

文章编号: 1001-4888(2018)02-0167-08

轻质点阵夹芯板热屈曲的实验研究^{*}

励争, 周洁, 李冰, 刘咏泉, 苏先槭

(北京大学工学院, 力学与工程科学系及湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 轻质点阵结构在高温工作环境下易产生失稳破坏, 因此, 研究其在热载荷条件下的稳定性是极为重要的。本文采用有限元数值计算和实验方法研究了轻质点阵夹芯板在热载荷作用下的稳定性问题。通过与点阵夹芯板的单向压力失稳形式相比较发现: 点阵夹芯板的单向压力失稳和热载荷作用失稳的形式并不完全一致; 而且, 面板厚度及其与夹芯杆件的粘接程度对点阵夹芯板的稳定性有着重要的影响。此外, 本文针对将温度变化等效为热应力这一等效模型的适用性进行了讨论, 发现等效均匀化理论只适用于面板较厚且产生整体失稳的情况。

关键词: 点阵夹芯板; 热稳定性; 屈曲模式

中图分类号: O347.2

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-078

0 引言

超轻多孔金属材料具有高孔隙率的特点, 其含孔隙的微结构按规则程度可分为无序和有序两大类。前者包括泡沫材料(开孔泡沫和闭孔泡沫), 后者包括点阵和栅格材料。轻质点阵材料作为一种具有新型高效结构构型的材料, 以其轻质、高强、抗冲击、吸能, 以及高效散热、隔热、隔声等优良性能^[1], 而被国际上认为是最具有发展前景的新一代轻质高强材料^[2,3]。三维点阵结构材料利用人为设计的几何周期性排布的点阵桁架体系作为芯材, 来连接上下两块面板, 制成点阵夹芯三明治结构。该点阵结构可充分发挥其密度低、抗剪力和抗弯强度高的优势, 优化设计出一种微结构有序的新型轻质高强多孔材料^[4,5]。国内外学者在金属三维点阵结构的优化设计、制备工艺和力学性能等方面做了大量的研究^[6-10]。相关的研究表明, 在相同的重量情况下, 点阵材料面内的杨氏模量可以比蜂窝材料高出两个数量级以上, 其面外的强度可以高出蜂窝材料一个数量级以上。在保持孔隙率的同时, 点阵材料的微结构一般都是人为设计可控的, 从而易于通过改变微结构来满足对材料力学性能的不同要求。国内外最常见的三维点阵材料的主要单胞构型有金字塔型^[11]、四面体型^[12]和 3D-Kagome 型^[13]。

由于轻质点阵结构具有极强的可设计性, 根据实际工程需求易实现多功能一体化设计, 因此, 在航天、航空、航海等工程领域具有广阔的发展前景。轻质金属点阵材料在航空航天结构和近空间飞行器的应用中, 多采用板壳类的结构。由于飞行器的蒙皮与气流间的摩擦会产生大量的热能, 因此, 往往需要考虑飞行器结构表面急剧升温的影响。过高的温度环境可能会危及结构的承载能力, 因此, 热载荷影响是轻质点阵结构安全设计和材料选择中不得不面对的重要问题。此时, 承载结构不仅需要具备出色的隔热、散热和承载能力, 而且要在高温条件下能够保持结构的稳定性, 防止由于热应力导致结构失稳破坏。目前对于轻质点阵金属材料的研究大多集中在等效力学性能^[2, 14]、抗冲击^[14, 15]和结构优化^[16]等方面, 而有关点阵夹芯板的稳定性分析, 只有一些基于等效模型的理论 and 数值模拟工作^[17-19], 特别缺乏热

^{*} 收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(11672004, 11521202)

通讯作者: 励争(1964—), 女, 教授。主要从事动态光测实验和无损检测研究。Email: lizheng@pku.edu.cn

载荷作用下稳定性分析的实验工作。点阵夹芯板的失稳形式有多种,其中包括整体屈曲、面板褶皱、芯体结构失稳、剪切破坏等等。在研究结构热稳定性时,往往将温度的变化等效为热应力的影响^[18,19],考虑由于热应力导致的结构失稳破坏^[20]。但是这种简化并未考虑到温度变化导致的热应变对结构稳定性的影响,因此,迫切需要对轻质点阵结构的热屈曲问题进行实验研究。

