

氢腐蚀分层对换热器筒体承载能力的影响

何家胜¹,李 超¹,朱晓明²,陈 伟²,路远明²,杨 峰²

(1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 中国石油化工股份有限公司武汉分公司,湖北 武汉 430082)

摘 要:为了解换热器筒体发生氢腐蚀分层后,其筒体局部材料的性能发生的变化及对换热器运行中的承载能力带来的影响,采用化学成分分析、硬度测试、拉伸试验、夏比 V 口冲击韧性试验等方法对换热器筒体材料的性能进行了分析;运用有限元分析方法计算了筒体分层处的应力分布,并探讨了裂纹尖端应力强度因子的变化情况。研究表明:材料化学成分中除 Mn 元素的含量偏低外,其它元素含量符合国家标准;材料的硬度符合要求,材料的强度极限降低,屈服比上升,韧性明显降低。氢腐蚀分层使换热器筒体材料局部劣化,破坏了材料的均匀性和连续性,破坏了筒体的薄膜应力状态,产生了较大的局部应力,使换热器筒体承载能力下降。

关键词:材料性能;有限元;应力强度因子

中图分类号:TQ051.5

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.02.016

0 引 言

某石化公司检修时,发现催化裂化工段中换热器的筒体发生氢腐蚀分层现象(筒体材料为 16MnR,壳层介质中含有湿硫化氢)。在筒体内表面上发现有多处存在呈放射状的交叉裂纹,并在交叉点中间有轻微鼓起现象,如图 1 所示。在该部位取样并沿厚度方向切割后,发现筒体在沿厚度方向中面处发生了严重的分层,如图 2 所示。前期已经对该氢腐蚀分层的椭圆裂纹进行了应力强度因子变化规律的计算^[1]。本文通过化学成分分析、硬度测试、拉伸试验以及夏比 V 口冲击韧性试验,对腐蚀分层后的筒体材料进行综合分析,并对分层的筒体进行有限元计算,讨论氢腐蚀分层对换热器筒体承载能力的影响。

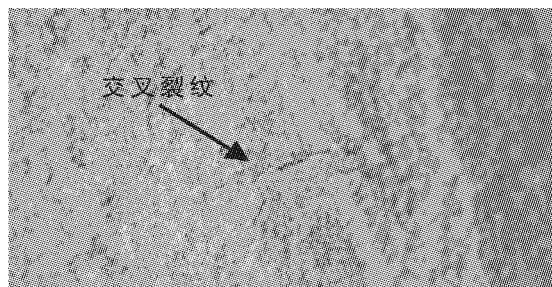


图 1 换热器筒体内表面交叉裂纹

Fig. 1 The crack developed on the inner on surface of heat exchanger

筒体外侧



筒体内侧

图 2 筒体分层处沿厚度方向的剖面图

Fig. 2 The section of inner surface crack in thickness—direction

1 材料性能分析

1.1 化学成分分析

对氢腐蚀分层区域取样进行化学成分分析,检测结果如表 1 所示。根据 GB6654-1996《压力容器用钢板》^[2]对 16MnR 钢板成分的要求,从表 1 可知,在筒体分层处的 Si、P、C、S 含量均在正常范围之内,但 Mn 元素的含量严重的低于国标中的规定。

表 1 试样成分检测结果

Table 1 Test results of chemical constituents

	(mass fraction) %				
	各成分的质量分数				
	Si	Mn	P	C	S
试样	0.19	0.65	0.011	0.126	0.0051
GB6654-1996/	0.20~	1.20~	≤0.035	≤0.20	≤0.030
(16MnR 钢板)	1.60	1.60			

收稿日期:2012-12-26

作者简介:何家胜(1958-),男,湖北武汉人,教授,硕士,研究方向:压力容器结构强度与失效分析研究。

1.2 硬度测试

对筒体分层部位线切割取样,如图 3 所示,将试样编号为 1、2、3,其中试样 1、试样 2 为圆柱形,尺寸为 $\phi 20\times 12\text{ mm}$. 试样 3 为矩形,尺寸为 $20\times 20\times 12\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚),测试使用 HB3000B 型布氏硬度测试仪,选用直径为 2.5 mm 的压头(针对 16MnR 钢材). 试样 1、试样 2 及试样 3 的测试点分别如图 4 和图 5 所示. 其中,试样 3 的侧面 1 与侧面 2 为两个相邻面,在侧面 2 的中间位置存在一条肉眼可见的裂纹. 测试结果如表 2~3 所示.

