

# 超大跨度混合梁斜拉桥中跨合龙温度影响及对策

涂光亚<sup>1</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 李亮辉<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.北京市首发高速公路建设管理有限责任公司)

**摘要:**随着大跨径斜拉桥的发展,混合梁斜拉桥的使用越来越多。在混合梁斜拉桥中跨合龙阶段,温度影响不可忽视。该文以湖北石首长江公路大桥(主跨 820 m)为工程背景,分析了合龙温度对最大悬臂状态、成桥状态标高、塔偏、索力、应力等状态参数的影响;分析了在实际合龙温度与设计基准温度不一致的情况下,顶推措施对保证成桥目标状态实现所起的重要作用;介绍了顶推行程和顶推力的计算方法;提出了合龙段焊接期间当温度变化时临时匹配件的受力计算方法。

**关键词:**斜拉桥;中跨合龙;温度;顶推;匹配件

混合梁斜拉桥一般主跨使用钢梁,边跨使用混凝土梁,两者通过连接件及预应力筋或锚杆等结合在一起,使斜拉桥的受力性能、跨越能力、经济性能等方面得到较大改善。对于混合梁斜拉桥,中跨合龙是关键工况,对结构成桥状态能否达到设计所确定的理想目标起着至关重要的作用,需要分析该工况下各个参数值的影响,其中温度是影响混合梁斜拉桥中跨合龙的一个重要因素。为了克服温度的不利影响,目前大跨度混合梁斜拉桥中跨合龙通常采用温度配切合龙工艺与顶推合龙工艺。温度配切合龙工艺即通过合龙口长度以及温度的连续监测,考虑合龙温差的影响,对合龙段进行切割后完成合龙;顶推合龙工艺即根据合龙温度变化,通过千斤顶纵向顶推主梁调整合龙口实现中跨合龙。该文以湖北石首长江公路大桥为例,详细介绍采用顶推合龙工艺时合龙温度对成桥受力性能及合龙施工的影响。

## 1 温度影响及对策

温度影响包括均匀温度影响和梯度温度影响,但由于中跨合龙段的施工通常选择在温度稳定的时间段进行,因此合龙时的温度影响实际上主要还是均匀温度影响。合龙施工期间的温度对结构的影响主要包括两个方面:①对成桥状态参数有影响,由于合龙时的温度与设计基准温度不一致,使得成桥时在设计基准

温度下斜拉桥的塔偏、标高、索力等会显著偏离目标值;②对合龙段临时匹配件的受力有影响,应根据合龙时可能的温度变化计算临时匹配件的最大受力,据此来对临时匹配件进行合理设计,确保合龙段焊缝的焊接质量。

对于成桥状态参数的影响主要是因为在合龙前的最大悬臂状态,均匀的温升温降只对梁长、合龙口的宽度有影响,而对于索力、标高、塔偏、应力等的影响较小,而在合龙完成后,均匀的温升温降会显著影响结构的塔偏和标高。由于合龙前的标高、塔偏与理论值是吻合较好的,这样当合龙后温度回到设计基准温度时,结构的塔偏和标高就会与理论值发生偏离。另外,合龙前温度对合龙口宽度的影响也会导致合龙段的长度与合龙口宽度不匹配从而使得合龙段嵌入困难或嵌入后焊缝宽度过大而无法进行焊接施工。对于混合梁斜拉桥,目前常用的对策是在钢主梁的塔梁之间设置双向顶推装置,通过合龙时的温度差确定顶推方向和计算相应的顶推量,这样可以一揽子解决合龙段的施工及合龙温度对成桥状态参数的影响问题。由于温度的变化对桥梁结构的内力和线形有很大的影响,在钢结构中更为突出,顶推施工适用于外界温度相对比较稳定的情形,不适用于温度骤然变化的情形。

合龙温度对合龙段临时匹配件的影响主要是指临时匹配件也是合龙段在焊接过程中的临时锁定装置,合龙段的焊接需要一定的时间(通常需要 24~48 h),

收稿日期:2019-11-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678068,51878073)

