

周期性金属桁架夹芯板的力学性能研究进展

张卫红, 吴琼, 高彤

(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 具有周期性桁架芯体的金属夹芯板是一种非常重要的超轻质结构. 概要叙述了金属桁架夹芯板的几何模型和制备方法, 重点介绍了金属桁架夹芯板力学性能在理论研究和实验研究方面的进展. 分析了基体金属的性能、芯体的相对密度、芯体的拓扑结构、夹芯板的热处理以及芯体和面板的连接方式因素对夹芯板力学性能的影响. 最后对未来的研究趋势进行了展望.

关键词: 金属面夹芯板; 桁架芯体; 力学性能; 有限元

中图分类号: V214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)06 - 0024 - 05

Progress in the Study on Mechanical Properties of Periodic Metallic Truss Core Sandwich Panels

ZHANG Weihong, WU Qiong, GAO Tong

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Metallic sandwich panels with periodic truss core are an important new structure. The geometric models and fabrication of periodic metallic truss core sandwich panels are introduced briefly in this paper. Emphasis is placed on the recent development of the experimental and theoretical research of mechanical properties of metallic truss core sandwich panels. The influence of key factors, including properties of parent metal, relative densities of truss core, an alternative core topology, heat treatment of sandwich panels and the influence of joining technique of truss core and panels on mechanical properties, are analyzed. Some future research trends are also presented.

Key words: metal skinned sandwich panels; truss core; mechanical properties; FEM

0 引言

为了减轻飞行器的重量,同时保证结构的强度刚度满足要求,夹芯结构在航空航天领域中得到了越来越多的应用.由于这种结构具有比刚度、比强度高突出特点,因而受到研究者广泛的重视^[1].近年来,轻金属泡沫夹芯板和蜂窝夹芯板已经应用于航空航天结构^[2,3],而周期性金属桁架夹芯板是当前国际上认为最有前景的新型先进轻质超强韧结构^[2-5],已经开始应用于卫星主体结构^[6,7].

另外,现代空天飞行器部件在承载的同时,还应该提供散热、电子屏蔽或吸收冲击能量等其他功能.在传统的结构设计中,一部分材料用来满足结构的强度刚度等力学性能要求,另一部分材料则用来满足散热、电子屏蔽等其他要求.这种材料的设计与选择和结构功能的分离设计,不能在大幅度减重的同时满足多功能要求^[8].而桁架夹芯结构正是综合考虑了材料设计、结构设计和功能设计因素的新型结构功能材料,能够满足飞行器构件的超轻结构设计(轻质、高比强度、高比刚度等)和多功能性(散热、电子屏蔽等功

收稿日期: 2005 - 06 - 13 基金项目: 国家自然科学基金重大项目“空天飞行器材料与结构的性能评价及关键理论研究”(项目编号: 90405016); 航空科学基金资助项目(项目编号: 04B53080).

第一作者简介: 张卫红(1964~),男,博士,教授,博士生导师,长江学者.主要研究方向: 多学科优化.

E-mail: zhangwh@nwpu.edu.cn

能)要求^[4~8].

本文将概要叙述周期性金属桁架夹芯板的几何模型和制备方法,着重介绍其力学性能的研究进展,总结影响其力学性能五个主要因素,并对未来的研究趋势进行展望.

1 周期性金属桁架夹芯板的几何模型与制备方法

1.1 周期性金属桁架芯体的几何模型

周期性金属桁架夹芯板的芯体属于多孔材料的范畴. 多孔材料是一种由形成孔穴的棱边和壁面的固体杆或固体板所构成的相互连接的网络体^[2]. 本文仅讨论由杆构成的周期性金属多孔芯体. 按照孔穴的空间拓扑结构分类,一种是由多边形孔穴在平面上周期性聚集形成的二维桁架结构,杆是这些多边形孔穴的边;一种是由杆在空间构成的多面体在平面上周期性聚集形成的三维桁架结构,杆是这些多面体的棱边,常见的结构形式如图 1 所示.

