

北方寒冷地区农宅太阳能供暖试验研究

赵金秀¹, 任春立¹, 温翠玲², 李国芝³

(1. 唐山学院 土木工程学院, 河北 唐山 063000;

2. 唐山市第一职业中等专科学校, 河北 唐山 063000;

3. 唐山红阳太阳能有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要:将设计的一套太阳能供暖系统在节能改造后的农宅(试验建筑)中应用,并与燃煤采暖炉供暖的农宅(对比建筑)进行冬季运行测试对比。室内温度和内墙壁温度分析结果显示,在同样的晴、阴天气条件下,试验建筑的室内平均温度都在16.5℃以上,温度波动幅度在3.8℃以下,而对比建筑室内平均温度在14.6~15.4℃,温度波动幅度达到6.6℃以上;试验建筑的内墙壁平均温度为12.9℃,温度波动幅度在1.0℃左右,而对比建筑的内墙壁平均温度为8.5℃,温度波动幅度在5.0℃以上。室内空气PM_{2.5}和CO₂浓度测试结果显示,试验建筑二者均在标准限值范围内,而对比建筑二者都远超出标准限值。整个冬季能耗测试结果显示,试验建筑对比建筑节省电能3390 kW·h,减少CO₂排放量79.4%。因此,北方寒冷地区的农宅采用太阳能供暖其舒适性和节能环保效益都较好。

关键词:农村住宅建筑;太阳能供暖系统;热稳定性;热舒适性;空气质量

中图分类号:TU832.1⁺7 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2020)06-0055-06

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2020.06.012

Experimental Study on Solar Energy Heating for Rural Houses in Northern Cold Regions

ZHAO Jin-xiu¹, REN Chun-li¹, WEN Cui-ling², LI Guo-zhi³

(1. School of Civil Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China;

2. Tangshan No. 1 Technical Secondary School, Tangshan 063000, China;

3. Tangshan Hongyang Solar Energy Co. Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: In this paper, a set of solar energy heating system is designed for the renovated energy-saving rural houses (test building), which is compared with the winter operation of the houses heated by coal heating furnace (comparison building). The temperatures of the outdoor and of interior wall show that: Under the same sunny and cloudy weather conditions, the average indoor temperature is above 16.5℃, with temperature fluctuation range below 3.8℃ for the test buildings, while the respective temperatures are respectively 14.6~15.4℃ and above 6.6℃ for the comparison building; The average temperature of the inte-

基金项目:河北省重点研发计划项目(17274318);河北省建设科技研究计划项目(20190503)

作者简介:赵金秀(1980—),女,河北沧州人,副教授,硕士,主要从事可再生能源应用技术及建筑节能研究。

rior wall is $12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, with fluctuation range about $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the test building, while the respective temperatures are respectively $8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and above $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the comparison building. The concentration test of $\text{PM}_{2.5}$ and CO_2 for indoor air shows that the figures are within the standard limits in the test building, while they are far beyond the standard limits in the comparison building. Through the whole winter energy-consumption test, the results show that the test building has saved $3\ 390\text{ kW}\cdot\text{h}$ electricity and lessened 79.4% of CO_2 emissions compared with the comparison building. Therefore, it is better for rural houses in northern cold regions to apply the solar energy heating because of its advantages in comfort, energy saving and environmental protection.

Key Words: rural house; solar energy heating; thermal stability; thermal comfort; air quality

0 引言

在能源发展的新时代,我国能源行业应贯彻“十九大”报告精神,以能源发展“十三五”规划为指引,构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。自“九五”以来,我国在城镇建筑节能与新能源利用方面已有了成效明显的政策、标准、科研成果及应用体系,但对于农村,由于建筑分散、技术落后、村民节能意识淡薄等问题,其住宅建筑(简称“农宅”)仍存在用能严重浪费和新能源利用明显不足等现象。据有关研究表明,农村建筑能耗约占我国建筑总能耗的 39% ^[1]。目前我国北方地区,农宅多采用效率极低的燃煤采暖炉(俗称“土暖气”)进行冬季取暖,这不仅使室内舒适性不高,而且要消耗大量的煤炭资源,造成矿物资源的紧缺,同时燃煤带来的环境污染物增加,导致农宅室内外的空气质量明显降低。所以北方寒冷地区农宅供暖方式的改造问题是目前面临的重要任务。

