

学校编码: 10384

分类号_密级_

学 号: 25320141151778

UDC_

厦 门 大 学

纯弯曲复合材料组合管统一联系参数法的
进一步研究

**More Investigation of Unified-connected-parameter
Method for Composite Material Combined Tubes
Under Pure Bending Loading**

柯淼宏

指导教师姓名: 张建霖 (教授)

张灿辉 (副教授)

专 业 名 称: 结构工程

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 6 月

答辩委员会主席: __

评阅人: __

2017 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

复合材料组合管的纯弯曲问题是一个广义平面问题,需要采用包含两个应力函数的柔度法进行求解。本文首先对包含柱型正交各向异性特殊缠绕层即 0° 或 90° 缠绕层以及各向同性层的不同复合材料组合管的应力特征进行有限元精细的数值模拟,指出当有普通缠绕层与之相邻时,不仅有面内应力而且有面外应力,所以,即便是特殊缠绕层和各向同性层也需要采用双应力函数进行求解。然后对复合材料管分析的双应力函数柔度法及其改进进行了详细分析和讨论,指出(1) Lekhnitskii 的单个应力函数柔度法只能求解特殊缠绕层及其组合的情况;(2) 传统双应力函数之间的联系参数法是以面内应力为主通过联系参数得到面外应力,由于部分联系参数奇异而难以求解特殊缠绕层情况,所以仅适用于求解普通缠绕层的情况;(3) 统一联系参数法不包含任何奇异联系参数项,可以求解多层同时包含特殊缠绕层和普通缠绕层的任意情况,但这种统一联系参数是根据需要人为构造出来的,缺少严格的理论基础,并且需要根据材料参数的导数分析统一联系参数极限,不仅过程比较复杂,而且对不同材料的普适性尚需进一步考察。不仅如此,由于各向同性材料层没有缠绕角度而难以分析其统一联系参数的极限。

在此基础上,本文直接考察特殊缠绕层以及各向同性材料层的相容方程,发现两个相容方程彼此独立而可以独立求解,完全不需要引进双应力函数之间的联系参数即双应力函数彼此独立,换言之,分别由它们计算得到的面内应力和面外应力彼此独立或者各自为主。受此启发,本文对普通缠绕层以面外应力为主提出双应力函数之间的反向联系参数法,并在不改变双应力函数内容本身的前提下有机结合正向和反向联系参数法,最终得到与统一联系参数完全吻合的结果,为统一联系参数法提供了可靠的理论基础,而对于特殊缠绕层情况只需要采用独立双应力函数法的结果而不必再求统一联系参数极限,从而避免了分析统一联系参数极限的困难,特别是避免了各向同性材料由于不存在缠绕角而无法分析统一联系参数极限的困难。

采用本文统一联系参数法详细分析了简单复合材料组合管 [Steel/90]、[Steel/45]、[Steel/25]、[Steel/45/-45]、[Steel/25/-25]、[Steel/90/45/25]、

[Steel/45/90/25]、[Steel/25/45/90]等，同时与有限元数值模拟结果进行对比，验证了本文方法的准确性和可靠性。在此基础上，对比分析研究有代表性复合材料管的等效抗弯刚度随缠绕角变化规律，为设计提供了有益的帮助。

一般工程设计人员难以直接使用统一联系参数法程序，缺少有效、便捷的人机交互界面，不能发挥该方法的实际应用价值。本文根据统一联系参数法编制人机图形交互界面（GUI），包括复合材料组合管等效抗弯刚度、应力、应变及位移的计算及其结果输出和分析等，有助于工程师和一般设计人员通过 GUI 用户界面对不同设计方案中的复合材料组合管进行计算分析和对比研究，为复合材料组合管设计提供了快速、便捷的计算及分析工具，具有十分重要的实际工程价值。

