

# SLM 制备 CuSn10 合金断裂机理的原位微 CT 研究

金文中<sup>1, 2</sup>, 曹永青<sup>1, 2</sup>, 左寒松<sup>1</sup>

(1. 洛阳理工学院 河南省绿色建筑材料制造与智能装备重点实验室, 河南洛阳 471023;

2. 河南省特种防护材料重点实验室, 河南洛阳 471000)

**摘要:** 采用激光选区熔化 (SLM) 增材制造技术制备 CuSn10合金试样, 使用微CT原位4D力学平台进行室温原位拉伸试验, 并采用扫描电镜观察拉伸试样断口的微观形貌, 对SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸试样的断裂机理进行了研究。结果表明: 在拉伸试样中观测到球形气孔和形状不规则的月牙状气孔, 在室温原位拉伸过程中, 拉伸试样内部的孔隙被拉伸变长, 孔隙率逐渐增大。裂纹是从拉伸试样一侧表面缺口底部萌生然后扩展到整个横向断面, 断裂方式属于宏观脆性微孔型断裂, 断口呈现出起伏不平的三维形貌结构。

**关键词:** CuSn10合金; 激光选区熔化; 微CT; 室温原位拉伸

CuSn10合金具有优异的耐蚀性和耐磨性, 大量应用于轴承和交通运输等领域<sup>[1]</sup>。随着社会经济的快速发展, 具有复杂结构CuSn10合金结构件的需求与日俱增, 而铸造和锻造等常规方法在成形CuSn10合金复杂结构件时的高难度制约了该材料的应用<sup>[2]</sup>。激光选区熔化 (SLM) 增材制造技术是一种利用高能激光对金属粉末进行熔化来制备致密复杂结构件的先进制造技术, 在制备复杂结构件方面具有较大的技术优势<sup>[3]</sup>。因此, CuSn10合金复杂结构件难以成形的问题可以通过SLM技术得到解决。张晓雅等利用水雾化法制备的CuSn10合金粉末进行SLM试验, 获得力学性能较好的CuSn10合金<sup>[2]</sup>。刘斌等利用 SLM 制备出致密度 99.8%的CuSn10合金, 并研究了热处理对 CuSn10合金性能的有利影响<sup>[4]</sup>。Zeng Congyuan等利用SLM和真空退火热处理制备出力学性能、热性能和耐蚀性能优异的CuSn10合金<sup>[5]</sup>。

微CT (micro-CT) 是一种空间分辨率高达微米级的X射线3D无损成像技术, 在SLM制备金属材料的研究中已经获得应用<sup>[6-7]</sup>, 但该技术目前对SLM成形CuSn10合金的研究未见报道。本课题采用SLM技术制备 CuSn10合金试样, 然后使用蔡司3D X射线显微镜结合原位4D力学平台对其进行了原位拉伸试验, 同时采用蔡司扫描电镜观察拉伸试样断口的微观形貌, 对SLM制备CuSn10合金的断裂机理进行原位微CT研究, 以期后续研究提供参考。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 成形材料及工艺

试验所使用的粉末为亚洲新材料 (北京) 有限公司通过真空气雾化制备的CuSn10粉末, 粉末粒径分布范围为15~53  $\mu\text{m}$ 。

试验设备为上海汉邦联航激光科技有限公司HBD-150型SLM系统。CuSn10合金SLM工艺参数如表1所示。

SLM制备CuSn10合金试样见图1 (a), 试样尺寸为: 30 mm  $\times$  20 mm  $\times$  3.3 mm, 其中高度方向为SLM成型堆积方向。由于选用的微CT系统的X射线可穿透合金材料

#### 作者简介:

金文中 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为铜合金及3D打印成形。电话: 0379-65928196, E-mail: wenzhong\_jin0872@sina.com

中图分类号: TG166.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

09-1251-05

#### 基金项目:

河南省高等学校重点科研项目 (18A430019)。

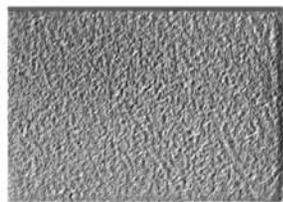
#### 收稿日期:

