

张 征 柴国钟 姜少飞 编著

双稳态可变形复合材料结构

Bistable Morphing Composite Structure

非外借



科学出版社

双稳态可变形复合材料结构

张 征 柴国钟 姜少飞 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书取材于双稳态可变形复合材料结构的最新研究进展和作者近年来从事相关研究工作的最新成果。全书共 8 章, 系统阐述双稳态可变形复合材料结构的基本理论、实验方法和数值模型。通过理论、实验与数值模拟, 对双稳态结构变形机理、环境影响和黏弹性本构进行重点分析与详细讨论。主要包括绪论、双稳态结构理论分析、双稳态结构实验与模拟、温度对双稳态结构的影响、温湿环境对双稳态结构的影响、黏弹性理论分析、黏弹性实验与模拟、非规则铺设和初始缺陷影响特例等内容。

本书可作为高等学校机械工程、力学、土木和航空航天等专业的研究生课程教材, 也可作为上述专业工程技术人员和教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

双稳态可变形复合材料结构/张征, 柴国钟, 姜少飞编著. —北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055191-7

I. ①双… II. ①张… ②柴… ③姜… III. ①复合材料结构 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 270560 号

责任编辑: 朱英彪 赵晓廷 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 14

字数: 277 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

双稳态复合材料结构是一种具有两种不同稳定状态、可变形的新型先进复合材料结构。由于其独特的多功能特性，在航空航天、国防军事、汽车电子和绿色能源等领域得到了广泛的应用。近年来，双稳态复合材料结构已被用于可折叠结构、可变形机翼、能量收集器及自适应结构等可变形智能结构的研发与制造，具有极强的应用特性和广泛的使用场合。双稳态可变形复合材料结构是空间可变形柔性结构的一种，以非对称正交铺设方式为主的双稳态结构在三十多年前就被人们发现并展开研究，而反对称铺设圆柱壳的研究近十年来也得到了广泛、持续的关注。

本书第一作者在香港城市大学进行访问研究期间接触到这种具有特殊特性的可变形复合材料结构，即被其所具有的优良性能深深吸引。2009年到浙江工业大学任教后，对此类变形结构进行了持续关注和系列研究，系统完成了从变形机理、环境影响和黏弹性本构等方面的研究工作，并有望在后期研究中将其应用于仿生机械和折叠结构中。

本书首先由基础理论开始，逐渐扩展至实验、模拟等方面，然后提升到考虑温度、温湿的影响，进而考虑基体的黏弹性特性，最后对两个特殊案例进行了讨论。本书叙述由浅入深，分层递进。本书撰写历时六年多，包含了作者多年来从事该项研究的成果，并广泛参考了国内外有关代表性论著。对于他人的工作，书中在引用时已做了标注，在此向各位作者表示感谢。

本书相关的研究工作得到了国家自然科学基金（51675485，51205355）、浙江省杰出青年科学基金（LR18E050002）、浙江省自然科学基金（LY15E050016，Y1100108）和高等学校博士学科点专项科研基金（20123317120003）等的资助。课题组研究生吴和龙、叶钢飞、陈丹迪、潘豪、李阳、黄仪、马伟力和张豪等为本书的出版工作做出了贡献，在此表示衷心感谢。

特别感谢浙江工业大学专著与研究生教材出版基金和浙江省一流 A 类学科（机械工程）对本书出版给予的资助。

受专业和水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评、指正。

作 者

2017 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 双稳态结构研究现状	2
1.2.1 理论研究	3
1.2.2 有限元模拟研究	5
1.2.3 实验研究	7
1.3 本书内容安排	10
参考文献	11
第 2 章 双稳态结构理论分析	16
2.1 经典层合板基础理论	16
2.2 反对称层合圆柱壳的双稳态特性	19
2.2.1 理论推导	19
2.2.2 算例分析	22
2.3 温度影响下的双稳态结构理论模型	25
2.3.1 理论推导	25
2.3.2 算例分析	28
2.4 温湿环境下的双稳态结构理论模型	35
2.4.1 理论推导	35
2.4.2 算例分析	38
参考文献	42
第 3 章 双稳态结构实验与模拟	46
3.1 双稳态结构实验	46
3.1.1 试件准备	46
3.1.2 实验方案	47
3.1.3 实验仪器、平台	47
3.1.4 实验结果	50
3.2 有限元数值模拟	55
3.2.1 有限元模型建立	56