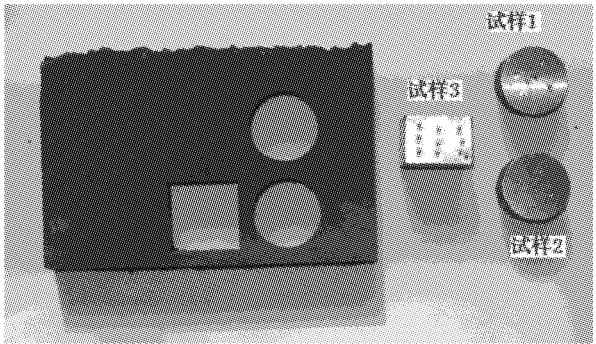


图 3 切割取样示意图
Fig. 3 Diagram of Curing test specimens

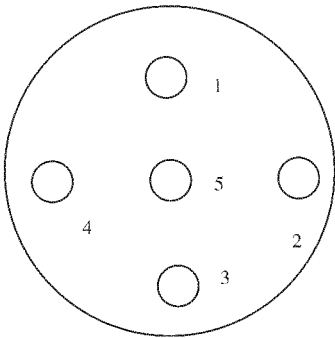


图 4 试样 1 与试样 2 上测试点示意图
Fig. 4 Diagram of test points on test specimens 1 and 2

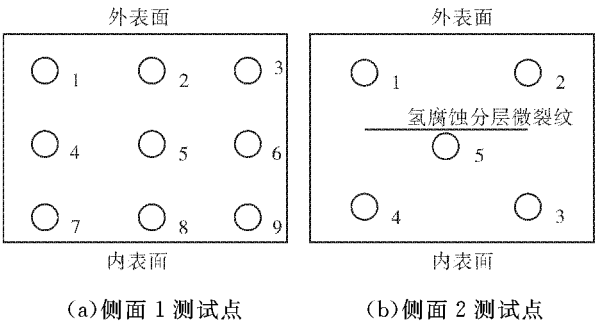


图 5 试样 3 上测试点位置示意图
Fig. 5 Diagram of test points on test specimens 3

表 2 测试点的布氏硬度值					
Table 2 Brinell hardness of test points					
试样	测试点				
	1	2	3	4	5
试样 1	146	144	156	149	152
试样 2	145	146	153	165	150
试样 3 侧面 2	149	150	152	166	161

表 3 试样 3 侧面 1 上的测试点布氏硬度									
Table 3 Brinell hardness of test points on side 3 on test specimens 3									
	测试点								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
硬度	156	144	160	148	160	149	158	158	156

根据 GB/T 231. 2-2002《金属布氏硬度试验》^[3]中要求 16MnR 材料的布氏硬度应在 120~180 HB 之间. 从表 2~3 可知,符合 GB/T 231. 2-2002 中对 16MnR 材料的硬度要求.

1.3 拉伸试验

根据 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》^[4]对分层部位进行线切割取 3 个试样进行试验测试材料的屈服强度 σ_s 、拉伸强度 σ_b 力学性能指标. 试样尺寸如图 6 所示. 根据所得数据绘制出试样的力-位移曲线图,如图 7 所示.

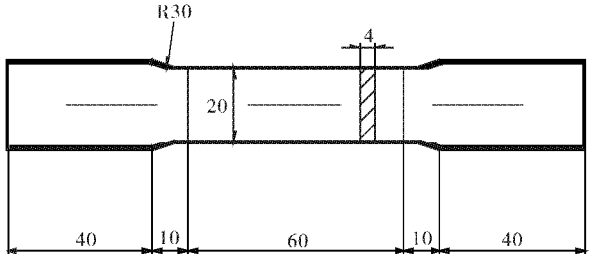


图 6 标准拉伸试样示意图
Fig. 6 Diagram of tensile test pieces

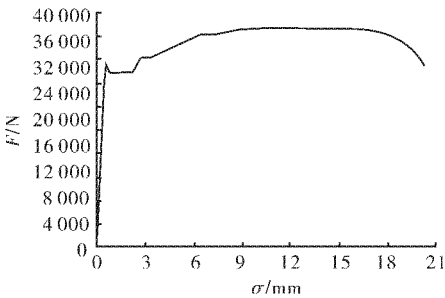


图 7 试样的力-位移曲线图
Fig. 7 Force-Displacement Curve of Specimens

试验中测得的数据是材料的 F_s (屈服拉力) 和 F_b (最大拉力), 最终材料的 σ_s 和 σ_b 通过式(1)确定.

$$\begin{cases} \sigma_s = \frac{F_s}{A} \\ \sigma_b = \frac{F_b}{A} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, A 为拉伸试样标定部位的横截面积.