2024-11-29 收到初稿,

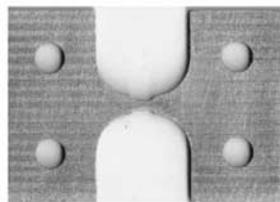
2025-02-07 收到修订稿。

表1 CuSn10合金SLM工艺参数  
Tab. 1 SLM process parameters of CuSn10 alloy

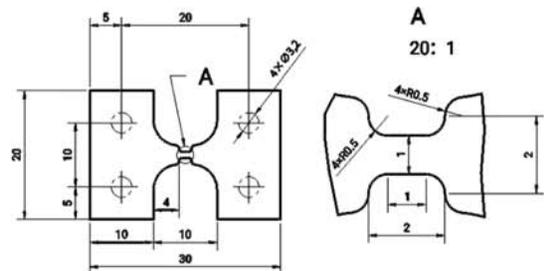
工艺参数	值
激光功率/W	180
扫描速度/mm · s <sup>-1</sup>	200
层厚/ $\mu\text{m}$	30
扫描间距/mm	0.1
基板预热温度/ $^{\circ}\text{C}$	200



(a) 合金试样



(b) 原位拉伸试样



(c) 工程图

图1 SLM制备CuSn10合金试样、原位拉伸试样及其工程图

Fig. 1 SLM CuSn10 alloy sample, in-situ tensile sample and their engineering drawing

位微CT拉伸试验。微CT扫描参数见表2所示，数据处理采用Dragonfly Pro高级3D可视化与分析软件。原位微CT拉伸实验结束后，使用蔡司EVO10型扫描电子显微镜对断口进行微观形貌观察分析。

表2 微CT扫描参数  
Tab. 2 Scan parameters of micro-CT

扫描参数	值
物镜倍数	4 ×
体素/ $\mu\text{m}$	3.0
视场范围/mm	$\phi 3.0 \times 3.0$
X射线源电压/kV	150
X射线源输出功率/W	10
扫描时间/h	3.0

## 2 结果与讨论

### 2.1 SLM 制备 CuSn10 合金室温原位拉伸力学性能

SLM制备CuSn10合金室温原位微CT拉伸力-位移曲线如图2所示，该曲线没有明显的屈服点，其中 $ab$ 是弹性变形阶段， $bc$ 是均匀塑性变形阶段， $cd$ 是不均匀集中塑性变形阶段。该曲线与常规室温力学拉伸曲线相比存在一些锯齿状波动，这是因为在原位拉伸过程中进行微CT扫描采集数据时候需要暂停拉伸，此时位移保持不变而应力则有所下降，在原位拉伸继续进行时应力就会恢复正常，这是原位拉伸过程中保持位移不变下的应力松弛现象<sup>[8]</sup>。

通过图1(c)标距段截面积(1.0 mm<sup>2</sup>)和长度

的最大尺寸约为1 mm，因此采用慢走丝的线切割将SLM试样进一步加工为厚度1 mm薄片试样进行后续的原位微CT拉伸实验，原位拉伸试样及其工程图纸如图1(b)和图1(c)所示。

### 1.2 试验方法

使用蔡司Xradia 515 Versa 3D X射线显微镜，结合其原位4D力学平台对SLM制备CuSn10合金试样进行原

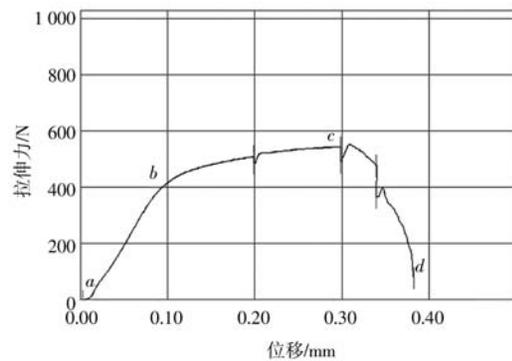


图2 CuSn10合金原位微CT拉伸力-位移曲线

Fig. 2 CuSn10 alloy in-situ micro CT tensile force-displacement curve

(1.0 mm)，计算出 SLM制备CuSn10合金的抗拉强度541 MPa、伸长率38.3%。

### 2.2 SLM 制备 CuSn10 合金室温原位拉伸的断裂机理

图3为使用Dragonfly软件对SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸试样中感兴趣区域(region of interesting, ROI)数据重构后的二维微CT切片图。

