

激光与光电子学进展

单胞构型和微观缺陷对 SLM 制备 NiTi 合金
高刚度点阵结构疲劳性能的影响

司冠琛, 向政, 杨琴, 沈显峰, 陈捷*, 黄姝珂**

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621000

摘要 采用选区激光熔化(SLM)技术制备了三种高刚度镍钛合金点阵结构(带有 Z 轴增强支柱的体心立方结构-BCCZ、带有 Z 轴增强支柱的面心立方结构-FCCZ、带有 Z 轴增强支柱的面体心立方结构-FBCCZ),研究了结构类型和微观缺陷对疲劳性能的影响。试验结果显示:FBCCZ 结构的疲劳性能最优,最大压缩应力为 25 MPa 时,实现 10^7 次加载循环;BCCZ 和 FCCZ 结构的疲劳性能较差,最大压缩应力为 15 MPa 附近时,实现 10^7 次加载循环。分析结果表明:循环加载应力较大时,FBCCZ 结构疲劳寿命最优,FCCZ 次之,BCCZ 最差,此时点阵结构的单胞类型对疲劳性能的影响显著,结构的变形程度和应力集中程度越小,疲劳性能越好。循环加载应力较小时,FCCZ 结构和 BCCZ 结构的疲劳寿命逐渐接近。此时单胞结构对疲劳性能的影响减弱,微观缺陷对疲劳性能的影响增强,试样中的孔洞缺陷在循环加载过程中将促进疲劳裂纹的萌生,降低疲劳性能。

关键词 激光技术; 镍钛合金; 点阵结构; 疲劳性能; 选区激光熔化

中图分类号 TG139.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222960

Effects of Cell Configuration and Micro Defects on Fatigue Properties of
NiTi Alloy Lattice Structure Having with Rigidity Prepared by SLM

Si Guanchen, Xiang Zheng, Yang Qin, Shen Xianfeng, Chen Jie*, Huang Shuke**

*Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621000, Sichuan, China*

Abstract In this study, three types of nitinol (NiTi) lattice structures [namely, body-centered cubic structure with Z-axis reinforcement pillars (BCCZ), face-centered cubic structure with Z-axis reinforcement pillars (FCCZ), and face-body-centered cubic structure of shaft reinforced pillars (FBCCZ)] having high stiffness were prepared by applying selective laser melting. The effects of the structure type and the porosity defect on the fatigue property were investigated. The experimental results show that the FBCCZ exhibits the best fatigue performance, reaching 10^7 loading cycles at the maximum compressive stress of 25 MPa. The BCCZ and FCCZ exhibit poor fatigue performance, reaching 10^7 loading cycles at the maximum compressive stress of approximately 15 MPa. The analysis results show that when the cyclic loading stress is large, the structure type has a significant effect on the fatigue property of NiTi alloys. The smaller the bending deformation and local stress concentration of the structure, the better is the fatigue property. Therefore, the best fatigue property is exhibited by the FBCCZ, followed by the FCCZ, and the BCCZ exhibits the worst. When the cyclic loading stress is small, the influence of micro defects on the fatigue property becomes significant than that of the structure type. The difference between the fatigue properties of the FCCZ and BCCZ gradually decreases as the cyclic loading stress decreases. The porosity defects in the sample promote the initiation of fatigue cracks and degrade the fatigue performance during cyclic loading.

Key words laser technique; nitinol alloy; lattice structure; fatigue properties; selective laser melting

1 引言

镍钛(NiTi)合金因具有超弹性、形状记忆效应和

生物相容性等特点而备受工程界和学术界的关注^[1-6],且已被应用于机械电气、航空航天和生物医疗等诸多领域^[7-9]。由于 NiTi 合金的超弹性、耐磨性、耐腐蚀性

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2022-11-25; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52001289)、国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金项目(U1930207,U2130201)

通信作者: *jiechen_6s@caep.cn; **huangshuke@caep.cn

和化学活性高等特点,传统加工方法制备 NiTi 合金复杂几何结构(例如多孔结构)时遇到刀具易磨损、焊接时析出有害相以及功能特性被破坏等诸多挑战^[10],限制了其应用范围的进一步拓展。近年来,激光增材制造技术的成熟[特别是选区激光熔化(SLM)技术]^[11]为制备复杂 NiTi 合金多孔结构提供了新的途径。然而,激光增材制造成型过程中复杂的热循环会引入各种缺陷(如裂纹、气孔、粉末黏附等),进而对 NiTi 构件的各个性能产生影响,特别对疲劳性能的影响尤为显著,而疲劳性能是零件服役过程中安全及稳定性能最重要的影响因素。因此,研究激光增材制造的 NiTi 合金多孔结构零件在循环载荷^[12]条件下工作的疲劳性能^[13]十分重要。

与传统方法制备的 NiTi 合金^[14-17]不同,影响选区激光熔化 NiTi 合金多孔结构疲劳性能的主要因素有单胞类型^[18]、工艺参数、成型方向^[19-20]、内部缺陷和表面黏附^[21]等。目前,仅有少数学者研究了作为医疗植入物的几种低刚度 NiTi 多孔结构(八面体、胞状极小曲面和片状极小曲面结构)的疲劳性能,分析了单胞类型、下表面面积^[21]和建造方向^[22]对疲劳性能的影响。然而,对于一些特殊的应用场景(例如减振、抗冲击等),高刚度结构因其良好的能量吸收能力更具有应用

潜力^[23]。目前,针对高刚度 NiTi 合金多孔结构疲劳性能的研究仍十分欠缺,且成型过程中引入的各种微观缺陷对其疲劳性能的影响机理及规律尚不清晰,限制了高刚度 NiTi 合金多孔结构的应用。

本文通过选区激光熔化技术制备了三种典型的高刚度 NiTi 合金点阵结构,研究了三种点阵结构在循环压缩载荷条件下的疲劳性能。通过有限元分析三种结构的变形和应力分布情况,以及微计算机断层扫描技术(micro CT)和扫描电子显微镜(SEM)等手段检测微观缺陷,探究了单胞构型和孔洞缺陷对点阵结构疲劳寿命的影响,为 NiTi 合金高刚度点阵结构的疲劳性能预测及优化提供了可参考的依据。

2 试验材料和方法

2.1 结构参数设计

本文通过 UG 设计了三种带有 Z 轴增强支柱的点阵结构(BCCZ、FCCZ、FBCCZ),符合拉伸主导型点阵结构^[22],相较传统 BCC、FCC、FBCC 结构具有更高的刚度。如图 1 所示,三种结构单胞的支柱直径 D 均为 0.6 mm,单胞尺寸均为 3 mm×3 mm×3 mm($L=3$ mm),总结构尺寸为 12 mm×12 mm×12 mm,理论体积分数分别为 20%、17%、31%。

