doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.04.007

设计计算

基于修正固有应变法的选区激光熔化成形SK型静态混合器残余应力预测

陈　意,周文奇,张　震,巩建鸣,耿鲁阳
(南京工业大学 机械与动力工程学院,南京 211816)

摘　要:针对选区激光熔化(SLM)成形过程中较大温度梯度引起的残余应力,影响零件使用范围与使用寿命的问题,采用修正固有应变(MIS)法,对SLM成形SK型静态混合器的残余应力分布进行预测,并以相同的工艺参数打印同尺寸的SK型静态混合器,使用X射线衍射(XRD)法对其残余应力进行测量。结果表明,MIS能够高效、准确地预测SLM成形SK型静态混合器的残余应力,与XRD测量结果相比,预测误差小于15%;对不同叶片扭转角度的SLM成形SK型静态混合器的残余应力进行预测,发现轴向应力随叶片扭转角度的增加明显增大。研究结果可为SK型静态混合器的残余应力的预测提供参考。

关键词:SK型静态混合器;选区激光熔化;固有应变法;残余应力
中图分类号:TH49;TQ515.9;TG485　　**文献标志码:**A

Residual stress prediction for selective laser melting SK-type static mixers based on the modified inherent strain method

CHEN Yi,ZHOU Wenqi,ZHANG Zhen,GONG Jianming,GENG Luyang
(School of Mechanical and Power Engineering,Nanjing Tech University,Nanjing 211816,China)

Abstract: In view of the fact that the residual stress caused by the large temperature gradient during the selective laser melting (SLM) forming process affects the application range and service life of parts,the residual stress distribution of SLM-formed SK-type static mixers was predicted using the modified inherent strain(MIS) method.Then,SK-type static mixers of the same size were printed with the same process parameters,and their residual stress was measured using X-ray diffraction(XRD).The results show that the MIS method can efficiently and accurately predict the residual stress in SLM-formed SK-type static mixers. Compared with XRD measurements,the prediction error is less than 15%.The residual stresses of SLM-formed SK-type static mixers with different blade torsion angles were predicted,and it was found that the axial stress increases significantly with the increase of blade torsion angle.The findings can provide a reference for predicting the residual stress in SK-type static mixers.

Key words:SK-type static mixer;selective laser melting(SLM);inherent strain method;residual stresses

0　引言

单螺旋形静态混合器又称SK型静态混合器,是出现最早的一种高效混合装置,其内部由不同扭转角度的叶片组成,相邻的叶片旋向相反且错开180°连接。SK型静态混合器作为管道系统的一部分,参与石油化工、生物制药、水处理等行业的混合、分散、传热和反应等过程,在服役过程中,受到介质的压力、冲刷及腐蚀等共同作用。由于传统制造的SK型静态混合器存在加工精度较低、较难进行一体化制造的缺点,难以满足节能减排和工业界对定制化产品的需求。选区激光熔化(SLM)作为一种新型的激光粉末床熔融工艺[1-3],能够直接制造形状复杂、力学性能好、精

收稿日期:2024-11-05　修回日期:2025-03-19

度高的金属零件，但由于金属重复熔化–凝固产生的局部拉伸和压缩，使SLM成形构件内部存在较大的残余应力[4–5]，导致零件在服役中会发生翘曲、分层开裂等[6]。因此，深入研究SLM成形构件的残余应力，高效预测变形过程，对优化打印参数、实现3D打印控形及控性至关重要[7]。

数值模拟是一种有效预测增材制造构件残余应力或变形的方法。目前，针对增材制造的传热传质过程，数值模拟方法主要集中在“热–流”耦合模型和“热–力”耦合模型[8–9]。然而，建立详细的、多尺度的热流体动力学数值模型，在模拟计算更大尺寸、复杂结构的残余应力和变形时仿真成本较高[10–11]。因此，为保证计算精度且同时节约计算时间，在热弹塑性模型的基础上，逐渐演变出了固有应变法。

固有应变理论最早由日本学者UEDA等[12]引入分析焊接热应力中。谢雷等[13]利用固有应变法，成功预测了机车车体顶盖总成的焊接变形；DENG等[14]基于计算固有应变值，成功预测了加强筋的焊接变形；卢耀辉等[15]使用固有应变法，成功预测了铝合金车体焊接接头的残余应力。

相对于焊接过程，增材制造存在更复杂的“层间效应”，为了提高固有应变法在增材制造中预测结果的准确性，研究人员进行了很多相关研究。LIANG等[16–17]修正了固有应变的定义，成功预测了激光成形的双悬臂梁和复杂标准部件变形，发现使用修正固有应变法进行逐层模拟时，精度明显提升，误差控制在10%以内。SIEWERT等[18]提出了以固有应变向量作为局部尺度模型输入力学层，对2根Ti_6Al_4V合金梁的残余变形和应力进行了模拟，得到的试验结果与模拟值吻合较好。此外，CHEN等[19]提出了一种多尺度建模框架，基于改进的固有应变模型中提取固有应变，并将固有应变用于悬臂梁的有限元模拟。门正兴等[20]基于固有应变法对SLM成形316L不锈钢叶轮进行了工艺仿真，数值模拟结果与试验结果的尺寸偏差控制在0.2 mm以内。WANG等[21]使用修正固有应变法准确预测了WAAM构件的变形和残余应力，并指出与详细的热力学模型比较，修正固有应变法具有较高的计算效率。