图3(a)和(b)分别是加载10 N拉力、样品相对位移0时XY、XZ方向ROI二维微CT切片图。从图3(a)观测到少量尺寸在3~30  $\mu\text{m}$ 、随机分布的球形气孔。从图3(b)观测到尺寸在148  $\mu\text{m}$ 、形状不规则的气孔。气孔是SLM制备合金中常见的体缺陷，根据气孔形貌特征将其分为球形气孔和非球形气孔，其中尺寸较大、呈月牙等不规则形状的非球

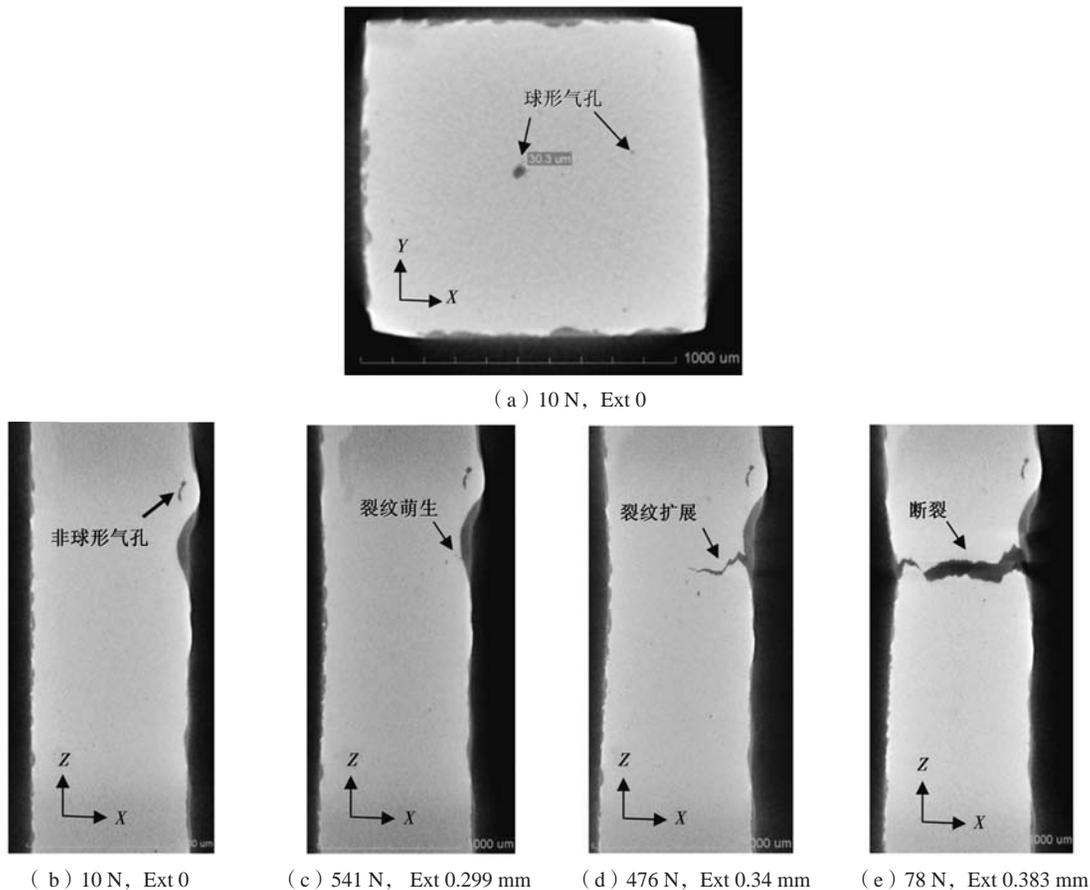


图3 SLM制备CuSn10合金原位拉伸试样二维微CT切片

Fig. 3 Two-dimensional micro-CT slices in SLM CuSn10 alloy in-situ tensile sample

形气孔往往是造成构件过早断裂失效的裂纹优先萌生区，球形气孔成因主要是原始粉末中存在的气体、熔池表面卷入气体和松散球形粉末间的气体在凝固过程中没能及时溢出，非球形气孔的成因主要为粉末或沉积层间的不充分熔合<sup>[9]</sup>。