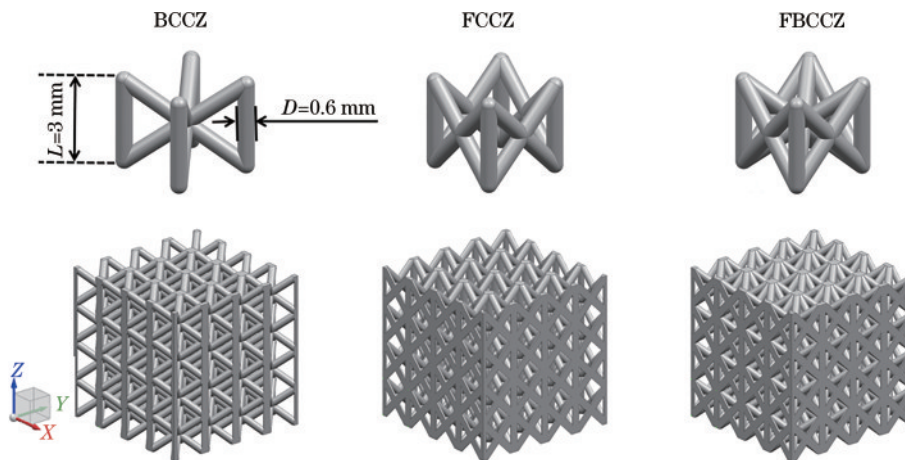


图 1 BCCZ、FCCZ 和 FBCCZ 的单胞模型和结构模型

Fig. 1 Unit cell and structure models for BCCZ, FCCZ, and FBCCZ

2.2 样品制备

试验采用深圳微纳增材技术有限公司的 $\text{Ni}_{50.6}\text{Ti}_{49.4}$ (原子数分数,%)合金粉末为原料,其显微图像和粒径分布如图 2 所示, NiTi 合金粉末呈球形,粒径范围从 $d_{10}=21 \mu\text{m}$ 到 $d_{90}=53 \mu\text{m}$,该粉末具有良好的流动性,利于铺粉。

如图 3 所示,采用 SLM-100B 型金属三维(3D)打印机制备了三种 NiTi 合金点阵结构。采用优化的工艺参数设置:激光功率为 180 W,扫描间距为 50 μm ,扫描速度为 700 mm/s,层厚为 30 μm 。该参数加工的 NiTi 合金构件成型质量良好,同时采用 NiTi 合金基板且打印过程始终处于 99.99% 的高纯氩气中。

2.3 表征与测试

采用 Instron 5985 型电子万能试验机对三种结构进行压缩测试(室温),沿垂直支柱方向施加恒定的速率(0.1 mm/s)直到试样断裂失效,压缩应力使用试样的横截面积(XOY 面)计算,由应力-应变曲线得到试样发生断裂失效前的屈服应力(σ_y)和弹性模量(E)。

使用 Instron 8801 型疲劳试验机对三种结构进行高周压缩疲劳试验(室温),沿垂直支柱方向使用恒定负载频率(15 Hz,正弦波形状)和恒定负载比 $R=10$, R 定义为每个循环期间施加的最小和最大负载之比。当位移突然增加(断裂)或者试样的循环次数达到 10^7 次时,停止试验。循环加载的最大应力 σ_{max} (对应于施加

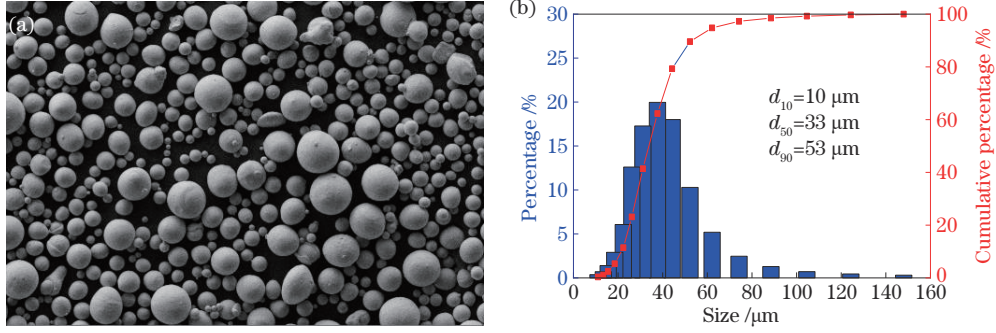


图 2 NiTi 合金粉末。(a)显微图像;(b)粒径分布
Fig. 2 NiTi alloy powder. (a) Microscopic image; (b) particle size distribution

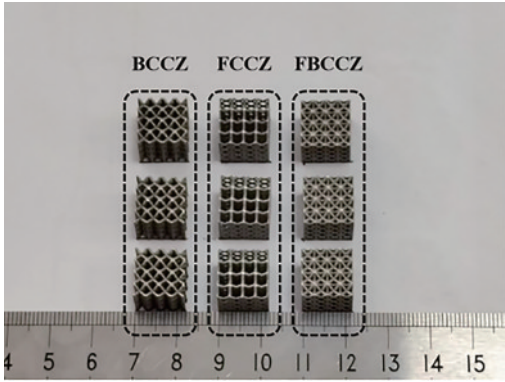


图 3 NiTi 合金点阵结构
Fig. 3 NiTi alloy lattice structure

的失效循环次数)被定义为疲劳强度。疲劳试验选择的最大应力值基于压缩测试得到的屈服应力的固定百分比(20%~90%)。绘制整体最大施加应力作为失效循环次数的函数,构建了S-N曲线(每种试样取5个应力值)。

通过FF85 CT微焦点X射线计算机断层扫描将三种结构的理论模型和实际模型进行对比,检测其内部的孔洞缺陷。使用德国ZEISS Sigma 300型扫描电子显微镜对疲劳失效后的结构进行断口形貌表征,研究微观缺陷对疲劳性能的影响。

2.4 有限元分析

采用有限元方法分析三种结构模型分别在相同压缩载荷下的应力分布和支柱弯曲情况。利用Abaqus CAE软件进行有限元仿真,假设成型后的实际模型与CAD模型相同,将CAD模型导入到软件中。根据先前的研究,SLM NiTi拉伸试样的静态拉伸应力应变曲线如图4(a)^[24]所示,由于存在复杂的相变过程,拉伸曲线依次发生NiTi初始弹性变形、马氏体相变及再取向、马氏体的弹性变形、马氏体的塑性屈服等过程,拉伸试验采用引伸计并在室温环境下进行。仿真试验目的是对比三种结构的应力集中和支柱弯曲情况(结构优劣),因此为了简化仿真试验,采用金属材料通用的弹塑性模型,将拉伸应变曲线第I阶段中的马氏体相变初始点假设为材料塑性变形起始点,I之后的II和III阶段均为塑性变形。材料属性设置:杨氏模量为36.0 GPa,泊松比为0.33,屈服强度为163.5 MPa^[24]。采用四面体三维实体单元对网格模型进行网格划分,网格单元的近似全局尺寸设置为0.15,共有10万个单元。模型边界条件如图4(b)所示,点阵模型上下端面分别连接两刚性板(通用接触),模型底面刚性板设置完全约束,顶面刚性板设置向下的应力(15 MPa和30 MPa),由于具有对称性,采用1/4模型并对模型的XoZ面及YoZ面设置对称约束。

