

考虑风险的桥梁防火措施选择

林 辉, 周云岗, 简方良

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 阐述了基于风险的桥梁防火措施的基本思想与基本内容, 包括桥梁防火水准和防火性能之间的关系、桥梁防火等级划分以及防火性能目标; 提出了考虑风险的桥梁防火措施选择方法, 这只需简单改变等级参数即可; 通过一个算例来说明该方法的应用过程。

关键词: 桥梁工程; 防火措施; 风险评估; 决策

中图分类号: U 447; U 441.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2011)02-0213-04

Fire Resistance Countermeasures Selection for Bridges Based on Risks

LIN Hui, ZHOU Yun-gang, JIAN Fang-liang

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Basic thoughts and contents of risk-based fire resistance countermeasures for bridges were discussed, including the relations between fire resistance level and fire resistance performance of bridges, the determination of fire resistance grade for bridges and the objective of fire resistance performance; fire resistance methods for bridges were proposed which could be achieved by varying grade parameters. An actual engineering was used to illustrate the applicability of the proposed method.

Key words bridge engineering; fire resistance countermeasures; risk assessment; decision making

维系现代城市功能与区域经济功能的基础性工程设施系统称为生命线工程系统。工程结构(如桥梁、高压输电塔等)是生命线工程系统的客观载体, 其抗灾性能、健康状态、耐久性等决定了生命线工程系统能否良好地发挥功能^[1]。桥梁在交通运输网络中作用特殊, 是生命线工程系统的重要组成部分。由于钢材强度高易加工, 且钢构件重量轻, 运输、架设方便, 易于工业化制造、拼装, 节省工期与造价, 因而被广泛应用于桥梁工程。钢材虽为非燃烧材料, 但它不耐火, 温度达到 400℃时, 钢材的屈服强度将降至室温下的一半; 温度达到 600℃时, 钢材基本丧失全部强度和刚度。同样, 钢筋混凝土结构在高温下承载力也迅速下降, 结构倒塌将会产生及为严重的社会、经济后果^[2-3]。

针对火灾的研究已成为国内外研究的热点。捷克的 W alda^[4]联合西班牙、英国的大学和研究机构通过试验研究了结构构件在火灾中温度变化和内力重分布情况; 新加坡的 Tan^[3, 5]通过试验推导出火灾下钢筋混凝土柱承载力计算公式; 意大利的 Matteo^[6]研究了火灾后混凝土结构安全评估的无损检

测技术; 中国的李国强, 等^[2, 7]对火灾下钢结构、索网结构进行了一系列试验和理论研究。但针对桥梁火灾风险评估及其措施选择方面的研究却很少。为更合理选择桥梁防火措施, 笔者提出了考虑风险的桥梁防火措施选择方法。

1 桥梁火灾

火灾下, 梁所达到的温度是梁距路面高度与放热率(HRR)和燃烧持续时间的函数。据统计, 经过主要交通干线(如主要桥梁等)的重型卡车中 2% 是装有易燃液体的卡车, 1% 是装载液化石油气的卡车^[8]。桥梁火灾中最危险的情况包括: ①主支撑(或索)附近重型卡车火灾; ②主支撑(或索)附近载油(或易燃液体)罐车火灾; ③液化石油气(LPG)罐车碰撞后发生的气体喷射火灾。

例如, 一挂车长 20 m, 高 4.6 m, 当挂车发生火灾燃烧时, 其火焰高度将是车宽和放热率的函数。由此产生的火焰高度将达到 12~15 m(放热率为 20~50 MW), 火焰温度约 800~1 000℃。如果火灾发生在索或垂直支撑(没有风)附近, 其热辐射火焰温度将达到 900℃。如果桥面上风作用显著, 应

考虑风对火焰的偏斜作用。如果风吹向索或主支撑,索或主支撑将同时遭受辐射热和直接加热。无保护索(和主支撑)失效时间,见表 1^[8]。

表 1 无保护索和无保护主支撑失效时间

Tab 1 Time to failure for unprotected cable and the main support /min

构件	索				
载荷比	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
失效时间	40.5	30	26.5	22.5	17.5

