有限元分析热一力学参量对焊接 残余应力峰值特征的影响

刘雪松, 闫德俊, 杨建国, 方洪渊 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 使用随温度变化的材料热一力学参量,采用双椭球热源模型,研究了弹性模量、线膨胀系数、泊松比三个热一力学参量对焊接残余应力的影响. 结果表明,弹性模量增加可使焊接残余应力增大,纵向残余应力峰值从双峰特征过渡到单峰特征;线膨胀系数降低可使焊接残余应力峰值降低,纵向残余应力峰值的双峰与波谷差值也逐渐减小;随着泊松比的增加,纵向残余应力峰值逐渐下降.因此,热一力学参量是导致铝合金纵向焊接残余应力峰值比屈服极限低以及焊缝附近呈现双峰分布特征的重要原因. 使用切条释放法对材料参量为铝合金 2024-T4的平板中纵向焊接残余应力模拟结果进行试验验证,模拟结果与试验结果吻合良好.



刘雪松

0序 言

随着计算机技术的发展和残余应力测量方法及 手段的不断提高,许多研究者对平板焊接件中纵向 残余应力进行了大量模拟和试验测量,均指出低碳 钢焊件中纵向焊接残余应力峰值呈现单峰分布特 征,而且单峰峰值接近材料屈服极限;铝合金平板中 纵向残余应力峰值比其屈服极限低,呈现双峰分布 特征[1-4]. 文献 [5-7] 对铝合金焊件中纵向残余应 力峰值约为屈服极限的 0.5~0.8倍的特点及原因 进行分析,认为其主要原因是铝合金材料的热导率 高,使其焊接温度场近似正圆形,与沿焊缝长度同时 加热的模型相差悬殊,进而造成了与平面变形假设 出入大而形成. 文中使用有限元分析方法研究了 热一力学参量对平板焊件中纵向残余应力峰值大小 以及纵向残余应力场在垂直焊缝方向截面上呈单、双 峰效应的形成原因进行分析,发现非线性热一力学参 量也是纵向残余应力形成上述特点的重要原因.

1 非线性理论及有限元模型建立

1.1 材料非线性热一力学方程
 焊接过程是瞬态加热、冷却的热传导过程和熔

收稿日期: 2009-05-18 基金项目: 中俄政府间科技合作项目 2007^{DFR70070} 池与周围金属间的力学作用过程.因此,焊接过程 热一力学关系方程为

$$d\sigma_{kk} = 3K(d\varepsilon_{kk} - 3d\varepsilon^{h}) + 3dK\varepsilon^{e}_{kk}$$
$$= 3K(d\varepsilon_{kk} - 3d\varepsilon^{h}) + \frac{dK}{K}\sigma_{kk}$$
(1)

$$ds_{j} = 2Gd\xi_{j} + \frac{dG}{G}s_{j}$$
 (2)

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{th}} = \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{th}}}{d\Gamma} dT = \alpha_{\perp} d\Gamma \qquad (3)$$

$$K = E/3(1-2v) \tag{4}$$

$$G = E/2(1+\upsilon) \tag{5}$$

式中: K为温度相关的体积模量; G为温度相关的剪 切模量; σ k为应力张量; S为应力偏张量; εkb为应变 张量; ε^{tb}为热应变; T为温度. α1为线膨胀系数; E 为弹性模量; v为泊松比, 三者均为温度的函数^[8]. 温度梯度越大, 熔池与周围金属间线膨胀系数差异 越大, 导致熔池与周围冷金属间的作用力越强. 那 么不同材料之间三者的差异也是较大的, 进而导致 熔池与周围金属间的作用力相差较大, 因此, 最后残 留在焊件中的残余应力也有所不同.

通过研究应力与应变关系的本构方程(1)~ (5)发现,焊接过程产生的焊接残余应力与线膨胀 系数、弹性模量及泊松比这三个材料非线性热一力 学参量是紧密相关的,文中借助于有限元分析方法 来分别阐述这三个热一力学参量对焊接残余应力的 影响.

