

缆式焊丝埋弧焊残余应力有限元分析

方臣富¹, 杨志东¹, 陈 勇¹, 胥国祥¹, 江家忠², 乔建设²

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 镇江 212003; 2. 中外运长航重工江苏金陵船舶有限责任公司, 南京 210015)

摘 要: 采用直径为 2.4 mm 的 7 根分焊丝, 其中一根分焊丝(称为中心丝)位于中间, 其余 6 根分焊丝(称为外围丝)围绕中心丝绞合组成直径为 7.2 mm 的缆式焊丝。试验用 22 mm 厚 DH36 船用钢板进行平对接缆式焊丝埋弧焊, 采用小孔法对焊接接头进行残余应力测试; 基于热弹塑性理论, 建立缆式焊丝埋弧焊残余应力有限元数值分析模型, 利用 ANSYS 软件对缆式焊丝埋弧焊残余应力进行模拟计算。结果表明, 缆式焊丝埋弧焊的应力分布特征和幅值与单丝埋弧焊相近, 纵向应力在焊缝及近缝区表现为拉应力, 应力峰值为 363 MPa; 横向应力较小, 焊缝上下部位呈现拉应力, 中间呈现压应力。

关键词: 缆式焊丝; 埋弧焊; 残余应力; 数值计算

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)11-0001-06

0 序 言

现有双丝埋弧焊、多丝埋弧焊、热丝埋弧焊和窄间隙埋弧焊等, 虽然可提高焊接效率, 但存在焊接电弧相互干扰、焊接系统和焊接参数协同控制比较复杂, 生产成本相对较高^[1-3]。缆式焊丝埋弧焊是一种以缆式焊丝为熔化极的高效、优质和低成本的创新型焊接工艺, 采用直径为 2.4 mm 的 7 根分焊丝, 其中一根分焊丝(称为中心丝)位于中间, 其余 6 根分焊丝(称为外围丝)围绕中心丝绞合组成直径为 7.2 mm 的缆式焊丝^[4]。焊接时 7 根分焊丝同时熔化, 可显著提高熔敷速度; 6 根外围丝端部阳极区围绕中心丝端部阳极区同步旋转、形成一个自主旋转焊接电弧, 可提高焊接接头质量; 只需一把焊枪、一台送丝机、一台焊接电源既可组成缆式焊丝埋弧焊设备, 因而设备简单, 操作方便; 焊接过程中没有焊接电弧相互干扰现象^[5-8]。

缆式焊丝埋弧与其它高效埋弧焊工艺一样, 焊接时热输入量较大, 亦可使焊接结构产生较大焊接应力和变形, 从而影响到焊接结构尺寸精度和焊接质量。文中结合缆式焊丝埋弧焊工艺特点, 通过建立残余应力有限元分析模型, 对缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊的残余应力分布进行比较分析, 为缆式焊丝埋弧焊的推广应用打下基础。

1 有限元模型的建立

1.1 试验方法

为了深入研究缆式焊丝埋弧焊残余应力分布特征, 对缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊进行比较。试验采用材料为 DH36 船用钢板, 尺寸为 400 mm × 300 mm × 22 mm 进行埋弧焊对接焊, 缆式焊丝为 H08A 焊丝(7.2 mm), 单丝埋弧焊为 H08A(5.0 mm), 焊剂 HJ431。试件开 45°Y 形坡口, 钝边 5 mm。控制层间温度小于 200 °C, 严格清理层间焊渣。缆式埋弧焊丝采用 7 根 2.4 mm 实心焊丝绞合而成, 其中 1 根焊丝(中心丝)位于中间, 其余 6 根焊丝(外围丝)围绕中心丝绞合, 如图 1 所示。

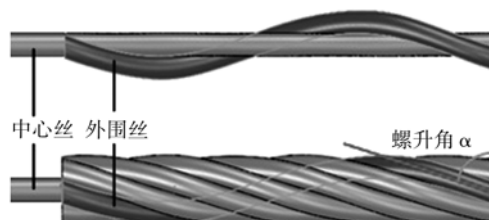


图 1 缆式埋弧焊丝形状示意图

Fig. 1 Schematic of cable-type wire shape in SAW

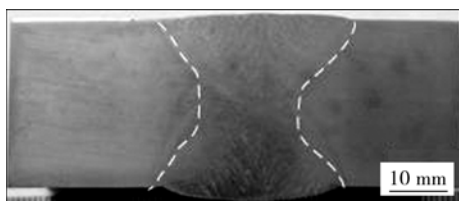
焊后采用小孔释放法测试应力, 试验设备为 CML-1H 型应变 & 力综合测试仪, TJ120-1.5-φ1.5 型应变片。焊接工艺参数如表 1 所示, 对接焊缝形貌和焊道示意图分别如图 2 和图 3 所示。

