

5A06 铝合金材料高温热物理参数的工程估算方法

曾 志, 王立君

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 5A06(LF6) 铝合金是一种基本的焊接结构材料, 但该合金的热物理参数, 尤其是在较高温度范围内的材料属性在一般工程条件下很难确定, 对工程计算的准确性有很大影响。基于工程试验结果确定了 5A06 铝合金结构的最佳退火温度, 根据该结构在不同温度退火消应力处理后的变形回弹量, 建立有限元模型, 应用 ANSYS 中的灵敏度与概率设计(PDS)系统对该材料的热物理性能进行估算。结果表明, 估算所得的热物理参数值基本符合工程实际, 所采用的概率分析方法为估算材料的高温热物理参数提供了一种唯象的有效工程手段。

关键词: 5A06 铝合金; 灵敏度与概率分析; 材料性能; 退火

中图分类号: TB440 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)11-101-04



曾 志

0 序 言

焊接过程中不均匀的热循环往往使结构内产生很大的热应力。迄今为止, 焊接应力一直是倍受关注的热点, 是焊接生产领域迫切需要解决的工程问题。

近年来, 国内外学者对此进行了大量研究。在计算机技术日益发展的今天, 采用数值方法预测焊接残余应力已经取得了丰硕的成果。

目前要面对的较重要问题是材料性能, 特别是高温材料性能和某些特殊材料性能缺乏数据, 这给焊接残余应力的数值分析带来了很大的困难^[1,2]。因此, 建立相应的材料特性数据库能促进焊接残余应力数值模拟技术的发展。

5A06 是非热处理强化铝合金, 属于基本的焊接结构材料^[3]。适用于各种塑性加工成形制品, 可供造船、车厢、仪器和容器等各种焊接结构, 是航空航天工业不可缺少的重要材料。在工程实际中, 测试 5A06 的高温热物理参数受到很多现实条件的制约, 花费也比较大。若在数值分析中, 将 5A06 的材料属性以 Al-Mg-Si 系合金的物理性能参数替代, 在工程计算中必然导致偏差与失实, 针对此问题, 使用 ANSYS 的灵敏度与概率分析技术对 5A06 铝合金的高温热物理性能进行了估算, 提出了唯象的工程解决方案。

1 工程试验及分析

基于退火消应力这一思想, 以结构弹性应力的松弛程度, 即变形结构件退火消应力处理后的回弹量作为调整 Al-Mg-Si 系铝合金热物理性能参数的依据, 设计了工程试验以确定 5A06 焊接结构件退火消应力的最佳温度^[3]。试验样件为图 1 中的 5A06 铝圈, 其外径为 $\phi 538$ mm, 内径为 $\phi 520$ mm, 样件数量为 5 个。为了使铝圈样件内产生一定的弹性应力, 需要在铝圈上施加一定的径向作用力, 使之产生相应的径向位移。

用有限元计算可得, 在控制变形量的条件下, 位移 ΔS_x 与图 1 中 A、B 两点的等效应力 R_{eff} 保持线性关系。当 ΔS_x 达到 8 mm 时, A 点处的等效应力 $R_{eff} = 165.2$ MPa, 接近 5A06 室温下的屈服强度 $R_d = 167$ MPa。基于考察退火处理后结构弹性应力松弛的效果, 对 5 个样件均施加径向作用力, 使之产生 $\Delta S_x = 8$ mm 的径向位移(图 1)。

5A06 铝合金的退火温度上限为 410 °C, 将图 1 的样件分别加热至 240, 260, 280, 300 和 320 °C, 保温 0.5 h, 然后空冷至室温, 分别测定其径向位移的回弹量和布氏硬度, 以考察弹性应力的松弛程度和材料软化情况。

