

doi: 10.3969/j.issn.1674-0696.2013.02.39

# 2205DSS 焊接结构在酸性环境下腐蚀速率研究

王智祥<sup>1</sup> 张 瑶<sup>2</sup> 张继祥<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 船舶工程中心 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 机电与汽车工程学院 重庆 400074)

**摘要:** 试验研究了 2205DSS 焊接结构的母材区、融合区、热影响区分别在草酸、硝酸和盐酸溶液中的腐蚀速率。研究发现: 该结构在草酸和沸腾的硝酸溶液中有较好的耐腐蚀能力,而在盐酸溶液中较差; 熔合区腐蚀速率最快,母材区次之; 在盐酸溶液中腐蚀速率随着温度的升高而加快,随着盐酸溶液浓度的增加先增加后降低,随着腐蚀时间的进行而降低。建立了腐蚀速率与盐酸溶液的温度、浓度、腐蚀时间之间的数学模型,该模型能快速计算该焊接结构在盐酸溶液中的腐蚀速率。

**关键词:** 2205 双相不锈钢焊接处; 酸性腐蚀环境; 腐蚀速率

中图分类号: TG 113.23+2

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2013)02-0360-05

## Corrosion Rate of the Welding Seam of 2205 Stainless Steel in the Acidic Environment

Wang Zhixiang<sup>1</sup>, Zhang Yao<sup>2</sup>, Zhang Jixiang<sup>2</sup>

(1. Center of Marine Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The corrosion rates of the base metal zone, fusion zone and the heat affected zone of 2205DSS welded structures in various acid solutions are studied. It is found that the 2205DSS welded structure shows better corrosion resistance in oxalic acid and boiling nitric acid solution. However, the structure shows poor corrosion resistance in the hydrochloric acid solution obviously and the fastest rate of corrosion is the fusion zone, and the corrosion rate of base metal is followed. In the hydrochloric acid solution, the corrosion rate is accelerated as the temperature rises; the corrosion rate increases with the increase of hydrochloric acid solution concentration firstly and then decrease; the corrosion rate is reduced with the conduct of the etching time. The mathematical model of relationship among corrosion rate, temperature of the hydrochloric acid solution, concentration and etching time is established, which can quickly calculate the corrosion rate of the welded structures in the hydrochloric acid solution.

**Key words:** weld of 2205 duplex stainless steel; acid corrosion environment; corrosion rate

2205DSS 是由大约各占 50% 的奥氏体和铁素体组成的,具有良好的力学和耐腐蚀性能。很多学者对其进行的试验研究表明,与奥氏体不锈钢相比,它的强度更高,耐晶间腐蚀和耐氯化物应力腐蚀性更强<sup>[1-3]</sup>。然而材料在工程运用中大量使用焊接工艺,焊接后的焊接结构与母材相比,奥氏体相和铁素体相的比例发生改变从而导致焊接结构的力学性能和耐腐蚀性能都发生了一定的变化<sup>[4-7]</sup>。

在 2007 年,川东船厂在国内首次使用国产 2205 双相不锈钢制造化学药品船,该船制造过程中大量用到焊接工艺,在最近检查发现焊接处有明显腐蚀痕迹,并且装酸性溶液的船被腐蚀的情况比装碱性药品的船严重得多。而国内对国产 2205DSS 焊接结构在酸性环境中的耐腐蚀没有单独研究,笔者根据 GB/T 4334—2008《金属和合金不锈

钢晶间腐蚀实验方法》,用草酸、硝酸、盐酸对 2205DSS 焊接结构进行腐蚀试验,旨在研究焊接处在恶劣的酸性环境下的耐腐蚀能力。

## 1 焊接工艺及试验前处理

### 1.1 试验材料

试验采用川东造船厂特种船舶用 2205 双相不锈钢,焊丝选用 ER 2209,两者的化学成分见表 1。

表 1 2205 双相不锈钢和 ER 2209 焊丝的化学成分

Table 1 Main chemical compositions of 2205 duplex stainless steel & ER 2209 wire

元素	母材	ER2209	元素	母材	ER2209
C	0.016	0.013	Cr	22.48	22.92
Mn	0.82	1.54	Ni	5.46	8.61
P	0.024	0.018	Mo	3.12	3.18
S	0.001	0.007	N	0.16	0.17
Si	0.36	0.49	Cu		0.012