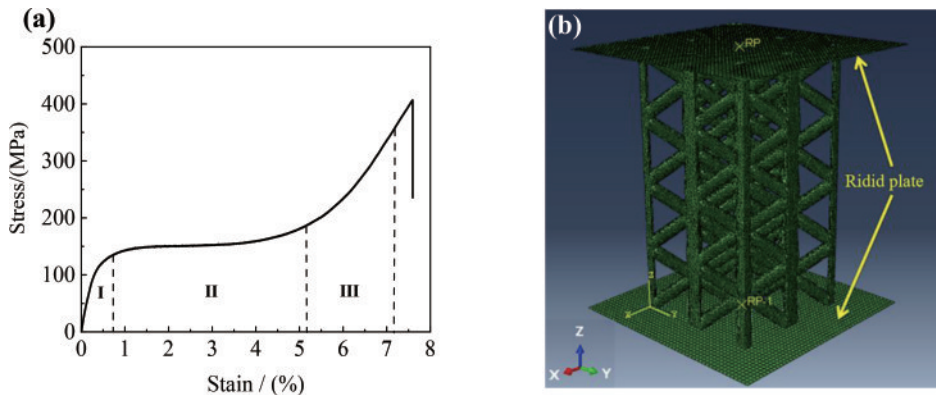


图 4 仿真采用的材料属性及边界条件^[24]。(a)SLM NiTi材料的拉伸数据;(b)边界条件
Fig. 4 Material properties and boundary condition used in simulation^[24]. (a) Tensile data for SLM NiTi material; (b) boundary conditions

3 结 果

3.1 压缩性能

图 5(a)为 BCCZ、FCCZ 和 FBCCZ 三种结构的压缩应力-应变曲线,可以观察到三种结构的压缩性能具有较大差异。对于 NiTi 合金点阵结构,由于存在特殊的相变,其在压缩过程中依次主要发生初始弹性变形、马氏体相变及再取向、马氏体的弹性变形、马氏体的塑性屈服,以及最后的断裂失效。如图 5(a)所示, BCCZ、FCCZ 和 FBCCZ 结构的压缩曲线在 2.5% 应变附近处发生马氏体相变,当应变达到 7.5% 附近时出现马氏体塑性滑移现象,此时结构发生屈服现象。值得注意的是,由于 FBCCZ 结构的体积分数较大,根

据 Ashby^[25]理论,其在出现结构屈服之后应力随应变增加而增长较多。BCCZ、FCCZ 和 FBCCZ 三种结构发生坍塌(超过平台区或者峰值应力约 1%~2% 的应变)时的应变分别为 18%、14%、22%,其中,FBCCZ 结构发生坍塌失效前的可压缩应变最大, BCCZ 结构次之, FCCZ 结构最差。由于疲劳试验的应力选取是基于马氏体塑性滑移导致的结构屈服现象,因此统计了三种结构的马氏体屈服强度(结构屈服)和马氏体的弹性模量。如图 5(b)所示:FBCCZ 结构的屈服强度和弹性模量最大(分别为 65 MPa 和 8.9 GPa); FCCZ 结构的屈服强度和弹性模量次之(分别为 46 MPa 和 8.0 GPa); BCCZ 结构的屈服强度和弹性模量最小(分别为 41 MPa 和 7.0 GPa)。

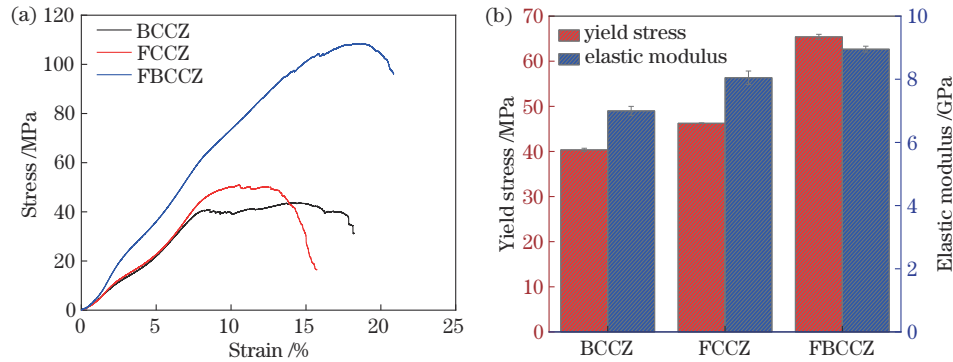


图 5 BCCZ、FBCCZ、FCCZ 结构的压缩试验结果。(a)应力应变曲线; (b)屈服应力和弹性模量

Fig. 5 Compression test results of BCCZ, FBCCZ, and FCCZ structures. (a) Stress-strain curves; (b) yield stress and elastic modulus

3.2 疲劳性能

三种点阵结构在相同应力水平下的疲劳寿命曲线如图 6 所示。可以观察到,三种点阵结构在相同应力水平下的绝对疲劳寿命具有明显的差异,其中, FBCCZ 结构的疲劳性能明显优于另外两种结构,当循环加载的最大应力为 25 MPa 时,疲劳寿命大于 10^7 次。此外,在循环加载应力较大时, FCCZ 结构的疲劳寿命优于 BCCZ 结构。值得注意的是,随着循环加载应力的减小, BCCZ 和 FCCZ 两种结构的疲劳寿命逐渐接近,当循环加载应力减小到 15 MPa 附近时, FCCZ 和 BCCZ 结构的疲劳寿命均可达到 10^7 次。研究表明,体

积分数是影响疲劳性能的因素之一,为了更好地比较单元构型对疲劳性能的影响,将三种结构的疲劳强度相对于结构屈服强度进行归一化处理^[18,21-22,26] [图 6(b)],以消除体积分数的影响。相较于图 6(a),经归一化处理后三种结构之间的疲劳寿命曲线差异减小[图 6(b)]。但仍呈现出与绝对疲劳寿命曲线类似的趋势:当应力比相同时, FBCCZ 结构的疲劳寿命最优, BCCZ 结构和 FCCZ 结构的归一化疲劳寿命较为接近;当应力比大于 0.5(应力比较大)时, FCCZ 结构优于 BCCZ 结构;当应力比小于 0.5(应力比较小)时, BCCZ 结构优于 FCCZ 结构。

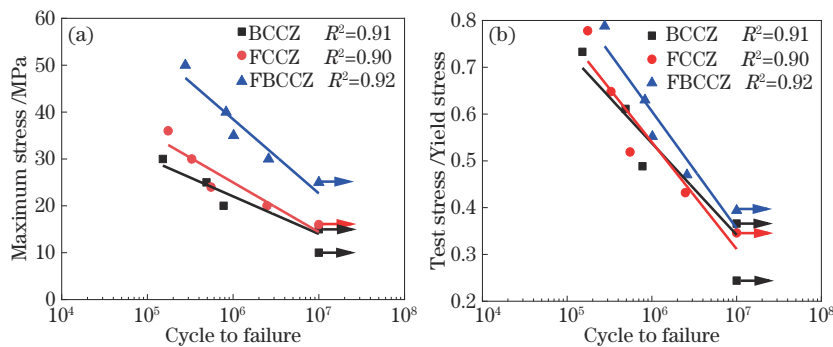


图 6 BCCZ、FBCCZ、FCCZ 结构的疲劳试验结果。(a)绝对疲劳寿命曲线; (b)归一化疲劳寿命曲线

Fig. 6 Fatigue test results of BCCZ, FBCCZ, and FCCZ structures. (a) Absolute fatigue life curves; (b) normalized fatigue life curves

