

网络出版时间:2013-9-17 16:10
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/33.1331.TJ.20130917.1610.014.html

TIG焊接铝合金自行车车架残余变形的有限元预测

李亚宁¹, 郭晓琴¹, 宋东福², 徐波³

(1.郑州航空工业管理学院,河南 郑州 450046;2.广州有色金属研究院,广东 广州 510650;
3.中核燃料元件有限公司南方分公司,四川 宜宾 644000)

摘要 基于焊接专用数值分析软件模拟电动自行车铝合金车架前管和连接管的钨极惰性气体保护焊接(GTAW)过程,分析了焊接变形的形成和残余变形分布。结果表明:在固定约束条件下,焊接过程的局部不均匀热输入是引起焊接变形的主要原因;在焊接和冷却过程中,焊接变形一直增大;室温状态时,最大残余变形量为0.530 573 mm,主要位于前管左端位置。

关键词 铝合金;TIG焊;残余变形;数值分析

中图分类号 TG404

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2013)05-0083-04

Finite element prediction of residual deformation in TIG welded aluminum bicycle frame

LI Yaning¹, GUO Xiaoqin¹, SONG Dongfu², XU Bo³

(1.Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450046, China;
2.Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510650, China;
3.Nuclear Fuel Element Limited Company of South Branch, Yibin 644000, China)

Abstract The welding process of GTAW welded aluminum alloy electric bicycle frame was numerically simulated by using special welding finite element analysis software. Furthermore, the formation and distribution of welding residual deformation were also analyzed. The results show that under the fixed constraint condition, the partially uneven heat input in welding is the main cause of welding deformation. In soldering and cooling process, welding distortion is always increasing. In room-temperature state, the maximum residual deformation amount is 0.530 573 mm, mainly located in the left end position of the front tube.

Key words aluminum alloy; TIG welding; residual deformation; numerical analysis

目前,电动自行车车架多采用高强度变形铝合金材料,其前管和连接管主要采用惰性气体保护焊接方法(TIG或MIG)连接。由于铝具有较大的线膨胀系数^[1](约为碳素钢和低合金钢的两倍),凝固时的体积收缩

率较大,容易导致焊件产生大的残余变形。焊接变形直接影响焊接结构性能、安全可靠性和制造工艺性,在一定条件下还会对结构的断裂特性、疲劳强度和形状尺寸精度产生不利影响^[2],因此需采取预防焊接变形

收稿日期:2013-04-09;修回日期:2013-06-08

基金项目:广东省部产学研结合项目(2010A090200078)

作者简介:李亚宁,男,硕士,助教;主要从事金属材料成形工艺的研究。E-mail:liyanning2006@126.com。

3 结 论

1) 旋压成形能够改善紫铜材料的组织,可以将紫铜晶粒细化至8.5 μm。

2) 药型罩沿母线方向材料的强度呈线性分布,且由锥顶至锥底逐渐升高,能够提高药型罩底部强度。

3) 旋压成形的紫铜药型罩具有组织取向,该取向与旋压工艺和退火工艺有关,旋压罩可能具有显微织构及抗旋性。

4 参 考 文 献

[1] 王铁福,王健平,阮文俊.冷挤压聚能药型罩的射流性能研

究[J].弹道学报,1996(12):65-69.

[2] 郭志俊,张树才,林勇.药型罩材料技术发展现状和趋势[J].中国钨业,2005(4):40-42.

[3] 黄正祥.聚能杆式侵彻体成型机理研究[D].南京理工大学,2003:11.

[4] 赵云豪.旋压技术现状[J].锻压技术,2005(5):95-100.

[5] 李友望,吴国东.三种聚能装药结构侵彻靶板的数值模拟[J].机械管理开发,2010(6):64-67.

[6] 刘建荣,张国伟,徐立新,等.药型罩加工精度对破甲战斗部威力影响的研究[J].弹箭与制导学报,2012(3):114-117.

[7] 郁锐,李福金,薛鑫莹,等.药型罩壁厚变化率对破甲威力影响的研究[J].弹箭与制导学报,2012(1):134-136.

