

# 航空发动机薄壁机匣激光焊接有限元数值模拟

## Finite Element Numerical Simulation of Laser Welding for Thin-Wall Outer Casing on Aeroengine

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 汪 苏 王春侠

**[摘要]** 对航空发动机燃烧室薄壁机匣建立了激光焊接的数值分析模型。基于 Sysweld 的焊接分析功能,用数值方法研究了燃烧室薄壁机匣环缝焊接时引起的焊接变形,模拟了薄壁机匣激光焊接时温度场、应力场的分布以及焊接变形情况。同时对焊接仿真中的热源问题从数学上进行了分析和探讨,在此基础上结合整个薄壁机匣的实际工作状况对其仿真结果进行了定性分析,验证了其分析方法的可行性。

**关键词:** 薄壁机匣 激光焊接 温度场 应力场 变形

**[ABSTRACT]** A numerical analysis model of thin-wall outer casing on aeroengine combustion chamber during laser welding is built. Welding deformations due to circumferential weld of thin-wall outer casing on combustion chamber is studied by numerical analysis based on Sysweld. The temperature field, stress field distribution and welding deformation in thin-wall outer casing during laser welding are simulated. The problem of heat source during welding simulation is analyzed and investigated mathematically. Then the analysis results are qualitatively discussed according to the factual working conditions of whole thin-wall outer shell for validating the feasibility of the analysis method.

**Keywords:** Thin-wall outer casing Laser welding Temperature field Stress field Deformation

近 20 年来,基于军用战机作战的需要,对其动力装置尤其是对燃烧室提出了越来越高的要求。现代发动机的燃烧室机匣(包括燃烧室内、外套和扩压器内、外壁)通常都是发动机的重要承力构件。燃烧室机匣承受有轴向力、径向力、扭矩、弯矩、振动等载荷,受力情况非常复杂。特别是燃烧室内、外机匣(燃烧室内套和扩压器内壁),空气压力使这个薄壳筒形零件承受径向压缩应力,容易被压扁而成椭圆,失去稳定,尤其是高

增压比的发动机,这一现象更为明显<sup>[1]</sup>,而燃烧室薄壁机匣的激光焊接更易引起挠曲变形,进而影响燃烧室的整体力学性能。为了满足研制高性能航空发动机燃烧室的需要,有必要开展燃烧室薄壁机匣焊接仿真、试验研究,寻找合理的结构方案,以便提高燃烧室性能,为设计先进燃烧室提供理论和试验依据。

本课题基于焊接有限元分析软件 Sysweld2004,应用焊接热传导以及热弹塑性力学相关理论,对航空发动机燃烧室薄壁机匣的焊接过程进行数值模拟。发动机燃烧室薄壁机匣焊接过程的变形规律与预测控制是数值模拟的关键,通过数值模拟的方法对焊接工艺进行分析,从而为控制焊接变形提供理论依据和实践基础。

## 1 有限元计算模型的建立

### 1.1 燃烧室简化分析模型

航空发动机燃烧室一般为短环直流燃烧室,燃烧室扩压器出口轴线与火焰筒轴线并不重合,而有一定角度,火焰筒位置靠近燃烧室内壁,使外环通道面积大于内环通道面积。

根据航空发动机燃烧室主体结构与工作负荷的特点,现对燃烧室外机匣进行如下简化处理:

(1) 燃烧室外机匣基本上是一个绕中心轴对称的回转体,外机匣整体结构基本对称,在其两端都有安装边与外部承力件相连,在实际分析处理时可认为薄壁机匣模型属于对称结构;

(2) 燃烧室机匣安装边上的连接螺孔相对整个机匣不但尺寸较小,而且焊接时对它产生的影响很小,为了减小分析计算的难度(即加大计算量),可忽略不计。机匣上的加强筋等部件,虽有利于增加机匣刚度,但忽略不计不会影响焊接时的实际要求。

