螺旋扩孔缠绕工艺,必须准确把握特定封头几何轮廓情况下的稳定偏差角的评估计算。了解芯模直径、极孔直径、渐次扩孔直径、摩擦系数对于工艺纱宽、螺旋缠绕角、非测地线螺旋缠绕角、稳定偏差角的影响规律。

2.2 工艺纱宽的确定

本文讨论的工艺纱宽取值原则适用于包含 $0 \sim 30^\circ$ 小缠绕角度的缠绕工艺。工艺纱宽取值,需要兼顾纱带贴模性(纱带贴角 β)、纱带压实性(落纱厚度 t)、纱带展宽稳定性(纱宽夹角 $2A$)和缠

绕效率 (缠绕圈数 N_c) 多个因素。工艺纱宽不仅影响螺旋缠绕角计算, 还涉及数控缠绕机丝架配置和送纱丝嘴结构设计, 故此先确定工艺纱宽的取值范围。本文根据影响纱宽贴模性的纱带贴模高度进行缠绕质量控制, 设置贴模弦高小于等于 1.5 % 的落纱宽度, 以此推导纱宽直径比 k_1 , 如图 7 所示。

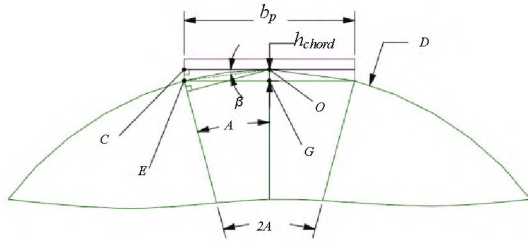


图7 零度缠绕的纱带芯模截面图

纱带展宽稳定条件, 假设纱带以零度缠绕角进行缠绕时, 纱带在圆周方向的展宽稳定性满足物体在斜面上的摩擦稳定原理, 则纱带贴角 β 正切值需要小于等于纤维轨迹曲线斜度 $f_{\angle}$ 。定义纱带贴角为 $\angle COE$, 则:

$$\begin{cases} \tan\beta = \frac{h_{\text{chord}}}{b_p/2} \Rightarrow \tan\beta = \frac{2h_{\text{chord}}}{b_p} = \begin{cases} f_{\angle} = \frac{2h_{\text{chord}}}{b_p} \\ \frac{h_{\text{chord}}}{b_p} \leq 1.5\% \end{cases} \Rightarrow \\ \beta = \angle COE, \tan\beta = f_{\angle} \end{cases}$$

$$f_{\angle} \leq 3\% \quad (1)$$

纱带贴模斜度公式 (1), 式中 β 为纱带贴模角, h_{chord} 为贴模弦高, b_p 为纱带宽度, $f_{\angle}$ 为贴模斜度。

根据上述公式, 我们设置贴模弦高小于等于 1.5 % 的落纱宽度, 则得出贴模斜度 $f_{\angle} \leq 3\%$ 。接下来, 我们根据纱宽夹角 $2A$ 与纱带贴模角 β 的关系, 推导出纱宽直径比系数 k_2 的取值范围。

$$\begin{cases} \tan A = \frac{b_p/2}{D/2 - h_{\text{chord}}} \Rightarrow \begin{cases} \tan A \approx \frac{b_p}{D} \Rightarrow \tan A \approx k_1 \\ k_1 = \frac{b_p}{D} \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \tan A = \tan 2\beta = \frac{2\tan\beta}{1 - \tan^2\beta} = \frac{2f_{\angle}}{1 - f_{\angle}^2} \Rightarrow k_1 \approx \frac{2f_{\angle}}{1 - f_{\angle}^2}, k_1 \approx \end{cases}$$

$$6\%, k_2 \approx \frac{1}{16} \quad (2)$$

纱宽直径比公式 (2), 式中 A 为 $1/2$ 纱宽夹角, b_p 为纱带宽度, D 为芯模直径, k_1 为纱宽直径比, β 为纱带贴模角。

故此, 根据纱宽直径比系数 k_1 小于等于 6 %, 则

$\tan A \approx k_1$, $A = 3.43^\circ$, $2A = 6.87^\circ$, 这时缠绕圈数 N_c 近似 $N_c = \frac{360}{2A} \approx \frac{360}{6.97} \approx 53$, 这是根据贴模弦高控制纱带贴模高度 $h_{\text{chord}} \leq 1.5\% b_p$ 条件下的缠绕圈数 $N_c = 53$ 。

