航空发动机薄壁机匣激光焊接有限元数值模拟

汪 苏 王春侠 郭军刚

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

摘 要: 针对航空发动机的关键部件之一——燃烧室薄壁机匣建立了激光焊接的数值分析模型. 基于 SYSWELD 软件的焊接分析功能,运用有限元分析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的温度场、应力场以及变形情况,同时对焊接模拟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模拟结果进行了定性分析,验证了分析方法的可行性,为实际薄壁机匣焊接提供了理论依据,有助于薄壁机匣焊接工艺方法的改进. 该分析方法对焊接领域类似问题的处理也有借鉴意义.

关 键 词: 有限元分析; 薄壁机匣; 激光焊接; 温度场; 应力场; 变形

中图分类号: TG 404

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0833-05

Numerical simulation of laser welding in combustion chamber case shell on aeroengine

Wang Su Wang Chunxia

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Guo Jungang

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A numerical analysis modeling was created about the case shell on aeroengine combustion chamber, which is one of the crucial parts of the aeroengine, during the process of laser welding. Welding deformation due to circumferential welds at the joint between the two cylindrical shells was studied using the finite element analysis method based SYSWELD. Temperature field, welded joint stress field and deformation in laser welding at case shell were simulated. Heat resource problems during welding were analyzed and discussed from the point of mathematics, based on which the analysis result was qualitatively discussed combined with the factual conditions of the whole case shell for validating the feasibility of the method. The analysis will provide a theoretic reference for factual case shell welded, and is helpful to the improvement of the case shell welding craft methods. The method is also a reference to settle similar problems in welding fields.

Key words: finite element analysis; case shell; laser welding; temperature field; stress field; deformation

近 20 年来,随着军用战机未来作战发展的需要,对其动力装置尤其是对燃烧室提出了更高要求. 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,承受轴向力、径向力、扭矩、弯矩、振动等载荷,受力非常复杂. 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,容易被压扁变成椭圆,失去稳定,尤其是高增压比的发动机更甚[1]. 燃烧室薄壁机匣在激光焊接过程中更易引

收稿日期: 2005-07-12

作者简介: 汪 苏(1959-),男,北京人,教授, wangsu@buaa.edu.cn.

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和试验研究,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.

本文基于焊接有限元分析软件SYSWELD,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过程中温度场和应力场进行分析,从而为控制焊接变形和改善焊接工艺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. 该燃烧室扩压器出口轴线与火焰筒轴线并不重合,而是有一定角度,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,整体结构基本对称,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,而且焊接时对其产生的影响很小,同时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,见图1. 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,圆筒的几何尺寸见表1.

表1 几何尺寸参数列表 mm

长度	小端外径	大端外径	壁厚
300	580	690	2

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[2-3]. 对于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,而其它部分则可以在保证精度的前提下保持较疏的网格.

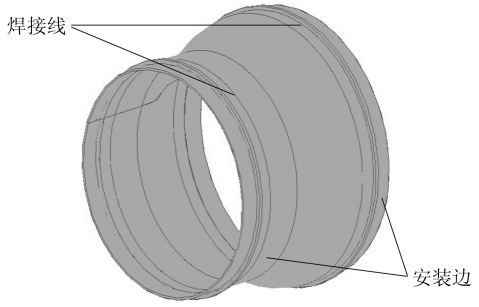


图1 燃烧室外机匣简化分析模型

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,使模型干净. 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. 针对实际结构的特点,在自动划分网格之后,为了使得计算结果更准确,需作手工调整,同时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272 000,节点总数为19 980.

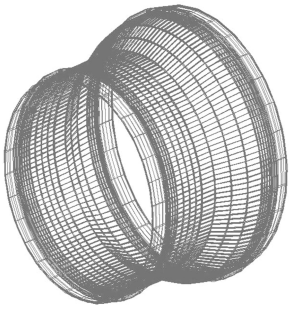


图2 燃烧室外机匣网格划分图

1.3 约束和载荷

求解焊接温度场和应力场时,通过施加一定的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周向和轴向2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

快. 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,于是焊接速度取为 10 mm/s. 在激光的焊接过程中,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[4].

1.4　单元生死

如果在模型中加入或删除材料,则其中相应的单元就"存在"或"死亡". 单元生死用于在这种情况下重新激活或杀死单元以模拟材料的加入或删除,该功能用在薄壁机匣 2 道焊中.

在 SYSWELD 中,对第 1 道焊缝进行焊接模拟时,必须杀死第 2 道焊接线以后的所有单元,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 $ / IS -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,方法同样.

在计算完第 1 道焊缝后,计算第 2 道焊缝时,若不进行上述操作过程,系统将自动激活第 2 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,各种热源模型得到了发展,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,激光焊接中存在着汽化、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[5]. 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:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_v=\frac{\partial H}{\partial t} \tag{1}$$

式中,热焓 $H=\int\rho\cdot C(T)\mathrm{d}T$;$T$ 为摄氏温度;ρ 为密度;$C(T)$ 为材料的比热容,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;坐标为 (r,θ,z);t 为时间;λ 为导热系数,它是温度的分段线性函数. 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.

