

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.04.006

# 面向增材制造的微桁架胞元几何与力学性能分析

梁晓康,孙国辉,刘敏,田彩兰,陈靖,董鹏,罗志伟  
(首都航天机械有限公司,北京 100076)

**摘要:**针对 BCC、FCC 及其衍化型共 6 种微桁架胞元结构进行了参数化建模及几何特性分析,通过有限元法对不同构型的胞元分别进行了压缩载荷条件下的力学性能分析,提出了等效比刚度的概念以表征不同构型胞元结构的刚度特性。结果表明:胞元构型对比表面积影响不大,但对相对密度有较大影响, FCC 和 FCCZ 型胞元具有较优良的几何特性及减重效果。FCCZ 胞元具有较高的比刚度,通过引入载荷方向上的 Z 模块,可显著提高微桁架胞元的等效比刚度,同时降低胞元构型对等效比刚度的影响程度。

**关键词:**微桁架;力学性能;有限元分析;增材制造

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)04-0024-03

## Geometry and Mechanical Properties of Micro-truss Cells for Additive Manufacturing

LIANG Xiaokang, SUN Guohui, LIU Min, TIAN Cailan, CHEN Jing, DONG Peng, LUO Zhiwei  
(Capital Aerospace Machinery Company Ltd., Beijing 100076, China)

**Abstract:** The parametric modeling and geometry focusing on the BCC/FCC and their derived structures and the mechanical properties of different micro-truss cells under compression loading conditions based on FEM both were analyzed. The concept of equivalent specific stiffness was proposed to characterize the stiffness characteristics of cell structures with different configurations. The results show that the cell structure has little effect on the specific surface area, but greater effect on the relative density. The FCC and FCCZ cells have better geometric characteristics and weight loss effects. As FCCZ cell enjoys higher specific stiffness, the equivalent specific stiffness of the micro-truss cell is significantly improved by introducing the Z module in the load direction, while the influence of the cell configuration on the equivalent specific stiffness is reduced.

**Keywords:** micro-truss; mechanical properties; finite element analysis; additive manufacturing

## 0 引言

随着航空航天飞行器对服役性能的要求越来越高,其产品结构正在从“面向性能”向“面向功能”转变,开发兼具承载与功能特性的多功能结构飞行器日趋重要。三维点阵结构由于其天然的多孔特性和可设计性以及轻质、高强度、高效散热、能吸收电磁波等特性,可实现光、电、力、热、声、磁等多物理场的有效融合<sup>[1]</sup>,在航空航天等领域具有广泛的应用前景。

三维点阵结构由哈佛大学 EVANS A G 等<sup>[2]</sup>于 2000 年首先提出,其结构形式与空间桁架结构类似。常见的三维点阵构型有四面体型、金字塔型、Kagome 型、体心立方型等,常用的制备方法有熔模制造法、冲压成型法、搭接拼装法、挤压线切割法、金属丝编织法等<sup>[3]</sup>。近年来,随着增材制造技术的发展成熟,给三维点阵结构的制造带来新的变革。相关的增材制造轻质点阵结构力学性能的研究受到了国内外专家的高度重视。仲梁维等<sup>[4]</sup>研究了由长方体空间衍生的胞元结构参数化建模方法及其力学性能;LI P 等<sup>[5]</sup>使用激光选区熔化成形技术制备了 BBC 型点阵

结构并进行了压缩试验,采用有限元方法研究了结构变形过程;MASKERY I 等<sup>[6]</sup>研究了 SLM 成形 Al-Si10-Mg 铝合金梯度分布点阵结构的力学性能,并对成形态、热处理态的均布/梯度分布的点阵结构性能进行了对比分析;AMANI Y 等<sup>[7]</sup>采用 SLM 成形技术制备了 FCC 型点阵结构并进行了压缩试验,通过 CT 检测得到了压缩变形行为,并建立了考虑微缺陷的异质有限元模型。

