

分区扫描对激光沉积成形钛合金T型接头温度场与应力场的影响*

邢本东, 张 瑞, 王福雨, 王向明

(航空工业沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

[摘要] 从分区扫描可以有效降低激光沉积成形大尺寸结构残余应力的工程经验出发, 采用热弹塑性有限元理论, 建立可以模拟成形过程温度场与应力场的有限元模型, 研究不同分区扫描方式对激光沉积成形钛合金T型接头温度/应力演变过程、监测点热循环曲线以及残余应力的影响。结果表明: 热应力与残余应力最大值均出现在T型接头上缘条与基板接触的4个外角点上, 与分区扫描方式无关; 分区扫描对T型接头外角点与短边外面中点影响较小, 对于内部节点、内角点与长边外面中点的热循环曲线及热应力曲线有一定的影响; 分区扫描对残余应力分布影响较大, 尤其是对沿指定截面残余应力分布规律与最大残余应力幅值有显著的影响。

关键词: 激光沉积成形; 分区扫描; T型接头; 温度场; 应力场

Effect of Subarea-Scanning on Temperature and Stress Field of Titanium Alloy Formed by Laser Deposition Forming

XING Bendong, ZHANG Rui, WANG Fuyu, WANG Xiangming

(AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

[ABSTRACT] Based on the engineering experience that subarea-scanning can effectively reduce the residual stress of large-scale structure formed by laser deposition forming, a finite element model based on thermo-elastic-plastic finite element theory was established to simulate the temperature and stress fields in the forming process. And the effects of different subarea-scanning on temperature and stress evolution, thermal cycling curve and residual stress of T-joint formed by laser deposition forming were studied. The results showed that the maximum values of thermal stress and residual stress occurred at the four outer corners of the contact between the upper edge strip and base metal, which is independent of the zoning method; The subarea-scanning has little effect on the outer corner points and the short outer midpoints of T-joint, but has certain influence on the thermal cycle curve and thermal stress curve of the inner corner points, the inner points and the long outer midpoints; Subarea-scanning has a great influence on the distribution of residual stress, especially on the distribution law and amplitude of residual stress along the specified section.

Keywords: Laser deposition forming; Subarea-scanning; T-joint; Temperature field; Stress field

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.073

激光沉积成形大尺寸结构件过程中, 由于不均匀热输入导致的变形与开裂问题^[1-2], 一直困扰着工程界。通常的做法是, 工艺人员凭借经验或反复试错的方法寻找减小变形与热应力/残余应力的工艺解决方案, 这种做法的成本和代价是较大的。从宏观尺度模拟激光沉积成形过程的温度场与应力场对于工程实际应用具有

重要价值。

多年来, 国内学者在激光沉积成形工艺温度场与应力场数值模拟方面的研究工作主要特点是采用热弹塑性有限元方法, 在无构型特征的小尺寸有限元模型上研究不同工艺参数或扫描路径对成形过程的影响, 在带有构型特征的大尺寸模型方面研究工作还比较少。如北京有色金属研究院席明哲等^[3]进行了激光沉积成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟; 清华大学胡围

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1100500)。

围等^[4]对激光多层熔覆成形的传热行为进行了数值模拟,分析了激光功率、扫描速度、间隔时间等对熔池尺寸及其稳定成形的影响;沈阳自动化研究所孔源等^[5]利用 ANSYS 参数化编程实现多层多道的激光沉积成形过程三维温度场与应力场的数值模拟,王福雨等^[6-7]利用有限元软件 MARC 研究了空心叶片成形以及冷却过程中温度场与热应力场的变化过程;重庆电子工程学院宋丽莉等^[8]基于 MARC 软件研究了 TC4 钛合金成形过程中温度场与残余应力场的分布;西北工业大学贾文鹏等^[9]模拟了 TC4 钛合金空心叶片激光沉积成形过程的温度场演变过程,马良等^[10]利用大型有限元分析工具 ANSYS 建立了参数化有限元模型,研究了不同工艺条件、不同材料等因素对成形过程热应力场的影响,姜亚琼等^[11]研究了基于轮廓偏置、长光栅、短光栅 3 种沉积路径对激光沉积成形钛合金 T 型缘条热应力场的影响。

在工程实践中,采用分区扫描方式成形大尺寸结构件被认为是可以降低残余应力行之有效的工艺策略。本文采用热弹塑性有限元方法,利用 MARC 软件焊接模块,计算分析 T 型接头在不同分区扫描方式下温度场与应力场的变化规律。

1 数学模型

1.1 基本假设

激光沉积成形的物理过程非常复杂,为了能够在宏观尺度采用热弹塑性有限元方法研究不同工艺策略对成形过程温度场及应力场的影响规律,需要对成形过程做一定的简化,采用的假设如下:

(1) 忽略熔池内熔体的流动,可以通过修改超过熔点时导热系数的方式考虑熔池内对流换热作用的影响;

(2) 忽略粉末与激光、熔池相互作用的过程,认为成形过程为熔覆层随激光扫描路径不断长大的过程;

(3) 材料密度为常数,随温度变化的热物性参数为多段线性函数;

(4) 材料为各向同性,服从双线性强化准则和 Von Mises 屈服准则;

(5) 与温度有关的应力应变在微小的时间增量内线性变化。

1.2 热传导方程

激光沉积成形是带有移动热源的热传导过程,在一般的热传导方程中增加了速度项,热传导控制方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (UH) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中, $H = \int \rho c(T) dT$ 为焓, $c(T)$ 为与温度相关的比热容; U 为激光扫描速度; λ 为热导率; Q 单位体积热

生成率。

温度场对流和辐射边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T_w}{\partial n} = h_c (T_w - T_0) + \sigma \varepsilon_s (T_w^4 - T_0^4) \quad (2)$$

式中, T_w 为工件壁面温度; n 为壁面法向; h_c 为对流换热系数; T_0 为环境温度; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; ε_s 为辐射率。

1.3 热弹塑性方程

热弹塑性有限元法可以分析整个成形过程中热应力的时间历程,详细了解热应力的变化规律。由于成形过程存在着材料非线性与几何非线性问题,需要采用增量理论进行计算。

热弹塑性分析包括以下 3 个基本关系:

平衡条件

$$\{dF\} + \{dR\} = [K] \{d\delta\} \quad (3)$$

式中, $\{dF\}$ 为外力引起的节点力增量; $\{dR\}$ 为温度引起的节点力增量; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{d\delta\}$ 为节点位移增量。