经过以上简化,可建立燃烧室外机匣激光焊接分析的有限元实体模型,如图 1 所示。燃烧室外机匣为一颈部逐渐扩张的瓶状薄壁圆筒结构,材料为铁镍基高温合金 GH118,圆筒的几何尺寸如表 1 所示。

表 1 圆筒的几何尺寸 mm

长度	小端外径	大端外径	壁厚
300	580	690	2

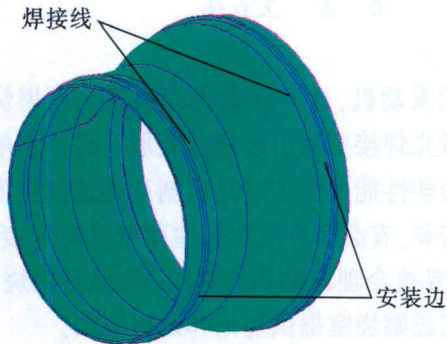


图 1 燃烧室外机匣简化分析模型

Fig.1 Simplified analysis model of outer casing on combustion chamber

### 1.2 有限元网格划分及分组

有限元分析的首要任务是对简化的实体划分网格。由于激光焊接的能量密度非常高,有效加热区域非常小,因而在网格划分时,要求在焊缝附近采用很小的网格单元(为了提高求解精度,单元大小应该和光斑大小相当),而在远离焊缝的区域可以选择较大的网格单元<sup>[2-3]</sup>。大件的激光焊接模型,由于其单元数量非常多,为了减少计算量,使网格细分区域只集中在焊接热源附近,并随热源一起移动,而其他部分则可以在保证精度的前提下保持较疏的网格。按照以上原则,在 Sysweld 中对燃烧室机匣划分网格。网格划分完后,合并节点,并把多余的自由点、线等删去,使模型变得简洁。然后保存相应的数据文件,以备分组时使用。

根据网格划分结果定义焊接线、参考线(焊接线和参考线必须平行且等长)、起始单元和节点、终止单元和节点以及热交换面和夹持条件,将这些分析参数定义为相应的组文件。在 Sysweld 中划分的网格节点应与受力点对应一致,针对实际结构的特点,在自动划分网格之后,为了使计算结果更准确,须作手工调整。同时,计算中温度场和应力场的计算均采用相同的有限元网格。图 2 为实际划分后的网格结构。单元总数为 27 000,节点总数为 19 980。

### 1.3 约束和载荷

在求解焊接温度场和应力场时,通过施加一定的

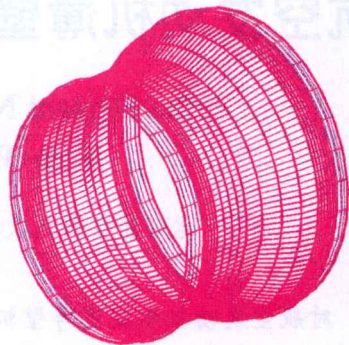


图 2 燃烧室外机匣网格划分图

Fig.2 The grid chart of outer casing on combustion chamber

力学边界条件来模拟薄壁机匣实际焊接过程中夹具的存在,对薄壁机匣两圆环边分别施加 Y,Z 两个方向的约束,即可模拟实际焊接的工作过程。求解时把激光能量沿着焊缝中心加入,即对工件的焊接线分别施加一定的热载荷。由于此焊件要求精度高,质量好,所以焊接速度不能太大。采用低速焊接,有利于焊缝中气体的排出,也有利于预防焊接裂纹。据此,焊接速度取为 10mm/s。在激光焊接过程中,热源载荷采用圆锥形热源模型更能准确地模拟实际焊接情况<sup>[4]</sup>。

### 1.4 单元生死功能

如果在模型中加入或删除材料,则其中相应的单元就会有“存在”或“死亡”2 种情况。在这种情况下,单元生死功能以模拟材料的删除或加入的方式,用于杀死或重新激活单元。该功能用在薄壁机匣两道焊缝中。