本文主要针对 BCC、FCC 及其衍化型共 6 种微桁架胞元结构进行了参数化建模及几何特性分析,通过有限元法对不同构型的胞元分别进行了压缩载荷条件下的力学性能模拟分析,提出了等效比刚度的概念以表征不同构型胞元结构的刚度特性,为桁架式三维点阵结构的建模、设计提供了一种新方法。

## 1 微桁架胞元参数化建模

根据空间桁架结构的几何特点,可以通过杆元尺寸主导或胞元尺寸主导两种方式确定桁架构型。以 BCC 型胞元为例(图 1),决定其构型的特征参数为:杆元长度  $C$ 、杆元与水平方向夹角  $\theta$ 、杆径  $D$ 、胞元长  $L$ 、胞元宽  $W$ 、胞元高

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2017YFB1103001)

**第一作者简介:**梁晓康(1985—),男,河北石家庄人,高级工程师,硕士,研究方向为增材制造创新设计及工艺开发。

$H$ 。杆元尺寸主导型数学模型见式(1),胞元尺寸主导型数学模型见式(2)。

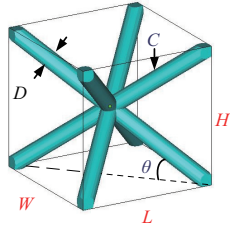


图1 胞元尺寸参数示意图

$$\begin{cases} L=C \times \cos \theta \times \cos 45^{\circ} \\ W=C \times \cos \theta \times \sin 45^{\circ} \\ H=C \times \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C=\sqrt{L^2+W^2+H^2} \\ \theta=\arcsin(H/C) \end{cases} \quad (2)$$

以胞元尺寸主导型数学模型建立微桁架胞元的三维模型,根据文献[8]基于Creo的三维点阵微单元参数化设计方法,分别建立了BCC、BCCZ、FCC、FCCZ、BFCC、BFCCZ共6种微桁架胞元三维模型库(表1)。

表1 微桁架胞元参数化实体模型

胞元构型	杆元直径 $D/\text{mm}$		
	0.4	0.8	1.2
BCC			
BCCZ			
FCC			
FCCZ			
BFCC			
BFCCZ			

## 2 微桁架胞元几何特性分析

对于三维点阵结构来说,根据用途的不同,其性能的主要关注点分为几何特性、力学特性、传热特性等,其中比表面积以及相对密度是衡量轻质点阵结构几何特性的重要指标。比表面积  $S_v$  是指胞元结构表面积与其体积的

值,比表面积将显著影响胞元的传热、吸波等特性。相对密度  $\rho$  是指胞元结构中胞元体积与其所占长方体包络体积的比值,相对密度对胞元结构的质量、吸声、吸震性能有着重要影响。随着相对密度的增加,材料的力学性能与能量吸收能力会提高,但能量吸收效率会降低<sup>[3]</sup>。

通过对本文涉及的微桁架胞元结构进行分析,可将其分为BCC模块、FCC模块、Z模块3类,通过模块化组合可得到其他类型微桁架胞元(图2),每个模块的表面积、体积可根据式(3)-式(5)进行计算。

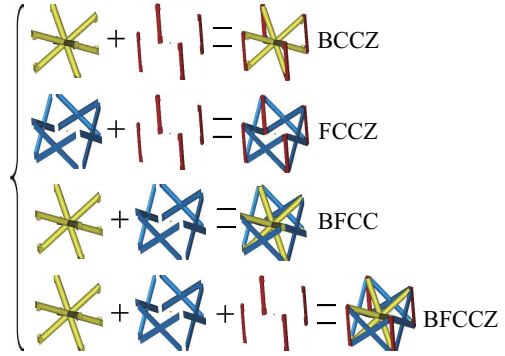


图2 微桁架胞元模块化组合

$$\begin{cases} S_{\text{BCC}}=4\pi D \sqrt{L^2+W^2+H^2} \\ V_{\text{BCC}}=\pi D^2 \sqrt{L^2+W^2+H^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_{\text{FCC}}=4\pi D \sqrt{L^2+H^2} \\ V_{\text{FCC}}=\pi D^2 \sqrt{L^2+H^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S_{\text{Z}}=\pi DH \\ V_{\text{Z}}=\pi D^2 H \end{cases} \quad (5)$$

