

超轻 X 型点阵芯体金属夹层板的剪切疲劳机制

张钱城^{1,2}, 韩云杰¹, 卢天健²

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安;
2. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过试验测量了超轻 X 型结构芯体与金字塔点阵芯体不锈钢夹层板的剪切性能和剪切疲劳性能, 并对二者的标准化疲劳极限 $\Delta\tau_e/\tau_p$ 值进行了比较分析. 结果表明: X 型结构夹层板的 $\Delta\tau_e/\tau_p$ 值不仅与钎焊结点的平台化相关, 而且也与其剪切应变幅度相关. 理论分析认为, 在低剪切应变幅度和高载荷率的情况下, 金属网在剪切和扩展工艺过程中形成的裂纹等加工缺陷是导致夹层板剪切疲劳极限降低的主要因素.

关键词: 夹层板; 钎焊; 剪切疲劳; 制造缺陷

中图分类号: TB33; TG4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0061-05

Shear Fatigue Mechanisms of Ultralightweight X-Type Lattice Truss-Cored Metallic Sandwich Panels

ZHANG Qiancheng^{1,2}, HAN Yunjie¹, LU Tianjian²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The shear and shear fatigue behaviors of ultralightweight X-type lattice truss-cored metallic sandwich panels with designated node area for brazing are experimentally investigated. Compared with pyramidal lattice truss-cored sandwiches, the shear endurance limit of the X-type sandwich is dependent upon not only the designated node area, but also the shear strain capacity. Further theoretical analysis demonstrates that if the shear strain capacity is low and the load ratio is high, cracks and other defects formed during the shear and expansion processes of the expanded metal sheets play a leading role in decreasing the shear fatigue performance of X-type sandwich structures.

Keywords: sandwich panel; brazing; shear fatigue; manufacturing defect

工业装备技术和航空航天科技的迅猛发展对高性能工程材料的设计与制备提出了轻质、高强/高韧、多功能化应用等要求. 以此为背景, 超轻多孔金属材料因具有优良的结构效率和广泛的多功能应用前景而成为近年来国内外研究关注的热点^[1-4], 其中, 点阵桁架结构芯体夹层板被认为是最具有应用前景的新型轻质超强韧多功能结构之一, 有望成为目前广泛使用的蜂窝夹层板的替代结构^[5-6].

在制备点阵桁架结构芯体夹层板的相关技术中, 采用折叠铝板网制备金字塔结构夹层板的技术^[6]受到了人们的关注. 这项技术成本较低, 具有规模化应用的潜力. 然而, 由于钢板网控制难度大(如易断梗)、强度高、难平整、难以折叠形成焊接结点平台等问题, 目前采用钢材质形成该结构还仅限于冲孔网(冲孔网比较浪费材料). 张钱城等^[7]采用冲压折叠成型, 成功实现了钢板网折叠形成金字塔结构

收稿日期: 2010-02-24. 作者简介: 张钱城(1977—), 男, 博士生; 卢天健(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家重点基础研究规划资助项目(2006CB601202); 国家自然科学基金资助项目(10572111, 10632060); 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA03Z519); 国家“111 计划”资助项目(B06024).

芯体及其改进的新结构——X型点阵桁架结构。

由于轻质夹层板在实际应用时均存在周期性的不间断加载(如工业装备和航空航天装备),因此其疲劳性能研究受到人们的重视.国内外的研究目前仅限于钎焊成型的金字塔结构夹层板(芯体焊接结点为弧形)和不锈钢菱形芯体夹层板的疲劳性能^[8-9],未考虑芯体焊接结点结构的设计.本文通过试验,重点研究了X型结构夹层板的剪切疲劳性能及其破坏机制。

