

# 高温下无黏结预应力混凝土中钢绞线预应力的损失

袁广林<sup>1,2</sup> 李庆涛<sup>2</sup> 吕志涛<sup>3</sup> 黄方意<sup>4</sup>

(1. 东南大学博士后流动站, 江苏 南京 210096; 2. 中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221008;  
3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 福州经济技术开发区建筑设计研究院, 福建 福州 350004)

**摘要** 对高温作用下无黏结预应力混凝土中钢绞线的预应力损失进行了试验研究, 根据试验结果分析了高温作用下产生预应力损失的主要因素, 并建立了高温作用下无黏结预应力混凝土结构预应力损失的计算模型. 结果表明: 在高温作用下, 预应力混凝土结构会产生预应力损失, 钢绞线的预应力损失随温度的升高而增大, 试件完全冷却后, 钢绞线的预应力损失会有所恢复, 但钢绞线经历的温度越高, 其恢复值就越小. 受高温作用的预应力构件产生附加预应力损失的主要因素有高温作用下预应力钢筋的松弛和蠕变、混凝土的高温徐变和钢筋与混凝土的热膨胀差. 高温作用下无黏结预应力混凝土结构预应力损失的计算模型可为无黏结预应力混凝土结构的抗火设计和火灾后预应力混凝土结构的评估提供参考.

**关键词** 高温; 预应力混凝土; 钢绞线; 预应力损失

中图分类号: TU528.571 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2006)01-0088-04

预应力损失的计算是预应力混凝土结构设计的重要内容. 在进行高温作用下预应力混凝土结构的抗裂度、挠度及剪、弯承载力计算时都会涉及预应力损失的计算, 因此了解及计算高温作用下预应力损失对研究预应力混凝土结构及构件的高温性能具有十分重要的意义. 已有研究<sup>[1-2]</sup>表明, 受高温作用的预应力构件, 由于高温作用下预应力钢筋的松弛和蠕变、混凝土的膨胀和收缩、钢筋与混凝土热膨胀差异的影响以及这些因素的相互作用, 将会产生预应力损失. 由于预应力结构的复杂性以及试验技术等方面的原因, 目前的研究成果主要集中在高温对预应力钢绞线性能的直接作用方面<sup>[3-6]</sup>, 尚未考虑其他因素对高温作用下无黏结预应力混凝土结构预应力损失的影响. 笔者对高温作用下无黏结预应力混凝土中钢绞线的预应力损失进行了试验研究. 本文根据试验结果分析了高温作用下产生预应力损失的主要因素, 并建立了高温作用下无黏结预应力混凝土结构的预应力损失计算模型.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

混凝土材料采用石灰岩骨料混凝土, 骨料粒径为 5~25 mm, 水泥为 42.5 强度等级的普通硅酸盐水泥. 混凝土水灰比为 0.36, 配合比为  $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{砂}):m(\text{石})=1:0.36:1.01:2.62$ . 混凝土 28 d 实测抗压强度为  $f_{cu}=40.8$  MPa. 钢绞线为 7 $\Phi$ 15.2 高强低松弛无黏结预应力钢绞线, 常温下实测强度标准值为  $=1.87$  GPa. 混凝土试件尺寸为  $b \times h \times l=150$  mm  $\times$  150 mm  $\times$  600 mm, 内置预应力钢绞线, 钢绞线总长为 1.2 m.

### 1.2 试验装置及分组

试验装置如图 1 所示, 张拉钢绞线设备为 YCN-25 前卡式千斤顶, 一端张拉, 一端固定. 锚具为双夹片式单孔锚具.

加热试验采用的电炉为中国矿业大学建筑结构与材料实验室研发的 ES-001 型节能试验电炉, 试件加热段长度为 400 mm, 加热升温速度约为 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . 试验温度及升温速度由与电炉配套的控温柜进行控制.

