

# 钢管砼拱桥主弦管煨弯非线性稳定分析

罗 鸣,<sup>1\*</sup> 刘小渝,<sup>1</sup> 王学勤<sup>2</sup>

(1. 重庆交通学院, 重庆 400074; 2. 河南省平顶山市交通局质监站, 河南平顶山 467000)

**摘要:** 通过大型通用软件 ANSYS 对不同温度、不同管径及不同径厚比的钢管砼拱桥主弦管的煨弯加工过程进行了非线性稳定分析, 找到了主弦管煨弯过程中发生局部鼓包现象的原因, 得到主弦管煨弯失稳的判据, 以此建立了以截面弯矩为加载控制指标的煨弯控制方法。

**关键词:** 钢管砼拱桥; 煨弯; 有限元; 非线性稳定分析

**中图分类号:** U448.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-716X(2004)04-0001-03

从 1990 年我国第一座钢管砼拱桥——四川旺苍东河大桥建成以来, 钢管砼拱桥在我国得到了很大的发展。同时, 对钢管砼拱桥的施工质量也提出了更高的要求。拱肋是钢管砼拱桥的主要受力构件, 它的制作质量和精度直接关系到整座成桥的质量。在拱肋节段的制作过程中, 主弦管的加工是一个重要的环节, 又是拱肋制作过程中的首要工序和难点之一。到目前为止, 主弦管的制作方法主要有: “以直代曲”法和热煨弯成型法。“以直代曲”法焊接工作量大、成本较高且工期较长; 而热煨弯成型法则广泛应用于拱肋工厂制作和施工现场制作, 在运输条件受到限制的地区, 更能发挥出它灵活、方便、经济的优势。然而主弦管煨弯时受力复杂, 加工精度控制难度大, 为了保证施工质量, 有必要对主弦管在热煨弯时的受力及变形特性进行分析, 确定主弦管热煨弯过程中温度的合理分布及加载方式, 以此来指导主弦管煨弯施工。

## 1 主弦管热煨弯工艺简介

钢管砼拱桥的主弦管, 通常是在工厂卷制、焊接成直钢管, 再运到施工现场或煨弯工厂进行制作。由于运输条件限制, 直钢管长度一般不超过 12m。在施工现场采用热煨弯加工钢管时, 常采用两端下压方式进行加载(图 1)。首先按拱肋的设计线形和估算的回弹量制作好胎模, 然后将置于胎模上的主弦管从中间对称分为若干段(通常为 1m 左右)加热, 当加热到一定温度时, 两端开始对称加力下压, 以此来产生塑性变形, 达到弯曲成型的目的。以每段为一加

热周期, 循环加热下压, 使主弦管逐步变形到位。常用加热方式有火焰加热法、陶瓷片加热法和中频感应加热法。不论用何种方式加热, 在实际煨弯过程中, 经常出现受压区局部鼓包及受拉区被拉薄的现象。为此, 笔者用通用软件 ANSYS 对主弦管煨弯失稳全过程进行了分析, 以了解导致这一现象的原因。

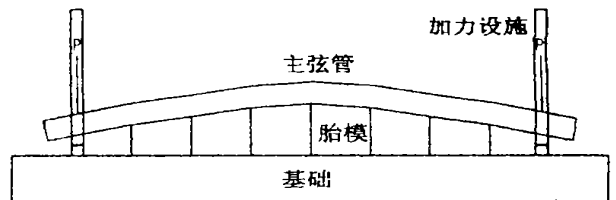


图 1 主弦管煨弯工艺示意

## 2 主弦管煨弯非线性失稳判据的建立

### 2.1 有限元模型的建立

在对主弦管煨弯失稳分析进行建模时, 主弦管采用欧洲规范 EUROCODE3 提供的材料模型, 它考虑了钢材在高温下的蠕变特性, 能得出 1200℃内钢材的应力应变关系曲线。使用六面体等参单元进行网格划分。根据图 1 所示的对称性, 建模时主弦管只取一半进行计算, 简化成一端固接, 一端自由的模型。为了让计算简化、可行, 又能考察在不同温度下主弦管煨弯失稳的发展过程, 遂从固接端向自由端取一个加热循环段(这里取 1m)考虑, 加上所要计算的温度, 且从自由端向固接端取 0.2m 作为荷载施加段。为了避免管口局部失稳, 实际制作过程中这里通常局部设有刚性隔板, 因此计算中此段主弦管弹

\* 收稿日期: 2003-11-24

作者简介: 罗 鸣(1977—), 男, 四川内江人, 硕士生, 从事桥梁及结构工程研究。

性模量取为较大值,在距自由端 0.1m 处施加一垂直向下的集中力作为荷载.计算时考虑材料非线性和几何非线性,利用弧长迭代法追踪主弦管失稳前后的受力、变形过程.