1.2 网格划分

图 1为模拟计算时使用的疏密过渡的 TG焊接 有限元模型,尺寸为 270 mm×130 mm×2 mm 采 用八节点六面体类型单元,单元数为 4 536个,节点 数为 7 066个.建立有限元模型时通过刚体来实现 真实刚性平台和卡具的面外变形的约束作用,实现 平板面外变形的真实约束状态.



图 1 整体有限元模型网格划分 Fg 1 Model of FEM mesh

1.3 试验测量结果

低碳钢焊件纵向残余应力峰值可以达到屈服极限,而铝合金焊件纵向残余应力比屈服极限低,呈现 出中间低,两侧高的双峰特征分布,图 2为两种材料 焊接残余应力分布,其中 σ₁为屈服应力^[5].



图 2 纵向应力沿板材横向上的分布

Fg 2 Longitudinal residual stress distribution along transverse direction of plate

文中使用的测试结果即为文献 [9] 中对 2024-¹⁴铝合金平板的纵向残余应力测量结果,真实参数 时的有限元模拟结果和试验测量结果如图 3所示. 模拟结果与实际测量结果吻合较好,从而验证了有 限元模拟结果的正确性.

1.4 材料特性

材料非线性热一力学参量对焊件中纵向残余应 力的形成有重要影响^[4 10],因此文中主要通过改变 2024-¹⁴铝合金材料的弹性模量、线膨胀系数及泊 松比来分别讨论其对纵向焊接残余应力的影响 (表 1).为了突出每个热一力学参量对纵向应力峰



图 3 模拟与测量的纵向残余应力对比

Fig 3 Contrast of [ong jud jna] residuals tress by simulation and test

值高低及双峰分布特征的影响,其中一个参量变化 时,其它所有参量和边界等条件均保持不变.

表 1 2024-T4铝合金热一力学参数

Table 1 The mo_mechanical parameters of 2024-T4 aluminum alloy

温度	弹性模量	线膨胀系数	泊松比
T/°C	E/GPa	$\alpha_{l}/(\;10^{-6}~K^{-1}\;)$	υ
20	66 8	22 8	0.3
100	60 8	—	—
150	56 8	—	—
200	54 4	24 7	—
250	51 1	—	—
300	43 1	25 5	—
400	_	26 5	0.33
470	30 2	—	0.33
550	_	27.1	0.33

1.5 热源模型

由于熔化焊接过程是一个极不均匀的热过程, 焊接温度场为椭球形分布,Goldak双椭球模型^[1011] 被认为是最接近 TIG焊接过程的热源模型,因此文 中采用双椭球热源模型,而且保证每种模拟情况的 热循环曲线基本相同.

2 热一力学参量调整方案及结果对比

2 1 弹性模量变化对残余应力分布的影响

低碳钢材料的弹性模量约为铝合金材料三倍,因此文中将铝合金材料的弹性模量逐渐增大到低碳钢材料弹性模量,研究其对纵向残余应力形成特点的影响.模拟结果见图 4 图中 1.0 压代表铝合金材料随温度变化的弹性模量,1.5 压为铝合金弹性模量的 1.5倍;3.0 压表示铝合金材料弹性模量的 3

倍 (与低碳钢材料弹性模量相当). 从图 4可以看 出,随着弹性模量逐渐增大,焊件中纵向残余应力峰 值逐渐升高:值得注意的是,随着弹性模量变大,焊 缝中心应力波谷与两侧波峰差值逐渐减小,焊缝中 心应力波谷消失,出现了低碳钢特征的中心单峰效 应应力分布. 当选用真实铝合金弹性模量 1.0 E_{A1} 时,中心波谷 174 MP 北两侧双峰 204 MP 低了 30 MPa约为双峰应力值的 14.7%);当弹性模量扩大 到 2 0 Ea时,中心波谷 217 MPa比两侧双峰 232 MPa低 15 MPa约占双峰应力值的 6 5%) 当弹性 模量扩大至 2 5 5 时,中心波谷消失,出现了低碳钢 特征的中间单峰效应,中心单峰 242 MPa比两侧双 峰 238 MPa高 4 MPa(约占双峰应力值的 1.7%), 当接近低碳钢弹性模量 3.0 互时,中心单峰 263 MP 化双峰 252 MP 高 11 MP a(占双峰应力值的 4. 37%).



