

文章编号:1673-9981(2021)04-0334-07

打印角度对 SLM 增材制造 Al250C 铝合金的 残余应力影响分析

吴涛¹,张昭²,王冲³,张恺⁴

1. 德累斯顿工业大学轻量化技术和高分子研究所,德累斯顿 01307,德国;2. 大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116023;3. 北京航空航天大学航空科学与工程学院,北京 100191;4. 上海理工大学材料科学与工程学院,上海 200093



摘要: 激光选区融化 Selective Laser Melting (SLM) 作为先进的增材制造技术(又称 3D 打印)受到高附加值的航空航天产业特别关注,但是在 SLM 过程中不断重复的融化和凝固过程导致残余应力的出现,残余应力会导致几何变形、内部裂纹及零件在交变载荷或腐蚀环境下过早失效等各种问题。利用 SLM 技术基于不同打印方向制造 Al250C 铝合金样品,并且使用小孔法测量样品的残余应力。由于增材制造技术生产的金属部件的微观结构具有各向异性、强织构和微观偏析等特点,为了提高小孔法测量结果的可靠性,打印样品的材料各向异性特征需要考虑到残余应力的数据分析中。通过实验测量结果可以发现,打印方向对样品中的残余应力分布有显著的影响,使用各向异性和各向同性的材料系数分析残余应力的结果差别可达 70 MPa。

关键词: 增材制造;打印方向;小孔法;残余应力;各向异性

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

引文格式: 吴涛,张昭,王冲,等. 打印角度对 SLM 增材制造 Al250C 铝合金的残余应力影响分析[J]. 材料研究与应用,2021,15(4):334-340.

WU Tao, ZHANG Zhao, WANG Cong, et al. Effect of building direction on the residual stresses in Al250C aluminum alloy fabricated by SLM[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(4): 334-340.

增材制造又称 3D 打印,作为新兴的先进制造技术受到了广泛的关注,尤其在高附加值的航空航天产业。其中激光选区融化 Selective Laser Melting (SLM) 技术,因其打印样品具有优良的力学性能和精度尤其受到重视。但是,在 SLM 过程中不断重复的融化和凝固过程导致残余应力的出现,残余应力会导致几何变形、内部裂纹及零件在交变载荷或腐蚀环境下过早失效等各种问题。

Al250C 是由澳大利亚莫纳什大学研究团队成功开发的高强高韧增材制造的专用铝合金材料,用

该材料打印出的铝合金样品的屈服强度可达 580 MPa、抗拉强度超过 590 MPa 及延伸率可达 11%,所制备的构件通过了 250 °C 高温下持续 5000 h 的稳定试验,相当于发动机常规服役 25 年的要求^[1]。用该材料生产的航空铝合金 3D 打印结构件,更有希望替代目前航空航天上的部分钛合金构件,达到航空航天领域降低重量和节约成本的目的。