我国寒冷地区由于供暖时间较长、供暖能耗偏大,利用太阳能供暖符合我国节能减排、发展低碳经济的目标和要求^[2]。近年来,一些专家学者对太阳能供暖系统在寒冷地区农宅的应用进行了相关研究。张叶等^[3]对太阳能相变蓄热地板辐射供暖系统应用于乌鲁木齐地区办公建筑进行了试验研究,得出此供暖系统在乌鲁木齐地区具有较好的应用价值。李金平等^[4]对西北新农村建筑太阳能主动供暖进行了试验研究,结果表明,天气晴朗的情况下太阳能单独供暖能够满足西北新农村建筑的供暖要求。郑豪

放^[5]通过在青海省建立太阳能炕与太阳能空气集热器复合采暖系统,得出了太阳能主被动复合供暖系统在青海省的实用性强、热舒适性优良的结论。邓杰等^[6]结合北京幕墙式太阳能供暖系统示范工程,对幕墙式太阳能供暖系统进行了热性能测试与分析,结果表明,室外平均气温为 $-7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,太阳能集热系统的平均集热效率约为 27.5% ,补热系统的热泵平均 COP 为 1.554 ;末端风机盘管采用侧面向下送风的气流组织形式时,室内供暖效果较好。

为响应国家节能减排、低碳经济的号召,提高北方寒冷地区农宅室内的舒适性,本文结合太阳能在建筑供暖方面的应用,提出了一套适于北方寒冷地区的太阳能供暖系统,对其在农宅(试验建筑)中的应用情况进行分析,并与燃煤采暖炉供暖的农宅(对比建筑)进行冬季运行测试对比,以此来检验该太阳能系统在农宅建筑中的应用效果。

1 试验建筑概况

试验建筑位于唐山市丰南区碱坨村,地处寒冷的华北地区,该地区太阳辐射年均值为 $4\ 960\sim 5\ 200\text{ MJ}/\text{m}^2$ ^[7],太阳辐射照度较高,阳光富足。碱坨村街道整齐,农宅布局规整,均为带农院的单层建筑。每户农宅建筑面积约 120 m^2 ,建筑高度为 3.2 m ;建筑外墙体结构为砖混结构,主体厚度为 370 mm ,外层为 5 mm 水泥砂浆+ 10 mm 外墙面砖,内层为 15 mm 水泥砂浆,外墙体的综合传热系数约 $2.4\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;窗户多为单层玻璃塑钢窗或木窗,平均传热系数

为 $3.5 \sim 4.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。农宅冬季采暖方式多为“土暖气”。经热负荷计算,该建筑设计热负荷约为 $11\,200 \text{ W}$ 。

将该村相邻的两户农宅作为研究对象,其中一户农宅为试验建筑,对其进行围护结构节能改造:对外墙进行外保温处理,将外墙面砖清除,然后粘贴 50 mm 厚模塑聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)板,外抹 25 mm 水泥砂浆保护层;单层玻璃塑钢门窗更换为 $(5+12+5) \text{ mm}$ 单框双玻塑钢窗。改造后墙体传热系数为 $0.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,门窗的传热系数为 $2.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。经热负荷计算,该试验建筑的设计热负荷约为 $5\,700 \text{ W}$ 。对试验建筑应用太阳能供暖系统进行设计,另一户农宅为对比建筑,仍采用燃煤暖气炉进行供暖。

