

文章编号:1673-2049(2016)06-0053-07

# 截面温度不均匀对受约束波纹腹板梁火灾下 悬链线效应的影响

王培军<sup>1</sup>, 刘昌斌<sup>1</sup>, 杨振民<sup>2</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 中通钢构股份有限公司, 山东 聊城 252000)

**摘要:**以受约束波纹腹板梁为研究对象,利用有限元模型进行了截面温度均匀和不均匀分布对轴向约束波纹腹板梁悬链线效应影响的对比分析。结果表明:由于不均匀温度下产生的热弯曲效应,约束钢梁在受压阶段的竖向挠度更大而梁内轴力更小;均匀温度受约束钢梁的临界温度比不均匀温度钢梁高 6.2%;不均匀温度钢梁的温度比越小,钢梁的热弯曲效应越明显,相应的临界温度越低。

**关键词:**波纹腹板梁;轴向约束钢梁;火灾;不均匀温度分布;悬链线效应

中图分类号:TU375.1 文献标志码:A

## Effects of Non-uniform Temperature Distribution Across Section on Catenary Action of Restrained Corrugated Web Beam in Fire

WANG Pei-jun<sup>1</sup>, LIU Chang-bin<sup>1</sup>, YANG Zhen-min<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Zhongtong Steel Structure, Co., Ltd, Liaocheng 252000, Shandong, China)

**Abstract:** The restrained corrugated web beam was taken as research object, and the influences of uniform and non-uniform temperature distribution across section on catenary actions of axially restrained corrugated web beam were analyzed by using the finite element model. The results show that due to the thermal bending effect produced by the non-uniform temperature, the vertical deflection of the restrained steel beam is larger at the compression stage, and the axial force in beam is smaller. The failure temperature of the steel beam with uniform temperature is 6.2% higher than that of the steel beam with non-uniform temperature. The smaller the temperature ratio is, the more obvious the thermal bending effect of steel beam is, and the lower the failure temperature is.

**Key words:** corrugated web beam; axially restrained steel beam; fire; non-uniform temperature distribution; catenary action

## 0 引言

波纹腹板梁广泛应用于大跨结构和桥梁中,腹板的波折提高了其平面外刚度和抗剪屈曲承载能

力,并避免设置横向加劲肋。李立峰等<sup>[1]</sup>通过 4 根波形钢腹板 H 型钢梁的屈曲加载试验,对弹性屈曲强度的计算方法进行了分析,给出了弹性屈曲强度简化计算公式和适用范围。张哲等<sup>[2]</sup>通过对 4 根试

收稿日期:2016-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51578322);山东省自然科学基金项目(ZR2015EM041);

山东省重点研发计划项目(2016GGX103013)

作者简介:王培军(1976-),男,山东菏泽人,副教授,工学博士,E-mail:pjwang@sdu.edu.cn.

件进行抗弯试验,研究了波纹腹板 H 型钢组合梁的受弯性能。

实际结构中钢梁受到周围梁柱的约束,火灾下大变形阶段时,钢梁轴向拉力与竖向挠度形成的悬链线效应可以协助钢梁继续承载,提高钢梁的耐火极限。Liu 等<sup>[3-4]</sup>采用试验和有限元方法参数化研究了火灾下钢梁的悬链线效应。Wu 等<sup>[5]</sup>给出了高温下钢筋混凝土梁悬链线效应的分析计算程序。波纹腹板梁轴向刚度小于相应的平腹板梁,其悬链线效应与平腹板梁有较大差别。张哲等<sup>[6-7]</sup>采用 ABAQUS 有限元模型对火灾下轴向约束波纹腹板梁的悬链线效应进行了参数分析,并且对比研究了波纹腹板梁和平腹板梁在悬链线效应方面的异同。

实际结构中的钢梁上翼缘受到混凝土楼板的保护,处于三面受火状态,梁截面温度分布不均匀,上翼缘的温度比下翼缘和腹板的低。王培军等<sup>[8]</sup>通过对 9 根受约束钢柱的抗火试验发现截面温度不均匀导致钢柱在绕截面对称轴弯曲时同时发生扭转。Dwaikat 等<sup>[9]</sup>通过对三面受火钢梁的有限元分析,给出了考虑不均匀温度影响时  $P-M$  曲线(其中, $P$ 为钢梁的轴向承载力, $M$ 为钢梁的抗弯承载力)的简化修正方法。梁截面温度的不均匀分布导致钢梁悬链线效应与均匀温度分布时有较大差别。目前尚无对火灾下截面温度不均匀分布时轴向约束波纹腹板梁悬链线效应的研究。

本文采用 ABAQUS 有限元软件对均匀温度和不均匀温度分布下轴向约束波纹腹板梁悬链线效应阶段的轴力、挠度和悬链线弯矩的发展进行对比分析,研究不均匀温度分布中高度比和温度比对钢梁悬链线效应的影响。

## 1 波纹腹板梁及不均匀温度分布

### 1.1 波纹腹板梁参数

本文拟研究的波纹腹板梁的腹板形状采用《波纹腹板钢结构技术规程》<sup>[10]</sup>推荐的波形,其尺寸如图 1 所示。梁的跨度为 9 600 mm,沿跨度方向上有 40 个完整的波形。

### 1.2 不均匀温度分布参数

钢梁截面温度简化如图 2 所示(其中, $\kappa, \omega$ 分别为不均匀温度分布中高度比和温度比)。以温度比为 0.5,高度比为 1/4 为例,上翼缘的温度是下翼缘温度的 50%,温度的变化范围为腹板高度的 1/4。Yin 等<sup>[11]</sup>在分析火灾下钢梁的弯扭屈曲时采用了同样的温度分布形式。Liu 等<sup>[3]</sup>的火灾试验结果也