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-09-05

基金项目: 重庆市科委重大科技攻关项目(ests2008ab3033)

作者简介: 王智祥(1955—)男,四川资阳人,教授,主要从事船舶、机械工程及材料成型加工方面的研究。E-mail: wzx@cquc.edu.cn。

1.2 焊接工艺

将 2205 双相不锈钢板加工成 200 mm × 100 mm × 10 mm 的试样,焊接前焊接坡口如图 1。焊接时采用川东船厂焊接试验室的 NB-500 IG-BT 型气体保护焊机对母材进行多层平焊。层间温度  $T$  控制在 150 ~ 250 °C 范围内,焊接速度  $v$  控制在 10 ~ 12 m/min 范围内,焊接电流  $I$  控制在 125 ~ 135 A 范围内,电压  $U$  控制在 24.5 ~ 25 V 范围内。

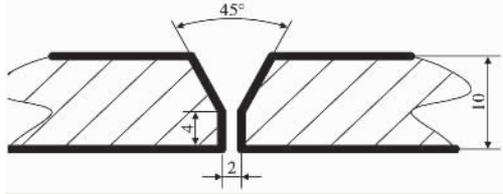


图 1 V 型破口试验

Fig. 1 Test on V-Shaped weld groove

2 试验

2.1 草酸试验

2.1.1 试验方法

按照 GB/T 4334.1—2008 《不锈钢 10% 草酸浸蚀试验方法》进行草酸试验。试验后,用试件的金相图与标准试验结论图对比,研究试件是否发生晶间腐蚀。

2.1.2 试验结果及分析

显微镜下试件腐蚀前后金相如图 2。对比母材腐蚀前后如图 2 中的 (a) 和 (b) 状态,可以清晰看到图 2 (b) 中标示的白色部分为奥氏体,黑色部分为铁素体并且在奥氏体表面有很多被腐蚀的深孔,对比国家标准<sup>[8]</sup>证实 2205 双相不锈钢发生晶间腐蚀。图 2 (c) 为热影响区,可以看到奥氏体相和铁素体相分布均匀,其表面看不到腐蚀留下的孔洞。

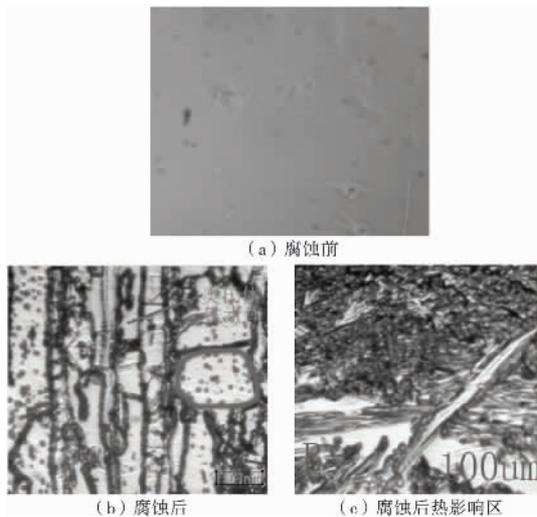


图 2 草酸试验结果

Fig. 2 Oxalic acid test results

2.2 65% 硝酸沸腾试验

2.2.1 试验方法

1) 根据 GB/T 4334.3—2008 《不锈钢 65% 硝酸

腐蚀实验方法》选择母材和焊缝各 2 块。试件 1 和试件 2 为母材,试件 3 和试件 4 为焊缝。

2) 用分析天平称出 4 块材料的质量  $W_1$ ,用千分尺测出其尺寸并计算出腐蚀面积  $S$ 。

3) 分别放入 4 个装有 400 mL 浓度为 65% 硝酸的锥形圆底烧瓶中,放入水域箱中加热并保持沸腾,保温 48 h。称其质量  $W_2$  按式 (1) 计算腐蚀速率:

$$V = (W_1 - W_2) / (S \cdot t) \quad (1)$$

式中:  $V$  为腐蚀速率,  $g / (mm^2 \cdot h)$ ;  $W_1$  为试验前试样重量  $g$ ;  $W_2$  为试验后试样重量  $g$ ;  $S$  为试样腐蚀面积,  $mm^2$ ;  $t$  为腐蚀时间  $h$ 。

4) 每隔 12 h 测量 1 次试件质量以及表面硬度,并且用显微镜观察试样表面显微组织。

2.2.2 试验结果及分析

试验完成后,将所测数据带入式 (1) 计算腐蚀速率结果见表 2。

表 2 腐蚀速率计算结果

Table 2 Calculation results of corrosion rate

试样编号	腐蚀速率 / ( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	
	测定值	平均值
母材	试件 1	0.32
	试件 2	0.31
焊缝	试件 3	0.81
	试件 4	0.83
		0.820

从表 2 可知母材和焊接处的腐蚀速率分别为 0.315  $g / (m^2 \cdot h^1)$ 。在 65% 沸腾的硝酸溶液中,腐蚀率不大于 0.6  $g / (m^2 \cdot h^1)$  的材料可以用来装硝酸溶液<sup>[6]</sup>,因此,母材能达到要求,而焊接处达不到要求。所以,船厂制造用来装硝酸溶液的化学船,焊接部位必须每间隔一段时间进行一次检测,防止因焊接腐蚀失效而引起的灾难。

图 3 为 2205 DSS 焊接结构在沸腾的硝酸溶液中腐蚀后表面硬度变化情况。

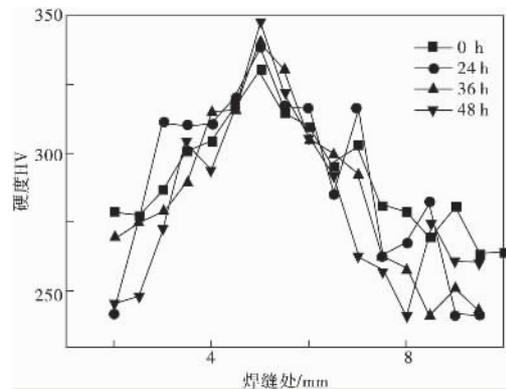


图 3 腐蚀后硬度变化

Fig. 3 Hardness change after corrosion

从图 3 中可以看出焊缝的融合区硬度变高,而热影响区变低。这是由于加工硬化和电化学腐蚀使 Cr 元素富集到焊缝从而引起焊缝处硬度增加,同时

热影响区热处理后奥氏体相和铁素体相分布不均匀,腐蚀影响了其表面硬度。热影响区由于热处理使Cr原子与C原子结合生成了CrC,从而导致表面硬度降低<sup>[9-10]</sup>。

2.3 盐酸腐蚀试验

2.3.1 试验方法

1) 在上述标准焊接材料的熔合区、热影响区及母材中,各取12个10 mm × 10 mm × 10 mm的立方体,并将腐蚀表面以外的面用环氧树脂密封好。测量出腐蚀面的表面积S和重量W<sub>1</sub>待用。

2) 取36根试管、4个恒温箱,每个恒温箱中装入9根试管,试管中分别装入10%、20%、30%盐酸

并编号。

3) 试验时间为72 h,每隔24 h检测一次。通过对比腐蚀前后质量变化,按式(1)计算出腐蚀速率。

4) 根据试剂浓度、腐蚀时间和温度,建立新的腐蚀速率数学模型。

2.3.2 盐酸中腐蚀试验结果

每隔24 h测一次试件质量W<sub>2</sub>,根据试验前测得的试验数据带入式(1)。分别计算出母材、热影区、焊缝在不同温度、不同浓度、不同时间下材料的腐蚀速率。计算结果见表3。