应力-应变关系

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\} - \{C\} dT \quad (4)$$

式中, $[D]$ 为弹性或弹塑性矩阵; $\{C\}$ 为与温度相关的向量; $\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon\}_p + \{d\varepsilon\}_e + \{d\varepsilon\}_T$, 其中 $\{d\varepsilon\}_e$ 为弹性应变增量, $\{d\varepsilon\}_p$ 为塑性应变增量, $\{d\varepsilon\}_T$ 为温度应变增量。

应变-位移关系

$$\{d\varepsilon\} = [B] \{d\delta\} \quad (5)$$

式中, $[B]$ 为联系位移与应变的矩阵。

1.4 热源模型

这里选用双椭球体积热源,热源模型如图 1^[12] 所示。前半部分椭球体内热流密度为

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi abc_1 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_1^2}\right) \quad (6)$$

后半部分椭球体内热流密度为

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi abc_2 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_2^2}\right) \quad (7)$$

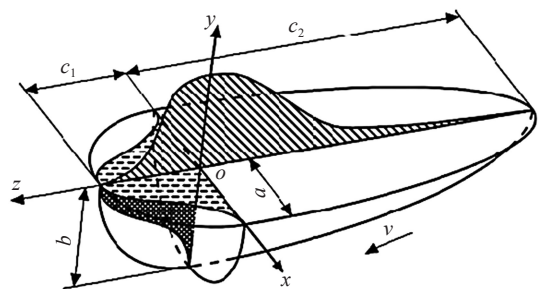


图1 双椭球体积热源

Fig.1 Double ellipsoidal heat source model

式中,形状参数宽度 a 、前端长度 c_1 与后端长度 c_2 均取光斑半径长度,深度 b 取单层熔覆层高度。

1.5 热物性参数

激光沉积成形数值模拟中需要确定与温度相关的材料热物理参数,包括温度场计算需要热导率和比热容,应力场计算需要线膨胀系数、杨氏模量、屈服强度和泊松比。目前在材料手册中能够查找到 TC4 的材料属性都是在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,高温部分的参数一般采用线性外推的方式获得。TC4 材料密度随温度变化很小,认为是常数, $\rho=4450\text{ kg/m}^3$ 。本文采用的 TC4 热物性参数见表 1。

2 数值模型

2.1 物理问题

采用激光沉积成形工艺在基板上成形 T 型接头,选用的工艺参数为:激光功率 1500 W ,光斑直径 2 mm ,扫描速度 5 mm/s ,单层熔覆层厚度 1 mm 。基板与 T 型接头均为 TC4 钛合金材料,基板尺寸为 $200\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,T 型接头的缘条与腹板厚度为 8 mm ,高度为 10 mm ,具体尺寸如图 2 所示。

2.2 网格划分

由于六面体网格计算精度高、形状规则便于按照光斑尺寸设计网格,因此 T 型接头采用均匀六面体网格划分。按照单层层高 1 mm 的工艺参数,T 型接头沿高度方向(Z 向)划分为 10 层,每层网格代表一层熔覆层,网格尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。为了减少单元数量,基板采用不均匀的网格划分方法,基板上远离 T 型接头的

单元尺寸逐渐增大。由于 T 型接头在基板上的角点处应力较大,是数值计算的关注点,为保证角点的网格质量,在 T 型接头外轮廓向外偏置 2 mm 范围内的基板采用 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的均匀网格。网格划分如图 3 所示。

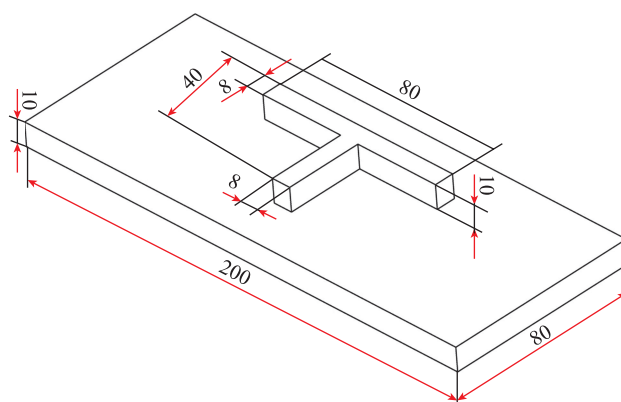


图2 基板及T型接头几何模型

Fig.2 Base metal and geometry of T-joint

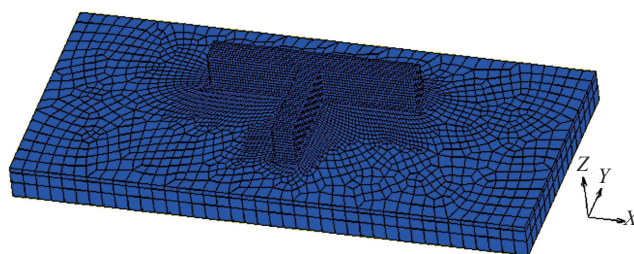


图3 有限元模型网格划分

Fig.3 Finite element mesh

表1 TC4热物性参数

Table 1 Thermo-physical parameters of TC4

温度/ $^{\circ}\text{C}$	比热/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	热导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数/ $(10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	屈服强度/MPa
20	611	6.8	109	0.34	8.4	920
200	653	8.7	94	0.34	9.2	750
400	691	10.3	80	0.37	9.5	560
600	713	13.7	66	0.39	10.0	340
700	725	14.4	48	0.40	10.4	280
800	735	15.8	35	0.41	10.9	130
1000	754	18.3	22	0.42	11.0	90
1200	771	21.7	5	0.42	11.0	66
1400	787	24.5	0.1	0.42	11.0	31
1540	800	25.3	0.01	0.42	11.0	12
1650	806	150*	0.01	0.42	11.0	2
1800	806	150*	0.01	0.42	11.0	0.1

注:“*”为考虑到对流作用对熔池内换热性能的影响,超过 $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热导率系数修改为 150。

由于熔池区域的温度梯度较大,为保证计算精度及收敛性,需要划分较细的网格。MARC 提供的动网格技术,可以实现在熔池区域进行网格细分,使熔池区域网格数量由 $2 \times 2 \times 1$ 增加为 $4 \times 4 \times 2$,并且细分网格随熔池一起移动,移出熔池区域的单元恢复原始较粗网格,保证计算精度与计算效率。