3.3 疲劳断裂形式

图 7 为 BCCZ、FCCZ 和 FBCCZ 结构的疲劳断裂形貌,其中,同种结构在不同应力下的失效形式相同,而不同结构的疲劳失效形式不完全相同。从图 7 可以发现:BCCZ 结构的失效沿 45°断裂(直线)并且伴随有

局部断裂;FBCCZ 和 FCCZ 结构失效则没有完全断裂,同时在边缘区域的支柱存在不同程度的局部断裂(圆线区域)。与 FCCZ 结构不同,FBCCZ 结构表现出 45°断裂的趋势。值得注意的是,三种结构的断裂区域主要集中在支柱节点附近(箭头处)。

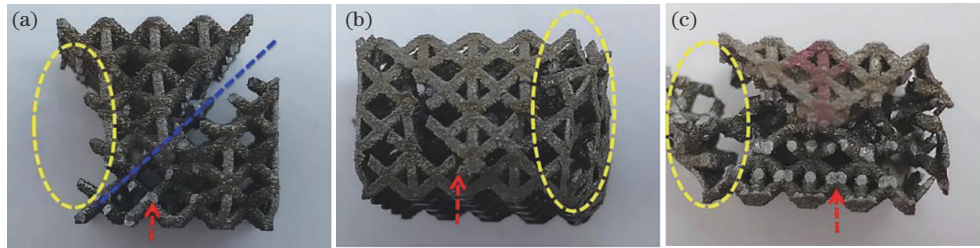


图 7 三种结构疲劳失效后的形貌。(a)BCCZ;(b) FCCZ;(c) FBCCZ

Fig. 7 Morphologies of three structures after fatigue failure. (a) BCCZ; (b) FCCZ; (c) FBCCZ

图 8 为疲劳失效后三种结构的 SEM 图,可以观察到三种结构的支柱表面比较粗糙,并且附着未融化的

粉末颗粒。此外发现,疲劳裂纹主要出现在支柱的节点处,这与图 7 中观察到的现象一致:支柱节点处优先

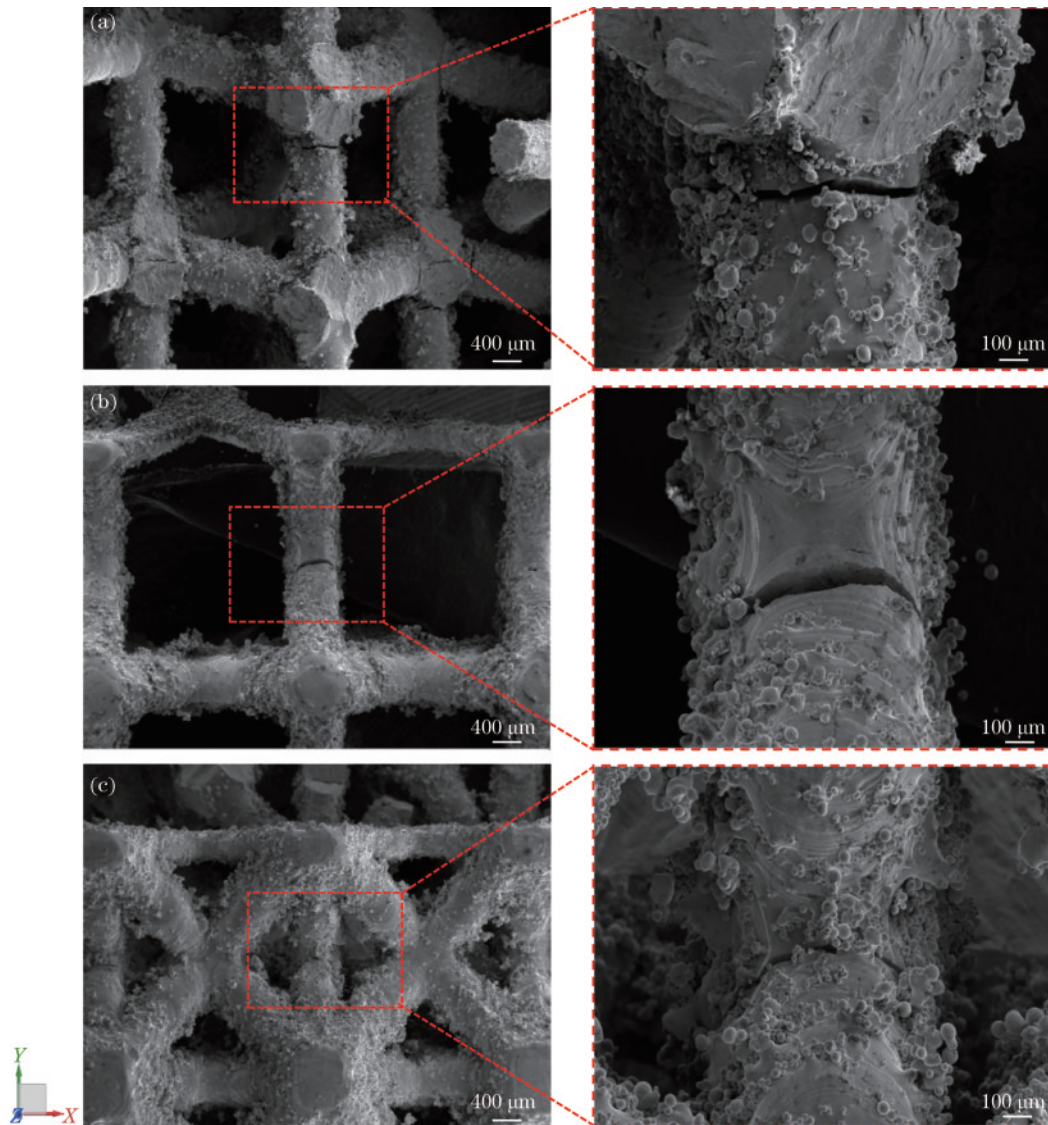


图 8 三种结构疲劳失效后在支柱节点处产生的裂纹。(a)BCCZ;(b) FCCZ;(c) FBCCZ

Fig. 8 Cracks generated at the pillar nodes after fatigue failure of three structures. (a) BCCZ; (b) FCCZ; (c) FBCCZ

发生疲劳断裂。

3.4 微观缺陷检测

三种结构内部的孔洞分布情况及孔洞形貌如图 9 所示。从图 9 可以观察到:选区激光熔化制备的 NiTi 点阵结构内部存在许多孔洞缺陷并且无规则地分布在试样的各个位置;大多数的孔洞缺陷形状呈球形且孔洞直径较小,存在少量直径较大的孔洞缺陷和极少数形状不规则的孔洞缺陷。