作者简介:涂光亚,男,博士,副教授.E-mail:328354390@qq.com

在此期间,如果温度升高或降低,则临时匹配件会受压或受拉,如果拉压力超过了临时匹配件的强度,则临时匹配件会发生破坏,从而影响合龙段焊缝的焊接质量。因此需要根据温度影响量对临时匹配件的最大受力进行计算,并据此合理设计临时匹配件的结构形式、尺寸和数量。

## 2 工程实例

石首长江公路大桥为半漂浮结构体系,主桥采用双塔混合梁斜拉桥,桥跨布置为 $(75+75+75)\text{ m}+820\text{ m}+(300+100)\text{ m}$ 。主桥索塔采用收腿倒Y形,北边跨主梁为预应力混凝土箱梁,南边跨和中跨主梁为钢箱梁,钢混结合面位于北塔附近。主梁均为分离式双边箱PK箱梁断面,箱梁全宽38.5 m,到索塔区缩小到35.98 m,钢箱梁高3.8 m,混凝土梁高3.822 m。主桥斜拉索采用强度为1 770 MPa的低松弛高强平行钢丝束,索面呈扇形分布,顺桥向标准间距15 m,混凝土箱梁段、钢箱梁段的标准间距分别为7.5、12 m,全桥共有 $4\times 26$ 对斜拉索。中跨合龙段(J梁段)长为12.4 m,吊装重量249.1 t。桥型布置如图1所示。

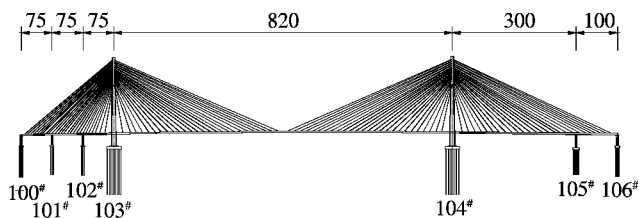


图1 石首长江公路大桥桥型布置图(单位:m)

在对中跨合龙计算分析时首先要对合龙时间和温度进行预估。石首长江公路大桥中跨合龙时间为2019年4月7日至9日,根据桥位处天气预报,在该时间段内,大气温度为 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而石首长江公路大桥设计基准温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此应对合龙温度影响进行全面计算并采取相应的应对措施。

### 2.1 计算模型

石首长江公路大桥采用平面杆系程序BDCMS进行理论计算分析,全桥共有552个节点,670个单元。斜拉索的单元类型为两端带刚臂的索单元,主塔和主梁为普通梁单元,钢混结合段及混凝土梁段支架的单元类型为只受压的桁架单元。大桥根据实际施工过程共划分了31个大工况,185个小工况。

### 2.2 合龙温度对合龙口宽度、标高和塔偏的影响

在合龙前的最大悬臂状态根据实际温度情况进行

温度影响分析,由于主桥合龙时大气温度为 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与设计基准温度的温差为 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,经理论计算,在最大悬臂状态温度影响计算结果如表1所示。

表1 最大悬臂状态温度影响结果

温度变化工况	合龙口 宽度/ mm	最大悬臂 处前端标 高/mm	北塔塔 偏/mm	南塔塔 偏/mm
整体升温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	-96.5	-9.9	4.7	0
整体升温 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$	-48.3	-6.3	2.9	0

由表1可知:合龙温度对最大悬臂状态的影响主要是合龙口宽度,对于主梁标高、塔偏的影响较小,对于主梁应力及索力的影响也比较小(限于篇幅,应力与索力的计算结果没有列出)。

### 2.3 对成桥状态参数的影响

按 $20、25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 合龙施工试算至成桥,然后将温度回到设计基准温度( $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),所得成桥状态与目标成桥状态标高、索力、应力偏差如图2~4所示;北塔塔偏偏差最大为0.3 mm,南塔塔偏偏差最大为99.3 mm。