的措施。采用有限元方法对焊接变形进行预测,分析其演变规律,对控制焊接变形具有积极的指导意义,已成功应用于焊接领域的工程实践^[3-4]。

基于焊接专用有限元分析软件SYSWELD,对某企业生产的电动自行车铝合金车架前管和连接管TIG焊接过程进行仿真分析,预测焊接变形的产生、演变及最终分布,研究结果可为该产品的实际焊接生产提供理论指导。

1 材料性能参数

材料为7075高强度铝合金,其成分的质量分数为:0.4%Si,0.5%Fe,1.2%~2.0%Cu,0.3%Mn,2.1%~2.9%Mg,0.18%~0.28%Cr,5.1%~6.1%Zn,0.2%Ti,Al余量。其室温条件下力学特性参数:抗拉强度为524MPa,屈服强度为455MPa,伸长率为11%,弹性模量为71GPa,硬度150HB,密度为2.81g/cm³。

数值计算时,温度变化的热物理性能参数(热导率、比热容、密度)和力学特性参数(弹性模量、泊松比、线膨胀系数)由材料组织性能计算软件Jmatpro数据库获取,如表1所示。

表1 不同温度下7075铝合金热物理力学特性参数

Table 1 Thermal physical and mechanical performance parameters of 7075 Al alloy at different temperatures

温度/°C	密度/ (g·cm ⁻³)	比热容/ (J·(g·K) ⁻¹)	热导率/ (W·(m·K) ⁻¹)	泊松比	弹性模 量/GPa	线膨胀 系数/%
25	2.82	0.86	173.5	0.328	72.17	0.0
100	2.81	0.9	176.3	0.331	69.47	0.18
200	2.79	1.02	178.3	0.335	65.44	0.43
300	2.76	1.15	170.4	0.339	60.83	0.74
400	2.73	1.18	160.8	0.342	55.65	1.13
500	2.70	1.14	160.5	0.352	48.79	1.47
550	2.68	1.68	159.5	0.365	35.62	1.74
600	2.63	5.23	131.2	0.408	9.02	2.5
630	2.5	17.27	81.1	0.498	3.2E-7	4.26
640	2.5	1.23	81.4	0.498	3.2E-7	4.32
700	2.48	1.12	83.2	0.5	3.2E-7	4.65

2 有限元分析

有限元网格模型,如图1所示。进行网格划分时,为保证计算的准确性,同时考虑计算时间的合理性,焊缝区域网格划分致密,远离焊缝区域网格划分稀疏,网格单元类型主要为8节点六面体和6节点五面体单元。

选用3-D双椭球热源模型(Goldak热源模型)^[5]进行热学计算,电弧的热效率值取0.7。热源模型高斯参数为:X正半轴长3mm,X负半轴长5mm,Y轴方向半轴长2mm,Z轴方向半轴长2mm;热源在前、后半椭圆

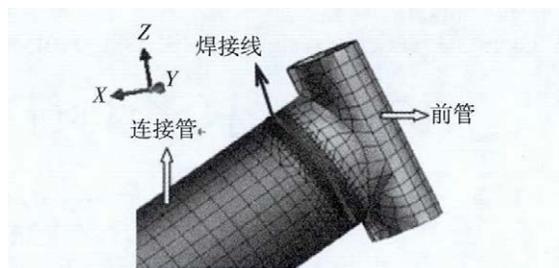


图1 有限元网格模型

Fig.1 Finite element mesh model

内最大热流体密度分布为60、48 W/mm³。

在实际焊接时,热源主要通过热传导对材料内部进行加热,产热方程遵循下列公式^[5]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_i (t \geq 0) \quad (1)$$

式中: T 为材料的瞬时温度,°C; λ 为材料的热导率,W/(mm·°C); q_i 为热源单位时间产生的热量,W/mm³; ρ 为材料密度,g/mm³; c 为材料的比热容,J/(g·°C)。

网格模型与周围空气之间的对流换热可通过Newton冷却方程^[5]描述,辐射散热遵循Stefan-Boltzman定理^[6]。

力学计算采用与温度计算完全相同的有限元模型。假设材料弹性应力-应变关系符合各向同性Hooke定律,塑性行为符合Von Mises准则;材料加工硬化性能通过各向同性准则来描述。材料处于弹性或塑性状态时,其应力-应变关系可表述^[7]