图3 (c) 是加载541 N拉力、样品相对位移0.299 mm时XZ方向ROI二维微CT切片图。从图3 (c) 可以看出，拉伸试样出现长度达到53 μm的裂纹，该裂纹是从拉伸试样表面一个边缘宽582 μm、底深9 μm的弧形缺口底部萌生并从外向内扩展。由于应力集中，拉伸试样表面缺口根部的应力最大，增加了裂纹的萌生概率和扩展速度，因此拉伸试样表面缺口根部成为承受载荷时裂纹萌生的源区<sup>[10]</sup>。拉伸试样表面的缺口是在试样线切割加工过程中产生的，由于所在位置比较狭窄，采用磨抛加工方法去除缺口比较困难。在实际工程应用中，由于结构设计问题存在很多带有缺口的工件，研究缺口件的断裂机理并提出相应防护措施具有一定的工程意义<sup>[11]</sup>。

图3 (d) 是加载476 N拉力、样品相对位移0.34 mm时XZ方向ROI二维微CT切片图。从图3 (d) 可以看出，在拉伸试样表面微缺口根部萌生的裂纹长

度从外向内进一步扩展到418 μm。

图3 (e) 是加载78 N拉力、样品相对位移0.383 mm时XZ方向ROI二维微CT切片图。从图3 (e) 可以看出，在拉伸试样表面缺口根部萌生的裂纹从外向内扩展到拉伸试样整个横向断面，拉伸试样完全断裂，断裂前具有明显的塑性变形。

图4为SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸断口SEM形貌。图4 (a) 是拉伸断口的宏观形貌，可以看出断裂源区发生在拉伸试样一侧的表面缺口处，断裂方向从左到右。图4 (b) 为拉伸断口的局部放大图，除了观察到少量气孔外，拉伸断口的微观电子形貌主要为密集分布、细小且浅的等轴型微孔，具有宏观脆性微孔型断裂的特征，其断裂的微观机制显然是微孔聚集型。但由于微孔的形成和连接时的塑性变形量很小，所以在宏观上表现为典型的脆性断裂特征<sup>[12]</sup>。

图5为利用Dragonfly软件重构得到的SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸试样中孔隙和裂纹的三维图，其中，孔隙三维结构采用紫色渲染显示，裂纹的三维结构采用红色渲染显示。从图5 (a) 至 (d) 可知，随着拉力和样品相对位移的增大，样品内部孔隙被拉伸变长，孔隙的体积逐渐增大，孔隙率也逐渐增

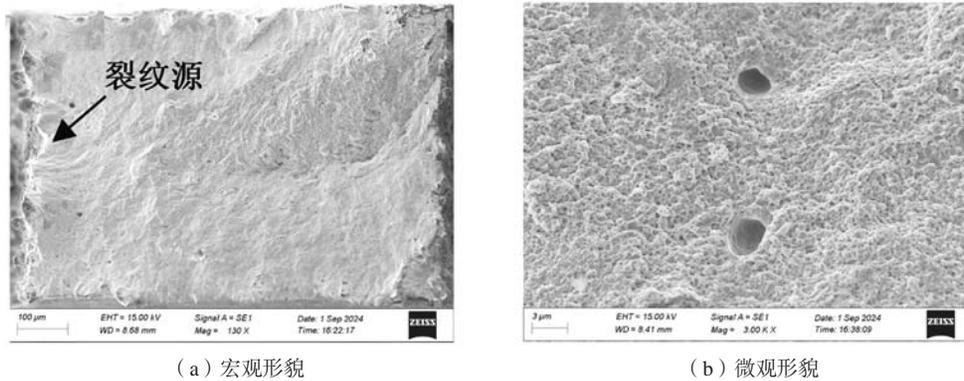


图4 SLM制备CuSn10合金原位拉伸断口形貌  
Fig. 4 Fracture morphologies of SLM-prepared CuSn10 alloy in-situ tensile sample