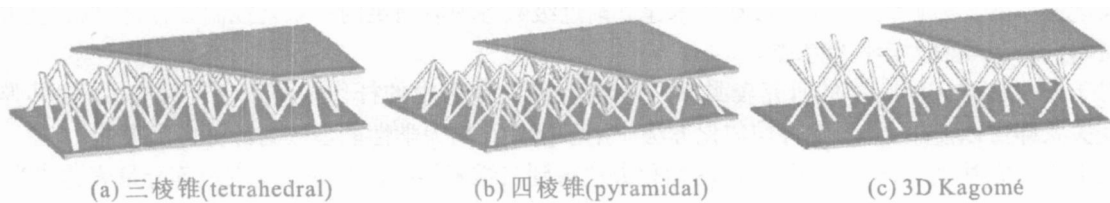


图1 具有不同形状多面体的三维桁架结构
Fig.1 3D truss core with different polyhedron shapes

1.2 周期性金属桁架夹芯板的制备方法

目前,周期性金属桁架夹芯板的制备方法主要有两种^[9],一种为快速成型技术与熔模铸造工艺相结合,直接制备整体金属桁架夹芯板,这种方法适用于芯体为任何拓扑结构的夹芯板,通用性强,但成本较高;另一种为先通过塑性成形工艺制得芯体,然后再采取焊接或胶结工艺与金属面板连接,这种方法目前仅用来制备单胞为三棱锥或四棱锥的芯体,具有一定的局限性,但成本较低.

2 周期性金属桁架夹芯板力学性能的理论分析方法

周期性金属桁架夹芯板力学性能的理论分析就是寻求计算其力学性能参数(包括等效弹性模量、剪切模量、泊松比等)的方法,常用的做法是从芯体中离散出一个单胞,研究单胞的等效力学性能,因为芯体是由一个单胞在平面上周期性阵列得到的,所以单胞的等效力学性能可以代表整个芯体的等效力学性能. 目前,分析桁架结构等效力学性能的主要方法大致可分为以下三种:

2.1 坐标变换法

周期性桁架芯体的单胞结构是各向异性的,Lekhnitskii^[10]指出各向异性桁架单胞的刚度系数可从正交笛卡尔坐标系 x_i 变换到 \bar{x}_i ($i = 1, 2, 3$),变换公式为:

$$\bar{Q}_{ij} = \frac{1}{i \sum_{j=1}^6 \sum_{n=1}^6 Q_{ijn} q_{ni} q_{nj}}, \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

式中, $k = \begin{cases} 1 & k = 1, 2, 3 \\ 2 & k = 4, 5, 6 \end{cases}$, Q_{ij} 是原坐标系下的刚度系数, \bar{Q}_{ij} 是变换后新坐标系下的刚度系数, $[q_{ij}]$ 是应变转换矩阵的转置.

Nayfeh 和 Hefzy^[11] 在 Lekhnitskii 的工作基础上计算了八面体和正六面体桁架结构的等效刚度矩阵.

2.2 有限元方法

随着对周期性桁架夹芯板理论研究的不断深入,计算机辅助的有限元分析方法被很多学者用来进行桁架结构等效力学性能参数的计算.

很多学者采用 Timoshenko 梁理论分析和计算周期性二维桁架结构的等效力学性能参数. Hayes 等^[12]总结了常见二维桁架结构等效力学性能参数的分析结果. Wallach 和 Gibson^[13]采用杆单元,应用 ABAQUS

有限元分析软件建立了桁架结构的等效刚度矩阵计算模型,以图2所示的空间桁架单胞为例计算了等效弹性模量、剪切模量和泊松比,计算结果与实验数据符合得较好。Hyun等^[14]应用有限元方法分析了3D Kagomé结构和三棱锥结构承受压缩和剪切载荷下的力学性能,不同的是他们将桁架单胞中的杆以10节点四面体单元进行离散,分析结果说明3D Kagomé结构比三棱锥结构更能抵抗塑性屈曲,承载能力更强。

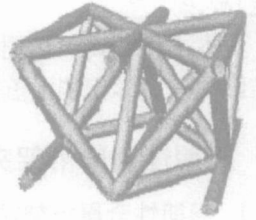


图2 桁架结构的单胞
Fig.2 Unit cell of truss core

应用有限元方法分析复杂的三维桁架结构的等效力学性能参数是一种有效的研究方法,但这依赖于计算模型的正确建立,而且边界条件的确立也是一个十分重要的因素,这将对最后的计算结果产生显明的影响。

