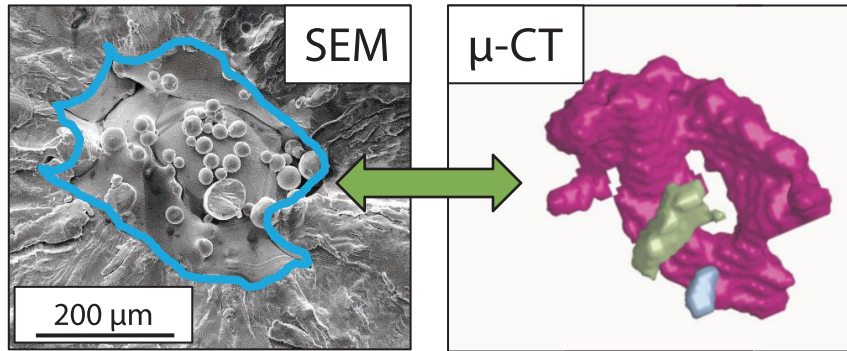
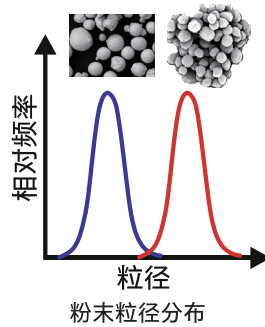


缺陷在增材制造的AISI12超高周疲劳中的影响

Mustafa Awd, Frank Walther*¹



扫描电子显微镜与微型计算机断层扫描之间的相关性



1. 简介

目前，研究的重点是材料和结构的可靠性。与其他金属增材制造（AM）方法相比，激光选区熔化（SLM）是一种高效的、基于粉末床的金属增材制造技术^{1), 2)}。要估计SLM部件的质量，必须对疲劳相关问题进行研究^{3), 4), 5)}。铝的应用领域十分广泛，其中最重要的是汽车和航空航天工业。铝硅合金在SLM加工中已较为成熟，可常规处理AISI12、AISI10Mg和Scalmalloy®。SLM加工利用了硅含量对提高强度的影响，直至达到共晶点。同时，共晶成分也更有利于铝合金的SLM加工^{6), 7), 8)}。

研究发现，SLM制造合金的疲劳强度与铸造合金相当或更高，例如^{9), 10), 11)}，但有少数其他报道^{12), 13)}。最重要的因素是SLM加工部件的小孔隙和不均匀特性在疲劳期间的影响。Brandl等人⁹⁾通过SLM研究了承受高周疲劳（HCF）载荷的AISI10Mg。

制造了三个不同方向的平台（0°、45°和90°），并在两种条件下进行了试验：完工和峰值硬化。由于孔隙的类型多样，预测SLM部件的疲劳寿命至关重要。

本文详细探讨了AISI12合金的生产工艺、结构和性质之间的关系。研究旨在确定工艺变量对微观结构特征的影响。研究了从硬度、准静态特性到超高周疲劳（VHCF）特性的各种机械特性。利用内部缺陷的形态和微观结构特征，分析了HCF和VHCF区域的损伤过程。研究结果可用于开发一种累积方法，以控制目的微观结构所需的SLM工艺参数，以及计算残留孔隙度，从而正确预测疲劳载荷下的机械性能。

*1 Chair of Materials Test Engineering (WPT), TU Dortmund University, Baroper Str.303, 44227 Dortmund, Germany

2. 材料和设备

旨在比较在施加VHCF载荷时，相对密度含量对破坏过程的影响。采用标准PBF-LB设置进行处理试样。使用SLM-AutoFabCAM软件将平台升温至200°C，熔池用氩气保护，并采用棋盘策略岛式绘制影线。在绘制轮廓影线过程中，每层在矢量方向平面旋转79°¹⁴⁾。