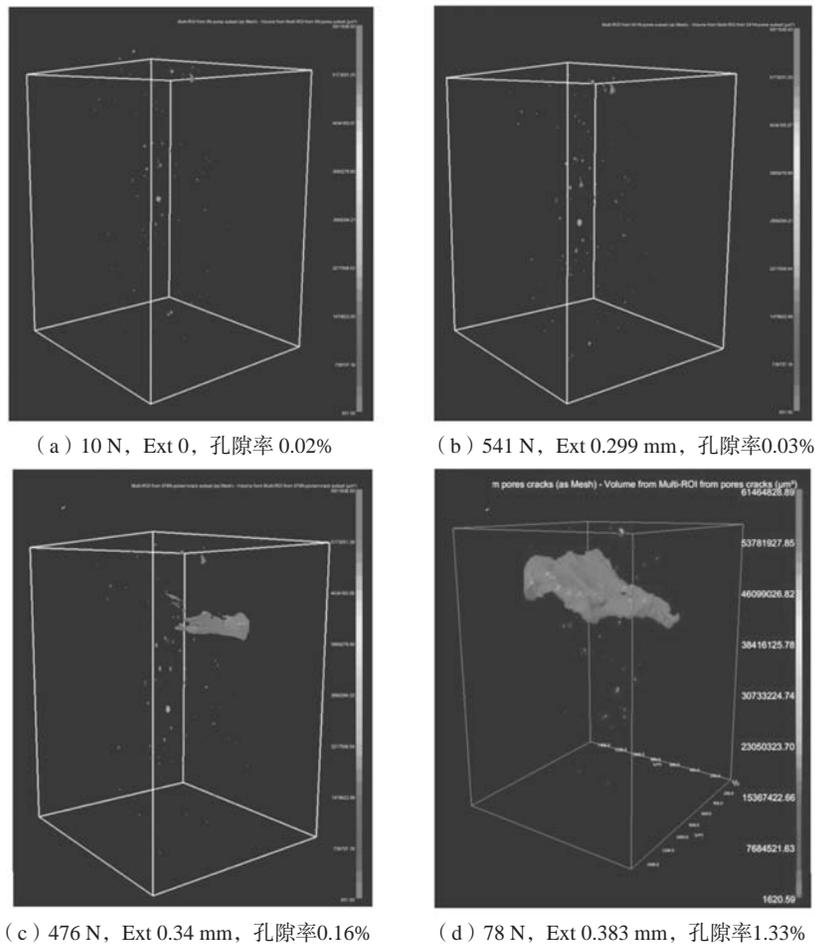


图5 SLM制备CuSn10合金原位拉伸试样中孔隙和裂纹三维分布  
Fig. 5 Three dimensional distributions of pores and cracks in SLM-prepared CuSn10 alloy in-situ tensile sample

大。裂纹是从拉伸试样的一侧表面萌生，然后扩展到整个断面，断口呈现出起伏不平的三维形貌结构。

### 2.3 SLM 制备 CuSn10 合金力学拉伸性能的改善措施

在工程上，宏观脆性微孔型断裂具有比较大的危险性，因此应该采取措施加以预防。SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸断口的断裂源区发生在拉伸试样的

表面缺口处，而且缺口处还未明显发生塑性变形扩展就开裂，说明SLM制备CuSn10合金的缺口敏感性比较大，脆化倾向大。因此，SLM制备CuSn10合金在工程应用时应该消除缺口、刮伤、较深加工刀痕等应力集中产生因素预防其断裂失效<sup>[12]</sup>。

此外，还需要提高材料的断裂韧性预防SLM制备CuSn10合金的宏观脆性微孔型断裂。脆性断裂一般采

用线弹性断裂力学进行失效分析, 线弹性断裂力学是在Griffith断裂理论基础上用弹性力学研究裂纹体的断裂问题, 提出的应力场强度因子 $K_I$ 如下式(1)所示<sup>[12]</sup>:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (1)$$

式中:  $Y$ 为裂纹体的几何因子函数;  $\sigma$ 为名义应力;  $a$ 为裂纹长度的1/2。

当 $K_I$ 达到某一临界值 $K_{IC}$ 时, 裂纹就失稳扩展而发生脆断,  $K_{IC}$ 就是断裂韧度, 由此建立的脆性断裂的安全判据如下式(2)所示<sup>[12]</sup>:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \leq K_{IC} \quad (2)$$