2.3 分区扫描方式

在 T 型接头成形过程中,考虑不同分区方式对温度场与应力场的影响。将 T 型接头分为 4 个区域,并分别用①、②、③、④标识,如图 4 所示。第 1 种分区方式的成形顺序为①、②、③、④;第 2 种分区方式的成形顺序为①、③、④、②;第 3 种分区方式的成形顺序为①、④、③、②。为便于表述,用 FQ-1 代表第 1 种分区方式, FQ-2 代表第 2 种分区方式, FQ-3 代表第 3 种分区方式, FQ-0 代表未采用分区方式,即沿缘条及腹板长边扫描。

2.4 初始与边界条件

初始时刻,基材与周围环境温度为 20°C 。

在结构分析中,为了消除有限元计算中的刚体位移,同时避免约束过多限制基板自由变形,选择在基板底面 4 个角点处施加 Z 向固定约束,在基板底面两个长边中间节点处施加 X 方向固定约束,在基板底面两个短边中间节点处施加 Y 向固定约束。

在热分析中,为了模拟基板及 T 型接头向周围介质通过热传导、对流、辐射等方式进行热量传递,需要施加单元面对流边界条件。这里的对流边界条件设定较为复杂,可以分为 3 种情况:

(1) 基板底面单元面:由于基板底面与机床平台接触,热传导较快,所以需要适当放大基板底面的对流换热系数,保证合适的热量输出。经过调试,取 $h_c=60\sim 100\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

(2) 基板侧面与顶面:与周围空气介质接触,设置的对流换热系数 $h_c=37.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

(3) 熔覆层的表面:熔覆层的表面与空气接触,对流换热系数设置为 $h_c=37.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2.5 相关参数设置

这里采用的是有限元软件 MARC 进行数值模型建立与计算,相关参数设置为:(1)单元类型选择为一阶全积分 8 节点等参元 SOLID7;(2)热源吸收系数取为 $0.23\sim 0.26$;(3)热源采用双椭球体积热源,形状参数为:前端长度与后端长度为 1mm ,宽度与深度为 1mm 。

3 结果与讨论

3.1 监测点布置

在 T 型接头第 1 层熔覆层上表面选取监测点及监测面,如图 5 所示,其中 $a-a$ 截面为上缘条对称面, $b-b$

截面为腹板对称面, $c-c$ 截面为上缘条顶面。监测点位置特征为: A 点代表长边外面中点, C 点代表内部节点, E 点代表内侧角点, B 点、F 点、H 点代表外侧角点, D 点、G 点代表短边外面中点。

3.2 温度场分析

在 3 种不同分区扫描方式下,第 1 层、第 4 层、第 7 层、第 10 层沉积结束时刻 T 型接头整体温度场分布如图 6 所示。可以看出,采用分区扫描方式在 4 个时刻得到温度场的最低温度均小于未分区扫描的最低温度,这是由于将整个 T 型接头进行离散分区后,在成形过程中熔覆层的外表面面积增加,通过对流辐射作用散失的热量更多。3 种不同分区方式得到的温度场分布基本相同,差别不大,只是 FQ-1 得到最高温度略低于 FQ-2 和 FQ-3,这是由于不同分区方式在每层扫描结束时对应的位置点热边界条件不同,如 FQ-1 扫描结束时对应内角点,而 FQ-2 和 FQ-3 扫描结束均是对应长边外面区域分界点。

各监测点在不同分区扫描方式下热循环曲线如图 7 所示。分区扫描对监测点 B 点、D 点、F 点、G 点、H 点的热循环规律影响不大,只是每层峰谷值出现的时刻不同,这一现象表明分区扫描对外角点以及短边外面中

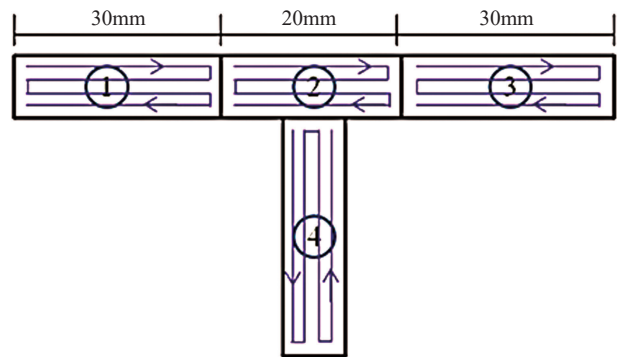


图4 T型接头分区扫描方式
Fig.4 Subarea-scanning of T-joint

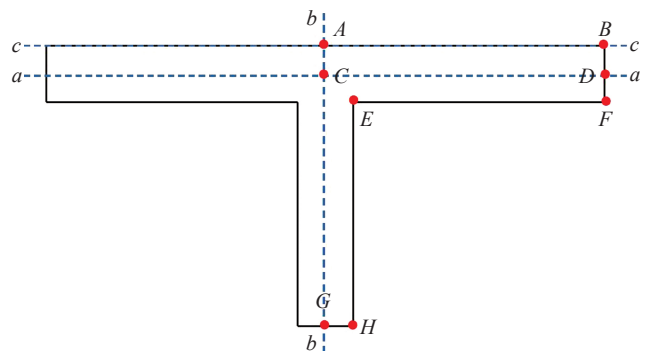
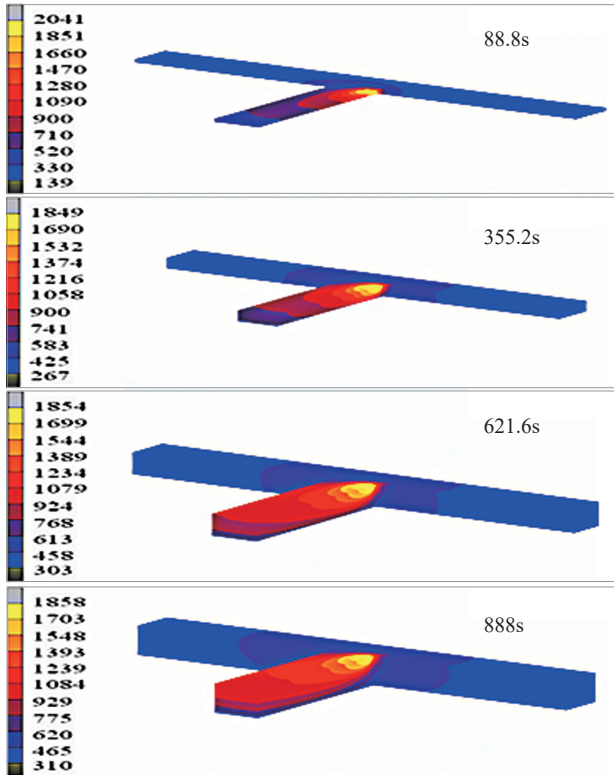
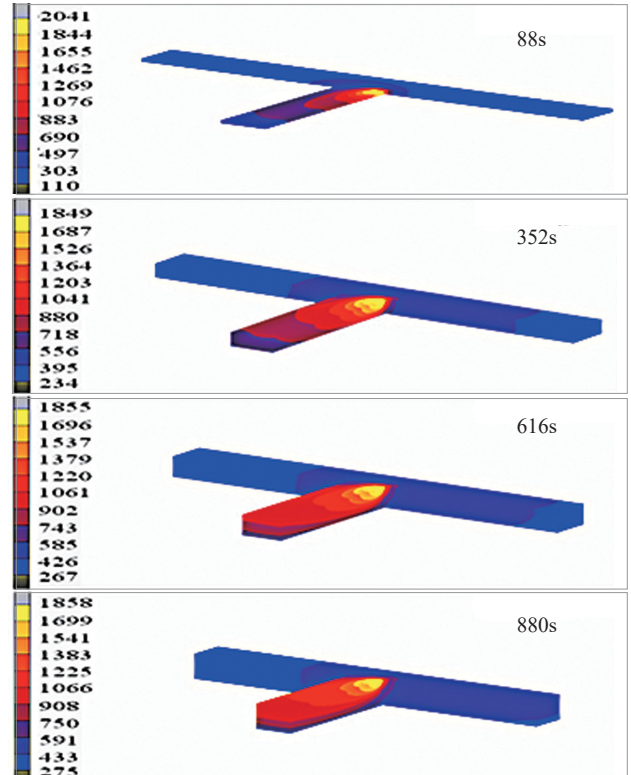