使用岛津制作的超声疲劳（USF）试验设备（USF-2000A，图1）进行VHCF试验，试验配置如图2所示。致动器基于压电原理，当试样的一端通电，另一端不夹紧时，会产生频率为20 kHz的共振。喇叭将振动传递给试样。构造为通过固体传递共振纵波，增加试样自由端的位移和试样中心的应力。由于使用高频率会导致试样发热，因此试验采用脉冲vs.暂停比为50:50的间歇式振动。系统经历200 ms的共振，然后接着200 ms无共振。此外，试验期间还使用了空气冷却。因此，将应力和频率引起的温度升高限制在10 K以下。岛津HMV-G21设备用于进行显微硬度试验和检测显微硬度分布。



图1 Shimadzu USF-2000A

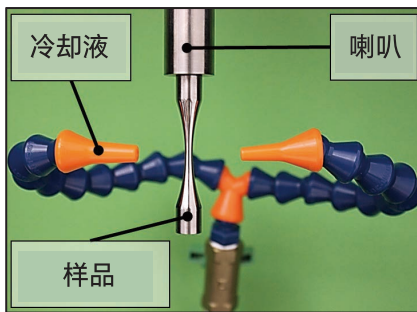
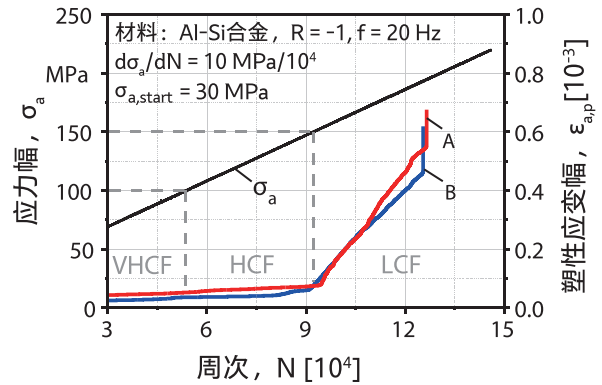


图2 振动期间的冷却液喷嘴¹⁴⁾

3. 结果

图3中采用了载荷增长试验（LIT）来区分LCF、HCF和VHCF疲劳条件。在HCF中，塑性主要是微尺度的，仅限于几个颗粒。在应力幅相当的情况下，未见宏观的不可逆循环塑性。根据塑性应变反应，该等级合金的最大应力幅为100 MPa。该应力幅值为HCF和VHCF区域之间的边界。当试样在150 MPa幅值接近塑性饱和时，会发生均匀的宏观塑性变形。应力释放处理使AlSi12（A-B）反应更加一致¹⁴⁾，从而可以忽略破坏应力幅差异。与批次B相比，批次A积累的不可逆塑性应变更大。



批次	合金	PH	SR [2hrs]
A	AlSi12	./.	240 °C
B	AlSi12	200 °C	240 °C

PH: 平台加热, SR: 应力释放

图3 AlSi12批次A[SR]和B[PH+SR]的塑性应变累积¹⁴⁾

在冷却梯度方向, AISi12的形态是等轴胞状枝晶, 而不是纵向柱状枝晶。平台加热 (PH) 的影响见图4a和图4c, 尽管两个试样均已应力释放 (SR)。观察到枝晶壁增厚。饱和硅导致形成较大的聚体。Z平面枝晶壁增厚程度更高。