图 4 随弹性模量变化的纵向残余应力分布



2.2 线膨胀系数变化对残余应力分布的影响

铝合金线膨胀系数约为低碳钢材料的两倍,因 此将线膨胀系数逐渐降低到低碳钢水平来研究线膨 胀系数对纵向残余应力峰值高低及峰值分布特征的 影响.模拟结果如图 5所示,图中 1.00αA代表铝合 金材料随温度变化的线膨胀系数,0.30αA为铝合金 线膨胀系数的 0.3倍,依此类推.从图中可看到,随 着线膨胀系数逐渐降低,焊件中纵向残余应力峰值 逐渐减小,表现出与弹性模量相同的趋势.对比图 4 和图 5可知,图 5中纵向残余应力的双峰分布特征 没有出现消失,而且随着线膨胀系数进一步降低,波 峰与波谷的差值越来越小(与弹性模量变化趋势相 反).当选用真实铝合金线膨胀系数 1.00αA时,中 心波谷 174 MPa比两侧双峰 204 MPa低了 30 MPa (约为双峰应力值的 14.7%),当选用与低碳钢水平 相当的线膨胀系数 0.50αA时,中心波谷 122 MPa比 两侧双峰 135 MPa低了 13 MPa(约为双峰应力值的 9.6%).



图 5 随线膨胀系数变化的纵向残余应力分布

FE 5 Long judinal residual stress distribution with ther malexpansion coefficient changing

23 泊松比变化对残余应力分布的影响

从式(4)(5)可以看出,泊松比影响着材料的 体积模量 (K)及剪切模量 (G), 进而影响公式 (1), (2)的应力一应变本构方程,从而影响到了焊接过 程中热应力计算结果,因此对焊接残余应力有一定 的影响,由于金属材料不同温度下的泊松比在 0.3 上下波动^[8],为了充分研究其对焊接残余应力的影 响,文中将泊松比范围设定为02~04图6为不 同泊松比时的纵向残余应力对比,随着泊松比的增 大,纵向残余应力峰值逐渐缓慢地降低,从图 6 व可 以看出,泊松比对纵向焊接残余应力影响不大,将不 影响纵向残余应力的单、双峰分布特征的改变.从 残余应力峰值部位的局部放大图 6 b可以看出,随着 泊松比的增加,纵向残余应力峰值缓慢下降.可见, 泊松比可以对纵向焊接残余应力的数值产生影响。 影响的程度较小、对纵向残余应力峰值分布特征影 响也很小. 泊松比对焊接残余应力影响很小, 与文 献[12]的结论一致.

3 讨论分析

通过对影响焊接热过程的应力一应变本构方程 的弹性模量、线膨胀系数、泊松比热一力学参量对纵 向残余应力峰值形成条件的研究发现,弹性模量从 1.0 E_A 升高到 3.0 E_A 纵向残余应力峰值从 204 MPa 增大到 263 MPa增加了 59 MPa(约占铝合金残余 应力峰值的 28.9%)、纵向残余应力峰值随着弹性 模量增大而升高;线膨胀系数从 1.00 α M降低到 0.50 α A4 纵向残余应力峰值从 204 MPa减小到 135

MPa减小了 69 MPa(约占铝合金残余应力峰值的 33.8%),纵向残余应力峰值随着线膨胀系数减小 而降低. 泊松比对纵向焊接残余应力数值大小产生 影响较小. 文献 [9] 中对影响焊接热传导微分方程 的热导率、比热容及密度热物理参量对纵向残余应 力峰值形成条件研究结果为:热导率从 1. 0λ_Α降低 到 0. 2λ_A,纵向残余应力峰值从 204 MPa升高到 278 MPa提高了 74 MPa约占铝合金残余应力峰值 的 36.3%);比热容从 1.0 %降低至 0.7~0.4 %时, 纵向残余应力峰值从 204 MPa降至 159~175 MPa 减小了 29~45 MPa(约占铝合金残余应力峰值的 14. 2% ~ 22. 1%);密度从 1. 0PAI升高到 2. 9PAI 纵 向残余应力峰值从 204 MPa增到 261 MPa增高 57 MPa(约占铝合金残余应力峰值的 27.8%). 六个参 量 综合作用后 可导致纵 向残余应力 峰值增加 37.1%~45.0%),也就是说低碳钢六个热一力学参 量可导致其纵向残余应力峰值比铝合金高出 37.1%~45.0%)即提高到 279~296 MPa该数值 达到低碳钢在室温下的屈服极限,即低碳钢纵向残 余应力峰值接近其屈服极限.