本文采用数值模拟和实验研究相结合的方法,分析了含四面体型胞元的轻质点阵夹芯铝板在热载荷作用下的屈曲问题,并与单向压力作用下的失稳模式进行了比较。此外,还探讨了缺陷对轻质点阵结构热屈曲的影响,以及将温度的变化等效为热应力对轻质点阵结构的适用性。

1 数值计算

现有的理论在研究结构热稳定性时,往往将温度的变化等效为热应力的影响,考虑由于压力导致的结构失稳破坏,因此会有如下结论:压力屈曲和热屈曲所表现出的屈曲形式相同。为了分析轻质点阵结构热屈曲问题,首先采用有限元方法进行数值模拟。我们以正四面体型点阵夹芯铝板为例,通过 ABAQUS 有限元程序分别计算了单向压力和温度变化导致的结构屈曲模态。在使用有限元软件的过程中,点阵结构面板使用 3Dshell 单元 S4R,桁架结构使用梁单元,网格用 ABAQUS 对全局节点进行自动划分,求解器使用 ABAQUS 自带的线性求解器 Buckle 用于计算力载荷和热载荷下点阵结构的屈曲模态。计算点阵夹芯铝板内部夹芯结构为正四面体结构(图 1(a)),芯层高度为 12.25mm,夹芯梁的横截面为 2mm×1.2mm 的矩形,四面体单胞底边边长为 15mm。整个点阵夹芯板长为 259.8mm(包含 20 个单胞),宽为 150mm(包含 10 个单胞),如图 1(b)所示。已知铝的杨氏模量为 70GPa,泊松比为 0.346,热膨胀系数为 $2.36 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。我们设定面板的厚度 t_f 分别为 3mm, 2mm 和 1mm。在单向均匀压力计算中,我们设定点阵夹芯板的均匀压力作用在两个短边,且两个短边节点的约束为沿受载方向可滑动的简支,两个长边节点的约束为自由。在热载荷作用分析时,两个短边节点的约束为固定简支,两个长边为自由。

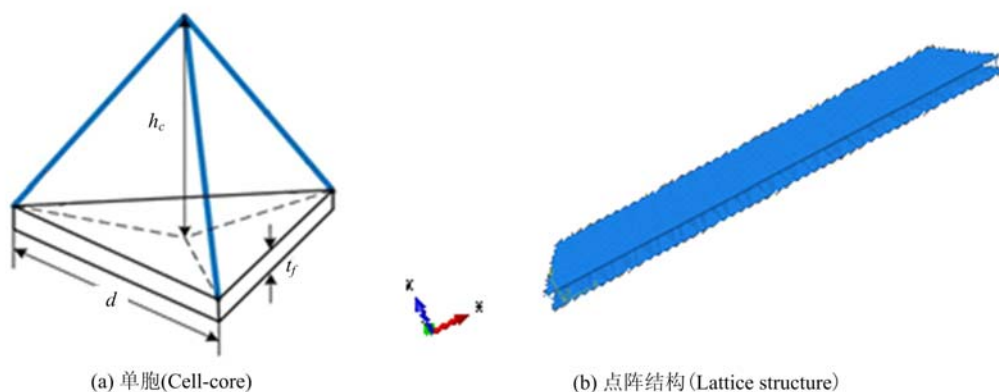


图 1 铝质点阵夹芯板示意图

Fig. 1 The schematic of aluminum sandwich lattice structure

图 2 给出了点阵夹芯板的面板厚度为 3mm 时,有限元计算出的热屈曲(图 2(a)-(d))和单向压力导致屈曲(图 2(e)-(h))的前四阶模态。由图可以发现,这两种情况下点阵夹芯板的第一阶屈曲模态基本一致。这说明将温度的变化等效为热应力,进而通过等效理论研究结构稳定性在一定程度上是可行的。然而,对于第二阶以上的屈曲模态,在点阵夹芯板受均匀温度变化时,其变形的局部性更强一些,且受自由边界的影响较大;而施加单向压力时,点阵夹芯板更加倾向于整体失稳变形。

当点阵夹芯板的面板厚度为 2mm 时,图 3 给出有限元计算出的热屈曲(图 3(a)-(d))和单向压力导致屈曲(图 3(e)-(h))的前四阶模态。由图 3 可见,这两种情况下第一阶屈曲模态一致,但在温度均匀变化时,点阵夹芯板的第二、三阶屈曲模态均变为边角的局部屈曲模态。因此,在该情况下,采用点阵夹芯结构热稳定性的等效理论可以计算出其临界屈曲温度,但无法考虑边角的局部影响,因此,无法准确预