上述研究表明，修正固有应变（MIS）法预测增材制造构件残余应力，具有较高的准确性与可靠性。然而，目前的研究主要集中在悬臂梁等简单构件，针对工业商用零件鲜有报道。本文以316L不锈钢SK型静态混合器为研究对象，采用MIS法预测SLM制造SK型静态混合器的残余应力，并使用XRD法对实际打印的同尺寸SK型静态混合器的残余应力进行测量，验证残余应力预测结果的准确性。此外，叶片扭转角度是影响静态混合器混合效率的关键因素[22]，而SLM的成形角度也会影响无支撑结构的良品率[23]，因此，本文模拟SLM成形不同叶片扭转角度的SK型静态混合器，分析其残余应力的变化规律。

1 修正固有应变法

1.1 修正固有应变理论

基于固有应变法预测增材制造结构的残余应力和变形，首先，需要通过热–力耦合模型模拟SLM工艺的温度场与应力场，并从应力场中提取其固有应变；其次，建立增材制造零件的完整结构模型；然后，确定等效层厚度，将固有应变矢量加载到结构中，进行残余应力和变形的预测。其中，提取准确的固有应变是确保固有应变法预测结果精度的关键。为此，LIANG等[16–17]针对增材制造结构，提出了一种改进的固有应变理论，将固有应变定义为：

$$\varepsilon^{*}=\varepsilon_{p}^{I}+\varepsilon_{e}^{I}-\varepsilon_{e}^{S} \tag{1}$$

式中，ε^{*}为固有应变；ε_{p}^{I}和ε_{e}^{I}分别为中间状态下的压缩塑性应变和弹性应变（“中间状态”为理论压缩塑性应变达到最大值的瞬间）；ε_{e}^{S}为稳定状态下的弹性应变（“稳定状态”为部件完全冷却时的状态）。

1.2 固有应变的提取

为了提取准确的SLM工艺过程的固有应变，使用ABAQUS有限元软件建立了三维详细模型，采用顺序热–力耦合方法模拟SLM成形的工艺过程。该模型中包含6层粉末层，每层尺寸为1.2 mm×1.2 mm×0.035 mm，粉末层总厚度为0.21 mm；粉末层下的基板尺寸为6 mm×6 mm×0.8 mm，网格划分如图1所示。扫描策略如下：采用沿Y轴方向往复式扫描，从X正轴方向向X负轴方向依次扫描，扫描速度为800 mm/s，扫描间距为0.12 mm，激光功率200 W。

MYERS等[24]使用光子高速相机拍摄打印过程的温度分布，发现SLM的316L的熔池形状与椭球形更为接近。因此，在热力耦合详细模型中，本研究采用了文献[25]中提出的双椭球热源，如图2所示。