构件	主支撑				
载荷比	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
失效时间	> 120	> 120	93	56.5	40.5

注:载荷比是指在规定时间(日、月、年)内,平均负荷与最大负荷之比。

若装载油或易燃液体罐车泄漏后燃油泄漏直径取为 15 m,热通量根据文献 [9] 确定:

$$q'' = EF_{12} \tag{1}$$

式中: E 为火焰辐射功率, $E = 58 \times 10^{-0.00823D}$ kW /m²; F_{12} 为目标与火焰之间形状系数。

液化石油气车爆炸,能量将突然释放,由此产生的蒸气云可形成直径数 10 m 的火球。相关的发射功率几秒钟内可达到 350 kW /m²。罐体破裂导致高速气体外泄使索或主支撑局部加热。当高压气体在直径 50 mm 管道内以 8 kg/s 释放压力为 13 bar(即 1.3 MPa)时,火焰长度将达到 35 m,同时距源头 4 m 处气体温度为 1 300℃; 25 m 处气体温度为 1 200℃。后者相当于 250 kW /m² 热通量^[8]。因此,对桥梁火灾必须予以高度重视。

2 桥梁防火设计流程

韦伯辞典中,风险被定义为“损失或伤害的可能性”。风险由两部分组成:①危险事件发生的可能性或事故发生的概率或失效概率;②危险发生后的后果严重程度或损失程度。桥梁火灾风险等级是根据桥梁在交通运输网络中的重要性和社会可接受火灾后果将桥梁火灾风险划分成不同等级。同时,还必须考虑安全与成本(社会承受力)间的关系^[10]。因此,桥梁火灾风险等级划分应处理好如下关系:①安全等级与桥梁规模的关系;②安全等级与桥梁交通量的关系;③安全等级与社会经济的关系。

文献 [11- 14] 将基于性能的抗震思想应用到建筑、水坝和桥梁等。阮欣^[10]在基于性能的基础上提出了基于风险的桥梁设计理念。基于风险的桥梁防火是根据桥梁的材料、结构、用途和重要性等方面具体情况,因地制宜地提出科学合理、切实可行的对策。其中,桥梁防火措施系统目标包括:①社会性目标,即希望桥梁能够满足社会安全所需要的基本目标;②功能性目标,即为实现社会性目标而在功能设计中所采用的措施和技术手段;③风险要求,即为实现社会性目标和功能性目标所必须达到的具体性能

标准。笔者提出的考虑风险的桥梁防火包括潜在火灾分析、火灾场景模拟、火灾评估、潜在火灾后果、火灾危险水准、期望防火等级、风险类别(可以忽略、可以合理控制或不能接受)和采取措施等。考虑风险的桥梁防火流程图,如图 1。

