

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 65



# 三维编织复合材料的 群论分析

- 作者：马文锁
- 专业：固体力学
- 导师：冯伟

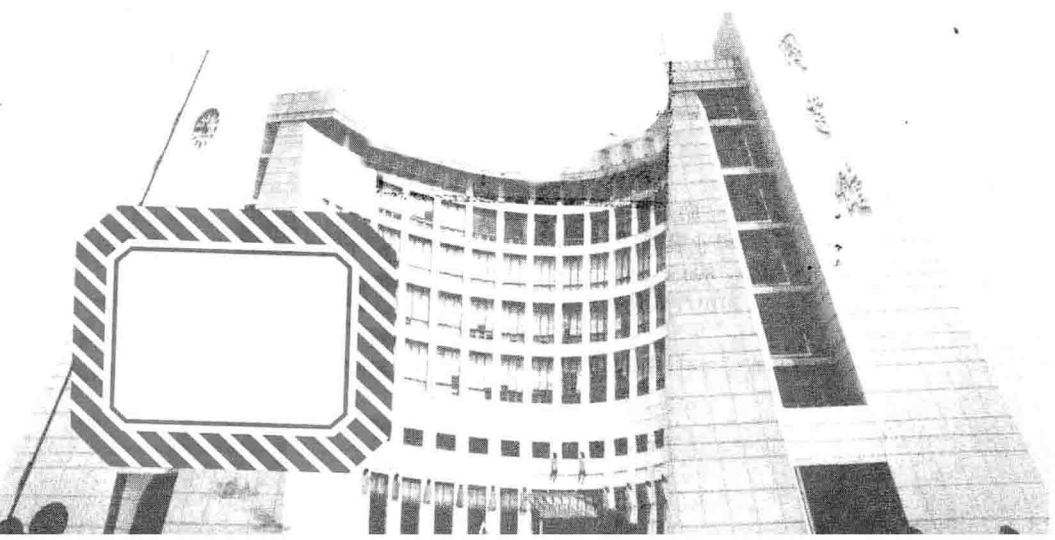


2006年上海大学博士学位论文 65



# 三维编织复合材料的 群论分析

- 作者：马文锁
- 专业：固体力学
- 导师：冯伟



Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

# **Group Theory Analysis of 3D Braided Structural Composites**

**Candidate:** Ma Wensuo

**Major:** Solid Mechanics

**Supervisor:** Feng Wei

**Shanghai University Press**

**• Shanghai •**

## 图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士学位论文编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2010. 6

ISBN 978 - 7 - 81118 - 513 - 3

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162510 号

## 2006 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

\*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890 × 1240 1/32 印张 278 字数 7 760 千

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—400

ISBN 978 - 7 - 81118 - 513 - 3/G · 514 定价: 880.00 元(44 册)

# 上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

|     |     |           |        |
|-----|-----|-----------|--------|
| 主任: | 刘正兴 | 教授,上海交通大学 | 200030 |
| 委员: | 金吾根 | 教授,复旦大学   | 200433 |
|     | 贺鹏飞 | 教授,同济大学   | 200092 |
|     | 程玉民 | 教授,上海大学   | 200072 |
|     | 郭 平 | 教授,上海大学   | 200072 |
| 导师: | 冯 伟 | 教授,上海大学   | 200072 |

评阅人名单:

|     |            |        |
|-----|------------|--------|
| 贺鹏飞 | 教授, 同济大学   | 200092 |
| 沈为平 | 教授, 上海交通大学 | 200030 |
| 张文  | 教授, 复旦大学   | 200433 |

评议人名单:

|     |          |        |
|-----|----------|--------|
| 叶志明 | 教授, 上海大学 | 610054 |
| 程玉民 | 教授, 上海大学 | 200072 |
| 张若京 | 教授, 同济大学 | 200092 |
| 聂国华 | 教授, 同济大学 | 200092 |

## 答辩委员会对论文的评语

马文锁同学的博士学位论文以三维编织复合材料研究为背景,将群论理论用于编织材料的几何结构和力学性能的研究,取得了创新性的研究成果:

(1) 系统地提出了用于描述编织几何结构的对称群理论。

(2) 将对称群的矩阵表示引入编织复合材料弹性性能的理论研究。

(3) 用对称群推导三维编织材料的几何结构,为进一步对编织复合材料性能分析提供了理论依据。

(4) 用编织对称群推导了一系列全新几何结构的三维编织材料,并对其性能作了分析。

(5) 提出了可变微单元几何分析模型,对变截面回转体中空三维编织复合材料构件进行了数值模拟。

论文工作具有创新性和实际应用价值,表明作者具有扎实的理论基础和专业知识,对所研究领域的国内外研究发展动态有全面的了解和掌握,有很强的独立从事科学研究的能力。论文条理清楚,逻辑严密,公式推导正确,算例真实可靠,是一篇优秀的博士学位论文。在答辩过程中,回答问题思路清晰,能予以正确回答。

## 答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过马文锁同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主任: **刘正兴**