2.2 主弦管煨弯失稳全过程分析

通过计算,可以得到主弦管煨弯过程中自由端最大位移与截面弯矩的关系曲线,如图 2 示,同时,还可以形象地看到其局部失稳时鼓包的形态,如图 3.图 2 曲线的 OA 段表明随着截面弯矩的增加,自由端挠度也增加,且整个过程呈非线性变化关系.分析还表明,主弦管在煨弯时,上缘受拉,下缘受压,由于下缘局部压力达到了临界点,导致局部失稳,发生鼓包现象,此时主弦管已进入弹塑性状态.随着荷载的增大,鼓包现象继续发展,当鼓包达到 4 ~ 7mm 时,材料沿截面高度大部分进入塑性状态,从而导致主弦管整体失稳(图 2 的 A 点),之后主弦管就进入了如图 2 曲线的 AB 卸载段,随着荷载的减小自由端位移却不断增加直至破坏.

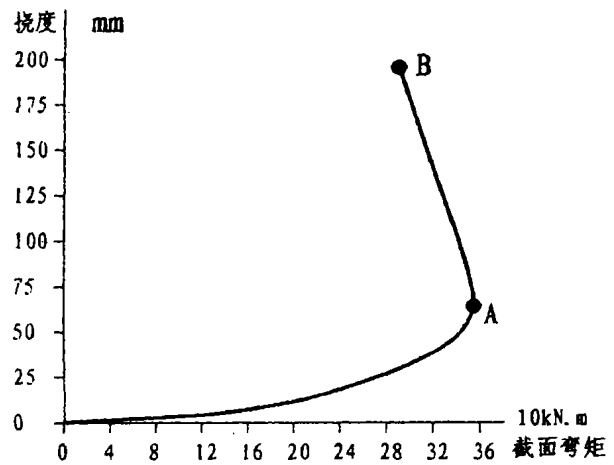


图 2 主弦管失稳全过程截面弯矩 — 挠度关系曲线

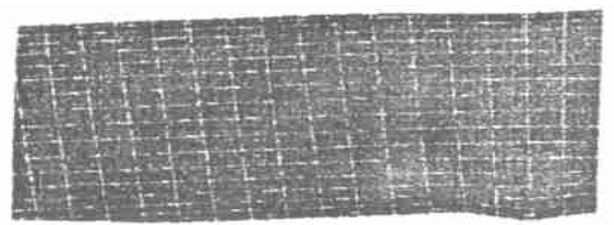


图 3 主弦管失稳时下缘受压区鼓包情况

2.3 失稳判据的确立

在两端加压煨弯方式中,主弦管除了受到弯矩作用外,还受到剪力的作用.通过大量的计算分析表明,主弦管的煨弯失稳主要与其截面受到的弯矩有关,而与截面的剪力关系不大.现以 800℃ 时,直径为 700mm,厚度为 10mm 的不同长度的主弦管为例进行计算.其计算结果见表 1.由表中结果可见,在剪

力相差较大的情况下,主弦管失稳时其截面弯矩相差甚小,几乎可以忽略,可见,截面弯矩是影响主弦管失稳的主要原因,因此,笔者选用截面弯矩作为主弦管煨弯失稳的判据.

表 1 截面剪力对主弦管失稳的影响

失稳荷载(10 <sup>4</sup> N)	力臂(m)	剪力(10 <sup>4</sup> N)	弯矩(10 <sup>4</sup> N.m)
6 10	2 75	6 10	16 78
3 56	4 75	3 56	16 90
2 51	6 75	2 51	16 93
1 94	8 75	1 94	16 94
1 44	11 75	1 44	16 95

3 主弦管煨弯控制弯矩

通过分析表明,主弦管在煨弯过程中,一旦超过失稳弯矩,则会进入破坏阶段,而使变形无法控制,因此在加载时不能以失稳弯矩作为控制弯矩.通过大量的计算结果表明,主弦管失稳时鼓包一般在 4mm ~ 7mm 之间,因此笔者选用了鼓包为 1mm 时的截面弯矩作为控制弯矩.