举例说明, 如果芯模直径 150 mm, 按照纱宽直径比 $k_1 \approx 1/16$, 可知工艺纱宽取值在 9 mm, 按 1.5 % 落纱宽度取值的贴模弦高为 0.135 mm, 线密度 800 g/km 的碳纤维湿法缠绕工艺的落纱厚度常在 0.15 ~ 0.25 左右, 其贴模弦高小于落纱厚度。

2.3 螺旋角度的确定

常用压力容器的两端封头, 当计算螺旋缠绕角时需要考虑纱宽因素影响, 因封头缠绕区纱带的纱宽中线落纱点和 2 个纱带侧边落纱点具有不同落纱点直径, 这样计算出的螺旋缠绕角不同, 故此螺旋缠绕角需按纱带中线计算。封头缠绕区的落纱点如图 8 所示。

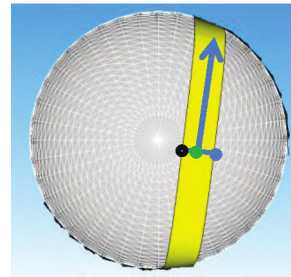


图8 封头缠绕区的落纱点

举例说明: 芯模直径 150 mm, 极孔直径 30 mm, 工艺纱宽 10 mm 时螺旋缠绕角 23.58° , 工艺纱宽 0.5 mm 时螺旋缠绕角 20.00° 。由此可见, 在纱宽直径比相对较大情况下, 不同纱宽情况下实际应用的螺旋缠绕角甚至超出 3.58° , 如图 9 所示。

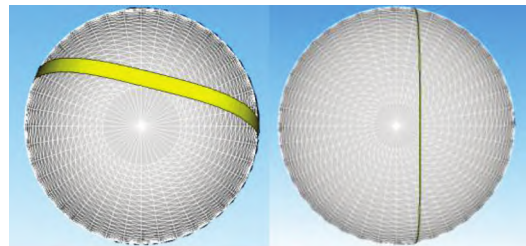


图9 工艺纱宽影响的螺旋缠绕角

根据螺旋缠绕运动特点, 纤维轨迹在芯模表面空间呈现出螺旋线规律, 科研工作者总结出螺旋缠绕时筒身段缠绕角度计算公式, 纤维轨迹上任意一个落纱点处缠绕角与对应芯模直径之积为常量, 此为螺旋缠绕角理论公式。

$$\begin{cases} D_i \sin \alpha_i = D_j \sin \alpha_j \\ D_i \sin 90^\circ = D \sin \alpha \end{cases} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{D_i}{D} \quad (3)$$

螺旋缠绕角理论公式 (3), 式中 α_i 和 D_i 为纤维轨迹在任意落纱点处的缠绕角和对应芯模直径, α_j 和 D_j 为纤维轨迹在任意落纱点处的缠绕角和对应芯模直径, α 和 D 为纤维轨迹在芯模筒身段落纱点处缠绕角和对应芯模直径。

纱带宽度通常分为纤维纱卷的单束粗纱宽度、导纱辊轮上的展纱宽度, 芯模表面的落纱宽度。纱带宽度在缠绕过程中的位置不同, 纱带的落纱宽度也不同, 有缠绕机轴数影响因素, 也有丝嘴结构设计等影响因素。螺旋缠绕角度计算依据芯模表面的落纱宽度计算, 如果芯模前后封头的落纱宽度与筒身段落纱宽度相同, 则螺旋缠绕角理论公式 (3) 改为螺旋缠绕角修正公式。

$$\begin{cases} D \sin \alpha \approx (D_1 + b_p) \sin 90^\circ \Rightarrow D \sin \alpha \approx D_1 + b_p \Rightarrow \\ \sin \alpha \approx \frac{D_1 + b_p}{D} \\ k_2 = \frac{D_2}{D}, k_1 = \frac{b_p}{D} \end{cases} \Rightarrow \sin \alpha \approx k_2 + k_1 \quad (4)$$