初始条件:在 0 时刻,工件的初始温度为 0.

$$T\Big|_{t=0}=\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_0}=\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_k}=\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=y_0}=\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=y_n}=\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=z_m}=0 \tag{2}$$

边界条件: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.

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_0}=\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_k}=\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=y_0}=\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=y_n}=\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=z_m}=0 \tag{3}$$

式(2)、式(3)中,x_k,y_n,z_m 分别为焊接对称面上各点在求解过程中任一时刻的 3 个坐标分量.

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[6]. 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通过热传导和辐射直接传输给焊件[7],为此高斯分布的热源可写为

$$q(x,\zeta)=\frac{3Q}{\pi c^2}\mathrm{e}^{-3x^2/c^2}\mathrm{e}^{-3\zeta^2/c^2} \tag{4}$$

式中,Q 为能量输入率;c 为热流分布特征半径;ζ 为动坐标参数. 为方便起见,将固定坐标系 (x,y,z) 引入,并定义热源位置滞后的时间因素 τ,则动、静坐标系关系可写为

$$\zeta=z+v(\tau-t) \tag{5}$$

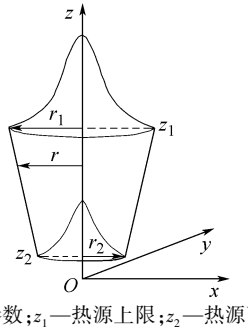
式中 v 为焊接速度. 在 (x,y,z) 坐标系中式(4)可写为如下形式:

$$q(x,z,t)=\frac{3Q}{\pi c^2}\mathrm{e}^{-3x^2/c^2}\mathrm{e}^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2} \tag{6}$$

此时 $x^2+\zeta^2<c^2$. 对于 $x^2+\zeta^2>c^2$,$q(x,\zeta,t)=0$.

综合以上因素,在 SYSWELD 中激光焊接模拟仿真所采用的热源模型和热源校核截面图分别如图 3、图 4 所示.

将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,热源的移动是



r_1,r_2—高斯参数;z_1—热源上限;z_2—热源下限

图 3　3D 锥形高斯热源

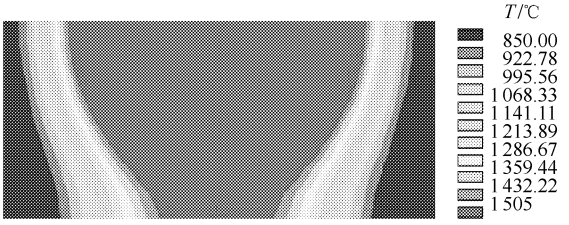


图4 热源校核截面图

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[8].

3 焊接仿真有限元计算

3.1 焊接温度场结果与分析

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汽化温度以上. 在温度场模拟时,材料熔点温度与实际工况温度范围一致. 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1道焊缝焊接时燃烧室薄壁机匣焊缝内外表面的温度分布.

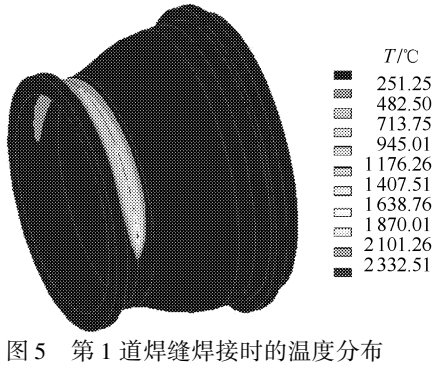


图5 第1道焊缝焊接时的温度分布

图5可见,焊缝外表面温度最高达2563.76℃,远高于材料GH118的熔点(1315℃),因此焊接时焊缝附近材料会很快发生熔解. 当激光热源作用在机匣焊缝瞬间,在机匣深度方向上存在很大温度梯度,热冲击较大,会将机匣焊透.

图6为进行第2道焊缝焊接时机匣焊缝内外表面的温度分布.

图6可见:焊缝外表面温度最高达2506.44℃,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,因此焊接时在焊缝周围存在着温度梯度,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,远离焊缝处温度有所升高,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,焊接终止时的温度分布如图7所示,最高温度为20.69℃,最低为20.01℃,基本接近室温20℃. 另外内表面最高温度并未出现在正对焊缝的位置,而是向外侧偏移约3~5 mm. 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.