表3 材料各区在不同环境的盐酸中的腐蚀速率

Table 3 Corrosion rate of different districts of weld structures in different environment

/(mg · mm<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>)

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
腐蚀时间 t/h	24	48	72	24	48	72	24	48	72
盐酸浓度 W/%	10	10	10	20	20	20	30	30	30
环境温度 T/°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20
V <sub>母材</sub>	0.004 1	0.003 1	0.005 5	0.005 9	0.004 2	0.005 0	0.004 0	0.004 0	0.002 7
V <sub>热影响区</sub>	0.002 9	0.003 0	0.001 2	0.030 8	0.004 3	0.003 5	0.004 1	0.004 7	0.002 4
V <sub>焊缝</sub>	0.003 2	0.003 4	0.001 2	0.005 2	0.004 4	0.007 5	0.006 5	0.006 2	0.006 5
试验编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
腐蚀时间 t/h	24	48	72	24	48	72	24	48	72
盐酸浓度 W/%	10	10	10	20	20	20	30	30	30
环境温度 T/°C	40	40	40	40	40	40	40	40	40
V <sub>母材</sub>	0.140 0	0.158 0	0.082 0	0.118 5	0.175 0	0.108 0	0.161 0	0.228 0	0.156 0
V <sub>热影响区</sub>	0.120 5	0.153 7	0.086 4	0.090 0	0.138 4	0.114 9	0.205 3	0.203 6	0.134 1
V <sub>焊缝</sub>	0.178 0	0.220 0	0.114 0	0.152 0	0.183 0	0.143 0	0.215 0	0.260 0	0.208 0
试验编号	19	20	21	22	23	24	25	26	27
腐蚀时间 t/h	24	48	72	24	48	72	24	48	72
盐酸浓度 W/%	10	10	10	20	20	20	30	30	30
环境温度 T/°C	60	60	60	60	60	60	60	60	60
V <sub>母材</sub>	0.157 8	0.238 6	0.085 7	0.240 8	0.277 5	0.212 2	0.281 6	0.345 8	0.188 8
V <sub>热影响区</sub>	0.094 8	0.257 8	0.065 9	0.188 9	0.226 1	0.192 5	0.233 1	0.365 4	0.159 0
V <sub>焊缝</sub>	0.207 5	0.312 5	0.148 4	0.276 8	0.310 4	0.220 7	0.325 4	0.480 1	0.204 5
试验编号	28	29	30	31	32	33	34	35	36
腐蚀时间 t/h	24	48	72	24	48	72	24	48	72
盐酸浓度 W/%	10	10	10	20	20	20	30	30	30
环境温度 T/°C	80	80	80	80	80	80	80	80	80
V <sub>母材</sub>	0.274 7	0.326 1	0.177 2	0.408 0	0.359 6	0.202 2	0.480 88	0.438 0	0.268 2
V <sub>热影响区</sub>	0.245 5	0.349 4	0.163 9	0.315 0	0.335 0	0.259 1	0.400 4	0.424 3	0.202 3
V <sub>焊缝</sub>	0.269 9	0.498 7	0.140 7	0.464 7	0.447 0	0.389 7	0.625 6	0.526 7	0.278 2

3 腐蚀速率的数学模型及分析

根据表3,母材、焊缝、热影响区的腐蚀速率变化趋势是一致的。这说明腐蚀速率V与温度T、腐蚀时间t以及盐酸浓度W存在某种数学关系,经研究发现腐蚀速率V与温度T成指数关系,腐蚀速率V与腐蚀时间t成周期变化,腐蚀速率V与盐酸浓度w成二次关系。运用ORIGIN软件对表3数据进行非线性数学模型模拟,采用单参数变化的方法,确定该参数与腐蚀速率之间的最佳拟合模型:

$$V = a(T + b)^c \cdot \sin(dt + e) \cdot (W + f)^2$$

该数学模型对曲线拟合精度可根据模型拟合值V<sub>i</sub><sup>-</sup>与实测值V<sub>i</sub>的接近程度来衡量<sup>[11]</sup>。定义曲线回归拟合精度指标相关系数R<sub>NL</sub>为:

$$R_{NL} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (V_i - V_i^-)^2}{\sum V_i^2}}$$

