

# 非对称正交铺层双稳态复合材料的发展与应用

## Development and Application of Unsymmetric Bi-Stable Composites

中航工业北京航空材料研究院 张晓艳

**[摘要]** 非对称正交铺层使得复合材料层压板产生面内翘曲,脱离铺层平面,并且形成两个稳定存在状态。对于非对称铺层产生的变形,无论是来自物理因素还是化学因素,最初的认识都是固化收缩引发内应力。双稳态复合材料恰恰充分利用了这一点:即利用这种非对称铺层自身两个稳定存在的状态,通过极小的外界能量引发形状的改变,以达到工程应用的要求。本文综述了非对称正交铺层双稳态复合材料在国内外发展与应用的情况,并对其发展趋势进行了展望。

**关键词:** 非对称正交铺层 双稳态复合材料

**[ABSTRACT]** Unsymmetric laminates often produce deformations and warps in composites, which will lead composites to break away layers plane and form two stable states. Originally, the deformation and warp are considered as a kind of interior stress, no matter from physics or from chemistry. While bi-stable composites develop the characterization that tiny energy brings a larger deformation. The development and application of unsymmetric bi-stable composites are reviewed and the prospect is also put forward.

**Keywords:** Unsymmetric layer Bi-stable composites

### 1 双稳态的提出与工程背景

与中文双稳态对应的英文是 Bi-Stable。这一概念的提出与应用最早见于电磁学<sup>[1]</sup>。在电磁学领域,所谓双稳态是指动铁芯无论在分闸还是在合闸位置,在行程终止的两个位置上不需要任何外界能量或锁扣系统即可保持状态,其保持力只是由永磁体提供。而单稳态是指永久磁体仅在合闸位置给动铁心提供保持力,分闸位置由弹簧保持。在随后的研究中,有学者把双稳态引入了光、电、声学中,在这里双稳态是指带电粒子分散在悬浮液体中构成胶体,当对该分散体系施加电场时,带电粒子就会在库仑力作用下发生电泳的现象。

由于双稳态结构通常不需要外界能量或只需很小的外来能量即可实现两种或两种以上稳定存在状况,因此各工程学科领域对这一现象的研究日益重视起来。

### 2 非对称正交铺层双稳态复合材料在航空航天领域的应用

在航空航天领域,复合材料的研究和开发已从单纯减轻重量角度,发展到了综合考虑减轻重量、长寿命、隐身、结构功能一体化、设计制造一体化、结构整体化和低成本化等因素。复合材料及其结构所涉及的双稳态复合材料壳体,属可延展空间结构。在这里,双稳态指复合材料结构具有延展和折迭两种特征状态。壳体是具有部分或全部圆截面的薄壁直管,形状类似卷尺,结构无需永久变形即能被折迭。同时,通过控制释放折迭过程积蓄的能量,结构能自行延展。这类结构可用于航天飞行器自锁铰、可延展探测器、精密机械、以及电子通信或计算机电缆可延展杆等,应用前景十分广泛。有关双稳态层合复合材料壳体(管)的研究是由英国剑桥大学率先进行的<sup>[2]</sup>。研究表明,为了避免结构在折迭过程中的扭转变形,纤维布置相对于管的中性面需要是反对称的。这与一般标准复合材料几乎都制成对称结构所不同。目前关于双稳态的许多力学机理还未弄清楚<sup>[2]</sup>。

#### 2.1 国外双稳态复合材料研究进展

1981年美国的 M.W.Hyer 等<sup>[3]</sup>发现了复合材料的双稳态现象并进行初步探索。M.W.Hyer 将研究对象定位为非对称复合材料层合板的固化变形,研究认为非对称复合材料层合板的固化变形是几何非线性的。在随后的研究中, K.S.Kim 等<sup>[4]</sup>研究了固化过程中的残余应力,提出了数学模型。S.R.White 等将这个研究残余应力的数学模型做了进一步改进。Hyer 等<sup>[5-6]</sup>运用能量方法,成功地预测了非对称正交层板的变形,他的模型指出,变形行为与板的尺寸有密切关系。任立波等<sup>[7]</sup>对薄壳固化后变形进行了研究。

##### 2.1.1 双稳态复合材料变形的力学解释发展

1998年, M.L.Dano 等<sup>[8]</sup>在 NASA 的支助下完成了热导致非对称层压板变形的研究工作。此时的工作主要集中在层压板从平贴在模板上的固化温度降到室温后被残余应力拉起脱离平板的过程。研究涉及了 0/90、-45/45、60/30 和 30/(-30) 等多个铺层从 280℃ 降到室温的一系列情况,还与其他学者的研究结果进行了比较。

2000年4月,英国剑桥的K.Iqbal和S.Pellegrino<sup>[9]</sup>在美国宇航杂志上公布了他们关于“双稳态复合材料壳层”研究结果。这是最早关于双稳态薄壳体的研究。这篇文章关注的焦点集中在可以像卷尺一样具有展开结构的双稳态结构上。材料结构的基础也是非对称铺层复合材料,在有限元分析过程中,把卷曲的双稳壳层结构用ABAQUS区分开。通过这样的方法用一种崭新的角度观察双稳态现象,并预测壳体表面的应力分布、曲率半径等。