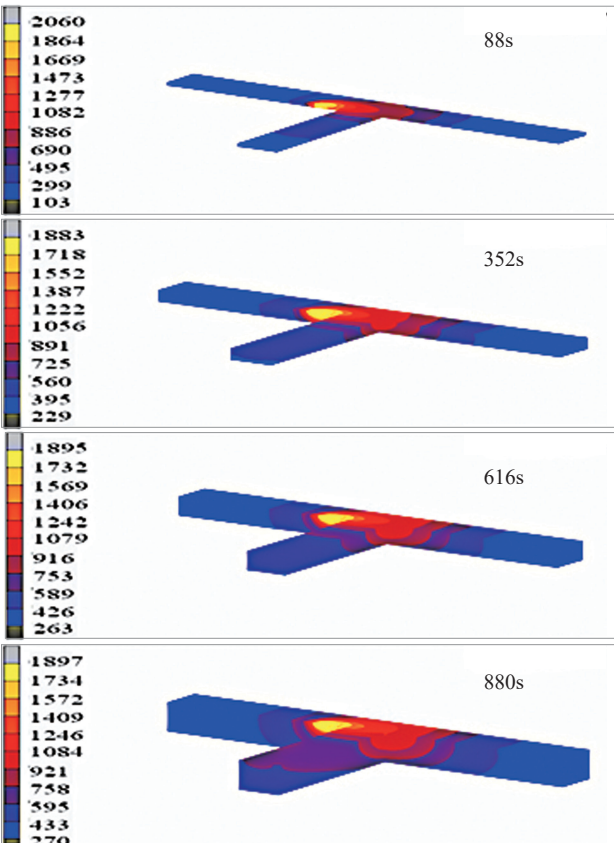
图5 监测点选取位置图
Fig.5 Selection of monitoring points