2 太阳能供暖系统设计

2.1 系统组成

太阳能供暖系统主要由真空管太阳能集热器、太阳能循环泵、储热换热水箱、散热器、供暖循环泵、控制装置等组成。此系统冬季可供暖,其他季节可提供生活热水。冬季时,优先满足供暖要求,供暖系统环路开启,生活热水环路保持关闭状态,并且当太阳能供暖不足时,启动电辅助加热器,考虑到农村室内穿衣舒适状况,电辅助加热器温度启停范围设定为室内空气温度低于 14°C 时,电辅助加热器启动;室内温度高于 16°C 时,电辅助加热器关闭。其他季节,供暖系统环路关闭,生活热水环路开启。太阳能供暖系统工作原理见图 1。

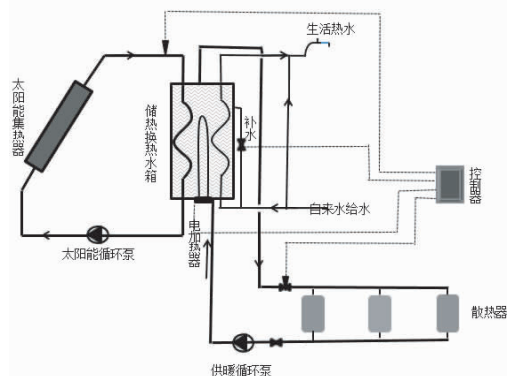


图 1 太阳能供暖系统工作原理图

2.2 系统布置

经设计计算,在试验建筑屋顶敷设真空管太阳能集热器 6 组,每组 50 根集热管,共 300 根集热管,集热器与屋面的敷设倾角为 $10^\circ \sim 12^\circ$ (见图 2)。在屋面一角设置储热换热水箱。为保证系统产生的气体顺利通过水箱并排出,以及热水顺畅流经室内散热器,水箱位置比系统最高点要高出 0.3 m ,设计水箱容积为 0.5 m^3 。



图 2 太阳能集热器屋顶敷设

3 试验测试参数及测试仪器

在冬季供暖期间,测试试验建筑和对建筑的主要房间(卧室)的空气温度、房间内墙壁温度、空气质量、耗电量。测试仪器见表 1。

表 1 测试仪器

仪器名称	型号	备注
热电偶温度传感器	铜—康铜 T 型	安徽天康集团股份有限公司,在冰水混合物下完成校订
数据采集器	安捷伦 34970A	通过 HP Benchlink Data Logger 软件与计算机连接,实现数据采集及分析
空气质量测试仪	博朗通 128S	博朗通医疗科技有限公司,测试 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO_2 浓度
电表	电力测量分析仪表 PW3198	监测太阳能系统耗电量

测试时间从 2015 年 11 月 16 日系统正式运行开始至 2016 年 3 月 15 日系统运行停止。通过布置在试验建筑和对建筑室内和内墙壁

表面的热电偶温度传感器测试室内和内墙壁温度,测试时间间隔为 20 min ;通过布置在试验建筑和对建筑室内主要房间(卧室)的空气质

量测试仪监测室内空气质量,测试时间间隔为 20 min;通过电表测试试验建筑中系统泵和电加热器的耗电量。

4 试验数据及分析

4.1 室内温度和内墙壁温度

对供暖时段的晴天及阴天典型日的测试数据进行分析,分别采集 2015 年 12 月 30 日阴天(室外温度为 $-9\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$)和 2016 年 2 月 23 日晴天(室外温度为 $-11\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)试验建筑 and 对比建筑主要房间(卧室)室内温度和内墙壁温度的测试数据,结果如图 3,图 4,图 5 和图 6 所示。