2002年,德国学者W. Hufenbach等<sup>[10]</sup>注意到,可以通过设计将非对称铺层的双稳态结构用于自适应结构上来。他们认为,非对称铺层层压板在制备过程中的热效应、湿环境、化学收缩是复合材料双稳态存在的主要原因,并通过“Snap-Through”现象表现出来。“Snap-Through”现象可以解释成通过极小能量使形状突然发生改变。可以在非对称铺层表面预埋钛/镍(Ti/Ni)导线,形成电路,以此控制非对称层压板在两个稳态之间的变形(图1)。



图1 预埋钛/镍(Ti/Ni)导线的双稳态结构  
Fig.1 Titanium/nickel(Ti/Ni) wire circuit bi-stable knot

### 2.1.2 双稳态复合材料变形特定铺层在实际工作中的应用

2004年,英国的剑桥学者J.C.H. Yee等<sup>[11]</sup>用各种环氧树脂T300预浸料,在0/90、45/-45和60/-60等非对称铺层下,利用非对称铺层双稳态特点制成具有“薄壁延展结构的卷尺”,并分析了这种延展结构的受力情况和卷曲情况。通过大量试验和预测发现,T300/913的 $[\pm 45]$ 铺层当长径比是10:1时可以做成类似卷尺的结构。通过大量试验也给出预测弯曲角、长径比、长度方向弯曲程度和宽度方向弯曲程度的公式。

2004年,英国的Filippo Mattioni等<sup>[12]</sup>研究了热导致非对称层合板变形的现象。复合材料非对称铺层如[0/90]通过“Snap-Through”现象表现出双稳态变形,将对称和非对称铺层交替,使变形在非对称铺层和对称铺层之间传递(图2)。

2005年, Marc R. Schultz等<sup>[13]</sup>发表了“用极小能量引发大尺寸变形”的研究内容。研究以“Snap-Through”现象引发的双稳态为基础,将具有这种特性的薄板结构

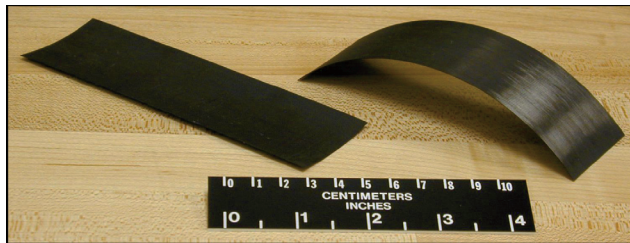


图2 复合材料非对称铺层双稳态基本单元  
Fig.2 Bi-stable basic unit of unsymmetrical composite layer

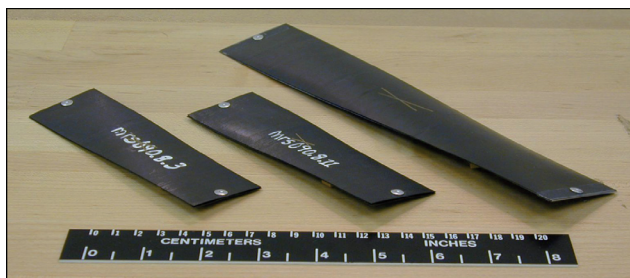


图3 复合材料非对称铺层基本单元制备的扭曲构件  
Fig.3 Distortion component prepared by unsymmetrical composite layer basic unit

以特定的方式链接,形成类似机翼等结构(图3)。Marc R. Schultz将两片具有双稳特性的矩形结构连接成小型无人机机翼形状。双稳态的优点在于变形过程只需要以很小的能量就能实现形状的改变,这一特点有望被用于宇航智能结构中,或作为控制航空动力的装置。美国海军、空军、NASA和波音等正试图利用矩形双稳态的扭曲特性提高飞机在转动时的灵敏性(图4)。

2006年,英国的F. Mattioni等<sup>[14]</sup>报道了他们将双稳态“Snap-Through”现象在展开翼上的应用情况。文中详细讲述了如何用两个大长径比非对称铺层的矩形做梁,中间辅以绉状的肋做成展开翼的过程。作者认为,智能飞行器上有许多通过小几何变形实现智能化的部分,通常的做法是在需要变形处安装复杂精密的机械铰链或电器件进行控制,而“Snap-Through”现象通过自身具有的双稳态结构可以满足这一需求。

2008年, Pedro Portela等<sup>[15]</sup>发表用“压电插入码方法研究智能多稳态结构”的论文。论文以非对称铺层为基础,考虑了干湿度等环境的影响,用有限元方法分析了双稳态复合材料,预测了干湿态下曲率半径和变形需要的外力。结果表明,湿态环境中变形需要的外力比干态下小一多半。