利用 SLM 技术基于不同打印方向制造 Al250C 铝合金,然后用小孔法测量 3D 打印样品的残余应力,再利用各向异性材料的残余应力分析模型,使用

收稿日期:2021-09-24

作者简介:吴涛(1984-),博士,目前在德国德累斯顿工业大学工作,主要研究方向为 3D 打印和轻量化

有限元方法根据材料的各向异性参数计算校准系数,最后分析不同的打印方向和材料各向异性对残余应力的影响。

1 残余应力测定方法的介绍

近年来,增材制造 Additive Manufacturing (AM)也称为 3D 打印,已成为制造具有复杂几何形状原型和组件最受关注的技术之一。AM 是指通过增材方式逐层连续打印材料,从数字模型制造三维物体的过程。在不同的 AM 工艺中,粉末床融合技术 Powder Bed Fusion (PBF)是制造金属部件最有前途的技术,其所使用的粉末尺寸在微米范围内,可以对具有高度复杂几何形状的部件进行近净成形^[2-3]。在 PBF 生产过程中,由于能量密度高和热影响区小,因此加热和冷却速度高,这有助于细化晶粒尺寸,从而使金属部件获得更好的机械性能。此外,该技术可通过设计和控制材料的微观结构来定制宏观力学性能。PBF 主要包括选择激光熔化 Selective Laser Melting (SLM) 和电子束熔化 Electron Beam Melting (EBM)。与 EBM 相比,SLM 能够制造出具有更精细微观结构和更好表面质量的部件。然而,在 SLM 工艺中高功率激光直接熔化冷基板上的金属粉末,会在制造的部件内产生较大的残余应力。残余应力会导致几何变形、内部裂纹,以及零件在交变载荷或腐蚀环境下过早失效等各种问题^[4]。

残余应力测量可分为非破坏性、半破坏性和破坏性方法^[5],这些方法都有固有的优点和缺点。与常规制造的样品相比,由于局部重复熔化和快速凝固现象,增材制造的金属部件的微观结构具有各向异性、强织构和微观偏析的特点。这对广泛使用的残余应力测量方法提出了新的挑战。最广泛使用的非破坏性方法是 X 射线衍射方法,它能够提供更晶体材料的近表面残余应力测量。 $\sin^2\psi$ 方法(ψ 为试样的倾斜角)已成功用于评估常规制造样品中的残余应力,然而对于材料具有高度各向异性和强纹理等特征,该方法可能会失效,因为一组特定的 $\{hkl\}$ 平面仅存在于特定的 ψ 角度,这会大大减少数据点的数量,导致不可靠的线性回归^[6]。晶群法 Crystallite-Group Method (CGM) 可以克服这些问题,CGM 是由 Willemse 等人发明后被 Hauk^[7]推广到单晶轧制

试样的测定,其基于的假设是样品的纹理组织可以用一个或几个微晶组来描述,并且每个微晶组都由具有相同晶体取向的微晶组成^[6]。残余应力可以利用测量的应变和解析模型进行分析评估,但依赖于主应力状态和立方晶体对称性的假设,而且这种方法仅限于某些特定的方向,如 ψ 为 0° 和 90° 。残余应力也可以利用数值方式计算,但需要考虑六个未知张量分量,这些分量可以通过将计算的应变与基于最小二乘法最小化方案的测量应变相拟合来获得,该方法已被应用于具有强各向异性的薄膜和涂层领域^[6],最近受到增材制造的关注。

小孔法 Hole Drilling Method (HDM) 是一种应用广泛的残余应力测试技术,可用于多种工程材料。该方法操作简单、可靠,对试件的损伤小。小孔法是在样品表面钻一个小孔让其应力释放,利用应变片测量释放的应变,并且建立测量的应变和应力的关系。ASTM E837-13 为小孔法的应力测试和数据分析提供了标准^[8]。小孔法最初是为测量各向同性和均质材料的残余应力而开发的,该方法假设钻孔释放的应变解析公式具有简单的三角函数形式。通过开发新的模型并以连续方式钻孔,小孔法可以用于测定各向异性材料中的深度残余应力^[9],其中校准系数由有限元方法计算获得,同时假设每个钻孔层应力均匀。小孔法也被应用于测量 3D 打印金属样品中的残余应力^[10],但该工作只考虑各向同性的材料状况。Bartlett 等人^[11]使用三维数字图像相关方法 Digital Image Correlation (DIC),开发了用于 SLM 打印过程残余应力原位测量的非破坏性方法。通过基于基尔霍夫板方程的二维分析模型将 DIC 测量的表面曲率信息转换为残余应力,但此工作采用的将表面曲率与残余应力相关联的模型过于简单,许多不确定性可能会影响测量结果。

