

大型厚壁筒体斜插弯管结构焊接变形及其演变数值模拟

Numerical Simulation of Welding Deformation and Its Evolution
for Welded Cylinder with Angle-inserting Elbow

张可荣¹, 张建勋¹, 黄嗣罗², 邱毅强²

(1 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;

2 茂名重力石化机械制造有限公司, 广东 茂名 525000)

ZHANG Ke-rong¹, ZHANG Jian-xun¹, HUANG Si-luo², QIU Yi-qiang²

(1 State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong

University, Xi'an 710049, China; 2 The Challenge Petrochemical Machinery

Corporation of Maoming, Maoming 525000, Guangdong, China)

摘要: 基于 ANSYS 有限元软件, 建立了大型厚壁结构焊接变形有限元计算模型, 分析了壁厚 125mm 的筒体斜插弯管接头焊接时小弯管与厚壁筒体间相对距离、筒体圆度变化及接头的位移演变过程。结果表明: 小弯管位移以及厚壁筒体两侧圆周上的圆度改变在焊接与冷却过程中呈相反状态, 而厚壁筒体两端的圆度变化率也有着明显差异; 坡口下端最终会产生相对较大的收缩; 冷却阶段最初 1~2h 内可适当降低冷却速率以减小焊接变形。

关键词: 简化计算; 大型厚壁; 圆度变化; 位移演变

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)01-0064-04

Abstract: Based on finite element code, ANSYS software, finite element model of welding deformation of large thick-walled structure was performed, and the relative distance between elbow and thick-wall cylinder, the cylinder roundness variation and the deformation evolution of welded cylinder with angle-inserting elbow with thickness of 125mm were numerically analyzed. The results show that the displacement of elbow and the roundness on both sides of the cylinder have opposite changes at the stage of heating to the stage of cooling, moreover the cylinder roundness on the two ends of the cylinder have significant differences; a relatively large contraction appears eventually in the bottom of the groove; the deformation should be reduced by reducing the cooling rate in stage of initial 1-2h.

Key words: simplify calculation; thick-wall joint; roundness variation; displacement evolution

在工业生产中, 焊接工艺成为大型厚壁结构制造过程中的关键技术之一。由于厚壁结构在焊接中受热严重不均匀, 焊接及冷却中有可能产生较大的变形, 从而影响到厚壁容器接头的使用性能。大型厚壁结构的焊接, 必须采用多层多道焊才能完成, 因此利用大量试验研究多道焊接头的变形是非常困难的。应用有限元数值模拟方法则可在结构施工前, 快速预测出接头在焊接及冷却过程中出现的变形。

对于厚壁多道焊结构焊接变形的计算理论有很多, 如固有应变法^[1]、弹塑性有限元法^[2]、变形累加法^[3]等。由于大型厚壁多道焊过程焊接时间长, 尺寸大, 如果完全按照实际生产过程进行分析, 即使利用数值方法也会耗时很多, 因此不少研究对厚壁容器多道

焊过程进行了简化, 如对焊道数进行简化^[4]、将三维模型转化为二维模型进行计算^[5]、利用固有初始变形数据库进行纯弹性变形计算^[6]等。简化计算是大型结构焊接有限元快速数值预测的发展方向之一。

弹塑性方法预测厚壁多道焊结构变形最为符合实际生产, 而三维有限元计算对接头不同部位变形的描述也更加准确, 因此建立三维有限元模型, 对厚壁大型设备“筒体斜插弯管”接头焊接变形进行弹塑性有限元数值预测, 并对计算过程进行了适当的简化。

1 有限元模型的建立

如图 1 所示, 所分析结构由两部分组成, 在一个外

径为 3650mm 的厚壁筒体上相贯焊接一个外径为 1650mm 的小弯管,两结构壁厚均为 125mm。小弯管切向斜插在厚壁筒体上,弯曲半径为 5100mm。

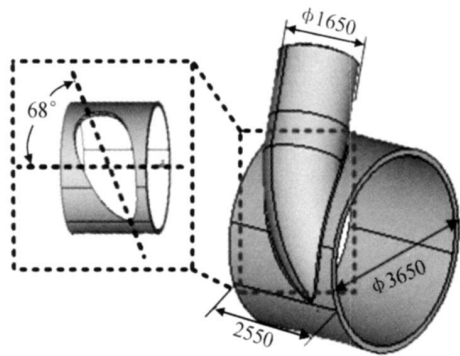


图 1 筒体切向斜插弯管结构及坡口示意图
Fig. 1 Structure and groove of welded cylinder with angle-inserting elbow