如果Z平面上不存在PH, 批次B的质地会更加坚硬。

因此, 微观结构失去了一些各向异性。微观结构反映了关于冷却梯度和凝固方向的几乎所有信息。所达到的强度主要取决于晶粒细度和硅颗粒在铝基体中的过饱和度。

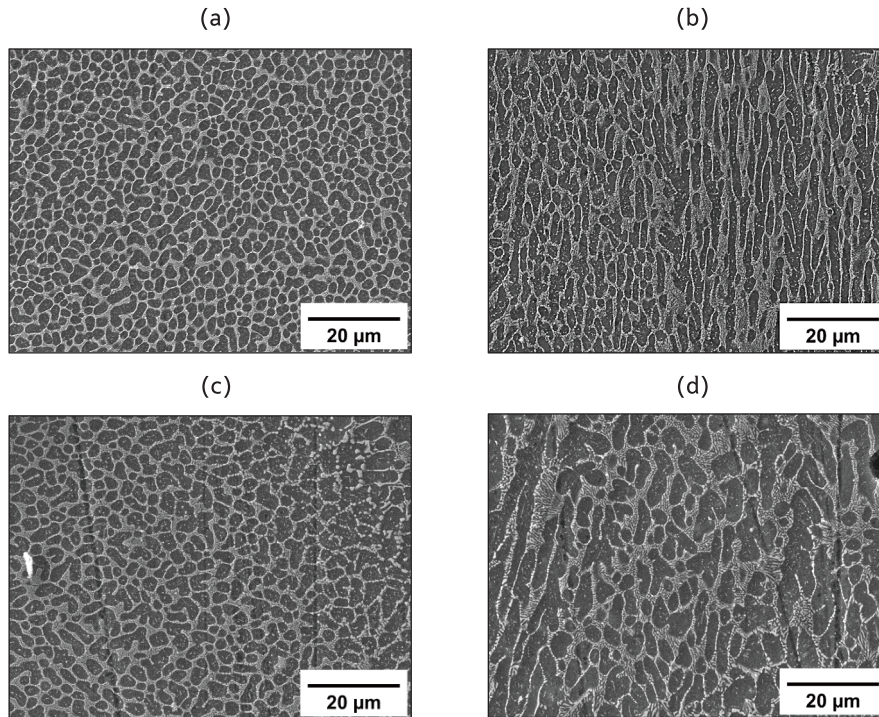


图4 扫描电子显微镜下平台加热 (PH) 对 AISi12 批次 A [SR] 和 B [PH+SR] 的影响:
a) 批次 A (XY 截面), b) 批次 A (Z 截面), c) 批次 B (XY 截面), d) 批次 B (Z 截面)¹⁴⁾

无损 X 射线微型计算机断层扫描 (μ -CT) 试验用于估算孔隙的体积分数。容积断层扫描图像见图 5a 和 5b。这些样品的 μ -CT 密度分数分别为 99.75% 和 99.88%。通过 μ -CT 获得的孔隙分数通常比金相图像分析得到的值小。与金相研究结果相符, 即由于平台加热, 孔隙度降低。

μ -CT 检查材料的整个内部结构, 因此比基于切片的二维金相分析更可靠。图 5 显示, 当批次 B 平台被加热时, 孔隙频率一致降低。在重熔部位还可以看到不紧密的单根 Mg_2Si 。

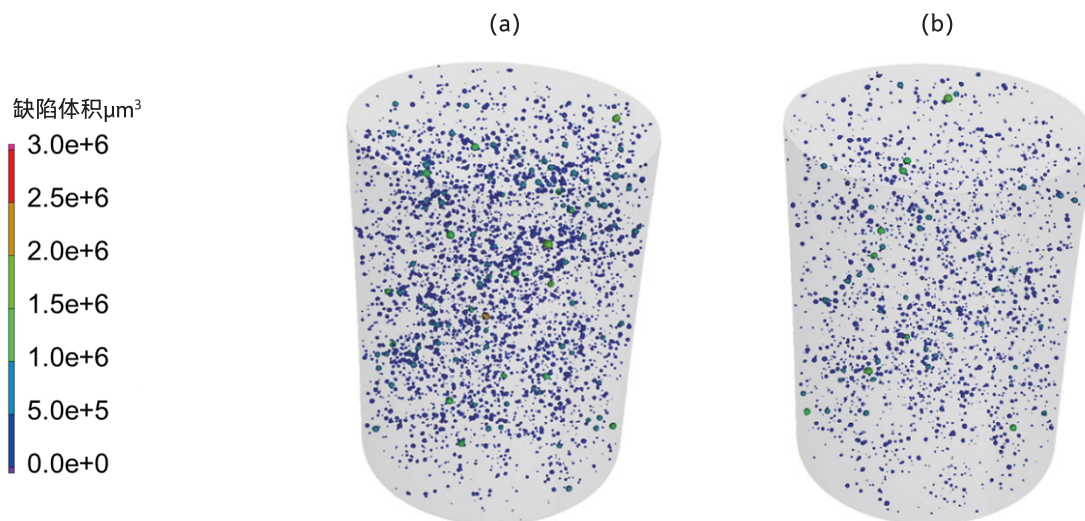


图5 批次 A [SR] 和批次 B [PH+SR] 的 3D μ -计算机断层扫描缺陷分析¹¹⁾

AISI12的微观结构改变会影响其显微硬度。如图6所示，AISI12批次B的硬度值低于批次A。这是由于它们不同的加热过程造成的。由于PH的存在，冷却速度减慢，导致硅沿晶界发生初始部分偏析。因此，在PH之后，早期扩散点较少。