为了对比三种结构内部孔洞缺陷的差异,对孔洞缺陷的直径分布进行统计,统计结果如图 10(a)所示。可以看出,孔洞缺陷的直径主要位于 60~180 μm 之间,结构内部也存在部分直径较大的孔洞缺陷(图 9)。此外将孔洞缺陷的总体积除以结构的理论体积,得到三种结构内部的孔洞缺陷体积分数[图 10(b)],FCCZ 最大(1.7%),BCCZ 次之(1.2%),FBCCZ 最小(0.5%)。

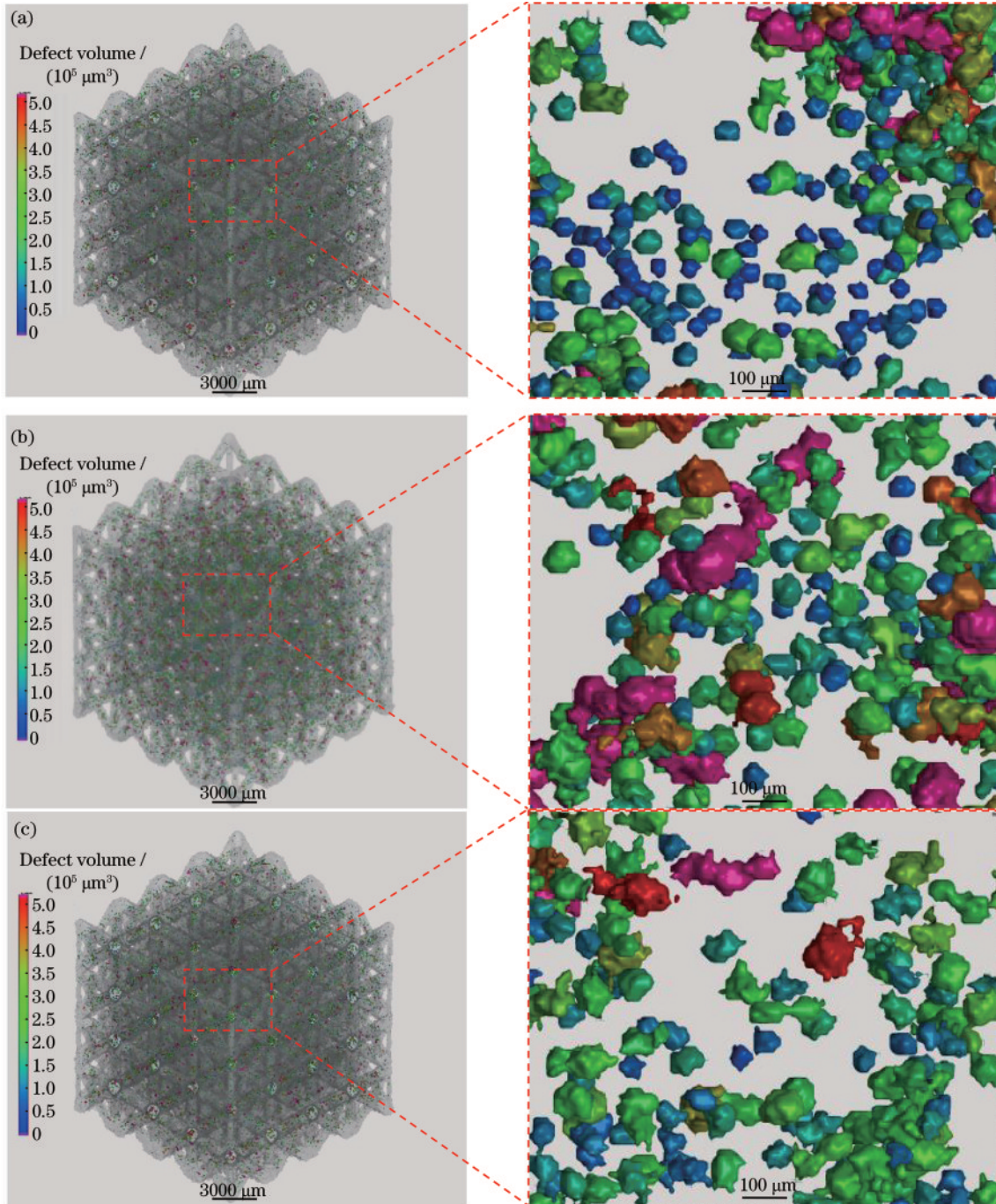


图 9 孔洞分布和孔洞形貌。(a)BCCZ;(b) FCCZ;(c) FBCCZ
 Fig. 9 Pore distribution and pore morphology. (a) BCCZ; (b) FCCZ; (c) FBCCZ

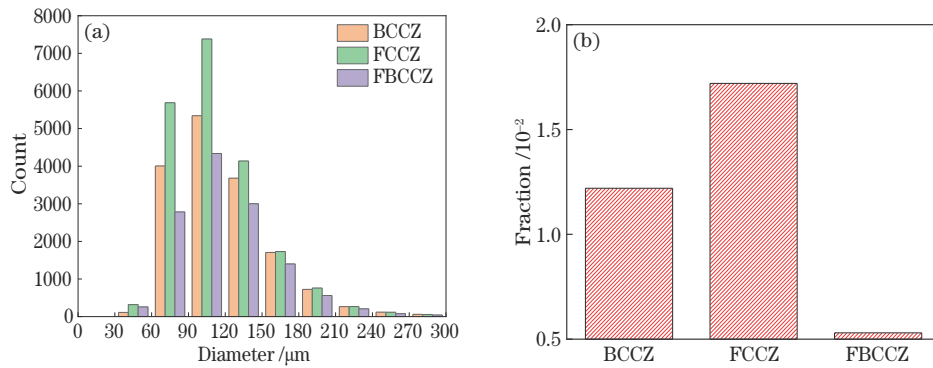


图 10 孔洞缺陷统计。(a)孔洞缺陷直径分布;(b)孔洞缺陷体积分数

Fig. 10 Statistics of hole defects. (a) Diameter distribution of hole defects; (b) volume fraction of hole defects

4 讨 论

4.1 单胞结构类型对疲劳性能的影响

研究表明:单胞结构类型是影响点阵结构疲劳性能的重要因素之一^[18-19]。单胞结构类型不同,点阵结构在相同载荷下的应力集中程度和支柱弯曲变形情况

也不同,导致点阵结构的压缩性能(图 5)和疲劳性能具有较大差异^[19,27]。有限元仿真应力分布云图如图 11 和图 12 所示,可以发现,在高应力(30 MPa)和低应力(15 MPa)下,FBCCZ 结构的应力集中程度远低于 BCCZ 和 FCCZ 结构,支柱弯曲变形不明显,具有更好的机械性能。因此,FBCCZ 的结构优势最大,当循环