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad (2)$$

式中:[D]为弹性或弹塑性矩阵; $\{C\}$ 为与温度相关的向量。

在塑性区,认为材料屈服条件^[8]

$$f(\sigma) = f_0(\varepsilon_p, T) \quad (3)$$

式中: f 为屈服函数; f_0 为与温度和塑性应变相关屈服应力的函数。

塑性应变增量 $\{d\varepsilon_p\}$ 可表示成^[8]

$$\{d\varepsilon_p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (4)$$

塑性区的加载或卸载由 λ 值判定: $\lambda > 0$ 时为加载过程; $\lambda = 0$ 时为中性过程; $\lambda < 0$ 时为卸载过程。总应变可描述为

$$\varepsilon^{\text{total}} = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{\text{th}} \quad (5)$$

式中: ε^e 、 ε^p 、 ε^{th} 表示弹性应变、塑性应变和热应变。其中,热应变是通过各向同性准则来表述,即 $LX=LY=L$ 。

根据实际焊接时的约束情况,数值分析时,模型连接管一端节点 X, Y, Z 方向施加刚性约束,定义 $UX=UY=UZ=0$ 。前管两端各选两个节点在 Z 方向施加刚性约束,定义 $UZ=0$ 。约束设置,如图2所示。

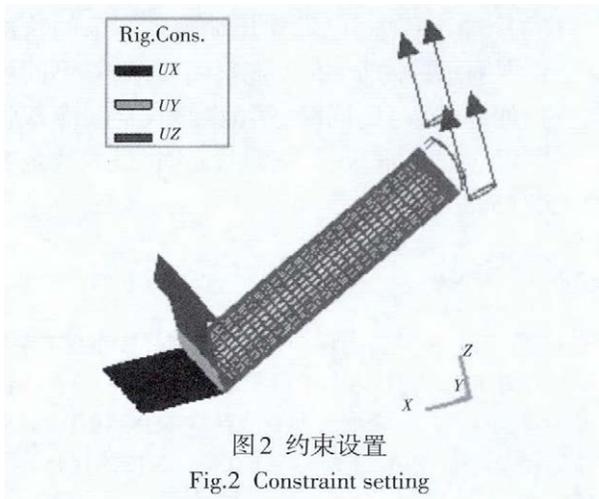


图2 约束设置

Fig.2 Constraint setting

3 计算结果分析

3.1 焊接温度场的演变

由于焊缝两侧对称点具有相同的温度分布,为观察熔池的三维形貌,只显示前管部分的模拟结果进行焊接温度场分析,如图3所示。可以看出:在0.6 s(引弧期)熔池最高温度为781.531 °C,达到7075铝合金的熔点(660 °C),但是熔池较小,未达到熔深要求(前管同连接管接口台阶部位尚未熔透);图3b显示,至4.6 s,熔池增大,最高温度为994.946 °C,前管同连接管接口台阶部位已熔透,由于热传导作用,熔池最低温度升至25.071 5 °C;图3c显示,焊接结束时($t=31.3$ s),熔池最高温度达到1 120.1 °C,熔池增大,前管同连接管接口处台阶部分已熔透,但前管内壁未熔透,前管区域最低温度升至105.234 °C;图3d显示,至 $t=32.0$ s,热源离开焊缝,熔池最高温度迅速降至580.188 °C,最低温度升至110.595 °C;图3e显示,至 $t=81.2$ s,熔池最高温度迅速降至159.048 °C,最低温度升至134.027 °C;图3f显示,至 $t=600$ s,熔池最高温度迅速降至31.693 °C,最低温度升至30.678 2 °C,焊缝冷却至室温状态。