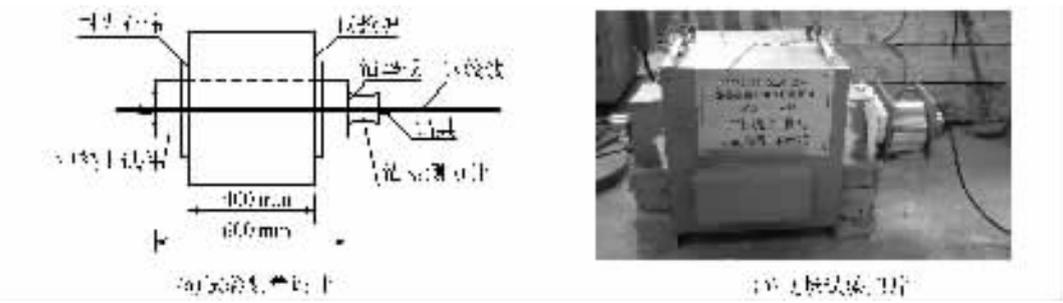


图 1 高温作用下混凝土中钢绞线预应力损失试验装置

Fig.1 Test equipment of prestressing loss of steel cable at high temperature

预先在混凝土中钢绞线处理设热电偶,以测量试件受热时钢绞线处的温度.测钢绞线预拉力的仪器为金坛市传感器厂制造的 JDMSJ—202 型锚索测力计.该锚索测力计内直径 60 mm,外直径 110 mm,高 105 mm,安装在张拉端.安装时钢绞线从锚索测力计中心穿过.测力计位于锚垫板和锚具之间.

对钢绞线进行张拉,张拉控制应力均为  $0.75f_{pk}$ .然后将试件放置到加热装置中加热升温,当温度上升到一定值时,再恒温 1 h.试验试件分组及测得的钢绞线处最高温度如表 1 所示.

表 1 试验试件分组及钢绞线处最高温度

Table 1 Group of specimens and the highest temperature of steel cable

试件编号	升温时间/min + 恒温时间/min	有效预应力 $p_0$ /kN	最高炉温/°C	钢绞线处最高温度/°C
H <sub>1</sub>	25 + 60	69.0	250	105
H <sub>2</sub>	25 + 60	96.2	250	110
H <sub>3</sub>	25 + 60	78.3	250	93
H <sub>4</sub>	45 + 60	68.0	450	189
H <sub>5</sub>	45 + 60	67.7	450	210
H <sub>6</sub>	45 + 60	92.3	450	201
H <sub>7</sub>	65 + 60	101.8	650	315
H <sub>8</sub>	65 + 60	100.6	650	305
H <sub>9</sub>	65 + 60	65.6	650	326

## 2 试验结果与分析

试验中记录电炉温度、钢绞线预应力的变化值,试验结果如图 2 和表 2 所示.图中  $p_t$  为温度  $t$  时钢绞线中的有效预拉应力,  $p_0$  为常温下钢绞线中的预拉应力.