在金属增材制造过程中,许多参数会影响残余应力的分布。科研人员研究了很多方法尝试去改变和减小残余应力,如优化 SLM 中使用的工艺参数激光功率、扫描速度、扫描策略、层高等,这样可以降低残余应力^[3, 12]。Ali 等人^[12]发现:在保持能量密度的情况下使用更长的曝光时间和更低的激光功率可以降低冷却速率和减小的温度梯度,因此 SLM 制造的 Ti-6Al-4V 组件中的残余应力可以被减小;扫描策略对残余应力的形成有显著影响,随着扫描矢量的延长,残余应力会被增大,因为扫描轨道之间的时

间延长会导致更高的热梯度;90°交替扫描策略会让SLM制造的Ti-6Al-4V部件产生最低的残余应力。此外,研究了零件几何形状,基板加热和打印方向都会对残余应力产生影响^[10]。

2 小孔法基本理论

小孔法是在贴在样品表面的应变片几何中心钻孔,使每一层材料的应力释放掉,然后在小孔附近建立新的力学平衡状态^[7]。图1为一个典型应变片及用于分析的坐标系的示意图^[13],其中 σ 代表应力、 ϵ 代表应变、 σ_{max} 和 σ_{min} 分别代表最大和最小应力。

ASTM E837-13a标准^[7]仅适用于各向同性材料。为了测量具有明显各向异性材料的残余应力,

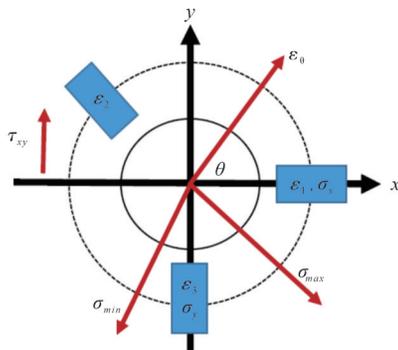


图1 典型应变片的几何形状和所使用的坐标系

Fig. 1 Typical geometry of a clockwise strain gauge and the coordinate system used

释放的应变和残余应力关系可以通过下面方程描述,其中 ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 是由已知位置处应变片测量到的应变,而 σ_x, σ_y 和 τ_{xy} 是平面内应力分量。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [C] \cdot (\sigma). \quad (1)$$

方程(1)的成立基于以下假设:材料具有线弹性行为,样品中的残余应力分布是均匀的,忽略沿厚度方向的应力梯度;系数 C_{ij} 为材料属性的函数,而不是等效于材料属性,它揭示释放应变与现有残余应力之间的关系,系数 C_{11}, C_{21} 和 C_{31} 可以通过施加均匀的应力值 σ_x 来获得,为了计算校准系数 C_{12}, C_{22} 和 C_{32} 可以在 y 方向上施加载荷,通过施加面内剪切载荷可以计算校准系数 C_{13}, C_{23} 和 C_{33} 。积分形式的残余应力评估需要通过有限元分析计算得到校准系数。

通过逐层小孔法能够确定样品在厚度方向上的非均匀残余应力分布^[7]。在这种情况下,第 i 个逐层内的释放应变是所有先前钻孔逐层的残余应力的影响总和,其值可以通过叠加表达式确定,并且假设每个逐层内的残余应力状态是均匀的。方程(2)中用于评估残余应力的每个矩阵 $[C]_{ij}$ 由9个系数 C_{ki} 组成,矩阵 $[C]_{ij}$ 内的系数 C_{kij} 不仅取决于当前第 j 个逐层中的残余应力 σ_j ,还取决于所有先前钻取的 i 个逐层中存在的所有残余应力。方程(2)可以通过迭代方式求解,可以参考文献^[13]获取关于评估残余应力方法的更多详细信息。

$$(\epsilon)_i = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_2 \end{pmatrix}_i = \sum_{j=1}^i \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}_{ij} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_j, \quad 1 \leq j \leq i; \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_i = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}_{ii}^{-1} \cdot \left(\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_2 \end{pmatrix}_i - \sum_{j=1}^{i-1} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}_{ij} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_j \right). \quad (3)$$