1 试验方法

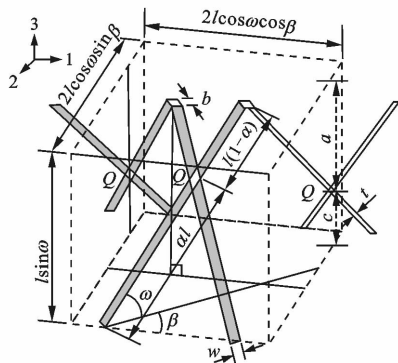
1.1 制备方法和工艺

X型芯体夹层板的面板和芯体制造材料均采用304不锈钢.面板采用3 mm加厚板,焊接前在每个面板的设定位置打9个孔作为固定孔(用于剪切试验).X型芯体采用钢板网,通过钢板的剪切、扩张和平整等工序获得平整的周期性菱形结构,板厚 $t=1.0$ mm,梗宽 $w=2.0$ mm,梗长 $l=22.0$ mm.芯体的加工工艺以及芯体和两边面板的钎焊工艺可参见文献^[7].图1a给出了X型芯体的单元胞示意图,本文根据其特征参量,选择 $\alpha=0.67$ 和 $\alpha=0.5$ (α 为杆长系数,用于表征X型结构中的杆元长度)两种规格的结构进行疲劳试验,同时采用金字塔结构($\alpha=1$)作为特殊的X型结构与上述结构进行对比.图1b和图1c为冲压后形成的具有结点平台的X型结构芯体图片,其中倾角 $\omega=45^\circ$, $\beta=40^\circ$,结点平台尺寸 $b=3$ mm.图1d为X型结构芯体夹层板的图片,其中芯体的相对密度(芯体与实体材料密度之比) $\bar{\rho}=0.017\pm 0.002$.

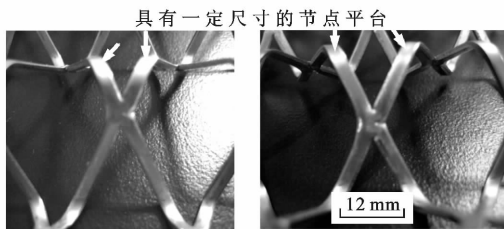
1.2 试验测试

夹层板的剪切试验根据ASTM C273M-07标准^[10]进行,采用MTS880型试验机,加载应变率为 1×10^{-4} s⁻¹.剪切试样的长厚比 $L/T\approx 16$.采用 $\varnothing 6$ mm螺钉将具有18个固定孔的试样固定在剪切加载板上,同时在加载板的边缘设计一个凸台以进一步固定试样,确保试样被充分剪切.试验中加载的力直接通过试验机获得,切向位移则通过Aramis三维变形测试仪(GOM公司)测得。

夹层板的疲劳试验亦在MTS880型试验机上进行,采用和剪切试验相同的工装和夹具.首先定义载荷比 $R=\tau_{\min}/\tau_{\max}$,设定载荷 $\Delta\tau=\tau_{\max}-\tau_{\min}$,其中 $\tau_{\max}$ 为最大剪应力, $\tau_{\min}$ 为最小剪应力.分别选取 $R=0.1$ 和 $R=0.5$ 两种情况进行剪切疲劳测试,载荷频率 $f=20$ Hz,设定循环 10^7 周试样不发生破坏为疲

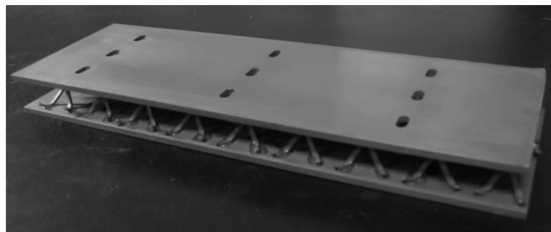


(a) X型芯体结构单元胞示意图



(b) X型结构单元胞
($\alpha=0.67$)

(c) X型结构单元胞
($\alpha=0.5$)



