

激光与光电子学进展

激光选区熔化成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金孔隙缺陷对拉伸性能的影响研究

冯振宇, 马佳威, 齐硕, 张宏宇, 陈琨*

中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300

摘要 激光增材制造合金内部存在的孔隙缺陷会对合金的力学性能产生不利影响。为研究激光选区熔化(SLM)成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金中孔隙缺陷对其拉伸性能的影响,通过 SLM 成形技术制备了 Al-Mg-Sc-Zr 合金试样,利用 X 射线计算机断层扫描技术表征了合金内部孔隙缺陷的三维特征,并通过室温拉伸试验获得了合金的拉伸性能。基于 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的孔隙数据及室温拉伸试验结果,建立能够反映材料本构以及孔隙特征的代表体积单元(RVE)模型,在 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金基体保持不变的情况下,通过改变 RVE 模型中的孔隙率和孔隙尺寸研究孔隙对 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金拉伸性能的影响。计算结果表明:当孔隙率增加时,合金的抗拉强度和弹性模量明显降低;当孔隙尺寸增大时,合金的抗拉强度明显降低,但弹性模量没有明显变化;当孔隙尺寸增大到一定程度(大于 100 μm)时,孔隙周围会出现明显的应力集中。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; Al-Mg-Sc-Zr; 孔隙缺陷; 代表体积单元; 细观有限元

中图分类号 TG146.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213362

Effect of Pore Defects on Tensile Properties of Al-Mg-Sc-Zr Alloy Formed by Selective Laser Melting

Feng Zhenyu, Ma Jiawei, Qi Shuo, Zhang Hongyu, Chen Kun*

College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Pore defects adversely affect the mechanical properties of laser-additive manufacturing alloys. To elucidate the effect of pore defects on the tensile properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy formed by selective laser melting (SLM), this study characterizes the internal pore defects of the alloy in three dimensions using X-ray computed tomography and obtains the tensile properties of the alloy through room-temperature tensile tests. Based on the pore data and tensile-test results of the Al-Mg-Sc-Zr alloy, a representative volume element (RVE) model that reflects the constitutive and pore characteristics of the material is established. Assuming an unchanging matrix of the Al-Mg-Sc-Zr alloy formed by SLM, the tensile properties of the alloy are evaluated for different porosities and pore sizes in the RVE model. The calculations show that the tensile strength and elastic modulus of the alloy decrease obviously when the porosity increases. And, when the pore size increases, the tensile strength of the alloy decreases significantly, but the elastic modulus does not change significantly. When the pore size exceeds 100 μm , obvious stress concentration appears around the pores.

Key words laser technique; selective laser melting; Al-Mg-Sc-Zr; pore defects; representative volume element; mesoscale finite element

1 引言

激光选区熔化成形(SLM)技术以高能激光为能量源,基于粉床逐层精细铺粉、激光逐层熔凝堆积的方式,成形高致密度、复杂形状的合金构件,拥有高精度、

近净成形等特点。在常见的金属激光选区熔化材料中,高强铝合金拥有比强度高和耐腐蚀性好等优点,在航空航天和高速铁路建设等场景均有广泛应用^[1-2]。目前,在激光选区熔化成形的铝合金材料中,Al-Si 系合金表现出了良好的成形性能,但抗拉强度较差,很难

收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-01-19; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1106300)

通信作者: *cknuaa@gmail.com

突破 400 MPa,限制了这类材料在航空航天等领域中对服役性能要求更高的承力结构件上的应用。SLM 成形的 Al-Mg-Sc-Zr 合金是由空客公司设计开发并拥有专利的一款高强铝合金,是第一款专门为 SLM 技术设计的合金^[3]。Spierings 等^[4-8]和 Zhang 等^[9-10]的研究表明,铝基体中的 Sc 元素和 Zr 元素在 SLM 成形过程中,会形成 Al₃(Sc,Zr)颗粒并起到显著的晶粒细化作用,从而促使 Al-Mg-Sc-Zr 合金的晶粒组织显著细化,提升合金的力学性能。

目前,将激光选区熔化技术应用在航空航天领域仍有许多亟待解决的问题,例如成形工艺不够成熟,导致成形件内部存在孔隙等缺陷,影响成形件的使用稳定性,限制了激光选区熔化技术在民航领域的应用^[11-12]。在激光扫描熔化过程^[13]中,工艺参数、外部环境和熔池状态等都可能影响成形件内部的各沉积层间、沉积层内或熔道间等区域出现各种类型的冶金缺陷,如未熔合缺陷、气孔、夹杂和微裂纹等,这些缺陷的分布位置、尺寸和形状等都会影响最终成形件的成形质量、力学性能和长期服役时的安全使用^[11,14]。

现有研究^[15-16]表明,利用 X 射线计算机断层扫描技术(X-CT)和三维重构软件,可以得到合金内部缺陷的三维形貌参数,能够较好地表征缺陷的尺寸和形貌特征。吴正凯等^[17]利用同步辐射 X 射线成像技术对 SLM 成形 Ti-6Al-4V 合金的缺陷进行了表征,采用 Feret 直径和极值统计方法定量表征了缺陷的特征尺寸、数量、位置及形貌。

当铝合金试样内部缺陷的含量或尺寸变化时,对试样的弹性模量和抗拉强度等拉伸性能可能会产生不同程度的影响,但是目前对这种影响的研究多停留在定性研究。因此,定量地表征铝合金内部缺陷,并进一步定量地研究缺陷对拉伸性能的影响有着重要意义。对金属增材制造来说,尽管改变工艺参数可以改变合金内部孔隙的含量和尺寸,但同时也会改变金属的晶粒尺寸等微观组织特征,因此通过试验研究不同孔隙