3.2.2	可行性验证	57
3.2.3	收敛性分析	58
3.2.4	几何参数对双稳态特性的影响	60
3.3	模拟与实验结果对比	70
	参考文献	73
第4章	温度对双稳态结构的影响	75
4.1	温度对双稳态结构影响的研究现状	75
4.1.1	概述	75
4.1.2	国内外研究现状	76
4.2	温度影响下的双稳态结构实验	80
4.2.1	实验准备	80
4.2.2	实验测量方法	83
4.2.3	整体温度场的影响	84
4.2.4	局部温度场的影响	89
4.3	温度影响下的双稳态结构有限元模拟	92
4.3.1	建模过程	92
4.3.2	温度场影响下的双稳态特性有限元模拟	93
4.3.3	温度梯度影响下的双稳态特性有限元模拟	99
4.4	热暴露对双稳态结构的影响	101
4.4.1	暴露温度的影响	102
4.4.2	暴露时间的影响	105
4.4.3	微观结构	107
	参考文献	109
第5章	温湿环境对双稳态结构的影响	114
5.1	温湿环境对双稳态结构影响的研究现状	114
5.1.1	概述	114
5.1.2	温湿环境影响的国内外研究现状	115
5.2	温湿环境下的双稳态结构实验	120
5.2.1	实验准备	120
5.2.2	实验过程	122
5.2.3	实验分析	123
5.2.4	湿度对双稳态结构的影响	125
5.3	温湿环境下的双稳态结构有限元模拟	129
5.3.1	有限元模型	130

5.3.2 温度和湿度对双稳态结构的影响	131
5.3.3 模拟结果与理论结果、实验结果的对比	134
参考文献	139
第 6 章 黏弹性理论分析	143
6.1 复合材料黏弹性研究现状	143
6.1.1 概述	143
6.1.2 复合材料结构黏弹性国内外研究现状	144
6.2 碳纤维复合材料黏弹性材料属性	150
6.2.1 黏弹性理论基础	150
6.2.2 DMA 实验	153
6.2.3 晶胞模型有限元分析	157
6.3 双稳态结构黏弹性理论	161
6.3.1 理论基础	161
6.3.2 双稳态结构黏弹性理论模型	166
6.3.3 双稳态结构黏弹性理论分析	168
参考文献	171
第 7 章 黏弹性实验与模拟	177
7.1 双稳态结构黏弹性实验	177
7.1.1 实验准备	177
7.1.2 松弛位置影响	178
7.1.3 加载时间影响	181
7.1.4 温度影响	182
7.1.5 SEM 实验	182
7.2 双稳态结构黏弹性有限元模拟	185
7.2.1 有限元模型	185
7.2.2 加载时间影响	185
7.2.3 温度影响	187
7.2.4 模拟结果与理论结果、实验结果对比	188
参考文献	191
第 8 章 非规则铺设和初始缺陷影响特例	194
8.1 非规则反对称层合圆柱壳的双稳态特性	194
8.1.1 四层圆柱壳理论分析	194
8.1.2 四层圆柱壳数值模拟	196
8.1.3 六层圆柱壳数值模拟	199

8.2 初始缺陷对双稳态结构的影响	201
8.2.1 多余树脂层缺陷影响	202
8.2.2 厚度缺陷影响	207
8.2.3 铺设角缺陷影响	209
参考文献	211

第1章 绪 论

1.1 概 述

复合材料是由两种或两种以上具有不同性质的材料通过一种物理或者化学的方法，在宏观的尺度上组合成的具有新性能的材料^[1]，从而可以克服单一材料性能的某些缺点，以期获得综合的特殊力学性能。复合材料具有比强度和比模量高、质量轻、抗疲劳性能优异、减振性能好、加工成形方便、耐化学腐蚀性能好等诸多优点。基于复合材料发展起来的先进复合材料结构，如双稳态复合材料结构^[2]、可折叠复合材料结构^[3]和复合材料点阵结构^[4]等，因其优异的复合力学性能被广泛应用于航空航天、汽车能源、能量收集、电子器件以及其他特殊需求领域。

复合材料的成形工艺包括手糊成形工艺、缠绕成形工艺、喷射成形工艺、树脂传递模塑成形工艺等，其中手糊成形工艺又分为湿法成形工艺和干法成形工艺^[1]。实验中试件的制备又包括试件的结构尺寸设计和纤维的铺设方式选择，其中铺设方式包括对称铺设（如 $[\alpha_n/\alpha_n]$ ）和非对称铺设，非对称铺设中除了正交铺设外还有两种特殊的铺设方式：一般非对称正交铺设（如 $[0_n^\circ/90_n^\circ]$ ）和反对称铺设（如 $[\alpha_n/-\alpha_n]$ ），如图 1.1 所示。

