

汽车离合器 GTAW 焊接过程温度场的三维有限元分析及工艺优化

莫明立

(重庆工商职业学院, 重庆 401520)

摘 要:采用焊接专用有限元分析软件对 20Cr 钢汽车离合器盘 GTAW 焊接过程进行数值仿真, 分析不同热输入条件下的温度场分布和熔池形态, 探索其最优热源参数。此外, 结合 20Cr 钢 CCT 曲线, 预测了焊接热影响区的微观组织组成。研究结果可为下一步预测汽车离合器 GTAW 焊接过程的变形和残余应力的分布提供热学方面的理论借鉴。

关键词:20Cr 钢; 温度场分布; 有限元分析; 工艺优化

中图分类号:TG404

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2013)05-0221-04

3-D Finite Element Analysis of Temperature Field and Process Optimization in GTAW Welded Auto Clutch Disc

MO Mingli

(Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China)

Abstract:The welding process of 20Cr low alloy steel auto clutch disc GTAW welding was numerically simulated by using special welding finite element analysis software. The temperature distribution and morphology of molten pool under different heat input conditions were analyzed, and the optimal heat source parameters were explored. Furthermore, based on the CCT curve of 20Cr low alloy steel, the microstructure at heat affected zone (HAZ) of the welded joints was predicted. The results could provide thermal theory help for the further prediction of welding deformation and residual stress distribution in GTAW welded automobile clutch.

Key words:20Cr steel; temperature distribution; finite element analysis; process optimization

离合器是汽车传动系统中直接与发动机相联系的部件, 它负责着动力和传动系统的切断和结合作用, 保证汽车平稳起步, 平顺换挡, 并防止传动系统过载。目前, 离合器从动盘和心部齿轮圈的结合方式主要为焊接, 焊接方法主要有钨极氩弧焊 (GTAW) 或激光束 (LWB) 焊, 对焊后精度要求较高。汽车离合器盘所用材料主要为低合金高强钢, 在 GTAW 焊接过程中, 由于低合金钢高温热导率高以及局部高温停留时间较长, 容易导致焊后零件产生较大的残余应力和变形^[1-2]。因此, 研究汽车离合器盘 GTAW 焊接过程的热特性, 对于确定最优热源参数具有十分重要意义。

近年来, 数值模拟方法已经被成功的应用于焊接过程各种热物理现象的研究^[3-4], 并具有准确、快速、低成本等优点。本研究基于焊接专用有限元分析软件, 研究某企业 20Cr 低合金钢汽车离合器从动

盘与心部齿圈 GTAW 焊接过程的热特性, 并确定最优热源参数, 以期为进一步预测焊件的残余应力和变形奠定热学基础。

1 材料性能参数

进行热学数值计算时, 需用到材料随温度变化的热物理性能参数, 包括导热率、比热容、密度。本文采用材料性能模拟软件 Jmatpro 计算上述所需不同温度下热物理性能参数值, 根据计算结果创建 20Cr 钢材料性能数据库, 导入 SYSWELD 软件进行计算。采用 Jmatpro 软件计算材料性能参数时所取 20Cr 钢成分 (质量分数, %) 为: 0.2C, 0.27Si, 0.65Mn, 0.85Cr, 0.02S, 0.02P, 0.02Ni, 0.02Cu, 97.97Fe。材料热物理性能参数计算结果如图 1 所示。

2 有限元分析

离合器 3D 模型如图 2 所示, 有限元网格模型如图 3 所示。进行网格划分时, 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, 该模型共包

收稿日期: 2012-10-25

作者简介: 莫明立 (1973-), 男, 四川人, 副教授, 硕士, 研究方向: 汽车检测;