对纵向残余应力峰值特征影响的结果发现:弹性模 量从 1.0 上升高到 3.0 上。焊缝中心纵向残余应力 数值与 1.0 与时的两侧双峰差值所占比例从 14.7% 过渡到 - 4.37% (波谷升高了 19.07%)从 双峰分布特征过度到单峰分布特征:线膨胀系数从 1. 00α Α 降至 0. 5α Α 焊缝中心纵向残余应力数值与 1.00α Α时的两侧双峰差值所占比例从 14.7%降低 到 9.6% (波谷降低了 5.1%),双峰分布特征逐渐 减弱,波谷峰值相对地逐渐增强;泊松比对纵向残余 应力峰值分布特征影响也较小;热导率从 1. 0AA降 至 $0.2\lambda_{A}$ 焊缝中心纵向残余应力数值与 $1.0\lambda_{A}$ 时 的两侧双峰差值所占比例从 14.7% 过渡到 - 2.6 (波谷升高了 17.3%),从双峰分布特征过渡到单峰 分布特征;比热容变化对波峰与波谷应力差值几乎 没有影响:密度从 1. 0PA升高到 2. 9PA, 焊缝中心纵 向残余应力数值与 1.0°时的两侧双峰差值所占比 例从 14.7% 变为 0 波谷升高了 14.7%) 双峰特征 逐渐消失. 六个热物理一力学参量综合作用后导致 中间波谷比两侧双峰应力值高 46% 左右, 即铝合金 六个热一力学参量是导致其纵向残余应力从低碳钢 的单峰值降低约 46% 而达到双峰效应的波谷, 是纵 向残余应力出现双峰分布特征的重要原因.

4 结 论

(1)随着弹性模量从铝合金等材料的较低值过 渡到钢铁等材料的较高值,焊件中纵向残余应力峰 值逐渐升高;纵向残余应力峰值将会从双峰分布特 征过渡到单峰分布特征.

(2)随着材料线膨胀系数的逐渐降低,焊件中 纵向残余应力峰值逐渐下降,而且铝合金材料纵向 残余应力分布特征的双峰分布特征呈现出逐渐减弱 的趋势.

(3)随着材料泊松比的逐渐增加,焊件中纵向 残余应力峰值缓慢地降低,变化量很小,纵向残余应 力始终保持着双峰分布特征.

(4) 铝合金六个非线性热一力学参量与低碳钢 存在较大差别,导致纵向残余应力峰值比其屈服极 限低 37.1%~45.0%,这就是铝合金焊件中纵向残 余应力峰值为其屈服极限 0.5~0.8倍的重要原因.

(5)弹性模量、线膨胀系数、热导率和密度四个 非线性热一力学参量亦是导致铝合金纵向残余应力 呈现双峰分布特征以及低碳钢纵向残余应力呈现单 峰分布特征的重要因素. (7): 755-758.

- [7] 翟秋亚 徐锦锋,张 兴,等. Z^r₅₅ C^u₃₀ A¹₁₂ N¹₃ 箔材的快速 凝固焊接[J. 金属学报 2009, 45(3), 321-325 ZhaiQiuya Xu Jinshen, Zhang X et al Rapid solidification welding of ultra. thin Z^r₅₅ Cu₃₀ A¹₁₂ N¹₃ amothous foils J. Acta Metallugica Sinica 2009, 45(3), 321-325
- [8] 翟秋亚 杨金山,徐锦峰,等. 急冷 Cu_Sn合金的快速凝固 焊接接头组织特征[J. 焊接学报, 2009 30(4): 23-26 Zhai Qiuya Yang Jinshen, Xu Jinfeng et al Microstructal characteristic of joint of quenched Cu_Sn alloy foils by rapid solidification welding J. Transactions of the ChinaWelding Instiution 2009 30(4): 49-52
- [9] LiMinggao, Sun Daqian, QiuXiaoming et al Microstructures

[上接第 30页]

参考文献.