测更高阶的屈曲模态。

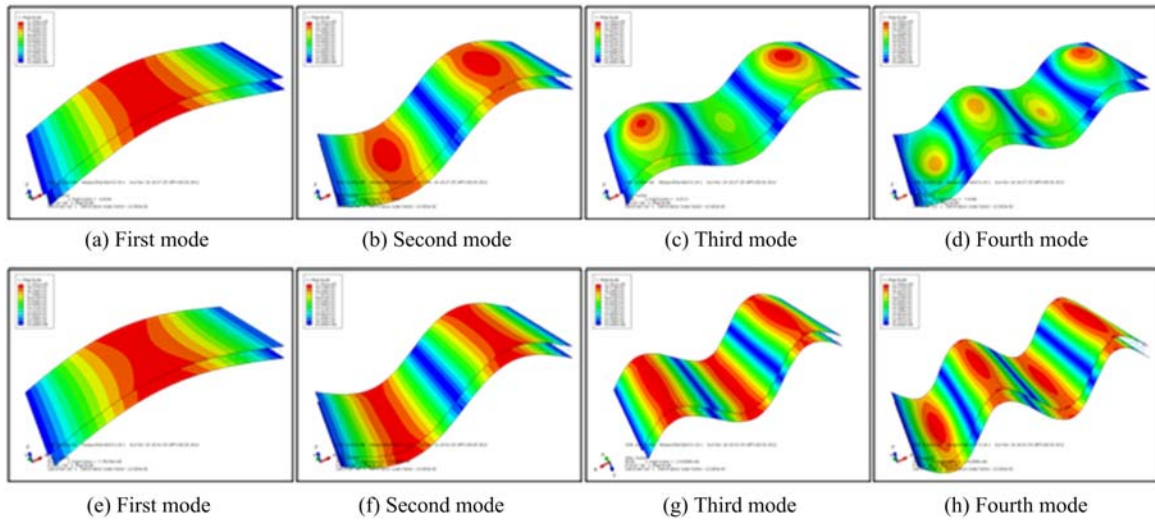


图2 面板厚3mm的点阵夹芯板前四阶屈曲模态：(a)-(d)热屈曲；(e)-(h)压力屈曲

Fig. 2 The first four buckling modes of lattice structure with 3mm thickness facesheet;
(a)-(d) under thermal loading; (e)-(h) under pressure

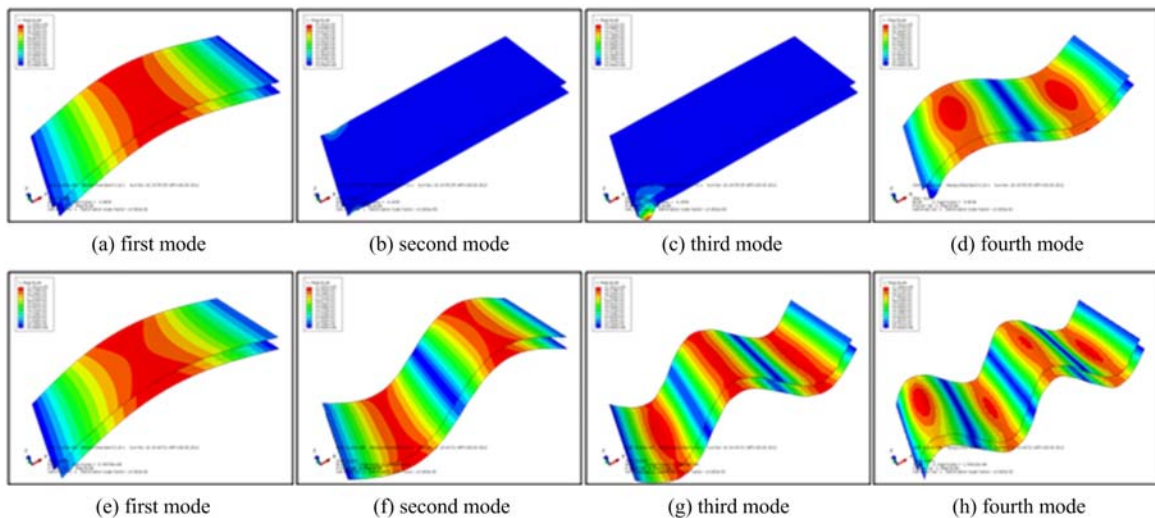


图3 面板厚2mm的点阵夹芯板前四阶屈曲模态：(a)-(d)热屈曲；(e)-(h)压力屈曲

Fig. 3 The first four buckling modes of lattice structure with 2mm thickness facesheet;
(a)-(d) under thermal loading; (e)-(h) under pressure