R<sub>NL</sub>把统计学中常用RSS参差平方和与相对误差有机地结合在了一起,R<sub>NL</sub>越接近1,表明数学模型对曲线地拟合精度越好。曲线拟合精度见表4,由

表可见建立的模型能够准确的反映盐酸溶液的温度、浓度和腐蚀时间对腐蚀速率的影响。

表4 数学模型拟合精度

Table 4 Fitting results of mathematical model

模型	母材	热影响区	焊缝
拟合精度 $R_{NL}$	0.959 9	0.919 7	0.907 7

根据 ORIGIN 软件非线性回归分析得到如下结果:

## 1) 母材

$$V = -0.019(T - 19.7)^{0.777} \times \sin(1.018t - 0.427) \times (W + 0.726)^2$$

## 2) 热影响区

$$V = -0.016(T - 19.6)^{0.752} \times \sin(1.013t - 0.075) \times (W + 0.726)^2$$

## 3) 焊缝

$$V = -0.021(T - 19.77)^{0.772} \times \sin(1.015t - 0.26) \times (W + 0.81)^2$$

$$T \in (20, 80), t \in (0, 72), W \in (0.1, 0.3)$$

从数学模型可以看出,温度对腐蚀速率的影响最大,其次是盐酸溶液的浓度,而腐蚀时间对其影响不明显。在同一浓度的盐酸溶液中,腐蚀开始的第一天,焊缝腐蚀速率是最大的,母材次之,而热影响区的腐蚀速率是最小的。这是由于在焊接过程中,焊缝的融合区是富含合金元素的区域,热影响区在热处理过程中该区域的 Cr 元素与 C 元素结合生成了 CrC,从而发生贫铬,热影响区含合金元素相对减少,最终导致腐蚀速率偏低。腐蚀发生到第2天和第3天,焊缝腐蚀速率最大,热影响区和母材的腐蚀速率相同。这是由于热影响区在热处理时是有一定深度的,当腐蚀到一定深度后热影响区的组织与母材差不多,所以腐蚀速率趋于相等<sup>[12-13]</sup>。

本模型能够准确表明 2205 双相不锈钢在盐酸溶液中的腐蚀速率的变化情况。与传统的腐蚀速率模型(1)相比,本模型能良好的反映腐蚀环境因素与腐蚀速率之间的关系。

## 4 结论

1) 在硝酸溶液中焊缝的耐腐蚀性能远不如母材,所以有焊缝的化学船不能用来装硝酸药品。

2) 在硝酸溶液腐蚀过程中母材硬度变化很小,焊缝腐蚀后硬度明显变大,热影响区硬度变小。

3) 2205 双相不锈钢在盐酸中腐蚀速率由快到慢依次是焊缝 > 母材 > 热影响区。

4) 建立了 2205 双相不锈钢在盐酸中腐蚀速率与温度、时间、盐酸浓度之间的数学模型。该模型在  $T \in (20, 80)$ ,  $t \in (0, 72)$ ,  $W \in (0.1, 0.3)$  的条件下能良好的预测瞬时腐蚀速率。

