

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221038

考虑太阳辐射的人字闸门温度场仿真及改善

杨光明,姚家晖,罗光宇,孙 鹏,皇甫晓瑛,黄佳程

(河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要: 作为露天环境中的大型钢结构,人字闸门在太阳辐射下会形成非均匀时变温度场,使结构产生复杂的温度效应,若工程中不加以重视,可能会出现焊缝开裂、结构失稳等安全问题。对此,通过改变表面涂层,利用有限元软件对比分析结构温度场分布。结果表明,太阳辐射下,闸门面板与顶梁形成多高温区域阵列式分布的温度场,梁系温度整体分布较均匀;表面涂层对闸门温度场影响较大,采用低辐射吸收率的涂层可使闸门各构件温升减小,最高温度可下降约 25%;温度场分布得到较大改善,可有效防止闸门应力场与变形场中可能出现的局部应力集中或变形过大现象。

关键词: 人字闸门; 太阳辐射; ASHRAE 晴空模型; 温度场; 涂层

中图分类号: TV663

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0207-04

1 引言

随着我国水利建设的飞速发展,船闸作为重要的通航建筑物,其设计与建设是航道正常运行的关键^[1]。人字闸门作为船闸的关键部分,属于处在露天环境中的大型钢结构,不可避免地会受到太阳辐射作用。由于太阳辐射强度与位置不断变化,会形成时空分布不均的温度场,在高温时节尤为明显,这对其稳定性与安全性乃至整个船闸的完整性、可靠度影响重大。抑制结构高温、改善结构温度场分布有助于提高结构的安全可靠性。现有研究^[2,3]表明,通过改变结构表面的辐射吸收率来改善结构温度场十分便捷有效。因此,本文基于 ASHRAE 晴空模型,利用有限元软件 ANSYS 仿真分析夏至日太阳辐射下人字闸门的温度场,并对比不同涂层作用下闸门各构件的温度场变化规律,旨在为实际工程中人字闸门温度场的改善提供参考。

2 仿真计算理论

2.1 晴空模型

太阳辐射模型选择美国加热、空调与制冷学会推荐的 ASHRAE 晴空模型。模型中太阳总辐射强度 G_t 计算公式^[4]为:

$$G_t = \alpha \left[\max(\cos\theta, 0) + \frac{G_{dV}}{G_{dH}} C \right] G_{ND} \quad (1)$$

$$G_{ND} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta)} C_N \quad (2)$$

$$\frac{G_{dV}}{G_{dH}} = 0.55 + 0.437\cos\theta + 0.313\cos^2\theta \quad (3)$$

式中, α 为太阳辐射吸收系数; θ 为太阳光线入射角; C 为散射辐射系数; ρ_g 为地面的反射率; F_{wg} 为表面对地面的角系数; β 为太阳高度角; A 为太阳辐射强度; B 为大气消光系数; C_N 为大气清洁度。

根据文献[5]中的 ASHRAE 晴空模型系数表,得到 6 月系数 A 、 B 、 C 分别为 1 088.29、0.205、0.134。

2.2 闸门模型

以西南地区某水利枢纽大中型船闸下闸首人字闸门为背景建立三维模型。单扇闸门尺寸为 10.8 m×24.0 m×2.2 m(宽×高×厚),重 3 820 kN,共设 22 根主梁(横梁 17 根,纵梁 5 根)、10 根背拉杆(分上下两层布置,每层 3 根主背拉杆、2 根副背拉杆),其中横梁布置间距由上至下依次减小。数值模拟主要参数见表 1,闸门三维模型见图 1。

表 1 主要参数

Tab. 1 Main parameters

材料	纬度 N	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数	比热	对流换热系数
Q345	30.8°	7 850	48	480	5