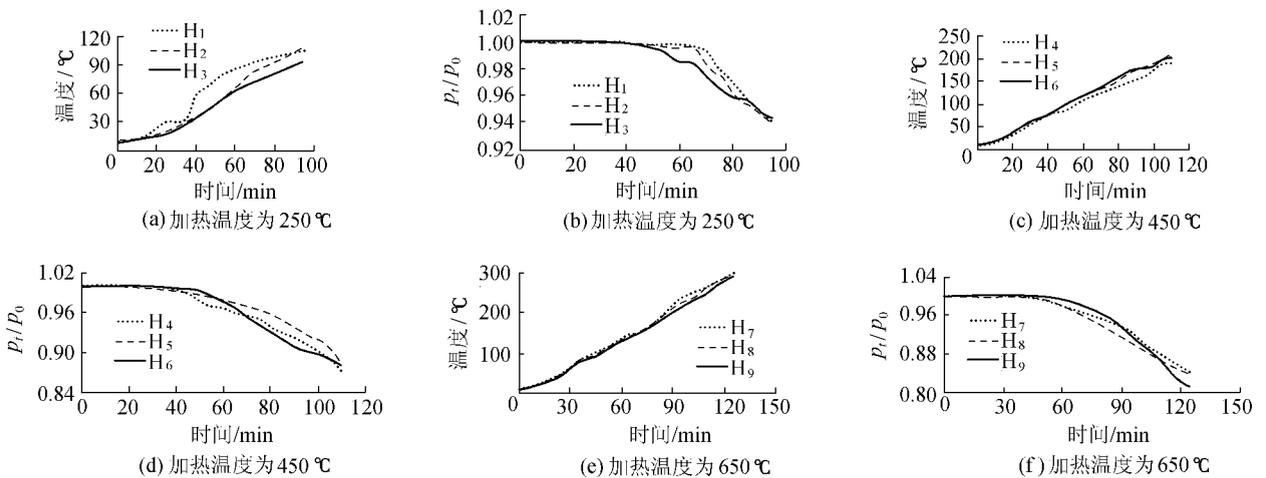


图 2 不同加热温度时钢绞线处的温度及钢绞线预应力随时间的相对变化曲线

Fig.2 Curve of temperature and prestress of steel cable at different heating temperatures

从图 2 可以看出,在高温作用下,预应力混凝土结构中会产生附加预应力损失,钢绞线的预应力损失随温度的升高而增大.温度为 100°C 左右时,钢绞线的预应力损失约为 6%,预应力损失较小;当温度达到 200°C 时,钢绞线的预应力损失约为 12%;当温度达到 300°C 时,钢绞线的预应力损失约为 17%.从图 2 还可以看出,在试验升温过程中,钢绞线预应力损失并不是很大,因为此时钢绞线处的温度还未达到最高温度,在恒温段时钢绞线处的温度达到最大,预应力损失开始明显变大.此外,钢绞线达到的最高温度越高,其预应力损失率就越大.

从表 2 可以看出:当试件完全冷却后,钢绞线预应力损失将有一定量的恢复,但是钢绞线所经历的温度

越高,其恢复值就越小;在同一个温度水平时,大多数情况下,钢绞线的有效预应力越大,则其最高温度时的预应力损失率和完全冷却后的预应力损失率就越大。

### 3 高温引起的预应力损失

#### 3.1 高温引起的预应力损失分析

受高温作用的预应力构件,热变形和预应力混凝土弹性模量的变化、预应力筋的蠕变、混凝土的徐变等因素将造成预应力损失<sup>[2]</sup>。

##### 3.1.1 高温作用下预应力钢筋的松弛和蠕变引起的预应力损失

在高温作用下,由于预应力筋处于高应力状态,必然导致高温作用下钢绞线的蠕变和松弛锐增,造成预加应力的减少。研究表明<sup>[6]</sup>,预应力钢绞线在 $0.7f_{pk}$ 应力下受热40 min,100℃时蠕变为 $216 \times 10^{-6}$ ,200℃时蠕变为 $1843 \times 10^{-6}$ ,300℃时蠕变为 $3763 \times 10^{-6}$ ,400℃时蠕变为 $5379 \times 10^{-6}$ 。

##### 3.1.2 混凝土的高温徐变引起的预应力损失

Cruz<sup>[7]</sup>的试验表明,480℃下加热5 h混凝土的蠕变量与常温下1 a的徐变量相同。在预应力混凝土结构中,由于混凝土受压,将引起混凝土的高温徐变,造成预应力损失。

##### 3.1.3 钢筋与混凝土热膨胀差引起的预应力损失

已有研究表明<sup>[8]</sup>,混凝土的高温变形因温度-应力途径的不同而存在很大差异,压应力的存在将使混凝土的热变形大大减小。预应力混凝土结构,由于预加应力的存在,混凝土会受到压应力的作用,从而混凝土内固相和气相的热膨胀受阻,水泥生成物的脱水和石英成分的晶体化膨胀受到遏制,而且压应力值( $\sigma/f_c$ )越高,对混凝土变形的约束作用越大。