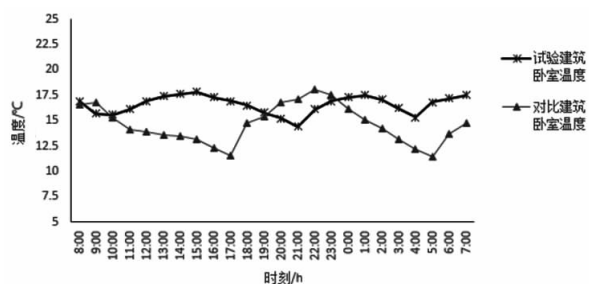


图 3 晴天试验建筑 and 对比建筑主要房间(卧室)的室内温度分布

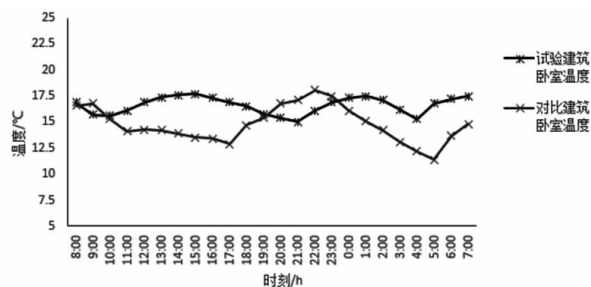


图 4 阴天试验建筑 and 对比建筑主要房间(卧室)的室内温度分布

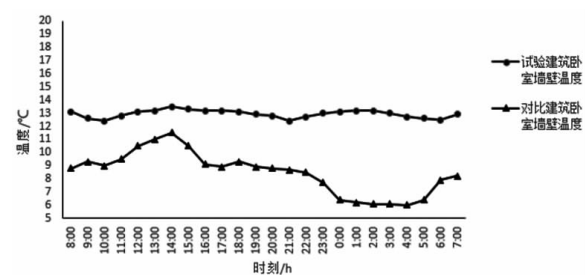


图 5 晴天试验建筑 and 对比建筑主要房间(卧室)的内墙壁温度分布

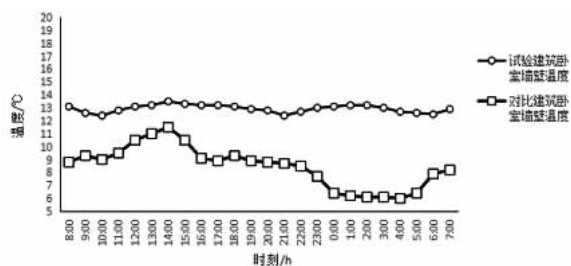


图 6 阴天试验建筑 and 对比建筑主要房间(卧室)的内墙壁温度分布

从图 3 中可以看出,晴天天气下,试验建筑全天室内温度平均为 $16.62\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动幅度比较小;而对比建筑全天室内温度平均为 $15.42\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动幅度相对较大。

从图 4 中可以看出,阴天天气下,试验建筑全天室内温度平均为 $16.58\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $17.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动幅度也比较小;而对比建筑全天室内温度平均为 $14.62\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动幅度相对较大。

由此说明,无论什么天气状况,试验建筑的室内温度波动幅度都较小,冬季室内平均温度都高于对比建筑,热舒适性和热稳定性都较好。这一方面源于对建筑围护结构进行外保温后,其热惰性增强,保温隔热性较好;另一方面源于该太阳能供暖系统采取温度控制,当太阳能不足时,电辅助加热器启动,保证了室内处于较舒适的温度。

从图 5 中可以看出,晴天天气下,试验建筑的内墙壁温度平均为 $12.94\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,热稳定性较好;对比建筑的内墙壁温度平均为 $8.47\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动幅度较大。

从图 6 中可以看出,阴天天气下,试验建筑的内墙壁温度平均为 $12.93\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动幅度为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,热稳定性较好;对比建筑的内墙壁温度平均为 $8.51\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度

波动幅度为 5.3°C ,热稳定性较差。

通过内墙壁温度测试对比可以看出,试验建筑的热稳定明显好于对比建筑,这是源于试验建筑进行了围护结构的保温节能改造,可见建筑围护结构节能改造对提高建筑热稳定性的意义之大。