在 Sysweld 中,对第一道焊缝进行焊接模拟时,必须杀死第二道焊接线以后的所有单元,通过在计算前生成的数据文件 \*.MECH\_C.DAT 中的 INITIAL CONDITIONS 后增加一条命令: ELEMEN GROUP \$BASE2\$ \$UPPER2\$ \$VOLUME2\$/S -1,表示组 BASE2 UPPER2 VOLUME2 不激活,即使得单元 BASE2 UPPER2 VOLUME2 被“杀死”。如有更多的层或道,方法相同。

在计算完第一道焊缝后,计算第二道焊缝时,若不进行上述操作过程,系统将自动激活第二道焊缝以后的所有单元 BASE2 UPPER2 VOLUME2,使其“存在”,继续求解。

## 2 焊接热源模型的建立

在热弹塑性有限元分析中,温度场、应力场对计算结果有着十分重要的影响。为了得到准确的温度场、应

力场,人们发展了各种热源模型,比较精确的激光热源模型通常会考虑空腔形成和熔池效应。

激光焊接热场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题,激光焊接中存在着气化、熔化、凝固等相变过程,相变潜热对温度场分析会产生较大的影响<sup>[9]</sup>。处理相变潜热问题常用的方法是热焓法。采用热焓法时,求解区域导热微分方程变为如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \frac{\partial H}{\partial t},$$

式中: $\lambda$ 为导热系数; $t$ 为时间; $q$ 为内热源强度; $H = \int \rho \cdot C(T) dT$ , $H$ 为热焓, $T$ 为温度, $\rho$ 为密度, $C(T)$ 为材料的比热容,它是温度的分段线性函数,在相变区变化较大时,将其考虑为等效比热容来处理相变潜热。

该热源模型确定了影响激光焊接热场分布的主要工艺参数。

此外,燃烧室薄壁机匣焊接对称面上各点在求解过程中为绝热边界条件。初始条件为:在零时刻,工件的初始温度为 $20^\circ\text{C}$ 。

$$T|_{t=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_0} =$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 20;$$

边界条件:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_1} =$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 20。$$

激光焊接过程中热弹塑性模拟一般采用高斯表面热源和柱状热源的复合模型<sup>[6]</sup>。用热传导模拟激光焊接的传热过程;计算考虑热物理参数随温度变化引起的焊接温度场的非线性和热源移动引起的焊接温度场非稳态性。

实践证明,激光焊接过程中相当部分热量是通过热传导和辐射直接传输给焊件的<sup>[7]</sup>,为此,高斯分布的热源可写为

$$q(x, \zeta) = \frac{3Q_0}{2\pi c} e^{-3x^2/c^2} e^{-3\zeta^2/c^2}, \quad (1)$$

式中: $Q_0$ 为能量输入率; $c$ 为热流分布特征半径。为方便起见,引入固定坐标系 $(x, y, z)$ ,而且定义热源位置滞后的时间因素 $\tau$ 。动、静坐标系关系可写为:

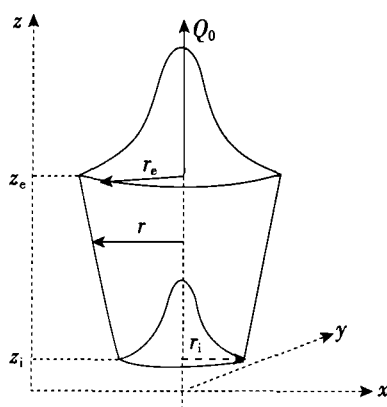
$$\zeta = z + v(\tau - t),$$

式中: $v$ 为焊接速度。在 $(x, y, z)$ 坐标系中,式(1)可为如下形式:

$$q(x, z, t) = \frac{3Q_0}{2\pi c} e^{-3x^2/c^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2},$$