因此,虽然高温时混凝土和钢绞线的热膨胀系数基本相同,但在高温作用下,由于钢绞线和混凝土的变形(伸长)存在差异,会产生预应力损失。而在冷却后,钢绞线的热膨胀基本恢复,但由于混凝土热膨胀的不可逆性,会产生残余变形。这样,混凝土会阻止钢绞线的回缩,从而导致钢绞线的应力增加。

#### 3.2 高温引起的预应力损失计算模型

高温引起的总的钢绞线预应力损失可表示为

$$\sigma_{lt} = \sigma_{11t} + \sigma_{12t} + \sigma_{13t} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{11t}$ ——高温作用下预应力筋松弛和蠕变引起的预应力损失; $\sigma_{12t}$ ——混凝土高温徐变引起的预应力损失; $\sigma_{13t}$ ——钢绞线和混凝土热膨胀差引起的预应力损失。

由于引起附加预应力损失的因素较多,预应力钢绞线本身化学成分和混凝土组成材料存在差异,在温度影响下材料热工、力学性能有较大的离散性,并且缺乏这方面的试验数据,因此要分别确定各个因素引起的预应力损失比较困难。

定义 $K$ 为高温作用下附加预应力损失的综合系数,主要与受火温度有关。因此,高温引起的预应力损失可表示为

$$\sigma_t = Kp_0 \quad (2)$$

式中 $p_0$ 为常温下钢筋中建立起来的有效预拉应力。

根据试验结果回归分析后的系数 $K$ 可表示为

$$K = 0 \quad (20^\circ\text{C} < t \leq 80^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$K = -0.0123 + 0.0008t - 6 \times 10^{-7}t^2 \quad (80^\circ\text{C} < t \leq 400^\circ\text{C}) \quad (4)$$

式中 $t$ 为预应力混凝土中钢绞线处的温度。

因此,高温作用下预应力混凝土构件中的钢绞线的预应力损失为

$$\sigma_{lt} = Kp_0 = (-0.0123 + 0.0008t - 6 \times 10^{-7}t^2)p_0 \quad (20^\circ\text{C} < t \leq 400^\circ\text{C}) \quad (5)$$

利用式(5)计算出的高温作用下预应力损失值和实测值比较结果见表3。

由表3可以看出,相对偏差最大为13.1%。由于试验的复杂性,该结果是可以接受的。在本试验的温度和

表2 混凝土中钢绞线预应力损失情况

Table 2 Prestressing loss of steel cable in RC

试件 编号	有效预应力 $p_0/\text{kN}$	钢绞线最高 温度/℃	最高温度时		完全冷却后	
			剩余预 应力/kN	损失率/%	剩余预 应力/kN	损失率/%
H <sub>1</sub>	69.0	105	64.9	5.9	67.8	1.7
H <sub>2</sub>	96.2	110	90.3	6.1	93.8	2.5
H <sub>3</sub>	78.3	93	73.8	5.7	76.9	1.8
H <sub>4</sub>	68.0	189	59.4	12.6	66.2	2.6
H <sub>5</sub>	67.7	210	59.9	11.5	65.6	3.1
H <sub>6</sub>	92.3	201	81.2	12.0	87.5	5.2
H <sub>7</sub>	101.8	315	85.9	15.6	93.9	7.8
H <sub>8</sub>	100.6	305	84.6	16.8	94.2	7.5
H <sub>9</sub>	65.6	326	56.8	13.4	62.0	5.5

预应力范围内,该模型能较好地拟合试验结果.

