

# 大气腐蚀对白洋长江大桥钢结构影响研究

朱文<sup>1</sup>, 周长泉<sup>2</sup>, 李聪<sup>3</sup>, 曾志远<sup>3</sup>, 何雄君<sup>3</sup>

(1. 湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 湖北交投建设集团有限公司; 3. 武汉理工大学 交通学院)

**摘要:**大气腐蚀对大跨径钢结构桥梁耐久性能的影响不可忽视,为了研究白洋长江大桥在设计年限内,钢结构受大气腐蚀损失、力学性能的退化规律,建立了白洋长江大桥100年寿命的有限元腐蚀模型。研究表明:在腐蚀时间为100年时,弦杆截面损失了12%,腹杆截面损失了15.2%,从而引起钢结构整体应力水平随钢桁梁截面积的损失而升高,加重了桥梁整体的承载负担。因此,在桥梁设计及运营期间,应加强钢结构防腐蚀设计和表面防护涂层管养意识,以延长桥梁的正常使用寿命。

**关键词:** 悬索桥; 钢桁梁; 钢结构; 大气腐蚀; 有限元模型

在大跨钢桁梁悬索桥的建造和设计中,腐蚀将降低钢材的物理力学性能,进而导致钢结构承载性能与抗震性能的退化,如何评估腐蚀钢结构的耐久性问题已成为钢结构领域的一项难题。自美国钢桁梁悬索桥建造和控制系统发展100多年来,发生了多起因钢结构的严重腐蚀导致的稳定系统失效,从而引起灾难性的桥梁事故,因此,大气腐蚀对大跨径钢结构桥梁的危害不容忽视。

近几十年来,已有许多学者在这方面进行了研究。Larrabee—Coburn等在美国对270种钢材进行了长达15.5年腐蚀研究,得出合金元素与大气腐蚀因素等对钢结构腐蚀影响的规律;Legault和Leckie等依据Larrabee等的长达15.5年270种钢的大气暴露数据,得到了腐蚀速率与钢化学成分定量关系;Kucera等在瑞典及捷克对钢材进行了长达8年的暴露试验;B. Chen等对一大型空间的钢结构腐蚀情况进行了空间腐蚀承载损伤评估和可靠性监测;王国民等探索了埋入式平行钢丝斜拉索梁端锚固区病害特征和机理,得出梁端锚头和钢丝等钢结构在潮湿状态比干燥状态损伤严重;陈露等对于钢结构滨海大桥输电塔的承载能力进行了安全可靠研究,利用有限元统计理论模型进行了可靠性分析,并且初步给出了安全可靠评定的理论和方法;徐伟华分别对幂函数统计模型、极值统计模型理论、灰色系统数学理论、人工神经网络等方法的可靠性进行了研究与随机分析;杨波等根据已有的

相关科学技术研究成果,提出了一种抗力随时变连续衰减的波函数。

但是,以上研究主要集中在对当前使用状态下钢结构的腐蚀影响以及腐蚀规律的研究、不同大气腐蚀试验方法及其相关性、大气腐蚀下钢材和钢构件的力学性能等,很少涉及对未来腐蚀钢结构安全使用状态的评估和安全使用预后。白洋长江大桥是一座钢桁梁悬索桥,由于桥梁周围化工厂扩建,环境污染严重,钢结构的腐蚀是较为突出的问题。因此,有必要对白洋长江大桥在运营期内,承载力退化与大气腐蚀之间的关系进行研究,考虑腐蚀对钢结构截面积的损失影响,建立相应的有限元腐蚀模型,以便于对运营期间桥梁结构的受力行为进行准确评估。

## 1 工程概况

白洋长江公路大桥作为湖北省西部骨架高速公路网中一条规划纵线的过江快速通道,它的建设和实施将在湖北鄂西地区形成最后一条直接沟通长江南北岸的双向长江快速通道。大桥为一座主跨1000 m的双塔单跨悬索桥,主缆边跨分别为276、269 m。悬索桥横向的吊索标准间距为36 m,吊索与主缆在一个竖直平面内。主缆吊索顺桥向间距15 m,主塔最近的横向吊索距主塔交点中心线20 m,跨中最短吊索长度小于5 m。白洋长江公路大桥的横向吊索主跨矢高与主塔