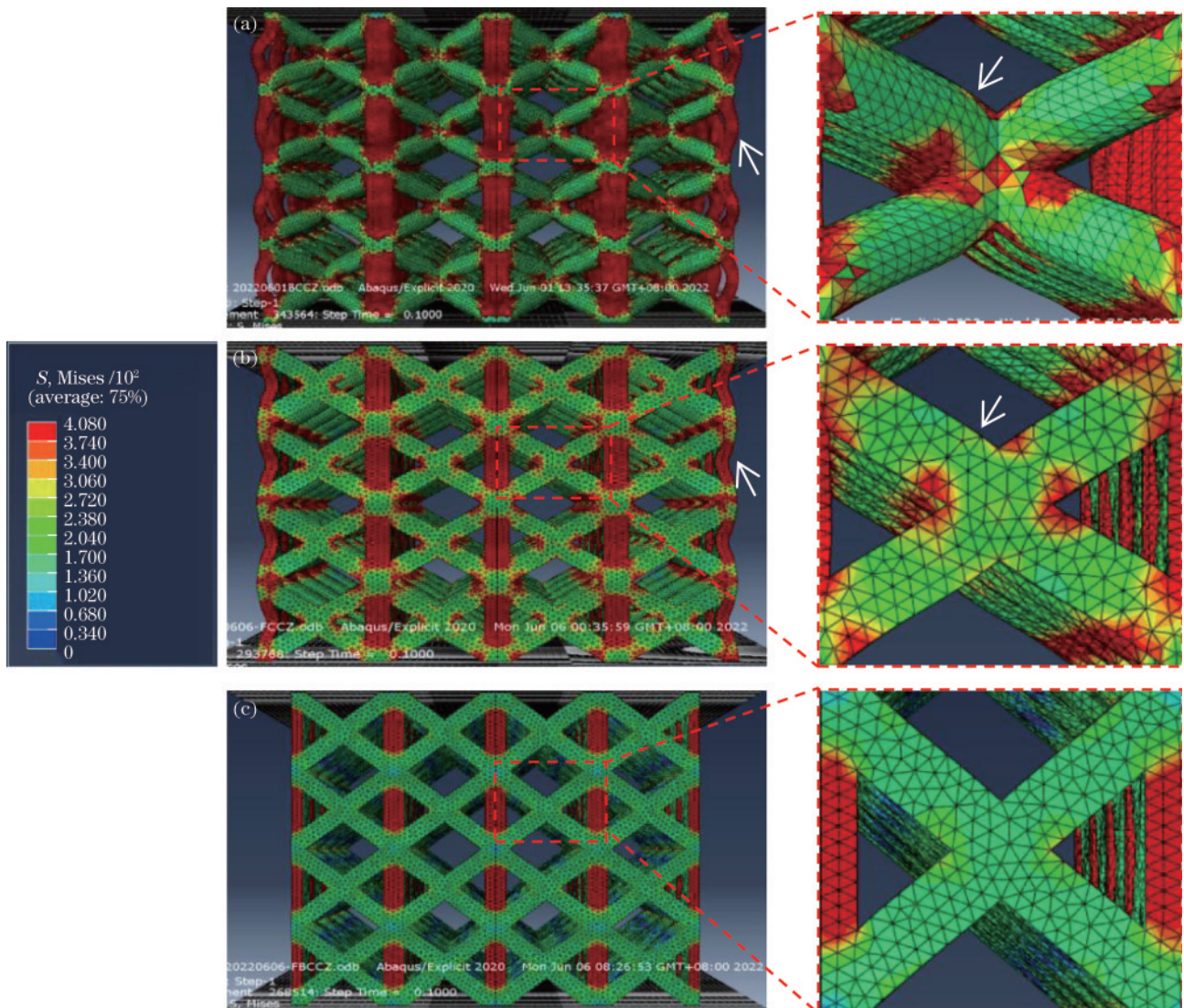


图 11 三种结构在 30 MPa 应力下的仿真结果。(a)BCCZ;(b) FCCZ;(c) FBCCZ

Fig. 11 Simulation results of three structures under 30 MPa stress. (a) BCCZ; (b) FCCZ; (c) FBCCZ

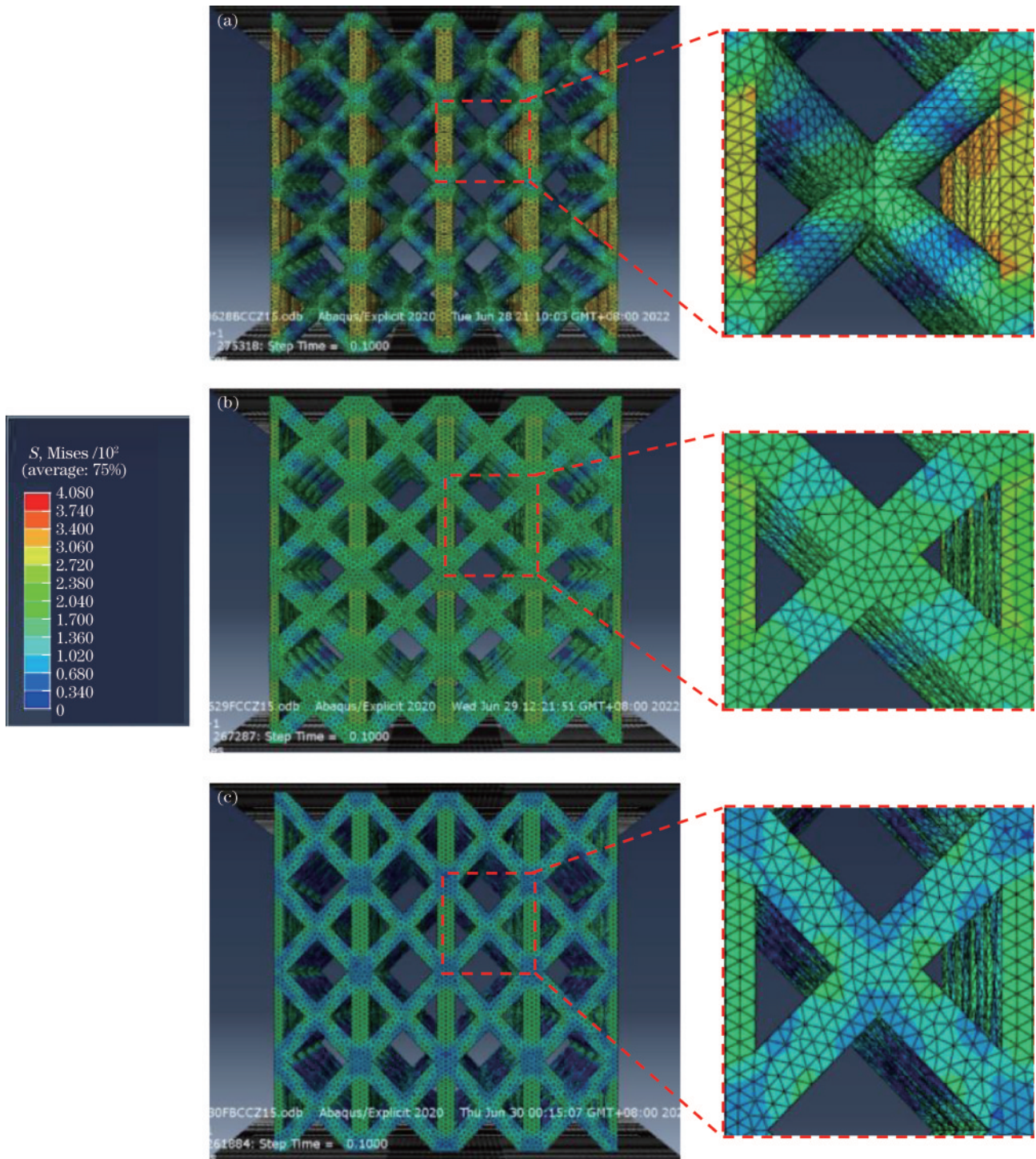


图 12 三种结构在 15 MPa 应力下的仿真结果。(a)BCCZ;(b) FCCZ;(c) FBCCZ

Fig. 12 Simulation results of three structures under 15 MPa stress. (a) BCCZ; (b) FCCZ ; (c) FBCCZ