当点阵夹芯板的面板厚度为1mm时,图4给出了有限元计算的热屈曲(图4(a)-(d))和单向压力导致屈曲(图4(e)-(h))的前四阶模态。由图可以发现,点阵夹芯板在温度均匀变化时,其屈曲模态均为局部屈曲模态。即使不考虑前两阶的边角局部屈曲形式,将第三阶屈曲模态作为第一阶的屈曲模态,也明显表现出点阵材料的周期性导致的面板的局部屈曲形式。但当它在受均布单向压力时,第一阶屈曲模态仍为整体屈曲模态,仅在第二阶以后的高阶屈曲模态中才表现出面板的褶皱屈曲形式。因此,在该情况下,点阵夹芯结构热稳定性的等效理论则完全不适用了。

2 实验测试

本文实验以含正四面体型胞元的点阵夹芯铝板为研究对象,芯层高度为13mm,面板厚度为1mm。桁架夹芯结构的梁横截面为 $2\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ 的矩形,单胞底边边长为15mm。整个点阵夹芯板长为380mm(30个单胞),宽为45mm(3个单胞)。本实验采用的含高温箱的试验机如图5(a)所示,试件加

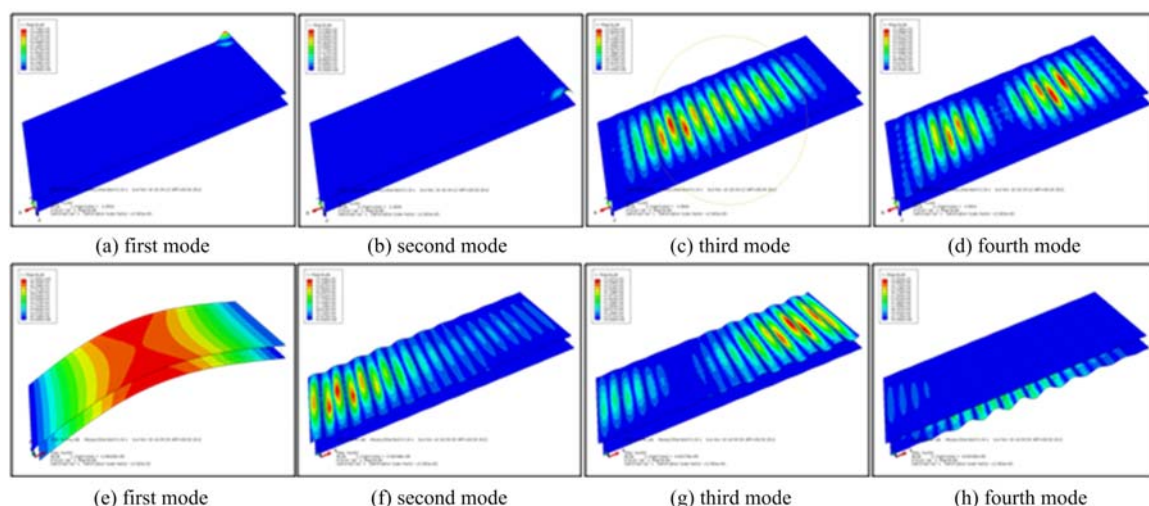
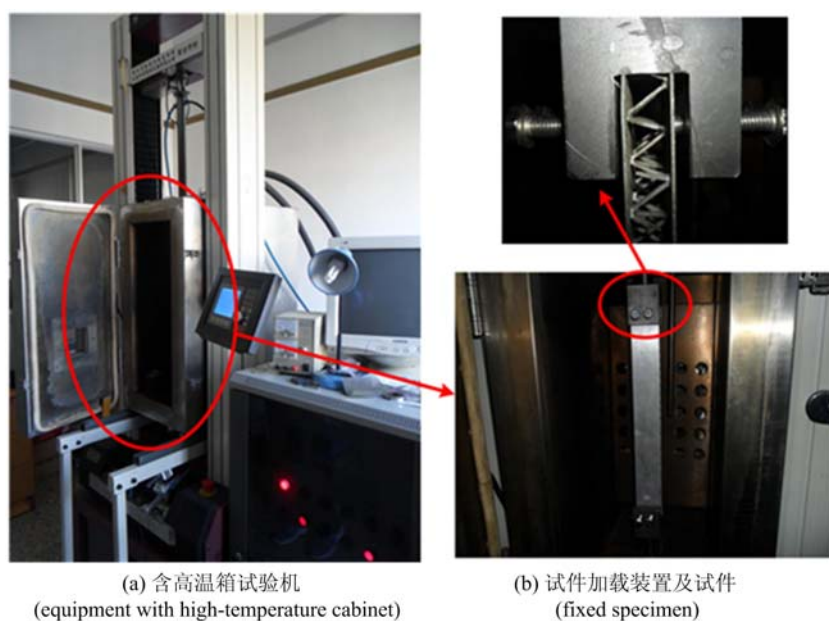