另一方面，在SR之前，由于没有PH，出现更多起始点，从而导致硅颗粒饱和度更高。这种下降与微观结构和残余应力分布图中的冷却速率下降相一致。

在0.05的显著性水平上，平台加热和后处理应力降低的影响有统计学意义。

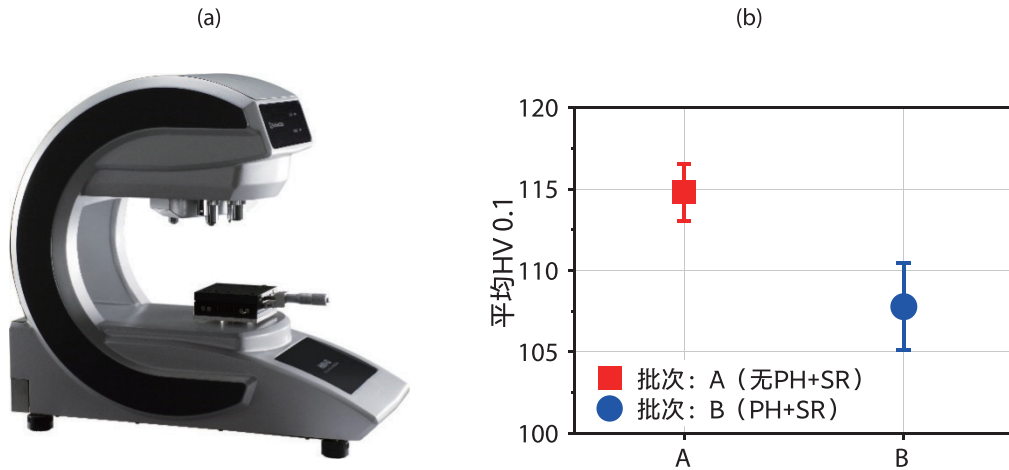


图6 a) 岛津HMV-G硬度试验机, b) 硅含量和微观结构特征对AISI12批次A[SR]和批次B[PH+SR]显微硬度特性的影响¹¹⁾

完整Woehler曲线见图7，包括高周疲劳（HCF）和超高周疲劳（VHCF）部分。批次B试样（有平台加热）的疲劳强度高于批次A试样1E9循环（无平台加热）时的疲劳强度。这种趋势并不连续；在应力幅较大时，批次A的疲劳强度高于批次B，但在120 MPa时，趋势发生逆转。出现这种现象的原因是在各种应力增加情况下，微观结构与处理引起的缺陷（瑕疵）之间的相互作用。与HCF一样，材料的疲劳强度取决于其抗断裂发生强度，而细粒材料的抗断裂强度更高。

在微观结构层面，较小的枝晶宽度可能是试样在140 MPa、无平台加热情况下延长寿命的原因。另一个关键点是两批产品的残留孔隙度存在差异。这些孔隙在较低的应力下相对被动，这意味着在断裂传播阶段，较粗微观结构比较细微观结构的疲劳寿命长。结果表明，平台加热对疲劳寿命的影响与施加的载荷水平成正比。