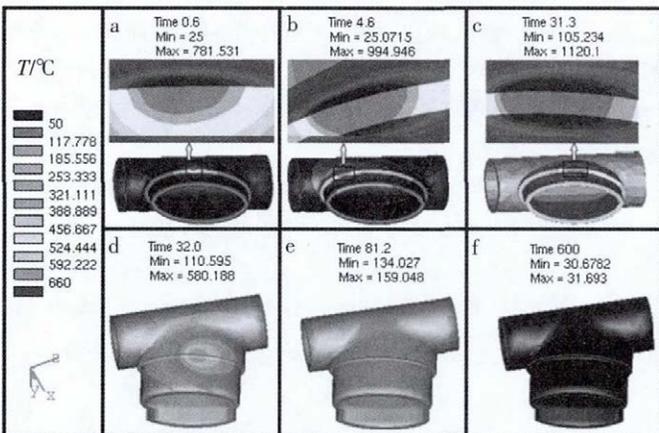


图3 焊接温度场的演变

Fig.3 Evolution of welding temperature field

综上所述,可以看出:在焊接阶段,熔池体积和最高温度一直增大;在冷却阶段,焊缝最高温度一直减小,远离焊缝区域的金属材料温度先增大后减小。

3.2 焊接热应力的演变

图4为对应引弧阶段、收弧阶段和冷却至室温状态时的焊缝及其邻近区域米塞斯等效应力分布云图。图4a显示,引弧阶段焊接热应力主要分布于熔池周围,熔池前沿热应力最大,约为95.176 1 MPa,熔池和远离熔池部位热应力为零。图4b显示,在收弧阶段焊接热应力主要分布在最后凝固熔池部位的前侧,最大值为93.111 2 MPa。图4c显示,冷却至室温时,焊接残余应力主要分布在最后凝固的熔池的前后部位,最大值为115.786 MPa。

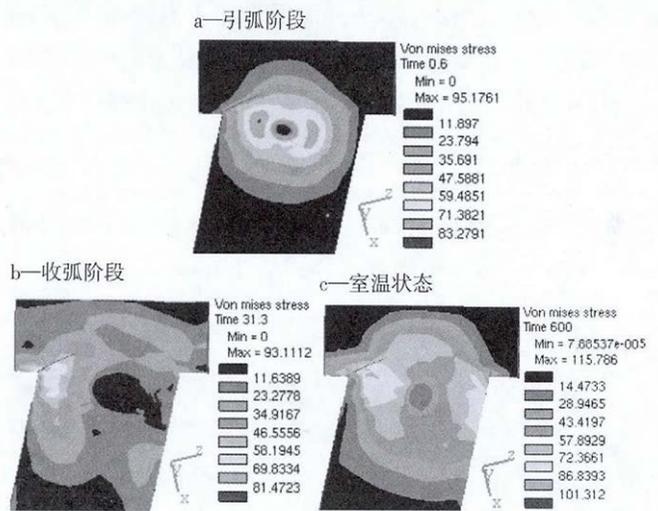


图4 焊接热应力的演变

Fig.4 Evolution of welding heat stress

3.3 焊接变形的演变

图5为焊接升温 and 冷却过程中变形场的演变云图。图5a显示,在0.6 s时刻(引弧期),最大变形量为0.184 415 mm,位于熔池位置;图5b显示,焊接结束时($t=31.3$ s),最大变形量增大至0.368 906 mm,位于前管左端(图中红色区域)部位;图5c显示,焊缝冷却至室温状态时,最大残余变形量增大至0.530 573 mm,主要位于前管左端位置(图中红色区域)。由图5可以看出,在焊接和冷却过程中,焊接变形逐渐增大。分析认为,在固定约束条件(外拘束度)下,焊接过程的局部不均匀热输入是决定焊接变形的主要因素。

焊接应力和变形是多种因素交互作用导致的结果。在固定约束条件下,决定热源周围金属运动的内拘束度是引起焊接应力和变形产生的主要原因;焊接时,焊接热输入引起材料不均匀局部加热,使焊缝区熔化;而与熔池毗邻的高温区材料的热膨胀则受到周围材料的限制,产生不均匀的压缩塑性变形;在冷却过程