在不同退火温度下, 铝圈样件的径向回弹量及其表面硬度的变化如图 2 所示。在室温下解除约束后, 该铝圈的径向位移回弹量为 100%。退火温度

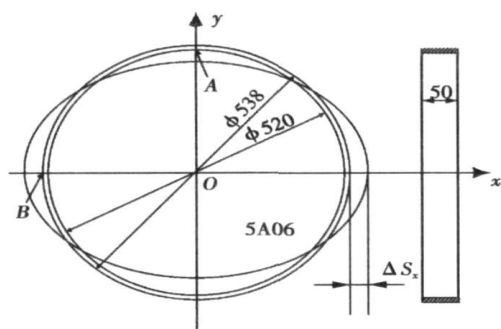


图 1 5A06 铝圈模型(mm)
Fig 1 Model of 5A06 alloy ring

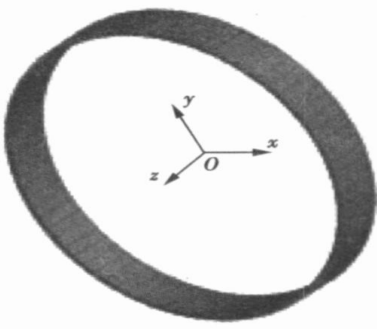


图 3 有限元模型
Fig 3 Finite element model

为 260 ℃时,回弹量为 13.3%,表明在此温度下退火的弹性应力没有完全松弛。退火温度大于 280 ℃时,回弹量为零,表明在此温度下退火可使铝圈内的弹性应力完全松弛。在 300 ℃以上的温度退火则铝圈软化明显。因而,用 280 ℃对图 1 所示的 5A06 样件进行退火处理,能够使其内部的弹性应力得到充分松弛,且不会导致过度软化,有利于该结构件的后续机加工,保证加工精度。

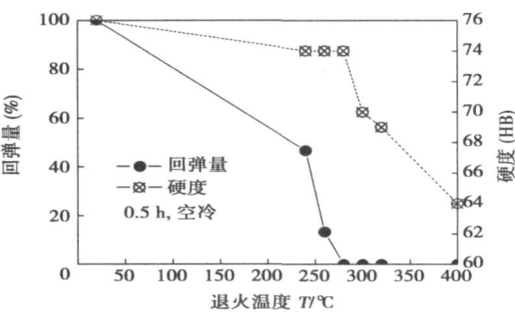


图 2 退火温度对铝圈径向回弹量和表面硬度的影响
Fig. 2 Influence of annealing temperature on rebound value and surface rigidity

2 有限元分析

2.1 有限元模型

以图 1 退火试验的铝圈为对象,建立有限元模型。由于该结构形状为筒形,曲率较大,故有限元单元采用带中间节点的六面体单元 solid95。网格划分采用六面体映射网格,如图 3 所示^[4]。

2.2 边界条件与约束

开始加热前,该模型所有节点的初始温度取为

20 ℃。在退火过程中结构与周围介质的对流换热和辐射会导致热量转移,结构的热传导使得温度逐渐均匀。通常情况下铝的热辐射率为 0.3,所以温度场分析中辐射边界条件的发射率取为 0.3^[5]。

炉内强制对流换热系数用下式^[6]表示

$$\alpha=Kv^{0.8},$$

式中:α 为对流换热系数;v 为炉气的实际流速;K 为系数,取决于炉温,随炉温升高 K 值降低。

2.3 概率设计系统(PDS)

ANSYS 高级技术环节中含有概率设计及灵敏度分析系统(PDS),概率设计用来评估模型的输入参数或假设条件的不确定性对于计算结果的影响。由于在某一给定时刻(随时间变化)或某一给定的位置(随位置变化)无法确定参数的确切值,所以使用不确定的或者随机的参数值作为模型的输入条件,比如无法知道某一时刻确切的材料属性,这些不确定的参数用某种概率密度函数描述,确定性分析的误差取决于输入数据的正确度,其合理性也同样取决于这些数据与实际情况的符合程度。灵敏度与概率设计系统要求相应的随机设计参数,包括随机输入参数,随机输出参数和样本。选择适当的概率设计方法对每组样本数据进行仿真抽样循环,可以得到构件在实际情况下(带有所有不确定性和数值离散性)响应出的所有信息。

文献[7]证实了在焊接过程中,材料的某些物理性质,如泊松比、导热系数和密度等,对残余应力的影响很小,在工程计算中可以不予考虑,即采用其室温时的参数就可以得到满意的结果。而力学性能参数,如弹性模量、屈服强度和线膨胀系数在结构受热变形过程中的影响很大,若用其室温参数值计算则与工程实际的结果相差甚远。基于这一分析,文中仅针对 5A06 的力学性能参数,即弹性模量、屈服强度和线膨胀系数进行 PDS 处理。