5) 对 2205 双相不锈钢在盐酸中腐蚀速率的影

响程度由大到小排序为温度 > 浓度 > 腐蚀时间。

## 参考文献(References):

- [1] 张忠和. 2205 不锈钢的点腐蚀试验的研究[J]. 机械制造与自动化, 2004, 33(4): 57-58.  
Zhang Zhonghuo. The test of dot taint for 2205 stainless steel [J]. Machine Building & Automation, 2004, 33(4): 57-58.
- [2] 王智祥, 张鑫. 2205 双相不锈钢焊接结构疲劳裂纹扩展速率研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(4): 880-882.  
Wang Zhixiang, Zhang Xin. 2205 duplex stainless steel welded structure fatigue crack growth rate [J]. Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(4): 880-882.
- [3] 韩志诚, 王少刚, 徐风林, 等. 2205 双相不锈钢焊接接头的耐蚀性能[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2008, 25(3): 1-3, 10.  
Han Zhicheng, Wang Shaogang, Xu Fenglin, et al. Study on corrosion resistance properties of 2205 duplex stainless steel welded joints [J]. Petrochemical Corrosion & Protection, 2008, 25(3): 1-3, 10.
- [4] 周立忠, 韩志诚, 徐风林. 2205 双相不锈钢焊接工艺研究[J]. 机械工人: 热加工, 2007(12): 37-39.  
Zhou Lizhong, Han Zhicheng, Xu Fenglin. Investigation of welding procedure on duplex stainless steel 2205 [J]. Machinist Metal Forming, 2007(12): 37-39.
- [5] 杨晔晖, 关凯书. 2205 双相不锈钢焊接接头裂纹失效机理分析[J]. 压力容器, 2007, 24(12): 26-28.  
Yang Yehui, Guan Kaishu. Failure mechanism analysis on the cracks of 2205 duplex stainless steel weld [J]. Pressure Vessel Technology, 2007, 24(12): 26-28.
- [6] 昌敬源, 石巨岩, 谢贵生, 等. 焊接工艺对 2205 双相不锈钢焊接接头组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(9): 40-43.  
Chang Jingyuan, Shi Juyuan, Xie Guisheng, et al. Effect of welding process on microstructure and properties of 2205 duplex stainless steel welded joint [J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(9): 40-43.
- [7] 刘佐嘉. 316L 与 2205 不锈钢的腐蚀行为研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(2): 149-153, 160.  
Liu Zuojia. Research status of corrosion behavior of 316 LSS and 2205DSS [J]. Corrosion & Protection, 2010, 31(2): 149-153, 160.
- [8] GB/T 4334—2008 金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
GB/T 4334—2008 Metal and Alloy Corrosion of Stainless to Intergranular Corrosion Test Method [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [9] 李健, 王玉山. 不同焊接工艺对双相钢(SAF2205)金相组织的影响[J]. 压力容器, 2004, 21(2): 7-11, 31.  
Li Jian, Wang Yusan. Effect on metallographic structure of duplex stainless steel (SAF2205) by different welding procedure [J]. Pressure Vessel Technology, 2004, 21(2): 7-11, 31.
- [10] 李为卫, 刘亚旭, 赵新伟, 等. 线能量对 2205 双相不锈钢焊接接头耐腐蚀性和韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2005(5): 23-24.  
Li Weiwei, Liu Yaxu, Zhao Xinwei, et al. Effect of heat input energy on corrosion and toughness of 2205 duplex stainless steel welding joint [J]. Hot Working Technology, 2005(5): 23-24.
- [11] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计,

2002, 19(1): 9-11.

Zhang Shiqiang. Approach on the fitting of optimization index of curve regression [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2002, 19(1): 9-11.

- [12] 熊庆人, 霍春勇, 李为卫, 等. 2205 双相不锈钢焊接热影响区的组织转变行为[J]. 焊接学报, 2007, 28(11): 53-57.  
Xiong Qingren, Huo Chunyong, Li Weiwei, et al. Transition be-

havior of welding HAZ microstructure of 2205 duplex stainless steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(11): 53-57.