注:表中导热系数、比热、对流换热系数单位分别为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

收稿日期: 2022-05-17, 修回日期: 2022-06-18

作者简介: 杨光明(1966-),男,博士、副教授,研究方向为水工金属结构, E-mail: gmyang@hhu.edu.cn

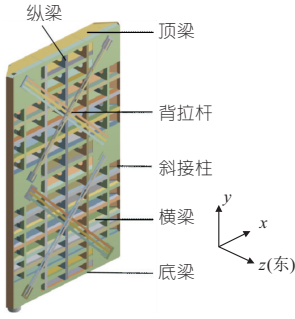


图 1 闸门模型

Fig. 1 Model of gate

3 闸门仿真结果分析

3.1 温度场时程分布

7:00~18:00 太阳辐射情况下人字闸门主要构件的最高温度随时间变化曲线见图 2。由图 2 可知,7:00~9:00 闸门各构件均能受到低辐射强度的太阳直射,温度同步缓慢上升,此后由于太阳直射区域不断变化,各构件温度差异较大,10:00 后各构件在太阳辐射下最高温度快速上升,除背拉杆在 12:00 左右达到峰值温度后进入温度下降阶段外,其他构件均在 15:00 左右达到峰值温度并进入温度下降阶段。其中 12:00~15:00 是一天中太阳辐射强度最大的时段,顶梁与面板在此时段相继受太阳直射,导致其峰值温度明显高于其他闸门构件的峰值温度。

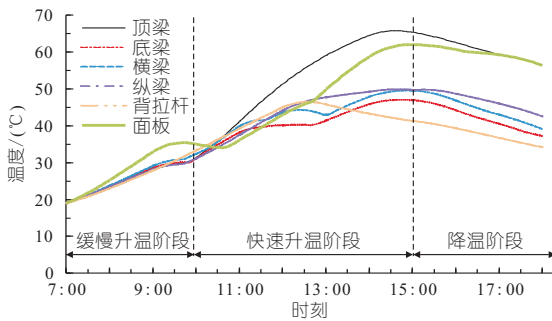


图 2 闸门主要构件最高温度变化曲线

Fig. 2 Maximum temperature variation curve of main gate components

其中,顶梁在 11:00 后开始持续受高辐射强度的太阳直射,15:00 左右达到峰值温度 65.8 °C,较初始温度升温接近 50.0 °C,是一天中闸门的最高温度。对于具有远大于其他构件表面积的面板,峰值温度达到 62.0 °C,略低于顶梁,但其在受热升温与散热降温过程中,温度变化较其他构件更加明显,这一现象在 9:00~11:00 非常明显,此时段太阳高度角较小,面板主梁侧受到穿过梁格的太阳直射,9:00 后温度逐渐超过其他构件;随着时间推移不再受太阳直射时,温度又逐渐下

降至略低于其他构件的水平;在 15:00 后由于继续接受太阳直射,其温度下降速度低于不再受直射的顶梁。背拉杆在中午后逐渐不受太阳直射,温度在 12:30 达到 46.5 °C 后就进入持续散热降温阶段。而纵梁、横梁和底梁均是后翼板与部分腹板上午受到太阳直射,午后不再受直射,后续温度升高主要是面板、顶梁的热传导作用,所以三者温度变化趋势相似,在 12:30 后温度上升逐渐减缓;由于纵梁与顶梁相接,底梁位于最下部,三者中纵梁峰值温度最高,横梁次之,底梁最低,在 15:00 左右分别达到 49.8、47.1、44.3 °C。

3.2 温度场空间分布

由于闸门温度变化范围大,且温度空间分布随太阳方位变化而变化,故在不同时间段采取不同云图标度,同一时刻选取两种不同视角的温度分布云图(闸门绕 y 轴逆时针旋转 90°形成第二视角),得到典型时刻的闸门温度分布云图(图 3)。由图 3 可知,上午闸门梁系的升温主要出现在后翼板,之后由于太阳可以穿过梁格直射到腹板的东侧部分,所以 11:00 时腹板温度也有明显升高,从总体来看,梁系的温度分布比较均匀。但受太阳直射的闸门外表面会出现局部高温区域,产生具有较强规律性的温度梯度分布,并随着时间(太阳直射位置)变化而变化。随着太阳东升西落,局部高温区上午出现在位于东侧的主梁后翼板、背拉杆等构件,中午逐渐转移至顶梁、受直射的侧面板,下午则移至位于西侧的整个闸门面板。