试样拉断后, 从曲线可得试样的 $F_{s上}$ (上屈服极限拉力)、 $F_{s下}$ (下屈服极限拉力) 和 F_b , 由于下屈服极限拉应力较为稳定且保险, 因此取 $F_{s下}$ 作为材料屈服拉应力 σ_s 的指标, 如表 4 所示. 计算得出的屈服强度 σ_s 和拉伸强度 σ_b , 如表 5 所示.

表 4 材料的 $F_{s下}$ 和 F_b

Table 4 $F_{s下}$ and F_b of specimens kN

	试样 1	试样 2	试样 3
$F_{s下}$	29.12	23.14	28.91
F_b	37.74	31.07	36.85

表 5 试样的 σ_s 和 σ_b

Table 5 σ_s and σ_b of specimens MPa

	试样 1	试样 2	试样 3
σ_s	364	289	361
σ_b	471	388	460

16MnR 钢料^[5]屈服强度 σ_s 为 355 MPa, 拉伸强度 σ_b 为 510 MPa. 从表 3 中可以看出, 试样 1 与试样 3 的 σ_s 略有升高, σ_b 有所降低, 屈服比增大, 而试样 2 的 σ_s 和 σ_b 则明显降低. 试样 2 的中间位置上有一条沿长度方向扩展的裂纹, 且沿厚度方向有轻微的分层, 说明氢腐蚀导致了该试样测试结果的明显降低. 对比试样 1 与试样 3 说明氢腐蚀分层致使换热器筒体材料的力学性能下降, 材质性能明显劣化.

1.4 夏比冲击韧性试验

根据 GB/T 229-2007^[6] 中的要求对筒体分层部位取样, 其中一个未使用过的 16MnR 钢板对比试样. 试样及尺寸如图 8 所示, 在长度方向中间开 2 mm 深的 V 型缺口, 缺口张开角度为 45°, 缺口所在面的表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$, 其它面的表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$.

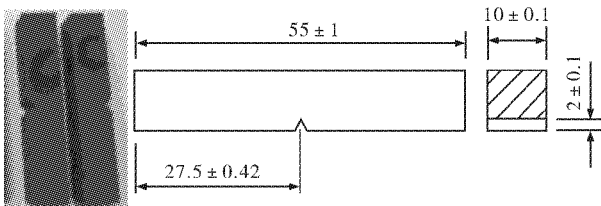


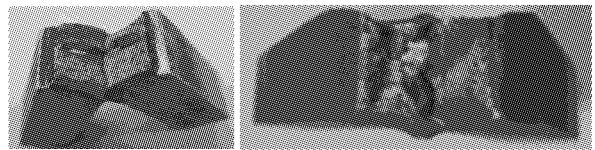
图 8 夏比冲击试验试样及尺寸

Fig. 8 Specimens and its dimensions of Charpy impact test

试验后的试样形貌如图 9 所示. 图 9(a) 中断口平齐, 断面与长度方向垂直, 断口状态为结晶状, 呈现出明显的脆性断裂特征; 图 9(b) 中断口不平齐, 断口呈锯齿状, 是典型的韧性断裂. 测得试样的冲击功 A_K 值和计算得出的冲击韧性 α_K 值如表 6 所示.

$$\alpha_K = \frac{A_K}{F} \quad (2)$$

通过公式(2)将冲击功转换成冲击韧性, 其中 F 为 V 型缺口处的横截面积.