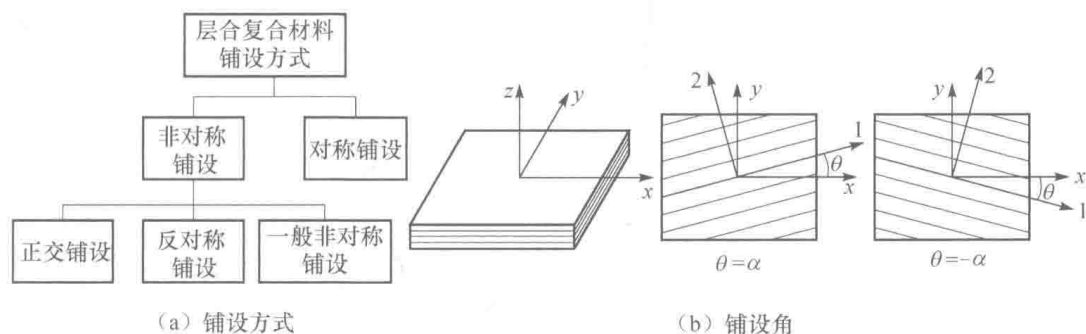


图 1.1 层叠复合材料的构造形式

由多层含纤维增强项层合材料叠加铺设（铺层方式包括反对称、正交和一般非对称等）高温固化制备而成，同时具有两种不同稳定状态特性的复合材料结构统称为双稳态复合材料结构（bistable composite structure）^[2]。相对于对称铺设和

一般非对称铺设方式,采用特殊正交铺设和反对称铺设方式制备的复合材料结构能够获得外轮廓为规则圆柱状的双稳态结构。图 1.2 所示为制备的稳态呈圆柱状的两种双稳态复合材料结构。在机械力、智能材料(压电片或形状记忆合金)、温度场等外载荷驱动下,双稳态复合材料结构可以由一种稳态转变为另一种稳态,且无须外力维持^[5,6]。作为一种新型的先进复合材料结构,双稳态复合材料结构因其质量轻、力学性能优异以及空间利用率高等优点引起了国内外诸多学者的广泛关注。近年来,双稳态复合材料结构已被用于可折叠结构^[7-10]、可变形机翼^[11-14]、能量收集器^[15,16]及自适应结构^[17,18]等可变形智能结构的研究与制造。

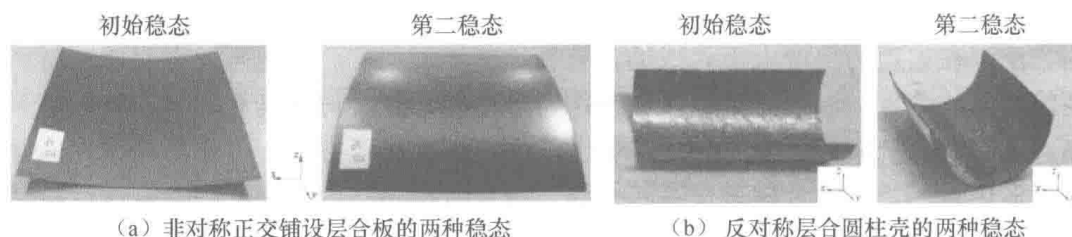


图 1.2 两种双稳态复合材料结构

美国弗吉尼亚理工学院暨州立大学的 Hyer^[2]于 1981 年发现了非对称铺设层合板的双稳态特性,并率先对其开展了理论、实验研究。通常情况下,非对称铺设的复合材料层合板具有双稳态特性,但是只有非对称正交铺设 $[0_n/90_n]$ 层合板的两种稳态呈现出规则的圆柱状。早些年对双稳态特性的研究主要集中在非对称正交铺设层合板,至今已有三十多年的历史^[2,19-23]。1996 年,英国学者 Daton-Lovett^[24]发现具有反对称铺层的复合材料圆柱壳结构也能够呈现出圆柱状的两种稳态。反对称层合圆柱壳与非对称正交铺设层合板的区别在于:反对称层合圆柱壳是由多个复合材料单层板按照既定的铺层顺序在圆柱形钢制模具中保压固化并冷却后制备得到的;而非对称正交铺设层合板则是经高温固化并自然冷却至室温后得到的。两种复合材料结构的双稳态特性也因此有所区别,如图 1.2 所示,非对称正交铺设层合板呈现出的两种稳态的曲率方向相反,而反对称层合圆柱壳的两种稳态的曲率方向则相同;即前者两种稳态的凹面朝向相反,而后者两种稳态的凹面朝向相同。由于模具结构尺寸的可设计性,可以根据实际需要反对称层合圆柱壳的初始尺寸和曲率进行设计,以制备出具有不同第二稳态卷曲半径和稳态转变载荷的双稳态试件。因此,相对于非对称正交铺设层合板,反对称层合圆柱壳具有更好的可设计性和更广泛的应用前景。