图 4 面板厚 1mm 的点阵夹芯板前四阶屈曲模态: (a)-(d)热屈曲; (e)-(h)压力屈曲

Fig. 4 The first four buckling modes of lattice structure with 1mm thickness facesheet:

(a)-(d) under thermal loading; (e)-(h) under pressure

载装置及试件如图 5(b)所示。



(a) 含高温箱试验机
(equipment with high-temperature cabinet)

(b) 试件加载装置及试件
(fixed specimen)

图 5 实验装置及试件

Fig. 5 Experiment devices and specimens

本实验中我们采用了两种试件,即完好试件和局部有不牢固焊点的试件(称为含缺陷试件),分别进行了在单向压力和热载荷下的屈曲实验,得到的力与位移曲线如图 6 所示。其中图 6(a)和图 6(b)分别表示单向压力和热载荷作用下的力与位移曲线。单向压力施加方式为如图 5(b)的相同试件在短边施加均布压力,屈曲时完好试件的临界载荷约为 3.02kN,破坏形式为整体屈曲破坏,中部发生大幅弯曲,如图 6(a)所示。热载荷屈曲实验的初始温度为 23.1℃,完好试件的最高承载温度约为 160.3℃,此时临界载荷约为 2.60kN,温度升高幅值约为 137.2℃,破坏形式为局部屈曲破坏,如图 6(b)所示。

从图 6 中还可以发现,有损伤的试件在两种加载条件下的屈曲载荷都要低于完好试件,并且当载荷达到屈曲极限条件时,含损伤试件的屈曲失效过程明显快于完好试件。

为了进一步分析损伤对轻质点阵夹芯板热屈曲的影响,我们还进行了点阵夹芯板的力-热耦合屈曲实验。给试件先施加约 1.0kN 的单向压力,然后加热使之膨胀,直至屈曲。试件破坏形式为局部屈