螺旋缠绕角修正计算公式 (4), 式中 α 为筒身螺旋缠绕角, D_1 为前后极孔直径, k_2 为前后极孔直径比, k_1 为纱宽直径比。

此公式只适用于封头轮廓曲线的端面线近乎垂直于芯模轴线的情况, 通常椭圆形封头、球形封头、蝶形封头适用, 但是对于锥形封头不适用。对于适用封头类型的螺旋缠绕角偏差, 近似等于以落纱宽度为极孔直径对应的螺旋缠绕角。

2.4 螺旋缠绕角速算

正弦三角函数在 $0 \sim 30^\circ$ 区域, 其正弦曲线近似为直线, 故此可以将螺旋缠绕角公式改为一元一次方程 $\alpha \approx m k_2 + \arcsin(k_1)$, 直线斜率 m 按 $k_2 = 0.5$ 极孔直径比对应的 30° 螺旋缠绕角计算。

$$\begin{cases} \alpha \approx m k_2 + \arcsin(k_1) \\ m = 30 / 0.5 = 60 \\ k_1 = 1/16 \end{cases} \Rightarrow \alpha \approx 60 k_2 + 3.58 \quad (5)$$

$$\Rightarrow k_2 \approx (\alpha - 3.58) / 60 \quad (6)$$

螺旋缠绕角速算公式 (5)、极孔直径比速算公式 (6), 式中 α 为螺旋缠绕角, m 为螺旋缠绕角一元一次直线方程的斜率, k_2 为极孔直径比, k_1 为纱宽直径比。典型极孔直径比的螺旋缠绕角速算值如

表 1 所示。通过表 1 螺旋缠绕角速算值可知, 当采用螺旋缠绕角速算公式时, 其螺旋缠绕角速算值与螺旋缠绕角修正公式的计算精度误差在 2 % 左右。由于可见, 可以根据螺旋缠绕角速算值进行缠绕工艺角度的计算取值。

表 1 螺旋缠绕角速算值表

极孔直径比	纱宽影响角	螺旋缠绕角	螺旋角速算值	速算精度 %
1/16	3.58	7.18	7.33	2.12%
1/10	3.58	9.35	9.58	2.47%
1/9	3.58	10.00	10.25	2.52%
1/8	3.58	10.81	11.08	2.56%
1/7	3.58	11.85	12.15	2.57%
1/6	3.58	13.25	13.58	2.53%
1/5	3.58	15.22	15.58	2.40%
1/4	3.58	18.21	18.58	2.05%
1/3	3.58	23.32	23.58	1.14%
1/2	3.58	34.23	33.58	1.89%
0.55	3.58	37.77	36.58	3.14%
0.60	3.58	41.49	39.58	4.60%
0.65	3.58	45.44	42.58	6.28%
0.70	3.58	49.69	45.58	8.26%
0.75	3.58	54.34	48.58	10.60%

2.5 稳定偏差角速算

1990 年冷兴武著的《纤维缠绕原理》书中论述非测地线稳定缠绕力学模型, 并由此给出非测地线缠绕稳定方程式。

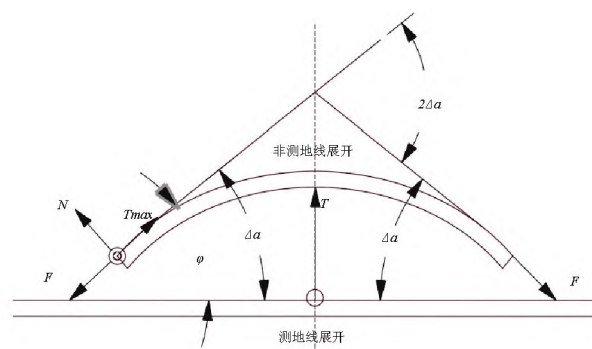


图 10 非测地线稳定缠绕力学模型

$$T = 2F \sin(\Delta \alpha), F \leq T_{\max}, \tan \phi = \frac{T_{\max}}{N} = kf \Rightarrow$$

$$\Delta \alpha = \alpha - \alpha', \Delta \alpha \leq \phi \quad (7)$$

非测地线缠绕稳定方程 (7), 式图中 T 为纱带与缠绕层之间摩擦力, F 为纤维张力, $\Delta \alpha$ 为稳定偏差角, α 为螺旋缠绕角, α' 为非测地线螺旋缠绕