此时 $x^2 + \zeta^2 < c^2$ ,当 $q(x, \zeta, t) = 0$ 时, $x^2 + \zeta^2 > c^2$ 。

综上所述,在 Sysweld 中,可得到激光焊接模拟仿真所采用的热源模型(图3)和热源校核截面图(4)。



$Q_0$ : 能量输入;  $r_e$ : 高斯参数;  $r_i$ : 高斯参数;  
 $z_e$ : 热源上限;  $z_i$ : 热源下限

图3 3D锥形高斯热源

Fig.3 3D conical Gaussian heat source

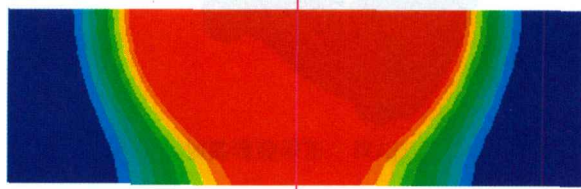


图4 热源校核截面图

Fig.4 The section for heat source verification

根据上述热源模型计算出的热流强度,作为面载荷或体载荷施加在选定的单元或节点上。激光焊接的热分析属于瞬态传热分析,移动热源时将空间域离散到时间域上,并设定一定的时间步长,通过循环加载来处理<sup>[8]</sup>。

### 3 焊接仿真有限元计算

#### 3.1 焊接温度场与分析

用内生热加载模拟焊接热输入,并随热源移动。由于激光焊接热源集中,在焊接过程中有小孔效应,因此焊缝中心的温度在材料的气化温度以上,而焊缝金属

温度不到气化温度。在温度场模拟时,材料熔点温度与实际焊接时的温度范围一致。Sysweld 软件通过改变相变区间的比热模拟相变潜热。

图 5 为进行第一、第二道焊缝焊接与焊接终止时燃烧室薄壁机匣焊缝内外表面在不同节点处的温度变化。

由图 5(a)可见,当计算时间达到 57.665 8s 时,焊

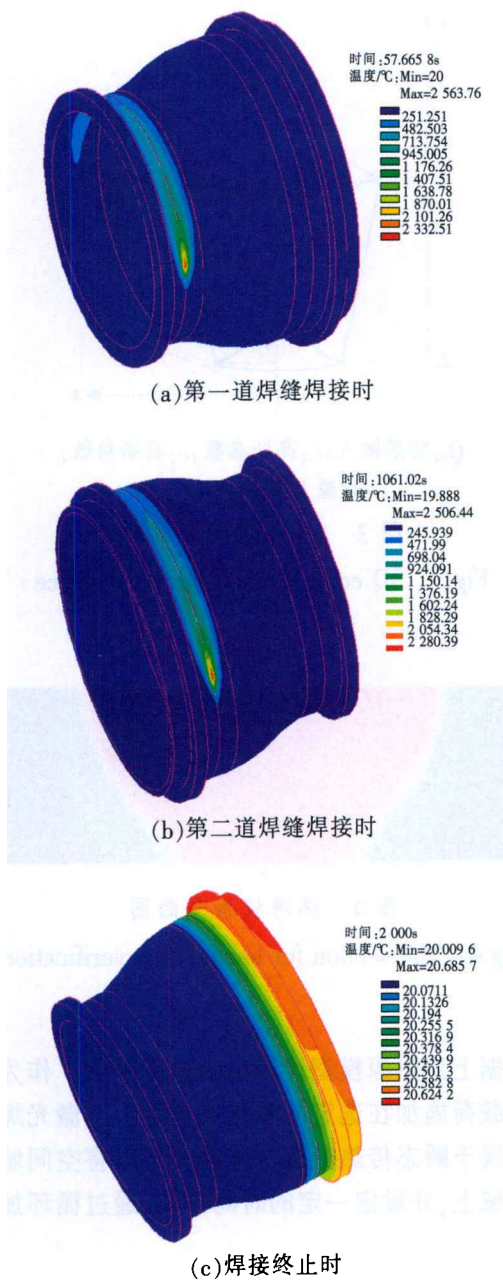


图 5 焊接第一、第二道焊缝及焊接终止时在不同节点处的温度变化

Fig.5 The temperature changes on different nodes when welding the first, second seam and the end of welding

