

# Q345 T形焊接接头焊脚尺寸对强度的影响分析

李金凤, 张东焕, 王玉朋

(山东理工大学交通与车辆工程学院, 淄博 255049)

**摘 要:** T形焊接接头在工程中应用广泛, 焊脚尺寸直接影响着焊接件的质量. 为了探索焊脚尺寸对焊接件强度的影响, 分别对取样位置不同、尺寸不同的 Q345 T形焊接接头试样进行拉伸试验, 得到 T形焊接接头的力学性能数据并对其进行分析比较. 按照等强度理论, 计算出 T形焊接接头在不同受力情况下的最优焊脚尺寸, 将理论计算值与试验数值对比分析. 结果表明, 理论值与试验值基本吻合.

**关键词:** T形焊接接头; 拉伸试验; 力学特性分析; 焊脚尺寸

**中图分类号:** TG 407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)12-0075-04

## 0 序 言

焊接是金属结构件的主要连接方式之一, 广泛应用于航空航天、海洋钻探、建筑等许多领域. T形接头是一种常见的焊接接头, T形接头焊缝形式有不开坡口的角焊缝和开单边坡口的没有焊脚的对接焊缝. 其中对接焊缝接头拐角处有很大的应力集中, 很少采用; 角焊缝的受力比较简单, 使用广泛. 然而在焊接接头焊脚尺寸方面仍存在很多的问题, 实际生产中, 存在着焊脚尺寸过大的情况, 比如一些设计图纸要求焊缝尺寸偏大, 传统观念认为焊缝是结构中的薄弱环节, 越大越放心. 焊脚尺寸过大会造成接近焊缝区的金属过热, 产生粗大的魏氏组织, 不仅降低冲击韧性, 还会造成焊接变形和残余应力过大, 浪费材料, 增加制造成本; 焊脚尺寸过小会导致母材与焊缝熔合不良, 引起应力集中, 还可能出现焊缝咬边、裂纹等缺陷, 这种情况更是严重影响焊接件的强度.

目前工业中使用的焊接技术是 19 世纪末 20 世纪初现代科学技术发展的产物. 最近几年, 国内外许多学者对焊接区的温度场和应力场, 焊接区的残余应力和应变及焊接缺陷、疲劳断裂等进行了分析. 胥国祥等人<sup>[1,2]</sup>利用有限元软件对焊接接头的温度场和应力场进行模拟分析, 刘玉君等人<sup>[3]</sup>通过对焊接结构焊前施加弹性反向角变形来控制结构残余角变形, 姜克斌等人<sup>[4]</sup>利用磁测应力仪及有限元数值模拟得焊接残余应力分布规律; 卢峰华等人<sup>[5]</sup>利用

ansys 软件对焊接件的疲劳强度进行数值模拟, 一些学者结合有限元与边界元, 数值模拟分析焊接件的应力强度因子<sup>[6,7]</sup>. 焊脚尺寸对焊件强度有很大影响, 张立斌和姚玉环<sup>[8]</sup>对于埋弧自动焊单面焊双面成形焊接, 利用二次回归正交组合方法及软件分析来预测几何尺寸, 陆志军及陈奎昌等人<sup>[9,10]</sup>对焊脚尺寸进行了理论分析. 但涉及焊脚尺寸对焊接件强度影响的试验分析较少. 通过对取样位置不同和焊接尺寸不同的 T形焊接接头进行拉伸试验, 得到接头的一般力学特性并对其进行分析比较. 按照等强度理论计算得到 T形焊接接头在不同受力情况下的最优焊脚尺寸, 计算结果与试验数据进行比较, 结果基本吻合.