1.2 双稳态结构研究现状

双稳态问题的求解包括解析方法、数值分析方法和实验方法。大多数解析方

法基于最小势能原理来预测复合材料结构的双稳态特性。当结构的总势能最小时,可以获得两个或多个局部最小值,每个稳定的局部最小势能状态都对应一个稳定的构型。数值分析方法如常用的有限元法,采用有限元软件对复合材料结构的双稳态特性进行预测并对结构的稳态转变过程进行模拟和捕捉。实验研究则是通过实验方法对双稳态试件施加外载荷从而驱动试件发生稳态转变,采用相关仪器设备捕捉其变形过程并对其双稳态特性进行测量、表征。在实验研究中,外载荷可以由拉伸试验机或智能材料(压电片或形状记忆合金)驱动直接提供,也可以以温度场的方式提供。

Hyer^[25]最早通过实验发现,非对称铺设复合材料层合板(初始状态为平板)经过高温固化并冷却至室温后,其最终形状并不总是遵循经典层合板理论所预测的马鞍形^[26],而是呈现出两种不同曲率的柱壳状。Hyer同时指出,在外载荷驱动下,非对称层合板能够在两种稳态间发生相互转变。随后,美国弗吉尼亚理工大学^[27,28]、英国布里斯托大学的先进复合材料创新及科学中心^[29-33]以及英国巴斯大学的机械工程学院等^[34-36]先后对非对称层合板的双稳态特性进行了理论、实验及有限元模拟研究,并对其在可变形机翼、多稳态结构和减振器等领域中的应用进行了探讨。1996年,在Daton-Lovett^[24]发现反对称铺设双稳态层合圆柱壳结构后,英国剑桥大学率先对此类双稳态复合材料结构进行了相关理论研究,选用的反对称铺设结构避免了弯曲和扭转的耦合效应^[37]。随后,我国的同济大学^[38-40]、清华大学等^[41,42]也相继对反对称铺设层合壳的双稳态性能开展了相关研究。本节对两种双稳态复合材料结构的研究现状进行阐述。

1.2.1 理论研究

1. 非对称正交铺设层合板

由于填充纤维与基底材料的热膨胀系数不同,非对称铺设层合板经高温固化、自然冷却至室温后会发生翘曲,并呈现出两种不同的稳定形状。其中,采取正交铺设的非对称层合板的两种稳态均为规则的圆柱状,不同于一般非对称铺设层合板所呈现的扭转翘曲。而经典层合板理论不能对这类实验现象进行准确预测。

在发现非对称铺设层合板的双稳态性能后,Hyer^[25]基于经典层合板理论考虑层合板的几何非线性,提出用于预测非对称正交铺设层合板双稳态特性的理论模型。该模型假设 $x(y)$ 方向应变不随层合板 $x(y)$ 方向坐标变化,采用多项式逼近方法建立层合板的位移函数,利用瑞利-里茨能量法求出非对称正交铺设层合板冷却至室温后的稳态解,较好地预测了层合板的双稳态行为。分析表明:非对称正交铺设方形层合板冷却至室温后的形状包括马鞍形、单一圆柱状和双稳态圆柱状,是否具有双稳态特性很大程度上取决于层合板的几何尺寸和铺设方式。1982

年, Hyer^[19]取消了上述对 $x(y)$ 方向应变的假设, 对四种不同铺设方式的非对称正交层合板的双稳态特性进行了分析、预测。数值计算结果表明: $x(y)$ 方向上的应变不随 $x(y)$ 坐标而变化, 这与之前的假设一致; 当层合板边长达到一定尺寸后, $x(y)$ 方向的应变与 $x(y)$ 方向坐标均无关。但是, 上述理论模型均没有考虑面内剪切应变对非对称正交铺设层合板双稳态性能的影响。

韩国的 Jun 和 Hong^[43]在 Hyer 研究的基础上, 在位移函数中引入了更多项来考虑非对称正交铺设层合板面内剪切应变对其变形的影响。研究结果表明: 长厚比在一定范围内的方形非对称正交层合板的剪切应变不能被忽略, 而长厚比较小或较大时则可以忽略。

Dang 和 Tang^[44]将 Hyer 的非对称正交铺设层合板的双稳态理论模型扩展到一般非对称铺设层合板, 用以预测任意非对称铺设层合板的变形。尽管预测结果与 Hyer^[2]的实验结果吻合较好, 但是位移函数中的系数无法单独求出。Jun 和 Hong^[45]完善了 Dang 和 Tang 的模型, 增加了位移函数的项数并采用三角函数关系对各变量的关系式进行了简化。结果表明: 对于长厚比较小的层合板, 该模型预测的变形结果与 Dang 和 Tang 的预测结果存在差异。Hyer 的实验结果验证了该模型的正确性, 但是对于层合板变形后的主曲率方向缺少实验验证。