收稿日期: 2015-10-08

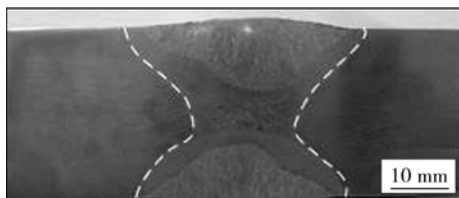
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275224, 51575250, 51575252, 51505200); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

焊接方法	焊接部位	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$
单丝埋弧焊	打底焊	750	36	38
	填充焊	750	36	35
	盖面焊	700	38	40
	反面焊	750	39	40
缆式埋弧焊	单丝打底	750	36	38
	盖面焊	850	36	33
	反面清焊	850	37	39



(a) 单丝埋弧焊



(b) 缆式焊丝埋弧焊

图 2 对接焊缝焊线形貌
Fig. 2 Welding seam profiles

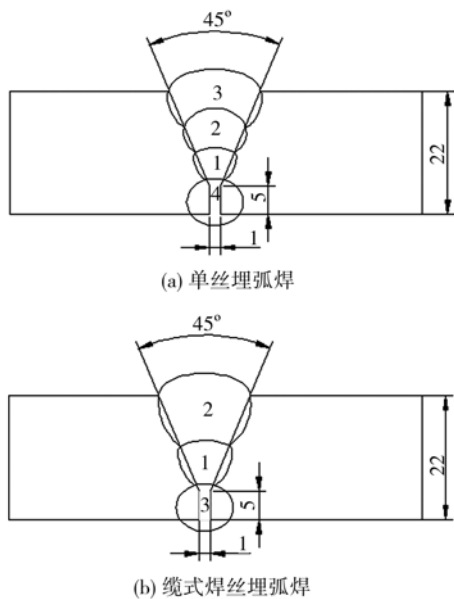


图 3 焊道示意图 (mm)
Fig. 3 Schematic of weld bead

1.2 热边界条件

缆式焊丝埋弧焊焊接传热是一个典型的三维瞬态传热过程,传热过程微分方程式是根据傅立叶公

式和能量守恒定律建立的. 非线性瞬态热传导问题的控制方程为

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

式中: c 为比热; ρ 为材料的密度; T 为温度; λ 为热导率; \bar{Q} 为内热源; t 为时间.

工件上表面控制方程为

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = q_s - q_{cr} - q_{evp} \quad (2)$$

$$q_{cr} = \alpha_{cr} (T - T_0) \quad (3)$$

$$q_{evp} = m_{er} L_b \quad (4)$$

式中: k 为热导率; q_s 为施加的热源; q_{cr} 为对流和辐射散失的热流密度; q_{evp} 为蒸发散失的热流密度; α_{cr} 为对流和辐射边界综合导热系数; T_0 为环境温度; m_{er} 为蒸发率; L_b 为蒸发潜热常数.

其他表面控制方程为

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = -q_{cr} \quad (5)$$

1.3 有限元模型

依据焊件实际尺寸,利用 ANSYS 建立模型,并对其进行网格划分. 为了提高计算速度,同时保证温度场和应力场的计算精度,在焊缝及近缝区采用密网格,而远离焊缝区域则采用不等距粗网格减少网格的数量,网格模型如图 4 所示.