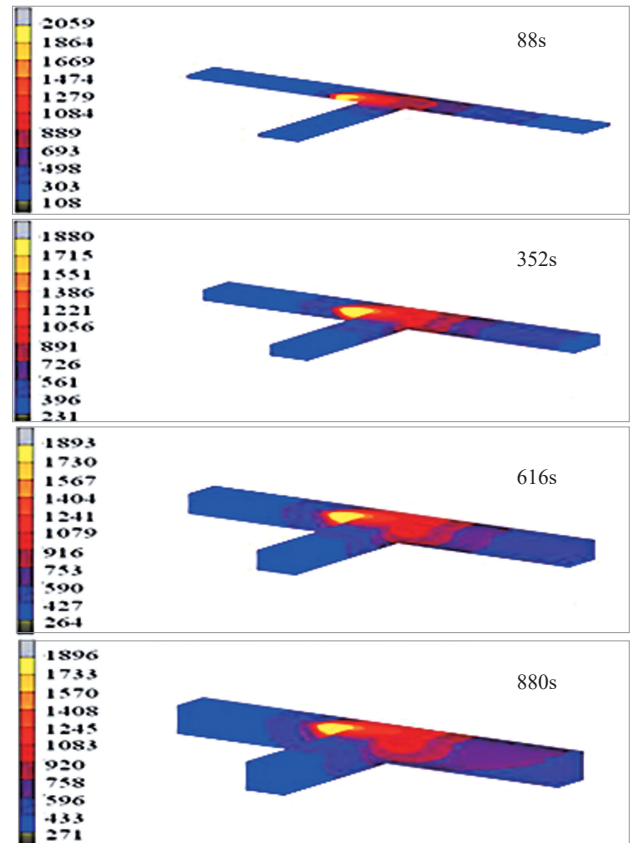
(a) 未分区扫描温度场演变过程



(b) 第1种分区扫描温度场演变过程



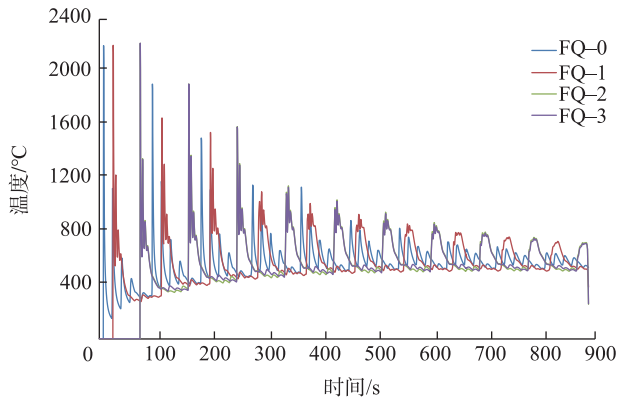
(c) 第2种分区扫描温度场演变过程



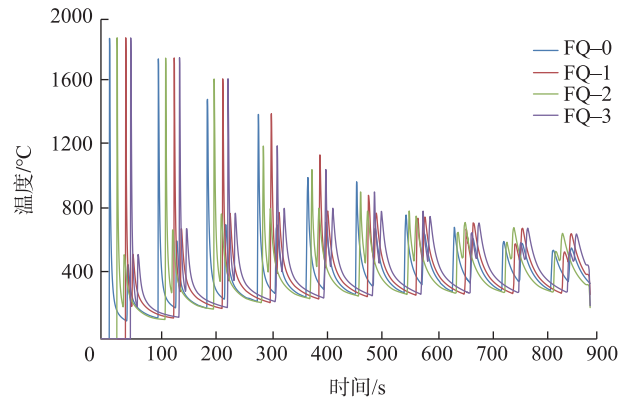
(d) 第3种分区扫描温度场演变过程

图6 不同分区方式下T型接头温度场演变过程

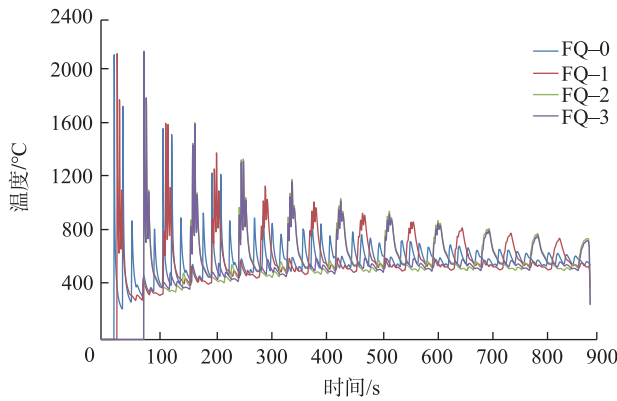
Fig.6 Evolution of temperature field of T-joint under different subarea-scanning



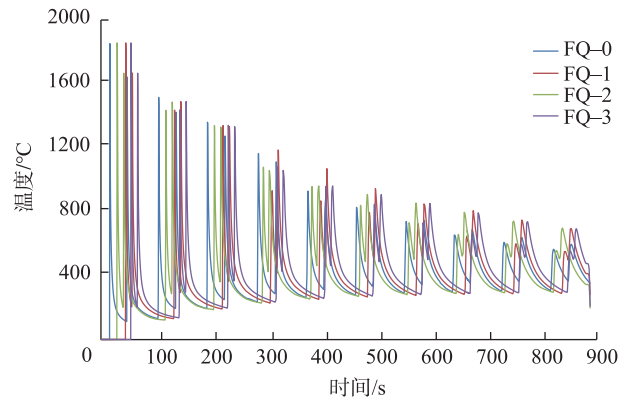
(a) A点热循环曲线



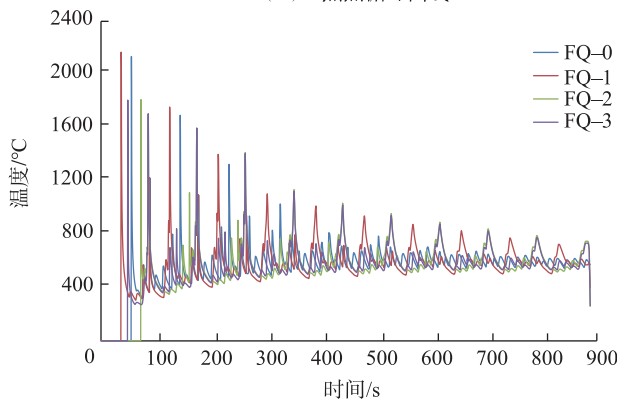
(b) B点热循环曲线



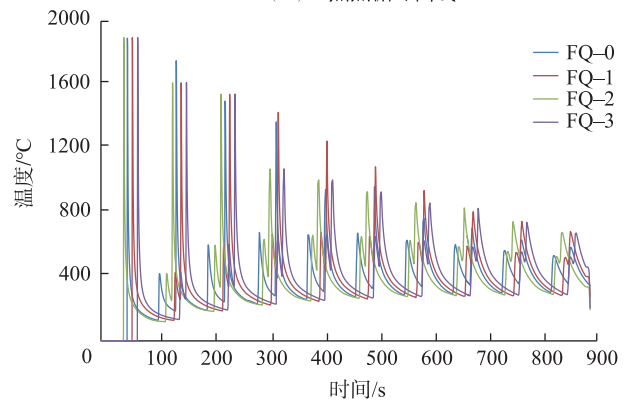
(c) C点热循环曲线



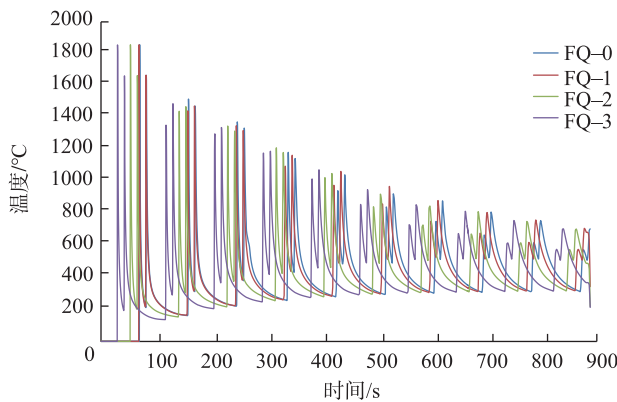
(d) D点热循环曲线



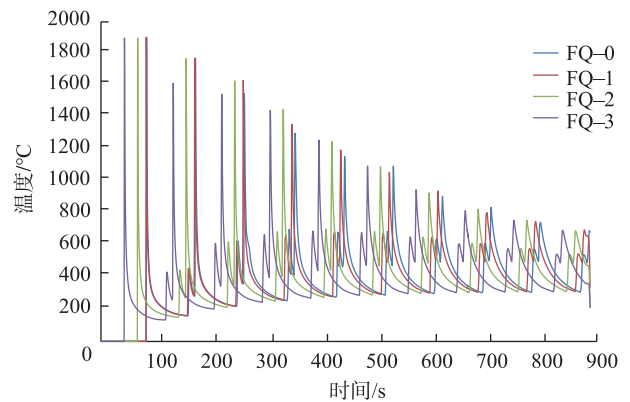
(e) E点热循环曲线



(f) F点热循环曲线



(g) G点热循环曲线



(h) H点热循环曲线

图7 不同分区扫描方式下监测点热循环曲线

Fig.7 Thermal cycle curve of monitoring points under different subarea-scanning

点的热循环历程影响不大。在第4层以后,监测点A点、C点、E点在未分区扫描方式下的热循环曲线峰谷值之差明显小于采用3种分区扫描方式,这表明分区扫描方式对内部节点、内角点、长边外面中点的热循环历程有较大的影响。这是由于分区扫描改变了内部节点、内角点、长边外面中点这些监测点的热边界条件,增强了这