角, φ 为斜面倾角, n 为落纱点法向支撑力, $T_{\max}$ 为落纱点处最大摩擦力, f 为摩擦系数, k 为滑移安全系数。此公式是在纤维轨迹曲线曲率均匀且铺纱速度均匀理想情况下的理论静平衡方程式。

由此可见, 一段纤维轨迹的稳定偏差角 $\Delta\alpha$ 与斜面倾角 φ 都与摩擦系数相关, 而与纤维张力和缠绕速度无关, 都只是摩擦系数 f 的函数。两者不同的是: 稳定偏差角 $\Delta\alpha$ 与摩擦系数 f 是正弦三角函数关系, 斜面倾角 φ 与摩擦系数 f 是正切三角函数关系。当角度在 0° 至 22.5° 时, 稳定偏差角 $\Delta\alpha$ 的正弦值与斜面倾角 φ 的正切值近似相等, 两个相应三角函数值相差 3% 之内且近似线性; 当角度在 22.5° 至 30° 时, 相应三角函数值相差在 3% 至 8% 之内且近似线性。这样, 工程师可以直接通过摩擦系数计算出非测地线缠绕的稳定偏差角。

$$\begin{cases} \sin \Delta\alpha = \text{function}(kf), \Delta\alpha = \arcsin(kf) \\ \tan \varphi = \text{function}(kf), \varphi = \arctan(kf) \\ \alpha = 0^\circ - 22.5^\circ \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\alpha = \arcsin(kf) \\ \alpha = 0^\circ - 22.5^\circ \end{cases} \Rightarrow \Delta\alpha \approx \arctan f \quad (8)$$

稳定偏差角计算公式 (8), 式中 $\Delta\alpha$ 为稳定偏差角, k 为滑移安全系数 (滑移安全系数由纤维轨迹曲线曲率不均匀变化或突变、以及纤维张力或缠绕速度变化而引起), f 为摩擦系数, φ 为落纱点处斜面角 (摩擦角), α 为螺旋缠绕角。

稳定偏差角计算公式 (8), 适用于 0° 至 30° 螺旋缠绕角的适宜封头类型和极孔直径比 0.5 内的气瓶。当极孔直径比为 0.5 时, 可以涵盖绝大多数椭圆型封头类型气瓶。基于摩擦系数与稳定偏差角如表 2 所示, 可得出摩擦系数与稳定偏差角曲线如图 11 所示。

表 2 摩擦系数与稳定偏差角表

摩擦系数	稳定偏差角	螺旋缠绕角	极孔直径比
0.01	0.57	0.57	0.01
0.02	1.15	1.15	0.02
0.03	1.72	1.72	0.03
0.04	2.29	2.29	0.04
0.05	2.86	2.86	0.05
0.06	3.43	3.43	0.06
0.07	4.00	4.00	0.07
0.08	4.57	4.57	0.08
0.09	5.14	5.14	0.09

摩擦系数	稳定偏差角	螺旋缠绕角	极孔直径比
0.10	5.71	5.71	0.10
0.11	6.28	6.28	0.11
0.12	6.84	6.84	0.12
0.13	7.41	7.41	0.13
0.14	7.97	7.97	0.14
0.15	8.53	8.53	0.15
...	...	...	...
0.16	9.09	9.09	0.16
0.19	10.76	10.76	0.19
0.22	12.41	12.41	0.21
0.25	14.04	14.04	0.24
0.28	15.64	15.64	0.27
0.31	17.22	17.22	0.30
0.32	17.74	17.74	0.30
0.34	18.78	18.78	0.32
0.37	20.30	20.30	0.35