为了对煨弯时加载的大小进行量化控制,笔者计算出了不同管径、不同径厚比在不同温度下的失稳弯矩和控制弯矩,旨在指导施工,得到其曲线回归公式如下:

$$M = e^a (d/t)^b$$

其中,  $M$ —— 单位为  $10^4 \text{N.m}$ ;  $t$ —— 主弦管厚度,  $d$ —— 直径;  $a$ 、 $b$  —— 参数,与管径、温度有关,其变化情况见表 2.

为了形象的说明失稳弯矩和控制弯矩与温度、

表 2 参数  $a$ 、 $b$  取值表

温度(℃)	管径 $d(\text{mm})$	失稳弯矩(鼓包约 4 ~ 7mm)		控制弯矩(鼓包 1mm)	
		$b$	$a$	$b$	$a$
800	500	-1.0117	6.1157	-1.0291	6.1020
	600	-1.0318	6.7430	-1.1223	6.9928
	650	-1.0290	6.9700	-1.0222	6.8510
	700	-1.0355	7.2180	-1.1617	7.6158
	750	-1.0401	7.4413	-1.1959	7.9683
	800	-1.0494	7.6702	-1.1649	8.0350
	850	-1.0604	7.8964	-1.2655	8.6486
	900	-1.0717	8.1132	-1.1299	8.2405
	950	-1.0820	8.3173	-1.1544	8.5031
	1000	-1.0761	8.4461	-1.1773	8.7521
700	500	-1.0153	6.8607	-1.1133	7.1427
	600	-1.0391	7.5017	-1.2756	8.3356
	650	-0.9941	7.5483	-1.1713	8.1269
	700	-1.0425	7.9604	-1.2008	8.4737
	750	-1.0455	8.1770	-1.2271	8.7904
	800	-1.0501	8.3870	-1.2677	9.1606
	850	-1.0606	8.6107	-1.3282	9.6009
	900	-1.0737	8.8344	-1.1828	9.1585
	950	-1.0860	9.0462	-1.1845	9.3220
	1000	-1.0819	9.1826	-1.2280	9.6549

温度(℃)	管径 <i>d</i> (mm)	失稳弯矩(鼓包约 4 ~ 7mm)		控制弯矩(鼓包 1mm)	
		<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>
600	500	-1.0127	7.5687	-0.9774	7.3568
	600	-1.0353	8.2053	-1.2456	8.9454
	650	-0.9867	8.2367	-1.1526	8.7860
	700	-1.0391	8.6637	-1.1835	9.1352
	750	-1.0431	8.8842	-1.2164	9.4806
	800	-1.0463	9.0886	-1.2519	9.8280
	850	-1.0551	9.3056	-1.2211	9.8862
	900	-1.0675	9.5260	-1.1299	9.6763
	950	-1.0790	9.7345	-1.1731	10.0103
	1000	-1.0750	9.8713	-1.1950	10.2532

注: 若实际温度在表中温度之间的, 可以计算出失稳弯矩和控制弯矩后按温度线性插值.

管径和径厚比的关系, 这里分别以直径为 800mm 和径厚比  $d/t$  为 50 的主弦管为例, 作出失稳弯矩、控制弯矩和径厚比的关系如图 4; 失稳弯矩、控制弯矩与主弦管管径的关系如图 5.

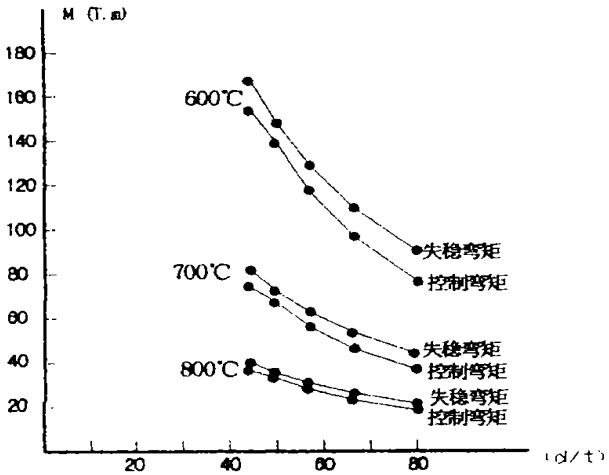


图 4  $d = 800\text{mm}$  主弦管在不同温度下失稳弯矩和控制弯矩与径厚比的关系

4 结 论

- 根据以上结果可以得到:
- 1) 当主弦管管径、径厚比一定时, 主弦管煨弯失稳弯矩随着温度的升高而减小; 当主弦管管径、温度一定时, 主弦管煨弯失稳弯矩随着径厚比的增加而增大; 当温度、径厚比一定时, 主弦管煨弯失稳弯矩随着管径的增加而增大.
  - 2) 当主弦管分段长度达到 12m, 煨弯温度为