些监测点与周围介质对流换热的能力,因此温度曲线的峰谷值之差变得更加显著。

3.3 热应力分析

在3种不同分区扫描方式下,第1层、第4层、第7层、第10层沉积结束时刻T型接头整体热应力场分布如图8所示(单位:MPa)。可以看出,第1层结束时热应力

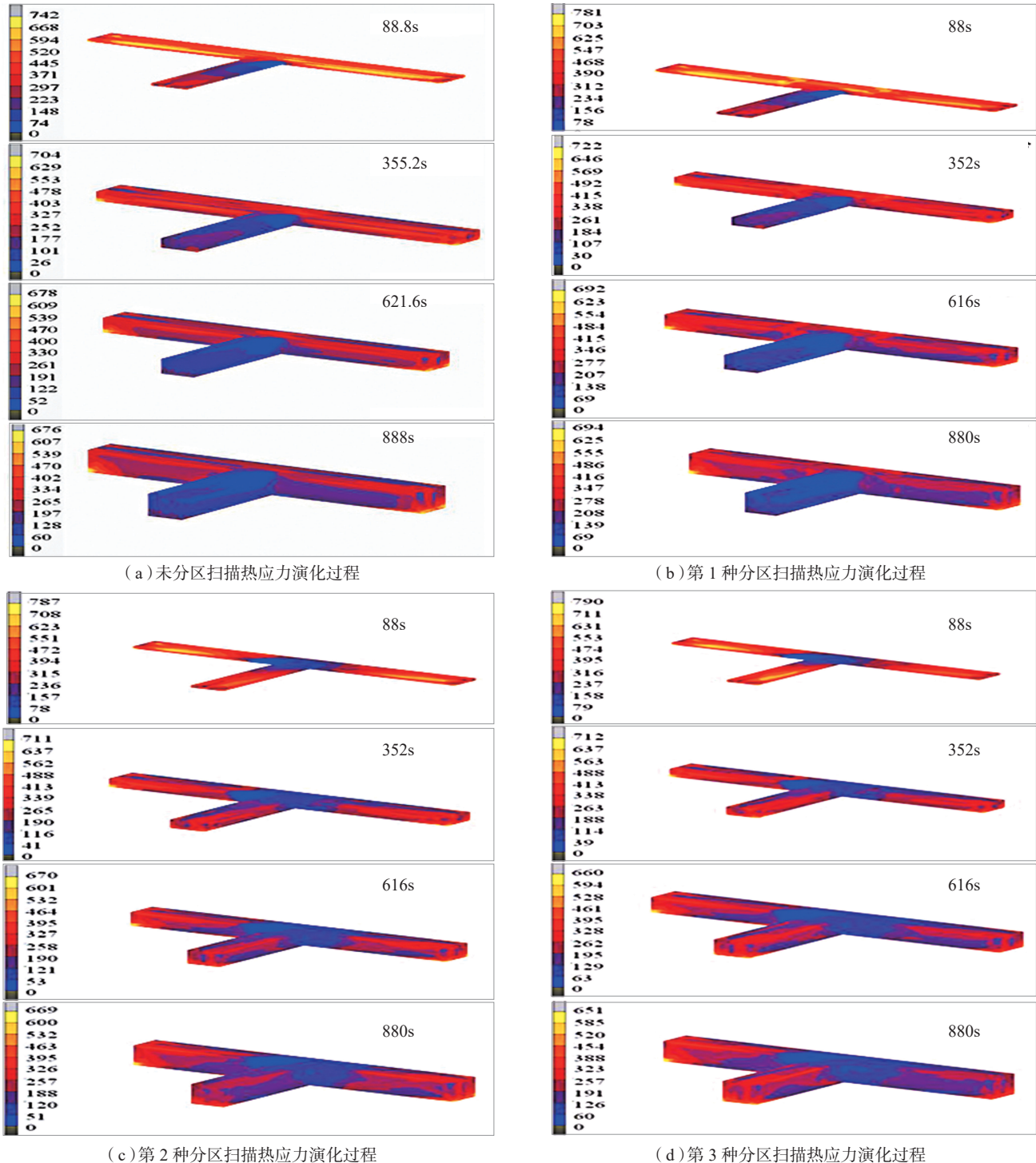


图8 不同分区方式下T型接头热应力演变过程

Fig.8 Evolution process of thermal stress

最大,这是由于第1层成形时基板温度较低,温差较大导致热应力较高,随着层数的增加,热应力呈下降的趋势。热应力最大值始终出现在T型接头上缘条与基板接触的4个角点上,与分区方式无关。第1层与第4层结束时