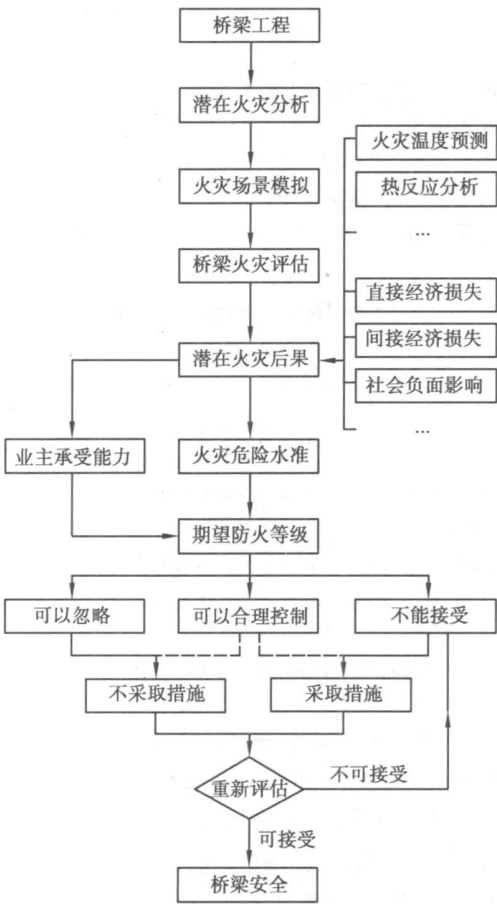


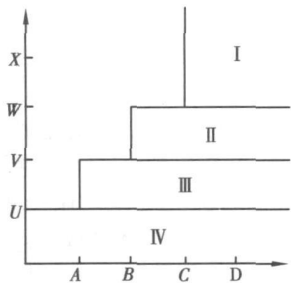
图 1 考虑风险的桥梁防火流程

Fig 1 Risk-based fire resistance flow chart for bridges

3 桥梁防火措施选择

公路隧道火灾相关研究较多^[15],桥梁火灾风险评估中火灾危险性等级划分借鉴日本公路隧道防火设施研究中根据交通量和长度对公路隧道划分防火等级的思想,结合目前我国桥梁的实际状况和技术水平,把我国桥梁火灾危险性等级按交通量和桥梁长度(或单孔跨径)从高到低划分为 I(高)、II(中高)、III(中低)和 IV(低)共 4 个等级,如图 2。这种划分充分考虑了桥梁长度和交通量之间的相互关系,其中桥梁长度是基础分界指标,交通量是可变动态指标,如某桥梁长 2 400 m,但如果其交通量仅为 17 000 veh/d,那么它的火灾危险性等级只能是 III 级。又如某桥梁很长,开通之初交通量不大,火灾危险性等级可以暂时定的低一些;随着经济发展,交通量上升,危险性等级可相应提高。相应的桥梁火灾

损失严重性等级见表 2。



注:横坐标 A、B、C、D 分别表示桥梁全长 500 m(或单孔跨径 40 m)、1 000 m(或单孔跨径 100 m)、2 000 m(或单孔跨径 200 m)、5 000 m(或单孔跨径 500 m);纵坐标 U、V、W、X 分别表示交通量为 5 000、20 000、35 000、50 000 veh/d。

图 2 桥梁火灾危险性等级
Fig 2 Fire hazard rank of bridges

表 2 桥梁火灾损失严重性等级
Tab 2 Fire loss severity rank of bridges

损失严重性	桥梁破坏情况
完全破坏	桥梁遭到完全破坏, 需要重建;
严重损坏	桥梁遭到严重损坏, 24 h 内车流量可恢复至灾前 25% 以上;
中等损坏	桥梁主要结构部件受到轻微损坏, 24 h 内车流量可恢复至灾前 50% 以上;
轻微损坏	桥梁主要结构部件基本未受损坏, 8 h 内车流量可恢复至灾前 75% 以上;
基本未损坏	桥上交通未受到大的影响, 8 h 内车流量可恢复至灾前 99% 以上

风险评估矩阵法是评估风险的常用方法之一。在风险评估矩阵中,任一事件的风险 R 是 P 与 S 的乘积。其数学表达式为:

$$R = P \cdot S \tag{2}$$

式中: P 为某一事件发生的概率; S 为该事件后果的严重性。

由式 (2), 桥梁火灾风险等级矩阵见表 3, 相应的桥梁防火措施选择见表 4

表 3 桥梁火灾风险等级矩阵

Tab 3 Matrix of fire risk for bridges

损失严重性	火灾危险性			
	I (高)	II (中高)	III(中低)	IV (低)
完全破坏	HH	HH	MH	MM
严重损坏	HH	MH	MM	ML
中等损坏	MH	MM	MM	ML
轻微损坏	MH	MM	ML	LL
基本未损坏	MM	ML	LL	LL