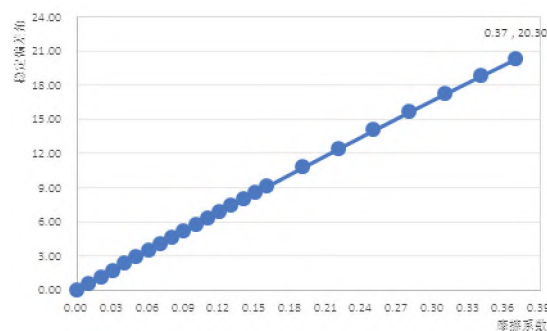


图 11 摩擦系数与稳定偏差角曲线图

基于摩擦系数与稳定偏差角曲线图可知, 稳定偏差角近似为摩擦系数的一元一次方程, 且曲线通过坐标原点, 故此稳定偏差角计算公式可以简化为:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = kf \times \frac{20.3}{0.37} \Rightarrow \Delta\alpha \approx 54.7 \times f \\ k = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \alpha' = \alpha - \Delta\alpha \\ \Delta\alpha \approx 57.4 \times f \Rightarrow \alpha' \end{cases} \quad (10)$$

$$f \approx \frac{\Delta\alpha}{54.7} \quad (11)$$

稳定偏差角速算公式 (9)、非测地线螺旋角速算公式 (10)、稳定摩擦系数速算公式 (11), 式中 α' 非测地线螺旋缠绕角, α 为螺旋缠绕角, $\Delta\alpha$ 为稳定偏差角, k 为滑移安全系数 (理想情况下,

$k=1$), f 为摩擦系数。根据稳定摩擦系数速算公式, 可以快速地计算出将理论螺旋缠绕角改变为非测地线缠绕角时所依赖的摩擦系数。

表 3 稳定偏差角对应的摩擦系数表

稳定偏差角	螺旋缠绕角	非测地线螺旋缠绕角	速算摩擦系数	模拟摩擦系数
0	23.16	23.16	0.000	0.000
2	23.16	21.16	0.037	
4	23.16	19.16	0.073	
6	23.16	17.16	0.110	0.110
8	23.16	15.16	0.146	
10	23.16	13.16	0.183	
12	23.16	11.16	0.219	
14	23.16	9.16	0.256	
16	23.16	7.16	0.293	
18	23.16	5.16	0.329	
20	23.16	3.16	0.366	0.350

本文应用 CADWIND 的 iwind 非测地线交互缠绕算法进行可缠绕性计算, 进行稳定偏差角的仿真模拟分析, 验证本文推导的稳定偏差角速算公式。

缠绕工艺参数: 本文使用芯模直径 150 mm、两端封头极孔直径 50 mm, 封头高度 50 mm, 工艺纱宽 9 mm。

(1) 测地线的工艺参数及仿真结果:

应用算法: iwind 非测地线交互缠绕算法;

螺旋缠绕角 = 23.16, 稳定偏差角 = 0°;

计算参数: 缠绕角 = 23.16, 无摩擦系数;

仿真参数: 缠绕角 = 23.16, 摩擦系数 = 0;

仿真结果: 纤维轨迹, 极孔正好切根。测地线的仿真结果如图 12 所示

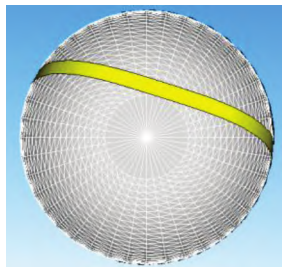


图 12 测地线的仿真结果

(2) 稳定偏差角 6°的工艺参数及仿真结果:

应用算法: iwind 非测地线交互缠绕算法;

螺旋缠绕角 = 23.16, 稳定偏差角 = 6°;

计算参数: 缠绕角 = 17.16, 摩擦系数 = 0.11;

仿真参数: 缠绕角 = 17.16, 摩擦系数 = 0.11;

仿真结果: 纤维轨迹, 极孔近似切根。

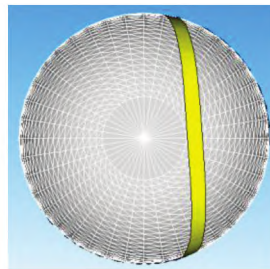


图 13 稳定偏差角 6°的仿真结果

(3) 稳定偏差角 20°的工艺参数及仿真结果:

应用算法: iwind 非测地线交互缠绕算法;