收稿日期:2021-05-23(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51178361);湖北省交通运输厅科技项目(编号:2018-422-1-2)

作者简介:朱文,男,硕士,工程师。

的横纵向吊索跨比,一般采用 1/9.5,主缆中跨矢高为 100 m,大桥立面如图 1 所示。

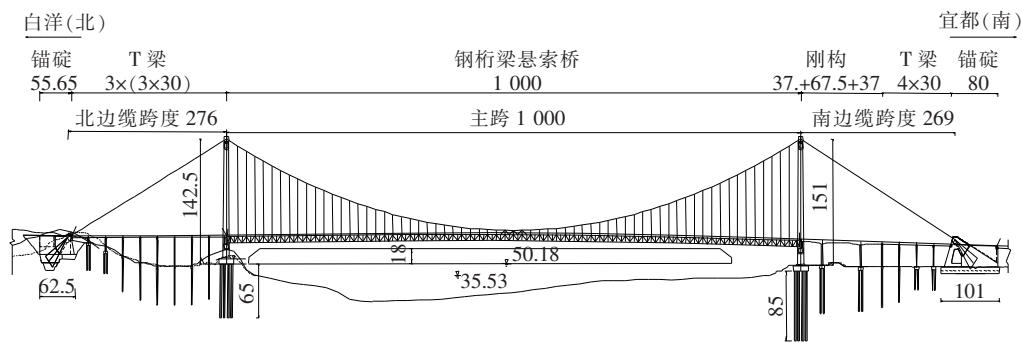


图 1 桥梁立面图(单位:m)

## 2 大气腐蚀预测模型

钢材的大气腐蚀是因为钢材长期暴露在恶劣的大气环境中而自然发生的化学现象。在收集目前宜都地区的气候特性及大桥环境后,考虑大气腐蚀对于宜都地区钢结构截面和力学参数影响时,采用幂函数形式的腐蚀数学模型,计算式为式(1)~(3)。另外考虑到腐蚀的随机性,同时假设钢结构构件截面均匀腐蚀。

$$D=A t^n \tag{1}$$

$$A=A_{(0)}+A_{(i)} Y_{(i)} \tag{2}$$

$$n=n_{(0)}+n_{(i)} Y_{(i)} \tag{3}$$

式中: $D$ 为钢材的腐蚀深度(mm); $t$ 为钢材在大气中暴露时间(年); $A_{(0)}$ 和 $n_{(0)}$ 为常数; $A_{(i)}$ 和 $n_{(i)}$ 为因子 $i$ 的系数; $Y_{(i)}$ 为因子 $i$ 的数量。当因子为钢的化学成分时, $Y_{(i)}$ 为钢的化学成分百分比含量。当因子为环境

因素时, $Y_{(i)}$ 为环境因子的平均值或累积量,如平均温度。因子也可以是某个因素的乘方或某几个因素的乘积,每个影响因素的系数值如表 1 所示。

经调取宜都地区历年气候统计资料得知:年平均相对湿度为 81%,平均温度为 18℃,年平均降雨量为 1 216 mm 左右,年日照时间为 1 883 h,二氧化硫含量平均为 0.46 mg/(100 cm<sup>2</sup>/d),氯离子含量为 0.011 mg/(100 cm<sup>2</sup>/d)。钢材为 Q345D,其化学成分含量依据标准 GB/T 1591—2008 取值。