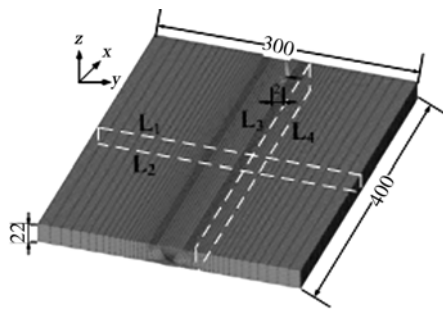


图 4 缆式焊丝埋弧焊网格模型 (mm)
Fig. 4 Mesh model of CWW-SAW

文中基于生死单元法描述金属流动过程对焊件传热及应力计算的影响. 采用热力顺序耦合方法及计算残余应力,先计算温度场,将其作为输入载荷. 基于热弹塑性理论,将瞬态温度场的计算结果作为计算应力场的负载加载到结构模型上进行残余应力计算^[9,10]. 在焊接残余应力计算过程中,采用分段温度热源^[11],不但能够保证精度,而且还可以提高计算效率. 由于板件较厚,文中采用温度热源表征焊接热输入,基于焊缝形貌特征,将焊缝区分段并依

次将各段节点施加熔化温度并保持一段时间,实现热源移动过程和瞬态温度场的计算。

2 分析与讨论

2.1 模型计算和验证

采用上述建立的网格模型与热源模型,对缆式焊丝埋弧焊进行模拟计算。利用 ANSYS 有限元软件对 DH36 厚板多层单道焊的单丝埋弧焊与缆式焊丝埋弧焊进行温度模拟计算。图 5 为两种焊接工艺的焊缝横断面及热影响区形状尺寸计算与实测结果比较。计算过程中环境温度为 20 ℃,其余材料热物性能参数文献[12]。熔池三维形状根据 DH36 钢的熔点(1 500 ℃)确定,粗晶区温度区间为 1 200 ~ 1 500 ℃。

单丝埋弧焊和缆式焊丝埋弧焊的焊缝横断面与热影响区形状尺寸通过计算得到的热影响区垂直焊接方向上的投影面获得,由单丝埋弧焊和缆式焊丝埋弧焊焊缝计算值与实测值基本一致,熔合线的走向基本相同,吻合较好。

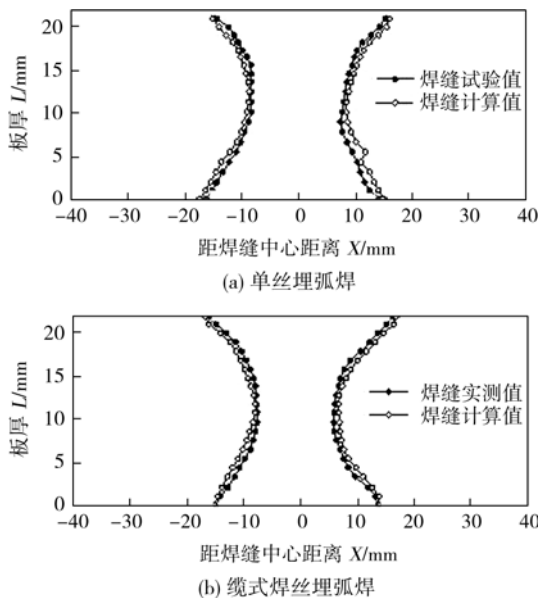


图 5 焊缝横断面及热影响区形状尺寸计算与实测结果比较
Fig. 5 Comparison of calculated weld cross section and HAZ size with experimental results

图 6 为缆式焊丝埋弧焊工件上表面残余应力计算值与实测值的比较。从纵向应力和横向应力的模拟结果与试验结果可以发现两者分布特征基本一致,吻合较好,从而验证了缆式焊丝埋弧焊模型的正确性。

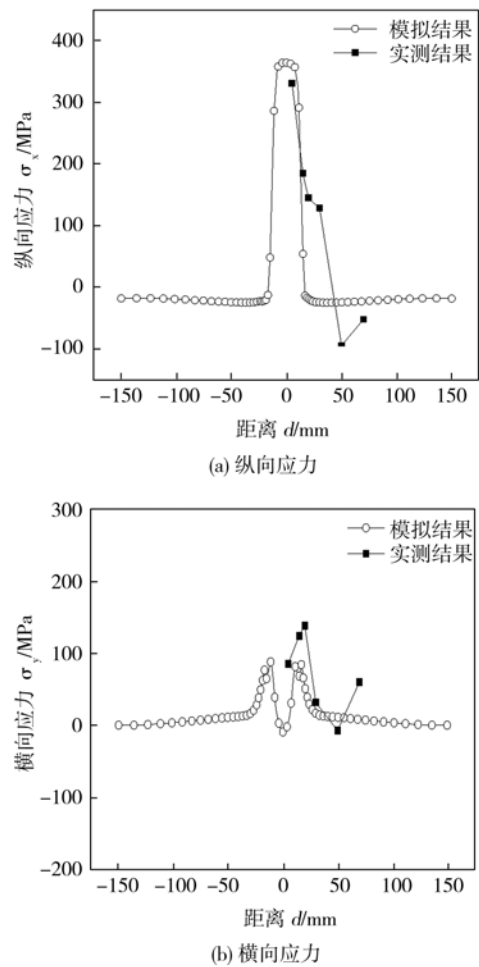


图 6 缆式焊丝埋弧焊上工件表面计算与实测应力比较
Fig. 6 Comparison between calculated stress on surface of workpieces with experimental results