特征对拉伸性能的影响较为困难,成本较高。除了开展大量试验的研究方法外,还可以利用有限元分析方法建立含缺陷模型进行仿真模拟研究。

建立代表体积单元(RVE)模型的有限元分析方法是一种以较低计算成本模拟工程材料细观力学行为的可靠工具。RVE 模型可以较全面地包含材料的三维微观结构特征,包括夹杂相的尺寸、形状和分布等参数。现有研究多以含缺陷混凝土和含增强相复合材料的研究为主^[18-22],针对金属增材制造材料,尤其是考虑金属材料内部孔隙的相关研究较少。高真等^[20]利用 Digimat-FE 软件建立了混凝土细观力学模型,并基于此模型预测了混凝土骨料体积比不同时混凝土的等效弹性模量,模拟结果与试验测定值较为吻合,表明此模型可用于预测混凝土的等效弹性模量。齐泽文等^[21]建立了含孔隙三维四向编织复合材料的 RVE 模型并验证了模型的正确性,在 RVE 模型中投入气孔单元,模拟分析了孔隙率对三维四向编织复合材料力学性能的影响,发现纤维束中孔隙率对复合材料力学性能影响大于基体中孔隙率对其的影响。Nayak 等^[22]利用 Digimat-FE 软件生成了石墨烯纳米颗粒增强铝合金复合材料的 RVE 模型,利用 RVE 模型模拟了不同含量石墨烯纳米颗粒对复合材料的增强效果,模拟结果表明 RVE 模型预测得到的拉伸性能与试验值吻合较好。

基于以上研究现状,本文从试验入手,对 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的孔隙三维特征和拉伸性能进行表征,建立含孔隙的 RVE 模型并对模型进行校准和验证,通过改变 RVE 模型中孔隙的数量和尺寸,预测合金孔隙缺陷对拉伸性能的影响。

2 试验材料及方法

2.1 试样制备

本文制备高强铝合金所使用的材料为 Al-Mg-Sc-Zr 合金粉末,其化学成分见表 1,粒度分布见表 2。

表 1 Al-Mg-Sc-Zr 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-Mg-Sc-Zr powders

| Element | Mg | Sc | Zr | Cr | Cu | Fe | Mn | Ti | Si | Zn | Al |
|-------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|
| Mass fraction / % | 4.64 | 0.68 | 0.29 | <0.01 | <0.01 | 0.12 | 0.65 | 0.023 | 0.069 | <0.01 | Bal. |

表 2 Al-Mg-Sc-Zr 粉末的粒度分布

Table 2 Particle size distribution of Al-Mg-Sc-Zr powders

| Powder | DV(10) | DV(50) | DV(90) |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Particle size / μm | 23.546 | 37.716 | 59.899 |

SLM 成形过程使用的设备为 BLT-S310,加工过程中使用氩气作为保护气体。本文制备 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金选择优化后的工艺参数如下:激光功率为 250 W,扫描速度为 900 mm/s,扫描间距为 0.17 mm,铺粉厚度为 30 μm,选用“之”字形扫描策

略。在成形完成后,对试样进行热处理。

2.2 缺陷表征

本文采用 X-CT 方法对 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金试样内部的制造缺陷进行表征,检测试样如图 1 所示。X-CT 检测使用的设备为 YXLON FF35CT,X-CT 检测的技术参数见表 3。

在得到 X-CT 检测结果后,利用三维重构软件 Avizo 提取孔隙的体积、表面积和三维形貌等参数。以等效直径作为孔隙的尺寸参数,以球形度作为孔隙的形状参数,其中等效直径为与孔隙同体积球体的直

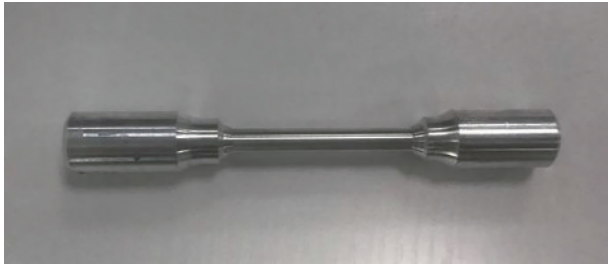


图 1 检测试样
Fig. 1 Test sample

径,球形度为与孔隙同体积球体的表面积与孔隙表面积之比。为了减少噪点的影响,将等效直径小于 $30\ \mu\text{m}$ 的孔隙过滤,X-CT扫描显示合金内部只存在极少的孔隙,X-CT扫描结果如图 2 所示。SLM成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的孔隙率为 0.0013% ,最小孔隙等效直径为 $31\ \mu\text{m}$,最大孔隙等效直径为 $126\ \mu\text{m}$ 。孔隙的球

表 3 X-CT 技术参数

Table 3 X-CT technical parameters

| Equipment | Value |
|--|--------------------|
| Detection model | Varian P2530 |
| Detector pixel / μm | 139 |
| Scan mode | Cone beam scanning |
| Radiation source to detector distance / mm | 600 |
| Radiation source to sample distance / mm | 20 |
| Tube voltage / kV | 140 |
| Tube current / μA | 70 |
| Filter material/mm | Cu 0.5 |
| Scan resolution / mm | 0.005 |