考虑到 Q345D 钢的一些元素含量在某一范围,为了求得相对不利的腐蚀结果,因此,对于某些有利于钢结构腐蚀的部分钢材成分取限值,对于一些抑制钢结构腐蚀的部分钢材成分数值取平均值或者取零值。依据文献可计算出宜都地区  $A$  为 0.06, $n$  为 0.65,得到宜都地区腐蚀深度与时间的关系如式(4)所示:

$$D=0.06 t^{0.65} \tag{4}$$

表 1 影响因素的系数值

影响因素	单位	$n$ 值系数	$A$ 值系数	备注
常数项		-0.079	0.031	
相对湿度	%/100	0.216	—	年平均
温度( $T$ )	℃/100	—	0.367	年平均
氯酸根离子( $\text{Cl}^-$ )	mg/(100 cm <sup>2</sup> /d)	1.022	0.016	沉积的速率
二氧化硫( $\text{SO}_2$ )	mg/(100 cm <sup>2</sup> /d)	0.195	0.028	沉积的速率
降雨量×日照时间	(mm/a)×(h/a)×10 <sup>-6</sup>	0.145	-0.021	年总量
铜(Cu)	%	-0.452	—	钢中的含量
锰(Mn)	%	—	-0.013	钢中的含量
硅(Si)	%	0.052	-0.022	钢中的含量
磷(P)	%×10	-0.069	-0.024	钢中的含量
硫(S)	%×10	0.375	0.036	钢中的含量
铬(Cr)	%	-0.025	-0.012	钢中的含量

### 3 腐蚀构件的剩余截面分析

图2为钢桁架局部示意图,通过分析可以得到大气腐蚀对其构件(腹杆和弦杆)截面损失的计算公式,如表2中式(5)、(6)所示。

考虑到大气腐蚀对钢结构的时间效应,根据式(4)~(6)可以计算钢结构中腹杆、弦杆截面积在100年内的变化,计算结果如表3所示。其中,钢桁架的上下弦杆、上下横梁均为弦杆截面形式,竖腹杆、斜腹杆均为腹杆截面形式。数据表明:在100年时,弦杆截面腐蚀

损失达到了12%,腹杆截面腐蚀损失已经达到了15.2%。

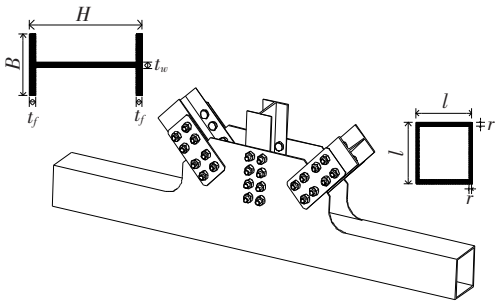


图2 钢桁架截面局部示意图

表2 大气腐蚀对构件截面面积的影响计算式

位置	腐蚀前	腐蚀后
弦杆截面	$A=l^2-(l-2r)^2$	$A_{(t)}=(l-2D_{(t)})^2-(l-2r)^2$ (5)
腹杆截面	$A=2Bt_f+(H-2t_f)t_w$	$A_{(t)}=2(B-2D_{(t)})(t_f-2D_{(t)})+(H-2t_f)(t_w-2D_{(t)})$ (6)

注:弦杆为箱形截面;腹杆为工字截面; $A$ 为腐蚀前的截面面积; $l$ 为弦杆截面腐蚀前的截面长,初始值为700 mm; $r$ 为弦杆的壁厚,初始值为20 mm; $A_{(t)}$ 为腐蚀后的截面面积; $D_{(t)}$ 为在 $t$ 时间时的腐蚀厚度; $H$ 为腹杆截面腐蚀前的截面高度,初始值为660 mm; $B$ 为腹杆宽度,初始值为360 mm; $t_w$ 为腹杆的翼板厚,初始值为18 mm; $t_f$ 为腹板的宽度,初始值为14 mm。

表3 不同年限的腐蚀后构件截面面积

时间/ 年	截面面积/mm <sup>2</sup>		时间/ 年	截面面积/mm <sup>2</sup>	
	弦杆	腹杆		弦杆	腹杆
0	54 400	21 696	60	49 728	19 331
10	52 942	20 957	70	49 235	19 083
20	52 112	20 537	80	48 767	18 847
30	51 422	20 188	90	48 319	18 621
40	50 810	19 878	100	47 887	18 403
50	50 250	19 595			