关键词：复合材料组合管、 0° 和 90° 特殊缠绕层、各向同性材料层、统一联系参数法、反向联系参数、人机图形交互界面（GUI）

Abstract

The pure bending problem of the composite combined tube is a generalized plane problem, which needs to be solved by the flexibility method with double stress functions. In this paper, finite element numerical simulation of the stress characteristics of composite tubes with 0° or 90° entangling layers and isotropic layers is carried out. It is pointed out that the internal stress and the external stress are present when there are other winding layers adjacent to each other. So even if the special winding layer and isotropic layer also need to use double stress function to solve. Then, Compliance method including two stress functions is analyzed and discussed in detail. (1) Lekhnitskii's single stress function method can only solve the problem of special entanglement and its combination. (2) The contact-parameter method between the traditional double stress function is based on the internal stress, and the external stress is obtained through the contact parameters. It is suitable for solving the other winding layers. However, since some contact parameters are singular in the special layers, it is difficult to solve the problem of the special winding. (3) The unified contact parameter method does not contain any singular contact parameter term, which can solve any situation where the multi-layer contains both the special winding layer and the ordinary winding layer. However, the unified-parameter is artificially constructed and lacks a rigorous theoretical basis. In addition, it is necessary to determine the parameter limit according to the derivative of the material parameter. Since isotropic material layers is no winding angle, it is difficult to solve the limits of its unified parameters.

On this basis, this paper directly investigates the compatibility equations of the special entanglement layer and the isotropic material layer. It is found that the two compatible equations are independent of each other and can be solved separately. So it is no need to introduce the contact parameters between the two stress functions. The double stress functions are independent of each other, in other words, the in-plane

stress and the out-of-plane stress calculated are independent or separate from each other. In this paper, the backward-contact-parameter method is proposed for the other tangent layers, and the forward and backward contact parameter method is combined without changing the content of the double stress function. The result of anastomosis provides a reliable theoretical basis for the unified parameter method. For the case of special entanglement, it is only necessary to use the results of the independent double stress function method without calculating the limit of the unified contact parameter, thus avoiding the difficulty of analyzing the limit of the unified contact parameter. In particular, it avoids the difficulty that the isotropic material can not analyze the limits of the contact parameter because it is no winding angle.

According to the theory of this paper, eight simple composite combined tube including [Steel/90], [Steel/45], [Steel/25], [Steel/45/-45], [Steel/25/-25], [Steel/90/45/25], [Steel/45/90/25] and [Steel/25/45/90] are calculated. At the same time, compared with the results of finite element numerical simulation, the results are in good agreement. On the basis of this, the equivalent bending stiffness of the composite pipe with the change of the winding angle is compared and analyzed, which provides useful help for the design.

Since the lack of effective and convenient man-machine interface, it is difficult for engineers to use the unified parameter method directly. Thus, the practical value of this method can not be used. In order to provide fast and convenient analysis tools, Man-machine interface (GUI) is created on the basis of the method for designers. It will help designers calculate and analyses different design schemes by Man-machine interface (GUI) which has very important practical engineering value.

Key words: composite material combined tube, special layers of winding angles 0° and 90° , isotropic material layers, unified-connected-parameter method, Graphical User Interface(GUI)

目录

摘要.....	i
Abstract.....	iii
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 纤维增强复合材料及其在土木工程中的应用.....	2
1.3 复合材料组合管的研究现状.....	5
1.3.1 理论研究概述.....	5
1.3.2 存在的困难.....	6
1.4 本文研究的创新点.....	6
第二章 纯弯曲复合材料组合管中特殊层的应力特征分析	8
2.1 广义平面应变问题.....	8
2.2 包含双应力函数的柔度法.....	11
2.3 特殊层的应力特征.....	14
2.4 本章小结.....	19
第三章 双应力函数柔度法初步改进的讨论	20
3.1 正向联系参数法.....	20
3.1.1 方法简介.....	20
3.1.2 分析讨论.....	24
3.2 统一联系参数法.....	27
3.2.1 方法简介.....	27
3.2.2 分析讨论.....	29

