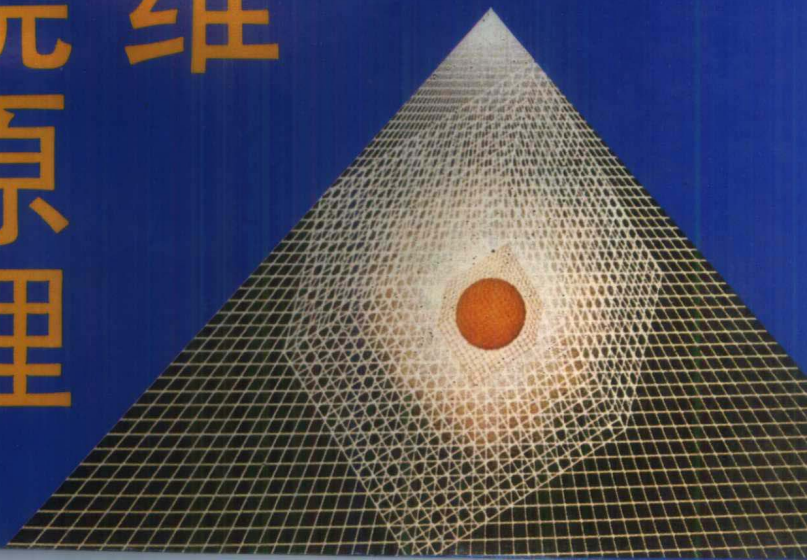
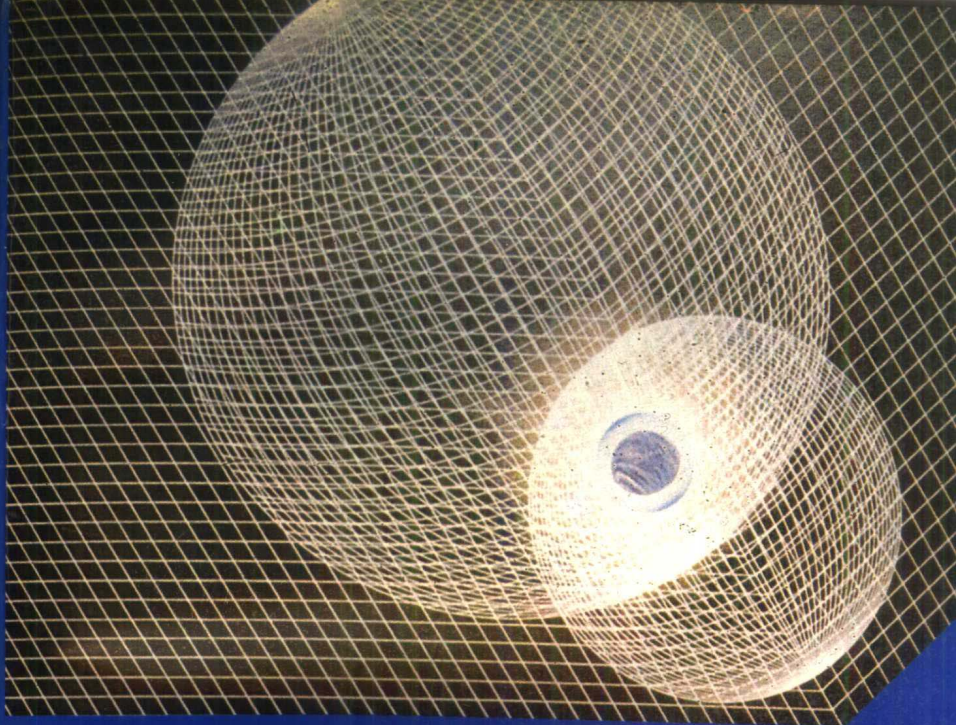