### 4 钢结构悬索桥整体结构分析

#### 4.1 全桥 Midas/Civil 模型

建立白洋长江大桥的有限元模型并进行静力分析。Midas/Civil 软件中的悬索梁单元是使用最常用的一种模拟单元。因此,悬索桥上的钢桁梁、桥塔以及悬索梁桁架上的桥墩使用 Midas/Civil 软件中的悬索

梁单元进行模拟。钢桁架悬索桥的整个结构采用4种材料。主缆、吊杆的材料根据实际性能进行定义,桥塔和桥墩采用C50,钢桁梁采用Q345D,材料参数见表4。白洋长江大桥 Midas/Civil 有限元模型如图3所示。全桥共包含2 594个节点,5 543个单元。桥梁模型考虑了恒载、活荷载、风荷载、温度荷载、制动力荷载以及相应荷载组合,建立了3种荷载组合(表5)。

#### 4.2 大气腐蚀对全桥应力影响分析

在 Midas/Civil 有限元模型中,输入表3中每10年一个阶段的腹杆和弦杆的截面积数据,其中,钢桁架的上下弦杆、上下横梁均为弦杆截面形式,竖腹杆、斜腹杆均为腹杆截面形式,可以得到表5中3种静力荷载组合下,100年内全桥整体结构应力状态。在荷载组合1和最不利荷载组合作用下,上弦杆、下弦杆、上横梁、下横梁、竖腹杆、斜腹杆在运营期间的应力变化如图4~9所示。

表4 材料参数

结构构件	材料	弹性模量/MPa	泊松比	线膨胀系数/( $\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )	重度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
主缆		$2.05\times 10^5$	0.3	1.2	85.00
吊杆		$1.10\times 10^5$	0.3	1.2	205.00
主塔	C50	$3.45\times 10^4$	0.2	1.2	25.00
钢桁梁	Q345D	$2.06\times 10^5$	0.3	1.0	76.98

表 5 3 种荷载组合

项目	荷载组合
主要组合	$1\times\text{恒载}+1\times\text{体系温度}+1\times\text{活载}$
组合 1	$1\times\text{恒载}+1\times\text{活载}+1\times\text{体系温度}+1\times\text{温度梯度}+1\times\text{制动力}+1\times\text{参与汽车组合的风荷载}$
最不利组合	(基于组合 1, 改变荷载作用位置可得到最不利荷载)