2006 年 1 月 15 日

## 摘 要

三维编织复合材料的品种还比较少,用于描述编织几何结构的理论和系统的分类方法有待于深入研究,本文用对称群理论解决了这些问题。编织几何结构的对称性可以用对称群加以描述。用点群描述编织几何结构的点对称性,根据点对称性特征可将编织材料进行粗略分类,同时获得相应几何结构的单胞形式。用空间群描述三维编织几何结构,可以将其进行详细分类,从而推导出系列全新的编织材料几何结构。

本文首先论述了与编织材料几何结构有关的对称群理论。定义了与编织材料几何结构对称群有关的对称操作和对称元素等概念;阐述了编织几何结构的对称操作的类型和表达方法;通过编织几何结构的对称性定义了编织点群、编织点阵和编织空间(平面)群;用编织材料几何结构对称操作的矩阵表示推导了编织空间点群、空间群的矩阵表示;归纳了对应编织几何结构的平面点阵和空间点阵。

为了用平面点群研究二维编织几何结构的点对称性,本文定义了代表纱线段的点符号和基本对称单元等概念。在此基础上,论述了对称单元的构建方法,从而将二维编织(包括平面机织)材料按几何结构合理分类。用平面点对称操作构建相应的平面对称单元图案,得到对应不同几何结构的单胞。

在分析二维编织几何结构的简化方法及与平面点阵阵点对应关系的过程中,对编织平面点阵进行总结分类。根据不同

编织平面点阵的特点,归纳了二维编织几何结构惯用单胞的形状。

用编织平面群分析二维编织几何结构,将二维编织几何结构进行有效分类,系统推导了二维编织几何结构。同时推导二维编织材料几何结构对应点群的矩阵表示,矩阵表示可用于编织复合材料的力学性能研究。

用空间点群将三维编织几何结构分类,并将其单胞的对称性用点群进行了描述。推导了编织空间点群的矩阵表示,为将对称群变换应用到三维编织复合材料的力学性能研究打下基础。通过验证得出编织空间点群不含有纯镜面对称群元素的结论。

将具有点对称性的纱线段组合用一个阵点表达,三维编织材料的几何结构就可以对应的不同空间点阵。根据不同编织空间点阵的特点,归纳了三维编织几何结构初基和惯用单胞的形状。对应于编织材料几何结构的空間点阵沿用 Bravais 空间点阵几何构形,但此空间点阵一般不具有 Bravais 空间点阵点群的全部对称性。

对应于编织材料几何结构的空間群可以完整地描述现有编织材料几何结构的对称性。通过对编织空間群的科学归纳,可以推导出系列新的三维编织复合材料几何结构。

通过用编织空間点群和编织空間群推导三维编织几何结构,验证了三维编织复合材料几何模型分析过程中纱线的近似横截面几何形状,为建立合理的三维编织复合材料几何模型提供了依据。

用编织对称群推导了几种全新的三维编织材料的几何结

构,并对它们的工艺可行性和对应的复合材料的物理性能进行了预测。

对特殊的空间三维编织复合材料的研究提出了一种新的模型——可变微单元几何分析模型,并以变直径的管状复合材料火箭喷管为例模拟了其几何结构,较为真实地反映了该构件的实际几何形状,通过理论分析获得了这种编织复合材料纤维体积百分数的变化趋势。用该几何模型对等直径的复合材料直管的物理和力学性能进行了预测。

**关键词** 编织材料,编织复合材料,编织点群,编织空间群,编织点阵,编织几何结构,矩阵表示,几何分析模型

# Abstract

There are a few varieties of 3D braided structural composites, the theory of braided geometric structures and systematic classification method of 3D braided structural composites should be approached deeply. Such problems have been solved by the theory of symmetry group in this paper. The symmetries of braided geometric structure can be described with symmetry group. When point symmetries of braided geometric structures are described with point group, the braided materials are briefly classified according to their point symmetries, thereby unit-cells of braided geometric structure are derived. Space group is applied to classify 3D braided geometric structures at length, which derives fully novel geometric structures of braided structural composites.

In the dissertation, the symmetry group theory of braided geometric structure has been generalized. Symmetric operations and symmetric elements of braided geometric structures are defined. Then we describe the type and expression of the symmetric operations. Braid point group, lattice and space (plane) group are defined according to the related symmetries of braided geometric structure. The matrix representations of space point group and space group on braid are derived from the matrix representations, which

are symmetric operations to describe braided geometric structures. The related plane and space lattices are deduced.

To describe the point symmetries of 2D braided geometric structures with plane point group, the constructional method of symmetric unit is studied by setting up point symbols representing yarn segment and applying the idea of a basic symmetric unit, therefore 2D braided geometric structures (including plain woven) are rationally classified. We obtained unit cells that satisfy various point symmetries by constructing various plane symmetry unit patterns with plane point symmetric operations.

The simplified methods of 2D braided geometric structures and their relations with plane lattice point are investigated. The braided plane lattices are summarized up and classified. According to specialties of various braided plane lattices, the shape of the regular unit cells of 2D braided geometric structures are reduced.

We classify 2D braided geometric structures and investigate methods to derive it with plane group. Then we derive out the matrix representation of point group, which can be used for studying mechanical properties of 2D braided composites.