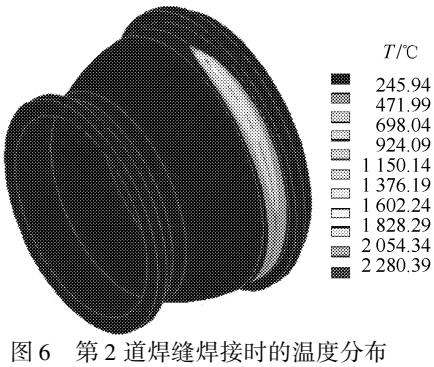


图6 第2道焊缝焊接时的温度分布

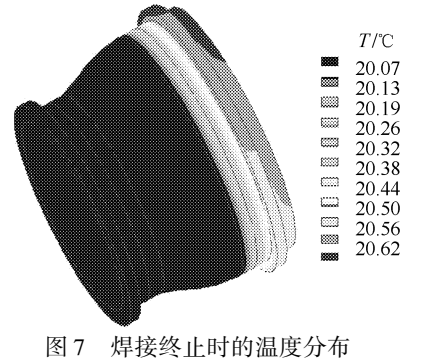


图7 焊接终止时的温度分布

3.2 焊接应力场结果与分析

热-结构耦合分析是指求解温度场对结构中应力、应变和位移等物理量影响的分析类型. 对于热-结构耦合分析,在SYSWELD软件中通常采用间接耦合分析方法,即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,将热分析中得到的节点温度作为体载荷施加到随后的结构分析中以进行焊接应力计算.

直接耦合方法只包含一个分析,它使用包含多场自由度的耦合单元,通过计算包含所需物理量的单元矩阵或载荷向量矩阵或载荷向量的方式进行耦合,即温度载荷和结构载荷同时施加进行计算. SYSWELD中也可以进行热-结构的直接耦合分析,本文采用了热-结构间接耦合分析方法,以保证分析过程中求解思路的清晰性.

图8为焊接终止时机匣焊缝内外表面的应力分布云图. 图中可见,焊接时随着距初始焊接位置

距离的增大应力的分布无明显变化,大小为350 MPa左右,基本趋于一致. 但在终焊位置时应力明显增加,高达 485.48 MPa. 此外,边缘局部约束处的应力较大,其值为 150 MPa 左右,但因其距离焊缝远,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 1.80 MPa,故可知此处焊接时产生的应力很小.

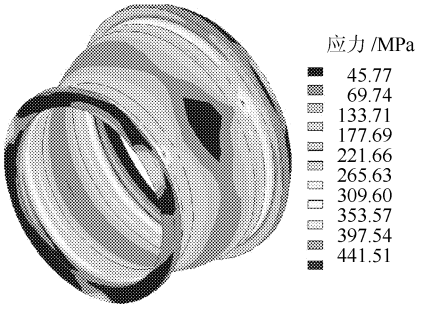


图 8　焊接终止时的应力场

3.3　焊接热变形的结果与分析

焊接过程是一个复杂的热-结构耦合过程,其变化包括许多方面. 图 9 为焊接终止时不同节点处的总位移. 可见:离焊缝最远的边缘处的位移大,高达 2.24 mm;离焊缝最近的边缘处的位移小,最小为 1.55 mm. 由此可分析焊接热过程中变形的规律. 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.

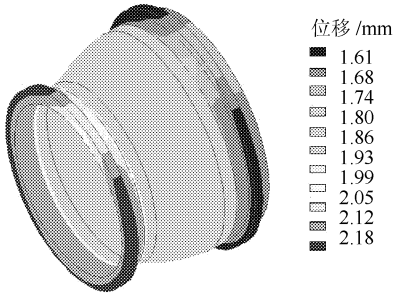


图 9　焊接终止时的总位移

4　结　论

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

2) 焊接后,焊缝及附近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) 焊接后机匣各处的位移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,边缘处于自由状态处位移大.

参考文献 (References)

[1] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1988:223-230
Chen Guang. Structure designing of air gas turbine engine[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,1988:223-230(in Chinese)

[2] Chang W S,Na S J. A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro-joining[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,120(1-3): 208-214

[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[J]. 上海交通大学学报,1996,30(3):120-125
Wang Jianhua, Qi Xinhai, Zhong Xiaomin. 3-D simulation of transient welding temperature fields by FEM[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,1996,30(3):120-125(in Chinese)

[4] Frewin M R,Scott D A. Finite element model of pulsed laser welding[J]. Welding Journal(Supplement), 1999, 78(1):15-22

[5] 赵贺,杨黎峰,赵熹华. 激光焊接热过程数值模拟研究进展[J]. 航天制造技术,2004,10(5):31-35
Zhao He,Yang Lifeng, Zhao Xihua. Research and evolution on numerical simulation for laser welding process[J]. Space Manufacture Technology,2004,10(5):31-35(in Chinese)

[6] 邹德宁,雷水平,黄廷禄,等. 移动热源条件下熔池内流体流动和传热问题的数值研究[J]. 金属学报,2000,36(4):387-390
Zou Dening, Lei Shuiping, Huang Tinglu, et al. Numerical analysis of fluid flow and heat transfer in melted pool with a moving heat source[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(4): 387-390(in Chinese)

[7] Tsirkas S A, Papanikos P, Kermanidis Th. Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens[J]. J Mater Process Technol, 2003, 134(1): 59-69

[8] Dilthey U,Weiser J. Investigations of EB characteristics and their influences on the weld shape[J]. Welding in the World,1997, 39(2):89-98

(责任编辑:文丽芳)