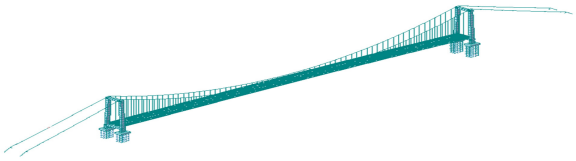


图 3 白洋长江大桥全桥模型

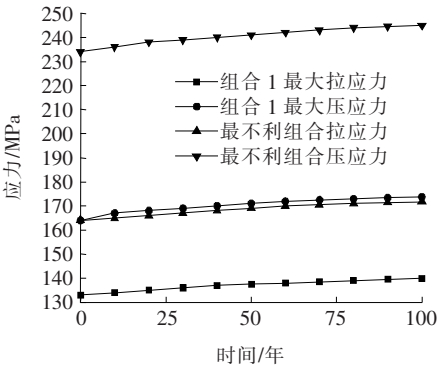


图 4 上弦杆应力变化图

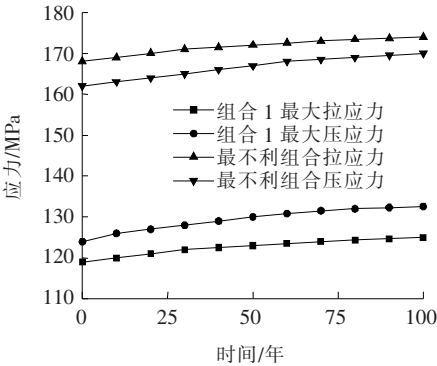


图 5 下弦杆应力变化图

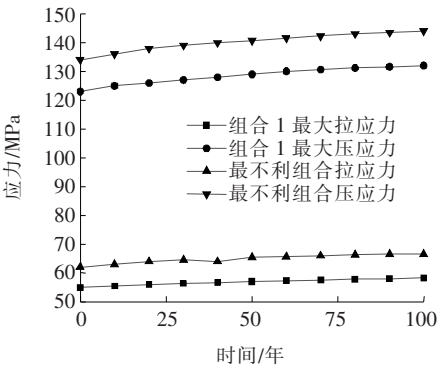


图 6 上横梁应力变化图

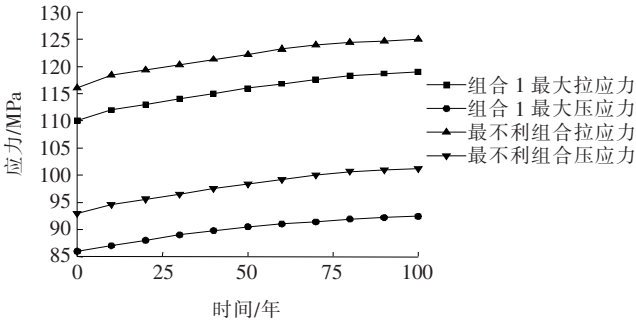


图 7 下横梁应力变化图

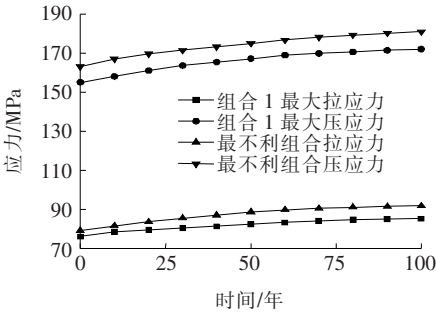


图 8 竖腹杆应力变化图

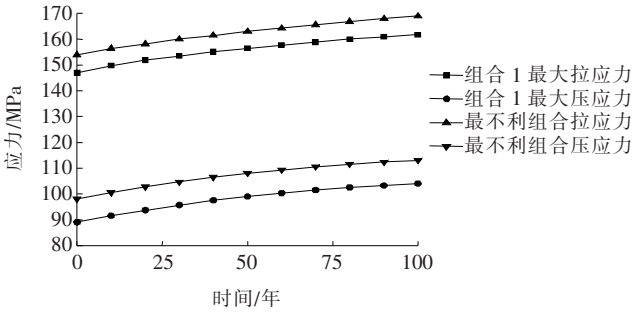


图 9 斜腹杆应力变化图

由图 4~9 可知:① 上弦杆的拉应力和压应力曲线在组合 1 和最不利组合下随年限变化不明显,组合 1 中上弦杆的拉应力、压应力在 100 年时分别增加了 8.0%、9.0%,最不利组合中上弦杆的拉应力、压应力在 100 年时分别增加了 7.2%、7.1%;② 组合 1 中下弦杆的拉应力、压应力在 100 年时分别增加了 7.5%、10.4%,最不利组合中下弦杆的拉应力、压应力在 100 年时分别增加了 5.4%、7.4%;③ 组合 1 中上横梁的拉应力、压应力在 100 年时分别增加了 9%、11.0%,

最不利组合中上横梁的拉应力、压应力在100年时分别增加了11.1%、10.9%;④组合1中下横梁的拉应力、压应力在100年时分别增加了12.3%、11.1%,最不利组合中下横梁的拉应力、压应力在100年时分别增加了11.7%、13.2%;⑤组合1中竖腹杆的拉应力、压应力在100年时分别增加了18.0%、16.5%,最不利组合中竖腹杆的拉应力、压应力在100年时分别增加了24.1%、16.5%;⑥组合1中斜腹杆的拉应力、压应力在100年时分别增加了15.2%、25.4%,最不利组合中,斜腹杆的拉应力、压应力在100年时分别增加了14.7%、23.0%。

通过对以上有限元模拟结果分析,可以得到:在组合1和最不利荷载组合中,下弦杆、上横梁、下横梁、竖腹杆、斜腹杆的拉应力和压应力变化曲线较上弦杆趋势明显,其中,竖腹杆、斜腹杆应力曲线增加趋势最大。整体来说,大气腐蚀提高了全桥的应力等级,使桥梁在服役过程中,向越来越不利于自身安全状态的应力方向发展。