## 1 T形焊接接头拉伸试验

### 1.1 试样的制备

试验所用的 T形焊接接头的材料是 Q345, 焊丝材料是 ER50-6, 采用不开坡口对接手工焊接. 为了探索焊脚尺寸对焊接件的影响, 将 T形焊接接头试样分 3 组试样进行试验, 第一组编号为 A, 取样位置是焊接端头段, 即起弧和收弧的位置; 第二组编号为 B, 取样位置是焊接中间段; 第三组编号为 F, 取样位置同样是焊接中间段. 每组焊接试样各准备 4 件, 并且要求焊接试样无缺陷, 无残余应力, 试验时选取 3 件进行试样测试, 1 件为预留件. A 组与 B 组为同一个 T形焊接接头中截取得到的试样, 其尺寸差异由于加工及测量误差产生, 通过第一组与第二组的比较来探讨焊接起弧, 收弧对焊接件强度的影响; B 组与 F 组取于不同尺寸 T形焊接接头的中间段, 把

它们设计成尺寸不同的试样,通过第 2 组与第 3 组的比较来探讨焊接件尺寸对焊接件强度的影响。

T 形焊接接头试样的尺寸如表 1 所示,形状如图 1 所示。图 1 中, $t$  为焊接接头的宽度, $b$  为垂直板的厚度, $a$  为水平板的厚度, $k_1, k_2, k_3, k_4$  为焊接接头焊脚的尺寸,其中 T 形焊接接头的焊缝长度等于焊接接头的宽度  $t$ 。

表 1 T 形焊接接头试样尺寸  
Table 1 Size of test piece T welded joint

试样 编号	$a$ /mm	$b$ /mm	$t$ /mm	$k_1$ /mm	$k_2$ /mm	$k_3$ /mm	$k_4$ /mm
A1	11.7	11.7	25.1	9.5	8.2	10.0	8.2
A2	11.7	11.7	22.1	10.0	9.7	10.5	9.7
A3	11.8	11.8	25.7	9.7	9.2	10.0	9.2
A 平均	11.7	11.7	24.3	9.7	9.0	10.2	9.0
B1	11.8	11.8	24.7	9.7	9.0	9.5	9.7
B2	11.8	11.7	24.3	9.2	9.0	9.5	9.0
B4	11.9	11.8	24.3	10.0	9.0	9.0	8.0
B 平均	11.8	11.8	24.4	9.6	9.0	9.3	8.9
F1	15.6	7.7	24.6	8.0	8.0	8.0	8.0
F2	15.5	7.7	25.0	9.0	9.0	9.0	9.0
F4	15.6	7.8	24.1	8.0	8.0	9.0	9.0
F 平均	15.6	7.7	24.6	8.3	8.3	8.7	8.7

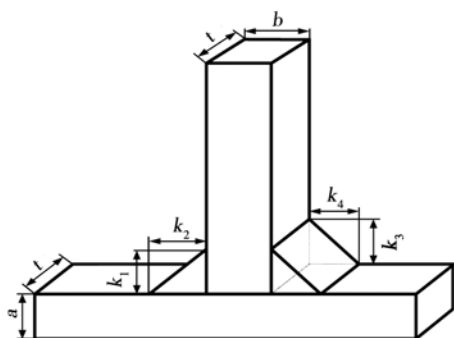


图 1 T 形焊接接头试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece T welded joint

## 1.2 试验设备

试验所用的主要仪器设备为 CMT5305 微机控制电子万能试验机,其准确等级为 1 级;YJ-4501A 静态数字应变仪,灵敏系数为 2.08%;BHF120-3AA 和 BX120-2BA 型号的电阻应变计。

## 1.3 拉伸试验

用游标卡尺测量试样的尺寸(包括标距、厚度、宽度、长度和截面面积);把试样磨平并且贴应变片,接线;准备好试验机,将准备好的试样夹持到试验机上,用半桥接线法将工作片及补偿片接于电阻应变仪;试验开始前将应变仪预调平衡,试样夹紧后开始

均匀缓慢的加载,由应变仪记录应变值。为了能得到比较理想的试验数据,不影响 T 形焊接接头性能测试的真实性,要求试样受力形式合理,试样夹持到试验机时必须调好位置,避免出现偏心现象,如图 2 所示,试样的拉伸试验示意图如图 3 所示。在试验时采用位移控制的方式加载,其加载的速度为 0.1 mm/min。