在样品表面测得的应变不能与应力直接建立关联。根据ASTM E837-13a^[7]可知,积分法是一种可靠的用于确定释放应变和残余应力之间关系的方法。对于确定积分法的应用,需要校准系数,而校准系数可以通过有限元计算模拟来确定。基于ABAQUS/Standard有限元的三维模型用于确定校准系数,其中所使用的网格单元为C3D8R类型,以

及材料被假设是线弹性的。图2为一个孔径2 mm和外径50 mm的圆柱模型^[13],图中 σ_r 代表径向应力、 $\tau_{r\theta}$ 代表剪应力。该模型由大约200,000个C3D8R型八节点实体单元组成,包括在钻孔附近的局部网格细化,特点是可以定义各向异性材料属性。平面内的应力分量 σ_x, σ_y 和 τ_{xy} 在径向坐标系中可以转换为 σ_r 和 $\sigma_{r\theta}$,用于定义孔边界处的载荷。

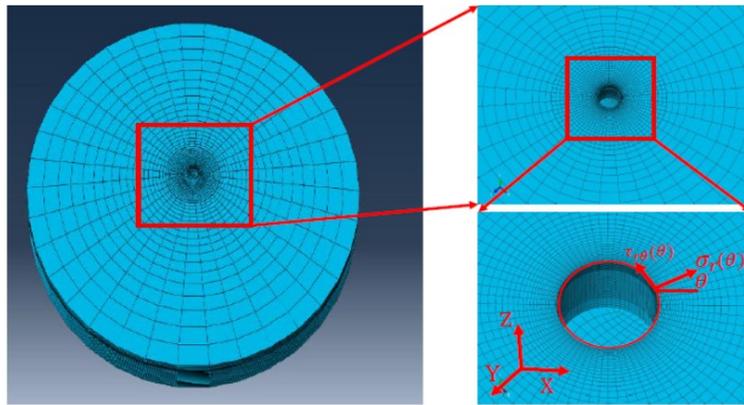


图2 ABAQUS有限元分析(FEA)模型(计算各向异性材料中的校准系数)及局部圆柱坐标系

Fig.2 ABAQUS finite element analysis (FEA) model (calculation of calibration coefficients in anisotropic materials) and local cylindrical coordinate system

为了获得方程(2)中的整个 $[C]_{ij}$ 矩阵,需要分别考虑 σ_x, σ_y 和 τ_{xy} 对 ϵ 的影响。 $[C]_{ij}$ 的第一列可以只考虑应力 σ_x ,第二列考虑应力 σ_y ,最后一列基于剪应力 τ_{xy} 。如上所述,载荷在孔侧面的径向坐标系中定义,用于在每个逐层内系数的有限元计算。从上面详述的计算程序可以总结,校准参数与给定的孔几何形状、应变片的类型和位置及材料特性都有关联。因此,一旦上述的任何一个参数发生变化,校准模型就需要更新以生成正确的校准系数分布。

3 实验部分

3.1 样品

Al250C 铝合金样品(10 mm×10 mm×50 mm)是使用基于 SLM 技术的倍丰 AMPPro SP500 (苏州倍丰激光科技有限公司)制造,打印角度分别为 0, 30, 45, 60, 75 和 90°,打印角度 30°的样品需要自支撑结构。图 3 为打印方向及测试样品,图中 A 和 B 为小孔法测试残余应力的位置。Al250C 粉末成分列于表 1。

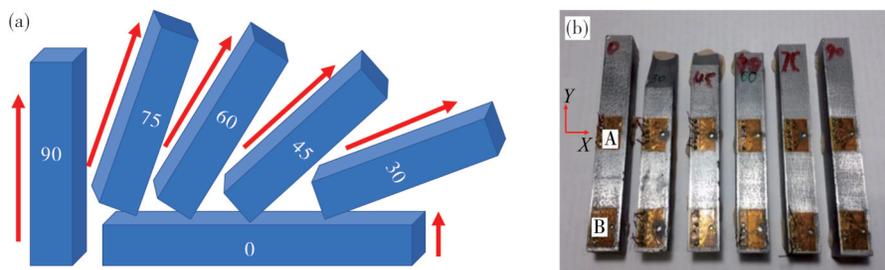


图3 打印方向(a)及样品(b)