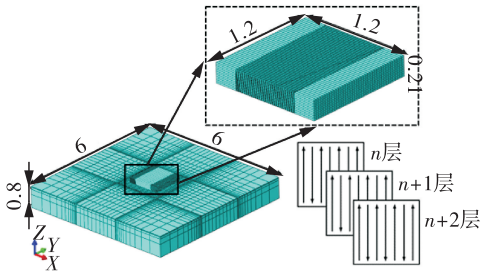


图1 热力耦合模型尺寸及网格划分情况

Fig.1 Dimensions and meshing of the thermodynamic coupling model

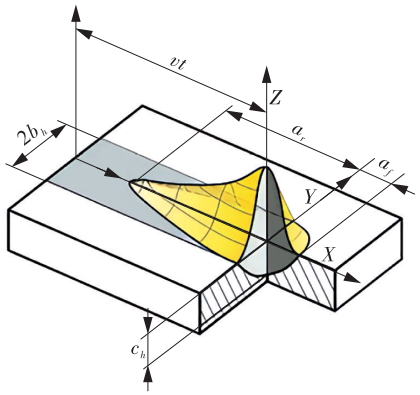


图2 双椭球热源模型

Fig.2 Double ellipsoid heat source model

双椭球热源模型中热流密度分布公式如下：

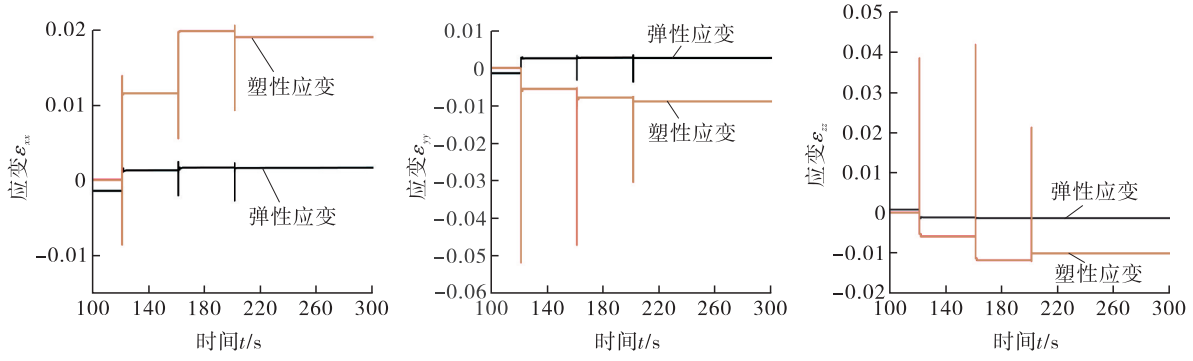
$$q_f(x,y,z)=f_f\frac{2^{5/2}\eta P}{\pi^{3/2}a_f b_h c_h}\exp[-2(\frac{x^2}{a_f^2}+\frac{y^2}{b_h^2}+\frac{z^2}{c_h^2})] \quad (2)$$

$$q_r(x,y,z)=f_r\frac{2^{5/2}\eta P}{\pi^{3/2}a_r b_h c_h}\exp[-2(\frac{x^2}{a_r^2}+\frac{y^2}{b_h^2}+\frac{z^2}{c_h^2})] \quad (3)$$

式中，q_f和q_r为前、后椭球的热流密度；f_f和f_r为前、后椭球能量分数；η为粉末的激光吸收率，取η=0.65[26]；P为激光功率；a_f, a_r, b_h, c_h为双椭球热源的各个半轴尺寸。

参照文献[27]对热源模型进行校核，得到a_f=b_h=52.1 μm，a_r=104.2 μm，c_h=78.2 μm，f_f=2/3，f_r=4/3。

从热-力耦合模型结果的第4层应力场中，提取得到材料点的三向弹塑性应变历史曲线，如图3所示。可以看出，后续层的沉积对冷却后底层的弹性应变几乎没有影响，但对冷却后的塑性应变影响显著。塑性应变绝对值随后续层累积整体在减小。根据式(1)计算获得在该工艺条件下的固有应变向量值为(-0.0271, -0.0025, 0.028)，并将其用于SK型静态混合器的固有应变模型。



(a)X方向的弹塑性应变演化历史 (b)Y方向的弹塑性应变演化历史 (c)Z方向的弹塑性应变演化历史

图3 热-力耦合模型提取的弹塑性应变曲线

Fig.3 The elastic-plastic strain curve extracted from the thermo-mechanical coupling model

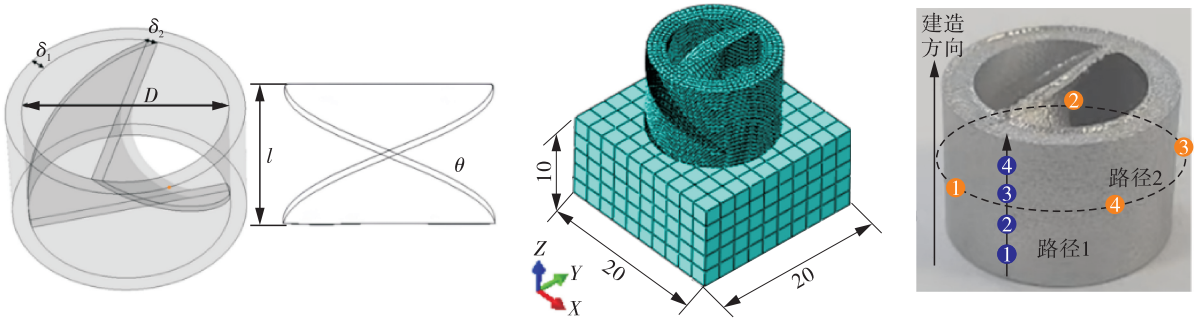
2 SLM成形SK型静态混合器的残余应力模拟

2.1 基于修正固有应变法的有限元模型

使用Abaqus软件建立SK型静态混合器三维有限元模型，外管内径D=10 mm，外管厚度δ_1=2 mm，管道长度l=10 mm，叶片扭转角度θ=180°，叶片厚度δ_2=1 mm。模型中基板底部完全固定，约束其在3个方向的平移和旋转，模型结构及其网格划分如图4(a)(b)所示。为验证预测结果的准确性，采用相同工艺参数，打印了和模型相同尺寸的SK型静态混合器，采用XRD方法测量其表面的残余应力，测量路径如图4(c)所示。实际打印构件中包含了286个层厚为35 μm的真实物理层。为了兼顾计算效率和计算精度，在仿真模型中，1个元层(激活单元高度)包含15个真实物理层。