形度分布在 $0.47\sim 0.63$ 之间,说明孔隙的形状较为规则,并未出现球形度小于 0.4 的不规则形状未熔合缺陷。

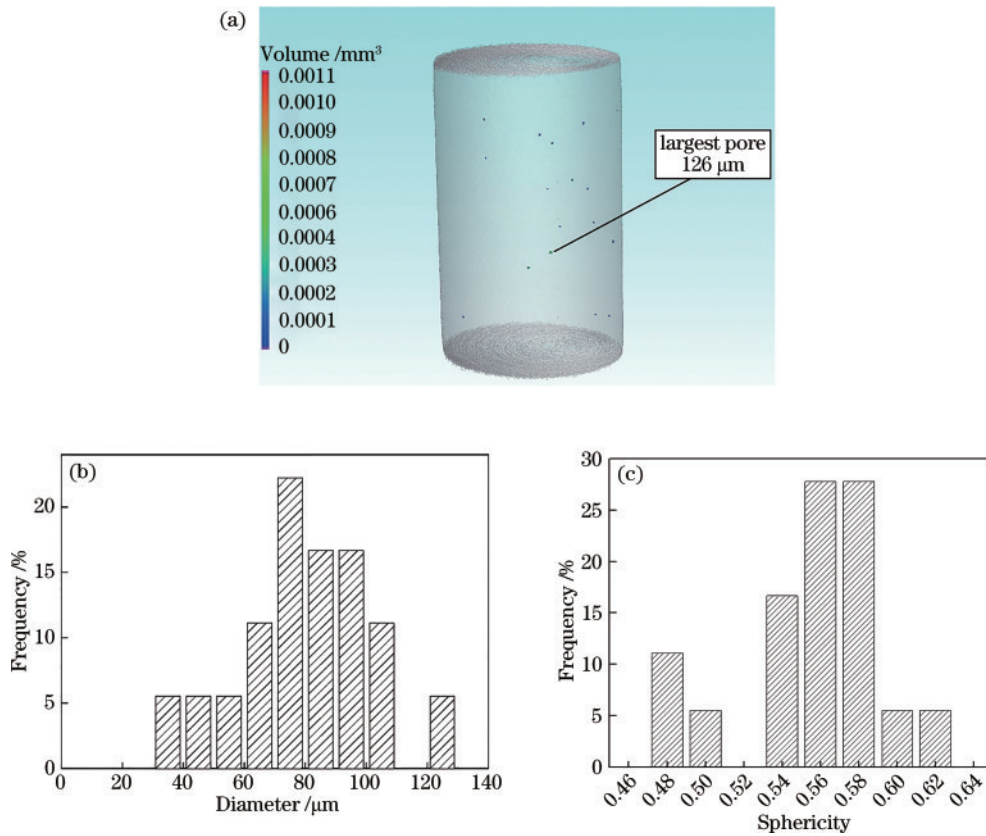


图 2 X-CT 扫描结果。(a) 三维重构图;(b) 孔隙尺寸分布;(c) 孔隙球形度分布

Fig. 2 Scan results of X-CT. (a) Three-dimensional reconstruction image; (b) pore size distribution; (c) pore sphericity distribution

2.3 拉伸试验

室温准静态拉伸试验件按 ASTM E8/E8M 进行加工,拉伸试样尺寸示意图如图 3 所示。疲劳试验设备为 INSTRON 公司的高力值万能材料试验系统电子式 5980 系列 INSTRON 5982。室温下进行拉伸试验,加载控制模式设置为拉伸应变控制模式。试验共得到 3 组有效数据,按照试验标准进行数据处理,获得 Al-Mg-Sc-Zr 合金的拉伸性能,计算其平均材料性能参数。

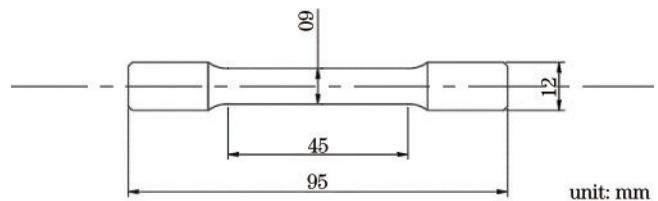


图 3 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tensile specimenEs dimensions

拉伸试验结果显示:合金的抗拉强度为 508.17 MPa,屈服强度为 465.03 MPa,弹性模量为 66.13 GPa。

3 Al-Mg-Sc-Zr 合金含缺陷有限元模型建模

3.1 含缺陷的 RVE 模型

均质化方法是一种常见的简化思想,通过均质化方法将非均匀材料等效为一种“均匀材料”,建立能够联系材料细观和宏观的 RVE,在细观上计算 RVE 的力学响应,确定细观应力场和应变场,再用平均场均质化方法把细观响应和宏观行为联系起来,得到宏观均匀材料的等效性能,即计算得到 RVE 对应的均质化等效介质的等效模量和等效强度。通过这种方法可以研究细观孔隙缺陷特征对材料宏观拉伸性能的影响。

在均质化方法中,RVE 的建立较为重要,本文中的 RVE 由 Al-Mg-Sc-Zr 基体相和孔隙缺陷夹杂相组成,RVE 需要尽可能全面地描述材料内部微观结构的特征,因此首先需要确定 RVE 的尺寸。相对于 RVE 中微观结构的尺寸,RVE 的尺寸应该足够大,使其能够包含完整的微观结构信息,较为准确、独立地代表真实的研究对象。但为了减少计算成本,在满足一定的计算精度的前提下,相对于研究对象的宏观尺寸,RVE 的尺寸应该尽可能小一些。考虑到 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的孔隙尺寸范围,RVE 的尺寸设置为 1 mm×1 mm×1 mm,此时立方体 RVE 的边长约为孔隙尺寸的 12 倍。

根据 X-CT 检测得到的孔隙球形度结果可知,孔隙的形状都较为规则,因此将孔隙的几何形状简化为球形度为 1 的球体以便于计算。在只考虑孔隙率对拉伸性能的影响时,基于 X-CT 检测得到的孔隙尺寸范围,将孔隙尺寸的分布范围设置为 30~130 μm,并以随机投放的原则,将孔隙逐个置入 RVE 模型中,使其不会相互接触,生成的含孔隙的 RVE 模型如图 4 所示。

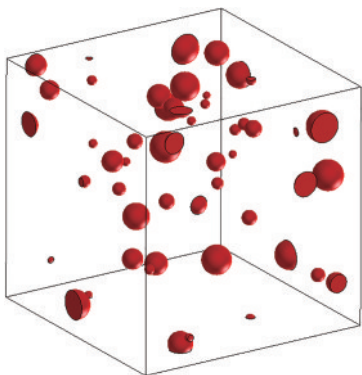


图 4 含随机分布孔隙的 RVE 模型

Fig. 4 RVE model with randomly distributed pores

由于四面体网格的加密性较差,RVE 模型的网格类型选择体素单元网格。考虑到孔隙尺寸分布在 30~130 μm,为保证计算精度,将立方体 RVE 模型的网格数量设置为 100×100×100,网格总数量为 1000000,网格尺寸为 0.01 mm。RVE 模型的边界条件选择均匀应变边界条件进行计算。

对于金属材料,Tresca 屈服准则和 Von Mises 屈服准则是比较常用的两种屈服准则,其中 Von Mises 屈服准则在工程中的应用更为普遍,其表达式为

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0, \quad (1)$$

式中: J_2 为偏应力张量 s 的第二不变量; k 为材料的剪切屈服强度。Von Mises 等效应力 σ_{eq} 为

$$\sigma_{eq} = \sqrt{J_2(\sigma)} = \left(\frac{3}{2} s : s\right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{3}{2} s : s = \frac{3}{2} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 \right] + 3 \left[\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 \right], \quad (3)$$

式中: σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 为三个主应力; σ_{12} 、 σ_{23} 、 σ_{31} 为三个切应力。在单轴拉伸时,由于其他两个方向的应力分量为 0,则有

$$k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

式中: σ_s 为屈服强度。

通常来说,复合材料会对基体和夹杂相分别添加不同的失效准则,但对此模型来说,只需要对基体添加失效准则即可,无需对孔隙进行定义。

3.2 材料参数

SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的材料本构模型选用 J2-plasticity 模型。根据 X-CT 结果得知,试样的孔隙率仅为 0.0013%,可以认为其是致密合金,作为 RVE 模型中的基体。根据室温拉伸试验结果,计算得到了 RVE 模型中 Al-Mg-Sc-Zr 合金基体所需的各项材料参数,见表 4。