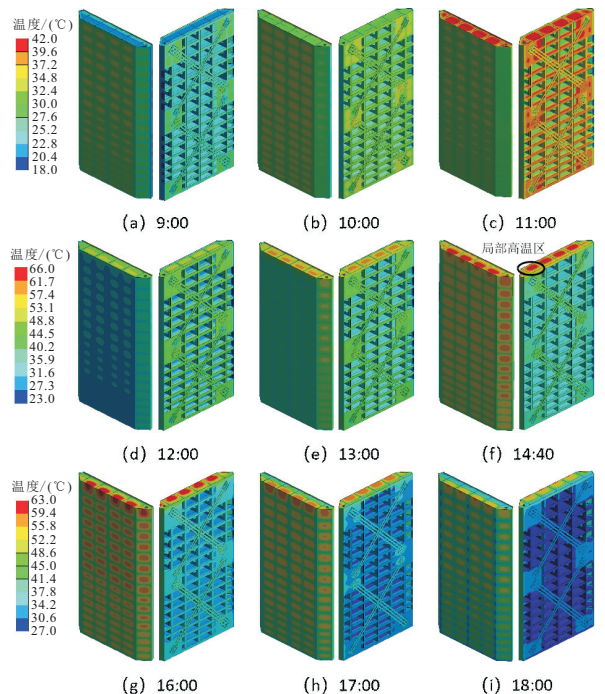


图 3 不同时刻闸门温度分布云图

Fig. 3 Gate temperature distribution at different times

从温度的空间分布上看,由于面板南侧的侧板受到太阳直射,其温度高于北侧侧板;闸门梁系温度分布则比较均匀,未产生大的温度梯度和局部高温区域;与闸门梁系不同,顶梁、面板受热升温时,出现了多个排列规律、形状相似的局部高温区,形成阵列式分布的中部温度高,周围温度低的多个局部温度场。可以看出,这些局部温度场的分布与主梁的位置密切相关,面板以热传导的方式向主梁的前翼板传热,所以面板上形成的并不是均匀分布的温度场;同时由于主横梁布置间距由上至下依次减小,这使得面板上部局部高温区的温度大于中下部的局部高温区。

3.3 温度场对闸门应力与变形影响分析

将太阳辐射产生的温度场作为热荷载,仿真分析闸门应力与变形情况,得到 14:40 时刻(闸门局部温度达到最大)闸门主要构件应力与初始时刻的应力情况对比,见图 4。同时,得到闸门在两种情况下的斜接柱与顶梁 z 向变形对比,见图 5。