螺旋缠绕角 = 23.16, 稳定偏差角 = 20°;

计算参数: 缠绕角 = 3.16, 摩擦系数 = 0.366;

仿真参数: 缠绕角 = 3.16, 摩擦系数 = 0.350;

仿真结果: 纤维轨迹, 极孔刚好切根。

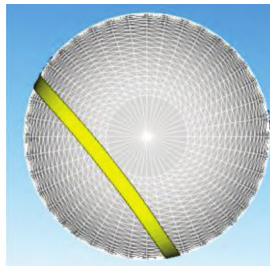


图 14 稳定偏差角 20°的仿真结果

(4) CADWIND 软件中给出的摩擦系数参考值表 4, 用于指导工程实践中的摩擦系数设置。实际工程应用中, 由于树脂应用类型、缠绕时的环境温度和树脂粘度不同, 用户需要实际测量使用。

表 4 摩擦系数参考值表

芯模/纱带	干纱	湿纱	预浸料
金属光滑芯模	0.18	0.15	0.35
塑料光滑芯模	0.2	0.17	0.32
干纱缠绕层表面	0.22	— — —	— — —
浸渍缠绕层表面	— — —	0.14	— — —
预浸料缠绕表面	— — —	— — —	0.37

从软件仿真计算结果分析可知, 典型情况下, 摩擦系数的计算结果与软件仿真的模拟结果基本相当, 摩擦系数等于稳定偏差角 $\Delta\alpha$ 除以 54.7 ($f \approx \Delta\alpha/54.7$)。

应用摩擦系数的计算结果与软件仿真的模拟结果之间存在少许的偏差。偏差产生原因在于应用 CADWIND 非测地线进行缠绕线型计算时, 不仅需

要进行可缠绕性计算,还要兼顾缠绕线型闭合计算。

2.6 扩孔缠绕工艺路线

等极孔气瓶的纵向螺旋缠绕层,因封头极孔处缠绕层厚度较厚而常采用扩孔缠绕工艺。当前,工程上螺旋扩孔工艺常根据封头极孔尺寸和工艺纱宽,渐次地计算出扩孔直径和扩孔螺旋缠绕角,进行扩孔缠绕工艺设计。本文介绍一种,针对等极孔气瓶的等角扩孔缠绕工艺,即渐次扩孔缠绕工艺的缠绕角保持不变,经过调整摩擦系数方式进行扩孔缠绕工艺;此等角扩孔缠绕工艺优点,在筒身缠绕区只存在环向缠绕角、纵向螺旋缠绕角两个角度,可以简化了筒身缠绕层的结构强度计算。

2.6.1 扩孔缠绕路线选择

因封头极孔处缠绕层厚度较厚而常采用扩孔缠绕工艺,扩孔缠绕工艺参数包括:

- (1) 扩孔直径和工艺纱宽
- (2) 缠绕角度和摩擦系数

因扩孔缠绕工艺的摩擦系数使用方法不同,采用测地线线型和非测地线线型不同,而产生三种扩孔缠绕工艺,分为全测地线扩孔缠绕、非测地线扩孔缠绕和等角扩孔缠绕工艺。

2.6.2 全测地线扩孔缠绕

全测地线扩孔缠绕,根据渐次扩孔直径计算出渐次扩孔螺旋缠绕角,所有扩孔缠绕线型不使用摩擦系数,所有扩孔缠绕线型为测地线线型。渐次扩孔直径参考工艺纱宽进行扩孔增量计算,因封头轮廓曲线的椭圆长短轴比不同以及初始切根螺旋缠绕角不同,扩孔增量通常可采用倍落纱宽度 ($n \times b_p$, n 取值范围 $1 \sim 2$, 为正有理数) 进行参考;其次落纱宽度受数控缠绕轴数和缠绕角度影响,工程上应以实际封头处落纱宽度进行计算。

