航空发动机燃烧室安装座相贯线焊缝焊接模拟

汪 苏 周 锋 张瑛莉

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对航空发动机的关键部件之一——燃烧室安装座建立了相贯线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安装座相贯线焊接时引起的焊接变形, 模拟了安装座相贯线焊接时的温度场、应力场、相变以及变形情况. 结合整个安装座的实际工作状况对模拟结果进行了分析, 同时对相贯线焊接过程中产生的变形从数学上进行了分析和探讨, 得到了安装座相贯线焊接模型的变形分布及位置, 为实际焊接提供了理论依据, 有助于安装座焊接工艺的改进. 该分析方法对焊接领域诸多类似问题的处理也有借鉴意义.

关 键 词: 有限元分析; 相贯线焊接; 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(2008)08-0986-05

Numerical simulation of intersection line welding in installation pedestal on aeroengine combustion chamber

Wang Su Zhou Feng Zhang Yingli

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract A numerical analysis modeling was created about the installation pedestal on aeroengine combustion chamber, which is one of the crucial parts of the aeroengine during the process of intersection line welding. Deformation caused by the intersection line welding at the joint between the two cylindrical shells was studied using the finite element analysis method based on SYSWELD. Temperature field, welded joint stress field, phase transition and deformation in intersection line welding on installation pedestal were simulated. Linked with the factual conditions of the installation pedestal, the simulation result was discussed and the deformation in intersection line welding was analyzed using mathematic method. The deformation distribution and location of the modeling were defined. These will provide a theoretic reference for factual installation pedestal welding, and are useful to optimize the technology of the installation pedestal welding. This method also provides a reference to solve similar problems in welding fields.

Key words finite element analysis; intersection line welding; temperature field; stress field; deformation

近年来, 未来飞机发展的需要, 对其动力装置尤其是对燃烧室提出了更高的要求. 现代飞机发动机的燃烧室安装座是发动机的重要构件之一, 承受轴向力、径向力、扭矩、弯矩等载荷, 受力情况非常复杂. 同时安装座本身的结构也非常复杂, 焊缝为相贯线形状, 所以在焊接过程中极易产生变形和焊接缺陷, 进而影响燃烧室的整体性能. 为了研制高性能的航空发动机, 有必要开展燃烧室安装座相贯线焊缝的焊接仿真和试验研究, 寻找合理的焊接方案和工艺参数, 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.

本文基于焊接专用有限元分析软件 SYSWELD, 应用焊接热传导及热变性理论模拟了某型号发动机燃烧室安装座相贯线焊缝焊接的过

收稿日期: 2007-07-17

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

程,得到了焊接温度场、焊件应力场及焊后变形结果并进行分析,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　模型的建立

1.1　安装座简化分析模型和网格划分

安装座相贯线焊缝焊接的数值模拟相对来说较为复杂. 座体壁厚 1.2mm,远远小于模型的其它几何尺寸,属于大型薄壁焊接结构. 因此,为了减少网格数量、缩短计算时间、提高计算效率,忽略材料厚度,使用二维壳单元(shell element)在结构的中面上划分网格,建立有限元模型. 这样合理的形状简化、变换处理,既能保证一定的分析精度,又能使分网和计算过程大为简化. 经过以上简化,可建立安装座的有限元实体模型,如图 1所示. 本文的安装座由于形状较复杂,在有限元软件中直接建模难以实现,所以选择了先在三维软件中建立几何模型,再将其线框、曲面模型调入到 SYSWELD中,清除掉模型中多余的曲面、边线及点,使模型干净,最后划分网格实现有限元模型.

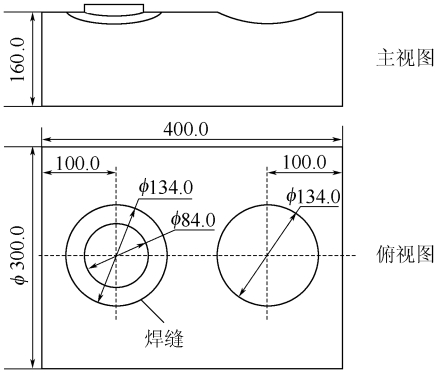


图 1　模型几何尺寸(单位: mm)

在有限元分析中,网格的划分是建模过程中最为关键的环节,直接关系到计算的精度、模型的规模. 由于焊接的能量比较集中,有效加热区域主要集中在焊缝附近,因而为了提高精度,在焊缝附近要采用很小的网格单元,而在远离焊缝的区域则可以选择较大的网格单元[1-2]. 本文中的安装座由于尺寸较大,所以为了减少计算量和节省存储空间,在焊缝附近网格划分细密,而在远离焊缝区在保证精度的前提下采用较稀疏的网格. 根据以上原则,最终建立的有限元网格模型如图 2所示,共有 4974个单元(包括 2D和 1D单元)、4421个节点(不同维数单元相应的重合节点均已合并).