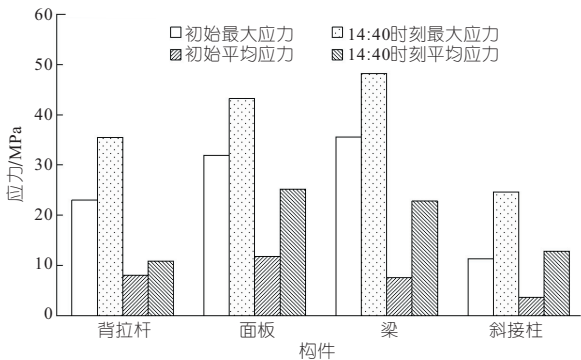


图 4 闸门主要构件应力对比

Fig. 4 Stress comparison of gate main components

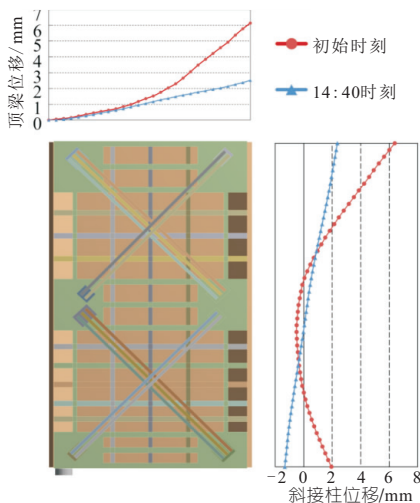


图 5 斜接柱与顶梁 z 向位移对比

Fig. 5 z-direction displacement comparison between miter column and top beam

从应力对比情况看,局部温度达到峰值时,闸门构件的最大应力与平均应力均显著增加,由于

应力集中现象,同一时刻下最大应力也明显大于平均应力。在温度荷载影响下,各构件最大应力增幅约 10 MPa,除背拉杆外平均应力增幅也均超过 10 MPa,与初始时刻相比,平均应力增幅已超过 1 倍,而对于背拉杆,由于施加了 5 MPa 的预应力,且 14:40 时背拉杆温度较峰值温度有所下降,所以其平均应力只有小幅增加。总体来看,温度对闸门应力影响较大。

从闸门变形来看,实际工程中闸门受力变形不可避免,根据《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》^[6]可知,人字闸门斜接柱侧向直线度应在 5 mm 以内,扭曲变形应小于 4 mm。由图 5 可知,在背拉杆预应力作用下,初始时刻闸门的变形均符合标准要求,但在温度场影响下,闸门变形加剧,已超过标准要求。所以,太阳辐射对人字闸门应力、变形的影响值得重视。

3.4 不同辐射吸收率下闸门温度场分析

结合文献[2,3]中对涂层辐射吸收率的研究可知,涂层的颜色越深,吸收率越大,涂层的材质及厚度对辐射吸收系数基本无影响。由文献[7]得到部分涂层的太阳辐射吸收率见表 2,通过改变闸门表面太阳辐射吸收率 α 来等效加设不同颜色涂层的闸门,并与无涂层情况下闸门的温度场特性进行对比。

表 2 不同颜色涂层的辐射吸收率

Tab. 2 Radiation absorptivity of different color coatings

涂层颜色	太阳辐射吸收率 α	涂层颜色	太阳辐射吸收率 α
银白色	0.55	浅灰	0.75
红色	0.60	黑色	0.90~0.97

结合表 2,分别取太阳辐射吸收率为 0.9、0.7、0.5,仿真模拟夏至日温度场,取无涂层闸门达到峰值温度时的云图标度,得到不同涂层作用下闸门温度达到峰值时的温度云图,见图 6。由图 6 可知,通过在闸门外表面加设不同涂层,闸门面板与顶梁的峰值温度下降,温度达到峰值时的整体温度分布也趋于均匀化。辐射吸收率为 0.7 时,局部高温现象明显缓解,但局部高温区阵列分布现象依然存在;而辐射吸收率低至 0.5 时,不仅高温区温度大幅降低,局部高温区也接近消失。

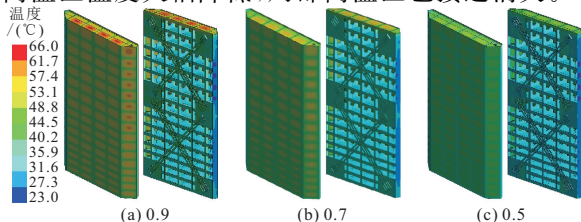


图 6 不同涂层下闸门温度分布云图

Fig. 6 Gate temperature distribution under different coatings

由于横梁、底梁和纵梁温度变化相似,故统一为梁系分析,图 7 为不同涂层作用下闸门主要构件的温度曲线,其峰值温度对比见表 3。由图 7、表 3 可知,各构件在不同涂层下温度变化趋势基本不变,但温度大小差异较明显。涂层对闸门受太阳辐射时各构件最高温度和平均温度的上升均有抑制作用,各时刻构件温度均有不同程度下降。随着辐射吸收系数的减小,最高温度曲线与平均温度曲线的间距也不断缩小,说明构件的温度分布趋于均匀。其中,背拉杆的最高温度与平均温度最接近,说明背拉杆各处温度的变化更具一致性,温度分布更均匀;而不同辐射系数下梁系的最高温度曲线大幅变化,平均温度曲线变化却很小,说明梁系温度分布更具整体性,但局部会出现高