(d) 夹层板剪切试样图片

图1 试验中所采用的芯体结构

劳极限.以剪切试验结果中夹层板的峰值剪切强度 τ_p 作为参比,采用内插法(数值逼近法)获得疲劳极限.试验温度为室温(20℃左右)。

2 试验结果与分析

2.1 剪切测试分析

X型结构芯体夹层板沿1方向(见图1a)剪切的试验结果如图2所示.试样在加载初期呈现线弹性特性,当剪切应变达到0.04左右后不久即开始产生塑性屈曲,表现出屈服硬化特征.2种X型结构夹层板的剪切峰值强度分别为1.05 MPa($\alpha=0.67$)和1.28 MPa($\alpha=0.5$),均显著高于金字塔结构的峰值强度(见图2).随后,试样开始软化,应力-应变曲线出现类平台区.金字塔结构的平台应力约为其峰值强度的60%,而X型结构($\alpha=0.67$)的平台应力约为其峰值强度的90%,即后者的平台应力比前者高约30%.值得注意的是,当剪切应变达到约

0.28 时(见图 2),X 型结构($\alpha=0.67$)和金字塔结构夹层板的焊点才开始破坏,而 X 型结构($\alpha=0.5$)夹层板在剪切应变仅达到约 0.11 时其焊点即开始破坏。

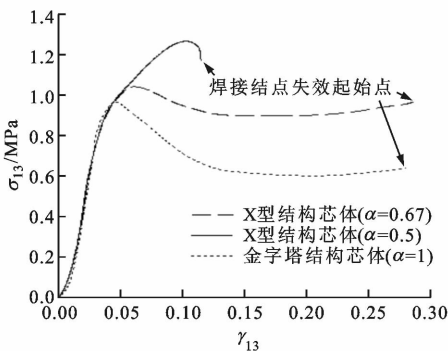
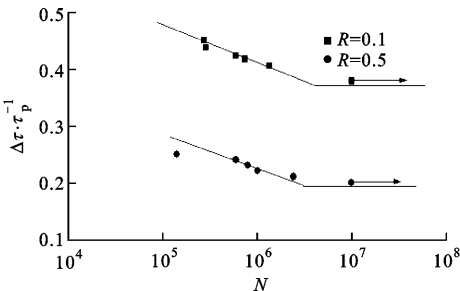


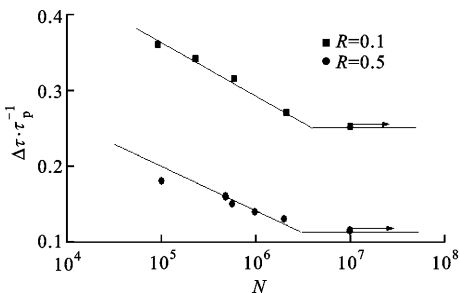
图 2 点阵结构夹层板的名义剪切应力-应变曲线

2.2 剪切疲劳测试和分析

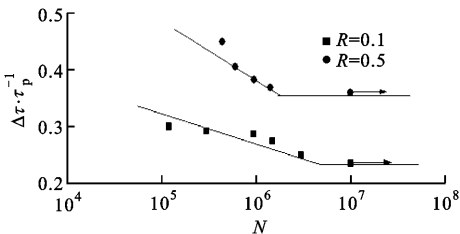
图 3 给出了 3 种点阵结构夹层板剪切疲劳的 S-N 曲线,显示出载荷比 R 分别为 0.1 和 0.5 条件下的剪切疲劳极限 $\Delta\tau_e$ 。与静态剪切峰值强度 τ_p (参见图 2)相比,疲劳极限 $\Delta\tau_e$ 或 τ_{max} ($\tau_{max} \equiv \Delta\tau/(1-R)$)



(a) X 型结构 ($\alpha=0.67$)



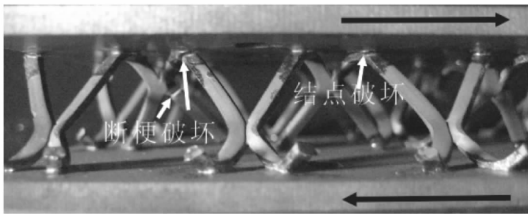
(b) X 型结构 ($\alpha=0.5$)