根据实际尺寸,建立 1: 1 实体模型并进行有限元离散。针对构件尺寸大,尤其是焊缝很厚的特点,利用自适应与映射相结合的方式,将实体模型离散成 35514 个单元。其中焊缝部位最小网格尺寸约 5mm × 5mm × 12mm,焊缝深度方向尺寸略大。结构网格划分如图 2 所示。

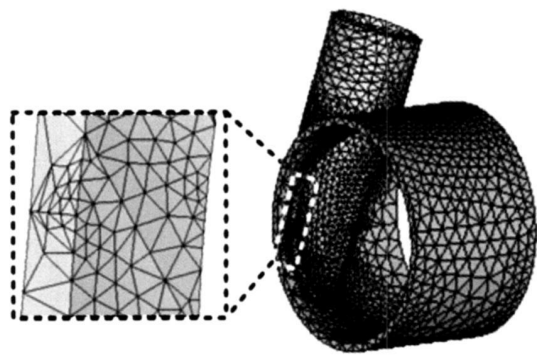
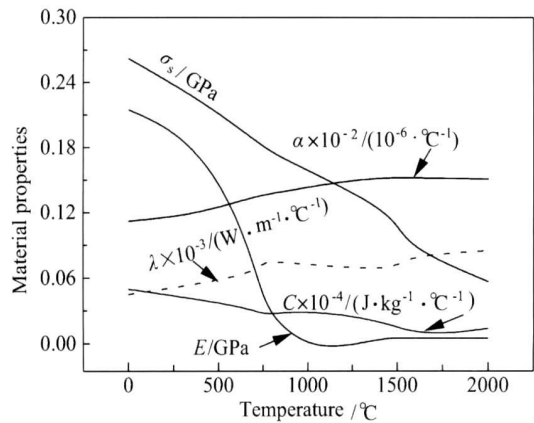


图 2 筒体切向斜插弯管接头有限元模型
Fig. 2 Finite element model of welded cylinder with angle inserting elbow

结合实际施工条件,对筒体一侧端面上施加轴向约束,以防结构在水平方向移动。在筒体端面距离弯管焊接位置较远处一点施加约束,以防结构滚动。

为简化计算,设定接头所有部分为同一材料 20G,其材料属性见图 3^[5],焊接过程为焊条电弧焊,采用相贯外坡口,具体工艺参数如表 1 所示。

金属在焊接过程中会因受热而膨胀,但对于接头变形及组织影响最大的阶段则是焊接完成后的冷却过程。由于筒体斜插弯管接头尺寸大,焊道数多,完全计算工作量太大,而许多类似问题的研究也多采用了简



α: linear expansion coefficient; σ_s : yield strength;
 E : elastic modulus; C : specific heat;
 λ thermal conductivity; ρ (density) = $7.89 \times 10^6 \text{ kg/m}^3$

图 3 材料性能参数

Fig. 3 Material properties

表 1 工艺参数

Table 1 Technological parameters

Parameter	Value
Welding speed / ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	16
Average time of single pass welding / min	100

化焊道数的方法^[7,8]。因此计算模型将接头焊道数简化为 5 道,如图 4 所示。

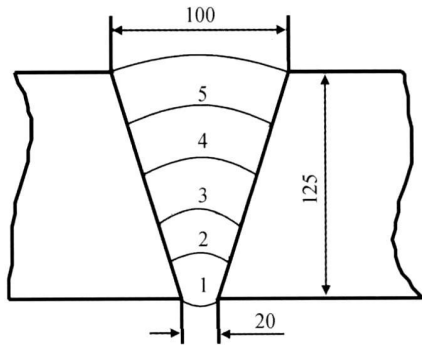


图 4 焊道数为 5 道时的焊接顺序及尺寸

Fig. 4 Welding process and size description for 5 bead

热源模型采用在相关焊缝施加线性温度的方式实现。线性温度作用时间 t_h 可由每段焊道总长度 L_h 与相应焊速 v 的相互关系确定^[9],其表达式为

$$t_h = \frac{L_h}{v} \tag{1}$$

为简化计算,所有焊道长度及焊速均取平均值。热输入温度 T 及其作用时间 t 如图 5 所示,总热输入按实际焊接工艺确定。因采用焊缝同时生热,会造成焊缝向母材热传导快于实际过程,因此按比例将母材导热系数适当减小,即可减小计算传热速率。