加载应力相同且经受相同循环次数时,FBCCZ 结构节点处的应力集中程度最小,应力诱发疲劳裂纹的可能性最小。同时,FBCCZ 结构支柱因弯曲变形积累的不可逆塑性变形最少,损伤最小,发生疲劳失效的可能性最小,疲劳性能最优(图 6)。如图 11 所示,在 30 MPa (高应力)下,BCCZ 和 FCCZ 结构的支柱均发生明显的弯曲变形,支柱的弯曲变形会积累更多塑性应变,进而加速了疲劳裂纹的扩展,严重降低疲劳寿命。同时,

由于节点处存在锐利的拐角及较大的应力集中,节点位置作为疲劳裂纹萌生的应力集中器,应力集中程度越大,越容易诱发疲劳裂纹的萌生,因此在最大应力为 30 MPa 的循环加载条件下,BCCZ 和 FCCZ 结构疲劳寿命更短。与 FCCZ 结构相比,30 MPa 压力下 BCCZ 结构支柱的弯曲程度和应力集中程度更大(箭头),经受相同循环次数,BCCZ 结构更容易发生疲劳失效,疲劳性能较差(图 6)。随着循环加载应力的减小,BCCZ

和 FCCZ 两种结构的绝对疲劳寿命逐渐接近,并且最大循环加载应力在 15 MPa 附近时,两种结构的疲劳寿命均达到 10^7 (图 6),此时 FCCZ 结构应力集中程度较小的结构优势没有体现(图 12 所示 FCCZ 应力集中程度较小),单胞结构无法解释此现象(具体将在 4.2 节中展开说明)。

点阵结构疲劳失效后的断裂形式也受单胞结构的影响。研究表明,点阵结构在受载时节点处容易产生应力集中,相同循环加载情况下更容易首先发生疲劳断裂^[21]。如图 11 和图 12 所示,相同应力下,三种结构的应力主要集中在支柱节点和垂直支柱处,三种结构受循环应力作用一定次数后,支柱的节点更容易发生疲劳断裂(图 7 和图 8)。

4.2 孔洞缺陷对疲劳性能的影响

以上对试样结构的分析解释了循环加载应力较高时,结构变形对疲劳性能的影响,然而循环加载应力较低时,FCCZ 与 BCCZ 结构疲劳寿命曲线相近的原因仍然不清晰。已有研究表明,微观缺陷是疲劳性能的影响因素之一,特别是低应力作用下,微观缺陷诱发疲劳裂纹的萌生,疲劳裂纹的萌生是降低零件低应力下疲劳性能的主要因素^[19]。

本文三种结构的支柱直径一致,消除了因支柱直径不同导致的表面几何偏差不一致^[28],因此,主要考虑内部孔洞缺陷不一致引起的疲劳性能差异。Zhao 等^[29]研究发现,实体试样中的孔洞缺陷周围容易产生疲劳裂纹,当孔洞缺陷体积分数达到 1% 时,孔洞缺陷

促进疲劳裂纹的萌生,严重降低疲劳性能。Gong 等^[27]研究发现,疲劳裂纹主要起源于点阵结构支柱表面节点和缺口附近未熔化的粉末周围,但仍有一些疲劳裂纹起源于内部孔洞缺陷。图 10 统计了三种试样内部孔洞缺陷的直径分布和体积分数(孔洞缺陷的体积分数是通过孔洞缺陷的体积除以试样的理论体积得到的),可以发现,孔洞缺陷的直径分布情况相似,但孔洞缺陷的体积分数具有较大差异。FCCZ 结构的孔洞缺陷体积分数最大(1.7%),BCCZ 次之(1.2%),FBCCZ 最小(0.5%)。孔洞缺陷体积分数的较大差异可能严重影响了低应力下的疲劳性能,FBCCZ 结构的孔洞缺陷体积分数最小,减少疲劳裂纹的萌生,疲劳性能最优。相对于 BCCZ 结构,FCCZ 的结构优势更大,但 FCCZ 结构的孔洞缺陷体积分数最大,促进疲劳裂纹的萌生,导致 FCCZ 结构在低应力下的疲劳性能降低,BCCZ 和 FCCZ 结构的疲劳寿命相近,FCCZ 的结构优势未体现出来。

为了进一步研究孔洞缺陷对疲劳性能的影响,通过扫描电子显微镜拍摄三种试样在低应力幅下失效的断口形貌(图 13),可以发现,BCCZ 和 FBCCZ 试样在低应力下的疲劳裂纹主要起源于支柱表面,内部的孔洞缺陷没有促进裂纹的萌生。而 FCCZ 结构在低应力下的疲劳裂纹起源于支柱表面和次表面的孔洞缺陷,表面缺陷和孔洞缺陷同时作用于 FCCZ 试样,加速了 FCCZ 试样在低应力载荷下疲劳裂纹的萌生,因此 FCCZ 试样疲劳性能降低,结构优势没有明显体现出来。

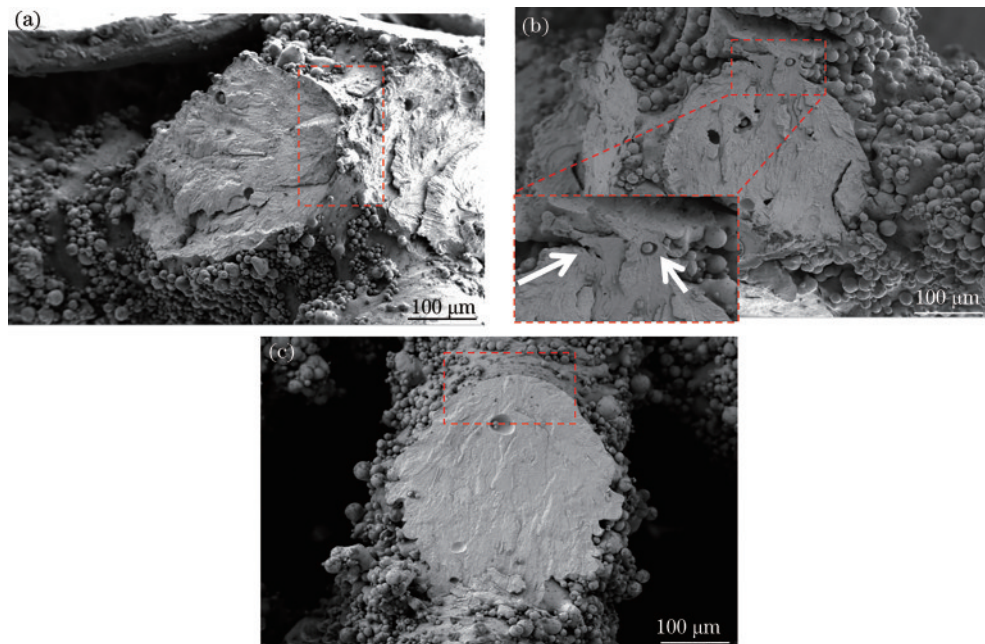


图 13 低应力下疲劳失效后的断口 SEM 分析。(a)BCCZ;(b)FCCZ;(c)FBCCZ

Fig. 13 SEM of fracture after fatigue failure under low stress. (a) BCCZ; (b) FCCZ; (c) FBCCZ