注:HH、MH、MM、ML、LL 分别表示桥梁火灾风险等级为高风险、中高风险、中等风险、中低风险、低风险。

4 算 例

某桥梁工程可行性研究阶段推荐采用主跨 375 m 的斜拉桥方案 (图 3), 跨径布置为: 150 m + 375 m +

150 m = 675 m。根据相关经济、社会统计数据, 业主选择并能够承受的桥梁火灾损失严重性等级为中等损坏 (见表 2), 下面采用考虑风险的方法确定桥梁防火对策。

表 4 桥梁防火措施选择

Tab 4 Fire resistance countmeasures selection for bridges

防 火 措 施	火灾风险等级				
	HH	MH	MM	ML	LL
统筹协调	交通信息收集	○	○	○	△
	防火预案	○	○	○	△
	人员训练、演习	○	○	△	△
	救火预案	○	○	○	△
	绕路绕行方案	○	○	△	
	快速抢修预案	○	○	△	
报警设备	手动报警器	○	○	△	△
	监视系统	○	○	△	
	自动报警器	○	○	△	
	探测装置	○	△		
	紧急电话 (消防部门)	○	○	○	○
	紧急电话 (桥梁管理方)	○	○	△	△
警报设备	信息显示屏	○	○	△	
	自动广播系统	○	○	△	
	闪光灯信号	○	○	○	○
	人工广播系统	○	○	○	△
	紧急路障	○	△	△	
	紧急停车带	○	○	△	
逃生设施	紧急照明	○	○	○	△
	紧急电源	○	○	△	△
	逃生指示牌	○	○	○	△
	避难逃生通道	○	○	△	

注: ○表示原则上必须设置; △表示根据需要设置。

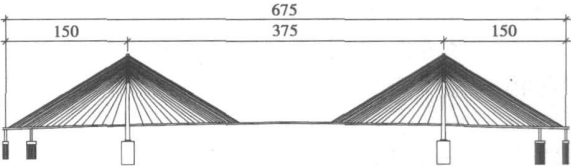


图 3 桥梁立面 (单位: m)
Fig 3 Bridge elevation

本方案中桥梁火灾损失严重性等级为中等损坏。根据桥梁跨径和交通量预测, 查图 2 可知, 该桥火灾危险性等级为 II (中高)。再查表 3 桥梁火灾风险等级为 MM (中等风险)。以表 4 中桥梁防火措施为基础, 确定防火措施 (具体安装详情略)。

4 1 消防电力系统设置

- 1) 消防用电设备采用专用供电回路, 当桥梁正常运营用电因火灾被切断时, 应仍能保证消防用电。
- 2) 消防用电电缆线管道应与其它管道分开设置。当采用矿物绝缘类不燃性电缆时, 可一同设置。
- 3) 桥梁采用自备发电设备作消防备用电源时, 自备发电设备应设置手动和自动启动装置 (自动启