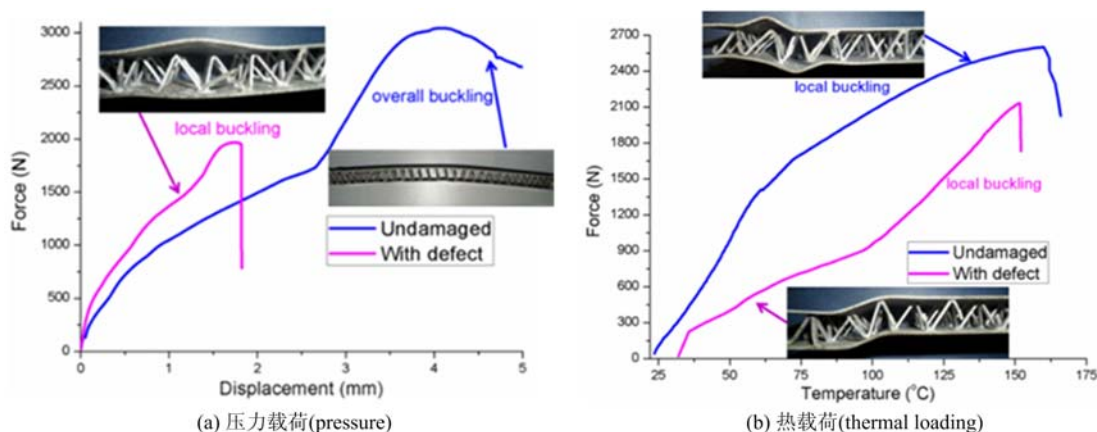


图6 两种试件的屈曲:(a)压力载荷;(b)热载荷

Fig. 6 Buckling of two specimens caused by: (a) pressure; (b) thermal loading

曲破坏,在焊点不牢固的地方发生脱层,致使面板弯曲,最终使结构失效,如图7(a)所示。采用有限元方法进行数值计算发现:若假设结构中没有缺陷,则试件会出现整体屈曲,如图7(b)所示;但是如果假设在某处加芯杆件与面板没有粘接,有限元计算结果则显示在缺陷处造成局部屈曲,如图7(c)所示,与实验中观察到的结果一致。可见,脱粘损伤对于结构的抗屈曲能力有很大的影响。

3 结果分析

图2~4的有限元计算结果表明,在点阵夹芯板的加芯材料和几何特性不变的条件下,面板的厚度对点阵结构的屈曲模式影响很大,进而影响屈曲的临界条件。当面板较厚时,点阵夹芯板的临界失稳模式主要是整体屈曲,这时等效均匀化理论依旧使用。但当面板较薄时,点阵夹芯板的失稳模式从整体屈曲向局部屈曲模式转变。对于点阵夹芯板,结构的局部特性在热屈曲中表现突出,即使是3mm厚的面板,在第二阶屈曲模式之后都表现出了与压力屈曲不同的局部特性(见图2)。相比单向压力屈曲,热屈曲的局部边角效应更为明显(见图3,图4),

这进一步说明了热屈曲失效的局部性,致使等效均匀化理论不再适用。点阵夹芯板本身极大地提高了两面板的弯曲刚度,加强了两面板承载能力和稳定性。然而,当面板厚度较薄时,点阵结构约束的局部小区域自由面板的稳定性很差,使得局部区域的面板屈曲更易于发生,使得点阵夹芯板表面产生与点阵结构周期相同的褶皱。在自由边角处,薄面板的约束条件更弱,局部屈曲形式更容易发生(见图3(b)-(c),图4(a)-(b))。

图6所示的实验测试结果如表1所示。从表1中可以发现,压力导致的屈曲和热屈曲会导致结构的屈曲形式不同。热载荷易使结构产生局部屈曲破坏,而单向压力载荷下,屈曲模式更接近于整体屈曲。这可能是由于温度变化导致的结构变形引起的。然而,研究结构热稳定性时,往往将温度的变化等效为热应力的影响,考虑由于热应力导致的结构失稳破坏,从而忽略了温度变化导致的热应变对结构稳定性的影响。此外,试件的完好程度对屈曲形式及试件承载能力影响较大。含缺陷试件往往会造成结构先于整体失稳产生局部屈曲,且使得试件承载能力明显下降。在这两种屈曲机制下,结构承载能力对缺陷的敏感程度不同。压力导致的屈曲对缺陷更加敏感,结构承载能力下降更明显,可达35%。这是由于结构的屈曲模式从整体屈曲转变为损伤引起的局部屈曲产生的。然而,热载荷产生的都是局部屈曲,因此,缺陷的影响相比之下略小。这也进一步说明,局部屈曲形式的失稳极大降低了点阵夹芯板的承载能力,因此,热屈曲问题更加值得关注。

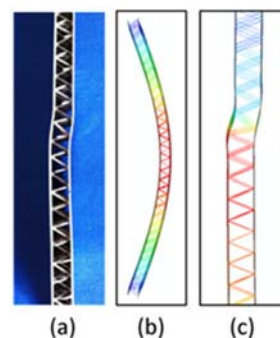


图7 含损伤试件的力-热耦合屈曲模式

Fig. 7 Thermo-mechanical coupling buckling mode of specimen with damage

表 1 压力和热载荷下的屈曲实验结果统计

Tab. 1 Experimental results of buckling under pressure and thermal loading

		屈曲形式	临界屈曲载荷/温度	缺陷致承载能力下降率
压力屈曲	完好试件	整体屈曲	3.02kN	35.10%
	含缺陷试件	局部屈曲	1.96kN	
热屈曲	完好试件	局部屈曲	137.2℃	12.70%
	含缺陷试件	局部屈曲	119.8℃	