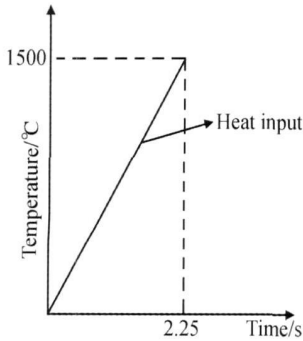


图 5 热输入模型及其作用时间
Fig. 5 Heat input and their duration

2 变形特征分析

为分析接头的位移特征, 选取厚壁筒体左、右端面圆度变化率, 小弯管外测轮廓线位移, 以及相贯焊缝所在曲线圆度变化率进行特征位移分析, 研究区域如图 6 所示。因实际位移很小, 故将各点实际位移等比例扩大, 图 7~ 9 所示位移曲线均为示意图。

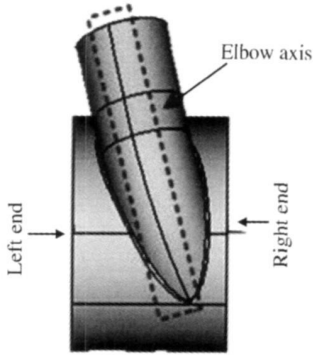


图 6 位移研究区域
Fig. 6 Research region of displacement

2.1 弯管变形特征

接头焊接及冷却过程中, 小弯管受热不均匀, 因此相对筒体轴线将产生“靠近”与“远离”的位移。

图 7 表示小弯管轴线方向外轮廓线上各点不同时刻的相对位移。越靠近弯管顶端位移量越大。小弯管位于焊缝以上的部分, 冷却中产生波浪变形。焊接初始小弯管因受热不均产生膨胀差, 呈“远离”筒体状态, 随后逐渐“靠近”筒体, 冷却中不断收缩, 最终呈现相对“靠近”筒体, 且轴线曲率增大的变形。

2.2 厚壁筒体圆度变形特征

由于焊缝对称轴倾斜, 厚壁筒体在焊接中所受热量也产生了差异。图 8 表示厚壁筒体左右两侧圆度变化。在焊接和冷却中, 筒体圆度变化规律正好相反。焊接中曲率变大的地方, 冷却中将呈相反变形。而圆周上部靠近焊缝部位(右侧 330°, 左侧 30°左右)在焊

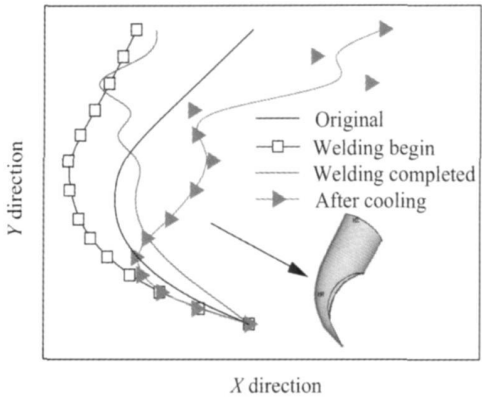


图 7 小弯管轴线上各点位移曲线
Fig. 7 Displacement schematic diagram of elbow axis

接和冷却中变形始终很大。在焊接中, 因焊缝膨胀, 筒体两侧端面圆周产生了类似“凹陷”变形。而在冷却过程中, 原“凹陷”部位逐渐“外凸”, 并带动整个圆周由“压扁”状态转变为“拉长”状态, 最终形成沿垂直焊缝平面方向的椭圆状变形。