1.2　材料热物理参数

金属材料的物理性质对焊接温度场的分布、

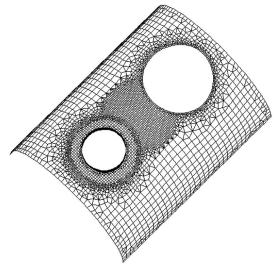


图 2　模型的网格划分

焊缝的形成有着十分重要的影响. 大多数物理性质参数都是随温度变化而变化的. 该燃烧室安装座拟用材料为马氏体型不锈耐热钢 2Cr13,熔点约为 1444℃,主要化学成分如表 1所示.

表 1　2Cr13的主要化学成分

元素	C	Cr	Mn	Si	Ni
质量分数/%	0.16~0.24	12.0~14.0	≤0.6	≤0.6	≤0.6

1.3　边界条件

施加在模型上的各类外部条件通称为边界条件. 边界条件反映了分析对象与外界的相互作用,是实际工况条件在有限元模型上的表现形式.

本文中的案例涉及 2种边界条件: ①节点自由度约束,主要用于模拟焊接工件的装卡情况. 图 3所示为焊件的装卡条件,即对根据实际装卡条件做了适当简化后选定节点约束了其 x, y, z三个方向上的自由度. ②工件的热边界条件,用于表示外界温度(亦即焊件的初始温度)、焊件表面与外界的相互热作用. 设定焊接初始温度条件为室温 20℃,即焊件初始温度;焊件表面与外界的热作用方式主要是对流换热和辐射换热,可在 SYSWELD中直接设置.

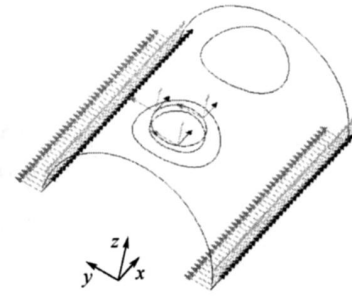


图 3　模型的装卡边界条件

2　热源模型的建立及焊缝变形计算

不同的焊接方式能量分布各不相同. 所以为了在模拟中得到准确的应力场和温度场,针对不同的焊接方式要建立合适的热源模型. 本文中,对于壁厚远远小于工件其余尺寸的安装座相贯线焊缝焊接模型,建模时已经忽略了焊件厚度,将模型

简化为二维曲面结构, 因此热源模型主要考虑焊接热源在安装座表面上的二维热量分布. 实际焊接时热源需要通过一定的作用面积把热能传给焊件, 该面积称为加热斑点. 加热斑点上的热量分布是不均匀的, 中心热流密度大, 而边缘小. 文献[3]将加热斑点上热流密度的分布近似的用高斯数学模型来描述, 其功率密度的一般形式如下:

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

$$q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q \quad (2)$$

$$Q = \eta UI \quad (3)$$

式中, q_m为热源中心的最大热流密度 (W/m^2); R为电弧有效加热半径 (mm); r为热源某点至电弧加热中心的径向距离 (mm); Q为热源的有效功率 (W); η为焊接热效率; U为电弧电压 (V); I为焊接电流 (A). 二维高斯热源模型的热流分布如图 4所示.

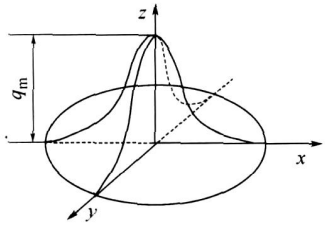


图 4 二维高斯热源模型简图

对于薄板类焊接结构, 二维高斯面热源模型能较好的描述焊接温度场. 该热源模型忽略板厚方向的热梯度, 适于进行薄板焊接温度场的模拟. 本文中相贯线焊缝的焊接电流为 60A, 焊接电压为 20V, 焊接速度为 5mm/s, 焊接热效率为 80%, 焊缝总长 423.75mm, 热源作用时间 84.75 s, 冷却时间 815.25 s, 冷却方式为室温下空气中自然冷却. 在相贯线焊接中焊缝的变形情况非常复杂, 但主要由纵向收缩和横向收缩造成, 其中纵向收缩起决定作用[4]. 焊缝塑性变形区的存在使构件相当于收到一个外加压力 P_f的作用而缩短 (或弯曲). 假想压力 P_f的数值可由下式表达[5]:

$$P_f = E \int_F \varepsilon_p \, dF \quad (4)$$

构件在假想外加压力 P_f的作用下产生纵向收缩 ΔL, 其数值可用下式表达:

$$\Delta L = \frac{P_f L}{EF} = \frac{L \int_F \varepsilon_p \, dF}{F} \quad (5)$$