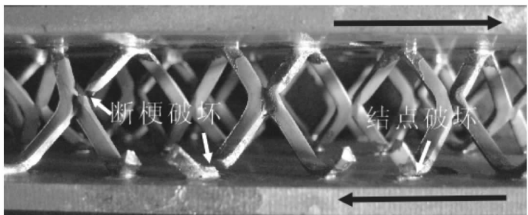
(c) 金字塔结构 ($\alpha=1.0$)

图 3 3 种不同点阵结构夹层板的剪切疲劳 S-N 曲线

均要低得多,且其对载荷比 R 较为敏感. 图 4 所示为 2 种典型的局部疲劳破坏形式: 焊接点位置断梗和焊点破坏; X 型结构单元结点位置断梗. Côté 等^[8]在试验研究金字塔结构的疲劳破坏方式时,已经讨论了前者的破坏机制。



(a) X 型结构 ($\alpha=0.67$)



(b) X 型结构 ($\alpha=0.5$)

图 4 X 型结构夹层板的典型疲劳破坏

为了进一步分析 X 型结构的疲劳破坏机制及结点焊接平台对标准化剪切疲劳极限 $\Delta\tau_e/\tau_p$ 值的影响,将测试结果和文献报道的另 2 种点阵结构的结果均列于表 1. 比较分析发现,焊接结点平台化的夹层板的剪切疲劳极限值不同于文献^[7-8]报道的结果,说明 $\Delta\tau_e/\tau_p$ 与焊接结点平台设计有关;对于 X 型结构($\alpha=0.67$)和金字塔结构,焊接结点平台在 $R=0.1$ 时可以显著改变 $\Delta\tau_e/\tau_p$,但是在 $R=0.5$ 时对 $\Delta\tau_e/\tau_p$ 的影响较小;对于 X 型结构($\alpha=0.5$),焊接结点平台对剪切疲劳极限值的影响则具有相反的效果. 结合三者的静态剪切应力-应变曲线(见图 2),发现 X 型结构($\alpha=0.67$)和金字塔结构均具有较高剪切应变幅度的特征,此特征说明,除了增大焊接结点面积,还需要增大剪切应变幅度,才能确保夹层板剪切疲劳性能的提高。

3 剪切疲劳破坏机制分析

为了分析点阵芯体夹层板的疲劳性能,根据试验结果(见图 3)考虑如下剪切疲劳破坏的模式:①焊接结点破坏;②不锈钢梗破坏。

对于高周疲劳,点阵芯体夹层板的变形为弹性变形,因此其整体和局部应力之间存在一一对应的关系. 假定整体应力 σ_G 和局部应力 σ_L 以及整体屈

表 1 不同点阵结构芯体夹层板的标准化剪切疲劳极限对比

芯体拓扑结构	基体材料	相对密度 $\bar{\rho}$	焊接结点平台	$\Delta\tau_e \cdot \tau_p^{-1} (R=0.1)$	$\Delta\tau_e \cdot \tau_p^{-1} (R=0.5)$
金字塔结构 ^[8]	AL6XN 不锈钢	0.07	无	0.27	0.20
菱形结构 ^[9]	304 不锈钢	0.15	无	0.29	0.20
金字塔结构	304 不锈钢	0.017	有	0.36	0.235
X 型结构($\alpha=0.67$)	304 不锈钢	0.017	有	0.38	0.20
X 型结构($\alpha=0.5$)	304 不锈钢	0.017	有	0.25	0.12