根据上述公式可知,BCC、FCC、Z模块比表面积分别为  $4/D$ 、 $4/D$ 、 $1/D$ ,仅由杆元直径决定,且随直径的增加比表面积将减小。

本文以尺寸主导型模型设定胞元参数分别为  $L=10\text{mm}$ 、 $W=10\text{mm}$ 、 $H=10\text{mm}$ 、 $D=0.4\text{mm}$ ,其比表面积、相对密度等几何特性如表2所示。

表2 微桁架胞元几何特性

序号	类型	节点数 $n$	杆元数 $s$	比表面积 $S_v/(\text{mm}^2/\text{mm}^3)$	相对密度 $\rho/\%$
1	BCC	9	8	10.00	7.5
2	BCCZ	9	12	9.53	8.0
3	FCC	9	16	10.00	5.0
4	FCCZ	12	20	9.32	5.5
5	BFCC	13	24	10.00	12.6
6	BFCCZ	13	28	9.71	13.1

根据图3可知,不同类型胞元的比表面积相差不大,当杆元直径为  $0.4\text{mm}$  时,比表面积均在  $9 \sim 10(\text{mm}^2/\text{mm}^3)$  的范围内,其中BCC、FCC、BFCC型胞元比表面积相同,随着Z模块的加入,比表面积均相应有所降低。不同类型胞元的相对密度相差较大,FCC和FCCZ型胞元相对密度较低( $4\% \sim 6\%$ ),BCC和BCCZ型次之( $6\% \sim 8\%$ ),BFCC和BFCCZ型胞元相对密度最大( $12\% \sim$

14%)。因此,仅从比表面积和相对密度来看,FCC和FCCZ型胞元具有较优的几何特性。

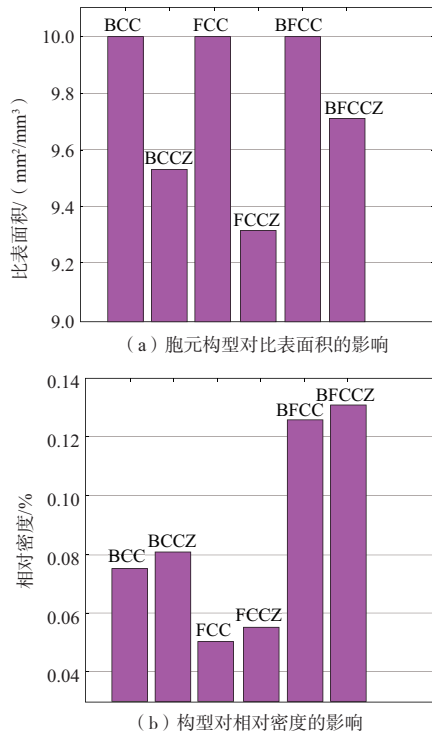


图3 胞元构型对比表面积和相对密度的影响

### 3 微桁架胞元力学性能分析

#### 3.1 材料及边界条件设置

通过有限元模拟,分析不同类型微桁架胞元结构在压缩载荷条件下的力学性能。模拟分析选用钛合金材料,密度 $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量 110 GPa,泊松比 0.33,屈服强度 825 MPa,抗拉强度 895 MPa,延伸率 10%。6种结构均采用一端固定约束,另一端施加压缩载荷 200 N(图 4)。

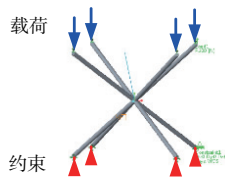


图4 边界条件设置示意图

#### 3.2 模拟结果分析

通过静力学有限元分析,得到图 5 压缩载荷条件下胞元的应力分布和变形分布情况,可以发现胞元构型以及 Z 向杆元对胞元的承受载荷能力有着重要影响。BCC 型胞元变形最大,FCC 型次之。通过 BCC 型与 FCC 型的组合,BFCC 型胞元变形显著减小。这主要是由于 FCC 胞元中的各杆元基本处于悬臂状态,整体刚度较弱。FCC 以及 BFCC 胞元中形成了局部稳固的三角形结构,可以增强胞