- [1] Masubuchi Kojchi Analysis of welded structures M. London Pergamon Press Ltd 1980.
- [2] Preston RV Shercliff HR Withers PJ et al Physically-based constitutive modeling of residual stress development in welding of alum inium alloy 2024[J]. A cta Materialia 2004 52 (17): 4973-4983.
- [3] 路 浩 焊接残余应力超声波法无损测量研究 [D]. 哈尔 滨:哈尔滨工业大学,2009
- [4] Zhu X K Chao Y J Effect of temperature_dependent material properties on welding simulation J. Computers and Structures 2002 80(11): 967-976.
- [5] 方洪渊,焊接结构学[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [6] 拉达伊 D. 焊接热效应[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [7] 关桥. 关桥论著选编 [M]. 北京: 北京航空制造工程研究所档 案馆, 2002
- [8] Lindgren LarsErik Finite element modeling and simulation of welding Part 2 Improved material modeling J. Journal of Thermal Stresses 2001 24(3): 195-231.

and properties of capacitor discharge we led joint of TNi shape memory alloy and stainless steep J. China Welding 2005 14 (2): 95-100

[10] 翟秋亚,杨 扬,徐锦锋,等.快速凝固 Cu Sn亚包晶合金的电阻率及力学性能[J].物理学报.2007 56(10):6118-6123.
 ZhaiQiuyā Yang Yang Xu Jinfeng et al Electrical resistivity

and m echanical properties of rapidly solidified Cu. Sn hypoperitec. tic a lloy J. Acta Physica 2007 56 (10): 6118-6123.

作者简介: 翟秋亚 女, 1963年出生, 副教授, 主要研究方向: 先进 材料的焊接. 发表论文 50余篇.

Email quyazha@ xaut edu en

 [9] 闫德俊、刘雪松 杨建国,等.有限元分析热物理参量对焊 接残余应力峰值特征的影响[J].焊接学报 2010 31(6).5 一9 Yan Dejun Liu Xuesong Yang Jiangup et al Effect of themo. Divisial Parameters on the hump feature of we king residual stress

physical parameters on the hump feature of we high residual stress by finite element ana lysis J. Transactions of the China We high Institution 2010 31(6): 5-9.

- [10] Goklak J Chakravani A Bibby M A new finite model for welding heat source J. Metallugual Transactions, 1984 15 B(2), 299-305
- [11] 陈翠欣,李午申,王庆鹏,等. 焊接温度场的三维动态有限 元模拟[J.天津大学学报,2005 38(5): 466-470.
 Chen Cuixin LiWushen WangQingperg et al Three_dimen. signal dynamic FEM simulation of temperature distribution for welding process J. Journal of Tianjin University 2005 38 (5): 466-470
- [12] Canas J Picon R Paris F et al A simplified numerical analy sis of residual stresses in a luminum welded Plates J. Computers and Structures 1995 58(1): 59-69

作者简介: 刘雪松 男, 1968年出生, 副教授, 博士. 主要从事焊 接结构力学与疲劳寿命评估. 发表论文 40余篇.

Em a il yandejun_2003@163. com

for Conveyance and Equipment East China Jiaotong University Nanchang 330013 China 2 Institute of Mechatronics Engineering Nanchang University Nanchang 330031 China) p 17-21

Abstract The rotating arc sensor is a kind of sensor used in welding automation its application in the underwater welding is a new topic The simulation computation of the electric arc model in the cases of the rotating arc sensor and high-pressure environment is carried out The results indicate that when the air pressure is elevated from 0 1MPa to 1MPa the the electric arc temperature elevates and the temperature gradient nearby the welding wire simultaneously the electric arc temperature field transforms by the bell into the spindle shaped. The comparision of the surface temperature on the weldment in the case of the two air pressures show that melting the same volume weld different need smore powerwhen the air pressure is evevated. The comparision of the temperature of rotating center axis and welding wire axis at different air pressure verify the molton pool section is bowl shaped not finger shaped when the rotating arc sensor is used