表 4 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的材料参数

Table 4 Material parameters of Al-Mg-Sc-Zr alloy formed by SLM

| Type | Name | Value |
|---------|---------------------------------|--------|
| General | Density / (kg·m ⁻³) | 2660 |
| | Young's modulus / GPa | 66.13 |
| Elastic | Poisson's ratio | 0.30 |
| | Yield stress / MPa | 477.45 |
| Plastic | Hardening modulus / MPa | 202.14 |
| | Hardening exponent | 9.86 |

考虑到网格类型以及后续计算的收敛性,用远小于 Al-Mg-Sc-Zr 合金材料参数的数值定义孔隙的密度和弹性模量,表 5 给出了孔隙的材料参数。

表 5 孔隙的材料参数
Table 5 Material parameters of pores

| Type | Name | Value |
|---------|---|-------|
| General | Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 2.66 |
| | Young's modulus / Pa | 66.13 |
| Elastic | Poisson's ratio | 0.30 |

4 结果与分析

4.1 模型验证

根据已建立的 RVE 有限元模型,在孔隙率为 0.0013%,孔隙尺寸为 30~130 μm 的条件下进行计算,仿真得到的应力应变曲线如图 5 所示。可以看到,仿真得到的应力应变曲线和拉伸试验结果较为相似,仿真得到的抗拉强度为 506.28 MPa,弹性模量为 66.127 GPa,与试验结果的抗拉强度 508.17 MPa 和弹性模量 66.130 GPa 相比,分别相差了 0.4% 和 0.004%,证明了本文模型的有效性。

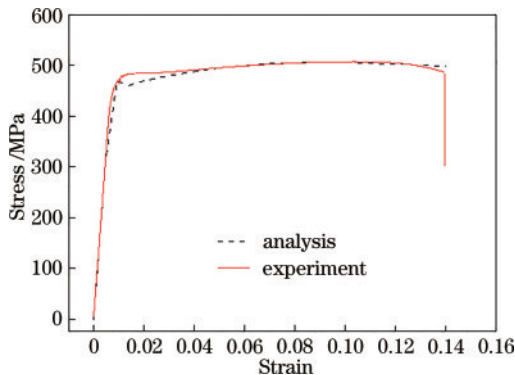


图 5 应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve

在孔隙率、孔隙形状和尺寸参数固定的情况下,孔隙位置的每一次生成都是随机、无规律的。为了证明

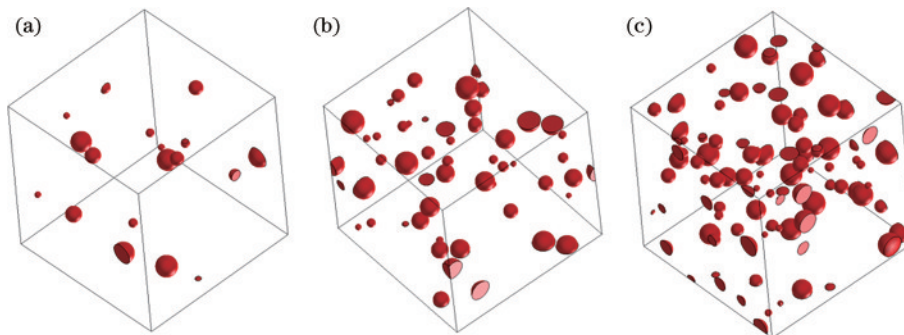


图 7 含缺陷 RVE 模型。(a)孔隙率为 0.5%;(b)孔隙率为 1.5%;(c)孔隙率为 2.5%

Fig. 7 RVE model with defects. (a) Porosity is 0.5%; (b) porosity is 1.5%; (c) porosity is 2.5%

对 8 组不同孔隙率的模型进行计算,并与 0.0013% 孔隙率的模型计算结果进行对比,结果如图 8 所示。随着孔隙率的增加,计算得到的抗拉强度和弹性模量持续下降。孔隙率为 3% 的 RVE 模型计

随机生成的 RVE 模型的微观结构具有代表性,孔隙位置的随机分布对模拟结果不会产生明显的影响,在孔隙率为 0.5% 和 2.5% 的情况下分别进行 10 组随机生成孔隙的 RVE 模型的计算结果。

如图 6 所示,同一孔隙率下 10 组模型的抗拉强度的变化波动幅度很小,孔隙率为 0.5% 的 10 组模型计算得到的抗拉强度离散度约为 0.171%,孔隙率为 2.5% 的 10 组模型计算得到的抗拉强度离散度约为 0.173%。这说明孔隙的随机分布不会对模拟结果产生明显影响,随机分布生成的含孔隙 RVE 模型可以用于后续的计算分析。

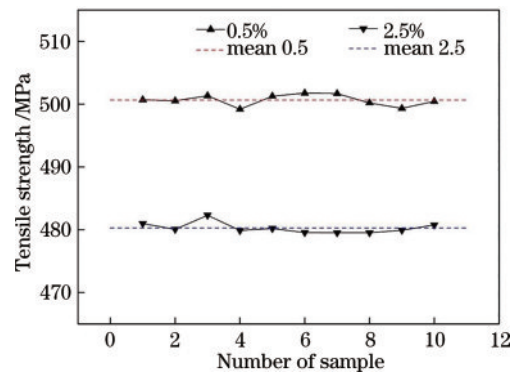


图 6 抗拉强度分散性

Fig. 6 Dispersion of tensile strength

4.2 孔隙率对拉伸性能的影响

由于激光增材制造合金内部易出现孔隙缺陷,研究孔隙率对合金力学性能的影响具有重要意义。基于前文建立的有限元模型,通过改变 RVE 模型中的孔隙率,可以计算不同孔隙率下材料的抗拉强度和弹性模量。考虑实际生产成形过程中可能出现的孔隙率,建立 8 组模型,其孔隙率分别为 0.01%、0.1%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5% 和 3%,图 7 列举了孔隙率为 0.5%、1.5% 和 2.5% 的三组 RVE 模型的孔隙分布示意图。