## 5 结论

通过建立宜都地区大气腐蚀预测模型,以及Midas/Civil有限元模型,研究了白洋长江大桥钢结构在运营100年期间受大气腐蚀影响下,全桥结构应力变化规律,得到以下结论:

(1) 根据宜都地区的气候和大气状况,得到了相应的大气腐蚀预测模型,根据腐蚀预测模型得到了100年白洋长江大桥钢桁梁的弦杆和腹杆截面变化数据,数据表明:在100年时,弦杆截面腐蚀程度达到了12%,腹杆截面腐蚀的程度达到了15.2%。

(2) 通过分析模型计算结果得知:上弦杆的拉应力和压应力曲线,在组合1和最不利荷载组合下随腐蚀年限增加的变化不明显,虽然钢结构应力在增加,但增加趋势比较小,说明大气腐蚀对上弦杆的应力变化影响较小;竖腹杆和斜腹杆的应力变化受大气腐蚀影响最大。

(3) 大气腐蚀对钢构件的截面积损失影响较大,从而造成运营期间结构整体应力水平增加,对桥梁的安全状态产生威胁,因此大气腐蚀问题不容忽视。建议在桥梁设计及运营期间加强钢结构防腐蚀设计和表面防护涂层管养意识,以延长桥梁的正常使用寿命。

## 参考文献:

- [1] 徐吉民,幸坤涛,郭小华,等. 腐蚀钢结构研究现状及进展[C]. 中国老教授协会土木建筑专业委员会,北京交通大学土木建筑工程学院,第十三届建筑物建设改造与病害处理学术会议暨土木建筑专业委员会三十周年纪念活动论文集,2021.
- [2] 李焱周. 应力和缝隙耦合作用下 N80 碳钢腐蚀行为研究[D]. 华中科技大学博士学位论文,2017.
- [3] Larrabee C P, Coburn S K. The Atmospheric Corrosion of Steels as Influenced by Changes in Chemical Composition[C]. Proc. 1st Int. Cong. Met. Corros. Butterworth, London, UK, 1992.
- [4] Legault R A, Leckie H P. Effect of Alloy Composition on Atmospheric Corrosion Behavior of Steels Based on a Statistical Analysis of Larabee-Coburn Data Set[C]. Corrosion in Natural Environments, ASTM STP 558, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1994:334-347.
- [5] Kucera, Knotkova D, Gullman J, Holler P. Corrosion of Structural Metals in Atmospheres with Different Corrosivity at 8 Years' Exposure in Sweden and Czechoslovakia. Proc. 10th int. Cong. Met. Corros. Oxford and EDH, Madras India, 1987.
- [6] B. Chen, Y. L. Xu, W. L. Qu. Evaluation of Atmospheric Corrosion Damage to Steel Space Structures in Coastal Areas[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(16).
- [7] 王国民, 吴中鑫, 颜东煌. 埋入式平行钢丝斜拉索损伤状态检测与分析[J]. 中外公路, 2020(6).
- [8] 陈露, 徐善华, 孔正义, 等. 输电塔腐蚀安全评定的有限元分析[J]. 钢结构, 2010(6).
- [9] 徐伟华. 桥梁钢结构的大气腐蚀寿命预测[J]. 中国住宅设施, 2010(2).
- [10] 杨波, 戴国欣, 陈昌海, 等. 钢结构工程抗力时变模型的构建与验证[J]. 重庆建筑大学学报, 2008(5).
- [11] 曹琛, 郑山锁, 胡卫兵, 等. 大气环境腐蚀下钢结构力学性能研究综述[J]. 材料导报, 2020(11).
- [12] 舒江, 刘琪, 彭元诚. 白洋长江公路大桥主桥设计[J]. 桥梁建设, 2019(1).
- [13] 梁彩凤, 侯文泰. 钢的大气腐蚀预测[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006(3).
- [14] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢及低合金钢 8 年大气暴露腐蚀研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995(3).
- [15] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢、低合金钢 16 年大气暴露腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005(1).