Braid space point group is defined. We classify 3D braided geometric structures and describe unit cell's symmetries of the geometric structure, then we derive matrix representation of braid space point groups, and it is the foundation of mechanics performance research of 3D braided

composites. Finally, a conclusion is drawn that the braid space point groups don't include pure mirror symmetric group elements.

The combination of yarn segment with point symmetries denote with a lattice dot, the 3D braided geometric structures are identified to various space lattices. According to space lattice performances the primitive cell of 3D braided geometric structures and the shape of their conventional unit cells are derived. The space lattice of braided geometric structures shares the geometric structure of Bravais space lattice, but it has not all the symmetries of Bravais space lattice.

The space groups of braided geometric structures can adequately describe the symmetries of the existing braided geometric structures. The scientific description of the braided space groups brings great enrichment to the geometric structures of braided composites.

3D braided geometric structures are derived with space point groups and space groups. We verify the approximate cross-section of the yarns in the analysis process of the 3D braided composites, which provides a reasonable hypothesis for establishing geometric models of 3D braided composites.

By the method of symmetry group analysis, novel 3D braided geometric structures are derived, and the feasibility of their braiding techniques and the physical performances of corresponding 3D braided composites are predicted.

A new geometric model named the variable micro-

structural unit cell geometric analysis model is present in the research of spatial 3D braided composites. Taking a 3D braided rocket nozzle as an example, we simulated the geometric structures, which essentially reflects the actual geometric shape. The tendency of the fibre volume fraction in the 3D braided composites is theoretically predicted. The physical and mechanical performances of 3D braided straight tube are forecasted with the geometric model.

**Key words** braided material, braided composites, braid point group, braid space group, braid lattice, braided geometric structure, matrix representation, geometric analysis model

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                  | 1  |
| 1.1 研究背景 .....                | 1  |
| 1.2 三维编织复合材料细观结构的研究进展 .....   | 2  |
| 1.3 三维编织复合材料力学性能的理论研究进展 ..... | 5  |
| 1.4 研究存在的问题 .....             | 11 |
| 1.5 本文的研究内容 .....             | 12 |
| 第二章 编织材料几何结构的对称群 .....        | 14 |
| 2.1 群的基本概念 .....              | 15 |
| 2.2 编织几何结构的对称群 .....          | 19 |
| 2.3 编织材料几何结构的对称操作和对称元素 .....  | 26 |
| 2.4 编织材料几何结构的图形简化 .....       | 42 |
| 2.5 本章小结 .....                | 49 |
| 第三章 二维编织材料几何结构的群论分析 .....     | 50 |
| 3.1 二维编织材料几何结构对应的平面点阵 .....   | 50 |
| 3.2 二维编织材料几何结构点群及其矩阵群表示 ..... | 52 |
| 3.3 二维编织材料几何结构平面群 .....       | 56 |
| 3.4 本章小结 .....                | 63 |
| 第四章 三维编织材料几何结构的群论分析 .....     | 64 |
| 4.1 编织空间点群及三维编织几何结构的分类 .....  | 64 |
| 4.2 编织空间点群的理论推导 .....         | 89 |
| 4.3 三维编织材料几何结构对应的空间点阵 .....   | 95 |

|             |                                     |            |
|-------------|-------------------------------------|------------|
| 4.4         | 三维编织材料几何结构的空                        | 110        |
| 4.5         | 群 矩阵表示                              | 113        |
| 4.6         | 本章小结                                | 119        |
| <b>第五章</b>  | <b>用编织对称群推导编织材料的几何结构</b>            | <b>121</b> |
| 5.1         | 用编织平面群推导二维编织材料的几何结构                 | 121        |
| 5.2         | 用编织空间群推导三维编织材料的几何结构                 | 125        |
| 5.3         | 三维编织几何结构纱线横截面的等效几何形状                | 129        |
| 5.4         | 本章小结                                | 131        |
| <b>第六章</b>  | <b>基于对称群的几种三维编织复合材料</b>             | <b>132</b> |
| 6.1         | 三维正方编织复合材料的几何结构及其性能                 | 132        |
| 6.2         | 空间群 $R3$ 对应的三维编织复合材料的几何结构及其性能       | 137        |
| 6.3         | 空间群 $P\bar{3}$ 对应的三维编织复合材料的几何结构及其性能 | 146        |
| 6.4         | 编织复合材料弹性性能的群分析方法                    | 156        |
| 6.5         | 本章小结                                | 166        |
| <b>第七章</b>  | <b>三维编织复合材料可变微单元分析方法</b>            | <b>167</b> |
| 7.1         | 管状三维编织复合材料的几何分析模型和物理性能              | 169        |
| 7.2         | 三维编织复合材料管的弹性性能预测                    | 184        |
| 7.3         | 本章小结                                | 193        |
| <b>第八章</b>  | <b>结论与展望</b>                        | <b>194</b> |
| 8.1         | 结论                                  | 194        |
| 8.2         | 展望                                  | 196        |
| <b>参考文献</b> |                                     | <b>198</b> |
| <b>致 谢</b>  |                                     | <b>212</b> |