### 2.2 国内双稳态复合材料研究进展

国内关于复合材料固化过程数值模拟的研究才刚刚开始。对于残余应力导致复合材料双稳态“Snap-Through”现象形成的研究也只是起步阶段。研究主要集中在用有限元方法计算上<sup>[16-31]</sup>,关于双稳态“Snap-Through”现象的应用鲜见报道。

(下转第89页)

表2 系统仿真检验结果

零件类型	零件序号	工时 /min		相对误差 /%
		实际工时	系统计算工时	
半框	1	565	565	0
	2	101	95	-5.9
	3	141.2	131	-7.2
整体框	4	389.9	406	4.1
	5	971.6	892	-8.2
	6	608	562	-7.6
	7	211.4	236	11.6
短梁	8	35	35	0.0
	9	129	132	2.3
接头	10	18.6	18	-3.2
	11	78.7	76	-3.4
	12	124.7	121	-3.0
	13	98	101.5	3.6
肋	14	17	17.5	2.9
	15	37	37.5	1.4
	16	22	21.5	-2.3
	17	13	13.5	3.8
整体壁板	18	128	129	0.8
	19	87	89	2.3
	20	74	77	4.1
	21	112	112	0

设备增效;

(3)零件的数控加工工时预测结果可以为选择合理的工艺方案、加工设备,以及科学的数控程编提供参考;

(4)对于数控加工零件来说,加工工时是其成本的重要组成部分,准确的工时预测有利于产品的成本控制,从而提高产品竞争力;

(5)在转包生产项目中,数控加工零件的工时预测可以为对外方的产品报价提供参考依据;

(6)结合企业标准工时数据库,可实现数控加工工定额的智能化制定及管理;在此基础上,可系统管理产品定额工时、实际工时,实现车间自动化工时管理及考核管理。

### 参 考 文 献

- [1] 杜茂华,黄亚宇,王学军. CAPP 系统中机械加工工时定额系统的开发. 机械设计, 2006, 23(1):10-12.
- [2] 朱历新,刘诚格. 计算工时定额的神经网络系统建模与实现. 航天制造技术, 2004(2):46-49.
- [3] 李晓斌,谭理刚,刘子建. CAPP中的工时定额的计算研究. 同煤科技, 2005(4):3-4.
- [4] 黄喜,王真星. CAPP 中工时定额系统的研究与开发. 电脑开发与应用, 2002, 15(9):2-4.
- [5] 庄长远. 机械加工工序工时自动计算方法的研究. 成组技术与生产现代化, 1996(3):29-31.
- [6] 姜晓鹏,王润孝,高琳,等. 计算机辅助工时定额系统中的定额测算模型研究. 计算机应用研究, 2006, 3:183-185.
- [7] 龚清洪,夏雪梅,牟文平,等. 基于加工特征实例的零件工时预测评估. 工具技术, 2009(3):58-61.
- [8] 邓寅东,王明珠. 特征信息模型在航空产品工时估算中的应

用. 咨询研究, 2008(2):23-26.

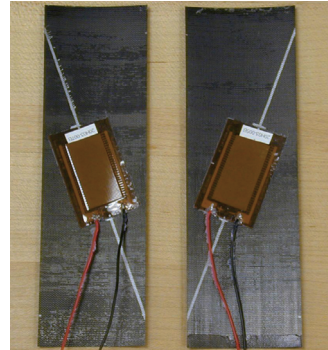
[9] 王明珠. 神经网络在飞机零件工时估算中的应用. 咨询研究, 2008(3):23-26.

[10] 朱名铨,蔡永霞,邓寅东. 刀具磨损估计的多信号神经网络方法研究. 工具技术, 1995(11):35-38.

[11] 蔡永霞. 神经网络在刀具磨损量估计及监控中的应用. 西安:西北工业大学, 1997.

(责编 三丰)

(上接第 71 页)



(a) 预置 MFC 传感器 (b) 试验组合装配件  
图4 有效试验件

Fig.4 Effective experimental device

### 3 双稳态复合材料的发展趋势

美国宇航局已经将性能优异的复合材料非对称铺层设计应用到诸如可展开旋翼、太阳能帆板等延展空间结构。通过控制释放折迭过程积蓄的能量,结构能自行延展,在满足结构材料的强度需求外,具有一定的智能功能性。与此类似的结构应用前景十分广泛,通过深入研究,可满足结构材料功能化的需求。

复合材料铺层的可设计性本身就为其向智能材料发展创造了巨大的空间,而国外双稳态复合材料向智能材料、结构的发展又为其应用指明了前进的方向。随着研究对双稳态复合材料变形本质的进一步认识及其与光、电、自动化控制的交叉应用,双稳态复合材料必定能在空天技术领域获得更大的应用。

从国内外对双稳态复合材料的研究对比可以看出,美国、英国对“Snap-Through”引发的双稳态结构发现较早,航空航天等领域已经开始就这一现象的不同形式发挥其潜在的作用。国内的诸多学者也发现了这一现象在材料、工艺、力学、模拟等诸多方面的深远影响和实用意义。但涉及面较窄,实际应用的例子鲜见。

本文有参考文献 31 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 三丰)