模拟过程中，首先，使用“生死单元”方法将静态混合器模型的所有单元“杀死”；然后，沿建造方向将元层依次激活，模拟构件的SLM成形过程。激活元层时，将提取的固有应变向量值同时施加

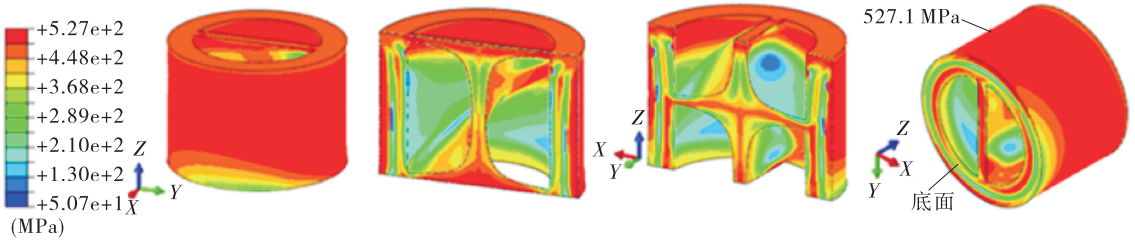
到该元层中所有单元上，因此，实际上忽略了同一元层中扫描顺序的影响。但在依次激活不同元层时，通过改变所施加的固有应变向量的方向，考虑了打印过程中扫描方向的变化。



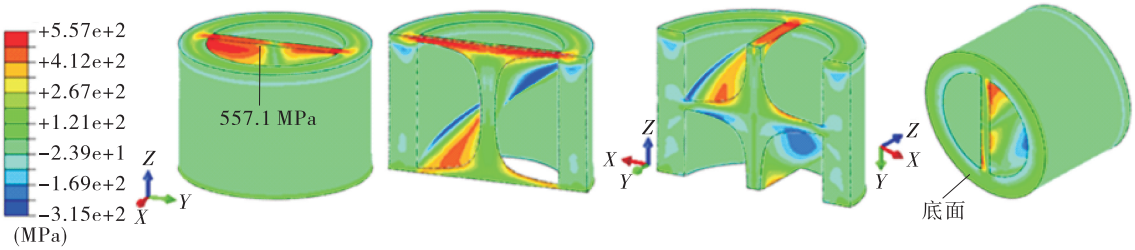
（a）模型结构　（b）网格划分　（c）测量路径

图4　模型结构及实际打印SK型静态混合器应力测量位置

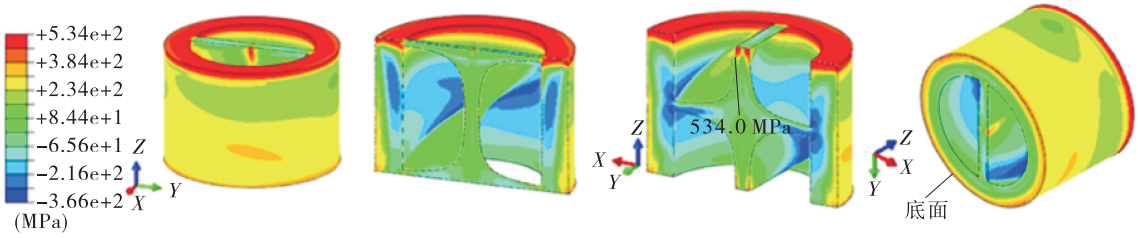
Fig.4　Model structure and the actual printed SK-type static mixer stress measurement position



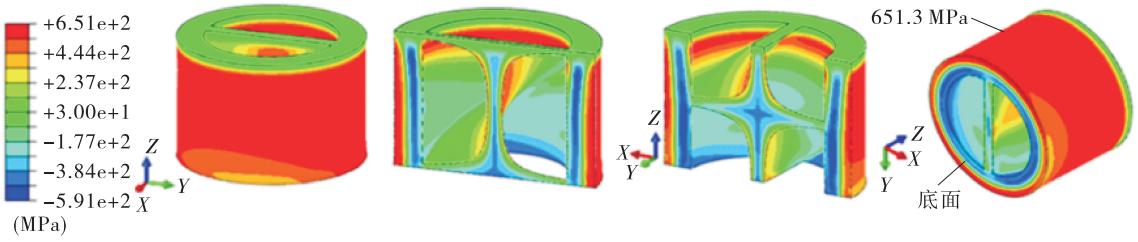
（a）Mises应力分布



（b）S_{11}分布



（c）S_{22}分布



（d）S_{33}分布

图5　修正固有应变方法计算模拟结果（从基板上切除后）

Fig.5　Inherent strain model prediction results (after removal from the substrate)