- [13] 王荣. 金属材料的腐蚀疲劳[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001: 5-26.  
Wang Rong. The Corrosion Fatigue of Metal Materials [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001: 5-26

(上接第 202 页)

得,且沿深度向下逐渐转移到轮隙中心位置 2 前侧;剪应力峰值在外侧轮底中心后侧位置取得,且沿深度向下逐渐靠近并转移到外侧轮底中心前侧。

参考文献(References):

- [1] 徐洁元, 谢华昌. 我国沥青路面结构现状特点分析[J]. 湖南交通科技, 2007, 33(2): 27-49.  
Xu Jieyuan, Xie Huachang. Analysis of asphalt pavement structure present situation [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2007, 33(2): 27-49.
- [2] 韦金城, 王林, 艾贻忠. 不同结构组合沥青路面设计及力学响应分析[J]. 中外公路, 2006, 26(2): 75-78.  
Wei Jincheng, Wang Lin, Yi Yizhong. Analysis of dynamics response and design of different combination of asphalt pavement structure [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(2): 75-78.
- [3] 吕涛, 田东军. 重载交通对沥青路面早期破坏的力学分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(27): 151-152.  
Lv Tao, Tian Dongjun. On dynamic analysis of early damage of heavy-load traffic on asphalt pavement [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(27): 151-152.
- [4] 姚占勇, 商庆森, 赵之仲, 等. 界面条件对半刚性沥青路面结构应力分布的影响[J]. 山东大学学报: 工学版, 2007, 27(3): 93-99.  
Yao Zhanyong, Shang Qingsen, Zhao Zhizhong, et al. The influ-

ence analysis of the semi-rigid asphalt pavement configuration stress and distortion by interface conditions [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 27(3): 93-99.

- [5] 殷立文, 丁静声. 荷载接触面形状对沥青路面力学响应的影响[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 544-547.  
Yin Liwen, Ding Jingsheng. Effect of varied tyre-pavement interface on the mechanical behavior of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(4): 544-547.
- [6] 孙志林, 黄晓明. 基于路基顶面压应变的沥青路面轴载换算方法[J]. 公路交通科技, 2007, 24(7): 28-30.  
Sun Zhilin, Huang Xiaoming. Conversion method of axle load for asphalt pavement based on compression strain on top of subgrade [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(7): 28-30.
- [7] 李婷婷. 不同轴载和行车状态下永久性沥青路面的力学响应规律[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 662-666.  
Li Tingting. Dynamics response characteristics of long-life asphalt pavement under different axial load and movement state [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5): 662-666.
- [8] 李雪莲, 陈宇亮, 张起森. 高速公路上坡路段半刚性沥青路面的三维有限元分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8): 23-26.  
Li Xuelian, Chen Yuliang, Zhang Qisen. Three-dimensional finite element analysis of semi-rigid asphalt pavement on highway uphill road [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8): 23-26.

(上接第 320 页)

- [5] 计明军, 刘丰硕, 李郭记, 等. 基于装卸协同作业的集装箱码头集卡调度及配置优化[J]. 大连海事大学学报: 自然科学版, 2010, 36(1): 47-50.  
Ji Mingjun, Liu Fengshuo, Li Guoji, et al. Truck routing and allocation optimization based on loading and unloading simultaneous operations in a container terminal [J]. Journal of Dalian Maritime University: Natural Science, 2010, 36(1): 47-50.
- [6] 刘丰硕. 基于装卸协调作业的集装箱码头集卡路径优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.  
Liu Fengshuo. The Research on Container Truck Routing in Container Terminal Based on Coordinating the Loading and Unloading Operations [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.
- [7] 康志敏. 集装箱自动化码头 AGV 路径优化和调度研究[D]. 武

汉: 武汉理工大学, 2011.

- Kang Zhimin. The Research of Routing Optimization and Scheduling for AGV on Automated Container Terminals [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [8] Huisman D, Wagelmans A P M. A solution approach for dynamic vehicle and crew scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 11: 1-20.
- [9] Lee Derhorng, Cao Jinxin, Shi Qixin, et al. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals [J]. Tsinghua Science and Technology, 2010, 15(4): 467-474.
- [10] Lee Derhorng, Cao Jinxin, Shi Qixin, et al. A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems [J]. Transportation Research: Part E, 2009, 45: 810-820.