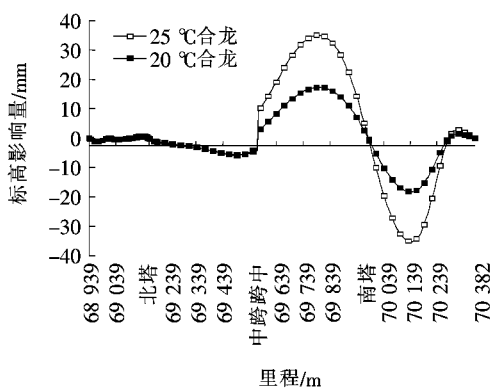


图2  $25、20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 合龙对主梁标高的影响

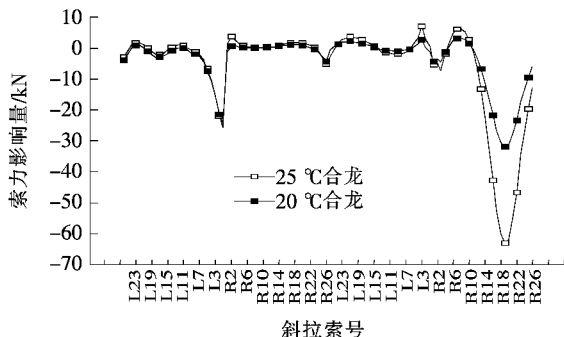


图3  $25、20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 合龙对成桥索力的影响

由图2~4可知:合龙温度与设计基准温度不一致对成桥钢主梁部分主塔的塔偏影响最大,其次是主梁标高,对索力、应力影响较小。当在 $20、25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下合龙时

对南塔塔偏的影响最大为 99.3 mm,对主梁标高的影响最大为 35 mm,对索力的影响最大为-65 kN,对应力的影响最大为 3.6 MPa。由此可见,如果不采取相关举措,最后得到的成桥状态塔偏和标高会显著偏离目标状态。

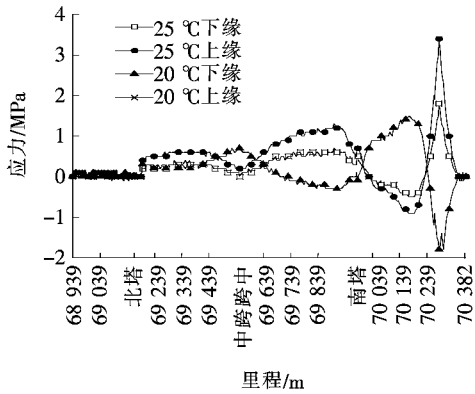


图 4 25、20 °C 合龙对钢箱梁上、下缘应力的影响

2.4 顶推措施

为了克服合龙温度对成桥目标参数的影响,在钢箱梁的塔梁之间设置顶推装置,顶推方向与温度影响的方向相反。当合龙温度比设计基准温度高时将主梁往边跨方向顶推,当合龙温度比设计基准温度低时将主梁往中跨方向顶推。顶推的行程理论上与温度对合龙口宽度的影响量相等即可。对于石首长江公路大桥假设按 25 °C 合龙来计算,由表 1 可知:顶推量为往边跨方向顶推 96.5 mm。确定了顶推量可通过施工控制有限元计算模型算得相应的顶推力。顶推力主要由以下 3 部分组成:支座摩阻力,当前状态下中、边跨水平不平衡索力和因顶推行程所引起的中、边跨水平不平衡索力增量。

在合龙段起吊前南塔钢箱梁部分各墩的支座反力如表 2 所示。

表 2 合龙段起吊前各墩支座反力			kN
104# 墩	105# 墩	106# 墩	
6 857	5 583	5 076	

由表 2 可知:南塔总的竖向力为 6 857+5 583+5 076=17 516 kN,取摩擦系数为 0.05,则需要克服的摩擦力为 17 516×0.05=875 kN。

由施工控制仿真计算模型结果可知:当前状态下中、边跨水平不平衡索力为 1 761 kN,方向为向中跨方向。

经试算,顶推行程与顶推力的关系为 11.45 kN/mm,则当顶推行程为 96.5 mm 时,需要的顶推力

增量为:11.45×96.5=1 105 kN。也就是由 96.5 mm 的顶推行程会引起新的中、边跨水平不平衡索力增加 1 105 kN。

则总的顶推力为:875+1 761+1 105=3 741 kN。

在合龙前将结构升温 10 °C,然后去掉南塔临时固结,对南塔主梁施加向边跨的顶推力 3 741 kN,经合龙施工后,在成桥时将结构降温 10 °C,所得成桥状态与目标成桥状态相比,北塔塔偏偏差为 0.2 mm,南塔塔偏偏差为-0.2 mm,标高、索力、应力偏差见图 5~7。