图 2 T 形焊件拉伸试验装置图

Fig. 2 Tensile test device of T welded joint

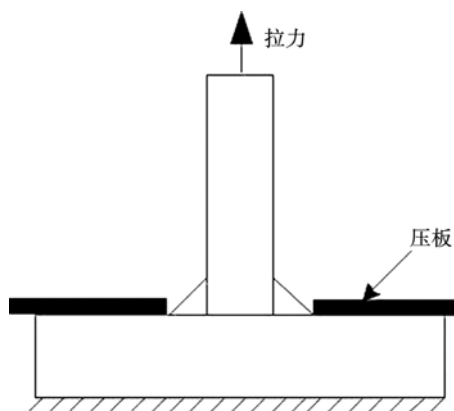


图 3 拉伸试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tensile test

通过观察试验过程发现,编号为 A 和编号为 B 的 T 形焊接接头试样在加载初期无明显现象,当载荷接近最大值时能听到轻微的焊缝拉开的声音,随后载荷下降试样“嘭”的一声破坏。拉断后的 T 形焊接接头断口是沿角焊缝 45° 的位置,如图 4a, 4b 所示。而编号为 F 的 T 形焊接接头试样在加载初期也是无明显变化,随着载荷的上升,在强化阶段中,试样的母材区长度明显增长,观察到出现了明显缩颈现象,最后随着载荷的下降试样“嘭”的一声破坏。拉断后的 T 形焊接接头断口在母材上,且角焊缝没有发生破坏,如图 4c 所示。各组试样的断口形貌示意图如图 5 所示。试验机自动记录了试样的荷载随

位移变化的曲线,将 A1、B1 和 F1 的载荷—位移曲线放在同一个图中进行比较,如图 6 所示,从图 6 可以看出 F1 的承载力小于 A1 和 B1 的承载力。

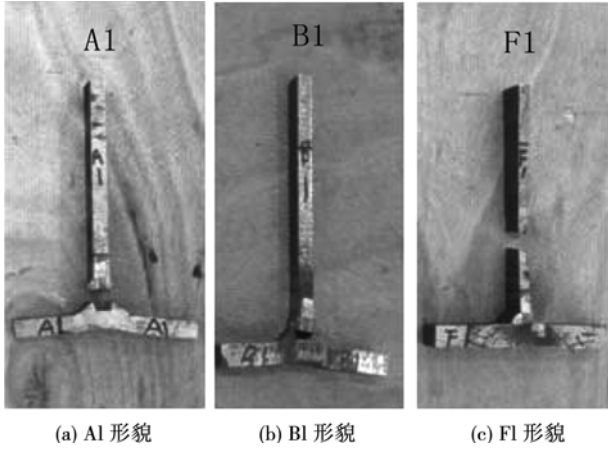


图 4 T 形焊接接头断口形貌  
Fig. 4 Fracture morphology of T welded joint

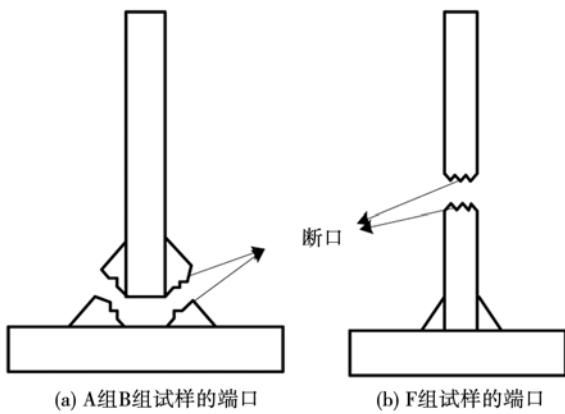


图 5 断口形貌示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of fracture morphology