2.2 模拟预测结果

模拟完成后，将模型中的基板单元切除，SK型静态混合器的残余应力分布如图5所示。对于Mises应力，由图5(a)可以看出，移除基板后的静态混合器中残余应力较大的区域为管道外壁面、内壁面和叶片表面，且在底层靠近叶片与管道连接处会出现一定的应力集中，而远离连接处残余应力则相对较小。随着建造高度的增加，管道外壁残余应力逐渐增大至527.1 MPa，但应力分布逐渐均匀，这是因为随着打印层数的增加，残余应力受层间相互作用的影响越来越大，当打印层数增加到一定程度时，由于铺粉面积和扫描长度不变，残余应力的增加幅度越来越小。而在构件的顶部区域由于约束较小，Mises应力略有降低，约为460.0 MPa。

从图5(b)可以看出，对于径向应力S_{11}，筒壁与叶片整体呈现拉应力分布，应力较大的区域主要集中在叶片上表面及筒壁顶部与叶片连接处。最大值为557.1 MPa，出现在叶片顶部中心。压应力主要分布在扭转叶片下表面及筒壁中部与叶片连接处，最大压应力出现在连接处，为−315.2 MPa。

从图5(c)可以看出，环向应力S_{22}的分布规律与径向应力相似，但在管壁底部外侧存在应力集中，这是因为该部位与基板相连，变形受基板的约束最大。在筒体的中部由于材料的热变形主要受层间相互作用控制，环向应力的变化较为平缓，而顶部的材料由于在冷却时的收缩变形受到下层的约束，呈现出较大的拉应力。最大压应力同样出现在筒壁与叶片的连接处，为−366.7 MPa。叶片的中部表面呈现较大拉应力，且随着建造高度的增加而增大，至叶片顶部增加到最大值534.0 MPa。

从图5(d)可以看出，轴向应力S_{33}在管道外表面和叶片表面呈现为拉应力，且随着构建高度的增加而增大，并逐渐趋于稳定，在外管壁中部达到最大值651.3 MPa，但在混合器顶部突然大幅降低，这是因为顶部的材料在变形时受到的约束最小。叶片中心、管壁与叶片连接处主要为压应力，最大压应力出现在底部管壁与叶片的连接处，为−591.4 MPa。

为了验证残余应力模拟结果的准确性，采用XRD法对实际打印的同尺寸混合器进行了残余应力测量。同时，为了确保测量精度，测量点的选取避开了边缘部位，在管道外表面2个分析路径上(见图4)，分别选取4个点，使用XRD测量残余应力。路径1的4个点沿构建高度选取；路径2为构建高度h=5 mm的环线，以与路径1的交点为起点，沿逆时针旋转选取4个点。测量所用设备为IXRD COMBO型X射线残余应力测量装置，使用Cr_K−Alpha为射线源进行测量，波长为2.291 Å，测量晶面为{211}，操作电压20 kV，工作电流4 mA，曝光时间1 s，曝光次数10次，光圈直径为1 mm。

图6、图7分别示出预测得到的SK型静态混合器在管道外表面分析路径1和路径2上的残余应力分布及与XRD测量结果的比较。因为管道外壁中部的径向应力极小，因此，仅比较环向应力与轴向应力。可以看出，预测结果与XRD测量结果吻合较好。

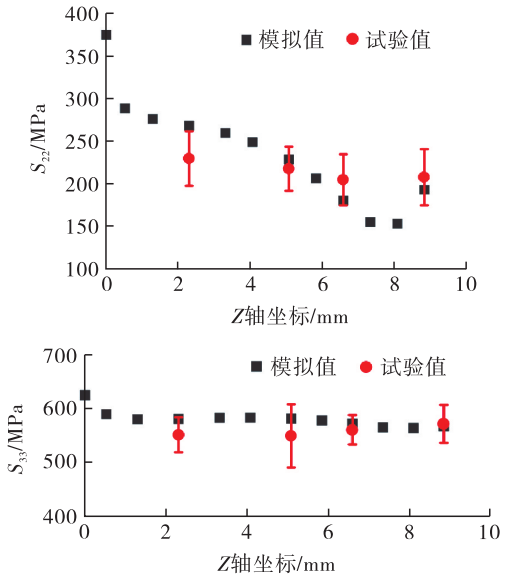


图6 路径1的测量结果与模拟结果对比

Fig.6 Comparison of the measurement results of path 1 with the simulation results

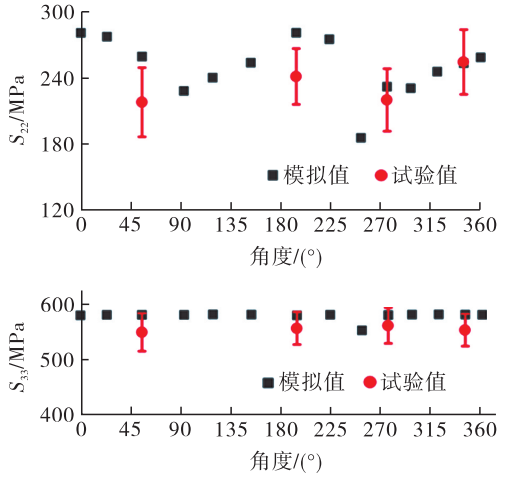


图7 路径2的测量结果与模拟结果对比

Fig.7 Comparison of the measurement results of path 2 with the simulation results