2.2 残余应力分布

图 7 为缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊残余应力三维分布云图。可以看出两种焊接工艺残余应力分布特征相似;对于纵向应力,焊缝及近缝区域均表现为残余拉应力,随着离焊缝距离的增大而减小。相对于纵向残余应力,缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊横向残余应力较小,在焊缝两端部呈现一定压应力集中。

图 8 为缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊横截面残余应力分布云图。可以看出,两种焊接工艺横截面残余应力分布特征相似;对于纵向应力,在焊缝区呈现较大拉应力。由于埋弧焊热输入较大,纵向应力几乎在整个焊缝区域均达到了材料屈服极限。对于横向应力,在焊缝厚度方向存在较大不同,因为横向应力受焊道布局影响,在焊缝上下部位均表现为拉应力,中间部位均表现为压应力。

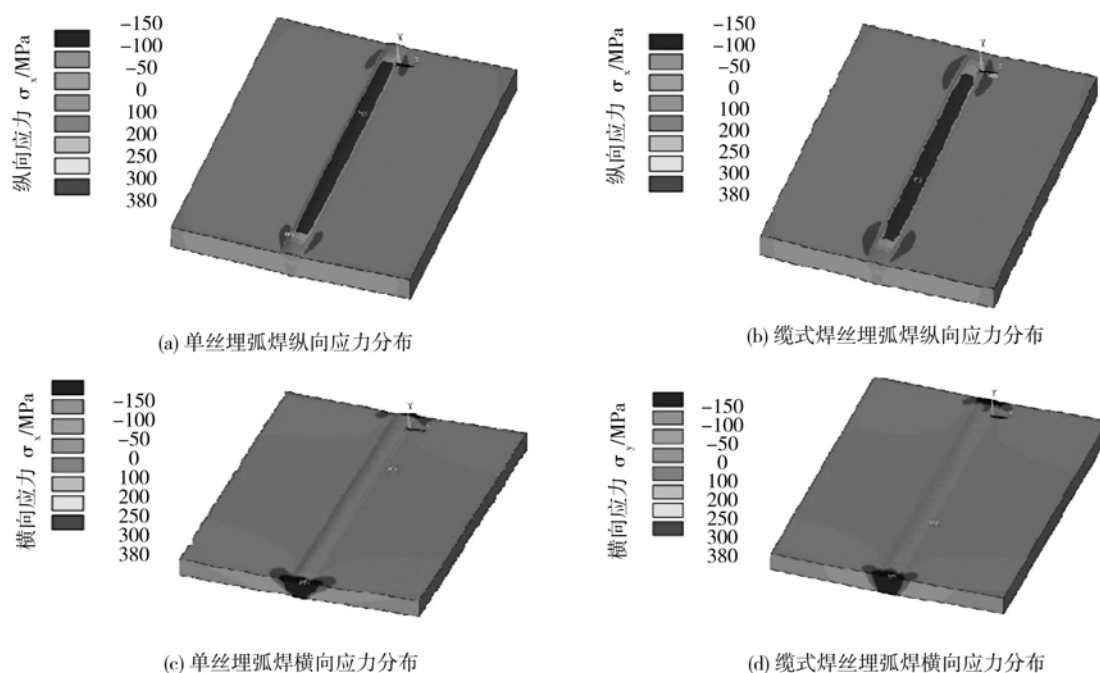


图 7 三维残余应力分布云图

Fig. 7 3-D residual stress distribution contour

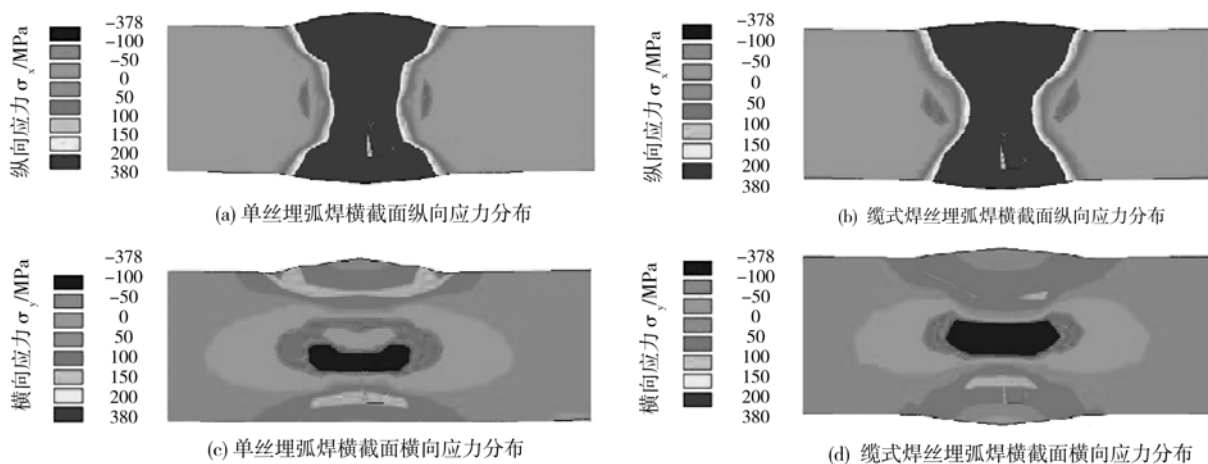


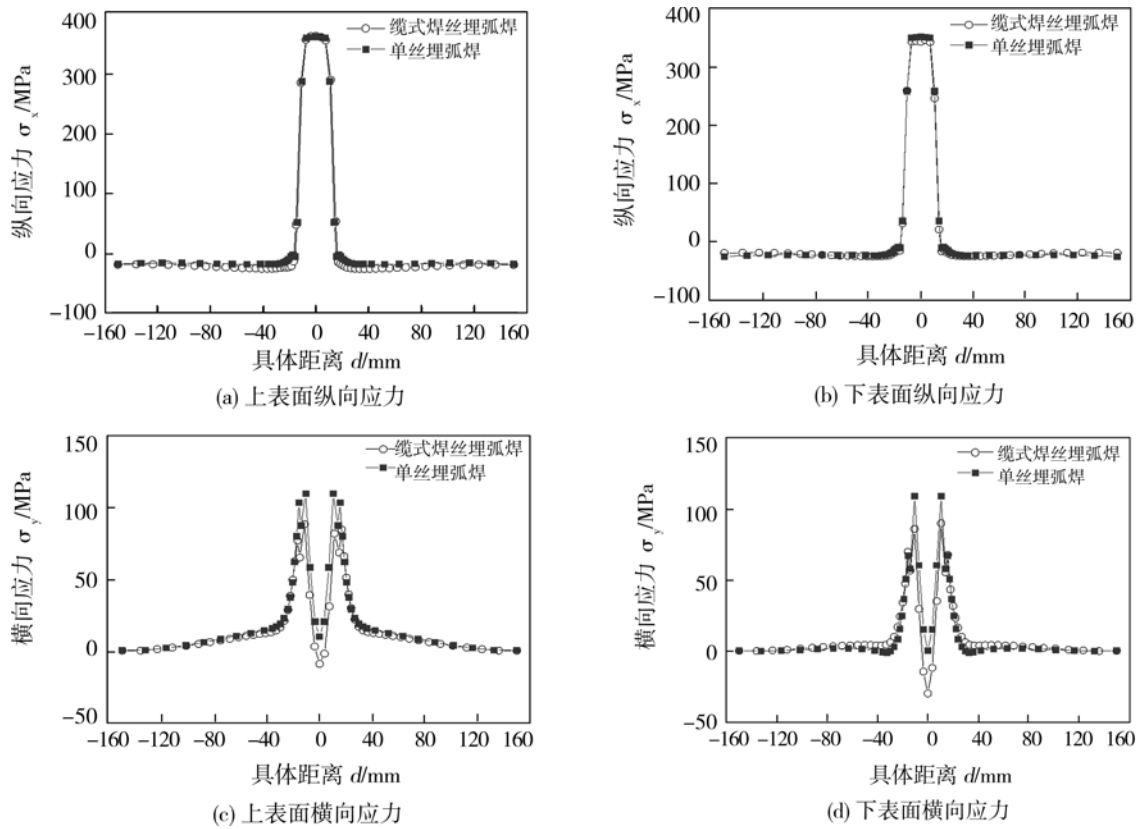
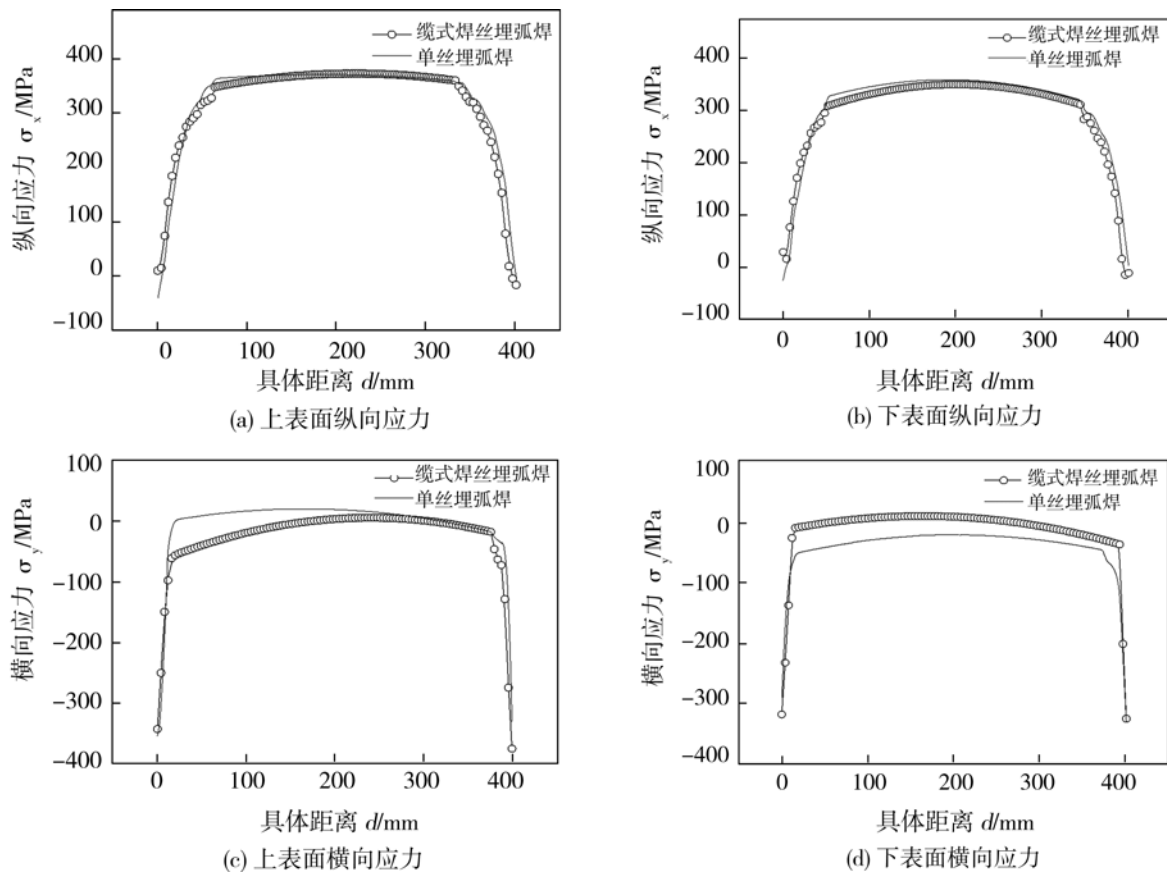
图 8 横截面残余应力分布云图

Fig. 8 Residual stress distribution contour of cross section

为了深入研究缆式焊丝的残余应力分布,对垂直焊缝方向和沿焊缝长度方向残余应力进行分析,计算位置如图 4 所示. 图 9 为缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊工件上、下表面垂直焊缝方向残余应力分布. 对于纵向残余应力,焊缝及近缝区均表现为较大的拉应力,缆式焊丝埋弧焊上、下表面峰值分别为 363 MPa 和 345 MPa,与材料屈服强度相近;单丝埋弧焊纵向应力峰值分别为 362 MPa 和 352 MPa. 可以看出,两种焊接工艺应力分布特征与应力值相似. 而对于横向残余应力,较纵向残余应力值小,在焊趾附近存在一定应力集中,其中,缆式焊丝埋弧焊上、

下表面应力峰值分别为 88 MPa 和 89 MPa,均低于单丝埋弧焊.