电话: 18725738839; E-mail: 150011354@qq.com

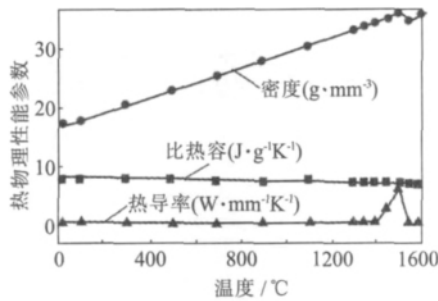


图1 材料热物理性能参数

Fig.1 Thermal physical properties parameters

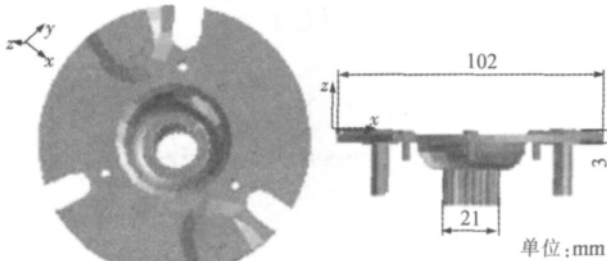


图2 离合器 3D 网格模型

Fig.2 3D mesh model of the clutch

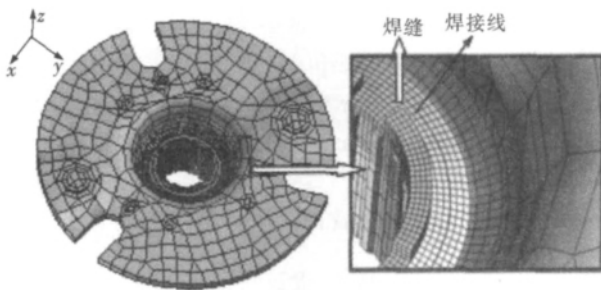


图3 有限元网格模型

Fig.3 Finite element mesh model

含 21526 个节点, 264 个 1D 单元, 11934 个 2D 单元和 18477 个 3D 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, 热流密度在前后半球区域内的分布可用下式来描述:

前半椭球:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} (f_f Q) \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

后半椭球:

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} (f_r Q) \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (2)$$

式中: Q 为热输入功率, $Q = \eta UI$, 本文取 $\eta = 0.7$; a_f, a_r, b, c 分别为热源模型高斯参数; f_f, f_r 为前、后半椭球体内热输入的份额, 且 $f_f + f_r = 2$, 本文 f_f, f_r 的取值分别为 1.2 和 0.8。

热源在对模型加热过程中的热传导是一个非线性

性的过程, 对于此过程中的瞬态非线性传热分析方程可表述为^[6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 (t \geq 0) \quad (3)$$

式中: T 为材料的瞬时温度 (°C); λ 为材料的热导率 ($W \cdot mm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); q_1 为热源单位时间产生的热量 ($W \cdot mm^{-3}$); ρ 为材料密度 ($g \cdot mm^{-3}$); c 为材料的比热容 ($J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)。

焊接模型与周围空气之间的对流热交换可用 Newton 冷却方程描述为:

$$q_a = -h_a (T_s - T_a) \quad (4)$$

式中: q_a 为工件与空气之间的热交换能量; h_a 为对流热交换系数; T_s 为工件表面温度; T_a 为周围空气的温度, 取为 20 °C。假设 h_a 是不随温度变化的定值^[7], 取值为 $10 \times 10^{-6} (W \cdot mm^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$ 。

另外, 通过热辐射散失的热量 q_r , 遵循 Stefan-Boltzman 定理, 可描述为:

$$q_r = -\varepsilon \sigma [(T_s + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4] \quad (5)$$

式中: ε 为辐射系数, 取值为 0.8 [8]; σ 为 Stefan-Boltzman 常量, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} (W \cdot mm^{-2} \cdot ^\circ C^{-4})$ 。

