

理论与应用

纤维缠绕基本原理的应用

冷兴武

(哈尔滨玻璃钢研究所 150036)

摘要 本文给出10条纤维缠绕基本原理，并重点讨论其在实践中的应用。

关键词 纤维缠绕 基本原理 实际应用

ABSTRACT Ten filament winding basic principles are presented in this paper highlighting the application.

1 引言

1997年7月14~18日在澳大利亚黄金海岸召开了第11届国际复合材料年会。笔者与沃丁柱教授合写了一篇“Basic Principles of Filament Winding”论文，由沃丁柱教授出席并在会上宣读，引起了与会的各国学者高度重视和热烈讨论，一时成了热点。因此，很有必要在国内介绍这10条缠绕基本原理，并着重讨论其实际应用及其开发的重要意义。

2 纤维缠绕的基本原理^[2]

- 原理1 总体缠绕线型决定于缠绕速比。
- 原理2 缠绕对象局部几何尺寸、局部缠绕角与切点数决定局部线型。
- 原理3 固定的总体线型与所缠绕的对象之几何形状无关。
- 原理4 纤维排布决定于微速比。
- 原理5 缠绕速比决定于缠绕中心角总和。
- 原理6 测地线缠绕纤维之位置最稳定。
- 原理7 “相当圆”原理。
- 原理8 非测地线缠绕稳定原理。
- 原理9 不等缠绕角原理。
- 原理10 凹曲面缠绕“架空”原理。

本文推理略去。

3 纤维缠绕基本原理的实际应用

① 根据原理1，缠绕速比决定缠绕纤维在芯模表面上的排线型式、交叉点数，沿圆周方向切点数或排成的平行四边形的个数等等。如此我们可以缠绕制出不同形状的制品，例如等截面圆柱体，不等截面的回转体（圆锥体、球形…）、不等截面的非回转体（复杂截面），“编织”缠绕、多孔结构缠绕，非测地线缠绕、凹曲面“架空”缠绕等典型的理论上可实现的缠绕制品，其总体线型皆决定于缠绕速比。

② 根据原理7“相当圆”理论，我们可容易地计算出椭圆形截面柱体、旋翼、矩形截面筒体、方形截面制品、六边形截面壳体、鼓形和船形截面制品。偏开孔容器、矩形管等角缠绕等各种非回转体的缠绕参数。

③ 原理3是我们能够成功地缠绕回转体与非回转体异型截面制品的理论依据。

例如缠绕圆锥形管壳制品、方锥形或矩锥形等角等厚缠绕、凸凹曲面回转体（葫芦形或带喷管的火箭发动机壳体等）、不等截面机翼形制品（舰艇上消除摇摆的鳍形制品、直升机旋翼和小型飞机螺旋桨等）。

④ 根据原理6,测地线是最稳定的位置,我们采用球形模扩大开口位置进行缠绕,只要保持测地线缠绕,扩口在任意位置都是稳定的。如此扩大开口可以从极孔直到赤道扩遍全球面均匀缠绕。这就是球形制品缠绕的基本原理。

众所周知,测地线缠绕是不计摩擦系数的,而非测地线稳定缠绕是计有限的摩擦系数。在这里,我们把摩擦系数加大到无穷大,即纤维张力=0或纤维松线致使微张力近乎于零的状态,纤维的缠绕位置同样是稳定的,我们就称它谓超测地线缠绕。超测地线缠绕好象写字一样,是稳定不滑线的。可以象手书一样随心所欲地尽情挥毫。这种无张力缠绕既便是在管端头90°缠绕小角度返回也不会滑线。这一发现,对变化张力,甚至小到零的方法可以缠绕多种容易滑线的复杂形状制品,尤其对微机控制缠绕机更为方便。

根据无张力缠绕的摩擦系数接近无限大,我们又联想到有张力挂勾缠绕,在挂勾点上对缠绕纤维可以看成摩擦系数无穷大的固定点。纤维从挂勾点引出可以成任意角度而不受限制。诸如端头挂勾和开口挂勾编织缠绕等。