(a) 筒体分层处试样 (b) 对比试样

图 9 试样断口形貌

Fig. 9 Fracture mode of specimens

表 6 试样冲击功 A_K 值和冲击韧性 α_K 值

Table 6 Impact energy Values A_K and impact toughness α_K of specimens

性能	试样	
	筒体试样	对比试样
冲击功 A_K/J	80.1	185.5
冲击韧性 $\alpha_K/\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	100.13	231.88

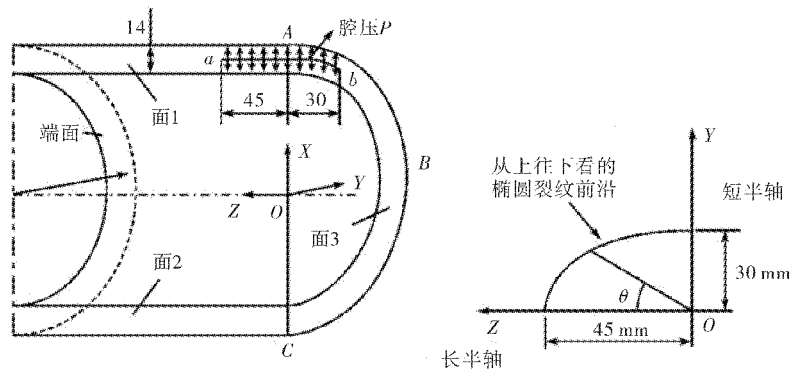
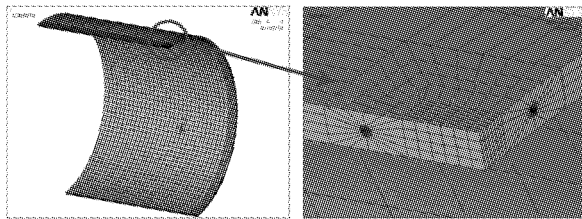
从表 6 中可以看出, 筒体试样的冲击韧性 α_K 值不足对比试样的 $\frac{1}{2}$. 说明筒体在发生氢腐蚀分层之后, 其韧性明显降低, 对裂纹扩展的抵抗力严重下降, 易引发脆性断裂^[7-8].

2 筒体分层处有限元分析

氢腐蚀使换热器筒体局部出现分层现象, 并产生屈服变形 (见图 2). 这说明分层处腔压很大, 到底多大的腔压能使分层边缘发生屈服以及此时分层处应力的分布情况, 将通过有限元方法进一步计算与讨论.

2.1 分层筒体有限元模型的建立

由于筒体氢腐蚀分层产生的曲面椭圆裂纹的几何尺寸和载荷分布在空间上对称, 所以取筒体及分层区域的 $\frac{1}{4}$ 建立几何模型, 筒体外径为 1 200 mm, 长度为 2 000 mm, 其它相关尺寸如图 10 所示, 先建立三维椭圆裂纹尖端^[8], 然后对几何模型进行单元网格划分^[9], 建好后的有限元分析模型如图 11 所示.

图10 筒体 $\frac{1}{4}$ 模型几何尺寸示意图Fig. 10 $\frac{1}{4}$ model diagram of heat exchanger shell图11 换热器筒体 $\frac{1}{4}$ 对称模型图Fig. 11 $\frac{1}{4}$ finite element diagram of heat exchanger shell

2.2 筒体分层处应力计算及分析

对有限元模型施加边界条件,坐标方向如图10所示,位移边界条件:面1和面2的Y向位移为零,面3的Z向位移为零;力边界条件:筒体内表面施加工作内压1.6 MPa,筒体端面施加24 MPa拉应力,在分层腔体的上下表面分别施加 P 为8 MPa、8.5 MPa、9 MPa、9.5 MPa、10 MPa和10.5 MPa的腔压.计算6种腔压情况下筒体的应力分布情况.图12为分层处在腔压为9.68 MPa时的应力分布情况.

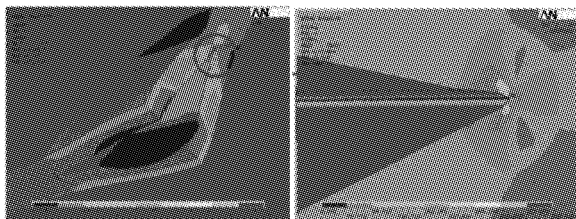


图12 分层处的应力分布情况

Fig. 12 Stress distributions of layered region

从图12中的应力分布云情况可以看出,在分层边缘有较大的应力集中,分层区域应力沿厚度分布不均,最大应力位于分层边缘线与椭圆裂纹短半轴的交汇处(图12圆圈标记处),6种腔压作

用下的最大应力点都在这个位置.绘制分层边缘最大应力随腔压变化曲线,如图13所示,最大应力随腔压的增大而近似线性增大.当腔压 P 为9.68 MPa时,分层边缘最大应力为355 MPa,达到材料的屈服极限,即腐蚀分层边缘达到屈服时的临界腔压 P 为9.68 MPa.该换热器筒体在没有出现腐蚀分层的情况下,筒体的环向薄膜应力($\sigma_\theta = \frac{PD}{2\delta}$),仅为68.7 MPa,整个筒体上应力沿厚度方向均匀分布,而由于腐蚀分层的出现,导致筒体局部出现高应力区,破坏了筒体的薄膜应力状态.