从图6可以看出，在沿建造方向（轴向）的路径1上，环向应力S_{22}预测值与测量值的误差最大为13.32%，轴向应力S_{33}的预测值与测量值的误差小于5.35%。从图7可以看出，在外壁面的环向路径2上，环向应力S_{22}、轴向应力S_{33}的预测值和测量值的最大误差分别为14.17%，4.82%。2条路经上环向应力的误差均明显大于轴向应力，可能是因为激活元层施加固有应变时是整体同时加载，忽略了同一层中的扫描顺序，这对环向应力的影响要大于轴向应力。整个模拟过程在微型计算机上所用计算时间小于30 min，而预测结果与XRD测量结果吻合较好，表明修正固有应变方法能够快速且相对准确地预测SLM成形较复杂构件的残余应力分布。

2.3　不同扭转角度的SK型静态混合器残余应力分布

静态混合器的长度、管道壁厚、叶片扭转角度和厚度等都会影响流体混合效果，其中，叶片扭转角度不但对流体混合效果影响最大，同时也对SLM的成形质量有显著影响。基于固有应变法，对不同叶片扭转角度的SLM成形SK型静态混合器的残余应力分布开展研究。所建模型的尺寸均与图4相同，仅改变叶片扭转角度依次为60°，90°，120°，180°，360°，模拟得到其残余应力分布见图8。可以看出，不同叶片的SK型静态混合器具有相似的残余应力分布规律，在管道与叶片连接区域均存在较大的残余应力。

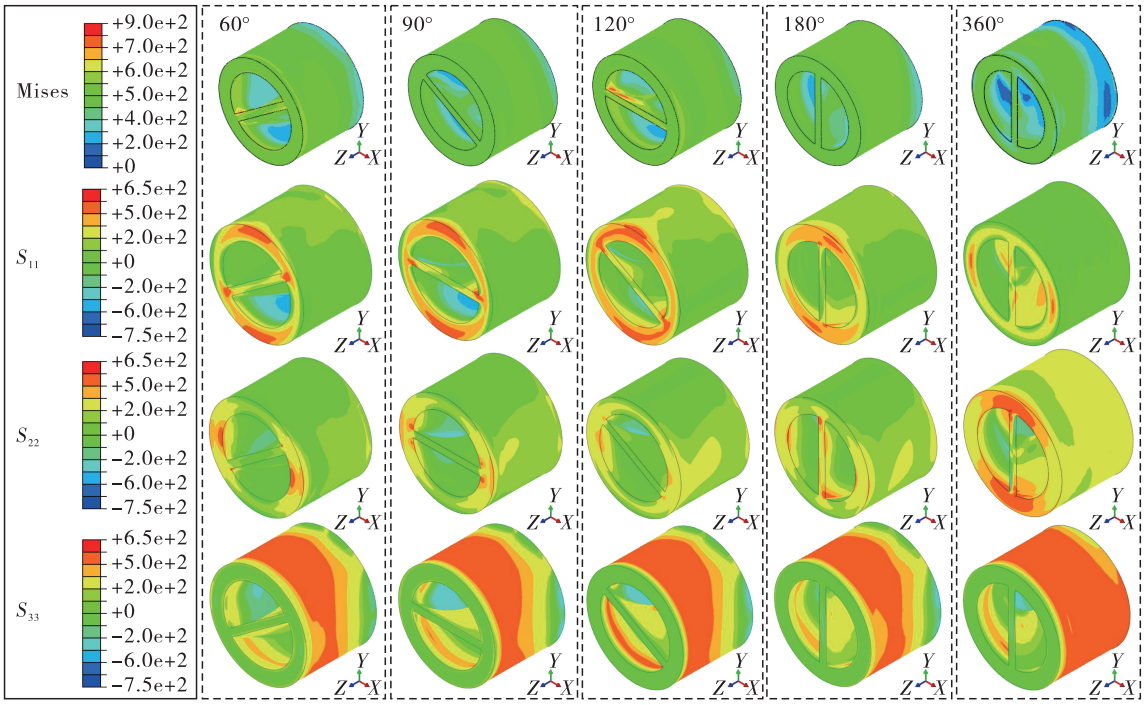
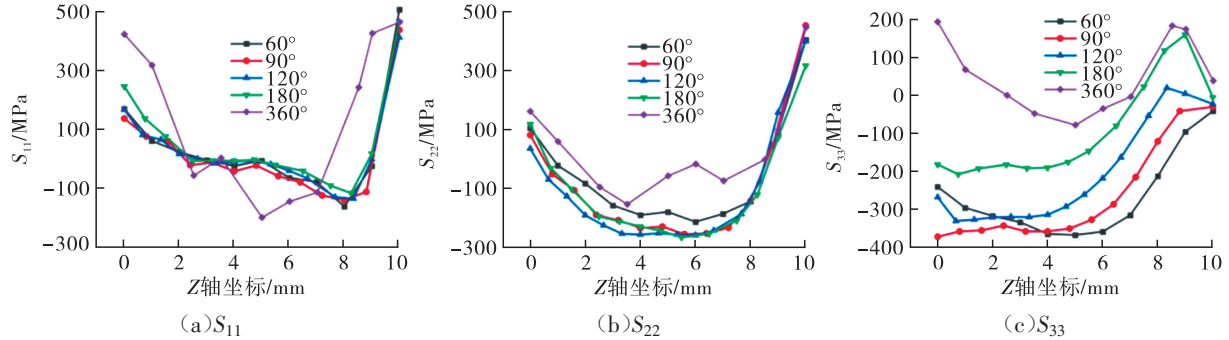