元的整体刚度。此外,通过引入载荷方向上的 Z 模块,可以显著提高该方向上的承受载荷能力,降低微桁架胞元的变形量。

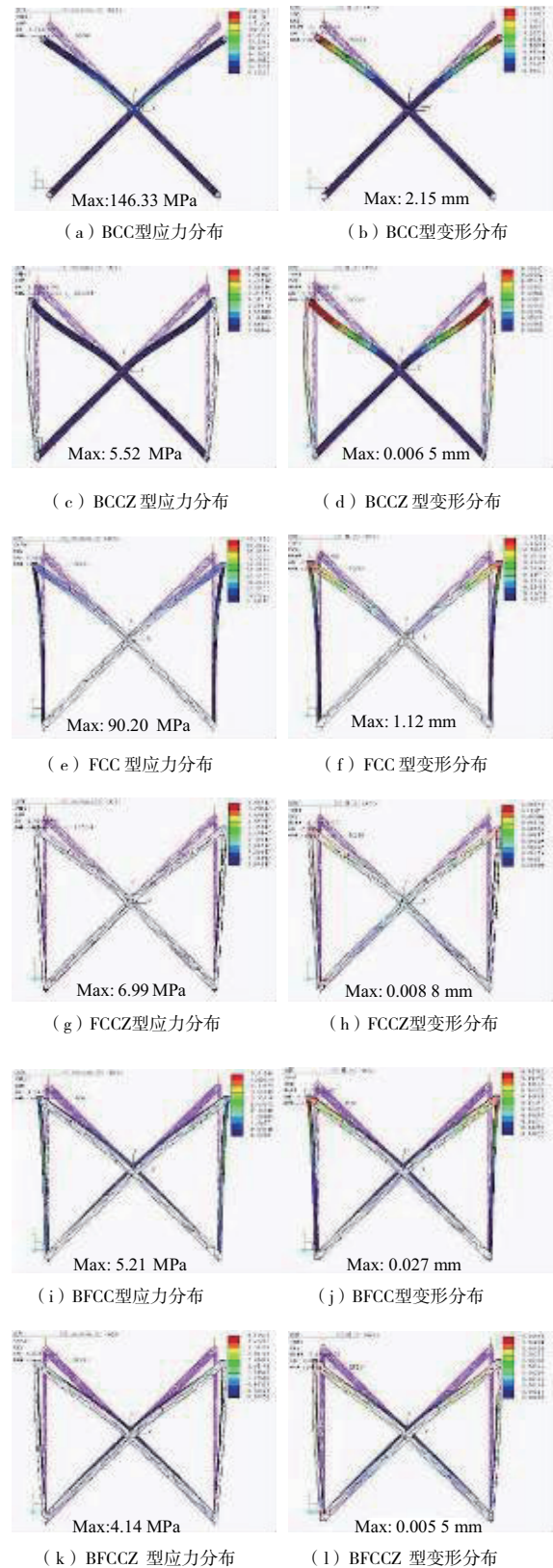


图5 压缩载荷条件下胞元有限元模拟结果

(下转第 48 页)

分析,确定失效模式,并对可能导致该故障的各个因素进行了排查,得出引起冲击转矩过大的深层次原因,为后续空气涡轮起动机安全性设计和加工制造提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] 于印鑫. 齿轮传动系统若干动力学问题研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
- [2] 刘恩福,吕希敏,张怡恭. 积累式冲击扭矩测试仪研制[J]. 大连理工大学学报,1999,39(1):90-94.
- [3] 赵帅,范习民,王金立,等. 发动机试验联轴器失效测试分析[J]. 内燃机与配件,2018(24):53-54.