Fig.3 Building direction (a) and printed samples (b)

表 1 Al250C 粉末成分

Table 1 Chemical composition of Al250C powder

元素	Mn	Mg	Sc	Zr	Fe	Si	Al
含量 $w/\%$	4.8	1.72	0.93	1.9	0.18	0.043	余量

2.2 方法

在残余应力实验中使用应变片测量因应力释放

而产生的变形。应变片通过粘合剂贴在样品表面,然后在应变片中心覆盖涂层,以防止在钻孔过程中去除箔片时造成其脱粘。以大约 20 μm 的步长增量钻孔,以提高应变测量的可靠性。连续钻孔步骤之间的等待时间调整为 2 min,以确保新钻孔前记录的应变数据的稳定性。在钻孔过程中,使用空气涡轮机以约 300,000 r/min 的钻孔速度并结合轨道技术

钻孔,使切屑下的材料能够自由移出孔,避免在材料中产生新的应力,保证孔的质量。

4 结果及讨论

4.1 打印方向的影响

每个样品都用小孔法测量两个点(图3中的A点和B点)且两个测试点位置都相同,所有样品均是在同样的打印参数下生产制造,所有样品的残余应力分析都是基于材料各项异性模型。因小孔法样品表面测试结果不准确,所以只保留从材料表面下20~600 μm 的测试结果,究其原因主要是由应变片的刚度对材料力学表现影响所造成的。当转孔深度低于600 μm 时,在样品表面使用应变片所测的应变信息会变得不敏感,从而导致结果出现很明显的分散性。另外,到达的测试深度也取决于选用的钻头直径,当前实验所选用的钻头直径为2 mm。根据ASTM E837-13a标准,小孔法提供可靠的测试结果不深于600 μm 。

图4为不同打印方向下通过小孔法测试A点的残余应力。从图4可见:对于打印方向为 0° 的样品,接近样品表面的残余应力为35 MPa左右的拉升应力;随着深度的增加,应力在100 μm 深度处增加至最大值75 MPa,然后其值几乎保持不变直至600 μm 的深度,表明应力的分布相对比较均匀。对于打印方向 0° 样品,表面残余应力为拉升残余应力,这是由于其残余应力测量点位于SLM构建的最后一层,在冷却过程中熔体材料被激光加热后收缩产生张力沉积层,因此最近添加的层将产生最大的张力,而最终较低的层受到冷却和收缩产生压缩残余应力。对于其它打印方向的样品,表面残余应力均为压缩应力。随着深度的增加,残余应力减小,然后转变为拉伸残余应力。对于打印角度为 30° 和 60° 的样品,接近表面的残余应力的特征值为-220 MPa,高于 45° 和 75° 样品的-100 MPa。值得注意的是3D打印的残余应力分布和扫描路径有很密切的关系,如果选用复杂的扫描路径,会得到非常不均匀的应力分布图。

图5为不同打印方向下通过小孔法测试的B点的残余应力。从图5可见,对于所有样品,B点的残余应力结果和A点的接近,从而验证了测试的可重复性及可靠性。对于打印取向为 0° 的样品,其表面

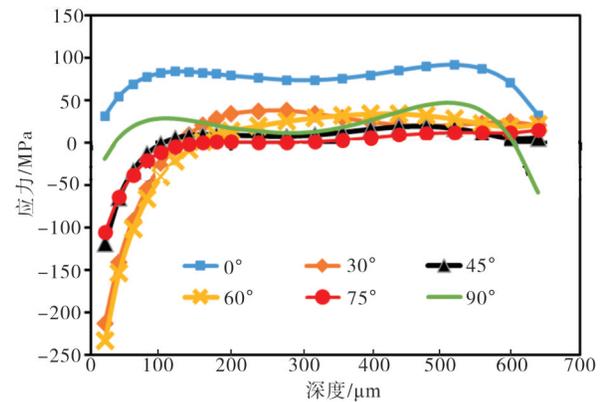


图4 不同打印方向的样品通过小孔法测试残余应力 σ_x (A点)
Fig. 4 Measured residual stresses σ_x in samples printed by different building directions through hole drilling method (Point A)