算得到的抗拉强度和弹性模量下降最多,与 0.0013% 孔隙率的计算结果相比,抗拉强度下降 5.11%,弹性模量下降 5.66%。

计算结果表明,当孔隙率小于 0.1% 时,合金的抗

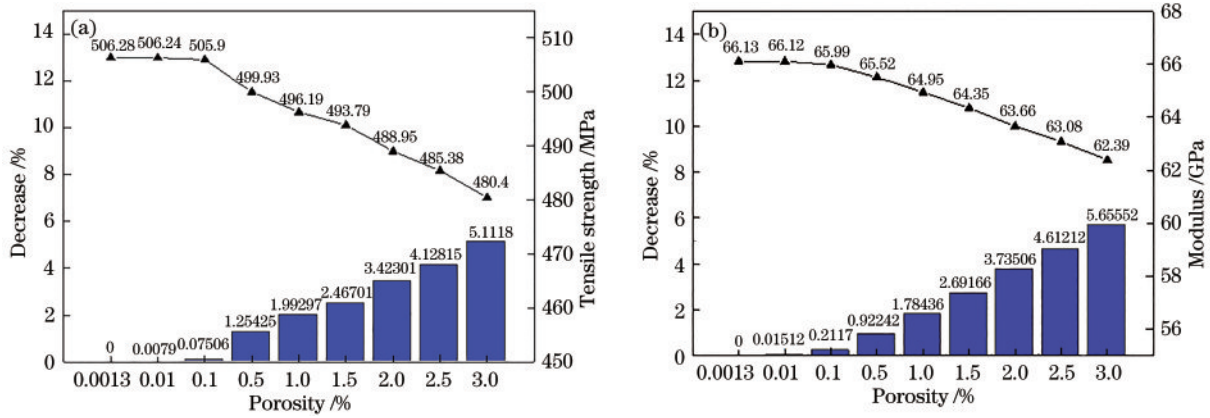


图 8 拉伸性能随孔隙率的变化规律。(a)抗拉强度;(b)弹性模量

Fig. 8 Variation of tensile properties with porosity. (a) Tensile strength; (b) elasticity modulus

拉强度和弹性模量的下降较不明显,随着孔隙率进一步增大,合金的拉伸性能下降。这一结果符合目前关于SLM成形合金孔隙缺陷对拉伸性能影响的认知,在SLM制造中应选择优化的工艺参数以达到较低的孔隙率,从而获得拉伸性能较优的合金。

4.3 孔隙尺寸对拉伸性能的影响

除了孔隙率外,孔隙尺寸对合金的拉伸性能也会产生影响,且不同孔隙率下孔隙尺寸对合金拉伸性能

的影响应该也有所差异。为了研究孔隙尺寸带来的影响,在0.5%、1.5%和2.5%三个孔隙率水平下,分别将RVE模型中的孔隙尺寸设置在25 μm、50 μm、100 μm、150 μm和175 μm五个水平,得到共15组RVE模型。部分RVE模型的孔隙分布图如图9所示。

对上述15组RVE模型进行计算,根据计算结果,得到孔隙尺寸与拉伸性能的关系图,如图10所示。

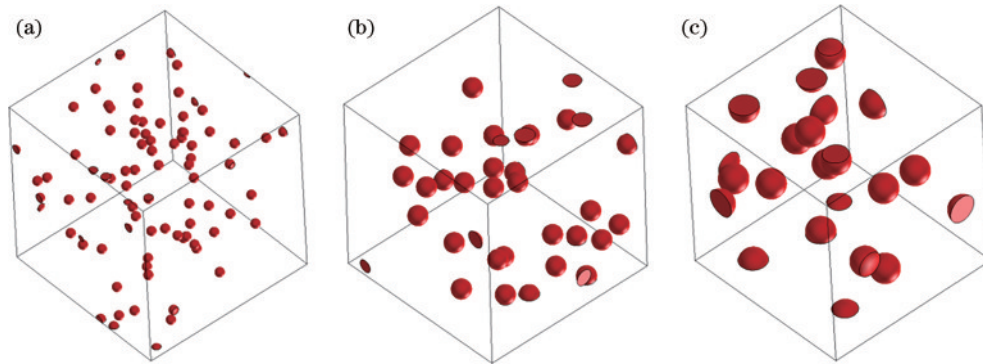


图 9 RVE模型。(a)孔隙率为0.5%,孔隙尺寸为50 μm;(b)孔隙率为1.5%,孔隙尺寸为100 μm;
(c)孔隙率为2.5%,孔隙尺寸为150 μm

Fig. 9 RVE model. (a) Porosity is 0.5%, pore size is 50 μm; (b) porosity is 1.5%, pore size is 100 μm;
(c) porosity is 2.5%, pore size is 150 μm

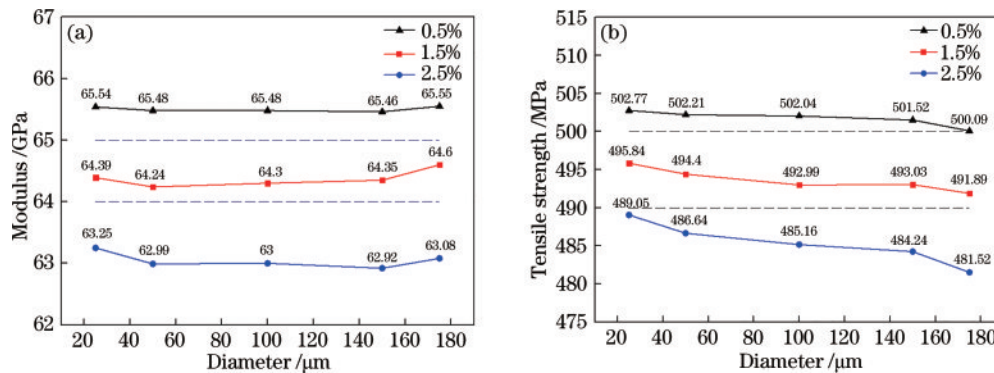


图 10 不同孔隙率下孔隙尺寸对拉伸性能的影响。(a)弹性模量;(b)抗拉强度

Fig. 10 Effect of pore size on tensile properties at different porosities. (a) Tensile strength; (b) elasticity modulus