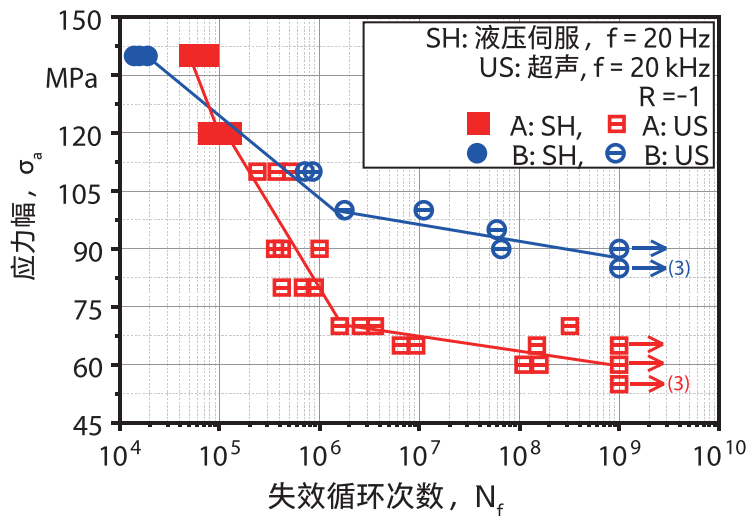
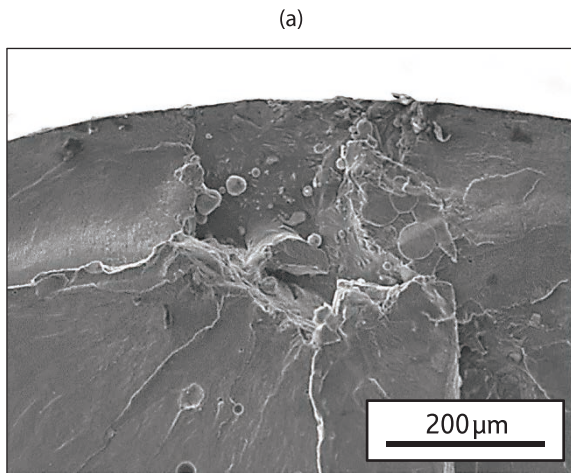


图7 AISI12批次A[SR]和批次B[PH+SR]的S-N (Woehler) 曲线，使用液压伺服（20 Hz）和超声（20 kHz）试验确定的直至VHCF范围的结果¹¹⁾

图8a和8b示出了批次A的裂纹萌生孔隙。由于不规则的形状和内部凹槽形态，缺陷尺寸增大了三倍，即使在70 MPa应力幅，疲劳寿命也显著降低。



在1E5循环时，HCF条件下的疲劳强度不同大大降低。批次A的微观结构更精细，可延缓疲劳裂纹的发展，从而推迟断裂。

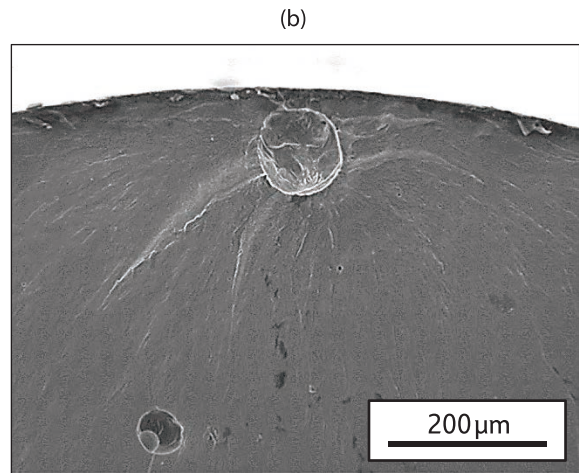


图8 (a) 70 MPa和 $N_f=1.6E6$ 条件下和 (b) 70 MPa和 $N_f=3.2E8$ 条件下，批次A[SR]裂纹起始侧的断面识别^[11]

这两个批次均预期经表面下孔隙引起失效。由于这些样品不是近净成形，而是经过机械加工达到最终几何形状，因此大量内部孔隙与表面更接近。

孔隙周围的平面应力集中和晶向的不理想组合，促使孔隙在中平面分离。多条裂纹聚合导致批次A快速失效，疲劳强度降低。

4. 摘要

探究了工艺引起的孔隙对增材制造（AM）合金AlSi12疲劳寿命和限度的影响。在HCF和VHCF条件下，孔隙导致疲劳寿命缩短。在LCF部分，平台加热会降低较高载荷下的疲劳寿命，但会延长HCF和VHCF条件下的疲劳寿命。使用岛津制作的超声疲劳（USF）试验设备进行了VHCF试验。实验中用的是脉冲与暂停比例为50:50的间歇式振动。利用选定的断面试验，可以精确地确定和验证AM铝合金的特定缺陷疲劳失效。对AM铝硅合金中的缺陷进行机械断裂分析，通过考虑独特的孔隙分布，可以可靠地估算出精细AM显微结构的疲劳寿命和限度。