根据文献[1]的研究结果, 初选 6 组热源模型参数进行热源调试, 所选热源参数见表 1。

表 1 热源模型参数

Tab.1 Parameters of heat source model

	$Q_f / (W \cdot mm^{-3})$	$Q_r / (W \cdot mm^{-3})$	a_f / mm	a_r / mm	b / mm	c / mm
工艺 1	48	36	1	2	2	2
工艺 2	60	50	1	2	2	2
工艺 3	72	70	1	2	2	2
工艺 4	84	70	1	2	2	2
工艺 5	90	75	1	2	2	2
工艺 6	96	80	1	2	2	2

3 计算结果分析

3.1 最优热源参数的确定

离合器盘的实际厚度为 3 mm, 根据文献[2], 预设焊缝熔宽为 3 mm, 并预设热源高斯参数为如下: $a_f = 1$ mm, $a_r = 2$ mm, $b = 2$ mm, $c = 2$ mm。在确定最优热源参数前, 预设六组热流密度值 (见表 1), 进行热源调试, 根据准稳态时的熔池形貌, 判断最优的热源参数。

图 4 给出了对应 6 组热源参数的熔池形貌及温度场分布调试结果。可看出, 随着前后半椭球内的热流密度 (焊接热输入) 的增大, 熔池宽度和长度不断增大, 最高温度也增大。图 4(a)、(b) 显示熔池最高温度分别为 1021.45 和 1379.77 °C, 尚未达到熔点

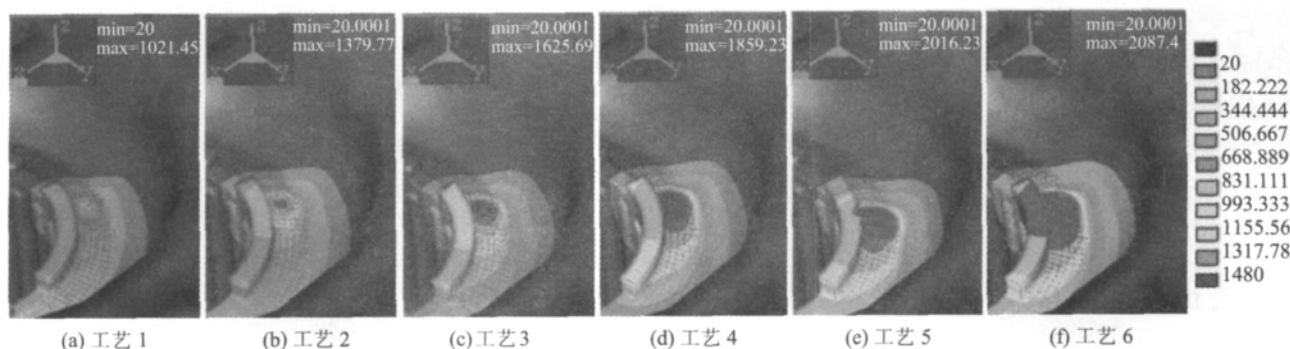


图 4 不同工艺参数下的熔池形态及温度场分布(°C)

Fig.4 The molten pool morphology and temperature distribution under different process parameters(°C)

1480 °C;图 4(c)显示熔池最高温度为 1625.69 °C,达到 20Cr 钢的熔点,但是熔池较小,不满足预设的焊缝宽度;图 4(d)显示,熔池最高温度为 1859.23 °C,熔池尺寸同预设焊缝尺寸吻合良好;图 4(e)~(f)显示,这两组参数下,熔池最高温度超过了 2000 °C,但是熔池尺寸过大,超过了预设的焊缝宽度。

综合考虑,确定工艺 4 的热源参数为最优参数。将工艺 4 的相关参数值代入双椭球热源公式(1)、(2),通过逆推,求得相应的热输入功率大约为 1000 W(焊接速率为 10 mm/s,热效率为 0.7 条件下),结合文献[2]的经验数据,取焊接电流范围为 100~120 A 进行实际焊接实验。