缝外表面温度最高达 2 563.76℃, 远高于材料 GH118 熔点 1 315℃, 因此, 焊接时焊缝附近材料会很快溶解。当激光热源作用于机匣焊缝的瞬间, 在机匣深度方向上存在很大的温度梯度, 其热冲击较大, 会将机匣焊透。

由图 5(b)可见, 当计算时间达到 1 061.02s 时, 焊缝外表面温度最高达 2 506.44℃。

当激光移动到每一垂直焊接横截面时, 机匣外表面焊缝中心的温度很高, 离焊缝中心越近的节点处温度越高, 远离焊缝中心的节点处温度低, 焊接时在焊缝周围存在着温度梯度。因此, 可从质的方面对焊接熔池状况作出正确评价。当激光离开焊接截面后, 焊缝中心附近的温度迅速下降, 而远离焊缝处则温度有所升高, 但上升速度很缓慢。随着时间的推移, 最终整个机匣温度会趋于均匀, 焊接终止时的温度变化如图 5(c)所示, 最高温度为 20.685 7℃, 最低为 20.009 6℃, 基本接近室温 20℃, 这与实际焊接情况相符。

另外, 内表面最高温度并未出现在正对焊缝的内表面, 而是向外一侧偏移约 3~5mm。这是由于机匣两端面水平段未完全贴紧安装边, 热量通过安装边接触热传导的速度比直接热传导稍慢的缘故。

### 3.2 焊接应力场与分析

激光焊接数值仿真计算时温度场和应力场是间接耦合的。焊接温度场计算完成后, 通过转换单元类型, 并将焊接加热和冷却过程的温度场读入, 形成热载荷施加在模型上进行焊接应力计算。

图 6 为焊接终止时激光热源处于不同节点位置时的应力分布云图, 同时也表明了应力在不同时刻的分布规律。从图中可以看出, 焊接时从热源开始移动到最

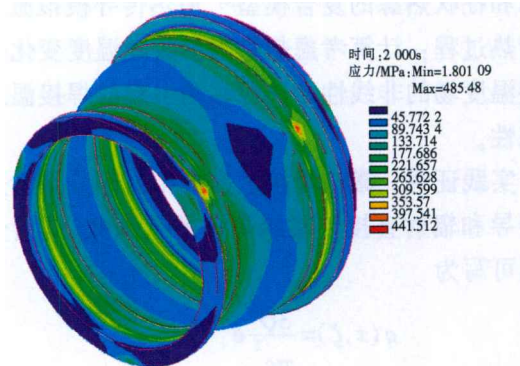


图 6 焊接终止时在不同节点处的应力变化  
Fig.6 The stress changes on different nodes when the end of welding

终冷却,随着距初始焊接位置距离的增大(除过始焊点和终焊点),应力的分布无明显的变化,应力大小为350MPa左右,基本趋于一致。但在始焊(终焊)位置时应力明显增加,应力高达485.484MPa,这与实际焊接时的应力变化情况基本一致。另外,边缘局部约束处的应力较大,其值为150MPa左右,但该区域距离焊缝远,所以不会对焊缝产生很大影响。安装边突出处的应力最小,只有1.801 09MPa,故可知此处焊接时产生的热应力很小,几乎没有,这正好验证了最初建模时简化安装边上小孔的理论正确性。