刻,3种分区扫描得到的热应力场分布相当,均高于未分区扫描方式;而第7层与第10层扫描结束后,FQ-2和FQ-3两种方式得到的热应力明显小于FQ-0和FQ-1。

各监测点等效热应力循环曲线如图9所示。与热

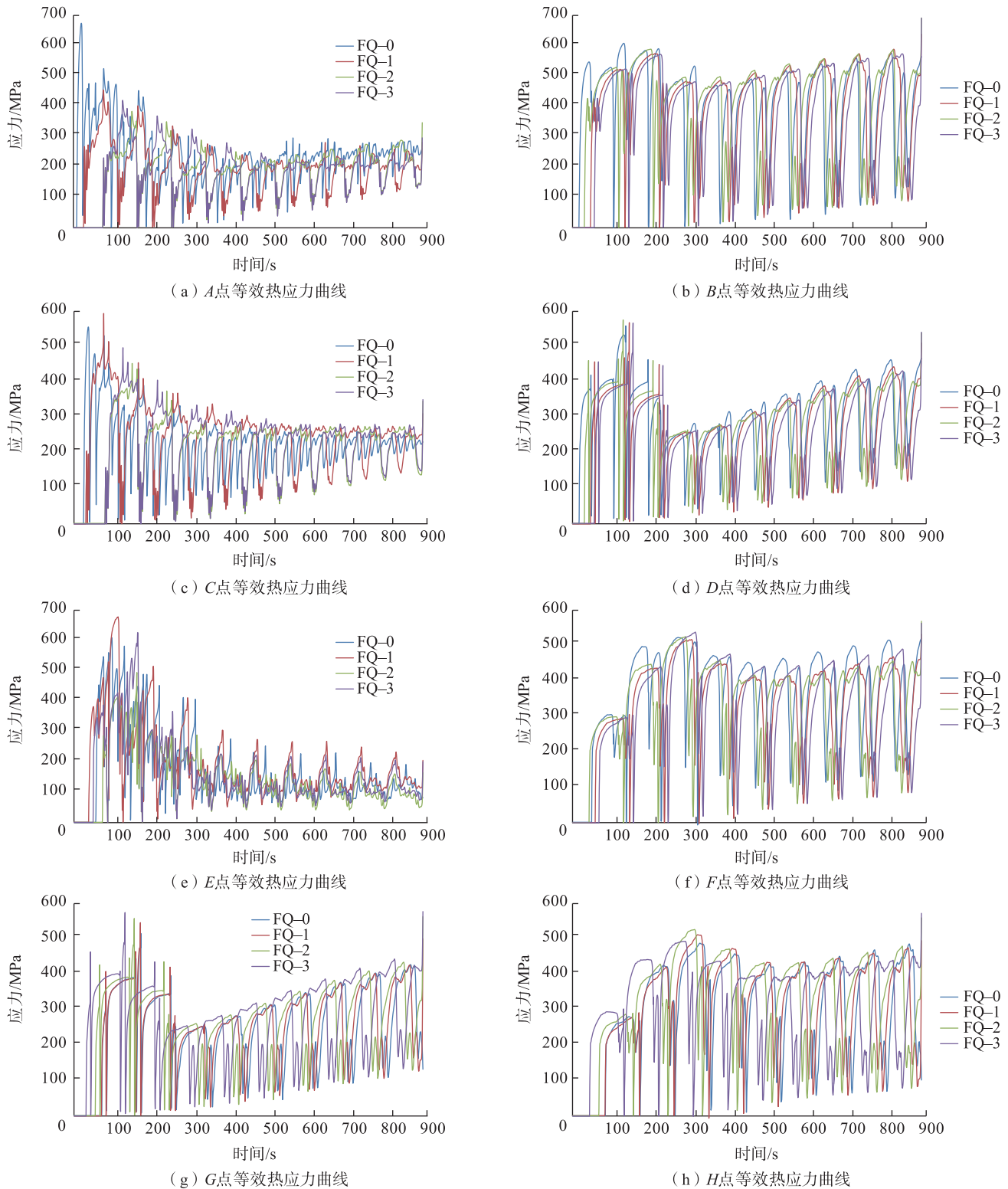


图9 各监测点等效热应力循环曲线

Fig.9 Equivalent thermal stress cycle curve of monitoring points

循环曲线一致,分区扫描对监测点 B 点、D 点、F 点、G 点、H 点的等效热应力循环曲线影响不大、数值相当,与未分区扫描结果差别不大。这说明分区扫描对外角点以及短边外面中点等效热应力影响不大。但是,在监测点 A 点、C 点、E 点位置处,第 1 种分区扫描方式的等效热应力明显高于第 2、3 种分区扫描方式,且略高于未分区扫描方式。这说明分区扫描对内部节点、内角点、长边外面中点的等效热应力有一定的影响。这是由于分区扫描主要改变了内部节点、内角点等位置点的热循环曲线,进而改变了这些位置点的等效热应力。

3.4 残余应力分析

不同分区扫描方式下,成形结束后温度降低到室温时,T 型接头的等效残余应力分布如图 10 所示(单位:MPa)。可以看出,最大的残余应力均出现在 T 型接头

与基板接触的外角点处,接近 950MPa,与分区方式无关;第 2 种分区扫描方式等效残余应力总体分布上最小,第 1 种分区扫描方式下等效残余应力总体分布上最大,第 3 种分区扫描方式与未分区扫描方式介于二者之间。

在不同分区扫描方式下,T 型接头残余应力沿上缘条顶面 *c-c* 截面与腹板对称面 *b-b* 截面的分布如图 11 所示。可以看出,与未分区扫描方式相比,3 种分区扫描方式显著降低上缘条顶面两侧外角点附近的残余应力幅值,由 900MPa 降低到 500MPa 左右,分区扫描改变了 T 型接头上缘条顶面残余应力分布波形规律。第 1 种分区扫描方式在 *c-c* 截面中间部位上的残余应力大于其他两种分区扫描方式。与未分区扫描方式相比,分区扫描降低了 T 型接头中间腹板外角点附近的残余应力。