纤维缠绕原理

冷兴武 著

纤维缠绕原理

冷兴武 著 山东科学技术出版社



323
891

出版社

纤维缠绕原理

冷兴武 著



山东科学技术出版社

内 容 摘 要

本书论述了纤维缠绕的基本概念、缠绕定理、缠绕几何学等基本理论,并系统地阐述了一般缠绕和特殊缠绕的计算问题,为实际应用给出绕线设计步骤。还介绍了各种典型制品的缠绕(包括用机械式链条缠绕机和计算机控制缠绕机)及特异缠绕技术。

本书原系国防科学技术大学非金属基复合材料专业的参考教材。可供从事纤维复合材料设计、工艺人员与纺织机械专业的科技人员及相应专业的高校教师、研究生参考。

纤维缠绕原理

冷兴武 著

*

山东科学技术出版社出版
(济南市玉函路)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

850×1168毫米32开本 11.75印张 256千字
1990年2月第1版 1990年2月第1次印刷
印数: 1—1,200

ISBN 7—5331—0615—6/TB·9

定价 6.85元

“泰山科技专著出版基金”顾问、评审
委员会、编辑委员会

顾 问 宋木文 伍 杰 苗枫林

评审委员会 (以姓氏笔画为序)

卢良恕 吴阶平 杨 乐 何祚庥

罗沛霖 高景德 唐敖庆 蔡景峰

戴念慈

编辑委员会

主 任 委 员 杜秀明 石洪印

副主任委员 梁 衡 邓慧方 王为珍

委 员 (以姓氏笔画为序)

邓慧方 王为珍 卢良恕 石洪印

刘韶明 吴阶平 杨 乐 何祚庥

杜秀明 罗沛霖 林凤瑞 唐敖庆

高景德 梁 衡 梁柏龄 蔡景峰

戴念慈

我们的希望(代序)

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自1988年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时，也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿“基金”支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1989年3月

前 言

在树脂基复合材料成型工艺中，缠绕工艺方法占有重要地位。这种方法通过材料力学设计，可充分发挥纤维拉伸强度高的特性，制造出承受内压的固体火箭发动机壳体和各种压力容器等产品。此外，还可借助缠绕机连续工作的特点，提高生产效率，生产质量高、成本低的产品。对有几何对称外形的产品，如雷达罩、直升飞机叶片、管道、化工容器、支架等也广泛采用这种工艺方法，并形成批量生产的产业。尤其自动控制等新技术进一步在缠绕机上应用，将会更加显示这种工艺方法的优越性。

本书原是国家建筑材料工业局哈尔滨玻璃钢研究所高级工程师冷兴武同志前几年应国防科学技术大学邀请在长沙讲学，供当时听课同志学习的讲义，后又作为国防科技大学非金属基复合材料专业本科生相应课程参考教材。这次由“泰山科技专著出版基金”评审委员会评选出版是我国复合材料界一件值得庆幸的事。

多年来冷兴武同志在纤维缠绕原理方面进行深入系统的研究，多次发表过专题研究论文，在国内学术交流会上宣读，并发表于多种学术刊物上。

书中的主要内容，建立于国家建筑材料工业局哈尔滨玻璃钢研究所多年科学研究和缠绕实践经验的基础之上。其中一些理论发展内容属于作者创造，具有独到见解。如作者提出的异

型缠绕理论曾获全国科学大会重大贡献奖，目前国际上尚未有相应理论发表。同时，该书又是一本在新兴科技领域——复合材料方面的具有我国特色的开拓性专著。目前，国际上尚未见到有如此系统、完备地论述纤维缠绕原理专著出版。

复合材料在我国的发展正方兴未艾，日益显现其对社会的技术进步的重要性。但是，就我国复合材料工业大宗而言，目前还停留在手糊成型为主的非机械化操作。为了提高这种材料的质量和拓宽其应用范围，推广工艺成型中的机械化和自动化制造方法是当务之急。纤维缠绕成型是复合材料的一种主要机械化工艺方法，本著作自成理论体系，使纤维缠绕的产品结构与缠绕工艺实现均建立于完整的理论基础之上，促使此种成型方法扩大应用范围，设计与工艺更趋向合理。因此，本书出版对于我国复合材料工业是一项基础性建设，又将起推动作用。它将首先对高技术部门产生直接推动作用，同时对异型截面件的缠绕成型及一般工业用缠绕制品具有指导作用。相信它的出版对于纤维缠绕复合材料的科研、教学、设计与制造技术的发展以及国际学术交流合作等方面定会起到积极的促进作用。