图8　不同扭转角度SK型静态混合器的Mises应力和三向应力分布

Fig.8　Mises stress and three-way stress distribution in SK-type static mixer with different torsion angles

沿管道与叶片的连接线建立分析路径，对路径上的残余应力分布进行分析，如图9所示。



（a）S_{11}　（b）S_{22}　（c）S_{33}

图9　管道与叶片连接线的应力分布

Fig.9　Stress distribution at the connection between the pipe and the blade

从图中可以看出，不同叶片扭转角度下静态混合器径向应力S_{11}与环向应力S_{22}分布规律一致，从混合器底部沿建造方向（轴向）均呈现先降低再增大的特点。

当叶片扭转角度小于180°时，叶片扭转角度对S_{11}与S_{22}的影响不大；但当叶片扭转角度为360°时，与其他扭转角度的预测结果间差异较明显。在管道与叶片的连接线上，轴向应力S_{33}随着扭转角度的增大而显著增加，且在叶片扭转角度小于180°时，主要呈现为压应力；当叶片扭转角度为360°时，主要呈现为拉应力。

3 结论

（1）采用修正固有应变方法能够较好地预测SLM成形SK型静态混合器的残余应力，预测值与XRD测量值之间误差小于15%。

（2）基板的约束对SLM成形SK型静态混合器底部的残余应力分布影响较明显。随着打印层数的增加，残余应力的分布逐渐由层间相互作用控制，残余应力沿构造方向的变化逐渐趋于稳定。但在混合器顶部，由于变形受到的约束与中部不同，残余应力的分布又会有明显的变化。

（3）不同叶片扭转角度的SLM成形SK型静态混合器，在建造方向中部，管道与叶片连接处的径向应力与环向应力主要呈现为压应力，在底部和顶部呈现为拉应力，且受扭转角度影响不显著；而轴向应力随叶片扭转角度的增加明显增大，且当扭转角度小于180°时主要为压应力，当扭转角度为360°时则以拉应力为主。

参考文献：

[1] URIONDO A, ESPERON-MIGUEZ M, PERINPANAYAGAM S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(11): 2132-2147.

[2] 黄羚惠，崔强，张伯君，等.送粉式激光增材制造工艺修复钛-不锈钢复合板的研究[J].压力容器，2024，41(6)：1-7.
HUANG L H, CUI Q, ZHANG B J, et al. Study on repairing of titanium-stainless steel clad plate by powder feeding laser additive manufacturing process [J].Pressure Vessel Technology, 2024, 41(6): 1-7.

[3] 王楚，李佳奇，刘洋，等.基于路径质量评估算法的LPBF分区扫描策略[J].机电工程，2024，41(12)：2243-2251.
WANG C, LI J Q, LIU Y, et al. Partition scanning strategy of laser powder bed fusion based on path quality evaluation algorithm [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(12): 2243-2251.

[4] YADROITSEV I, YADROITSAVA I. Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2015, 10(2): 67-76.

[5] ABOULKHAIR T, EVERITT N, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2014, 1-4: 77-86.

[6] 李一义，王芳，黄逸，等.残余应力对P91钢断裂行为的影响[J].压力容器，2024，41(2)：28-36.
LI Y Y, WANG F, HUANG Y, et al. Effect of residual stress on the fracture behavior of P91 steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(2): 28-36.

[7] ALMANGOUR B, GRZESIAK D, CHENG J, et al. Thermal behavior of the molten pool, microstructural evolution, and tribological performance during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites: Experimental and simulation methods [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 288-301.

[8] LOH L E, CHUA C K, YEONG W Y, et al. Numerical investigation and an effective modelling on the selective laser melting (SLM) process with aluminium alloy 6061 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 288-300.