1998 年, 加拿大拉瓦尔大学的 Dano 和 Hyer^[5]通过考虑面内剪切应变并合理假设主曲率方向为变量, 直接采用多项式逼近建立了层合板的中面应变函数, 进而提出任意非对称铺设层合板的双稳态理论模型。实验结果显示, 该理论模型与 Jun 和 Hong^[45]的理论模型相比在层合板固化温度附近对层合板的变形给出了更加精确的预测, 且在变形分叉点附近与有限元解具有更好的吻合性。2002 年, Dano 和 Hyer^[46]在前期提出的理论模型基础上, 采用瑞利-里茨能量法和虚功原理预测了非对称层合板发生稳态转变所需的弹性突变力和弯矩, 这对采用智能材料驱动双稳态层合板的研究具有指导意义。随后, Dano 和 Hyer^[47]又引入了形状记忆合金 (shape memory alloys, SMA) 本构模型, 建立了 SMA 驱动双稳态非对称层合板的理论模型。2006 年, 美国学者 Schultz 等^[23]建立了压电材料驱动双稳态非对称正交铺设层合板的理论模型并进行了实验研究, 理论预测的弹性突变电压与实验结果存在 25.5% 的误差。美国的 Ren 等也对采用压电材料驱动双稳态非对称正交铺设层合板变形进行了相关研究^[22,48]。

2. 反对称层合圆柱壳结构

英国剑桥大学的 Iqbal 等^[37]基于经典层合板理论提出了一个简单的线弹性双稳态模型, 并得出了应变能关于纵向和横向曲率及柱壳横截面圆心角的函数关系式, 采用最小势能原理对反对称铺设壳结构的双稳态行为进行了预测。但是, 该模型忽略了纵向应变和扭曲率等参数, 因此也不能对正对称和反对称铺设的层合

壳的双稳态行为进行区分。Galletly 和 Guest^[49]发展了 Iqbal 等的理论模型, 通过假设层合壳结构无限长、应变沿长度方向不变且允许结构在纵向的任意变形, 从而将层合壳简化为梁并采用梁理论来计算结构的应变。该模型考虑了扭转对复合材料层合壳双稳态特性的影响, 能够对正对称和反对称铺设层合壳的双稳态特性进行预测。随后, Galletly 和 Guest^[50]在此基础上假设壳结构横截面始终为圆弧状而圆弧半径可变, 从而提出了“梁模型”, 预测的反对称层合圆柱壳结构第二稳态半径与有限元模拟结果^[51]吻合较好, 但与实验结果^[37]有较大差异。之后, Galletly 和 Guest^[52]又提出了“壳模型”, 该模型取消了对层合壳横截面形状的假定, 预测结果与“梁模型”基本一致, 但同样与实验结果相差较大。给出的原因是, 在高应变状态下, 复合材料基体呈现出黏弹性, 而理论计算中材料是线弹性的, 材料参数不变^[52]。

Guest 和 Pellegrino^[53]在总结前述工作时指出, 之前提出的模型均没有充分地考虑影响壳结构双稳态特性的关键因素。在此基础上, 他们提出了一个简单的“双参数模型”。该模型假设结构在初始状态下无初应力、中面无拉伸及结构变形均匀, 可以用圆柱来描述壳结构的变形。因此, 对于壳的每一种可能的形状, 都可以用两个参数来加以定义: 一是对应的潜在圆柱半径; 二是与潜在圆柱相关的壳的方向。他们对反对称铺层、正对称铺层和各向同性圆柱壳结构的双稳态特性进行了计算分析, 与采用前述更为复杂的理论^[49,50,52]计算得到的结果相比具有很好的一致性; 同时指出, 存在预应力的各向同性壳结构也具有双稳态特性。近年来, 英国剑桥大学又先后对表面褶皱的多稳态复合材料壳结构^[54-57]和含有预应力的各向同性层合壳结构^[58]的双稳态特性进行了相关研究。

国内同济大学的聂国华和顾欣对反对称层合圆柱壳结构的力学特性进行了研究, 建立了双稳态结构的力学模型^[39,59]。该模型考虑了拉弯耦合效应, 并给出了壳在稳态转变过程中的应变能表达式。黎志伟^[40]对双稳态复合材料壳结构进行了进一步研究, 考虑将压电材料聚偏二氟乙烯膜 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 结合到双稳态复合材料结构中, 提出了压电片-反对称层合圆柱壳结构的双稳态模型。清华大学的雷一鸣^[41]研究了双稳态结构折叠与展开过程中的力学变形理论机制, 提出了双稳态结构的控制方程。通过数值方法求解方程发现, 反对称铺设层合圆柱壳结构存在双稳态特性的前提是其初始圆心角大于某一临界值。通过对壳结构的应变能进行分析, 给出了反对称铺设层合圆柱壳结构的两种稳态之间的简明关系。