图 10 为缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊工件上下表面沿焊缝长度方向残余应力分布. 可见,缆式焊丝埋弧焊和单丝埋弧焊纵向拉应力在沿焊缝长度方向分布平稳,均达到了材料本身的屈服强度. 其中上表面两种焊接工艺纵向应力峰值相似,下表面纵向应力单丝埋弧焊峰值略大. 而由于焊缝两端为自由端,其附近纵向残余应力迅速减小. 对于横向应力,两种焊接工艺在上下表面焊缝区域应力分布均较小,焊缝两端存在较高压应力集中.

图 9 工件上下表面应力(沿 L_1 和 L_2 线)分布Fig. 9 Stress distribution along line L_1 and L_2 图 10 工件上下表面应力(沿 L_3 和 L_4 线)分布Fig. 10 Stress distribution along line L_3 and L_4

3 结 论

(1) 基于热弹塑性理论,综合考虑焊缝横断面形状特征,建立了缆式焊丝埋弧焊数值分析模型,计算了残余应力分布,与试验结果比较,两者吻合较好,证明模型的准确性。

(2) 缆式焊丝埋弧焊应力分布特征和特征值与单丝埋弧焊相近,纵向应力在整个焊缝区域表现为拉应力,沿焊缝长度方向应力峰值为 363 MPa;横向应力较小,焊缝上下部位呈现拉应力,中间呈现压应力。

参考文献:

- [1] Cao M Q, Zou Z D, Zhang S S, *et al.* Present situation and development of twin-wire Arc welding[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 2: 021.
- [2] Tusek J, Suban M. High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1): 207–213.
- [3] 林尚扬. 我国焊接生产现状与焊接技术的发展[J]. 船舶工程, 2005, 27(5): 15–24.
Lin Shangyang. Welding production status and the development of welding technology in China[J]. Ship Engineering, 2005, 27(5): 15–24.
- [4] 杨志东. 新型粗丝埋弧焊工艺研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [5] 方臣富, 陈志伟, 胥国祥, 等. 缆式焊丝 CO₂ 气体保护焊工艺研究[J]. 金属学报, 2012, 48(11): 1299–1305.
Fang Chenfu, Chen Zhiwei, Xu Guoxiang, *et al.* Study of cable-type welding wire CO₂ gas shielded metal arc welding process [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(11): 1299–1305.
- [6] 方臣富, 王海松, 刘 川, 等. 缆式焊丝 CO₂ 气体保护焊接头残余应力高效数值计算和试验[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 17–20.
Fang Chenfu, Wang Haisong, Liu Chuan, *et al.* Cable type welding wire CO₂ gas shielded welding residual stresses efficient numerical computation and experiment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 17–20.
- [7] Fang C F, He B, Zhao Z C, *et al.* Comparative study on the processing property between cable-type welding wire CO₂ gas shielded welding and SAW[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 20(4): 84–89.
- [8] Yang Z D, Fang C F, Chen Y, *et al.* Arc behavior and droplet transfer of CWW CO₂ welding[J]. Journal of Iron and Steel Research, International. 2016, 23(8): 808–814.
- [9] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] 胥国祥, 杜宝帅, 董再胜, 等. 厚板多层多道焊温度场的有限元分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 87–90.
Xu Guoxiang, Du Baoshuai, Dong Zaisheng, *et al.* Finite element analysis of temperature field in multi-pass welding of thick steel plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 87–90.
- [11] Cho J R, Lee B Y, Moon Y H, *et al.* Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155: 1690–1695.
- [12] 谭 真, 郭文广. 工程合金热物性[M]. 北京: 合金工业出版社, 1994.

作者简介: 方臣富,男,1954 年出生,教授,博士研究生导师. 主要从事现代焊接设备及工艺、焊接电弧物理的研究工作. 发表论文 50 余篇. Email: 13952846832@163.com

通讯作者: 胥国祥,男,博士,副教授. Email: xugxiang@163.com