动方式应能在 30 s 内供电)。

4) 桥梁消防应急照明系统和疏散指示标志连续供电时间不应小于 2.0 h(全长大于 10.0 km 的桥梁需单独研究确定)。

4.2 报警系统设置

1) 桥梁入口外 200.0 m 处,设置警示信号装置(当桥梁发生火灾事故后及时提示车辆禁止前行)。

2) 桥梁出入口及两侧设置报警电话或报警按钮(间距不应大于 100.0 m);有条件的重要桥梁可设置自动报警系统(间距不大于火灾感应设备最大有效探测距离)。

3) 桥梁中央分隔带设置火灾应急广播和发光警报装置(间距不应大于 50.0 m)。

4.3 灭火器设置

1) 桥梁出入口及两侧均应设置灭火器(每个灭火器设置点不应少于 4 具,间距不应大于 100.0 m)。

2) 灭火器应设置在位置明显和便于取用的地点(且不得影响桥上人员快速疏散);对有视线障碍的灭火器设置点,应设置指示其位置的发光标志。

3) 灭火器的摆放应稳固,铭牌应朝外。

4) 灭火器宜设置在灭火器箱内(灭火器箱不得上锁),其顶部离地面高度不应大于 1.50 m,底部离地面高度不应小于 0.10 m。

4.4 火灾疏散系统设置

1) 桥梁两侧设置消防应急照明系统(供电能力按消防电力系统设置要求执行)。

2) 桥梁两侧设置明显的发光紧急疏散指示标志(其高度不应大于 1.0 m)。

3) 疏散方向采用“安全出口”作为指示标识(其间距不应大于 20.0 m)。

4) 全长大于 2.0 km 的桥梁应增设能保持视觉连续的灯光疏散指示标志。

除表 4 中措施外,针对该桥特点建议以下防火设计原则:①交通运输规划。规划布局需综合考虑桥梁与周围交通运输线路的关系,桥梁周围道路应该简明畅通,以便在发生火灾事故时迅速救援和及时疏散;②桥梁外环境。桥梁出入口作为交通工具和人员通向桥面的第一入口,需要重点防范控制;③桥面防火。可以考虑在桥面重要构件表面涂上防火涂料,减少火灾给桥梁结构施加的温度荷载。

桥梁防火安全是一项系统工程,它包含线路、车辆、通讯信号、供电设备、运营管理以及防灾监控、报警设备等众多环节,系统安全思想应贯穿工程前期决策、设计、施工到运营管理等各个阶段。

5 结 语

研究成果为进一步科学合理选择桥梁防火措施

奠定了基础,同时也为桥梁火灾风险等级的制定提供了参考。在考虑风险的桥梁防火措施选择体系中,对措施方案不做具体规定,只要能够达到目标,任何方法都可以使用。

在考虑桥梁长度和交通量的基础上,把桥梁火灾危险性划分为 4 个等级。在保证风险水平前提下,通过设计方案的选择可以采用投入效益比最优化的系统措施。设计以系统的实际工作效果为目标,给桥梁防火领域的新思想、新技术带来了广阔应用空间。

这里的分析是一种简化方式,今后需要做的工作包括:把考虑因素扩展到诸如冗余,力矩重分配,几何和材料非线性等方面。

参考文献(References):

- [1] 李杰. 生命线工程抗震: 基础理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢混凝土组合结构抗火设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [3] TAN K H, YAO Yao. Fire resistance of four- face heated reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering 2003 129(9): 1220- 1229.
- [4] Walda F, Simões S L, Moore D B, et al. Experimental behavior of a steel structure under natural fire [J]. Fire Safety Journal 2006 41(7): 509- 522.
- [5] TAN K H, TANG Chu- yang. Interaction formula for reinforced concrete columns in fire conditions [J]. ACI Structural Journal 2004 101(1): 19- 28.
- [6] Matteo C, Roberto F. New NDT techniques for the assessment of fire- damaged concrete structures [J]. Fire Safety Journal 2007 42(6/7): 461- 472.
- [7] 李国强, 周煥廷. 火灾(高温)下索网结构计算的连续化方法 [J]. 力学季刊, 2007, 28(4): 638- 646.
LI Guo- qiang, ZHOU Huan- ting. A continuous approach for cable- net structure calculation in fire [J]. Chinese Quarterly of Mechanics 2007 28(4): 638- 646.
- [8] Bennetts I, Moirudd K. Evaluation of the impact of potential fire scenarios on structural elements of a cable- stayed bridge [J]. Journal of Fire Protection Engineering 2009 19(2): 85- 106.
- [9] Shokri M, Beyler C L. Radiation from large pool fires [J]. Journal of Fire Protection Engineering 1989, 1(4): 141- 149.
- [10] 阮欣. 桥梁工程风险评估体系及关键问题研究 [D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2006.
- [11] Priestley M J, Kowalsky M J. Direction displacement- based seismic design of concrete building [J]. Bulletin of the Zealand Society for Earthquake Engineering 2000, 33(4): 421- 444.
- [12] 邹响, 吕西林, 朱杰江. 在某复杂超高层结构中的应用研究 [J]. 工程力学, 2008 25(9): 93- 99.
ZOU Yun, LV Xi- lin, ZHU Jie- jiang. Application study of performance- based aseismic design to a complicated super tall building structure [J]. Engineering Mechanics 2008, 25(9): 93- 99.