残余应力值约为300 MPa的拉升应力,高于同个样品的中间点(A点)。随着深度的加深,样品的应力值也开始减小,但一直处于被拉升的状态。对于其它打印方向的样品,靠近样品表面的应力都是压缩应力,随着深度的加深,应力的值也开始减小,到100 μm 处转成拉升残余应力,100 μm 后所有样品的拉升残余应力值都偏小大概在25 MPa左右。

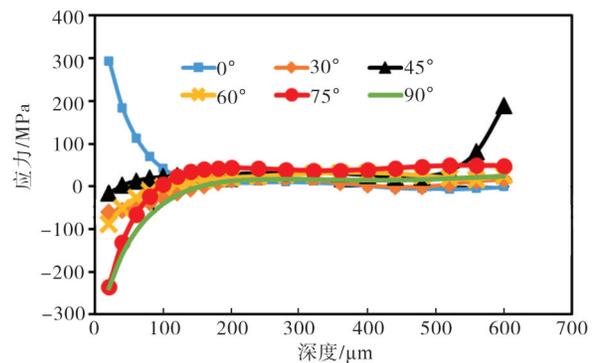


图5 不同打印方向的样品通过小孔法测试残余应力 σ_x (B点)
Fig. 5 Measured residual stresses σ_x in samples printed by different building directions through hole drilling method (Point B)

4.2 材料各项异性的影响

3D打印通过改变打印方向使材料微观结构会发生变化,这是因为晶粒主要沿构建轴排列成明显的柱状结构,从而导致材料的各向异性。对所有样品进行残余应力分析时,校准系数是根据样品的各向异性特性和厚度通过有限元法计算得到的。因为

Al250C 和 AlSi10Mg 性能接近,用于计算校准系数的样品力学参数参考文献[14]。这里主要比较各向异性和各向同性材料性能对残余应力的结果影响。

图 6 为打印方向 45° 样品的各项异性对残余应力值的影响。从图 6 可以看到:在各向异性和各向同性情况下存在明显的差别,这不仅体现在应力值方面,而且在变化趋势方面的差别也很明显;各向异性材料的表面残余应力为压缩残余应力,而各向同性材料的表面残余应力为拉升残余应力;在两种情况下不同深度的应力存在差别,分别是 0~200 μm 应力差为 75.4 MPa, 200~400 μm 为 65 MPa, 400~600 μm 为 80 MPa。

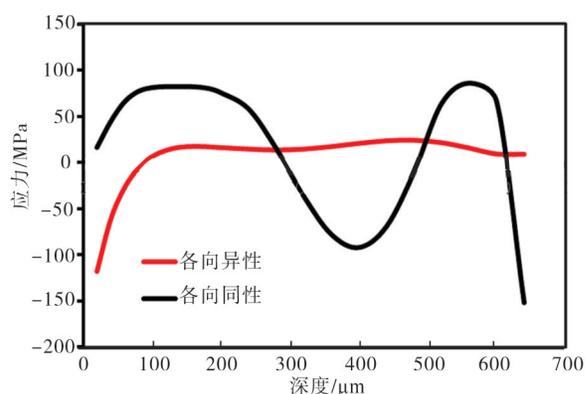


图 6 各向异性和各向同性材料残余应力的比较

Fig. 6 Comparison of residual stress between anisotropic and isotropic materials

除了考虑材料的各项异性对残余应力数据分析的影响以外,还有其它因素会影响残余应力的测量结果的可靠性,如孔加工引起的应力、孔花环偏心、应力集中引起的塑性效应、钻轴倾斜(相对于零件表面的法线)、应变片附近区域的温度变化、孔底圆角半径的影响及零深度偏移(由于错误的铣刀初始定位)等。