Keywords underwaterwetwelding rotating arc sensor hgh pressure simulation

Structura | stress solution of welded joints based on shell element WUQi QIU Huiqing ZHENG Yang (Department of Mechanica | Engineering, Tongji University Shanghai 201804 China). P 22-26

Abstract Structural stress concentration factors (SCF) of T-shape welded joints and non baded cruciform welded joints were solved with shell element Relationship between the shell element nodal forces and the corresponding sectional forces and moments was derived. The solution procedure was described for structural SCF with shell element. A proper definition of the shell element thickness in the weld area is proposed, structural SCF obtained by shell element is very close to that obtained by plate solid element. The method shows also the mesh-size insensitive characteristics

Keyword welded pintş fatigue assessment structural stress shellekment

E ffect of thermonmechanical parameters on hump feature of welding residual stress by finite element analysis LLU Xuesong YAN Dejun YANG Jianguo FANG Hongyuan (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China). P 27-30 34

Abstract The momechanical parameters related with temperature were used to compare qualitative influence of the Young smodulus, coefficient of thermal expansion on the welding residual stress. The result shows that the rise of Young s modulus can increase the welding residual stress and make the peak value of longitudinal residual stress transfer to a single hump from a double one the decline of thermal expansion coefficient may result in the falling of the welding residual stress and lessen ing the difference between wave crest and wave trough the peak value of longitudinal residual stress drops with the incre. ment of Poisson ratio. The longitudinal welding residual stress of aluminum alloy is lower than its yield limit and appears double hump effect near the weld that is the results of the thermome. chanical parameters influence. The simulation results of welding longitudinal residual stress are testified using cutting pieces stress relieving method with the flat plates of 2024-T4 aluminum alloy. The simulation results are well accordant with test which prove the validity of the simulation results.

Key words numerical sin ulation [ongitudina] residual stress thermomedianical parameters double hump effect

Rapid solidification joining of Cu/Nimatrix heterogeneous alloy foils ZHAIQiuya, YANG Jinshari, JNGMing, XU Jinfeng (1. School of Materials Science and Engineering Xian University of Technology Xian 710048 China, 2 CNGC the 205 Institute Xian 710065 China). P 31-34

The rapid solidification joining of quenched Abstract Cu13 5% Sn /Ni19 8% Sn heterogeneous alloy foils with the thickness of $40 \sim 60^{\mu}$ m was performed by a micro type capacitor discharge welding machine and the microstructural morphology of joint was investigated as well as the effect of welding parameters on shearing strength of joint were researched The results ind; cate that the capacitor discharge welding can realize the rapid so. lidification pining of quenched Cu13 5% Sn /Ni19 8% Sn dis similar alloy foils The joint consists of a nugget and fusion zone and the nugget is characterized by regular objate spheroid with the major and m nor diameters are $100 \ \mu$ m and $60 \ \mu$ m respec. tively The nugget is mainly composed of blocky and stripy Ni rich phase fine and compact Cu₁₃₇ Sn columnar crystals and a. Cuphase which distributed with the a_Cuphase The bonding zone width is about $2 \sim 3 \mu$ m. The welling parameters have obvious influence on the shearing strength of joint and the favorable welding parameters are C=3300 m f F=12 N U=75 V D= 0 18 mm and the shearing strength of pint up to 590 MPa

Key words quenched alloy foils micro pining of heter ogeneous alloy foils capacitor discharge welding

Feature extraction of arc sound signal in M IG welding based on linear prediction analysis LIU Liuth², WANG Qi LAN Hu², ZHENG Hongyan, LI Feng (1. Ningbo Institute of Technology Zhejiang University Ningbo 315100 Zhejiang China 2 Hathin University of Science and Technology Hathin 150080 China 3 Ningbo Shuanglin Group Co, Ltd, Ningbo 315153 Zhejiang China). P35-38

A b stract Aim ing at recogn ition of the arc sound signal in different welling status the mechanism of arc sound generation and propagation were investigated to MG butt welling with spray transfer. It is proposed that arc sound is an associated thing of gas discharge is the result of transmitting by the wave when the plasma collectively vibrates is also the outcome of their combined action, including the sound source and the sound track Among them, the spectrum characteristic depends mainly on the