(下转第 339 页)

- tong University Natural Science, 2008, 27(Sup 1): 990–993.
- [2] 唐秋生, 谢如鹤. 物流园区建设中存在的问题与对策[J]. 重庆交通大学学报, 2004, 23(3): 107–110
TANG Qi-sheng XIE Ru-he. Problems and countermeasures of logistics park construction[J]. Chinese Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(3): 107–110
- [3] 丁立言. 物流系统工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 桂寿平, 朱强. 系统动态学在区域物流系统研究中的应用[J]. 起重运输机械, 2002, 20(12): 8–12
GU IShou-ping ZHU Qiang. System dynamics research in the area of logistics system[J]. Chinese Journal of Handling Equipment, 2002, 20(12): 8–12.
- [5] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994
- [6] 王之泰. 现代物流学[M]. 北京: 中国物资出版社, 1995
- [7] 钟永光. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [8] 云虹. 物流成本管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010

(上接第 208 页)

- [9] 管乐. 扁平钢箱梁局部构造研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007
- [10] 刘丽萍, 王应良. 南京长江第二大桥南汉主桥流线形薄壁扁平钢箱梁分析的新方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(7): 51–53, 62
LIU Li-ping WANG Ying-liang. New analysis methods of Nanjing Yangtze River second bridge streamline flat thin-walled box girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(7): 51–53

(上接第 216 页)

- [13] Tekie P B, Ellingwood B R. Seismic fragility assessment of concrete gravity dams[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(14): 2221–2240.
- [14] Mackie K R, Stojadinovic B. Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1953–1971
- [15] 李强, 郭军, 夏铃. 公路隧道衬砌火灾后力学行为分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 693–696
LI Qiang GUO Jun XIA Ling. Mechanical behavior analysis on highway tunnel lining after fire hazard[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(5): 693–696

(上接第 245 页)

- [4] Jerome F H, Molodan A, Schiller P H. A distributed plasticity model for cyclic analysis of concrete-filled steel tube beam-columns and composite frame[C] // Proceedings for bridge and structural Association for Bridge and Structural Engineering 1973: 37–52
- [5] HUANG Y H. A computer package for structural analysis of concrete pavements Proceedings[C] // 3rd International conference on concrete Pavement Design and Rehabilitation. West Lafayette: Purdue University, 1985.
- [6] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [7] AASHTO. AASHTO Guide for design of pavement structures[S]. AASHTO, 1986
- [8] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 双层水泥混凝土路面板的温度应力[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 10–12
TAN Zhi-ming YAO Zu-kang LIU Bo-ying. Thermal stress analysis of two-layered concrete slabs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 10–12
- [9] 何兆益, 章佩佳. 复合碾压混凝土路面温度应力分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 540–543
HE Zhao-yi ZHANG Pei-jia. Temperature stress analysis of composite roller compacted concrete pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010, 29(4): 540–543.

(上接第 302 页)

- XU Tao YANG Ba. Control of engine idle speed based fuzzy theory[J]. Beijing Automobile, 2008(6): 31–34.
- [7] 顾建斌, 时凯. 模糊控制在发动机怠速控制中的仿真[J]. 现代车用动力, 2007(3): 29–31.
GU Jian-bin SHI Kai. Application of fuzzy PID controller for idle speed control of engine[J]. Modern Vehicle Power, 2007(3): 29–31.
- [8] 刘海朝, 孙帅. 基于 DSP 的 Fuzzy-PID 发动机怠速控制应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(5): 59–61
LU Hai-chao SUN Shuai. Application of fuzzy-PID control in idle of engine based on DSP[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 30(5): 59–61.
- [9] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001