服应力 σ_G^u 和局部屈服应力 σ_L^u 之间存在如下关系

$$\sigma_G = k_f \sigma_L \tag{1}$$

$$\sigma_G^u = k_y \sigma_L^u \tag{2}$$

其中 k_f 和 k_y 为常数,则有

$$\frac{\sigma_G}{\sigma_G^u} = \frac{k_f \sigma_L}{k_y \sigma_L^u} \tag{3}$$

如果塑性屈服和疲劳失效发生在材料的同一个位置(如焊接点),则有

$$\frac{k_y}{k_f} = \gamma \tag{4}$$

因此

$$\frac{\sigma_G}{\sigma_G^u} = \frac{1}{\gamma} \frac{\sigma_L}{\sigma_L^u}$$

或

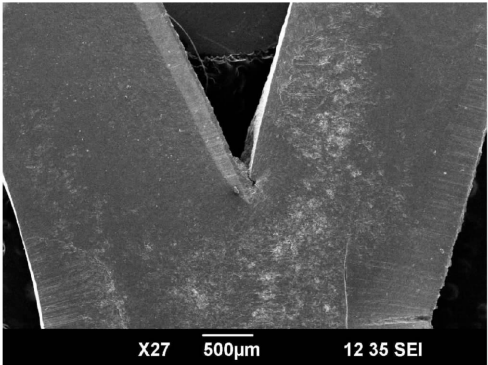
$$\frac{\Delta\sigma_G}{\sigma_G^u} = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta\sigma_L}{\sigma_L^u} \tag{5}$$

基于理想弹塑性假设,当材料存在塑性屈服时,应力将重新分布,所以 $\gamma \in [1, 2]$.

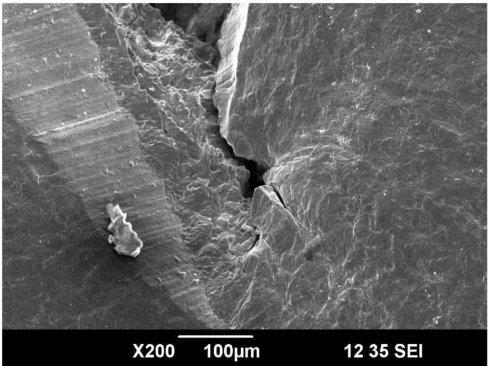
根据上述推导结果,对于 X 型结构($\alpha=0.67$)和金字塔结构,由于焊接结点失效延迟至高剪切应变区,不适合使用钎焊合金的疲劳性能来估计夹层板的剪切疲劳性能,所以疲劳性能提高的唯一解释是:一定面积的结点焊接平台缓解了焊接点位置的应力.

对于 X 型结构($\alpha=0.67$),塑性屈曲和疲劳失效均产生于 X 型梗的位置,适合采用不锈钢材料的疲劳性能来估计夹层板的剪切疲劳性能.但是,将 Côté 等^[8]报道的不锈钢疲劳数据转换为 $\Delta\sigma_e/(\gamma\sigma_y) (R=0.1, 0.5) \in [0.45, 0.9]$ 后,发现其值显著大于表 1 中的测试结果.分析认为,夹层板内的疲劳断梗可归因于位于 X 单元顶端的裂纹(见图 5)等缺陷,而这些缺陷大多产生于钢板网的剪切、扩展和平整工艺过程,且疲劳裂纹也均源于这些缺陷位置.图 6 所示为 X 型结构($\alpha=0.67$)中一条尚未破断的梗上的疲劳裂纹.