5 结论

通过先进的 SLM 技术制造打印 Al250C 铝合金样品,并且尝试了不同的打印方向。用小孔法准确测量打印样品的残余应力,为了提高小孔法结果的可靠性,打印样品的材料各向异性特征需要考虑到残余应力的数据分析中。

(1) 打印方向影响残余应力的值。0° 打印方向

样品的表面残余应力为拉升残余应力,对于其它打印方向样品的表面残余应力为压缩残余应力。

(2) 利用各向异性和各向同性系数得到的残余应力有明显的差别,不光在应力值上,还在趋势上观察很大的差别。这也表示选择各向异性参数对分析和测量 3D 打印样品残余应力的重要性。

参考文献:

- [1] 苏州倍丰发布超高强 3D 打印铝合金粉末材料使用温度达 250 °C [EB/OL]. (2010-08-31) [2020-09-22] https://www.Xianjichina.com/special_detail_414558.html.
- [2] ABDULHAMEED O, AL-AHMARI A, AMEEN W, et al. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(2):1-27.
- [3] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- [4] 赵剑峰,谢德巧,梁绘昕,等. 金属增材制造变形与残余应力的研究现状 [C]. 南京:南京航空航天大学, 2019:1005-2615.
- [5] GUO J, FU H Y, PAN B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021(4):54-78.
- [6] GERGAUD P, LABAT S, THOMAS O. Limits of validity of the crystallite group method in stress determination of thin film structures [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 319:9-15.
- [7] HAUK V. Röntgenographische und mechanische verformungsmessungen an grauguß [J]. *Arch Eisenhüttenwesen*, 1952, 23:353-361.
- [8] ASTM. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method [M]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [9] SICOT O, GONG X L, CHEROUAT A, et al. Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method [J]. *Journal of Composite Materials*, 2003, 37:831-844.
- [10] SALMI A, PISCOPO G, ATZENI E, et al. On the effect of part orientation on stress distribution in AlSi10Mg specimens fabricated by laser powder bed fusion (L-PBF) [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 67:191-196.
- [11] BARTLETT J L, CROOM B P, BURDICK J, et al. Revealing mechanisms of residual stress development in additive manufacturing via digital image correlation

- [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 1-12.
- [12] ALI H, GHADBEIGI H, KAMRAN M. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712: 175-187.
- [13] WU T, TINKLOH S, TRÖSTER T, et al. Measurement and analysis of residual stresses and warpage in fiber reinforced plastic and hybrid components[J]. Metals, 2021(11): 1-21.
- [14] TANG M, PISTORIUS P C. Anisotropic mechanical behavior of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting[J]. JOM, 2017, 69: 516-522.

Effect of building direction on the residual stresses in Al250C aluminum alloy fabricated by SLM

WU Tao¹, ZHANG Zhao², WANG Cong³, ZHANG Kai⁴

1. Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology, Technische Universität Dresden, Dresden 01307, Germany; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 3. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Selective laser melting (SLM) as an advanced additive manufacturing technology has drawn high attention from high-value aircraft and aerospace industries. Due to repeat heating-cooling phenomenon in the SLM process, the residual stresses are formed. The residual stresses can lead to geometric distortion, built-in cracking or premature failure of parts subjected to alternating loading or corrosive environments. The objective of this work is to fabricate Al250C aluminum alloy samples using the SLM technology with different building directions, as well as to measure the residual stresses through hole drilling method (HDM). The printed samples are characterized by the strong texture and anisotropy. For improving the reliability of the residual stress analysis, these factors are accounted for in the present work. Through the measurement results, it can be found that the building direction has a significant influence on the residual stress profile in the samples. Also, it is found that the difference in stress values between anisotropic and isotropic parameters used for residual stress evaluation can be over 70 MPa.

Key words: additive manufacturing; building direction; hole drilling method; residual stress; anisotropy