表 5 全测地线扩孔缠绕工艺列表

扩孔工艺	切根缠绕	扩孔缠绕 1	扩孔缠绕 2	扩孔缠绕 3
芯模直径	D	D	D	D
极孔直径	D_1	D_1	D_1	D_1
工艺纱宽	b_v	b_v	b_v	b_v
扩孔增量	b_v	$b_n + nb_n$	$b_n + 2nb_n$	$b_n + 3nb_n$
扩孔直径	$D_1 + b_n$	$D_1 + b_n + b_n$	$D_1 + b_n + 2b_n$	$D_1 + b_n + 3b_n$
螺旋角度	α	α_1	α_2	α_3
...	...	...	...	...
偏差角度	0	0	0	0

扩孔工艺	切根缠绕	扩孔缠绕 1	扩孔缠绕 2	扩孔缠绕 3
实用角度	α	α_1	α_2	α_3
摩擦系数	0	0	0	0
筒身缠绕	测地线	测地线	测地线	测地线
封头缠绕	测地线	测地线	测地线	测地线

2.6.3 非测地线扩孔缠绕

非测地线扩孔缠绕,根据渐次扩孔直径计算出渐次扩孔螺旋缠绕角,所有扩孔缠绕线型使用最大摩擦系数所对应的非测地线缠绕角,所有扩孔缠绕线型的筒身缠绕区为测地线线型,而封头缠绕区为非测地线线型。

表 6 非测地线扩孔缠绕工艺列表

扩孔工艺	切根缠绕	扩孔缠绕 1	扩孔缠绕 2	扩孔缠绕 3
芯模直径	D	D	D	D
极孔直径	D_1	D_1	D_1	D_1
工艺纱宽	b_v	b_v	b_v	b_v
扩孔增量	b_v	$b_n + nb_n$	$b_n + 2nb_n$	$b_n + 3nb_n$
扩孔直径	$D_1 + b_n$	$D_1 + b_n + b_n$	$D_1 + b_n + 2b_n$	$D_1 + b_n + 3b_n$
螺旋角度	α	α_1	α_2	α_3
...	...	...	...	...
偏差角度	6.84	6.84	6.84	6.84
实用角度	-6.84	-6.84	-6.84	-6.84
摩擦系数	0.12	0.12	0.12	0.12
筒身缠绕	测地线	测地线	测地线	测地线
封头缠绕	非测地线	非测地线	非测地线	非测地线

2.6.4 等角扩孔缠绕工艺

等角扩孔缠绕工艺,根据渐次扩孔直径计算出渐次扩孔螺旋缠绕角,由扩孔螺旋缠绕角与极孔切根缠绕角之差计算出稳定偏差角,由稳定偏差角计算出摩擦系数,通过调整摩擦系数进行纤维轨迹设计。所有扩孔缠绕线型的筒身缠绕区为测地线线型,而封头缠绕区为非测地线线型。

表 7 等角扩孔缠绕工艺列表

扩孔工艺	切根缠绕	扩孔缠绕 1	扩孔缠绕 2	扩孔缠绕 3
芯模直径	D	D	D	D
极孔直径	D_1	D_1	D_1	D_1
工艺纱宽	b_v	$b_v + nb_v$	$b_v + 2nb_v$	$b_v + 3nb_v$
扩孔增量	b_v	$b_n + nb_n$	$b_n + 2nb_n$	$b_n + 3nb_n$
扩孔直径	$D_1 + b_n$	$D_1 + b_n + b_n$	$D_1 + b_n + 2b_n$	$D_1 + b_n + 3b_n$
螺旋角度	α	α_1	α_2	α_3
...	...	...	...	...
偏差角度	0			

扩孔工艺	切根缠绕	扩孔缠绕 1	扩孔缠绕 2	扩孔缠绕 3
实用角度	α	α	α	α
摩擦系数	0	f_1	f_2	f_3
筒身缠绕	测地线	测地线	测地线	测地线
封头缠绕	测地线	非测地线	非测地线	非测地线

2.6.5 等角扩孔缠绕举例

本文结合一个气瓶具体案例，对等角扩孔缠绕进行举例说明。产品几何尺寸：筒身直径 $D = 150\text{ mm}$ ，筒身长度 $L_c = 300\text{ mm}$ ；前极孔直径 $D_1 = 50\text{ mm}$ ，前封头高 $H_1 = 50\text{ mm}$ ；前极孔直径 $D_2 = 50\text{ mm}$ ，前封头高 $H_2 = 50\text{ mm}$ 。