3.3 本章小结	30
第四章 统一联系参数法的进一步研究	32
4.1 特殊层的独立假设双应力函数法	32
4.2 普通层的反向联系参数法	36
4.3 正向和反向联系参数法的有机结合	38
4.4 本章小结	39
第五章 复合材料组合管的精细有限元数值模拟	40
5.1 层合近似和精细模拟	40
5.2 纤维缠绕方向的实现	42
5.3 层间有限元结果后处理	45
5.4 数值算例	50
5.5 本章小结	52
第六章 复合材料组合管算例分析	53
6.1 简单复合材料组合管	53
6.2 等效抗弯刚度的比较分析及其设计	70
6.3 本章小结	73
第七章 复合材料管分析的 GUI 用户界面	74
7.1 用户界面工作流程	74
7.2 GUI 操作界面实现	75
7.2.1 输入/导入复合材料管文件	76
7.2.2 计算等效抗弯刚度 (EI)	76
7.2.3 计算载荷下的应力、应变及位移	79
7.2.4 复合材料管结果的进一步考察	81

7.3 本章小结	83
第八章 结论与展望	84
8.1 结论	84
8.1.1 统一联系参数法的进一步研究.....	84
8.1.2 复合材料管分析的 GUI 用户界面	85
8.2 展望	85
参考文献	86
致谢	91
作者攻读硕士学位期间撰写的论文	92

Contents

Abstract in Chinese	i
Abstract in English	iii
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and significance	1
1.2 Fiber reinforced composites and its application in Civil Engineering	2
1.3 The current investigation status of composite combined tube	5
1.3.1 Overview of investigation	5
1.3.2 Difficulty in theory	6
1.4 Innovation of this paper	6
Chapter 2 Stresses in special layer for composite combined tubes under pure bending	8
2.1 Generalized plane strain problem	8
2.2 Compliance method including two stress functions	11
2.3 Stress distribution for special layers	14
2.4 Summary	19
Chapter 3 Preliminary improvement of compliance method with two stress functions	20
3.1 Forward-connected-parameter method of two-stress-function	20
3.1.1 Brief description	20
3.1.2 Discussion	24

3.2 Unified-Parameter Method	27
3.2.1 Brief description.....	27
3.2.2 Discussion	29
3.3 Summary	30
Chapter 4 More investigation of unified-connected-parameter method	32
4.1 Independent assumed two stress functions for special layers	32
4.2 Back-connected-parameter for ordinary layers	36
4.3 Ingenious combination of front and back connected parameters	38
4.4 Summary	39
Chapter 5 Numerical simulation by fine finite element method for composite combined tubes	40
5.1 Laminated approximation and fine numerical simulation	40
5.2 Realization of filament winding direction in finite element method	42
5.3 Post processing of FEM Data for interface	45
5.4 Numerical examples	50
5.5 Summary	52
Chapter 6 Examples for composite combined tubes	53
6.1 Simple composite combined tubes	53
6.2 Comparison of equivalent flexibilities as well as its design	70
6.3 Summary	73
Chapter 7 GUI of composite combined tube	74

7.1 Working flow chart for GUI	74
7.2 Operation interface of GUI	75
7.2.1 Input/load DATA of composite combined tube.....	76
7.2.2 Calculation of equivalent flexibility	76
7.2.3 Calculation of stresses, strains and displacements.....	79
7.2.4 More investigation of composite combined tube.....	81
7.3 Summary.....	83
Chapter 8 Conclusions and prospect.....	84
8.1 Conclusions.....	84
8.1.1 More Investigation of unified-connected-parameter method	84
8.1.2 GUI of composite combined tubes	85
8.2 Prospect.....	85
Reference.....	86
Acknowledgement.....	91
List of Publications.....	92

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

由于现代工程结构向大跨度、轻质、高强绿色环保方向发展，原先钢筋混凝土等传统的建筑材料已经无法满足发展需要[1]。纤维增强复合材料，由于具有良好而独特的性能，逐渐成为钢管、混凝土等传统建筑材料的补充，从而为土木建筑业解决一些技术难题提供了新的途径[2][3]。