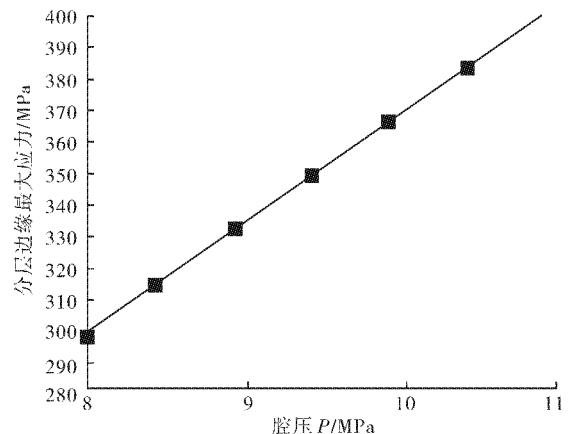


图13 分层边缘应力随腔压变化曲线

Fig. 13 Curve for edge stress as the pressure increased

2.3 应力强度因子的确定

根据文献[1]中分层边缘应力强度因子变化曲线(见图14),通过有限元方法进一步计算完善了腔压 P 为5 MPa、10 MPa、20 MPa时的应力强度因子,得到了其变化曲线(见图15),得出了应力强度因子最大点为 $\theta = \frac{9\pi}{24}$ 处.通过对分层筒体的有限元计算,已经得到了分层处应力达到屈服极限

355 MPa 时的临界腔压 P 为 9.68 MPa, 则此时的应力强度因子便可由图 15 的曲线得出, 约为 $14.27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

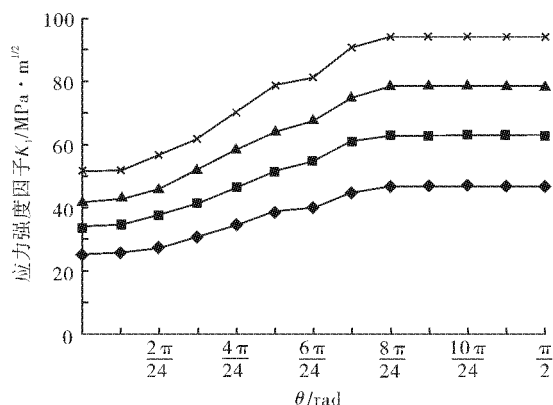


图 14 文献 1 中应力强度因子变化曲线

Fig. 14 The variation curve of stress intensity factor in document [1]

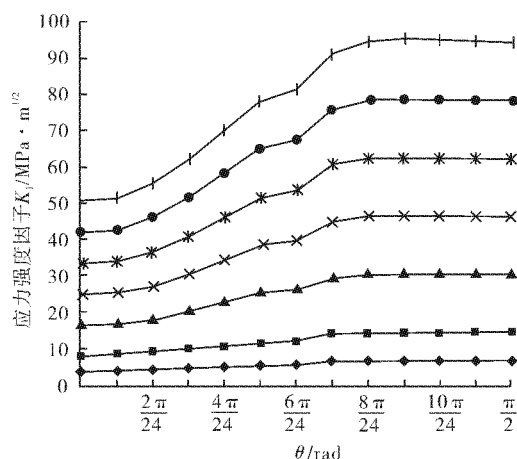


图 15 应力强度因子变化曲线

Fig. 15 The variation curve of stress intensity factor

注: ◆ 5 MPa; ■ 10 MPa; ▲ 20 MPa; × 30 MPa;
* 40 MPa; ● 50 MPa; + 60 MPa

在已知腔压的情况下, 通过图 13 中的曲线, 可以快速得出最大的应力强度因子的值, 对此时裂纹是否扩展能快速地做出定量的判断, 对发生腐蚀分层换热器筒体的安全评定具有参考和指导意义。

3 结 语

氢腐蚀分层使筒体材料局部劣化, 破坏了材料的均匀性和连续性, 材料的强度极限降低, 屈服比上升, 材料韧性下降, 抵抗裂纹扩展能力下降。材料变形及应力分析表明, 分层处应力状态为非薄膜应力状态, 有较大的局部应力产生; 并有进一步扩大分层的趋势。以上情况说明氢腐蚀分层使换热器筒体的承载能力下降。