厚壁筒体左侧圆周所形成的“椭圆型”变形量, 明显小于右侧圆周。这种因为接管斜插而引起的不均匀变形状态在一些学者的试验中也得到了验证^[10]。

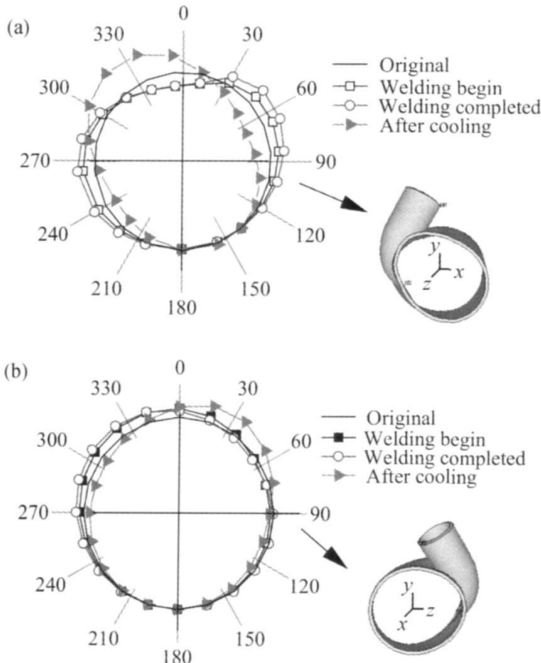


图 8 筒体两侧端面上各点位移曲线
(a) 右侧端面; (b) 左侧端面
Fig. 8 Displacement schematic diagram of points on both ends of thick-wall cylinder
(a) right end; (b) left end

2.3 相贯焊缝曲线变形特征

图 9 表示相贯焊缝所在曲线上各点在不同时刻的位移分布。焊接中最靠近筒体右侧端面的一段焊缝,

出现了较大“凸出”,而冷却中此部位又回复到原始状态,最后因焊缝收缩,此部位曲率小于原始状态。而与此区域相对称的区域(以圆点为对称轴,中心对称),位移却很小。可见,相贯焊缝对称轴与厚壁筒体轴线的角度,对焊缝部位的刚度及变形有着重要影响。

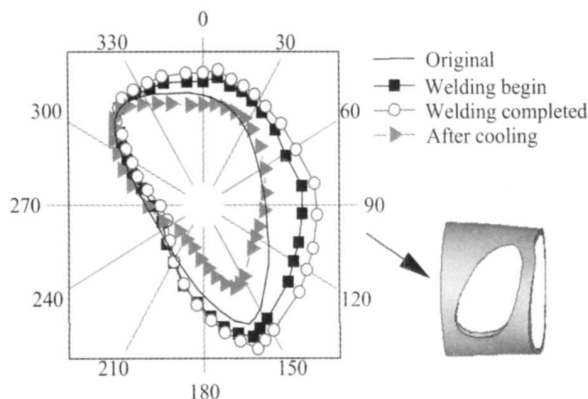


图9 坡口曲线上各点的位移曲线

Fig. 9 Displacement schematic diagram of points on groove curve

3 冷却过程中位移演变规律

接头上有两处位移较大,分别为小弯管外轮廓线最上端及筒体右侧圆周上部。图10即为两区域内一点在冷却中的位移演变曲线,焊接过程对接头最终变形影响较小,因此从冷却过程开始分析。小弯管靠近筒体为“正”位移,筒体向外凸出也为“正”位移。

位于小弯管顶部的区域,在焊接结束后相对于厚壁筒体呈“远离”状态,位移量约5.5mm。在冷却初始,接头降温与收缩率都很大,弯管顶部短时间内即达到了与筒体最近的位置,此后弯管逐渐“远离”筒体,直至冷却约2h停止。此后小弯管顶部再次靠近厚壁筒体,最终位于靠近厚壁筒体约6mm的位置。

在冷却初期较短时间内,厚壁筒体圆度会发生约9mm的较大改变。在迅速转变为膨胀后,“外凸”逐渐增加,直至约2h达到峰值,但在冷却中,厚壁筒体圆度改变最大量也未超过6mm,相对改变不大。