⑤ 原理4讲的是纤维的排布取决于微绕速比。考虑到纤维之间的间隔,可以缠绕出网格制品。其计算方法有二:

(1) 纤维间距等分圆周法

$$\Delta_i = \frac{b + \Delta L}{n\pi D \cos \alpha} \quad (1)$$

式中 Δ_i —微绕速比; n —一切点数;

α —缠绕角; D —工件直径;

b —纤维纱片宽; ΔL —两纱片之间隔距离。

要求相邻纱片中心距离等分工件圆周长。

(2) 无增量缠绕法

使 $\Delta_i = 0$,纱片无前进增量叫无增量缠绕法。此时,纤维在原位置上重叠落纱形成网格(孔)肋。网格在圆周方向上的宽度计算为:

$$S_i = \frac{\pi D}{n} \quad (2)$$

用该式求出切点 n 后,再根据总的中心转角 $2\theta t$ 来求绕速比:

$$i = \frac{2\theta t}{360^\circ} = \frac{K}{n} \quad (3)$$

在 $\Delta_i = 0$ 的情况下,如果采用单切点单螺旋缠

绕,可以缠绕出玻璃钢弹簧或螺旋通气孔道夹层结构制品。

⑥ 根据原理8非测地线稳定缠绕原理(也有人称准测地线缠绕),我们可以进行管道端部的无端头连续缠绕以及不等开口压力容器(固体火箭发动机壳体)的稳定缠绕。如果我们只考虑容器的筒身段的非测地线稳定缠绕时(即椭圆端头仍按测地线计算),则对任意不等开口容器缠绕的稳定不滑线公式为:

$$L \geq \pm \frac{R}{f} \left(\frac{1}{\sin \alpha_2} - \frac{1}{\sin \alpha_1} \right) \quad (4)$$

式中: L —等直径筒身的稳定缠绕长度;

R —筒身半径;

α_1 —大开口端头与筒身相连接处的稳定缠绕角;

α_2 —小开口端头与筒身相连接处的稳定缠绕角;

f —纤维与芯模表面或纤维层间的摩擦系数。

公式(4)中的一个缠绕角 α_1 大到 90° 时,就变成了计算管道无端头缠绕的稳定长度公式:

$$L \geq \pm \frac{R}{f} \left(\frac{1}{\sin \alpha_1 - 1} \right) \quad (5)$$

式中: L_1 —管端部变缠绕角部分的稳定长度;

α —管中段等角缠绕段的缠绕角。

⑦ 根据原理2,缠绕对象之局部几何尺寸、局部缠绕角与切点数决定局部线型。我们可以算出缠绕平行四边形在回转轴方向对角线之半或纤维交叉点圈之间距:

$$e = \frac{\pi D}{2n} \cot \alpha \quad (6)$$

式中: e —缠绕交叉点圈之间距; α —缠绕角;

D —被缠绕工件之直径; n —一切点数。

从式(6)可见,增大 α 和 n 、 e 变小,即交叉点圈数增多,间距加密,这就是编织缠绕。

所谓整体编织缠绕,其实质就是大缠绕角的多切点交叉缠绕。用这种技术可做直段软模,缠绕成后再弯曲固化成弯管或模芯构成工件夹芯,弯曲成椭圆型做成羽毛球拍框等制品。这种高强度的制品用一般方法是很难完成的。

⑧ 根据原理5绕速比决定于缠绕中心角之总和。这就说明只要总的缠绕中心角不变,其绕速比就不变,并不受局部缠绕角和局部缠绕中心角变化

的影响。根据这一条原理,我们在容器端头的“肩上”放置一个“桃型”凸块,用它来缠绕局部接嘴,尽管凸块可改变局部缠绕角和局部中心角,但它不影响整体缠绕中心角和整体线型。