- [4] 王文阁,鹿云,刘再生,等. 降低传动系统冲击载荷的一种有效方法[J]. 汽车技术,2013(2):4-8.
- [5] 陈宝庆,叶福民. 两级行星齿轮断齿故障的动态特性分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):51-54.
- [6] 李文辉. 某型直升机交流发电机断轴故障分析及改进[J]. 直升机技术,2016(4):51-53.
- [7] 夏致斌,李武元. 空气起动机保险轴断裂故障分析[J]. 热加工工艺,2013,42(16):202-204.

收稿日期:2020-09-07

#### (上接第26页)

本文引入等效比刚度  $\bar{S}$  (见公式(6))的概念以表征不同微桁架胞元结构的刚度特性。

$$\bar{S} = \frac{F/x}{\rho} \quad (6)$$

式中: $F$ 为载荷力; $x$ 为变形量; $\rho$ 为胞元相对密度。

由图6可知,FCCZ胞元具有最高的比刚度,BCCZ、BFCCZ模块次之,可见通过引入载荷方向上的Z模块,不仅使传力路径得到优化,显著提高了微桁架胞元的等效比刚度(1~2个数量级),而且降低了胞元构型对等效比刚度的影响程度,即在仅承受压缩载荷的条件下,相对胞元构型,载荷方向上的杆元基本决定了胞元的等效比刚度。

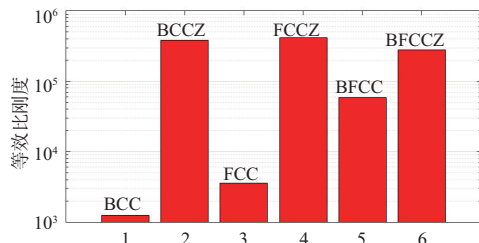


图6 不同构型微桁架胞元的等效比刚度

## 4 结语

本文针对6种微桁架胞元结构进行了参数化建模及几何特性分析,通过有限元法对不同构型的胞元分别进行了压缩载荷条件下的力学性能分析,得到以下结论:

- 1) 不同类型胞元的比表面积相差不大,随着Z模块的加入,比表面积均相应有所降低;
- 2) 不同类型胞元的相对密度相差较大,FCC和FCCZ型胞元相对密度较低(4%~6%),FCC和FCCZ型胞元具

有较优的几何特性及减重效果;

3) 胞元承载能力主要受胞元构型以及Z向杆元的影响。BCC型胞元变形最大,通过BCC型与FCC型的组合,BFCC型胞元变形显著减小。通过引入载荷方向上的Z模块,可以显著提高该方向上的承受载荷能力;

4) FCCZ胞元具有最高的比刚度,BCCZ、BFCCZ模块次之,通过引入载荷方向上的Z模块,显著提高了微桁架胞元的等效比刚度,同时降低了胞元构型对等效比刚度的影响程度。

#### 参考文献:

- [1] 王向明,苏亚东,吴斌,等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术,2018,61(10):16-25.
- [2] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(3/4):309-327.
- [3] 戴贵鑫,吴士平. 超轻质微点阵结构金属材料的研究进展[J]. 铸造,2020,69(1):1-10.
- [4] 仲梁维,李小伟,胡寿根. 轻质点阵结构的参数化建模及力学性能研究[J]. 中国机械工程,2014,25(16):2253-2261.
- [5] LI P, WANG Z, PETRINIC N, et al. Deformation behaviour of stainless steel microlattice structures by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering:A, 2014, 614:116-121.
- [6] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, AREMU A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering:A, 2016, 670:264-274.
- [7] AMANI Y, DANCETTE S, DELROISSE P, et al. Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches[J]. Acta Materialia, 2018, 159:395-407.
- [8] 梁晓康,孙宏波,董鹏,等. 桁架式三维点阵结构的参数化建模与增材制造[J]. 电加工与模具,2020(2):65-68.

收稿日期:2020-07-03