1.2.2 有限元模拟研究

有限元数值模拟相比实验和理论研究有其独特的优势, 不但可以保证较高的求解精度, 而且计算成本低, 能求解复杂几何形状和本构关系的模型。借助现有商业有限元软件可对双稳态复合材料结构的稳态转变过程进行捕捉和模拟, 从而

对复合材料结构的双稳态特性进行预测, 计算结果的显示也更加直观。将有限元模拟结果与理论和实验结果进行对比分析, 可对理论模型的完善和实验研究提供参考依据。

1. 非对称正交铺设层合板

Dano 等^[5]提出任意非对称铺设层合板的双稳态理论模型时, 就采用 ABAQUS 软件对多种非对称正交铺设层合板进行了有限元模拟, 模拟得到的层合板稳态形状与理论计算结果相吻合。

英国布里斯托大学通过有限元模拟方法对非对称正交层合板的双稳态性能进行了长期的研究。Gigliotti 等^[60]采用 ABAQUS 软件对热应力下的 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板的变形进行了模拟, 模拟结果与理论计算相吻合。对于长方形层合板, 有限元模拟能够预测分叉的消失, 而瑞利-里茨能量法则不能, 文献中的有限元模拟结果也得到了实验的验证。Mattioni 等^[61]用 ABAQUS 软件对冷却过程的非对称层合板进行有限元模拟, 分析了热应力对双稳态复合材料结构的最终形态的影响。通过模拟给出了双稳态非对称层合板冷却过程的临界转变温度 T_{cr} , 在冷却过程中, 当温度大于 T_{cr} 时, 层合板结构呈马鞍形, 不具备双稳态特性; 当温度下降到 T_{cr} 以下时, 结构才具有双稳态特性。Portela 等^[6]通过修正材料的热膨胀系数, 在有限元模型中考虑了环境湿度对非对称层合板的双稳态性能的影响, 模拟得到的层合板稳态曲率和稳态转变载荷与实验结果较为吻合。同时, 对采用 MFC (macro fiber composite) 压电片驱动层合板实现双稳态转变的可行性进行了有限元模拟。结果表明: 现有压电驱动材料提供的驱动力有限, 要实现层合板双稳态间的可逆转换较为困难, 采用智能材料实现双稳态层合板的双向驱动有待于进一步研究。Shaw 和 Carrella^[33]通过有限元模拟和实验研究了非对称正交层合板在周期载荷下发生稳态转变时的动态响应。实验和有限元模拟获得的载荷-位移曲线表明层合板的响应存在滞后性, 双稳态层合板的这种特性可降低系统的固有频率并用于振动隔离器中。

英国的 Giddings 等^[34]在有限元模型中考虑了树脂黏结剂对双稳态层合板厚度的影响, 模拟得到的层合板变形比理想有限元模型更符合实验测量结果; 并采用 ANSYS 软件建立了贴有 MFC 压电片的双稳态层合板的三维有限元模型, 模拟得到的层合板稳态形状和稳态转变所需的弹性突变电压与实验结果进行了对比, 面外位移误差为 16.0% 而弹性突变电压则相差较小。

2. 反对称层合圆柱壳结构

Iqbal 和 Pellegrino^[51]采用 ABAQUS 软件对反对称层合圆柱壳结构的双稳态行为进行了有限元分析, 并对所施加的边界条件和分析步参数进行了讨论, 给出了反对称层合圆柱壳结构的稳态转变过程和第二稳态结构的应力分布。当初始圆心

角小于 120° 时,有限元模拟得到的壳结构的第二稳态卷曲半径与理论计算结果^[37]存在明显差异。黎志伟^[40]采用 ANSYS 软件对含压电层的反对称层合圆柱壳结构的双稳态行为进行了有限元模拟,对反对称层合圆柱壳结构的第二稳态卷曲半径进行了预测。陈孟^[38]采用 ABAQUS 软件对嵌有 SMA 的反对称层合圆柱壳结构的稳态转变过程进行了有限元模拟,对不同形状的 NiTi 合金(合金丝、合金带及薄膜)驱动下的反对称层合圆柱壳结构的第二稳态卷曲半径和应力分布进行对比,发现了 NiTi 形状记忆合金带作为驱动元件所获得的驱动效果最佳。