式中, F为构件的截面积; F_p为塑性变形区面积; E为构件材料的弹性模量; L为构件的长度 (焊缝贯穿全长); ε_p为塑性应变.

横向收缩变形产生的过程比较复杂, 根据相贯线焊接的特点, 可以按丁字接头的焊缝形式来计算其横向变形量, 用下式进行估算[5]:

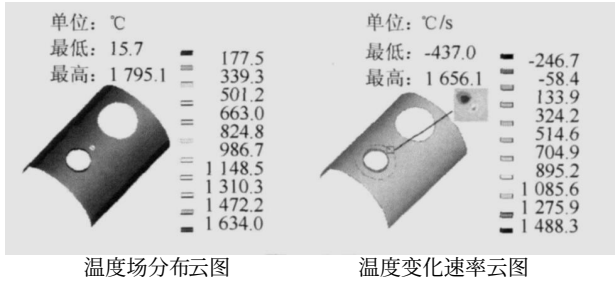
$$\Delta B = 1.2 \times 10^{-5} \times \frac{2q}{v(2\delta_H + \delta_V)} \quad (6)$$

式中, q/v为焊接线能量; δ_H和 δ_V分别为安装座和安装体的厚度.

3 求解结果与分析

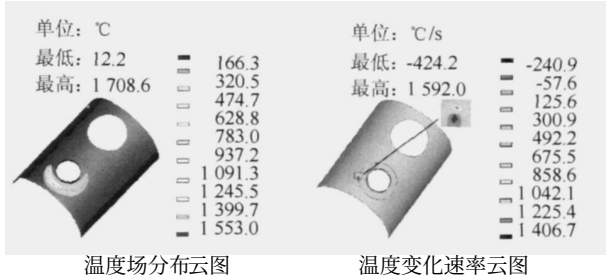
3.1 温度场模拟计算结果及分析

图 5给出了安装座模型在不同时刻 (即热源处于焊缝上不同位置时及冷却过程中)的温度场分布.



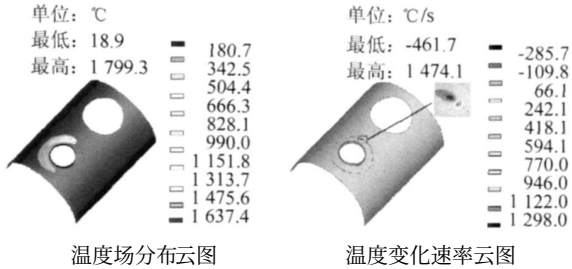
温度场分布云图 温度变化速率云图

a t= 2.0 s(加热初始阶段)



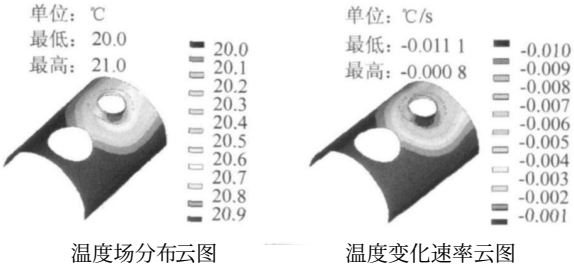
温度场分布云图 温度变化速率云图

b t= 60.1 s(加热过程中)



温度场分布云图 温度变化速率云图

c t= 84.75 s(加热结束)



温度场分布云图 温度变化速率云图

d t= 900 s(冷却至室温)