温区域。从峰值温度来看,在辐射吸收系数为 0.5 的涂层作用下,各构件最高温度峰值降幅达 25%左右,除梁系平均温度峰值降幅 9%外,其余构件降幅达到了 20%左右。

综上所述,通过改变闸门外表面涂层的颜色,或重点调整面板与顶梁的涂层颜色,可降低闸门的辐射吸收率,有效缓解闸门面板与顶梁的不均匀温度场分布,降低高温时闸门各构件的最高温度与平均温度,以此来改善闸门应力场与变形场中可能出现的局部应力集中或变形过大现象。

4 结 论

a. 太阳辐射下,人字闸门形成非均匀时变温度场,随着太阳位置变化,受直射区域温度梯度明显,未受直射区域温度分布较均匀;其中,面板与顶梁受直射时,会形成多个高温区域,且呈规律的阵列式分布,最高温度达 65.8℃。

b. 使用低辐射吸收率的涂层,可使闸门各构件整体温升下降 10%~20%,最高温度峰值降低约 25%;同时,面板与顶梁的温度分布趋于均匀,温度场分布得到较大改善。可有效防止闸门应力场与变形场中可能出现的局部应力集中或变形过大现象。

参 考 文 献:

[1] 郑林娜,苏超,杨畅,等. 不同季节施工对软基上船闸闸首结构的影响[J]. 水电能源科学,2019,37(12):66-69.

[2] 陈志华,陈滨滨,刘红波. 钢结构常用涂料太阳辐射吸收系数试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(5):81-87.

[3] 张文灿,陈吉清,兰凤崇. 太阳辐射下车窗玻璃特性对车内温度场的影响研究[J]. 机械工程学报,2011,47(22):119-125.

[4] 杨应华,马越. 太阳辐射作用下钢管仓结构温度场分析研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(1):52-57.

[5] 李锦萍,宋爱国. 北京晴天太阳辐射模型与ASHRAE模型比较[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),1998,19(1):37-40.

[6] 水利部综合事业局. 水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范:GB/T 14173-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[7] 彭友松,强士中,刘悦臣. 钢管混凝土圆管拱肋日照温度分布研究[J]. 桥梁建设,2006,36(6):18-20,24.

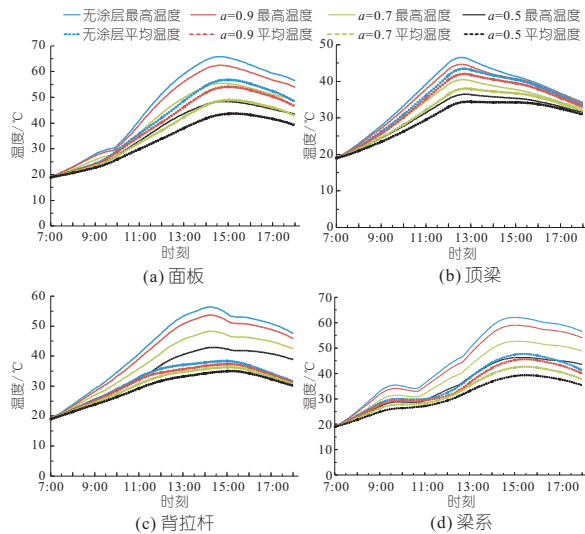


图 7 不同涂层下构件温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curves of components under different coatings

表 3 不同涂层下构件峰值温度对比

Tab. 3 Peak temperatures of components under different coatings

构件	涂层	最高温度		平均温度	
		峰值/℃	降幅	峰值/℃	降幅
面板	无	62.0		47.7	
	0.9	59.0	5	45.6	4
	0.7	52.7	15	42.7	10
	0.5	46.3	25	39.3	18
顶梁	无	65.8		56.8	
	0.9	62.4	5	54.1	5
	0.7	55.5	16	49.0	14
	0.5	48.4	26	43.7	13
背拉杆	无	46.5		43.4	
	0.9	44.6	4	42.0	3
	0.7	40.5	13	38.0	12
	0.5	36.5	22	34.4	11
梁系	无	56.3		38.3	
	0.9	53.7	5	37.3	3
	0.7	48.3	14	36.3	5
	0.5	42.9	24	35.0	9

poral and spatial variation in nitrogen sources along the lower reach of Fenhe River (Shanxi Province, China) using stable isotope and hydrochemical tracers[J]. *Water*, 2018, 10(2):231.