FBCCZ 结构中的孔洞体积分数最小,结构性能最好,因此疲劳性能最优。相对于 BCCZ 结构,FCCZ 结构更具结构优势,但 FCCZ 结构中的孔洞缺陷体积

数较大,低应力加载条件下更容易诱发疲劳裂纹的萌生,导致 FCCZ 结构疲劳性能降低,是低应力下 BCCZ 结构和 FCCZ 结构疲劳寿命曲线相近的主要原因。

5 结 论

本文通过选区激光熔化技术制备了三种典型的 NiTi 合金高刚度点阵结构,通过循环压缩疲劳试验发现:

1) 疲劳试验得到三种试样的疲劳寿命曲线, FBCCZ 试样的绝对疲劳寿命最优,加载应力为 25 MPa 时疲劳寿命达到 10^7 次, BCCZ 试样和 FCCZ 试样的疲劳性能较差,在加载应力为 15 MPa 时疲劳寿命达到 10^7 次,疲劳失效断裂的位置均位于支柱节点附近。

2) 单胞结构类型是影响点阵试样高应力下疲劳性能的重要因素,当循环加载应力较大时,试样的变形程度和应力集中程度越小,疲劳性能越好。

3) 试样内部的孔洞缺陷也是影响疲劳性能的重要因素,在低应力幅作用下,试样的变形较小,结构对疲劳性能的影响减弱,孔洞缺陷对疲劳性能的影响增强,通过诱发疲劳裂纹的萌生降低试样在低应力下的疲劳性能。

参 考 文 献

- [1] Bansiddhi A, Sargeant T D, Stupp S I, et al. Porous NiTi for bone implants: a review[J]. *Acta Biomaterialia*, 2008, 4(4): 773-782.
- [2] Pfeifer R, Müller C W, Hurschler C, et al. Adaptable orthopedic shape memory implants[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 5: 253-258.
- [3] Elahinia M H, Hashemi M, Tabesh M, et al. Manufacturing and processing of NiTi implants: a review [J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(5): 911-946.
- [4] Yan L N, Liu Y. Effect of temperature on the wear behavior of NiTi shape memory alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 2015, 30(2): 186-196.
- [5] Yan W Y. Theoretical investigation of wear-resistance mechanism of superelastic shape memory alloy NiTi[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 427(1/2): 348-355.
- [6] Dadbakhsh S, Speirs M, Kruth J P, et al. Effect of SLM parameters on transformation temperatures of shape memory nickel titanium parts[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16(9): 1140-1146.
- [7] Jani J M, Leary M, Subic A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, 56: 1078-1113.
- [8] Hartl D J, Lagoudas D C. Aerospace applications of shape memory alloys[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2007, 221(4): 535-552.
- [9] Moghaddam N S, Elahinia M, Miller M, et al. Enhancement of bone implants by substituting nitinol for titanium (Ti-6Al-4V): a modeling comparison[C]// *Proceedings of ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, September 8-10, 2014, Newport, Rhode Island, USA. New York: ASME Press, 2014.
- [10] Haberland C, Elahinia M, Walker J, et al. Visions, concepts and strategies for smart nitinol actuators and complex nitinol structures produced by additive manufacturing[C]// *Proceedings of ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, September 16-18, 2013, Snowbird, Utah, USA. New York: ASME Press, 2014.
- [11] 胡泽华, 宋长辉, 刘林青, 等. 镍钛合金激光选区熔化成形技术研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1202005.
Hu Z H, Song C H, Liu L Q, et al. Research progress of selective laser melting of nitinol[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1202005.
- [12] Plotino G, Grande N M, Cordaro M, et al. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments [J]. *Journal of Endodontics*, 2009, 35(11): 1469-1476.
- [13] Eggeler G, Hornbogen E, Yawny A, et al. Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 378(1/2): 24-33.
- [14] Wagner M, Sawaguchi T, Kausträter G, et al. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 378(1/2): 105-109.
- [15] Lin C K, Wang Z Q, Yang X, et al. Experimental study on temperature effects on NiTi shape memory alloys under fatigue loading[J]. *Materials*, 2020, 13(3): 573.
- [16] Mahtabi M J, Shamsaei N, Mitchell M R. Fatigue of nitinol: the state-of-the-art and ongoing challenges[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2015, 50: 228-254.
- [17] Yin H, He Y, Moumni Z, et al. Effects of grain size on tensile fatigue life of nanostructured NiTi shape memory alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 88: 166-177.
- [18] Yavari S A, Ahmadi S M, Wauthle R, et al. Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2015, 43: 91-100.
- [19] Benedetti M, Du Plessis A, Ritchie R O, et al. Architected cellular materials: a review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication[J]. *Materials Science and Engineering*, 2021, 144: 100606.
- [20] Bayati P, Jahadakbar A, Barati M, et al. Toward low and high cycle fatigue behavior of SLM-fabricated NiTi: considering the effect of build orientation and employing a self-heating approach[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 185: 105878.
- [21] Speirs M, van Hooreweder B, van Humbeeck J, et al. Fatigue behaviour of NiTi shape memory alloy scaffolds produced by SLM, a unit cell design comparison[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 70: 53-59.

- [22] Chen W L, Yang Q, Huang S K, et al. Compression behavior of graded NiTi gyroid-structures fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing under monotonic and cyclic loading[J]. *JOM*, 2021, 73(12): 4154-4165.
- [23] Leary M, Mazur M, Elambasseril J, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures[J]. *Materials & Design*, 2016, 98: 344-357.
- [24] 向政, 沈显峰, 杨琴, 等. SLM NiTi 记忆合金负刚度结构的能量吸收与形状恢复[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(21): 316-324.
Xiang Z, Shen X F, Yang Q, et al. Energy absorption and shape recovery of NiTi shape memory alloy negative stiffness structure fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(21): 316-324.
- [25] Ashby M F. The properties of foams and lattices[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2006, 364(1838): 15-30.
- [26] Yáñez A, Fiorucci M P, Cuadrado A, et al. Surface roughness effects on the fatigue behaviour of gyroid cellular structures obtained by additive manufacturing[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 138: 105702.
- [27] Gong H J, Rafi K, Gu H, et al. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 545-554.
- [28] Yang Q, Sun K H, Yang C, et al. Compression and superelasticity behaviors of NiTi porous structures with tiny strut fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 858: 157674.
- [29] Zhao S, Li S J, Hou W T, et al. The influence of cell morphology on the compressive fatigue behavior of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 59: 251-264.