4.2 室内空气质量和舒适性

对供暖时段的室内空气质量进行测试,2016年2月23日采集试验建筑和对比建筑主要房间(卧室)的室内空气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO_2 浓度测试数据,结果如图7和图8所示。

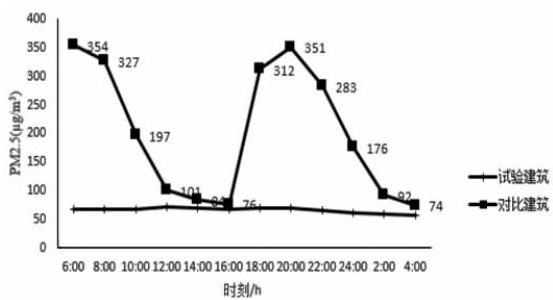


图7 试验建筑和对比建筑主要房间(卧室)的室内空气 $\text{PM}_{2.5}$

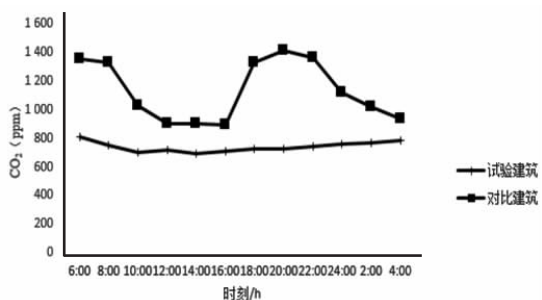


图8 试验建筑和对比建筑主要房间(卧室)的室内空气 CO_2 浓度

从图7中可以看出,试验建筑室内空气 $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $57\sim 71\mu\text{g}/\text{m}^3$,24 h 平均值为 $65.9\mu\text{g}/\text{m}^3$,未超出《室内空气质量标准》GB/T18883—2002 二类环境限值 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$;而对比建筑室内空气 $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $74\sim 354\mu\text{g}/\text{m}^3$,24 h 平均值为 $202.3\mu\text{g}/\text{m}^3$,远超出限值。从图8中可以看出,试验建筑室内空气 CO_2 浓度在 $692\sim 811\text{ppm}$,24 h 平均值为 741.5ppm ,未超出《室内空气质量标准》GB/T18883—2002 的限值 1000ppm ;而对比建筑室内空气 CO_2 浓度

在 $892\sim 1412\text{ppm}$,24 h 平均值为 1132ppm ,已超出限值。这是由于对比建筑供暖期间采用燃煤炉取暖,在早晚燃煤炉燃烧煤燃料时,室内空气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO_2 浓度明显增大,其余时间相对较低;而试验建筑采用太阳能供暖,室内空气质量较好。

人对室内空气环境的主观评价既有热舒适性,又有对室内空气新鲜性的感受^[8]。问卷调研两户人家对室内舒适性的评价,结果见表2。试验建筑的评价明显高于对比建筑,分析原因:一方面是试验建筑室内温度全天满足舒适范围,另一方面是围护结构使内墙壁温度的冷辐射减弱,也提高了人体的热舒适性;在空气质量方面,由于对比建筑燃煤炉燃煤引起室内空气气味和颗粒物增多,使人感觉空气不新鲜。

表2 试验建筑和对比建筑室内舒适性评价

不同建筑	未成年人 <18岁	成年人 18—55岁	老年人 >55岁
试验建筑	温度舒适、 空气舒适	温度舒适、 空气舒适	温度较舒适、 空气舒适
对比建筑	有点冷、 有煤烟味	早晚冷、 空气脏	冷、 空气尚可

4.3 节能环保效益

整个冬季测试下来,试验建筑太阳能供暖系统耗电量由电表测得为 $885\text{kW}\cdot\text{h}$,对比建筑一个冬季供暖耗煤量为 1.5t ,折合耗电量约为 $4275\text{kW}\cdot\text{h}$ (取 $2850\text{kW}\cdot\text{h}/\text{吨煤}$)。可见,试验建筑对比对比建筑节能电能 $3390\text{kW}\cdot\text{h}$,由此减少 CO_2 气体排放量 79.4% ,节能环保效益显著。