以前的相关应用说明：

- SCA-300-071: USF-2000A - 增材制造AlSi12和压铸AlSi7Mg0.3超高周疲劳中的损伤机理分离
<https://www.shimadzu.eu/SCA-300-071>
- SCA-300-001: 激光增材制造（LAM）AlSi12合金的超高周疲劳（VHCF）评估
https://www.shimadzu.eu/sites/shimadzu.seg/files/SEG-images/EUIC/composite/SCA_300_001_Application_190214_VHCF_USF2000.pdf

作者的其他研究论文：

- <https://wpt.mb.tu-dortmund.de/en/research/publications/>

<参考文献>

- 1) Frazier, W.: Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23, 6 (2014) 1917–1928.
- 2) Campbell, I.; Bourell, D.; Gibson, I.: Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal* 18, 4 (2012) 255–258.
- 3) Bremen, S.; Meiners, W.; Diatlov, A.: Selective laser melting: A manufacturing technology for the future? *Laser Technik Journal* 9, 2 (2012) 33–38.
- 4) Lewandowski, J.; Seifi, M.: Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties. *Annual Reviews of Materials Research* 46 (2016) 151–186.
- 5) Ngnkou, J.D.; Nadot, Y.; Henaff, G.; Nicolai, J.; Haokan, W.; Cairney, J.; Ridosz, L.: Fatigue properties of AlSi10Mg produced by additive layer manufacturing. *International Journal of Fatigue* 119 (2019) 160–172.
- 6) Prashanth, K.; Scudino, S.; Klaus, H.; Surreddi, K.; Löber, L.; Wang, Z.; Chaubey, A.; Kühn, U.; Eckert, J.: Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. *Materials Science and Engineering A* 590 (2014) 153–160.
- 7) Buchbinder, D.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R.: Selective laser melting of aluminum diecast alloy – Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties. *Journal of Laser Applications* 27 (2015) S2.
- 8) Awd, M.; Tenkamp, J.; Hirtler, M.; Siddique, S.; Bambach, M.; Walther, F.: Comparison of microstructure and mechanical properties of Scalmalloy® produced by selective laser melting and laser metal deposition. *Materials* 111 (2018) 1–17.
- 9) Siddique, S.; Imran, M.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.; Walther, F.: Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* 221 (2015), 205–213.
- 10) Brandl, E.; Heckenberger, U.; Holzinger, V.; Buchbinder, D.: Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and Design* 34 (2012) 159–169.
- 11) Siddique, S.; Imran, M.; Walther, F.: Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy. *International Journal of Fatigue* 94, 2 (2017) 246–254.
- 12) Bagherifard, S.; Beretta, N.; Monti, S.; Riccio, M.; Bandini, M.; Guagliano, M.: On the fatigue strength enhancement of additive manufactured AlSi10Mg parts by mechanical and thermal post-processing. *Materials and Design* 145 (2018) 28–41.
- 13) Tang, M.; Pistorius, P.: Oxides porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting. *International Journal of Fatigue* 94, 2 (2017) 192–201.
- 14) Awd, M.; Siddique, S.; Walther, F.: Microstructural damage and fracture mechanisms of selective laser melted Al-Si alloys under fatigue loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 106 (2020) 102483.

岛津应用云



岛津企业管理（中国）有限公司
岛津（香港）有限公司

<http://www.shimadzu.com.cn>

用户服务热线电话： 800-810-0439
400-650-0439

免责声明：

※ 本资料未经许可不得擅自修改、转载、销售；
※ 本资料中的所有信息仅供参考，不予任何保证。
如有变动，恕不另行通知。

第一版发行日：2022年02月