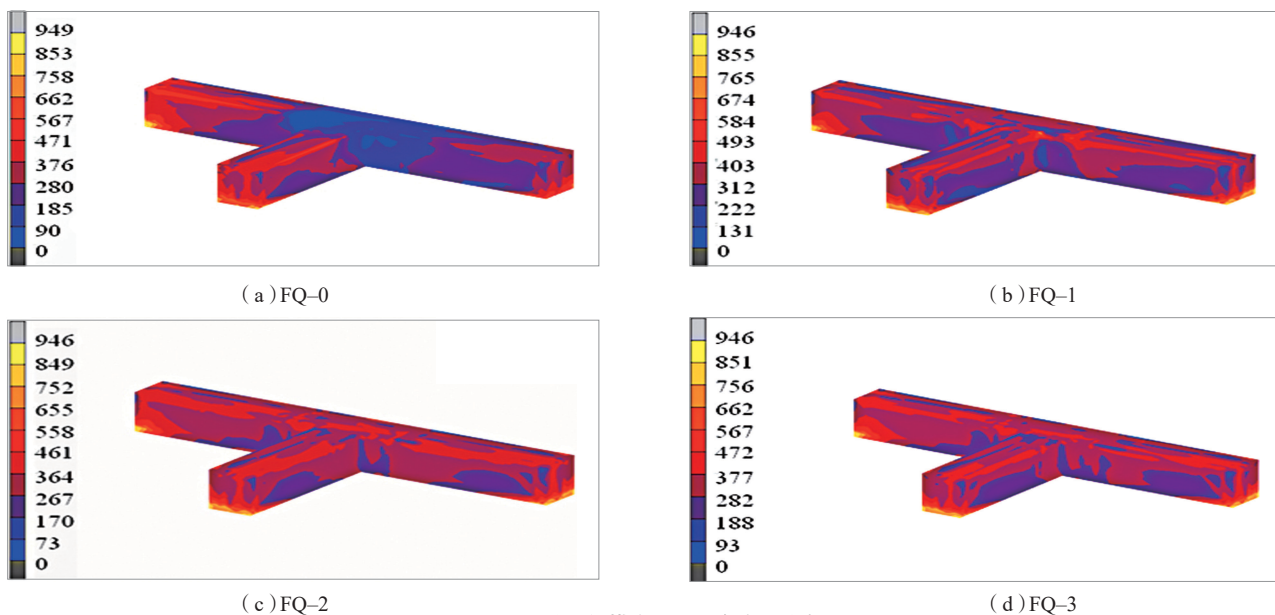


图10 不同分区扫描方式下残余应力分布

Fig.10 Residual stress distribution

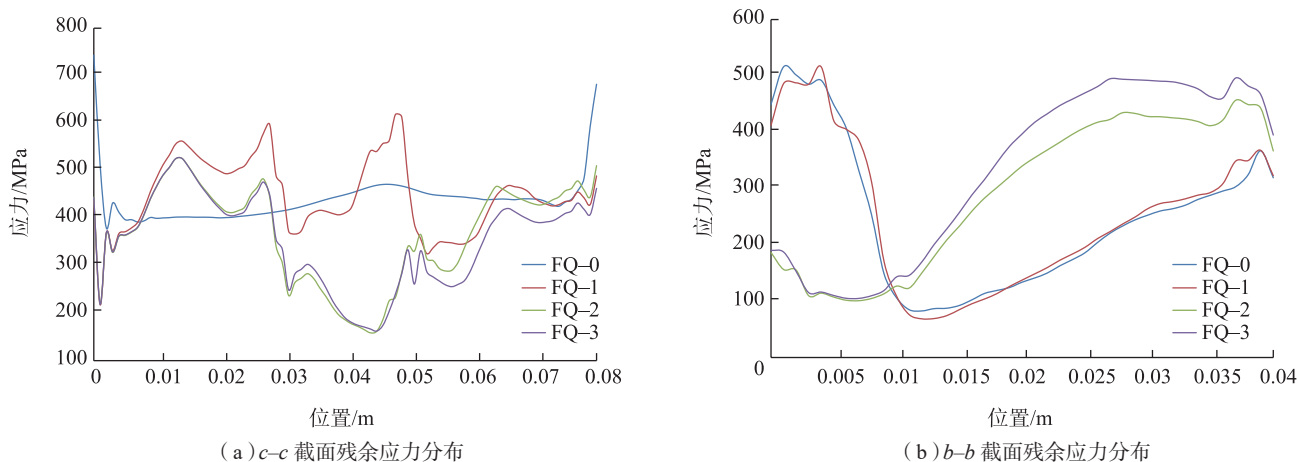


图11 *c-c*截面和*b-b*截面等效残余应力分布图

Fig.11 Equivalent residual stress distribution of section *c-c* and *b-b*

4 结论

(1) 热应力与残余应力最大值均出现在 T 型接头上缘条与基板接触的 4 个角点上, 与分区扫描方式无关。

(2) 分区扫描对外角点与短边外面中点的热循环曲线与热应力曲线影响较小。

(3) 由于分区扫描改变了内部节点、内角点与长边外面中点的热边界条件, 因此分区扫描对这些位置点的热循环曲线及热应力曲线的影响较为显著。

(4) 分区扫描改变了 T 型接头监测截面上残余应力分布的波形规律, 并且显著降低了残余应力的幅值。

参考文献

[1] 王向明, 崔灿, 苏亚东, 等. 飞机高能束增材制造结构研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 16–21.

WANG Xiangming, CUI Can, SU Yadong, et al. Aircraft structures technology based on power beam additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 16–21.

[2] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204–3209.

WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204–3209.

[3] 席明哲, 张永忠, 石力开, 等. 激光快速成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 887–892.

XI Mingzhe, ZHANG Yongzhong, SHI Likai, et al. Three-dimensional transient temperature field numerical simulation of metal thin-walled parts in laser rapid prototyping[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 887–892.

[4] 胡围围, 马继宇, 康进武, 等. 激光多层熔覆成形温度场数值模拟和工艺优化[J]. 金属铸锻焊技术, 2009, 38(7): 136–139.

HU Weiwei, MA Jiyu, KANG Jinwu, et al. Numerical simulation of temperature field and process optimization in multi-layer laser cladding forming[J]. Casting Forging Welding, 2009, 38(7): 136–139.

[5] 孔源, 刘伟军, 王超越, 等. 钛合金激光直接成形过程中热应力耦合场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 74–82.

KONG Yuan, LIU Weijun, WANG Yuechao, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 74–82.

[6] 王福雨, 刘伟军, 赵宇辉, 等. 复杂薄壁零件激光快速

成形过程的热应力耦合场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 191–198.

WANG Fuyu, LIU Weijun, ZHAO Yuhui, et al. Thermo-mechanical coupling field simulation of complex thin-wall part laser rapid prototype process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 191–198.

[7] 王福雨, 刘伟军, 赵宇辉, 等. 激光快速成形数值模拟可视化人机对话系统设计[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 145–151.

WANG Fuyu, LIU Weijun, ZHAO Yuhui, et al. Design of man-machine conversation system of laser rapid prototyping numerical simulation[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(10): 145–151.

[8] 宋丽莉, 李庆. 基于 MSC. Marc 的钛合金激光快速成形过程模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(15): 68–73.

SONG Lili, LI Qing. Simulation on titanium alloy prepared by laser rapid prototyping process based on MSC. Marc[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(15): 68–73.

[9] 贾文鹏, 林鑫, 谭华, 等. TC4 钛合金空心叶片激光快速成形过程温度场数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1193–1199.

JIA Wenpeng, LIN Xin, TAN Hua, et al. Numerical simulation of temperature field in laser rapid forming of TC4 titanium alloy hollow blade[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(7): 1193–1199.

[10] 马良, 黄卫东, 于君, 等. 金属激光立体成形热应力场参数化有限元模型[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3226–3232.

MA Liang, HUANG Weidong, YU Jun, et al. Parametric finite element model of temperature stress field evolution by metal laser solid forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3226–3232.

[11] 姜亚琼, 林鑫, 马良, 等. 沉积路径对激光立体成形钛合金 T 型缘条热/应力场的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 58–66.

JIANG Yaqiong, LIN Xin, MA Liang, et al. Effects of scanning patterns on the thermal stress field during laser solid forming T-shape chord of Ti-6Al-4V alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 58–66.

[12] 吴振, 王发展, 安高灵, 等. 大型复杂结构件高效焊接热源[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 61–65.

WU Zhen, WANG Fazhan, AN Gaoling, et al. High efficient welding heat source for large and complex structural parts[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 61–65.

通讯作者: 邢本东, 硕士, 工程师, 研究方向为飞机结构拓扑优化与增材制造技术, E-mail: xingbd601@163.com。

(责编 铃兰)