如进一步推理,凡是固定的缠绕中心转角,就会对应固定的缠绕速比。若只计两端等开口容器两个椭圆端头缠绕中心角,而令其筒身长为零(筒身缠绕中心角为零)。此时,算出的总的缠绕中心转角和缠绕速比,所进行的整体缠绕,就是无筒身缠绕,如扁椭球型、轮胎型和棱型制品的缠绕等。

我们再进一步,除不要椭圆端头外,也把筒身长度缩短到很窄,这就变成电动机的绑环和护环的缠绕成型。

⑨ 原理 9 告诉人们,由于端部缠绕角必为 90°,所以对任何一个制品都不可能达到整体等缠绕角。但工程上常常需要制品整体等厚度和整体等缠绕角的需要,所以人们就想各种办法绞尽脑汁来实现整体等缠绕角缠绕,尤其是要实现端头部分等厚度缠绕,但实施结果都以失败而告终。这是一条缠绕的规律,不能违背。这里,我们再次告诫人们,采用连续缠绕的方法只能局部实现等厚或等缠绕角,不可能实现整体的等厚和等角缠绕。所以,只能采用手工或其它方法补厚度,也可以切掉不等角、不等

厚部分,而保留所需要的等缠绕角和等厚度部分等。

⑩ 根据原理 10,避免凹曲面回转体产生“架空”现象,必须计算使“架空”高度 $\Delta S = 0$ 。这样,我们便可实现“葫芦型”制品的缠绕,如带喷管的固体火箭发动机壳的整体缠绕等。

4 结 论

① 纤维缠绕原理集数学和物理学于一体形成的理论,它也像数学和物理学中的规律一样,是不可违背的。

② 下功夫研究纤维缠绕原理是必要的,摸透每一条原理,扩大其实际应用范围,内容是极其丰富的。纤维缠绕制品将是千姿百态绚丽夺目的,其应用前景无限广阔。当然我们这里只列举其中一部分,更多的内容有望大家来发展。

参考文献

- 1 Ling Xing Wu, Wo Dingzhu. Basic principles of Filament Winding, Volume IV Composites Process and Microstructure, Eleventh international conference on Composite materials, Australia.
- 2 冷兴武. 纤维缠绕原理. 山东科学技术出版社, 1990 年 2 月第 1 次印刷

(上接第 60 页)

保护罩的生产合同,工程中心的技术和产品已走向国际市场。

树脂基复合材料工程技术研究中心的另一项工作重点是“中心”。工程中心首先将成熟的纤维缠绕技术与规模生产线相集成,向国内复合材料行业推广,代替了相当部分原来打算进口的同类设备,为国家节约了大量的外汇和建设费用。到 1997 年末为止,工程中心向全国复合材料行业提供纤维缠绕玻璃钢管道、贮罐、管件生产线 34 条,单机 12 台,分布于全国 20 个省、市和自治区,形成年生产能力 2.3 万吨,为复合材料行业机械水平的提高作出贡献。为了普及纤维缠绕生产技术,使企业尽快掌握技术,工程中心举办了 6 期“纤维缠绕技术培训班”为全国 30 多个单位的近 200 名学员进行系统的理论学习

和实践操作演习,获得良好的学习效果;为了帮助企业掌握先进技术,工程中心的技术人员还走出去,到企业进行现场技术指导,给技术骨干传授专业知识,为提高从业人员的生产技术水平,普及复合材料机械化成型技术做了工程中心应尽的义务。

工程中心作为一种新生事物,应该有别于一般企业和科研机构,要不断创新,能够不断地提供新技术和新产品,促进行业的技术进步,真正发挥行业的导向作用。国家树脂基复合材料工程技术研究中心作为我国复合材料技术、设备和产品的工程研究开发基地,要面向经济、面向市场,不断创新,真正成为树脂基复合材料行业规模生产技术和生产装备的开发源和扩散源,成为行业的技术开发中心,为我国复合材料行业的发展和技术进步服务。