于 翹

唐羽章

王兴业

1989年10月



冷兴武同志现任国家建筑材料工业局哈尔滨玻璃钢研究所副总工程师、技术开发部主任,并被武汉工业大学聘为研究生导师、副教授。吉林省双阳县人,生于1934年3月。1959年于哈尔滨工业大学土木系毕业,留校任教,后为哈尔滨建筑工程学院助教。1960年在该院玻璃钢研究室任研究实习员,1965年该室扩大为建筑材料工业部哈尔滨玻璃钢研究所,之后历任课题组长、工程师、室主任、高级工程师。曾提出异型缠绕规律、非测地线稳定缠绕原理、纤维缠绕定理、球形罩设计简化公式及差异论法等具有独到的理论见解。在由他主持或任课题组长的项目中,4项获国家级重大贡献奖,5项获部级奖;在他为主要研制者的项目中,2项获国家级奖,1项获部级奖。撰写论文39篇,在宇航学报、航空学院、玻璃钢等刊物上发表20篇,翻译2篇、全国性会议交流17篇。并荣获全国建材科技大会先进工作者光荣称号。

CAH 27/01

目 录

第一章 概述.....	1
第一节 纤维缠绕理论的发展.....	1
第二节 纤维缠绕及其类型.....	3
第三节 纤维缠绕的理论模型及公式.....	5
第二章 纤维缠绕定理、原理与推理.....	11
第一节 纤维缠绕定理及推理	11
第二节 纤维缠绕原理及推理	22
第三章 缠绕几何学.....	30
第一节 凸、凹曲面回转体纤维缠绕角的计算.....	30
第二节 端头缠绕角及缠绕中心角	44
第三节 圆筒段缠绕角及缠绕中心角	46
第四节 无端头缠绕角与中心角	47
第五节 异型截面非回转体的缠绕计算原理	63
第六节 “相当圆”原理的证明.....	78
第七节 变截面非回转体螺旋缠绕计算	88
第四章 凹曲面回转体纤维缠绕“架空”高度解法 及其处理	99
第一节 几种凹曲面“架空”高度计算	99
第二节 “架空”区段处理.....	112
第三节 计算实例.....	114
第五章 非测地线稳定缠绕计算——绕线方程	116
第一节 非测地线稳定缠绕的基本原理.....	116

第二节	圆锥体的非测地线缠绕稳定公式解.....	135
第三节	纤维缠绕圆(椭圆)柱曲面滑线及其稳定位置的计算.....	140
第四节	带开口端头的非测地线稳定缠绕计算公式.....	150
第五节	不等开口容器纤维缠绕及其滑线计算.....	175
第六章	绕丝嘴轨迹及其控制计算	183
第一节	绕丝嘴运动轨迹.....	183
第二节	纤维缠绕超越长度的计算.....	184
第三节	绕丝嘴运动速度计算.....	200
第四节	绕速比与微绕速比计算.....	203
第七章	绕线设计	205
第一节	缠绕角的初步设计.....	205
第二节	缠绕角验算与调整.....	208
第三节	缠绕角及中心转角计算.....	211
第四节	绕速比、链长或停留时间计算.....	214
第五节	链条布局与超越长度计算.....	216
第六节	缠绕线型的最后确定.....	218
第八章	典型例解	221
第一节	带喷管玻璃钢火箭发动机壳体的纤维缠绕原理.....	221
第二节	纤维缠绕碳复合材料矩形截面管等缠绕角绕线计算.....	273
第三节	带圆锥型喷管发射管的纤维缠绕计算.....	290
第四节	采用微机控制缠绕机缠绕计算例解.....	325
第五节	圆锥体等厚、等角缠绕计算.....	332
第六节	网格结构纤维缠绕计算.....	343
第九章	特异缠绕技术简介.....	353
参考文献		365