因此在初始冷却中,接头会发生较大位移突变。如能在冷却最初的1~2h内降低冷却速率,控制接头变形,则将在一定程度上减小接头的残余变形量。

4 结论

(1)小弯管在焊接中相对厚壁筒体发生“远离”位移,但在冷却中则变为“靠近”,因此摆动率较大。而小弯管焊缝以上部位则发生了波浪变形。

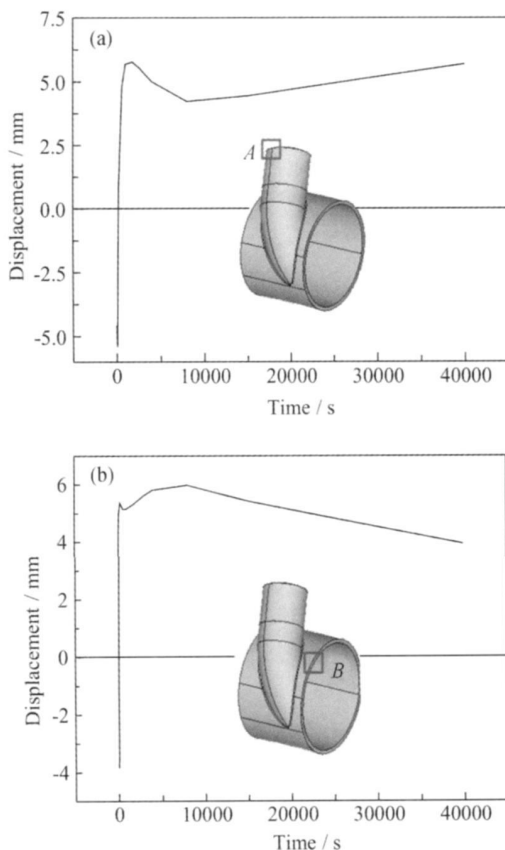


图10 冷却过程中接头变形最大处的位移演变

(a) A点; (b) B点

Fig. 10 Deformation evolution at point with maximum displacement (a) point A; (b) point B

(2)厚壁筒体两侧圆周圆度改变在焊接和冷却过程中呈现相反状态,且筒体两侧变形率有着明显差异,更靠近焊缝一侧的变形量和形变区域大于另一侧。

(3)坡口所在曲线在焊接中发生了较大的位移,更靠近筒体端面一侧的坡口在焊接中“外凸”明显,但坡口所在曲线下端最终形成了较大收缩。

(4)在焊接阶段应在小弯管与厚壁筒体间适当约束以减少小弯管摆动,而冷却阶段的最初1~2h内可适当降低冷却速率以减小变形。

参考文献

- [1] 徐济进, 陈立功, 汪建华, 等. 基于固有应变法筒体对接多道焊接变形的预测[J]. 焊接学报, 2007, 28(1): 77-80.
- [2] LIU C, ZHANG J X. Numerical simulation of transient welding angular distortion with external restraints[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(1): 26-31.
- [3] 杨广臣, 薛忠明, 张彦华. 厚板多层多道焊角变形分析方法[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 115-118.
- [4] 陈建波, 罗宇, 龙哲. 大型复杂结构焊接变形热弹塑性有限元分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 69-72.