2.3 均匀化方法

均匀化方法^[15]根据材料细观周期性特点,将宏观结构中一点的位移和应力等物理量展开为表征细观结构尺度的小参数渐近级数,并用摄动技术建立渐近级数各项应满足的一系列控制方程,依据这些方程求解出材料的宏观等效力学性能参数。

对于桁架结构, Cook^[16]的研究表明,将二维桁架结构单胞中的杆作为两节点连续单元,则其弹性应力应变关系即可以使用,从而使得均匀化方法应用于桁架结构力学性能参数的计算成为可能。

在上述研究基础上, Sigmund^[17]用均匀化方法得到二维桁架结构的等效胡克矩阵分量表达式为

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{Y} \int_Y E_{ijpq} \left(\begin{matrix} 0 & (kl) \\ pq & \end{matrix} - \begin{matrix} * & (kl) \\ pq & \end{matrix} \right) dY \quad (2)$$

式中, E_{ijpq} 是杆单元材料的弹性模量, Y 为单胞区域, $\begin{pmatrix} * & (kl) \\ pq & \end{pmatrix}$ 为以下方程的解

$$Y \int_Y E_{ijpq} \begin{pmatrix} * & (kl) \\ pq & \end{pmatrix} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijpq} \begin{pmatrix} 0 & (kl) \\ pq & \end{pmatrix} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY \quad \forall v \quad v \quad (3)$$

式中, v 为包含周期性边界条件的单胞设计域; $\begin{pmatrix} 0 & (kl) \\ pq & \end{pmatrix}$ 为三种标准单位预变形(两个坐标轴方向的单向拉伸和面内剪切变形)的预应变。考虑周期性边界条件,用有限元方法求解(3)得到 $\begin{pmatrix} * & (kl) \\ pq & \end{pmatrix}$ 的解并将其代入(2)即可得到二维桁架结构的等效胡克矩阵。

3 周期性金属桁架夹芯板力学性能的实验研究

周期性金属桁架夹芯板力学性能的理论研究是对离散出的单胞结构进行等效力学分析,实验研究则是对其整体结构进行力学分析。近年来国际上许多学者对周期性金属桁架夹芯板进行了一系列力学实验,在力学性能的研究上取得了一定的进展。

3.1 周期性金属桁架夹芯板的准静态实验研究

Evans和 Hutchinson^[8]对多种轻质结构进行了压缩实验,指出在同样重量下,桁架夹芯板的承载能力比加强筋板和泡沫夹芯板强。Wallach和 Gibson^[13]对图2所示的铝合金桁架结构做了压缩、拉伸以及剪切试验,并且分析了相应的失效机理,表明桁架的剪切模量以及拉伸和压缩强度都明显高于闭孔金属泡沫材料。Deshpande和 Fleck^[18]通过实验研究了铝硅合金和铜硅合金周期性三棱锥桁架夹芯板在压缩、剪切以及三点弯曲下的失效机理,指出了三棱锥桁架夹芯板的四种失效模式:面板屈服、面板起皱、压凹以及芯体剪切,构造了失效机理图,说明夹芯板的失效与芯体的拓扑结构以及材料的屈服应变有关。Wang和 Evans^[19]对铜铝合金3D Kagomé桁架夹芯板做了压缩与剪切试验,并与周期性三棱锥桁架夹芯板做比较,表明3D Kagomé桁架夹芯板承载能力更强,指出压缩失效的主要形式是芯体的塑性屈曲,剪切失效的主要原因在于剪切时承受拉伸应力的杆件在与面板的连接点处出现断裂。Sugimura^[20]对三棱锥桁架夹芯板进行了剪切实验,结果显示这种结构是各向异性的,说明在不增加结构重量或改变结构尺寸的条件下仅需调整其受力方向即可增加承载能力,指出主要的失效模式是杆的塑性屈服。Kooistra和 Deshpande^[21]进一步研究了时效硬化处理后的铝硅合金周期性三棱锥桁架夹芯板压缩下的性能,说明时效硬化处理后的三棱锥桁架夹芯板具有更高的抗压强度,指出铝合金三棱锥桁架结构的抗压强度高于开孔铝泡沫和波纹结构,并且在相对密度较低的时候抗压性能优于闭孔蜂窝结构。