第一章 概 述

第一节 纤维缠绕理论的发展

回顾我国复合材料发展的历史,纤维缠绕技术的研究起步于 50 年代末期。到 1965 年,我们就完全掌握了缠绕速比、增量的基本概念,实现了螺旋缠绕排线机械化。于 1969 年正式发表了“螺旋缠绕的基本规律”的论文^[1]。文中首次提出“封头曲面上的纤维轨迹位于一个平面内”的基本假设,该理论假定顺利地解决了当时端部封头曲面缠绕中心角计算的关键问题。

之后,异型缠绕也开始了研究,自 1971 年起先后开展了矩形等截面非回转体制品缠绕、一端粗一端细的变截面制品缠绕以及不带端部封头的无端头制品缠绕,于 1975 年全国第一届玻璃钢年会上发表了“玻璃钢异型制品螺旋缠绕的基本原理”的论文^[2],文中首次提出异型截面的“相当圆假设”的理论,又解决了异型截面纤维缠绕计算的关键问题。到 1977 年全国第二届玻璃钢年会上又发表了“异型玻璃钢制品的无端头螺旋缠绕”的论文^[3],经过实践解决了无端头异型截面制品的缠绕计算问题。由于,我们建立了异型缠绕规律,在纤维缠绕工艺理论上有了突破性进展,所以在 1978 年荣获全国科学大会重大贡献奖。

1978 年全国纤维缠绕工艺与设备交流会上发表了“带喷管

玻璃钢火箭发动机壳体纤维缠绕排线的基本原理探讨”论文^[4]，文中首次提出“非测地线稳定缠绕的基本理论”，并给出了圆柱体非测地线稳定缠绕的具体计算公式。无疑，这对传统的测地线稳定缠绕论是个重大冲击，解决了测地线缠绕理论无法解决的滑线问题。1979年全国第三届玻璃钢年会上发表了“纤维缠绕中若干排线原则与推理”的论文^[5]，总结了12条原则与24条推理，提出了交叉点编织数、多孔网格结构等缠绕编织新内容。1980年又完成了圆锥体的等缠绕角与等厚度缠绕，相继发表了两篇论文^{[6][7]}。在完成两端大小不等开口容器的试制时，再一次成功地采用了非测地线稳定缠绕理论，并于1981年全国第四届玻璃钢年会上发表了“不等开口容器纤维缠绕及其滑线计算”的论文^[8]。在经过圆柱、椭圆柱、圆锥、圆球、椭球、矩形锥、机翼形等制品的非测地线缠绕实践后，结合实际应用进一步总结上升到理论，首次提出计算简单、实用性强的非测地线稳定缠绕理论，于1982年发表了论文^[9]。

在总结多年缠绕经验的基础上，我们进一步明确了缠绕制品工艺计算的步骤，提出了缠绕线型需要设计的概念。并于1983年发表了“纤维缠绕线型设计”的论文^[10]。同年全国第5届玻璃钢年会召开，会上又发表了“特异缠绕技术”论文^[11]，文中介绍了16种特殊情况，为纤维缠绕技术的扩大开发应用，指出了广阔的开拓领域。两年之后，我们又在原纤维缠绕若干原则的基础上，把20多年的缠绕经验逐条上升到理论高度，并总结出了“纤维缠绕的基本理论”的论文^[12]。该文具有较大的实践意义和应用价值。例如，利用第6条定理：“纤维排布决定微绕速比”中的推理4：“微绕速比等于零时，必然出现纤维完全重迭缠绕情况，且重迭位置与切点数一致等

分截面圆周”，就可在普通机械式缠绕机上缠绕出气象卫星用的碳复合材料外网格圆筒形壳体，充分证明该理论的先进性。为此，1987年又发表了“网格结构纤维缠绕计算原理”的专题论文^[13]，这项新技术的实现，它标志着我国纤维缠绕技术又进入了一个新的阶段。