致谢

在论文前期调研取样过程中, 武汉石化公司领导和技术人员给予的大力支持和帮助; 实验检测中, 武汉工程大学的石大力和刘春晖两位老师的辛勤指导与协助; 论文后期的建模计算中, 谢飞和魏卫等同学的积极参与和付出等, 在此一并表示由衷的感谢和敬意。

参考文献:

- [1] 何家胜, 谢飞, 朱晓明. 圆柱壳内表面椭圆裂纹应力强度因子数值计算[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(11): 70-73.
- [2] GB6654-1996. 压力容器用钢板[S].
- [3] GB/T 231.2-2002. 金属布氏硬度试验[S].
- [4] GB/T 228-2002. 金属材料室温拉伸试验方法[S].
- [5] 乔松. 16MnR 裂纹缺陷分析[J]. 宽厚板, 2007, 13(5): 24-26.
- [6] 宰绍峰, 董强, 刘明. GB/T 229-2007 关于夏比 V 型缺口冲击试样几何参数的规定及加工方法[J]. 理化检验, 2010, 46(12): 765-770.
- [7] 后宗保. 16MnR 钢板性能不合格原因分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2005, 41(1): 19-20, 53.
- [8] 何家胜, 魏卫, 朱晓明, 等. 含裂纹法兰接管的应力强度因子数值计算[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(12): 49-52.
- [9] 张恒星. 液化器异形偏心锥有限元应力分析[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(8): 75-78.

Influence of bearing capacity of heat exchanger shell caused by hydrogen corrosion delaminating crack

HE jia-sheng¹, LI chao¹, ZHU xiao-ming², CHEN wei², LU yuan-ming², YANG feng²

(1. School Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Branch of China Petroleum & Chemical Co., Ltd., Wuhan, 430082, China)

Abstract: To explore the influence of hydrogen corrosion delaminating crack on the mechanical properties and bearing capacity in operation of the layered heat exchanger shell, the material capability of layered heat exchanger shell was analyzed by using chemical constituents analysis, hardness test, tensile tests, Charpy V-notch pendulum impact test. The finite element method was used to calculate the stress distribution of heat exchanger shell and to discuss the stress intensity factors of crack tip. The results show that the Mn element is lower in the chemical constituents, other elements accord with the National Standards; the material hardness meets the requirements, but the toughness declines obviously. The material of heat layered exchanger shell is deteriorated by the hydrogen corrosion, which destroys the continuity and uniformity of the material, decreases the ultimate strength, but increases the yield-strength ratio. The film stress state is destroyed, and material resistance to crack growth decreases. The hydrogen corrosion delaminating crack causes biggish partial stress and makes bearing capacity of the heat exchanger shell decrease.

Key words: material capability; finite element method; stress intensity factor

本文编辑:陈小平



(上接第 73 页)

Improvements of collaborative localization algorithm of multi-robot on target in ROBOCUP

ZHANG Yan-duo^{1,2}, LI Zhe-jing^{1,2}, LU Tong-wei^{1,2}

(1. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan 430074, China)

Abstract: Armed at the accuracy and stability of data processing by density-based spatial clustering of applications with noise algorithm(DBSCAN), an improved DBSCAN clustering algorithm was used to raise the accuracy of multi-robot cooperative localization on platform of the Robot World Cup (ROBOCUP) autonomous robot. The information fusion model of cooperative localization was established by studying the self-positioning and targeting of a single-robot. The distance threshold was introduced in the improved DBSCAN algorithm, by combining the actual condition of less distance of observation, the higher accuracy, the data which might be deleted by DBSCAN was kept by comparing the actual distance to the distance threshold. In this way, the size and accuracy rating of data was improved and the error of observation information and instability of data was reduced. In the experiment, the traditional DBSCAN clustering algorithm and improved DBSCAN clustering algorithm were both used in the data fusion of same observation point on robot platform. The experiment results show that the integration of data is stable by the improved algorithm with the EPS changes; the data fusion is more stable and accurate using improved DBSCAN clustering algorithm, in which the robot distance threshold is used on real ROBOCUP autonomous robot platform.

Key words: autonomous robot; cooperative localization; DBSCAN algorithm; distance thresholds

本文编辑:陈小平