3 概率设计 及 分析

3.1 PDS 处理

5A06 属 Al—Mg 系合金, 基于图 2 的工程试验结果, 以 Al—Mg—Si 系合金的材料属性(表 1)为参考系, 对表 1 中 Al—Mg—Si 系合金的材料属性做服从高斯分布的离散化处理以作为 5A06 材料属性 PDS 设计的随机输入参数。首先取图 1 样件试验的退火最佳温度 280 ℃, 采用蒙特卡罗直接抽样法, 进

行 100 次仿真计算, 得到一系列 PDS 计算的数据样本。然后查看计算的退火后样件的径向位移与仿真输入的材料属性的关系。由于用直接抽样的蒙特卡罗法计算的数据样本较多, 计算结果中有个别参数集中或与试验结果偏离较大的情况, 删除这些不合理的计算的“奇点”, 30 个抽样样本对应的退火后结构的径向位移见图 4。由图 4 可见, 用第 25 组抽样样本计算, 该结构退火后的径向位移近似为零, 铝圈不再回弹, 即其弹性应力得到充分释放, 与工程试验结果(图 2)吻合最好因而该组抽样样本可用作

表 1 Al—Mg—Si 系铝合金的材料属性
Table 1 Material properties of Al—Mg—Si alloy

温度 <i>T</i> /℃	弹性模量 <i>E</i> /GPa	线膨胀系数 $\alpha_l/(10^{-6}\text{℃}^{-1})$	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比焓 <i>h</i> /(J·kg ⁻¹)	屈服强度 <i>R_{sL}</i> /MPa
20	70	3.26×10 ⁻³	0.35	2 750	898	130
100	70	1.91	0.35	2 730	951	100
200	61	4.50	0.35	2 710	1 003	54
500	41.3	13.3	0.35	2 640	1 150	10
587	30	15.9	0.35	2 630	1 195	8
630	1	17.6	0.35	2 450	1 165	5

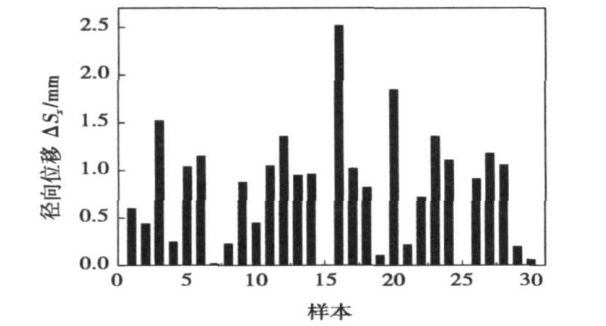


图 4 材料属性的抽样样本与退火后的径向位移
Fig. 4 Sample series and radial displacement after annealing

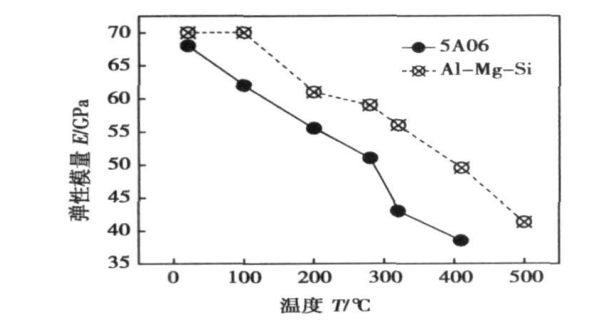


图 5 估算的 5A06 的弹性模量随温度变化曲线
Fig. 5 Estimated Young's modulus for 5A06

280 ℃以下的 5A06 铝合金的材料属性应用。
由图 2 的试验结果可知, 对于该结构而言, 退火温度在 280 ℃以上, 其内部的弹性应力亦完全松弛, 同时材料硬度有所降低。
5A06 铝合金退火温度的上限为 410 ℃。为此, 在 280~410 ℃的温度范围内, 对表 1 中 Al—Mg—Si 系铝合金的材料属性再次进行类似的 PDS 处理, 并应用估算的 280 ℃以下的材料热物理参数, 对铝圈加热到 410 ℃的退火过程进行数值模拟, 以估算 5A06 铝合金的高温热物理性能。更高温度下的热物理性能用外推法确定, 从而得到 5A06 材料的高温热物理性能, 如图 5~图 7 所示。