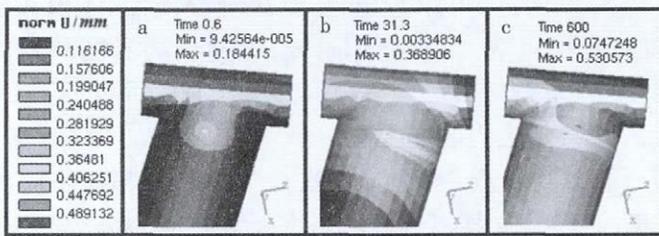


图5 焊接变形的演变

Fig.5 Evolution of welding deformation

中,已发生压缩塑性变形的这部分材料又受到周围条件的制约,而不能自由收缩,在不同程度上又被拉伸而卸载;与此同时,熔池凝固,金属冷却收缩时也产生相应的收缩拉应力与变形。这样,在焊接接头区就产生缩短的不协调应变。与焊接接头区产生的缩短不协调应变相对应,在构件中会形成自身相平衡的内应力,即焊接应力。而焊后在室温条件下,残留于构件中的内应力和宏观变形,导致焊接残余应力与焊接残余变形。

4 结论

1) 焊接升温阶段,熔池体积和峰值温度一直增大,焊接结束时,熔池最高温度为 $1\ 120.1\ ^\circ\text{C}$;在冷却阶段,焊缝峰值温度一直减小,远离焊缝的金属材料温度先增大后减小。

2) 焊接过程中,材料的局部不均匀受热导致焊缝区金属熔化,与熔池毗邻的高温区材料的热膨胀受到周围低温区材料的限制,产生不均匀的压缩塑性变形,焊接结束时,最大变形量为 $0.368\ 906\ \text{mm}$ 。

3) 在冷却过程中,已发生压缩塑性变形的这部分材料受到周围条件的制约,不能自由收缩,在不同程度上又被拉伸卸载;与此同时,熔池凝固,金属冷却收缩时也产生相应的收缩变形,室温状态时,最大残余变形量为 $0.530\ 573\ \text{mm}$ 。

5 参考文献

- [1] 王玉仓,王向杰. 热应力在 CO_2 气体保护焊接小型工字梁结构时的演变规律[J]. 热加工工艺,2012,41(17):180-182.
- [2] 王玉仓,王向杰. 残余应力和变形在Q345D钢 CO_2 气体保护焊接接头中的分布[J]. 热加工工艺,2012,41(15):151-153.
- [3] 刘奇先. 汽车变速箱齿轮 CO_2 激光焊接热过程的有限元分析及实验验证[J]. 热加工工艺,2012,41(15):148-150.
- [4] 陈楚. 数值分析在焊接中的应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985:6-15.
- [5] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990:14-15.
- [6] Deng D A. Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method[J]. Mater Des,2009,30:359-366.
- [7] Kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment[J]. Comput Mater Sci,2009,46:987.
- [8] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003:89-90.

《特种铸造及有色合金》杂志征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会主办的全国性期刊,为国内外权威数据库及检索系统收录,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖和新中国60年有影响力的期刊。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法,如:熔模铸造,压铸,低压铸造,挤压铸造,差压铸造,半固态铸造、金属型铸造,离心铸造,连续铸造,壳型铸造,消失模铸造(实型铸造)及电磁铸造等方面的理论、工艺、设备、造型材料、测试与控制、计算机应用技术等;各种(砂型铸造及特种铸造)有色合金及复合材料的熔炼和铸造工艺、凝固理论、测试与控制、计算机应用等方面的科研成果及生产经验,并介绍上述内容的国内外发展动向和学术活动消息等。

本刊为月刊,邮发代号38-109。邮发订价每期12元,全年144元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购(邮购免收邮寄资费)。本刊近几年编有合订本和专刊,光盘也已正式出版。合订本、专刊和光盘须向本刊编辑部邮购。杂志、合订本、专刊、光盘也可登陆本刊淘宝网店(specialcast.taobao.com)在线订购。

本刊联系地址:武汉市汉口万松园路千禧园3号楼1-502室,邮编:430022,电话:027-85358206 85486024,传真:027-85358127,电子信箱:tzzz626@163.com、tzzz01@qq.com。网址:www.special-cast.com。