图 5 焊接温度场结果云图

从图 5a中可以看出, 在加热初始阶段焊缝外表面最高温度 1 795. 1℃, 已超过焊件母材熔点 1 444℃. 同时增温范围逐渐向四周扩大. 热源作用点处升温速率高, 随着热源前移, 后端已开始降温, 但降温速率相对较小. 经过一段时间后, 形成准稳态温度场. 此时焊件上各点的温度随时间不断变化, 但整个温度场随热源一起移动, 不发生明显变化. 此时, 温度场等温线是相对于焊缝对称的闭合类椭圆形. 热源作用前端, 迅速升温, 等温线密集, 温度梯度极大; 而热源作用尾部, 随着热源离开高温区逐渐开始散热, 等温线稀疏, 温度梯度小, 如图 5b所示. 图 5c给出了焊件上热源作用终止时刻的温度场及温度变化速率. 对于环形焊缝而言, 前端散热不受影响, 热源离开升温速率迅速减小, 而降温速率增大. 此后, 焊件进入冷却阶段. 从这个过程中可以对焊接熔池作出正确分析. 图 5d给出了焊件在冷却阶段的温度场及温度变化速率. 冷却过程中, 由于热量的散失, 等温线向两边不断远离焊缝, 并趋近于与焊缝平行. 高温区等温线向四周扩大, 降温速率值在冷却初始阶段较大, 随着焊件温度的下降而逐渐减小. 最终焊件上各处温度趋近于室温 20 ℃, 降温速率趋于零. 从图中还可以看出, 在安装座相贯线焊缝焊接结构中, 热量快速向远离焊缝的方向扩散, 即高温区等温线向不易散热的安装座偏移, 薄壁筒体散热较快.

3. 2　焊接应力场结果与分析

图 6所示为焊接过程结束 (84. 75 s)时焊件上的平均应力分布. 图中可见, 焊缝及其附近应力场都表现为焊缝中心线上主要呈现压应力, 最大值为 - 206. 2MPa 相邻两边狭窄区域为拉应力且绝对值较大, 最大值为 361. 7MPa 这是由于热源的作用引起材料不均匀的局部受热, 使焊缝区熔化, 而与熔池毗邻的高温材料的热膨胀则受到周围材料的限制, 产生了不均匀的压缩塑性变形; 在冷却过程中, 已发生塑性变形的这部分材料又受到周围的制约, 而不能自由收缩, 在不同程度上承受拉应力; 与此同时, 熔池凝固, 形成的焊缝金属冷却收缩受阻时也将产生相应的拉应力. 另一方面, 焊接接头区金属在冷却到较低温度时, 材料回复到弹性状态, 此时组织发生变化, 伴随有体积变化, 出现相应应力.

如图 7取点, 从图 8、图 9中可以得到热源作用终止 (t = 84. 75 s)时焊缝中心线节点的纵向应力和横向应力在不同位置的分布情况.

如图 8所示, 在热源作用终止时刻, 焊缝前段

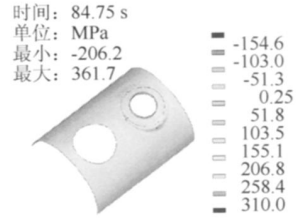


图 6　焊接应力场结果云图



·—节点 (8 个, 在相贯线焊缝上均布)

图 7　取点示意图 (单位: mm)

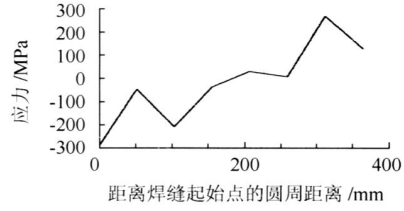


图 8　节点纵向应力变化曲线 (t = 84. 75 s)

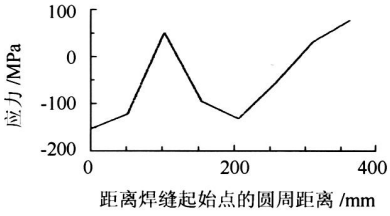


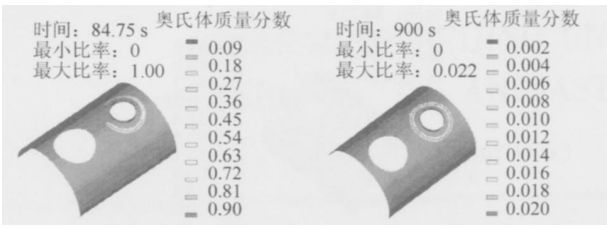
图 9　节点横向应力变化曲线 (t = 84. 75 s)

承受纵向压应力, 起始点最大约为 - 290MPa, 而焊缝后段纵向应力表现为拉应力, 最大值约为 260MPa, 焊缝中段几点的应力绝对值较小, 小于 40MPa

图 9可见, 焊缝不同位置由于温度不同, 横向应力值变化显著, 最大压应力值约为 - 155MPa 最大拉应力值约为 75MPa, 但大部分区域承受横向压应力 (在所取的 8个点中有 5个是承受压应力).