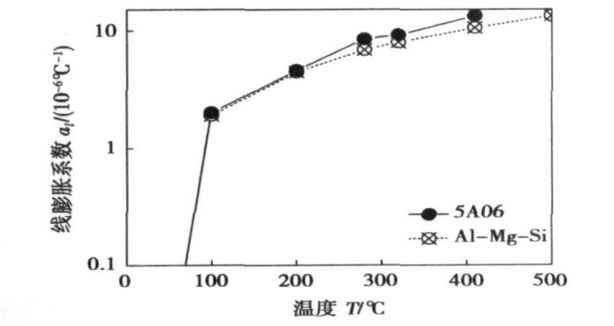


图 6 估算的 5A06 的材料线膨胀系数随温度变化曲线
Fig. 6 Estimated linear expansion coefficient for 5A06

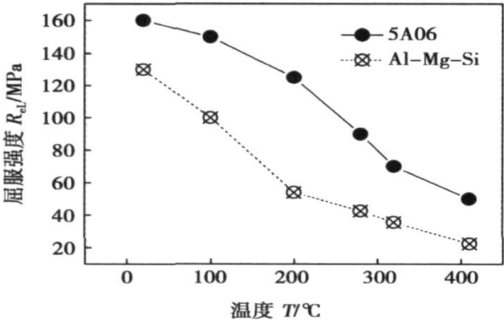


图 7 估算的 5A06 的屈服强度随温度变化曲线
Fig. 7 Estimated yield strength for 5A06

3.2 PDS 处理结果验证

应用校正后确定的热物理参数，以及相同的有限元模型和边界条件对预变形 5A06 铝圈在 260 °C 下的退火工艺进行模拟。结果表明，空冷到室温后，该铝圈仍会有径向位移回弹，结构内亦存在残余应力，如图 8 所示，这与工程试验结果(图 2)基本吻合，表明用 PDS 方法估算的 5A06 的热物理属性具有工程意义上的准确性和实用性。

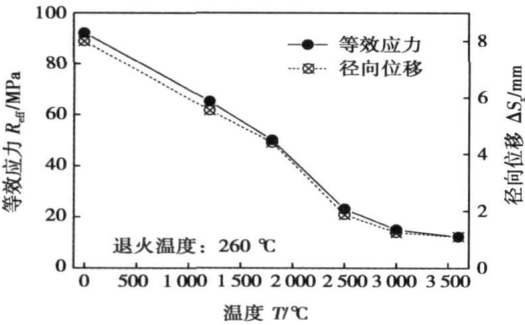


图 8 计算的 B 点径向位移与等效应力随温度变化曲线
Fig. 8 Radial displacement and equivalent stress calculated for point B

4 结 论

- (1) 在工程试验的基础上，对 5A06 铝合金预变形构件的退火消应力过程进行了数值模拟，建立了相应的有限元模型，应用灵敏度与概率设计系统，以 Al—Mg—Si 系铝合金的热物理性能为参考系，估算 5A06 铝合金的高温材料属性。采用估算的 5A06 高温材料属性计算，其结果与工程试验的规律基本吻合，该数据具有工程上的实用性。
- (2) 采用灵敏度与概率分析方法可以在工程上唯象地估算材料的高温热物理性能，为焊接残余应力的数值模拟提供支持。

参考文献:

[1] 董辉跃, 柯映林. 残余应力对加工变形的分析和模拟[J]. 航空材料学报, 2005, 25(5): 54—57.
[2] Ueda Y, Yamakawa T. Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding[J]. Transactions of the Japan Welding Society, 1971, 2(2): 90—100.
[3] 侯学涛, 王立君. 5A06 铝合金焊接构件退火消应最佳温度的确定[J]. 电焊机, 2005, 35(9): 35—37.
[4] 孔祥谦. 热应力有限单元法分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
[5] 孙中原. 铝合金焊接结构退火消应工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
[6] 吴光英. 现代热处理炉[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
[7] Zhu X K, Chao Y J. Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation[J]. Computers and Structures, 2002, 80: 967—976.

作者简介: 曾 志, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要从事焊接结构、疲劳及断裂行为的研究。
Email: tju_zzhier@yahoo.com.cn

dual-arc welding method. Finally, the actual arc igniting course was observed and analyzed by high speed video camera.