- [10] 张彦, 梁志杰, 邹磊, 等. 黄河干流及主要支流水质时空差异性及其变化特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 125-133.
- [11] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J]. *水利学报*, 2020, 51(9):

1048-1058.

- [12] 孙慧, 张建锋, 单奇华, 等. 宜兴太湖防护林对农业面源污染的减源增汇作用浅析[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 227-233.
- [13] 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 等. 夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 768-773.
- [14] 张学青, 夏星辉, 杨志峰. 黄河水体氨氮超标原因探讨[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1435-1441.

Analysis of Spatial-temporal Variation Characteristics and Causes of Water Quality in the Yellow River Basin

ZHU Zhi-peng^{1,2}, SI Yuan¹, DONG Fei¹, GUO Wen-xian²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to explore the spatial and temporal distribution of water quality in the Yellow River basin and the causes of pollution, the monthly monitoring data of 7 basic water quality indicators at 8 provincial boundary stations of the Yellow River from 2015 to 2019 were systematically collected, and the spatial and temporal distribution characteristics and trend changes of water quality of the Yellow River were systematically analyzed by seasonal Kendall trend test method. Based on the surface water quality standard, the status of water quality was evaluated and the main pollution indicators were determined. The linear regression model was used to discuss the causes of pollution. The results show that the spatial distribution characteristics of most water quality indicators are middle reaches > lower reaches > upper reaches. The concentration values of water quality indicators at Tongguan station are significantly higher than those at other stations. TP concentration values at some stations in the middle and lower reaches of the river show a significant upward trend, especially at Gaocun and Lijin stations. From the perspective of spatial variability, the poor water quality of Tongguan station is related to the convergence of several seriously polluted tributaries in this section. From the perspective of seasonal variability, the seasonal distribution characteristics of TP concentration show that the non-flood season is less than the flood season. Under the effect of rainfall erosion in the flood season, agricultural phosphorus carried by tributaries flow into the river with the surface runoff formed by rainfall, resulting in the increase of TP concentration. The seasonal variation of NH₃-N concentration in flood season is less than that in non-flood season, which is strongly correlated with air temperature. Higher flow rate and air temperature in flood season contribute to the dilution and degradation of NH₃-N.

Key words: spatial-temporal variation of water quality; seasonal Kendall trend test; pollution causes; the Yellow River basinn

(上接第 210 页)

Simulation and Improvement of Temperature Field of Miter Gate Considering Solar Radiation

YANG Guang-ming, YAO Jia-hui, LUO Guang-yu, SUN Peng, HUANGFU Xiao-ying, HUANG Jia-cheng
(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: As a large steel structure in the open environment, the miter gate will form a non-uniform time-varying temperature field under the solar radiation, resulting in complex temperature effect on the structure. If not paid attention to the project, it may lead to safety problems such as weld cracking and structure instability. The temperature field of the structure was analyzed by changing the surface coating and using finite element software. The results show that under solar radiation, the gate panel and the top beam form a multi-temperature area array distribution of temperature field, and the beam system temperature distribution is relatively uniform. The surface coating has great influence on the temperature field of the gate. The coating with low radiation absorption rate can reduce the temperature rise of the gate components, and the maximum temperature can be reduced by about 25%. The distribution of temperature field is greatly improved, which can effectively prevent local stress concentration or excessive deformation in the stress field and deformation field of the gate.

Key words: miter gate; solar radiation; ASHRAE clear-sky model; temperature field; coating