3.2 周期性金属桁架夹芯板的动态实验研究

目前国际上对周期性金属桁架夹芯板的准静态实验研究相对多一些,对其动态实验(诸如疲劳、振动和冲击)的报道较少。Xue和 Hutchinson^[22]研究了铝合金三棱锥桁架夹芯圆板和实体圆板的冲击力学行为,在研究中假设这两个结构具有同样的半径、材料以及质量,瞬间冲击载荷作用于面板上,两种结构具有足够的韧性,不考虑断裂,实验结果表明桁架夹芯圆板比实体圆板可以吸收更多的冲击能量。他们^[23]进一步比较研究了周期性四棱锥夹芯板、蜂窝夹芯板以及波纹夹芯板的冲击力学行为,这三种夹芯板的研究假设条件同上,结果发现蜂窝夹芯板和波纹夹芯板比周期性四棱锥夹芯板能够吸收更多的能量,而且三者的抗冲击性能都比同质量同材料的实体板强。

4 影响周期性金属桁架夹芯板力学性能的因素

周期性桁架结构的存在,使金属桁架夹芯结构比其他金属夹芯结构具有更加优异的力学性能,其性能主要受下面 5 个因素的影响: 基体金属的性能; 芯体的相对密度; 芯体的拓扑结构; 金属桁架夹芯板的热处理; 芯体与面板之间的连接方式。

4.1 基体金属力学性能的影响

不同基体材料力学性能的差异将直接导致周期性桁架夹芯板承载能力不同^[9]。如果基体材料为塑性金属,在压缩过程中芯体的杆主要表现为塑性行为,随着外加载荷的增加,杆件的轴向应力超过其屈服强度时,发生塑性屈曲而造成夹芯板失效。如果基体材料为脆性金属,在压缩过程中芯体的杆主要表现为脆性行为,随着外加载荷的增加,杆件的轴向应力超过其断裂强度时,发生断裂而造成夹芯板失效。

4.2 芯体相对密度的影响

桁架夹芯板的多种性能与芯体的相对密度有密切关系^[8]。随着芯体相对密度的变化,不仅其隔热、减振、吸收能量等特性会变化,其抗压强度和弹性模量(刚度)也随之变化。夹芯板的抗压强度随着芯体相对密度的增加而增加,弹性模量也随之升高。例如三棱锥桁架芯体,其抗压强度与相对密度成线性关系^[21]。对不同的相对密度,芯体的压缩应力-应变曲线也不一样,主要表现在屈服平台的长度上。随着相对密度的增大,相同应变的应力值也随之增大,曲线明显上移,屈服平台缩短。

4.3 芯体拓扑结构的影响

理论研究以及实验分析表明,单胞的空间拓扑结构对夹芯板的力学性能影响是非常显著的^[24],比如前述^[19]周期性 3D Kagom 桁架夹芯板比三棱锥桁架夹芯板的承载能力更强。目前桁架夹芯板芯体空间结构的拓扑优化正成为一个研究热点。

4.4 金属桁架夹芯板热处理的影响

在机械加工中,热处理会对工件的力学性能产生显著的影响,金属桁架夹芯板也不例外。Kooistra和 Deshpande^[21]对时效硬化处理后的周期性铝硅合金三棱锥夹芯板进行了压缩实验,发现铝硅合金夹芯板在时效硬化处理后具有更高的强度,说明热处理能够明显改善金属桁架夹芯板的力学性能。

4.5 芯体与面板之间连接方式的影响

芯体和面板之间的连接方式对其力学性能也起着不容忽视的影响。常见的连接技术有两种^[9]:胶接和焊接。胶接可连接不同类型的金属,接缝处耐腐蚀、抗疲劳、韧性高,但是存在着接缝强度低、寿命短、耐高温性能差的问题,这些问题可以通过表面预处理得到缓解;焊接包括钎焊、激光焊、瞬间液相扩散焊(TLP)等,焊接能使面板和芯体形成很好的冶金结合,克服了采用胶接法耐高温性能差的缺点,近年来出现的 TLP 技术能够在一定温度、低压力、小变形条件下实现界面良好的冶金结合,故受到普遍关注。