5 结论

对试验建筑进行围护结构保温节能改造后,应用太阳能供暖技术,使一套供暖系统实现了冬季供暖、其他季节提供生活热水的功能。

在冬季供暖时对应用太阳能供暖系统的试验建筑和采用燃煤采暖炉供暖的对比建筑进行室内温度和内墙壁温度测试分析,结果显示,无论晴天还是阴天条件下,试验建筑室内平均温度都在 16.5°C 以上,且温度波动幅度都在 3.8°C 以下,而对比建筑室内平均温度为

15.4℃以下,阴天时只有 14.6℃,且温度波动幅度达到 6.6℃以上,热稳定性和热舒适性较差;晴、阴天条件对试验建筑的内墙壁温度影响很小,且温度波动幅度较小,在 1.0℃左右,而对比建筑的内墙壁温度受室外温度影响较大,平均温度较低,为 8.5℃,且波动幅度达到 5.0℃以上,热稳定性和热舒适性较差。对试验建筑和对比建筑的冬季室内空气质量进行测试,结果显示,试验建筑室内空气质量较好,对比建筑在燃煤炉使用期间室内空气的 PM_{2.5} 和 CO₂ 浓度都超出了《室内空气质量标准》要求的限值。另外人对室内环境的舒适性评价结果也表明,无论是热舒适性和还是空气质量,试验建筑都优于对比建筑。

对试验建筑和对比建筑进行能耗对比分析,结果显示,试验建筑的节能环保效益显著,比对比建筑节省电能 3 390 kW·h,减少 CO₂ 排放量 79.4%。

参考文献:

- [1] HE B, YANG L, YE M. Building energy efficiency in China rural areas: situation, drawbacks, challenges, corresponding measures and policies[J]. Sustainable Cities and Society, 2014, 11: 7-15.
- [2] 刘慧芳,张时聪,姜益强,等.严寒地区太阳能热利用系统防冻实验研究[J].暖通空调, 2014, 44(4): 27-31.
- [3] 张叶,陈超,王万江,等.太阳能相变蓄热地板辐射供暖系统应用于乌鲁木齐地区办公建筑的实验研究[J].暖通空调, 2016, 46(6): 101-109.
- [4] 李金平,王磊,李修真,等.西北新农村建筑太阳能主动供暖试验研究[J].可再生能源, 2016, 34(11): 1680-1685.
- [5] 郑豪放.太阳能炕主被动复合采暖系统在青海的应用研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2016.
- [6] 邓杰,杨旭东,王鹏苏.幕墙式太阳能供暖系统热性能测试与分析[J].暖通空调, 2014, 44(10): 84-88.
- [7] 陈震,王冠,王丹.唐山市太阳总辐射变化特征分析[J].现代农业科技, 2017(16): 187-188.
- [8] 朱颖心.建筑环境学[M].北京:中国建筑工业出版社, 2010: 142-146.
- [9] 郭强强,田会娟,王丽红.氨基酸复配酸洗缓蚀剂的研究[J].表面技术, 2016, 45(7): 46-50.
- [10] 潘杰,严志轩,张黎,等.咪唑啉类化合物在 HCl 溶液中对碳钢的缓蚀机理分析[J].表面技术, 2018, 47(10): 211-218.
- [11] YADAV M, KUMAR S, KUMARI N, et al. Experimental and theoretical studies on corrosion inhibition effect of synthesized benzothiazole derivatives on mild steel in 15% HCl solution[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10(1): 602-624.
- [12] 王锦昌,林元华,孙志鹏,等.一种新型的咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 对 N80 钢在 CO₂ 环境下的缓蚀性能评价[J].表面技术, 2018, 47(6): 1-7.

(责任编辑:李秀荣)

(责任编辑:李秀荣)