现有的理论在处理结构热稳定性问题时,往往将温度的变化等效为热应力的影响,仅考虑由于压力导致的结构失稳破坏,因此会有如下结论:压力屈曲和热屈曲所表现出的屈曲形式相同。但这与实验结果不符。针对实验测试的试件,我们采用有限元方法,分别得到了完好试件在单向压力和热载荷作用两种情况下的第一阶屈曲模态,如图 8 所示。由此可见,有限元计算结果与实验结果(图 6)相符。因此,现有的热应力均匀化理论在有些点阵结构的情况下并不适用,这是由于理论中忽略了温度变化与压力引起的结构局部变形的不同。

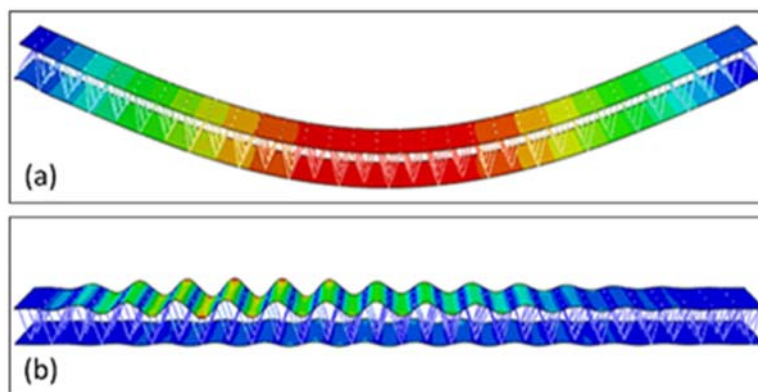


图 8 完好试件的第一阶屈曲模态:(a)压力屈曲;(b)热屈曲

Fig. 8 The first buckling mode of intact specimens caused by: (a) pressure loading; (b) thermal loading

图 7 力-热耦合屈曲模态的结果进一步说明了压力屈曲与热屈曲的不同。我们将图 7 与图 8 的结果比较发现,当完好试件承受一部分预压力后,再承受热载荷作用,其失稳模式为整体屈曲,与压力屈曲形式相同(图 8(a)),与热屈曲的局部失稳形式(图 8(b))不同。这是因为在预压力条件下,点阵夹芯板达到热屈曲的温度变化较无预应力的完全热屈曲的温度变化要低得多,热应变的影响较弱。因此,预压力在改变屈曲模式从局部屈曲变为整体屈曲时,也可改善结构的稳定性。但是局部损伤都会导致局部屈曲的产生,都会降低点阵夹芯板的承载能力。

4 结论

本文对轻质点阵夹芯铝板在单向压力和热载荷两种加载方式下的屈曲行为进行了有限元数值计算和实验研究。有限元计算和实验测试的结果都表明,点阵夹芯板的单向压力失稳和热载荷作用失稳的形式并不完全一致。本文通过有限元分析发现,将温度的变化等效为热应力的影响,建立点阵夹芯结构热稳定性的等效理论,与实验结果不同的主要原因在于等效模型忽视了热变形的影响,而且均匀化理论也无法考虑结构的局部失稳模态。因此,等效均匀化理论只适用于面板较厚且产生整体失稳的情况,并不适用于较薄面板的热屈曲问题的研究。此外,结果还表明点阵结构的脱粘缺陷明显降低了结构的极限屈曲载荷,而且相比原本局部屈曲的失稳模式,缺陷对整体失稳模式的影响更大。影响轻质点阵结构的热屈曲模式的因素,除了点阵芯体的刚度、点阵结构分布的周期形式和面板的厚度外,还有预应力的影响,以及局部缺陷的影响。因此,轻质点阵结构的热屈曲是一个十分复杂的问题,只能依赖于实验的测试分析。本文的工作为轻质点阵结构的承载能力和热载荷影响的进一步理论分析与工程应用提供了

参考。

致谢 感谢清华大学姚学锋教授和蒋小林高工对本文实验研究提供的帮助。感谢中国工程物理研究院重点学科项目“计算固体力学”资助。

参考文献:

- [1] 方岱宁, 张一慧, 崔晓东. 轻质点阵材料力学与多功能设计[M]. 北京: 科学出版社, 2009 (FANG Daining, ZHANG Yihui, CUI Xiaodong. Mechanical properties and multi-functional optimal design of lightweight lattice structures[M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))
- [2] 范华林, 杨卫. 轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(1):99—112 (FAN Hualin, YANG Wei. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(1):99—112 (in Chinese))
- [3] Evans A G. Lightweight materials and structures[J]. MRS Bulletin, 2001, 26(10):790—797.
- [4] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures[J]. Composites Science & Technology, 2003, 63(16):2331—2343.
- [5] Chiras S, Mumm D R, Evans A G, et al. The structural performance of near-optimized truss core panels[J]. International Journal of Solids & Structures, 2002, 39(15):4093—4115.
- [6] Hasan R, Mines R A W, Shen E, et al. Comparison on compressive behaviour of aluminium honeycomb and titanium alloy micro lattice blocks[J]. Key Engineering Materials, 2011, 462:213—218.
- [7] Smith M, Cantwell W J, Guan Z, et al. The quasi-static and blast response of steel lattice structures[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2011, 13(4):479—501.
- [8] Zhang Y H. Vibration and buckling of lattice sandwich structures[J]. International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation, 2008, 9(1):41—46.
- [9] 杨亚政, 杨嘉陵, 曾涛, 等. 轻质多孔材料研究进展[J]. 力学季刊, 2007, 28(4):503—516 (YANG Yazheng, YANG Jialing, ZENG Tao, et al. Progress in research work of light materials[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(4):503—516 (in Chinese))
- [10] 方海, 刘伟庆, 万里. 点阵增强型复合材料夹层结构的力学性能实验与分析[J]. 实验力学, 2010, 25(5):522—528 (FANG Hai, LIU Weiqing, WAN Li. Experiment and analysis of mechanical properties of grooved perforation sandwich composites[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(5):522—528 (in Chinese))
- [11] Zok F W, Waltner S A, Wei Z, et al. A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores[J]. International Journal of Solids & Structures, 2004, 41(22-23):6249—6271.
- [12] Deshpande V S, Fleck N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending[J]. International Journal of Solids & Structures, 2001, 38(36-37):6275—6305.
- [13] Wang J, Evans A G, Dharmasena K, et al. On the performance of truss panels with Kagomécóres [J]. International Journal of Solids & Structures, 2003, 40(25):6981—6988.
- [14] Yungwirth C J, Wadley H N G, O'Connor J H, et al. Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8):920—936.
- [15] Cui X, Zhao L, Wang Z, et al. Dynamic response of metallic lattice sandwich structures to impulsive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 43:1—5.
- [16] Pan S D, Feng J C, Linzhi Wu. Refined optimal design of sandwich structures with modified pyramidal lattice cores[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43:29—33.
- [17] Zhang Y H. Vibration and buckling of lattice sandwich structures[J]. International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation, 2008, 9(1):41—46.
- [18] Chen J W, Liu W, Su X Y. Vibration and buckling of truss core sandwich plates on an elastic foundation subjected to biaxial in-plane loads[J]. Computers Materials & Continua, 2011, 24(2):163.
- [19] 袁武, 王曦, 宋宏伟, 等. 轻质金属点阵夹层板热屈曲临界温度分析[J]. 固体力学学报, 2014, 35(1):1—7 (YUAN Wu, WANG Xi, SONG Hongwei, et al. Thermal buckling and its critical temperature analysis of sandwich panels with metal-truss core[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(1):1—7 (in Chinese))

- [20] Hua Lu, Alireza Shirazi, Ahmad Varvani-Farahani. 三层薄板的热屈曲测量及特征反演[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 540—555 (Hua Lu, Alireza Shirazi, Ahmad Varvani-Farahani. Thermal flexure measurement and inverse characterization for a tri-layer thin plate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5): 540—555 (in Chinese))

Experimental study of thermal buckling of lightweight lattice sandwich panel

LI Zheng, ZHOU Jie, LI Bing, LIU Yong-quan, SU Xian-yue

(College of Engineering & LTCS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The lightweight lattice structure is prone to instability failure in high temperature environment, so it is a crucial issue to study its stability under thermal loading. In this paper, the thermal stability of lightweight lattice sandwich panel under thermal loading is studied by using finite element (FE) numerical calculation and experimental method. It is found by comparing with the unidirectional pressure instability form of the lattice sandwich panel, that its thermal load instability is not completely consistent with former. Moreover, the panel thickness and the bonding degree with sandwich bar have important influence on the stability of lattice sandwich panel. In addition, the applicability of equivalent model, in which, the temperature change is equivalent to thermal stress is discussed. It is found that the equivalent homogenization theory is only applicable to the case where the panel is thick and the overall instability occurs.

Keywords: lattice sandwich panel; thermal stability; buckling pattern