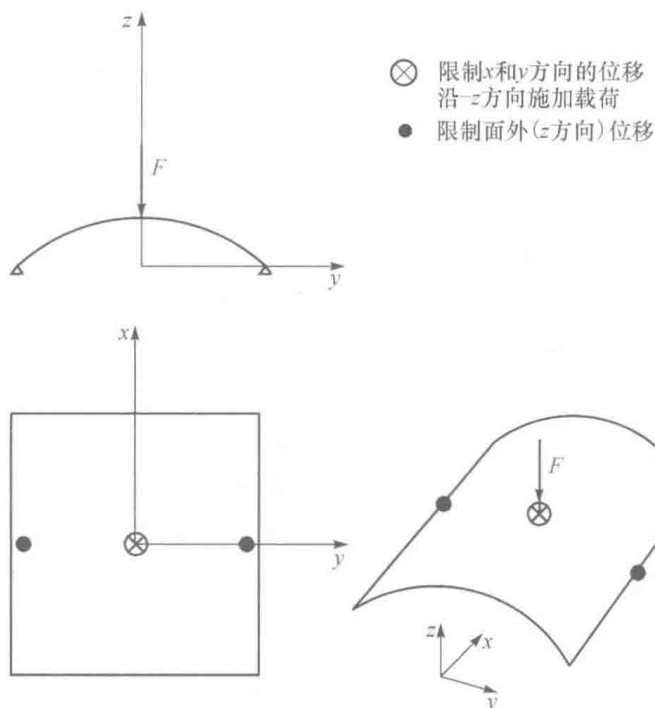
1.2.3 实验研究

在双稳态复合材料结构的实验研究中,通常需要施加驱动载荷诱导双稳态试件发生弹性突变,从而实现试件稳态转变。按照驱动载荷施加方式分为机械力载荷驱动和智能材料驱动。机械力载荷是通过拉伸试验机实验平台对试件施加力或弯矩,诱导双稳态结构的弹性突变,捕捉双稳态结构的稳态转变过程并测量转变所需的稳态转变载荷、第二稳态曲率半径及载荷-位移曲线。智能材料驱动通过对双稳态结构嵌入压电材料(如 MFC)或 SMA(如 NiTi 合金),通过施加电场(对 MFC)或温度场(对 SMA)使驱动材料产生应变,从而达到驱动双稳态复合材料结构变形的目的。

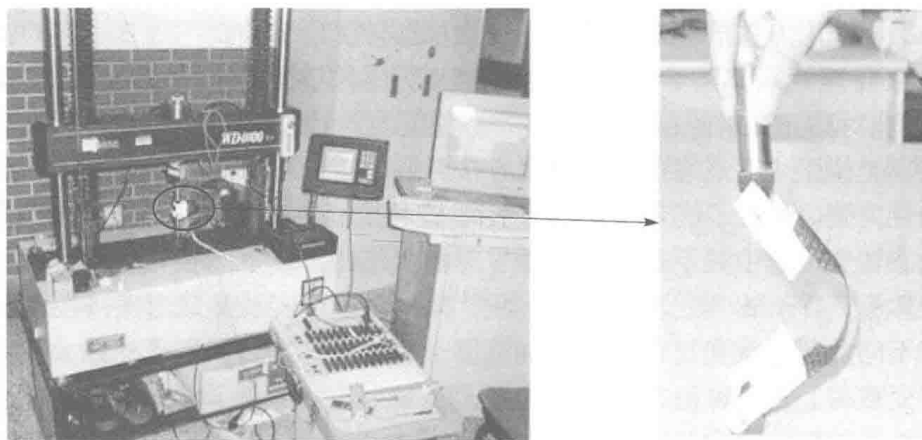
1. 机械力载荷驱动

Dano 和 Hyer^[46]设计了一种简单并且巧妙的加载方式,通过调节水量控制载荷的大小,以此测定双稳态层合板发生稳态转变所需的稳态转变载荷。对相同铺层数、不同铺层方式的非对称层合板发生稳态转变所需的载荷进行了实验测定,测量结果与理论计算吻合较好。英国布里斯托大学的 Potter 等^[62]通过实验对 $[0^\circ/90^\circ]$ 非对称正交铺设层合板的双稳态性能及两种稳态间的转换过程进行了研究,采用类似于“三点弯曲”的加载方法对层合板形心加载,诱导双稳态层合板发生弹性突变,测得了层合板形心的载荷-位移曲线。实验发现,非对称正交层合板在稳态转变过程中并不是关于中心呈对称变化的,而是两边先后各自向第二稳态发生转变。Daynes 等^[63]和 Tawfik 等^[64]采用类似的实验加载方案(图 1.3),获得具有不同几何形状和尺寸的正交铺设层合板发生稳态转变所需的最大载荷(即稳态转变载荷)及两种稳态的曲率变化。Etches 等^[65]考虑了湿度对双稳态层合板的力学性能的影响,实验研究了在 20°C 、相对湿度为 65%的环境下, $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板的几何形状、重量以及稳态转变载荷随时间的变化。实验结果表明:非对称正交铺设层合板的几何尺寸、重量及对应的稳态转变载荷在实验初期随时间变化明显,后渐趋于平缓。