对于 X 型结构($\alpha=0.5$),焊接结点的破坏产生于其峰值强度位置附近,因此可以近似采用钎焊合



(a) X 型结构单元一端的扫描图



(b) 尖点位置局部放大图

图 5 制备过程中产生的裂纹等缺陷

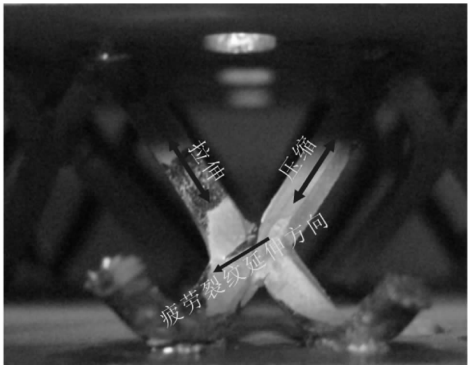


图 6 X 型结构($\alpha=0.67$)中一条尚未破断的梗上的疲劳裂纹

金材料的疲劳性能来估计其夹层板的剪切疲劳性能.在钎焊合金材料的疲劳性能指标(即 $\Delta\sigma_L/\sigma_L^u$)未

知的情况下,可以采用类推法获得 $\Delta\sigma_L/\sigma_L^0$,由此可以推断出 X 型结构($\alpha=0.5$)的标准化疲劳极限 $\Delta\tau_c/\tau_p$ 值应与表 1 中文献[8]的结果近似.但是,试验测得的标准化疲劳极限 $\Delta\tau_c/\tau_p$ ($R=0.5$) 值仅为 0.12,远低于表 1 给出的结果,与 X 型结构($\alpha=0.67$)的类似.上述结果表明,X 型结构($\alpha=0.5$)疲劳性能的降低不仅与低的剪切应变幅度有关,而且与加工过程中出现的缺陷(裂纹)相关,在低剪切应变幅度和高载荷率的情况下,加工缺陷的影响尤为显著.

4 结 论

本文通过试验研究了超轻 X 型结构夹层板的剪切和剪切疲劳性能,分析了其疲劳破坏机制,获得的主要结论如下:

- (1)对于 X 型结构($\alpha=0.67$)和金字塔结构夹层板,剪切疲劳性能的提高源于焊接结点面积的增加和剪切应变幅度的提高;
- (2)对于 X 型结构($\alpha=0.5$),低的剪切应变幅度仅在一定程度上降低了其剪切疲劳性能,而加工缺陷在降低剪切疲劳极限上起主要作用.

参考文献:

[1] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用 [J]. 力学进展,2006,36(4):517-535.
LU Tianjian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 517-535.

[2] 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 (11): 2163-2175.

[3] 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(9): 2071-2093.

[4] WADLEY H N G. Multifunctional periodic cellular metals [J]. Philos Trans R Soc London; A, 2006, 364(1838): 31-68.

[5] BIAGI R, BART-SMITH H. Imperfection sensitivity of pyramidal truss sandwich panels [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(14/15): 4690-4706.

[6] KOOISTRA G W, WADLEY H N G. Lattice truss structures from expanded metal sheet [J]. Materials and Design, 2007, 28(2): 507-514.

[7] ZHANG Qiancheng, HAN Yunjie, CHEN Changqing, et al. Ultralight X-type lattice sandwich structure, 1: concept, fabrication and experimental characterization [J]. Sci in China; E, 2009, 52(8): 2147-2154.

[8] Côté F, FLECK N A, DESHPANDE V S. Fatigue performance of sandwich beams with a pyramidal core [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(8): 1402-1412.

[9] Côté F, DESHPANDE V S, FLECK N A. Shear fatigue strength of a prismatic diamond sandwich core [J]. Scripta Materialia, 2007, 56(7): 585-588.

[10] ASTM Standard C273M—07 Standard test method for shear properties of sandwich core materials [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2007.

[本刊相关文献链接]

往复压缩机轴系扭振的数值分析. 西安交通大学学报,2010,44(3):100-104.

特种产品运输振动加速模拟试验条件的研究. 西安交通大学学报,2009,43(3):74-77.

铝合金薄板在疲劳载荷下孔洞聚合试验中的材料损失. 西安交通大学学报,2009,43(3):121-124.

铜长条薄板在疲劳载荷下裂纹聚合的试验研究和一个新发现. 西安交通大学学报,2009,43(2):121-124.

考虑应变率效应的复合材料层合板冲击动态响应. 西安交通大学学报,2010,43(1):72-76.

航空铝合金薄板在疲劳载荷下孔洞聚合的试验研究和一个新发现. 西安交通大学学报,2009,43(1):125-128.

离心压缩机叶轮叶片疲劳断裂故障的数值分析. 西安交通大学学报,2008,42(11):1336-1339.

柔性夹持多点拉形过程的数值模拟. 西安交通大学学报,2008,42(9):1160-1164.

内嵌流体柔性板的流体自适应减振机理数值分析. 西安交通大学学报,2008,42(5):612-616.

烧结金属纤维材料的吸声模型研究. 西安交通大学学报,2008,42(3):328-332.

(编辑 葛赵青)