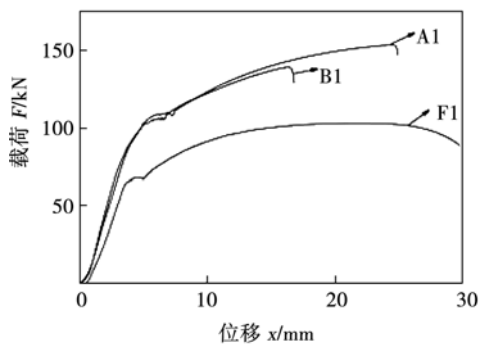


图 6 T 形焊接接头拉伸试验载荷—位移曲线  
Fig. 6 Load—displacement curve of T welded joint

## 2 试验数据分析

材料在线弹性阶段,根据胡克定律,有

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{A\varepsilon} \quad (1)$$

式中:  $E$  为材料的弹性模量;  $F$  为轴向拉力;  $A$  为试样的横截面面积;  $\varepsilon$  为轴向应变,由式(1)可计算材料的弹性模量. 在母材上贴了夹角是  $90^\circ$  的应变花,通过拉伸试验可测出轴向应变  $\varepsilon_p$  和横向应变  $\varepsilon'_p$ . 当应力不超过比例极限时,横向应变与轴向应变之比的绝对值是个常数,即

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon'_p}{\varepsilon_p} \right| \quad (2)$$

由式(2)即可求出材料的泊松比.

T 形焊接接头的 3 组试样的拉伸试验数据及数据处理结果,如表 2 所示. 其中弹性模量和泊松比都是母材的.

表 2 T 形焊接接头试样的试验数据及其参数

Table 2 Experimental data and parameters of T welded joint specimen

试样 编号	最大力 $F_{\max}/\text{kN}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$
A1	153.22	521.74	215.88	225	0.25
A2	123.25	476.65	377.34	209	0.28
A3	147.70	487.03	186.01	215	0.28
B1	139.16	477.47	363.32	203	0.31
B2	143.71	505.45	377.99	203	0.27
B4	146.95	512.50	369.51	193	0.32
F1	103.82	548.10	356.65	197	0.24
F2	101.16	525.51	351.02	221	0.26
F4	101.07	537.68	346.02	230	0.27

为了分析比较 T 形焊接接头焊接质量及其参数,编号为 A、B、F 的焊接试样的试验数据及其参数的平均值,如表 3 所示.

表 3 三组 T 形焊接接头试验结果的对比

Table 3 Comparing for experimental results of three groups of T welded joint

试样 编号	最大力 $F_{\max}/\text{kN}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$
A	141.39	495.14	259.74	216.33	0.27
B	143.27	498.47	370.27	199.67	0.30
F	102.02	537.10	351.23	216.00	0.26

由表 3 可以看出无论是端头段还是中间段,它们的弹性模量与泊松比基本是一致的,这与理论是相符合的,因为弹性模量与泊松比是材料的基本属性. 比较取样于端头段的 A 组和取样于中间段的 B 组,这两组都是在焊缝处断裂,它们的最大承载力,

抗拉强度基本一致,但是屈服强度相差 110.53 MPa,这说明焊接试样中间段的焊接质量更好. 比较同样取样于中间段的 B 组与 F 组, F 组试样都是拉断于母材上,抗拉强度有所提高,屈服强度基本一致,但是 B 组承受的最大力要比 F 组的要大 41.25 MPa,由于 F 组的焊脚大于最薄的母板材的厚度  $b$ ,而 B 组的焊脚小于最薄的母板材的厚度  $b$ ,同时根据试验结果可看出它们的强度基本一致,说明了在工程中 B 组的尺寸是最佳的选择,而 F 组存在焊脚尺寸大所导致的问题.

### 3 T 形焊接接头等强度理论

对于焊接件,并不是焊脚的尺寸越大越好,若焊脚尺寸偏大,不仅加大了热影响区尺寸、焊接应力和变形,还浪费材料和工时,并且对焊接件的强度没有任何好处. 因此,优化焊脚尺寸对于焊接件具有重要意义. 随着焊接材料和焊接工艺的不断发展,按照等强度理论,根据 T 形焊接接头焊缝受力情况,确定 T 形接头角焊的焊脚尺寸. T 形焊接接头焊脚如图 7 所示.