当然，近些年来国内、外还相继发表了其他学者有关纤维缠绕理论的几篇论文。应该说所有这些文献的发表，都为纤维缠绕技术的开发与推广应用打下了坚实的理论基础。因此，系统地进行纤维缠绕理论总结，对纤维缠绕复合材料的发展具有重大的推动作用。

第二节 纤维缠绕及其类型

纤维缠绕是纤维增强复合材料成型工艺的一种，此外还有层压、手糊、模压、喷射、铺放、挤拉等方法。

所谓纤维缠绕，是指一束或几束连续纤维有规律地缠绕在芯模上。由于纤维已经浸渍胶粘剂，经固化便可形成纤维缠绕复合材料制品。

这种成型工艺方法又分为下列几种类型。

一、按纤维缠绕在芯模内腔、外侧分布情况分

1. 外侧缠绕

外侧缠绕是纤维缠绕在芯模的外侧，是目前最常见的一种缠绕方法，复合材料制品之几何形状决定于芯模外表面。

2. 内侧缠绕

这个方法少见，它是把浸胶量较大的纤维借助离心力甩缠在芯模内侧，制品形状取决于芯模内腔的几何尺寸。

二、按纤维轨迹所在的空间位置分

1. 平面缠绕

平面缠绕常用轨道式或摇臂式绕机缠绕。纤维轨迹所在平面与芯轴相交成较小夹角。

2. 环向缠绕

环向缠绕较简单，芯轴转一周，环向纤维前进一个纱片宽，纤维缠绕角接近 90° ，其轨迹似密牙螺纹。

3. 螺旋缠绕

螺旋缠绕稍复杂一点，其纤维轨迹在空间呈螺旋线形状，并均布于芯模表面，按规律排列出各种缠绕线型。

三、按纤维浸胶工艺方式分

1. 干法

采用预浸纱的称干法缠绕。由于纤维预先按规定含胶量浸好粘接剂，在缠绕时稍加热便可使纤维粘在一起。加热方法可烘热纱带和芯模表面或者在芯模内部加热。此法优点是质量易控制。

2. 湿法

采用浸胶（湿）纱带直接缠绕的称湿法工艺。此法简单、方便。纤维之间含胶量丰满，粘接力较强。

3. 半干法

此法介于上两种工艺之间，即浸胶后“湿”的纱带经过烘烤炉后去掉一些挥发物，然后半湿半干状态缠到芯模上。它兼有前两种工艺之优点。

四、按纤维种类分

按复合材料所采用的纤维种类可分为玻璃纤维缠绕复合材料、碳纤维缠绕复合材料、有机纤维缠绕复合材料、金属纤维

缠绕复合材料。

这里要说明一下，纤维缠绕排线原理与机械设备无关，与缠绕工艺方法无关。除内侧缠绕外，各种纤维缠绕（包括手工缠绕）都适用下面讲的基本原理。

第三节 纤维缠绕的理论模型及公式

一、理论模型

如图 1—1 所示，纤维从芯模一端某点起始，往另一端行进，与此同时芯模绕芯轴转动，于是纤维便沿芯模表面形成螺旋线。故人们常称之为螺旋缠绕。

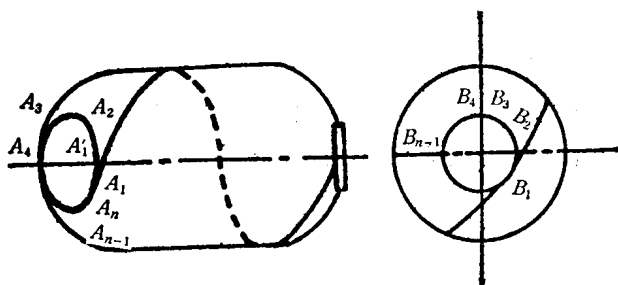


图 1—1 纤维缠绕落纱点轨迹

现假设缠绕纤维轨迹从左端 A_1 点开始往右端缠绕，在右端极孔边 B_1 点相切返回往左端缠绕，在左端极孔边 A_2 点相切返回再往右缠绕，在右端极孔边 B_2 点相切返回往左端缠绕……直至经过极孔几个切点又回到起始切点 A_1 处，我们称它为一个完整循环。此后在 A_1 点相邻一个纱带宽的地方新起点 A_1 便开始缠绕下一个完整循环，如此不停地缠绕，纤维便会均匀