雷一鸣^[41]设计了一种施加偏心载荷的压头(图 1.4),使 $[\pm 45^\circ]_2$ 铺设的碳纤

图 1.3 非对称正交铺设层合板的实验加载方案^[64]

维/环氧树脂、玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合壳试件弯曲。通过捕捉试件的弯曲过程，分析了材料、剖面弧度等参数对试件弯曲性能的影响，得到了试件在弯曲过程中所受弯矩和纵向曲率半径的变化规律。

图 1.4 针对反对称层合圆柱壳的偏心载荷施加方案^[41]

2. 智能材料驱动

采用智能材料驱动双稳态复合材料结构实现稳态转变是近年来研究的热点，

对具有自主控制的智能可变形结构的设计和制备具有重要的指导意义。已有文献主要对智能材料驱动非对称正交铺设层合板实现稳态转变的可行性和驱动效果进行了研究。

Dano 和 Hyer^[47]率先将 SMA 结合到层合板表面(图 1.5),通过控制合金丝的温度来产生大小不同的驱动力,实现对非对称铺设层合板的双稳态转变的智能控制,实验测得的 SMA 应变-温度变化趋势与理论预测大致吻合。Schultz 等^[28]对采用压电材料驱动 $[0^\circ/90^\circ]$ 双稳态层合板实现稳态转变的可行性进行了实验研究,通过改变外加电压来控制非对称层合板的变形,但实验测得的稳态转变电压与理论计算结果之间的误差较大。Tawfik 等^[66]在非对称正交铺设层合板的两面都贴上 MFC 压电片(图 1.6),通过施加电压实现了层合板在两种稳态间的可逆转变。实验测得的稳态转变所需最大电压与有限元模拟结果的误差在 10%以内。

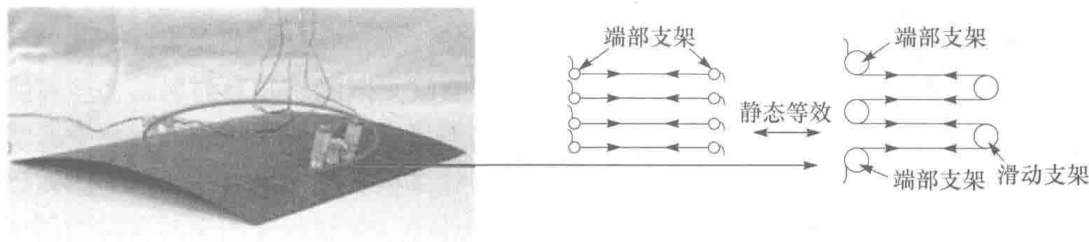


图 1.5 SMA 驱动非对称正交层合板的实验方案^[47]

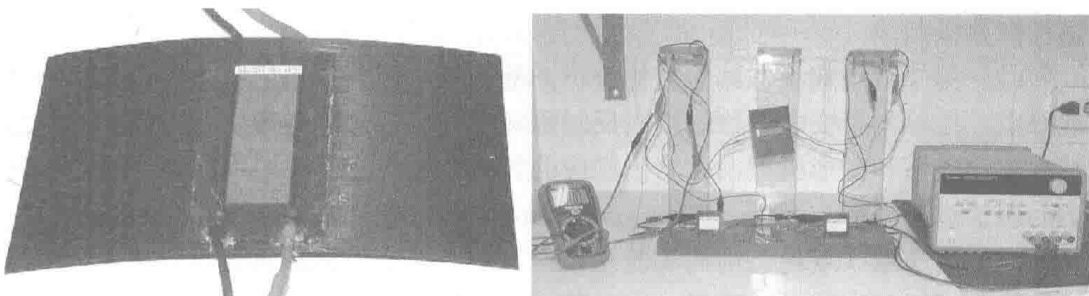


图 1.6 MFC 驱动非对称正交层合板的实验方案及装置^[66]

Giddings 等对采用电压控制压电片-双稳态层合板结构的变形量进行了研究,得出了电压-变形量之间的变化关系,对智能可变形结构的设计及控制具有指导意义^[67,68]。韩国首尔大学的 Kim 等^[69]结合 SMA 高应变和 MFC 响应快的优点,同时采用 MFC 和 SMA 成功实现了双稳态悬臂梁结构在两种稳态下的可逆变换。

由上述可知,双稳态复合材料结构作为一种新型的可延展性结构在诸多领域具有广泛的应用前景,特别是两种稳态能够呈现出规则圆柱状的非对称正交铺设层合板和反对称层合圆柱壳结构。对非对称正交铺设层合板双稳态特性的研究已经有三十多年,双稳态层合板理论模型的发展、智能控制的实现以及其在可变形