产品工艺参数：纱宽 $b_p = k_1 \times D = 9\text{ mm}$ ，第一道螺旋切根缠绕（缠绕角 23.16° ），第二道螺旋扩孔缠绕 1（缠绕角 23.16° ），第三道螺旋扩孔缠绕 2（缠绕角 23.16° ），第四道螺旋包根缠绕（缠绕角 23.16° ）。

表 8 等角扩孔缠绕示范工艺列表

扩孔工艺	切根缠绕	扩孔缠绕 1	扩孔缠绕 2	切根缠绕
芯模直径	150	150	150	150
极孔直径	50	50	50	50
工艺纱宽	9	9	9	9
扩孔增量	9	$9 + 1 \times 9$	$9 + 2 \times 9$	9
扩孔直径	59	68	77	59
螺旋角度	23.16	16.96	30.88	23.16
...	...	...	...	...
偏差角度	0	3.8	7.72	0
实用角度	23.16	23.16	23.16	23.16
摩擦系数	0	0.07	0.14	0
验证角度	23.16	19.36	15.44	23.16
筒身缠绕	测地线	测地线	测地线	测地线
封头缠绕	测地线	非测地线	非测地线	测地线

软件仿真验证结果:

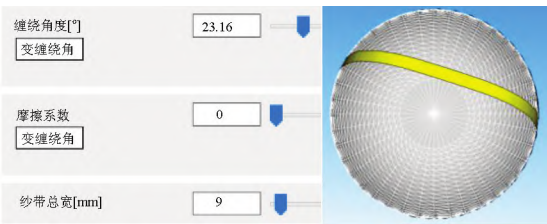


图 15 缠绕角 23.16° / 摩擦系数 $f = 0$ 的仿真结果

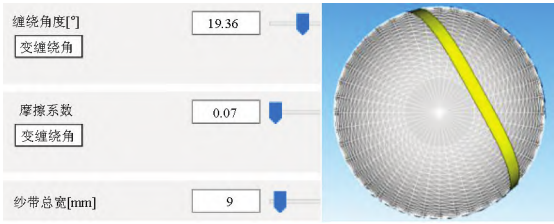


图 16 缠绕角 19.36° / 摩擦系数 $f = 0.07$ 的仿真结果

3 结语

结合纤维缠绕理论和仿真技术，给出了工艺纱宽和稳定偏差角的计算公式，纱宽直径比 $k_1 \approx 1/16$ ，非测地线稳定偏差角速算公式为 $\Delta\alpha \approx 54.7 \times f$ ，非测地线缠绕的摩擦系数速算公式为 $f \approx \Delta\alpha/54.7$ 。根据稳定偏差角与摩擦系数关系，给出等极孔气瓶的三种扩孔缠绕工艺路线，为全测地线扩孔缠绕、非测地线扩孔缠绕、等角扩孔缠绕工艺。

全测地线扩孔缠绕根据渐次扩孔直径计算出测地线缠绕角进行缠绕轨迹设计，纵向螺旋缠绕层的平均螺旋缠绕角最大；非测地线扩孔缠绕根据渐次扩孔直径与最大摩擦系数计算出非测地缠绕角进行缠绕轨迹设计，纵向螺旋缠绕层的平均螺旋缠绕角最小；等角扩孔缠绕工艺根据渐次扩孔直径对应螺旋缠绕角与极孔切根缠绕缠绕角计算出稳定偏差角、摩擦系数，经过调整摩擦系数方法进行缠绕轨迹设计，纵向螺旋缠绕层的平均螺旋缠绕角相对其它两种居中。

参考文献

[1] 王祥龙,程彬,刘志栋. 复合材料缠绕氩气瓶研制技术 [J]. 纤维复合材料, 2015, 32 (02): 3-6.

[2] 吴伟萍,于柏峰,赵亮,等. 复合材料压力容器的研究与制备 [J]. 纤维复合材料, 2024, 41 (01): 95-99.

[3] 张星星,陈明新. 纤维缠绕压力容器扩极孔工艺研究 [J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47 (06): 39-42.

[4] 冷兴武. 纤维缠绕原理 [M]. 山东科学技术出版社, 1990: 121-122.