从图 10 可以看到,在同一孔隙率下,孔隙尺寸对合金的弹性模量没有明显影响,而合金的抗拉强度随着孔隙尺寸的增加而降低,并且孔隙率越大,孔隙尺寸对合金抗拉强度的影响越明显。在 0.5% 孔隙率下,孔隙尺寸为 175 μm 的 RVE 模型的抗拉强度相比孔隙尺寸为 25 μm 的 RVE 模型的抗拉强度下降了约 0.53%。在 2.5% 孔隙率下,孔隙尺寸为 175 μm 的 RVE 模型的抗拉强度相比孔隙尺寸为 25 μm 的 RVE 模型的抗拉强度下降了约 1.54%。由此可见,随着孔隙尺寸的增大,孔隙周围更易出现应力集中并导致更快地断裂,从而导致合金的抗拉强度降低。而当孔隙率较高时,大尺寸孔隙的数量较多,抗拉强度下降较明显。在实际生产成形中,大尺寸孔隙往往伴随着较

高孔隙率出现,从而导致成形合金的拉伸性能显著下降。

为了进一步研究孔隙尺寸对合金拉伸性能的影响,图 11 给出了孔隙率为 2.5% 时,孔隙尺寸分别为 25 μm 、50 μm 、100 μm 、150 μm 和 175 μm 的 RVE 模型计算得到的 Von Mises 等效应力云图。当孔隙尺寸较小时,如图 11(a) 和 (b) 所示,在 25 μm 和 50 μm 的孔隙尺寸下,孔隙周围并未出现明显的应力集中。当孔隙尺寸较大时,如图 11(c)、(d) 和 (e) 所示,在 100 μm 、150 μm 和 175 μm 的孔隙尺寸下,孔隙周围开始出现应力集中的现象。RVE 模型中的最大等效应力出现在孔隙边缘,此时孔隙边缘易产生微裂纹并最终导致合金的宏观破坏失效。从图 11(c) 和 (d) 可以看出,在

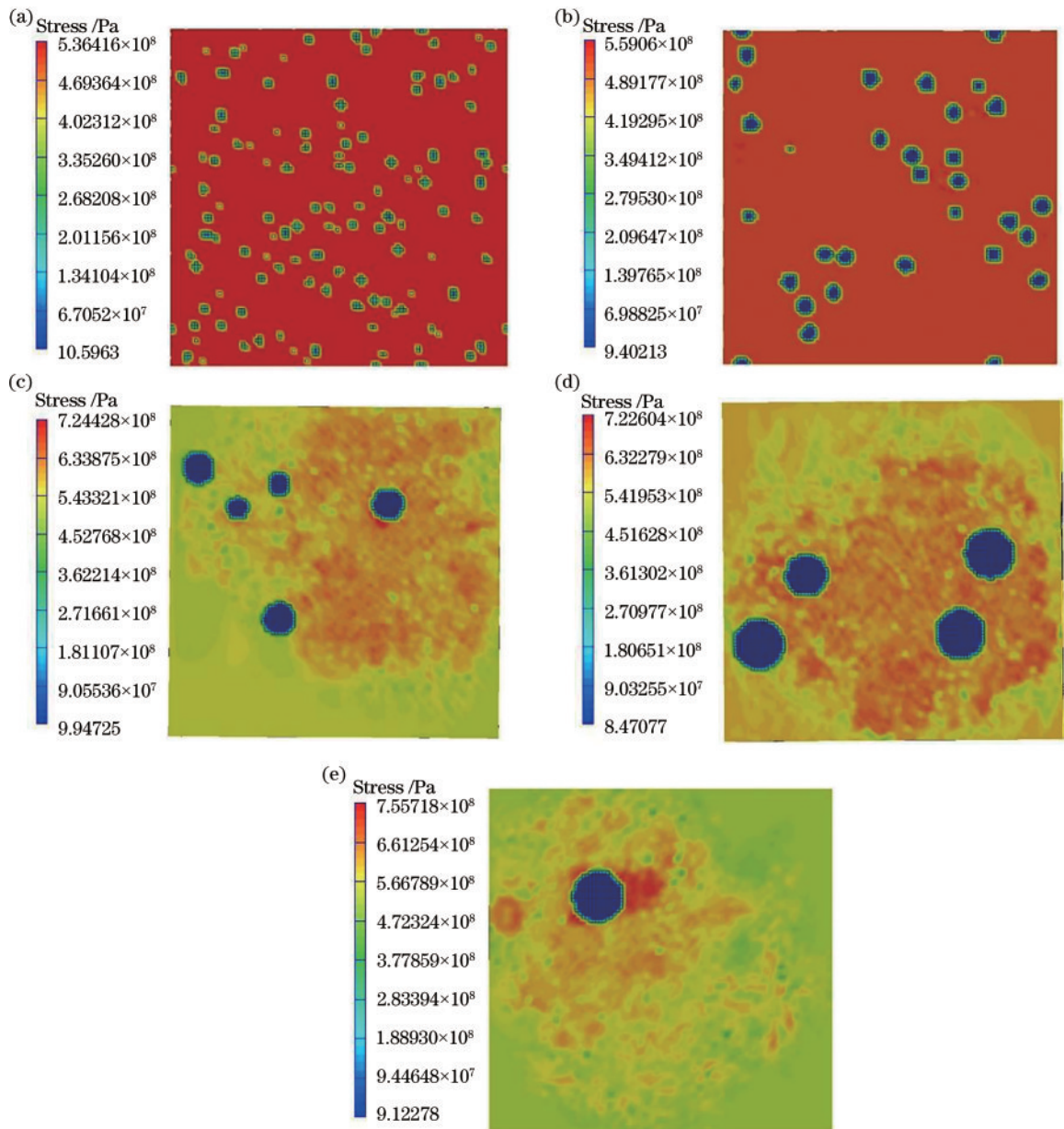


图 11 孔隙率 2.5% 下不同孔隙尺寸 RVE 模型的等效应力云图。(a) 25 μm ; (b) 50 μm ; (c) 100 μm ; (d) 150 μm ; (e) 175 μm
 Fig. 11 Equivalent stress cloud maps of RVE models with different pore sizes at 2.5% porosity. (a) 25 μm ; (b) 50 μm ; (c) 100 μm ; (d) 150 μm ; (e) 175 μm

几个孔隙之间出现了较高的等效应力,说明多个孔隙的聚集也会对合金的拉伸性能产生不利影响。

图 12 给出了当 RVE 模型的孔隙率为 0.5% 和 1.5% 时,50 μm 和 100 μm 孔隙尺寸的 Von Mises 等效应力云图。可以看到,图 12 中的等效应力云图与图 11 中孔隙率为 2.5% 时的等效应力云图类似:当孔隙尺寸为 50 μm 时,RVE 模型中的最大等效应力出现在基