[9] HUSSEIN A, HAO L, YAN C, et al. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting [J]. Materials & Design, 2013, 52: 638-647.

[10] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones [J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36-45.

[11] YAN W, GE W, QIAN Y, et al. Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting [J]. Acta Materialia, 2017, 134: 324-333.

[12] UEDA Y, FUKUDA K. New measuring method of three-dimensional residual stresses in long welded joints using inherent strains as parameters—LZ method [J]. Journal of Engineering Materials and

Technology，1989，111(1)：1-8.

[13] 谢雷，罗宇，谢志勇，等.基于固有应变的大型焊接结构变形的预测[J].焊接学报，2004，25(2)：107-110.
XIE L，LUO Y，XIE Z Y，et al. Prediction of deformation of large welded structures based on in inherent strain[J].Transactions of the China Welding Institution，2004，25(2)：107-110.

[14] DENG D，MURAKAWA H，LIANG W. Numerical simulation of welding distortion in large structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering，2007，196(45)：4613-4627.

[15] 卢耀辉，张德文，赵智堂，等.焊接残余应力对动车组铝合金车体疲劳强度的影响[J].交通运输工程学报，2019，19(4)：94-103.
LU Y H，ZHANG D W，ZHAO Z T，et al.Influence of welding residual stress on fatigue strength for EMU aluminum alloy carbody [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2019，19(4)：94-103.

[16] LIANG X，CHENG L，CHEN Q，et al. A modified method for estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single-walled structures fabricated by directed energy deposition [J]. Additive Manufacturing，2018，23：471-486.

[17] LIANG X，CHEN Q，CHENG L，et al. Modified inherent strain method for efficient prediction of residual deformation in direct metal laser sintered components [J]. Computational Mechanics，2019，64(6)：1719-1733.

[18] SIEWERT M，NEUGEBAUER F，EPP J，et al. Validation of Mechanical Layer Equivalent Method for simulation of residual stresses in additive manufactured components [J]. Computers & Mathematics with Applications，2019，78(7)：2407-2416.

[19] CHEN Q，LIANG X，HAYDUKE D，et al.An inherent strain based multiscale modeling framework for simulating part-scale residual deformation for direct metal laser sintering [J]. Additive Manufacturing，2019，28：406-418.

[20] 门正兴，张学睿，包有宇，等.基于Simufact Additive的激光选区熔化成形过程有限元分析[J].锻造与冲压，2021(21)：28-30.
MEN Z X，ZHANG X R，BAO Y Y，et al. Finite element analysis of laser selective melting forming process based on Simufact Additive [J]. Forging and Stamping，2021(21)：28-30

[21] WANG Y，LI Q，QIAN L，et al. A modified inherent strain model with consideration of the variance of mechanical properties in metal additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes，2021，72：115-125.

[22] BYRDE O，SAWLEY M L. Parallel computation and analysis of the flow in a static mixer[J].Computers & Fluids，1999，28(1)：1-18.

[23] 胡伟南，冯颖，王迪，等.激光选区熔化成形低角度无支撑结构的方法与工艺研究[J].中国激光，2024，51(4)：168-180.
HU W N，FENG Y，WANG D，et al. Method and process of selective laser melting forming low-angle support-free structures[J].Chinese Journal of Lasers，2024，51(4)：168-180.

[24] MYERS A J，QUIRARTE G，OGOKE F，et al. High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera [J]. Additive Manufacturing，2023，73：103663.

[25] GOLDAK J，CHAKRAVARTI A，BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B，1984，15(2)：299-305.

[26] WILLY H J，LI X，CHEN Z，et al. Model of laser energy absorption adjusted to optical measurements with effective use in finite element simulation of selective laser melting[J].Materials & Design，2018，157：24-34.

[27] BJELIC M，RADICEVIC B，KOVANDA K，et al. Multi-objective calibration of the double-ellipsoid heat source model for GMAW process simulation[J]. Thermal Science，2022，26：2081-2092.

作者简介：陈意(2000)，男，主要研究方向为金属增材制造有限元模拟，通信地址：211816江苏省南京市浦口区浦珠南路30号南京工业大学，E-mail：chenyi0512@njtech.edu.cn。

通信作者：耿鲁阳(1976)，男，副教授，硕士生导师，主要从事化工过程机械、高温强度和材料、断裂与失效分析，以及增材制造结构完整性等方面研究工作，通信地址：211816江苏省南京市浦口区浦珠南路30号南京工业大学，E-mail：young@njtech.edu.cn。

本文引用格式：
陈意，周文奇，张震，等.基于修正固有应变法的选区激光熔化成形SK型静态混合器残余应力预测[J].压力容器，2025，42(4)：48-55.
CHEN Yi，ZHOU Wenqi，ZHANG Zhen，et al.Residual stress prediction for selective laser melting SK-type static mixers based on the modified inherent strain method[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(4)：48-55.