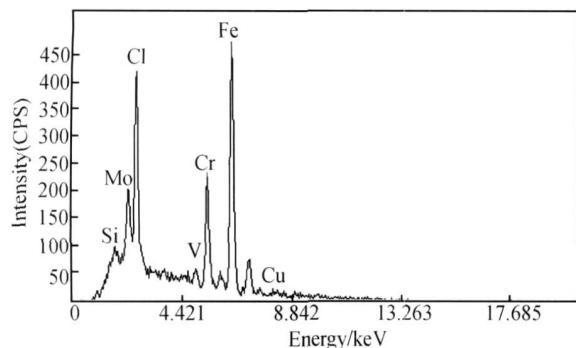


图5 腐蚀产物膜 X 射线能谱分析

Fig.5 XPS analysis on corrosion product film

另一方面, Cr 的碳、氮化物析出不能在金属表面形成完整的耐蚀膜, 而成为点蚀源, 使点蚀的机会增多, 反而会作为腐蚀电池的阴极加速腐蚀。

由于 Cr 是强碳化物形成元素, 容易与基体中的碳形成 (Cr, Fe)₇C₃ 等金属间化合物; 这种化合物比较稳定, 不会溶解, 当基体溶解以后作为残余物质留在了腐蚀产物膜中; 如果基体中的碳含量较高, 会消耗基体中合金元素的量, 降低合金化效果, 使得材料抗 CO₂ 腐蚀能力下降。因此, 为了提高基体合金元素 Cr 的利用效率, 在研究开发过程中适当降低了基体中的碳含量; 同时降低碳含量也有利于提高材料的耐蚀性。适当增加 Nb, Ti 含量, 以固定 C, N, 减少 Cr 的碳、氮化物析出, 采取适当的轧后冷却速率和冷却温度, 避免 Cr 的析出, 充分发挥 Cr 在抗腐蚀方面的有利作用。

4 结论

(1) 在传统的 TMCP 生产工艺基础上, 加入 0.55% 的 Cr, 并适当降低 Mn 元素含量, 采取合适的

控冷工艺, 可生产出屈服强度 530 MPa 以上的, 具有抗 CO₂ 腐蚀性能的管线钢, 该管线钢的金相组织为 F + B 粒。

(2) 腐蚀过程中材料基体中的 Cr 优先发生腐蚀, 形成无定形化合物, 并在晶界富集形成保护膜, 形成类似支撑骨架的载体, 使 FeCO₃ 膜容易附着在基体上, 从而形成覆盖整个基体表面的保护性致密腐蚀产物膜。

(3) 为了提高基体合金元素 Cr 的利用效率, 应当降低 C 的含量; 适当增加 Nb, Ti 含量, 以固定 C, N, 减少 Cr 的碳、氮化物析出; 采取适当的轧后冷却速率和冷却温度, 避免 Cr 的析出。

参考文献

- [1] 李廷取, 吴化, 李雪松. 天然气输气管线钢的 CO₂ 腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(5): 260-263.
- [2] 林冠发, 白真权, 赵新伟, 等. 温度对 CO₂ 腐蚀产物膜形貌结构的影响[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 101-109.
- [3] MASAKATSU UEDA, AKIO IKEDA. Effect of Microstructure and Cr Content in Steel on CO₂ Corrosion[R]. Denver: Corrosion, 1996.
- [4] 秦紫瑞, 姚曼, 李隆盛. 铸造高合金不锈钢析出相及腐蚀行为的研究[J]. 钢铁, 1996, 31(12): 49-54.
- [5] 王献昉, 董振江, 梁拥军, 等. 经济型低 Cr 抗 CO₂ 腐蚀合金石油管材钢开发现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(6): 436-439.
- [6] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. 含 1% Cr 的 N80 钢 CO₂ 腐蚀产物膜特征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(6): 330-334.

收稿日期: 2009-07-10; 修订日期: 2010-06-30

作者简介: 张伟卫 (1981—), 男, 硕士, 从事输送管与管线材料方面研究工作, 联系地址: 陕西省西安市电子二路 32 号, 中国石油天然气集团公司管材研究所 (710065), E-mail: zhangww@tgrc.org

(上接第 67 页)

- [5] WEN S W, HILTON P, FARRU GIA D C. Finite element modeling of a submerged arc welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119(1-3): 203-209.
- [6] WANG R, ZHANG J X, SHERIF R, et al. Study on welding inherent deformations in welded structural materials [J]. Transaction of JWRI, 2008, 37(1): 91-100.
- [7] DENG D, MURAKAWA H, LIANG W. Numerical simulation of welding distortion in large structures [J]. Computer Methods Appl Mech Engrg, 2007, 196(45-48): 4613-4627.
- [8] BRICKSTAD B, JOSEFSON B L. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(1): 11-25.

- [9] SATTARI-FAR I, JAVADI Y. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 265-274.

- [10] 张茂龙, 江燕云, 钱旭辉, 等. 大型插入式斜接管与筒体焊接工艺及变形控制技术[J]. 压力容器, 2008, 25(6): 28-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875200)

收稿日期: 2009-09-28; 修订日期: 2010-07-05

作者简介: 张可荣 (1979—), 女, 博士研究生, 从事激光焊接应力分析及焊接或结构有限元数值模拟方面的研究, 联系地址: 西安交通大学材料科学与工程学院焊接研究所 (710049), E-mail: zhkr2001@163.com