在土木工程领域，纤维增强复合材料（FRP）最早运用在各种类型的结构加固当中[4][5]，作为辅助性材料[6]用于加固补强混凝土结构、钢结构[7]等。近年来，随着研究的深入以及现代工程的发展需要，全 FRP 结构、FRP 组合结构等新型结构形式越来越广泛的运用在海洋结构工程、桥梁工程当中[8]。纤维增强复合材料作为梁[9]、柱等主承力构件[10][11]运用在土木工程中已成为当前的研究热点和未来的发展方向[12]，其中，复合材料组合管[13]是将纤维增强复合材料与传统建筑材料结合的一种新结构构件。

无论是对于原有建筑结构的 FRP 法加固，还是海洋平台的立管和海底输油管道及新型 FRP 组合管等[14]，都在不同程度上受到弯矩荷载的作用[15]。以往针对复合材料组合管的研究大多采用经典层合板理论[16]对其中的复合材料层近似[6][17]，但是，这样的近似结果显然无法满足 FRP 组合管作为主承力构件的精度要求，而极薄单层大量组合使得在数值分析中进行逐层三维精确化建模也难以实现，因此，三维的弹性力学方法求解势在必行。Lekhnitskii[18]提出采用双应力函数求解各向异性材料结构的柔度法是最早的一种三维弹性力学方法，Jolicoeur 和 Cardou[20]提出提联系参数法对柔度法[18]进行了改进，Zhang 和 Hoa 等[21]以及刘沛[22]进一步提出统一联系参数法改进了联系参数法[20]，然而，对于一些特殊层包括 0 和 90 缠绕层以及各向同性层仍然存在一定的局限性，而且人为组合的统一联系参数法还缺乏严格的理论基础，因此，进一步研究统一联系参数法是目前一个迫切的任务，具有重要的工程应用价值。

综上所述，针对复合材料组合管受弯矩荷载作用的问题，进一步研究可以准确求解复合材料组合管受弯状态下的弹性理论方法是目前一个迫切的任务，具有

十分重要的工程应用价值[23]。

1.2 纤维增强复合材料及其在土木工程中的应用

复合材料是由两种或多种不同性质的材料用物理和化学方法在宏观尺度上组成的具有新性能的材料。工程中所应用的复合材料，主要由两种组分材料构成[24]，一种是增强材料，主要采用碳纤维、玻璃纤维、硼纤维、芳纶、玄武岩纤维等；另一种是基体材料，主要有各种树脂材料或金属材料[25]。复合材料性能一般优于其组成成分的性能，改善了材料的强度、刚度、耐久性、热力性能等，而且有些性能是原来组分材料不具备的。纤维增强复合材料（FRP）由于其优越的材料性能，最开始应用在航空航天工程[26]、机械工程[27]、国防工程[28]当中，随着纤维复合材料成本降低，开始逐渐成为土木工程的一种新型材料。

由于 FRP 不同于传统建筑材料的物理和力学特性，其用于工程结构具有很大的性能优势和发展前景，主要体现为：

（1）轻质高强：FRP 材料具有密度小强度高的特性，其比强度约为钢材的 20~50 倍，运用于工程结构中将有效减轻结构自重，减少因结构自重对建筑结构产生的不利影响；

（2）较强的可设计性：FRP 可以根据工程实际需要，进行人工选材，通过使用不同纤维材料、含量及铺层方向等设计出各种性能指标的产品，且成型方便；

（3）耐久性好和耐腐蚀性强[29]：FRP 材料的化学性能稳定，具有良好的耐腐蚀性，能够在化工建筑工程、海洋建筑工程、港口工程、地下工程等腐蚀性环境中长期使用，能够降低工程结构的维护费用；

（4）适用范围广、施工性较好：可以使用在混凝土结构、钢结构、砌体结构当中，而且 FRP 材料可以按照要求在工厂生产片状、管状等形式，然后运送至施工现场直接安装；

（5）良好的弹性性能：在发生较大变形后可弹性复原，对需要承载较大动荷载的结构优势明显。

目前 FRP 在土木工程中的应用[30]，按照形式可分为以下几类：

（1）结构加固

FRP 在建筑工程中最早应用于各种类型结构加固[31]，包括：混凝土结构、

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库