3.2 焊接热循环分析

焊接热循环对焊缝组织和性能有很大的影响,分析焊接热循环主要考虑以下几个参数:相变温度区间的冷却速度 ω_H (本研究为最高温度至 400 °C)、焊缝和热影响区达到的最高温度 T_{max} 、相变以上温度(>876.47 °C)的停留时间 t_H 、冷却时间 $t_{8/5}$ 。图 5 为熔池进入准稳态阶段后熔化区(FZ),热影响区(HAZ)和母材(BZ)区的热循环曲线,表 2 为对应图 5 的 FZ、HAZ 的焊接热循环参数。

结合图 5 和表 2 数据可以看出,在最优热源参

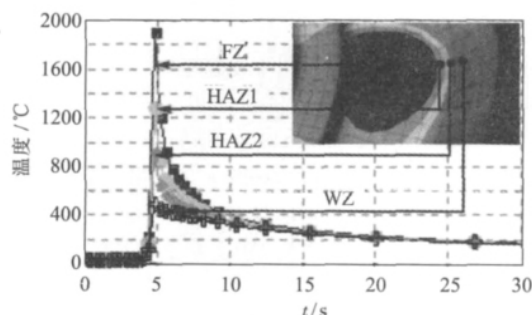


图 5 不同区域的热循环曲线

Fig.5 Thermal cycle curves of different zone

表 2 焊接热循环参数
Tab.2 Thermal cycle parameter

区域	$\omega_H / (^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	$T_{max} / ^{\circ}\text{C}$	t_H / s	$t_{8/5} / \text{s}$
FZ	271.3	1898	0.8	5.4
HAZ1	163.3	1263	0.4	4.8
HAZ2	100.9	900	-	9.6

数下,熔池进入的准稳态阶段,FZ 区金属温度范围为 1480~1898 °C,冷却速率为 271.3 °C/s;HAZ 温度范围为 900~1480 °C,冷却速率为 100.9~163.3 °C/s;FZ 和 HAZ 相变温度以上停留时间分别为 0.8 和 0.4 s;FZ 和 HAZ 的 $t_{8/5}$ 分别为 5.4 和 4.8~9.6 s。

3.3 热影响组织预测

表 2 所示的 $t_{8/5}$ 是焊缝冷却时相变发生的主要阶段,对整个 HAZ 焊后的组织和力学性能有着重要影响。低合金钢的焊缝组织比较复杂,与其合金元素、焊接方法等密切先关。通过数值模拟计算所得的冷却时间,结合低合金钢焊缝金属连续冷却组织转变图可以预测 HAZ 的组织。

图 6 是由 Jmatpro 软件数据库计算得到的 20Cr 钢的 CCT 曲线。结合表 2 所示 $t_{8/5}$ 、高温停留时间以及热影响区金属的冷却速率大于 100 °C/s,可以判断 HAZ 高温停留时间短(约 0.4 s),奥氏体稳定化程度

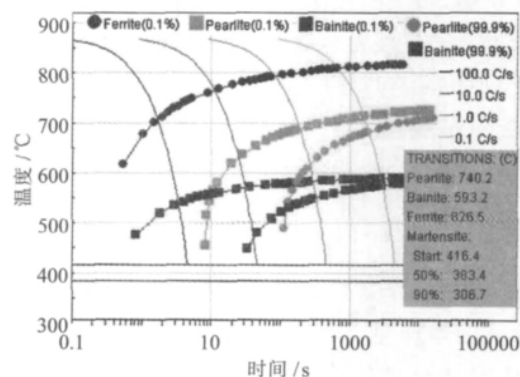


图 6 20Cr 钢的 CCT 曲线

Fig.6 CCT curves of 20Cr steel

不够(即碳元素来不及充分溶解在奥氏体内),容易造成贝氏体相变温度提高,使得冷却曲线容易进入贝氏体区域,容易产生中、高温相变反应。也就是说,上述 CCT 图的中高温反应区(即所谓的“鼻温区”曲线)会向左移动,实际焊接得到的 HAZ 组织为马氏体 + 贝氏体 + 珠光体组织。