Key words: welding; plasma arc; metal inert-gas arc; arc igniting; Paschen law

Mechanical properties and microstructure of X70 butt joint welded by self-shielded flux cord wire

PAN Chuan¹, YU Ping¹, TIAN Zhilin¹, XUE Zhenkui² (1. China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang 065000, Hebei, China). p93—96

Abstract: The present paper deals with the research work of self shielded flux cored wire (FCAW-S) for X70 large diameter pipe. Welding procedure qualifications tests and mechanical properties tests were carried out by Pipeline Research Institute of CNPC to assess field weldability and should be in accordance with API 1104 and the additional standard requirements. The results of welding procedure qualifications tests show that the self-made FCAW-S has good all-positions weldability, detachability, arc stability and less spatter loss coefficient and total amount of weld fumes. The tensile strength of the weld is about 730—760 MPa and the average impact absorbing energy at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 125 J. Tests results show that this self-made FCAW-S can provide a qualified weld for X70 pipeline steel. The microstructure of X70 butt joint weld exhibits acicular ferrite, polygonal ferrite, proeutectoid ferrite, bainite morphology but shows no weidmanstien structure in HAZ (heat-affected zone) coarse grain zone. The main microstructure in columnar crystal zone and HAZ coarse grain zone is bainite. Bainitic microstructure in the butt joint indicated this self-made FCAW-S have the capability to meet all mechanical properties requirements of this welding material.

Key words: X70 Pipeline steel; self-shielded flux cored wire; properties; microstructure

Welding technology and microstructure and properties of welded joint of high strength and hardness alloy steel for tandem GMAW

FENG Yuehai, WANG Kehong, WANG Jianping, GU Minle (Department of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China). p97—100

Abstract: Tandem GMAW (gas metal arc welding) is high efficiency welding technology for high strength and hardness alloy steel in heavy vehicles was studied. Austenitic stainless steel wire was adopted to make welding process experiment for high strength and hardness alloy steel, and the performance and microstructure of the joint were researched. The experiment results proved the good joint of high strength and hardness alloy steel was attained with tandem GMAW.

Key words: tandem; welding parameters; joint properties; microstructure

Engineering estimation method of 5A06 aluminum alloy's material properties by PDS

ZENG Zhi, WANG Lijun (School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p101—104

Abstract The 5A06 aluminum alloy is one kind of basic welding materials but its thermo physical parameters, especially at the high temperature, have been hardly determined under the general project condition, which have great influence on the accuracy of engineering computation. The best annealing temperature of 5A06 Al alloy was confirmed with engineering experiment, based on the rebound after annealing, and the finite element model was built, and the thermo physical parameters were estimated with the probability design system (PDS) in the finite element software ANSYS. The analysis indicated that the obtained material attribute values accord with the project reality. The use of the probability design system provides one of the phenomenological effective methods for the solution of the unknown material attributes.

Key words: 5A06 aluminum alloy; probability design system; material properties; annealing

Stress-strain cycles of titanium alloy welding process

LI Ju¹, GUAN Qiao¹, SHI Yaowu², GUO Delun¹ (1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 2. School of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p105—107

Abstract The welding thermal elasto-plastic stress-strain cycles diagram (shortly WSS diagram) describes the welding stress-strain relation on the whole. The stress-strain cycle in every area is the necessary part of the WSS diagram. The stress and strain relations of the points with different distances from the weld centerline on the specimen were investigated. The states of stress and strain of some point on the specimen during the welding process could be derived. On the basis of these results, the stress and strain relation in the each area of WSS diagram can be derived, and the diagram is described quantitatively, which make it easy to understand the WSS diagram. The results showed that the longitudinal stress-strain cycles are different in the different areas in the diagram. During the cooling process, weld and the zone nearby are in the unloaded states.

Key words: titanium alloy; welding; stress; strain

Review and prognosis of state of arts on force sensing and control for robotic remote welding

WEI Xiuquan, LI Haichao, GAO Hongming, WU Lin (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p108—112

Abstract Force sensing and force control are crucial for the successful execution of contact manipulation in unstructured environment for robotic remote welding. In this paper, research on the theory of robot force control and the strategy of embedding force control into industrial robots are reviewed. Focusing on the fundamental issues in contact task, appropriate force control strategies for remote welding are presented. The using of force sensing and control technology in some aspects of robotic remote welding field, such as bilateral force-feedback teleoperation, contact force control and force-based precise task environment modeling, are emphasized. At last, some research topics and investigation trends are proposed.

Key words: force sensing; force control; robotic remote welding