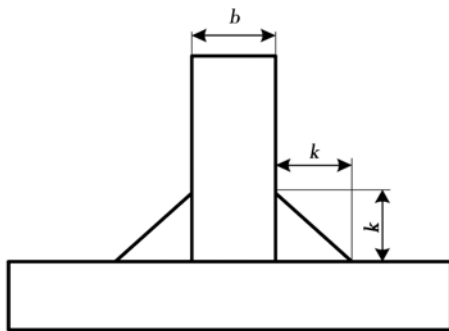


图 7 T 形焊接接头焊脚示意图

Fig. 7 Schematic diagram of T welding joint leg size

(1) 当接头焊缝以传递拉(压)应力为主时,按等强度理论计算,有

$$[\sigma] \cdot b = 2 \times 0.7k \cdot [\tau] \quad (3)$$

式中:  $[\sigma]$  为材料的许用拉(压)应力 (MPa);  $b$  为垂直板板厚 (mm);  $[\tau]$  为材料的许用切应力 (MPa);  $k$  为焊缝焊脚尺寸 (mm).

因为

$$[\tau] = 0.7[\sigma] \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),整理得

$$k = 0.98b \quad (5)$$

一般取

$$k = b \quad (6)$$

(2) 当接头焊缝以传递剪应力为主时,按等强度理论计算,有

$$[\tau] \times b = 2 \times 0.7k \times [\tau] \quad (7)$$

则可求得

$$k = 0.714b \quad (8)$$

一般取

$$k = 0.7b \quad (9)$$

(3) 梁柱系腹板受压区的加劲板的 T 形接头角焊,这种接头主要是为防止梁柱腹板受压区失稳而设置,它的焊缝是联系焊缝,不受力,通常按加劲板板厚的 0.5~0.6 倍选取,一般不小于 6 mm. 即

$$k = (0.5 \sim 0.6)b, \text{ 且 } k \geq 6 \text{ mm} \quad (10)$$

综上所述, T 形接头角焊缝作为工作焊缝和作为联系焊缝时的焊脚尺寸选取分别为  $k = b$ ,  $k = 0.7b$  和  $k = (0.5 \sim 0.6)b$ , 且  $k \geq 6 \text{ mm}$  3 种.

T 形焊接接头试样的尺寸平均值对比,焊脚的大小与薄板的厚度的比值及拉伸试验断裂位置,如表 4 所示.

表 4 T 形焊接接头尺寸以及比值  
Table 4 Size and ratio of T welded joint

编号	a/mm	b/mm	t/mm	k/mm	k/b	断裂位置
A	11.73	11.73	24.3	9.49	0.81	焊缝断裂
B	11.80	11.75	24.38	9.21	0.78	焊缝断裂
F	15.57	7.73	24.57	8.50	1.10	母材断裂

由表 4 中的数据,可以看出编号为 A 的试验试样满足  $k = 0.81b$ , 编号为 B 的试验试样满足  $k = 0.78b$ , 编号为 F 的试验试样满足  $k = 1.10b$ , 与理论计算结果基本吻合.

### 4 结 论

(1) 通过静载拉伸试验测得 Q345 T 形焊接接头的力学性能,端头段 A 组和中间段 B 组相比较,可以看出焊接中间段的焊接质量更好.

(2) 中间段 B 组与 F 组相比较,可以看出 B 组的尺寸是最佳的尺寸.

(3) 由等强度理论确定 T 形焊脚的最佳尺寸是:传递拉压应力时,  $k = b$ ; 传递剪应力时,  $k = 0.7b$ ; 为防止梁柱腹板受压区失稳时,  $k = (0.5 \sim 0.6)b$ , 且  $k \geq 6 \text{ mm}$ . 比较试验数据和理论计算结果,可以看出它们基本吻合.