4 结论

(1) 基于汽车离合器构件的实际尺寸,采用 GTAW 方法进行焊接时,焊接速率 10 mm/s 条件下,预测其最优焊接电流范围为 100~120 A,熔池最大宽度小于 3 mm,熔池最高温度不超过 2000 °C,冷却速率约为 271.3 °C/s;HAZ 温度范围为 900~1480 °C,冷却速率为 100.9~163.3 °C/s;FZ 和 HAZ 相变温度以上停留时间分别为 0.8 和 0.4 s;FZ 和 HAZ 的 $t_{8/5}$ 分别为 5.4 和 4.8~9.6 s。

(2) 结合 20Cr 钢的连续冷却 CCT 曲线,预测在最优热源参数下,其实际焊接接头 HAZ 组织应该是马氏体 + 贝氏体 + 珠光体组织。

(上接第 218 页)

参考文献:

- [1] 李景波,王刚,沙玉刚,等. 船体厚板高效气电立焊焊接技术的研究[J]. 电焊机,2004,(2):14-15.
- [2] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] Yang Jian, Zhu Kai, Wang Ruizhi, *et al.* Technology for improving the toughness of heat affected with strong

参考文献:

- [1] 许海玲,刘小平,姜智超. 基于 ANSYS 模拟不同参数对 20 钢焊接温度场的影响[J]. 热加工工艺,2011,40(15): 122-124.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 刘奇先. 汽车变速箱齿轮 CO₂ 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):148-150,154.
- [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.
- [5] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metal. Tran. B, 1984, 15: 299-305.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kermanpur A,Shamian M,Yeganeh V. Three-dimensional thermal simulation and experimental investigation of GTAW circumferentially butt-welded Incoloy 800 pipes [J]. J. Mater. Proc. Tech., 2008,199:295-303. 

deoxidizers [J]. Baosteel Technical Research,2010, (4): 32-36.

- [4] Kojima A, Kiyose A, Uemori R, *et al.* Super high HAZ toughness technology with fine microstructure imparted by fine particles [J]. Nippon Steel Technical Report,2004, (380): 2-5.
- [5] Suzuki Shinichi, Ichimiya Katsuyuki, Akita Toshikazu. High tensile strength steel plates with excellent HAZ toughness for shipbuilding[J]. JFE GIHO,2004,(5):19-24. 

(上接第 220 页) 后先产生弹性形变,载荷上升到 a 点时开始屈服,随载荷增大在 b 点处开裂。开裂后先经稳定扩展阶段,c 点后为失稳扩展,到 d 点后又以剪切撕裂方式扩展直至终断。冲击吸收功可以分解为:裂纹形成功(包括弹性变形功 A1 和塑性变形功 A2)及裂纹扩展功(包括稳定扩展功 A3 和失稳扩展功 A4 及撕裂功 A5)两部分。

3 结论

(1) P92 钢焊缝冲击韧性随焊缝柱状晶与 V 型缺口角度的增加而增加。

(2) 冲击试样的缺口尖端组织对试样冲击功有重要影响,缺口尖端组织为层间细晶区时,冲击韧性

较高;缺口尖端组织为枝状粗晶时,冲击韧性较低。

参考文献:

- [1] 马明编. 美国新的超临界机组考虑使用 T/P92 的原因[J]. 电力建设,2006,(11):79-80.
- [2] 杨富,章应霖,任永宁,等. 新型耐热钢焊接[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [3] Arivazhagan B. Effect of TIG arc surface melting process on weld metal toughness of modified 9Cr-1Mo (P91) steel, Mater. Lett[J]. 2008, (3): 23-47.
- [4] 田燕. 焊接区断口金相分析 [M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [5] Orlova A, Bursik J, kucharova K, *et al.* Microstructure of High Temperature Materials[J]. IOM, 1998, 2: 89-107. 