## 4 结 论

a. 试验结果表明,在高温作用下,预应力混凝土结构会产生预应力损失,钢绞线的预应力损失随温度的升高而增大.当试件完全冷却后,钢绞线的预应力损失将有一定量的恢复,但是钢绞线所经历的温度越高,其恢复值就越小.

b. 分析表明,受高温作用的预应力构件,引起附加预应力损失的主要因素有高温作用下预应力钢筋的松弛和蠕变、混凝土的高温徐变和钢筋与混凝土的热膨胀差.

c. 本文建立的高温作用下预应力混凝土中钢绞线的预应力损失计算模型,其计算结果与试验结果吻合较好,可为火灾后预应力混凝土结构评估及预应力混凝土结构抗火设计提供参考.

### 参考文献:

- [1] 李小红, 沈玉根, 程超. 高温(火灾)后预应力混凝土受弯构件的抗裂度及强度[J]. 工程力学, 1996(增刊): 92-97.
- [2] 熊学玉, 蔡跃, 李春祥, 等. 预应力混凝土结构火灾研究现状及展望[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 152-156.
- [3] 范进, 吕志涛. 受高温作用下预应力钢绞线性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(3): 50-63.
- [4] 范进. 高温后预应力钢绞线性能的试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(2): 186-189.
- [5] 李明, 朱永江, 王正霖. 高温下预应力筋和非预应力筋的力学性能[J]. 重庆建筑大学学报, 1998, 20(4): 73-77.
- [6] 王俊, 蔡跃, 黄鼎业. 预应力钢筋高温蠕变试验研究及有限元分析应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11): 1-5.
- [7] CRUZ C R. Elastic properties of concrete at high temperature[J]. Journal of PCA Res And Lebs, 1968, 10(3): 36-42.
- [8] 过镇海, 李卫. 混凝土在不同应力-温度途径下的变形试验和本构关系[J]. 土木工程学报, 1993, 26(5): 58-69.

## Prestressing loss of steel cable in unbonded prestressed RC at high temperature

YUAN Guang-lin<sup>1, 2</sup>, LI Qing-tao<sup>2</sup>, LÜ Zhi-tao<sup>3</sup>, HUANG Fang-yi<sup>4</sup>

(1. Mobile Postdoctoral Center of Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

4. The Architectural Design Institute of Fuzhou Economic & Technical Developing Zone, Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** From the experimental study on the prestressing loss of steel cable in unbonded prestressed RC at high temperature, the main influencing factors of the prestressing loss were analyzed, and a calculation model for the prestressing loss at high temperature was established. The results show that the prestressing loss occurs in the prestressed concrete structure at high temperature, and it increases with the rise of temperature, and that the prestressing loss can be recovered partly as the specimens are cooled completely, and the higher the temperature of steel cable being heated, the less the recovery of the prestressing loss. It is also indicated that the main influencing factors of the prestressing loss of prestressed members at high temperature are the relaxation and creep of prestressed steel cable, the thermal creep of concrete and the thermal expansion difference between steel cable and concrete. The calculation model for the prestressing loss at high temperature provides some references for fire control design and post-fire evaluation of unbonded partial prestressed concrete structures.

**Key words:** high temperature; prestressed concrete; steel cable; prestressing loss

表 3 高温作用下混凝土中钢绞线预应力损失的实测值与计算值  
Table 3 Measured data and calculated results of prestressing loss of steel cable in RC at high temperature

试件编号	有效预应力 $p_0/\text{kN}$	钢绞线最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	最高温度时实测预应力损失值/ $\text{kN}$	最高温度时计算预应力损失值/ $\text{kN}$	实测值与计算值的相对偏差/%
H <sub>1</sub>	69.0	105	4.1	4.5	8.9
H <sub>2</sub>	96.2	110	5.9	6.6	10.6
H <sub>3</sub>	78.3	93	4.5	4.5	0
H <sub>4</sub>	68.0	189	8.6	8.0	7.5
H <sub>5</sub>	67.7	210	7.8	8.7	10.4
H <sub>6</sub>	92.3	201	11.1	11.5	3.5
H <sub>7</sub>	101.8	315	15.9	18.3	13.1
H <sub>8</sub>	100.6	305	17.2	17.9	3.9
H <sub>9</sub>	65.6	326	12.8	12.1	5.8