因此, 采取减少有害杂质的含量、球化异相质点并优化其分布状态等措施提高SLM制备CuSn10合金的 $K_{IC}$ 值, 也会有助于防止其宏观脆性微孔型断裂<sup>[12]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 刘章兴, 文科, 李永坤, 等. CuSn10P1合金晶间偏析对拉伸断裂行为的影响及变形机制 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31(8): 171-178.
- [2] 张晓雅, 李现兵, 谈震, 等. 激光选区熔化水雾化Cu-10Sn合金粉末成形件的微观组织结构及力学性能研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 125-132.
- [3] 熊孝经, 吴晓鹏, 张唯, 等. Al-Mn-Sc合金的选区激光熔化工艺优化及室温与高温力学性能研究 [J]. 铸造, 2024, 73(5): 626-631.
- [4] 刘斌, 路声宇, 李忠华, 等. CuSn10合金选区激光熔化成形及热处理工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2022(4): 121-125.
- [5] ZENG Congyuan, ZHANG Bin, ALI hemmasian ettefagh, et al. Mechanical, thermal and corrosion properties of Cu-10Sn alloy prepared by laser-powder-bed-fusion additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 1-8.
- [6] 高祥熙, 杨平华, 乔海燕, 等. 基于 $\mu$ CT表征的SLM成形GH3536高温合金缺陷特征 [J]. 材料工程, 2022, 50(10): 63-72.
- [7] 胡正伟, 甘勇, 林建辉, 等. 基于微纳CT的SLM成形铝合金缺陷与损伤表征 [J]. 无损检测, 2024, 46(4): 1-6.
- [8] 朱嘉冕, 吕国森, 姜文祥, 等. 原位拉伸研究热处理对激光选区熔化GH4169合金组织及650℃力学性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 93-103.
- [9] 王楠, 李金国, 刘纪德, 等. 选区激光熔化镍基高温合金组织及缺陷研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(1): 257-269.
- [10] 田伟, 伏宇, 钟燕, 等. 缺口对TC17钛合金拉伸性能和低周疲劳性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37(11): 68-72.
- [11] 湛理飞, 罗云蓉, 付磊, 等. 缺口件疲劳行为研究进展 [J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(5): 197-204.
- [12] 孙智, 任耀剑, 隋艳伟. 失效分析-基础与应用 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2024.

### 3 结论

(1) SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸的力-位移曲线分为弹性变形、均匀塑性变形和不均匀集中塑性变形三个阶段, 没有明显的屈服点, 抗拉强度541 MPa、伸长率38.3%。

(2) 采用微CT在SLM制备CuSn10合金室温原位拉伸试样中观测到球形气孔和形状不规则的月牙状气孔, 在室温原位拉伸过程中, 拉伸试样内部的孔隙被拉伸变长, 孔隙率逐渐增大。裂纹是从拉伸试样一侧表面缺口底部萌生然后扩展到整个横向断面, 断裂方式属于宏观脆性微孔型断裂, 断口呈现出起伏不平的三维形貌结构。

## In-Situ Micro-CT Study on the Fracture Mechanism of CuSn10 Alloy Prepared by Selective Laser Melting

JIN Wen-zhong<sup>1,2</sup>, CAO Yong-qing<sup>1,2</sup>, ZUO Han-song<sup>1</sup>

(1. Henan Key Laboratory of Green Building Materials Manufacturing and Intelligent Equipment, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Henan Key Laboratory of Special Protective Materials, Luoyang 471000, Henan, China)

#### Abstract:

The CuSn10 alloy samples were prepared using selective laser melting (SLM) additive manufacturing technology. In-situ tensile tests at room temperature were conducted using a micro-CT in-situ 4D mechanical platform. The fracture morphologies of the tensile samples were observed using a scanning electron microscope (SEM), and the fracture mechanism of the SLM-prepared CuSn10 alloy samples under room temperature in-situ tensile conditions was investigated. The results showed that both spherical and irregular crescent-shaped pores were present in the tensile samples. During the in-situ tensile process at room temperature, the internal pores of the tensile specimen were elongated and the porosity gradually increased. Cracks originated from the bottom of a notch on one side of the tensile sample and then expanded to the entire cross-sectional area. The fracture mode was characterized as macro-brittle microporous fracture, with the fracture surface exhibiting an uneven three-dimensional morphology structure.

#### Key words:

CuSn10 alloy; selective laser melting; micro-CT; in-situ tensile test at room temperature