体中;当孔隙尺寸为 100 μm 时,RVE 模型的最大等效应力出现在孔隙周围。结合图 11 和图 12 可以看到,当孔隙率在 0.5%~2.5% 范围内时,尺寸小于 50 μm 的孔隙对合金的等效应力分布影响较小,等效应力都均匀地分布在基体中,而尺寸大于 100 μm 的孔隙对合金的等效应力分布影响较大,在孔隙周围出现了明显的应力集中。

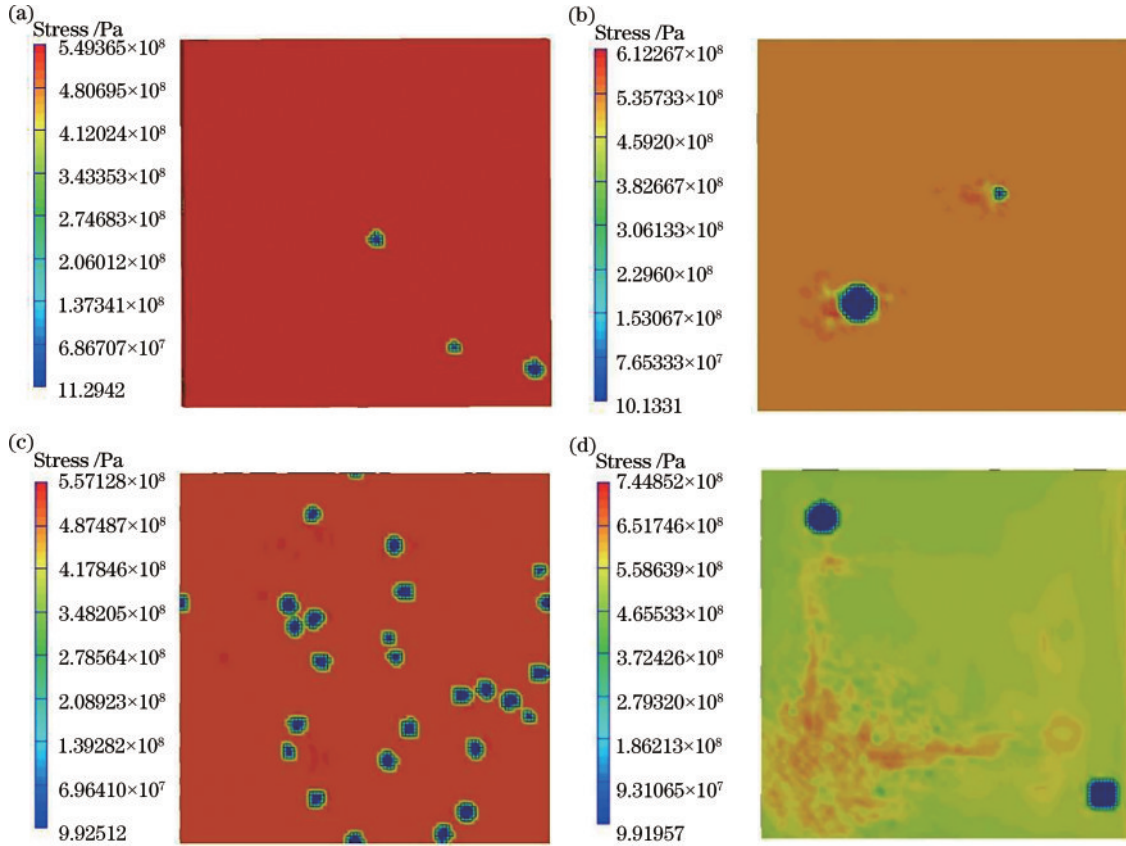


图 12 RVE 模型的等效应力云图。(a)孔隙率为 0.5%,孔隙尺寸为 50 μm;(b)孔隙率为 0.5%,孔隙尺寸为 100 μm;
(c)孔隙率为 1.5%,孔隙尺寸为 50 μm;(d)孔隙率为 1.5%,孔隙尺寸为 100 μm

Fig. 12 Equivalent stress cloud maps of RVE models. (a) Porosity is 0.5%, pore size is 50 μm; (b) porosity is 0.5%, pore size is 100 μm; (c) porosity is 1.5%, pore size is 50 μm; (d) porosity is 1.5%, pore size is 100 μm

表 6 给出了 3 种孔隙率下 5 种孔隙尺寸的 RVE 模型计算得到的最大 Von Mises 等效应力值,可以看到,相较于孔隙率,孔隙尺寸对 RVE 模型中最大等效应力的影响更大。当孔隙尺寸为 25 μm 和 50 μm 时,RVE 模型的等效应力最大值维持在 530~560 MPa,但当孔

隙尺寸大于 100 μm 后,RVE 模型的等效应力最大值跃升至 610 MPa 之上。这说明:当孔隙尺寸小于 50 μm 时,孔隙对合金的等效应力分布影响较小;当孔隙尺寸大于 100 μm 时,孔隙的存在对合金的等效应力分布影响较大。

表 6 含不同孔隙率与孔隙尺寸的 RVE 模型的等效应力最大值

Table 6 Maximum equivalent stress of RVE model with different porosity and pore size

| Porosity / % | Equivalent stress /MPa | | | | |
|--------------|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Pore size is 25 μm | Pore size is 50 μm | Pore size is 100 μm | Pore size is 150 μm | Pore size is 175 μm |
| 0.5 | 533.88 | 549.36 | 612.27 | 712.25 | 743.95 |
| 1.5 | 534.33 | 557.13 | 744.85 | 716.83 | 756.73 |
| 2.5 | 536.42 | 559.06 | 724.43 | 722.60 | 755.72 |

5 结 论

本文基于 X 射线计算机断层扫描和室温拉伸试验

测得的 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的孔隙缺陷数据和拉伸性能数据,建立了含孔隙缺陷的 Al-Mg-Sc-Zr 合金的 RVE 模型。计算验证了 RVE 模型的有效性,

并进一步通过改变 RVE 模型中的孔隙参数,预测了孔隙缺陷对合金拉伸性能的影响。得到的主要结论如下:

1) SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的孔隙率仅为 0.0013%,孔隙的等效直径分布在 31~126 μm 范围内,孔隙的球形度分布在 0.47~0.63,孔隙的形状较为规则。

2) SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的抗拉强度和弹性模量随孔隙率的增加而下降。孔隙率增加到 3% 时,相较于几乎完全致密的 Al-Mg-Sc-Zr 合金(孔隙率为 0.0013%),弹性模量下降约 5.66%,抗拉强度的下降约 5.11%。说明在 SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的基体稳定不变的情况下,孔隙率对合金拉伸性能的影响明显,在较低的孔隙率下,合金的拉伸性能较好。

3) SLM 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金的抗拉强度随着孔隙尺寸的增加而下降,但弹性模量和孔隙尺寸间没有明显关系。当孔隙率为 2.5% 时,孔隙尺寸为 175 μm 的合金抗拉强度比孔隙尺寸为 25 μm 的合金抗拉强度下降了约 1.54%,相较于孔隙率对抗拉强度的影响,孔隙尺寸对抗拉强度的影响较小。随着孔隙尺寸变大,RVE 内部的最大等效应力也呈上升趋势,并且当孔隙尺寸较大时(大于 100 μm),孔隙边缘出现了明显的应力集中,最大等效应力出现在孔隙边缘处,说明大尺寸孔隙会导致明显的应力集中,孔隙边缘处容易出现开裂,进而影响合金的拉伸性能。

参 考 文 献

- [1] Xu L P, Wang Q Y, Zhou M. Micro-crack initiation and propagation in a high strength aluminum alloy during very high cycle fatigue[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 715: 404-413.
- [2] Cao B, Shaeffer M, Cadel D, et al. An analysis of strengthening mechanisms and rate-dependence in a high strength aluminum alloy[J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2018, 4(1): 6-17.
- [3] Schmidtke K, Palm F, Hawkins A, et al. Process and mechanical properties: applicability of a scandium modified Al-alloy for laser additive manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 369-374.
- [4] Spierings A B, Dawson K, Voegtlin M, et al. Microstructure and mechanical properties of as-processed scandium-modified aluminium using selective laser melting[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 213-216.
- [5] Spierings A B, Dawson K, Kern K, et al. SLM-processed Sc- and Zr- modified Al-Mg alloy: mechanical properties and microstructural effects of heat treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 701: 264-273.
- [6] Spierings A B, Dawson K, Heeling T, et al. Microstructural features of Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys processed by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2017, 115: 52-63.
- [7] Spierings A B, Dawson K, Uggowitzer P J, et al. Influence of SLM scan-speed on microstructure, precipitation of Al_3Sc particles and mechanical properties in Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys[J]. Materials & Design, 2018, 140: 134-143.
- [8] Spierings A B, Dawson K, Dumitraschkewitz P, et al. Microstructure characterization of SLM-processed Al-Mg-Sc-Zr alloy in the heat treated and HIPed condition [J]. Additive Manufacturing, 2018, 20: 173-181.
- [9] Zhang H, Gu D D, Yang J K, et al. Selective laser melting of rare earth element Sc modified aluminum alloy: thermodynamics of precipitation behavior and its influence on mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 1-12.
- [10] Zhang H, Gu D D, Dai D H, et al. Influence of scanning strategy and parameter on microstructural feature, residual stress and performance of Sc and Zr modified Al-Mg alloy produced by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 788: 139593.
- [11] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [12] 宋哲. 选区激光熔化钛合金的缺陷容限评价方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Song Z. The defect tolerance evaluation method for selective laser melted titanium alloys[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [13] 吴正凯, 张杰, 吴圣川, 等. 同步辐射 X 射线原位三维成像在金属增材制件缺陷评价中的应用[J]. 无损检测, 2020, 42(7): 46-50.
Wu Z K, Zhang J, Wu S C, et al. Application of *in situ* three-dimensional synchrotron radiation X-ray tomography for defects evaluation of metal additive manufactured components[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(7): 46-50.
- [14] 石鑫, 韩志荣, 蒋凡伟. 内燃机用激光增材 Ti600 合金缺陷表征及其疲劳行为分析[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(12): 1162-1165.
Shi X, Han Z R, Jiang F W. Characterization of defects and fatigue behavior of Ti600 alloy rod synthesized by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(12): 1162-1165.
- [15] Zhao X L, Li S J, Zhang M, et al. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting[J]. Materials & Design, 2016, 95: 21-31.
- [16] Maskery I, Aboulkhair N T, Corfield M R, et al. Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography [J]. Materials Characterization, 2016, 111: 193-204.
- [17] 吴正凯, 吴圣川, 张杰, 等. 基于同步辐射 X 射线成像的选区激光熔化 Ti-6Al-4V 合金缺陷致疲劳行为[J]. 金属学报, 2019, 55(7): 811-820.
Wu Z K, Wu S C, Zhang J, et al. Defect induced fatigue behaviors of selective laser melted Ti-6Al-4V via synchrotron

- radiation X-ray tomography[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(7): 811-820.
- [18] 李宗利, 邓朝莉, 张国辉. 考虑骨料级配的混凝土有效弹性模量预测模型[J]. *水利学报*, 2016, 47(4): 575-581.
Li Z L, Deng C L, Zhang G H. A predictive model of effective elastic modulus of concrete under influence of aggregate gradation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(4): 575-581.
- [19] 卢子兴, 徐强, 王伯平, 等. 含缺陷平纹机织复合材料拉伸力学行为数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(6): 200-207.
Lu Z X, Xu Q, Wang B P, et al. Numerical simulation of plain weave composites with defects under unidirectional tension[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(6): 200-207.
- [20] 高真, 曹鹏, 孙新建, 等. 基于 DIGIMAT 的混凝土等效弹性模量研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(5): 186-192.
Gao Z, Cao P, Sun X J, et al. DIGIMAT-based study on equivalent elastic modulus of concrete[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(5): 186-192.
- [21] 齐泽文, 胡殿印, 张龙, 等. 含孔隙三维四向编织复合材料力学性能的双尺度分析[J]. *推进技术*, 2018, 39(8): 1873-1879.
Qi Z W, Hu D Y, Zhang L, et al. Two-scale analysis for mechanical properties of 3D four-directional braided composites with pore defects[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(8): 1873-1879.
- [22] Nayak B, Sahu R K. Experimental and Digimat-FE based representative volume element analysis of exceptional graphene flakes/aluminium alloy nanocomposite characteristics [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 116593.