### 3.3 焊接热变形与分析

焊接过程是一个复杂的热力耦合过程,其变化包括许多方面。图7为焊接终止时在不同节点处的合成位移变化情况。由图可见:离焊缝最远的边缘处的位移变化大,高达2.240 64mm;离焊缝最近的边缘处的位移变化小,最小为1.551 59mm。由此可分析焊接热过程中位移变化的规律。因此,根据焊接热变形的数值模拟结果,在实际焊接时采取适当的反变形措施,有针对性地抑制焊接时产生的热变形,尽量使其最终变形达到最小。

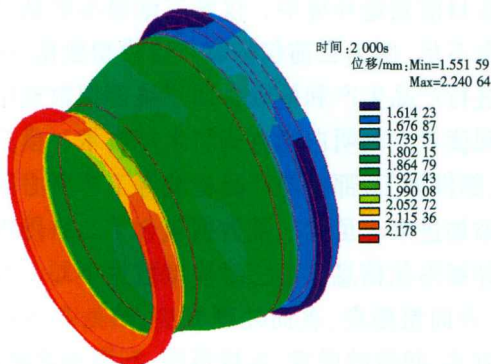


图7 焊接终止时在不同节点处的合成位移

Fig.7 The resultant displacement on different nodes when the end of welding

## 4 结论

本课题基于专用焊接有限元分析软件 Sysweld,对燃烧室薄壁机匣进行了焊接有限元分析,通过仿真分析,获得了焊接时温度场、应力场、焊接热变形的分布规律,并结合整个机匣的实际工作状态对其结果进行了定性分析,这不仅有助于燃烧室机匣的实际焊接工艺的改进和优化,而且对于燃烧室机匣的整体性能提高具有参考价值。另外,本课题对机匣有限元分析中所

采用的技术处理方法,对解决不同工程领域的类似问题也是一个很有益的借鉴。根据以上分析结果,可得出如下结论:

(1)焊接时温度场的分布呈现出一定的温度梯度,并呈现出以焊缝为中心的对称分布,由里向外温度从高到低依次减小;焊接后冷却时温度由里向外温度从低到高依次增大。最终整个焊件的温度趋于一致并接近室温。

(2)焊接后,焊缝及附近区域处于复杂的三维应力状态,表层以下的应力比外表面的应力更大,在焊缝处,焊接应力达到最大值,从而使薄壁圆筒焊缝附近易产生宏观开裂,焊缝处易产生微裂纹,所以在实际焊接时应尽量采取相应措施来减小此处应力,避免产生裂纹。

(3)用移动热源模型对机匣焊接进行有限元计算的结果表明,焊缝中心处的应力比焊接接头相应区域的应力数值减小了约50%。

(4)焊接后的位移变化随着约束条件的不同而不同。焊缝处明显突出,位移最大;边缘受约束处位移小,边缘处于自由状态时位移大。

## 参 考 文 献

- [1] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构设计. 北京:北京航空航天大学出版社,1988.
- [2] Masubuchi K. Prediction and control of residual stress and distortion in welded structure. Proceedings of the International Symposium on the Oritical Prediction in Jointing and Welding. Osaka,Japan,1996: 71-88.
- [3] 汪建华,戚新海,钟小敏. 三维瞬态焊接温度场的有限元模拟. 上海交通大学学报,1996,30(3):120-125.
- [4] Frewin M R, Scott D A. Finite element model of pulsed laser welding. Welding Research Supplement, 1999, 78 (1): 15s-22s.
- [5] 赵贺,杨黎峰. 激光焊接热过程数值模拟研究进展. 航天制造技术,2004,10(5):33.
- [6] 邹德宁,雷水平,黄廷禄. 移动热源条件下熔池内流体流动和传热问题的数值研究. 金属学报,2000,36(4):387-390.
- [7] Tsirkas S A, Papanikos P, Kermandis T H. Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens. Journal of Materials Processing Technology, 2003,134: 59-69.
- [8] Diltheyu, Weiser J. Investigations of EB characteristics and their influences on the weld shape. Welding in the World, 1997, 39(2): 89-98.

(责编 七丁)