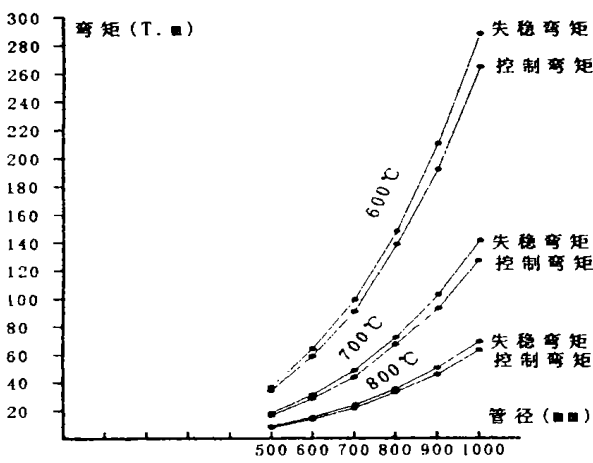


图 5  $d/t = 50$  时不同温度下失稳弯矩和控制弯矩与管径的关系

800℃时, 主弦管几乎在自重作用下就会失稳, 因此煨弯温度不宜超过 800℃.

3) 随着温度的升高, 钢材的弹性极限减小, 为了使主弦管在煨弯过程中塑性变形均匀, 应尽量使温度的分布与弯矩的增大方向相反, 即弯矩大的截面温度控制到较低, 弯矩小的截面温度控制到较高.

4) 在实际煨弯时, 应保证各截面的最大弯矩都不超过控制弯矩, 以确保不发生失稳及过大的鼓包现象. 同时, 由于温度分布难以和弯矩变化相符, 因此加载时建议分级加载, 控制加载速度, 以免局部高温区的弯矩达到或超过失稳弯矩, 造成鼓包过大甚至失稳的现象.

此外, 现场进行主弦管煨弯加工时, 还要注意胎膜的刚度和制作精度, 以及加载时力和位移的测试, 以确保制作质量.

参考文献:

- [ 1 ] 李国强, 蒋首超, 林桂祥. 钢结构抗火计算与设计[ M ]. 北京: 中国建筑出版社, 1999.
- [ 2 ] 沈世钊, 陈 昕. 网壳结构稳定分析[ M ]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [ 3 ] 何 华, 王劫耘. 几种钢管拱肋弯制方法的对比及其技术的探讨[ J ]. 广西交通科技, 2000, 25( 增刊 ): 22-25.
- [ 4 ] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[ M ]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [ 5 ] 何树民. 大型钢管拱桥拱肋的煨弯工艺[ J ]. 铁道建筑, 2000, ( 6 ): 14-15.

(下转 18 页)

**Key words:** channel girder bridge; pavement of bridge deck; reinforce and repair

责任编辑:袁本奎

(上接 3 页)

**Non-linear stability analysis for process of heat treated  
chord member for arch-bridge of CFST**

LUO Ming,<sup>1</sup> LIU Xiao-yu,<sup>1</sup> WANG Xue-qin<sup>2</sup>

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. The Supervising Department of  
Communication Bureau of Pingdingshan City, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** The process of heat treated chord member for arch-bridge of CFST are analyzed by non-linear stability analysis through “ANSYS”. With disparate temperature, diameter and diameter-thickness ratio, the discriminant for buckling moment is found out. From this, the method of heat treated chord member for arch-bridge of CFST is suggested.

**Key word:** arch-bridge of CFST; heat treatment; FEA; non-linear stability analysis

责任编辑:袁本奎

(上接 11 页)

**Application of TL2000 road strengthen dose to the preventive maintenance  
project for Chongqing Egongyan bridge’ s deck**

HU Juan, ZHOU Shui-xing, FAN Cao-yuan

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** This essay has introduced the main characteristics of TL2000 road strengthen dose and its construction method, and its application on Chongqing Egongyan bridge’ s deck project. Measured data expresses that TL2000 strengthen dose, which is applicable to the preventive maintenance of deck of steel box beam, can improve effectively anti-pemeability of deck.

**Key words:** TL2000 road strengthen dose; preventive maintenance of deck; pemeability coefficient; antiskid factor; Chongqing Egongyan bridge

责任编辑:袁本奎