3. 3　焊接金相组织转变的结果与分析

焊接过程中, 由于材料受热, 其微观组织会发生相应的变化. 2Cr13在加热至一定温度和冷却至一定温度后都会发生相变, 这个温度和转变程度取决于焊接加热 (冷却)速度、最高温度和在此温度之上的持续时间. 图 10给出了安装座相贯线焊缝焊接模型焊接过程中热源作用结束和冷却至室温 2个时刻的金相组织变化云图.



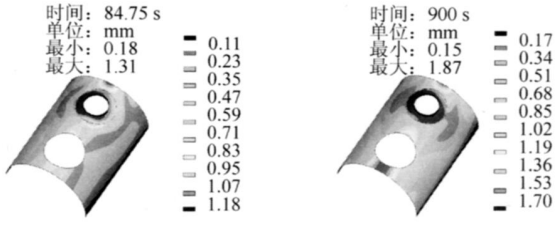
a t= 84.75 s(加热结束) b t= 900 s(冷却至室温)

图 10 焊接模型相变云图

其中母材初始组织为马氏体(碳在α-Fe中的过饱和固溶体),焊缝中心高温区组织绝大部分为奥氏体(碳原子溶于γ-Fe的固溶体).热源作用进行中,焊缝区已焊段材料的组织发生转变,部分马氏体组织转变为奥氏体组织.与其它金相转变相同,马氏体的金相转变是可逆的.焊件加热至一定温度时,焊缝区域金相组织就会有马氏体向奥氏体的转变;热源作用结束后,随着冷却过程的进行,部分奥氏体又转变回马氏体.热源作用终止,焊缝高温区奥氏体质量分数仍然很高,最大达到99.92%,但已经处于冷却的部分奥氏体又转变回马氏体,温度越低奥氏体质量分数越少.比较图10a和图10b可见,t= 900 s,焊件冷却到室温,此时奥氏体组织含量较图10a已大大减少,最终的焊缝区材料中奥氏体和马氏体的含量与初始母材中的含量相差不大.

3.4 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11为热源作用焊接终止和冷却到室温时各节点处的总位移.



a t= 84.75 s(加热结束) b t= 900.0 s(冷却到室温)

图 11 焊接模型变形云图

从图11a中可以看出热源作用终止时最大变形1.31 mm,最小变形为0.18 mm,从图11b中可知冷却到室温时的最大变形为1.87 mm,最小变形为0.15 mm.而且可以从图中看出离焊缝最远的边缘处位移较大,而焊缝和孔之间的节点位移较小.所以整体来看,安装座的变形很小.根据焊接热变形的数值模拟结果,可以分析焊接过程中的变形规律,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[6].

4 结 论

1) 焊接时温度场的分布呈现出一定的规律,近焊缝区温度梯度较大,热源中心前部等温线密集,温度梯度极大;热源中心后部温度梯度逐渐减小;远离焊缝的地方受热源影响较弱甚至不受热源影响,冷却过程中椭圆形等温线逐渐偏离易于散热的一端.

2) 由于材料不均匀的局部受热和金相组织变化共同作用,焊缝中心线主要呈残余压应力分布,相邻两边的狭窄区域内则表现为绝对值较大的拉应力.

3) 变形明显部位处于薄壁筒体圆周边缘的中间位置,冷却到室温时最大变形量为1.87 mm,安装座变形量很小.

参考文献 (References)

[1] 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

[2] 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)

[3] Eager T W, Tsai N S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources[J]. Welding Journal, 1983, 62(12): 346-355

[4] 董丕明,顾福明,高进强,等.相贯线焊缝纵向收缩对法兰平面影响的数值分析[J].焊接学报,1999,20(2):132-138
Dong Piming, Gu Fuming, Gao Jinqiang et al. Numerical analysis for effect of longitudinal shrinkage of perpendicular intersection weld on flange plan[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(2): 132-138(in Chinese)

[5] 田锡唐.焊接结构[M].北京:机械工业出版社,1996:20-25
Tian Xitang. Welded structure[M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 20-25(in Chinese)

[6] 汪苏,王春侠,郭军刚.航空发动机薄壁机匣激光焊接有限元数值模拟[J].北京航空航天大学学报,2006,32(7):833-837
Wang Su, Wang Chunxia, Guo Jungang. Numerical simulation of laser welding in combustion chamber case shell on aeroengine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 833-837(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)