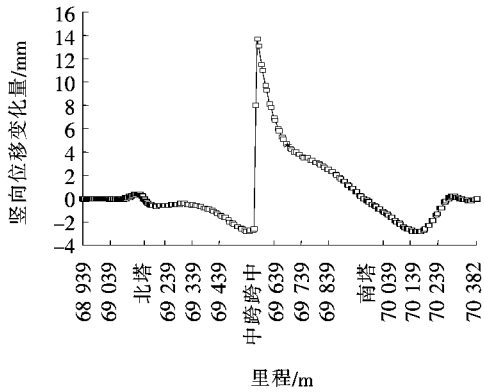


图 5 主梁标高偏差

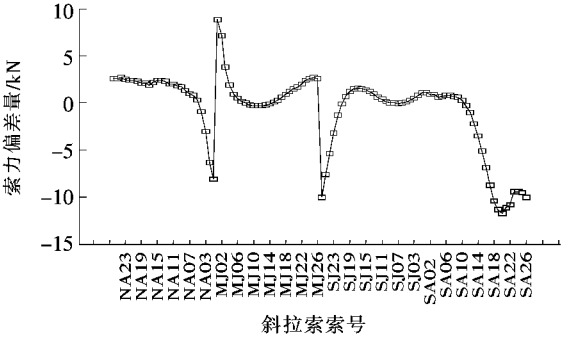


图 6 斜拉索索力偏差

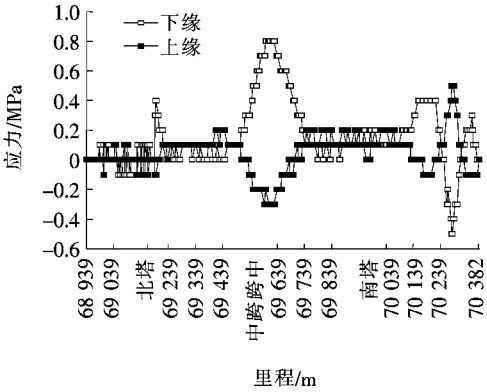


图 7 主梁应力偏差

由图 5~7 可知:在对主梁进行合理顶推之后,虽然合龙温度与设计基准温度不一致,但所得成桥状态

与目标成桥状态的偏差已非常小,对于塔偏的影响为 0.2 mm,对于标高的影响为 13.7 mm,对于索力的影响为 -12 kN,对于上缘应力的影响为 0.5 MPa,对于下缘应力的影响为 0.8 MPa,合龙温度对成桥状态参数的影响基本可以忽略不计。

### 2.5 温度对临时匹配件的影响

合龙段焊接施工期间,当温度变化时,其受力主要由临时匹配件来承担。温度升高承受压力,温度降低承受拉力。合龙段焊接施工时间通常为 24~48 h。假设这段时间的最不利温度变化为  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可据此算出临时匹配件的最大受力。当钢箱梁与主塔之间的纵向约束解除之后,临时匹配件的受力也由 3 部分组成:温度位移所引起的支座摩阻力,当前状态下中、边跨水平不平衡索力和因顶推行程所引起的中、边跨水平不平衡索力增量。

当温度变化为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,临时匹配件的受力为:  
 $-96.5 \times 2 \times 11.45 + 1\ 761 - 875 = -1\ 324\text{ kN}$ (拉力)。

当温度变化为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,临时匹配件的受力为:  
 $96.5 \times 2 \times 11.45 + 1\ 761 + 875 = 4\ 846\text{ kN}$ (压力)。

当钢箱梁与主塔之间存在纵向约束时,临时匹配件的受力可按以下公式进行估算:

$$F = \epsilon_t E_s A_s \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_t$  为温度应变;  $E_s$  为钢的弹性模量;  $A_s$  为钢箱梁的面积。