布满整个芯模表面。

研究纤维缠绕排线规律便是纤维绕线基本原理，建立该原理所采用的理论模型必须符合下列各项条件。

1. 用一束或几股成一束连续纤维，不间断地进行缠绕。偶然地断线情况不在该理论考虑之列。

2. 纤维有次序按规律地稳定地均布于芯模表面。

3. 芯模呈刚性体，纤维缠绕时受到压紧力，其几何形状基本保持不变。该理论不计芯模微小变形对绕线的影响。

4. 缠绕纤维能承受一定工艺张紧力，该张紧力远大于纤维自重的影响。该理论对纤维自重忽略不计。

5. 纤维与芯模表面或纤维缠绕层之间存在摩擦力。

二、螺旋缠绕的几个基本公式

1. 绕速比

缠绕纤维绕芯模之转数与缠绕纤维沿芯轴往返次数之比称为绕速比。绕速比用 i 表示，它等于

$$i = \frac{K}{n} \quad (1-1)$$

式中： K ——完成一个完整循环纤维绕芯模的转数；

n ——完成一个完整循环纤维在端部极孔周边之等分点数或切点数。

2. 缠绕中心角

缠绕纤维绕芯模回转中心轴旋转的角度称为缠绕中心角。它又分为局部和总体缠绕中心角。

按纤维缠绕机械发展阶段，我们可采用下面两种模型来说明。

(1) 初始模型：芯模和绕丝嘴传动链皆为匀速运动，绕丝

嘴由封闭链条带动，链条呈平面状态布局，如图 1—2 所示模型，可得如下结论：

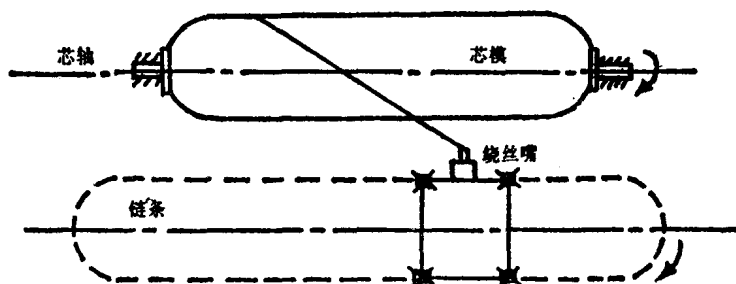


图 1—2 纤维缠绕原始模型

① 任意一段缠绕中心转角和带动绕丝嘴的链条前进的距离成正比。

$$\frac{\theta_{ci}}{360^\circ} = \frac{L_{ci}}{L_1}$$

即
$$\theta_{ci} = \frac{L_{ci}}{L_1} \times 360^\circ \quad (1-2)$$

式中： θ_{ci} ——任意段筒身，纤维绕芯模轴中心旋转角；

L_{ci} ——缠绕任意段筒身时链条移动的距离；

L_1 ——芯模转 360° ，链条前进的距离。

② 对于直线段链条平行或斜交回转芯轴那一段筒身来讲（即绕丝嘴沿芯轴前进速度是均匀的那一段筒身），则缠绕中心角与绕丝嘴前进之距离成正比。

$$\frac{\theta_{ci}}{360^\circ} = \frac{l_{ci}}{l_1}$$

即
$$\theta_{ci} = \frac{l_{ci}}{l_1} \times 360^\circ \quad (1-3)$$