5 讨论和展望

综上所述,人们对周期性金属桁架夹芯板力学性能的研究还很不充分,与其制备工艺和使用过程相关的力学问题还远远没有解决。而且,现有的实验研究主要是关于静态力学性能的,很少考虑复杂加载和动态加载条件的影响,也没有考虑时间因素的影响。因此,研究桁架夹芯板的蠕变问题、疲劳问题和动态失效及其本构关系等问题具有重要的学术价值和工程应用前景。另外,影响桁架夹芯板力学性能的原因很复

杂,还有待人们去探索,因此,要想在工业上广泛应用周期性金属桁架夹芯板,需要全面理解各种因素对桁架夹芯板力学行为的影响。就目前来看,桁架夹芯板的研究与应用工作主要集中在国外,而国内在此方面却滞后了许多,有待人们深入探索和努力。

参考文献:

- [1] Manuel stein Nonlinear theory for plates and shells including the effects of transverse shearing[J]. A AA, 1986, 24(9): 161 ~ 162
- [2] Gibson L J, Ashby M F Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge University Press, Cambridge 1997. 307 ~ 308
- [3] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al Metal Form: A design Guide[M]. Butterworth - Heinemann, Boston, 2000 157 ~ 161
- [4] Wicks Nathan, Hutchinson J W. Optimal truss plates[J]. International Journal of Solids and Structure, 2001, 38: 5165 ~ 5183
- [5] Lu T J, Hutchinson J W, Evans A G Optimal design of a flexural actuator[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49: 2071 ~ 2093.
- [6] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F Effective properties of the octet - truss lattice material[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49: 1747 ~ 1769.
- [7] Gu S, Lu T J, Evans A G On the design of two - dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity[J]. International Journal of heat and Mass transfer, 2001, 44: 2163 ~ 2175.
- [8] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al The topological design of multifunctional cellular metals[J]. Progress in Material science, 2001, 46: 309 ~ 327.
- [9] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 2331 ~ 2343.
- [10] Lekhnitskii S G Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body[M]. Holden - Day, Inc , San Francisco, California, 1963 31 ~ 46
- [11] Nayfeh A H, Hefzy M S Continuum Modeling of Three - Dimensional Truss - like Space Structures[J]. A AA, 1978, 16 (8): 779 ~ 787.
- [12] Hayes A M, Wang A J, Dempsey B M. Mechanics of linear cellular alloys[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 691 ~ 713
- [13] Wallach J C, Gibson L J. Mechanical behavior of a three - dimensional truss material[J]. International Journal of Solids and Structure, 2001, 38: 7181 ~ 7196
- [14] Hyun S, Karlsson A M, Torquato S, et al Simulated properties of Kagom é and tetragonal truss core panels[J]. International Journal of Solids and Structure, 2003, 40: 6989 ~ 6998
- [15] Fish J, Shek K, Pandheeradi M. Computational plasticity for composite structures based on mathematical homogenization: theory and practice[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997, 148 (2): 53 ~ 73.
- [16] Cook R D, Malkus D S, Plesha M E Concepts and applications of finite element analysis[M]. John Wiley & Sons, New York, 1989. 76 ~ 78
- [17] Sigmund O. Materials with prescribed constitutive parameters: an inverse homogenization problem [J]. International Journal of Solids and Structure, 1994, 31: 2313 ~ 2329.
- [18] Deshpande V S, Fleck N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3 - point bending[J]. International Journal of Solids and Structure, 2001, 38: 6275 ~ 6305.
- [19] Wang J, Evans A G, Dhamasena K, et al On the performance of truss panels with Kagom é cores[J]. International Journal of Solids and Structure, 2003, 40: 6981 ~ 6988.
- [20] Yuki Sugimura Mechanical response of single - layer tetrahedral trusses under shear loading[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 715 ~ 721.
- [21] Kooistra G W, Deshpande V S, Wadley H N G Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structure made from aluminum[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4229 ~ 4237.
- [22] Xue Z Y, Hutchinson J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45: 687 ~ 705.
- [23] Xue Z Y, Hutchinson J W. A comparative study of impulse - resistant metal sandwich plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 1283 ~ 1305.
- [24] Chiras S, Mumm D R , Evans A G, et al The structural performance of near - optimized truss core panels[J]. International Journal of Solids and Structure 2002, 39: 4093 ~ 4115.