当温度变化  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $F = 1.2 \times 10^{-5} \times 20 \times 2.1 \times 10^{11} \times 1.696 = 19\ 382\text{ kN}$

石首长江公路大桥合龙段临时匹配件的布置如图 8 所示。

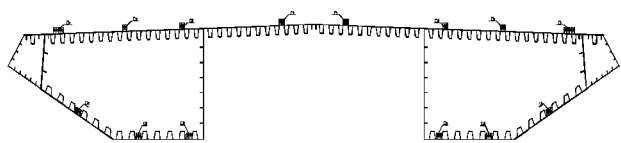


图 8 合龙段临时匹配件布置图

由图 8 可知:合龙段临时匹配件在顶板布置了 8 套,在底板布置了 6 套。每套临时匹配件包含 M24 高强螺栓 6 个,按单个高强螺栓的极限承载力为 200 kN 计算,则全部临时匹配件的受拉承载力为:  $14 \times 6 \times 200 = 16\ 800\text{ kN}$ ,与高强螺栓匹配的连接筋板和顶底板之间焊缝的承载力不小于高强螺栓的受拉承载力,因此全部临时匹配件的受压承载力不会小于 16 800 kN。由于  $4\ 846\text{ kN} < 16\ 800\text{ kN} < 19\ 382\text{ kN}$ ,可见当临时匹配件连接之后,应迅速解除钢箱梁与主塔之间的纵向约束和顶推千斤顶,这样临时匹配件的拉压承载力

远大于由温度所引起的拉压力荷载,临时匹配件在合龙段焊缝施工期间受力安全。否则,如果钢箱梁与主塔之间的纵向约束不及时解除,临时匹配件将有可能因受力过大而破坏,从而影响合龙段焊缝的焊接质量。

### 3 结论

(1) 当回避梯度温度影响时,在中跨合龙前的最大悬臂状态,实际合龙温度与设计温度不一致主要影响合龙口的宽度,对该状态下的标高、索力、塔偏、应力影响不大。

(2) 如果不采取任何措施,实际合龙温度与设计基准温度不一致主要影响目标成桥状态塔偏,其次是标高,对索力和应力影响不大。

(3) 按精确计算的顶推行程进行顶推施工后,能大大降低实际合龙温度与设计基准温度不一致对成桥状态塔偏、标高、索力和应力的影响,对塔偏效果最好,标高次之,索力和应力误差也进一步减小。

(4) 合龙段临时匹配件通常也是合龙段临时锁定装置,应对其进行受力分析;在临时匹配件连接完之后,宜迅速解除钢箱梁部分塔梁临时纵向约束,防止合龙段焊接期间由于温度变化而使临时匹配件受力超限发生破坏。

### 参考文献:

- [1] 魏一绍.独塔混合梁斜拉桥施工过程分析[D].西南交通大学硕士学位论文,2015.
- [2] 谢鸿.独塔单索面混合梁斜拉桥钢-混结合段模型试验设计与分析[D].湖南大学硕士学位论文,2012.
- [3] 徐国平,刘高,吴文明,等.钢-混凝土结合部在桥梁结构中应用新进展[J].公路,2010(2).
- [4] 孙建渊,尹成章.大跨度部分斜拉桥施工控制温度效应影响研究[J].城市道桥与防洪,2014(9).
- [5] 李海岗,熊起,陈远久,等.温度效应对含有叠合梁段混合梁斜拉桥主梁受力行为的影响[J].中外公路,2018(2).
- [6] 王超,李振珂.钢箱梁斜拉桥无压重配切合龙关键技术研究[J].四川建材,2016(6).
- [7] 李慧敏.钢箱梁顶推施工安全性分析[D].北京交通大学硕士学位论文,2014.
- [8] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学报,2016(2).
- [9] 王进军,胡永波.钢-混结合梁斜拉桥中跨合龙施工及敏感性分析[J].施工技术,2018(9).
- [10] 李伟,冯仲仁.独塔混合梁斜拉桥合龙控制分析[J].中外公路,2018(4).