- 接数值模拟的方法探讨[J]. 焊接学报, 2008, 29(11): 105-108.
- Zhu Jindan, Chen Hu, Gong Jianming, *et al.* Discussion on numerical simulation of mult pass welding of thin-plate based on shell element[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(11): 105-108.
- [6] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 焊接数值模拟中以温度为控制变量的高效算法[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 77-80.
- Yan Dongyang, Shi Qingyu, Wu Aiping, *et al.* A high-efficiency welding simulation method based on welding temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 77-80.
- [7] 赵明, 武传松, 胡庆贤. TIG 焊接熔透熔池形状和表面变形的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 203-214.
- Zhao Ming, Wu Chuansong, Hu Qingxian. Numerical simulation of penetrated weld pool geometry and surface deformation in TIG welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 203-214.
- [8] 莫春立, 钱百年, 国旭明, 等. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 93-96.
- Mo Chunli, Qian Bainian, Guo Xuming, *et al.* The development of models about welding heat sources calculation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 93-96.
- [9] 路登平, 李义丹, 司树恒, 等. 正态分布焊接热源集中系数的确定和研究[J]. 焊接学报, 1986, 7(1): 47-54.
- Lu Dengping, Li Yidan, Si Shuheng, *et al.* The determination of normal distribution concentration factor for heat source of welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1986, 7(1): 47-54.
- [10] D. 达拉伊. 焊接热效应、温度场、残余应力、变形[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997, 07.
- [11] Abid M, Siddique M. Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 82(2005): 860-871.
- [12] 中国航空材料手册. 铝合金镁合金第3卷[M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

**作者简介:** 卫亮,男,1984年出生,博士研究生. 主要从事轨道车辆车体强度方面的科研. 发表论文5篇. Email: 12116345@bjtu.edu.cn

**通讯作者:** 张乐乐,女,博士,教授,博士研究生导师. Email: llzhang1@bjtu.edu.cn

## [上接第78页]

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李亚娟, 李午申. X80 管线钢环焊缝接头残余应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(6): 97-100.
- Li Yajuan, Li Wushen. Numerical simulation on welding residual stresses of X80 pipeline girth weld joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(6): 97-100.
- [3] Liu Yujun, Li Yanjun. Control of angular distortion in T-joint fillet structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(6): 904-912.
- [4] 姜克斌, 肖叶桃, 郭永涛. T 型焊接试件焊接残余应力分布的测定[J]. 焊接学报, 2008, 29(1): 53-56.
- Jiang Kebing, Xiao Yetao, Guo Yongtao. The measure of welding residual stress distribution of T welded specimen[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(1): 53-56.
- [5] 卢峰华, 张文朝, 张隶新, 等. 209 T 型转向架构架疲劳强度数值模拟[J]. 焊接技术, 2014, 43(5): 57-59.
- Lu Fenghua, Zhang Wenchao, Zhang Lixin, *et al.* Numerical simulation to fatigue strength of type 209 T bogie frame[J]. Welding Technology, 2014, 43(5): 57-59.
- [6] Lie S T, Li G, Cen Z. Effect of brace wall thickness and weld size on stress intensity factors for welded tubular T-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(2): 167-182.
- [7] Song Zhanxun, Fang Shanxuan, Xie Jilong. Research on stress intensity factors for weld root crack of T-butt joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 87-94.
- [8] 张立斌, 姚玉环. 埋弧自动焊单面焊双面成型焊缝尺寸预测[J]. 热加工工艺, 2014, 43(11): 225-229.
- Zhang Libin, Yao Yuhuan. Forecast of welding seam sizes for one side welding both sides formation using submerged Arc welding[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(11): 225-229.
- [9] 陆志军. 炉用机械焊接结构 T 型接头焊脚尺寸的确定[J]. 现代焊接, 2010(12): 47-48.
- Lu Zhijun. Determination of the dimensions of fillet weld leg of T joint on welding structural components of machinery for kiln use[J]. Modern Welding, 2010(12): 47-48.
- [10] 陈奎昌, 高景荣. T 形接头组合焊缝及角焊缝焊脚 K 的选取[J]. 中国三峡建设, 2002(11): 44-45.
- Chen Kuichang, Gao Jingrong. Selection of combination welding and fillet welding feet K of T joint[J]. China Three Gorges Construction, 2002(11): 44-45.

**作者简介:** 李金凤,女,1990年出生,硕士研究生. 主要从事材料与结构的力学性能研究. Email: lijinfengsy@163.com

**通讯作者:** 张东焕,男,副教授. Email: zhangdonghuan@sdut.edu.cn