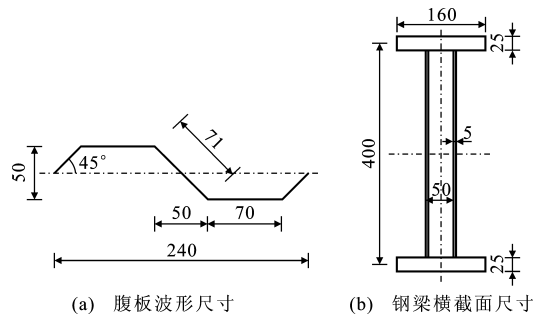


图 1 波纹腹板梁尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of Corrugated Web Beam (Unit:mm)

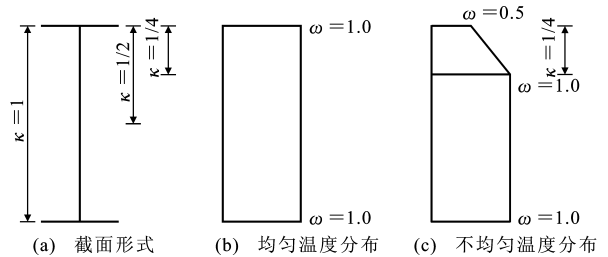


图 2 梁截面均匀温度和不均匀温度分布

Fig. 2 Uniform and Non-uniform Temperature Distribution Across Section of Beam

验证了这种温度分布形式。本文不均匀温度分布下钢梁的温度均指下翼缘的温度。

## 2 有限元模型及模型验证

### 2.1 有限元模型

轴向约束波纹腹板梁关于平面  $yOz$  对称,有限元模型中仅模拟半跨钢梁,如图 3 所示。钢材的泊松比和热膨胀系数分别为 0.3,  $1.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。常温下钢材的屈服强度为 345 MPa,弹性模量为  $2.05 \times 10^5$  MPa。火灾高温对钢材的强度和弹性模量有显著影响,随着温度升高,钢材的弹性模量和屈服强度均逐渐降低。本文高温下材料模型采用欧洲规范<sup>[12]</sup>的规定。单元类型为 S4R 壳单元,通过网格敏感性分析确定单元宽度为 20 mm。

在钢梁端部建立 MPC 约束(ABAQUS 中的多节点约束),并限制 MPC 控制点沿  $y$  轴和  $z$  轴的位移及绕  $z$  轴的转动。采用线弹性弹簧 Spring2 单元连接 MPC 控制点,模拟梁端弹性轴向约束。梁跨中采用对称的边界条件。为防止钢梁发生弯扭屈曲,限制梁上翼缘的平面外位移。实际工程中,钢梁上翼缘设置有混凝土楼板,可有效限制钢梁上翼缘的侧移。有限元分析过程采用恒载升温方式,第 1 步在梁上翼缘施加均布荷载,第 2 步使整个模型升温,梁截面的不均匀温度分布采用 ABAQUS 中的

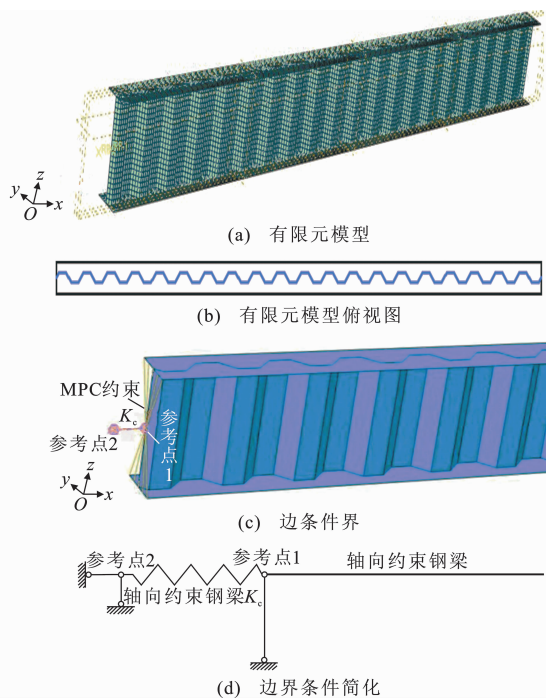


图3 波纹腹板梁有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Corrugated Web Beam

自定义函数实现。为避免火灾下钢梁大变形分析时的不收敛问题,引入人工阻尼系数 $\alpha$ ,并取能量耗散系数为尽可能小值<sup>[4]</sup>。

## 2.2 模型验证

采用Liu等<sup>[3]</sup>轴向约束刚度为 $62 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时火灾下平腹板梁的试验结果来验证有限元模型的准确性。荷载比(常温下简支梁最大弯矩与塑性抗弯承载力的比值)分别为0.5, 0.7。有限元模型与试验结果对比如图4所示,其中正值代表拉力。有限元分析采用了ABAQUS默认的收敛准则,即迭代的残差小于相应荷载或位移增量的0.5%。由图4可以看出,本文有限元分析结果与Liu等<sup>[3]</sup>的试验结果以及Yin等<sup>[4]</sup>的有限元模拟结果吻合较好,不同人工阻尼系数对分析结果影响较小,下文分析采用 $\alpha = 1 \times 10^{-10}$ 。验证结果说明了本文有限元模型的适用性。

## 3 钢梁悬链线效应对比分析

在钢梁上翼缘施加荷载比为0.5的均布荷载,大小为 $143.6 \text{ kPa}$ 。梁端的轴向约束刚度 $K_C = 0.1 K_B$ ,其中 $K_B$ 为钢梁常温下的轴向刚度,则 $K_C$ 的大小为 $17\,083 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

### 3.1 轴力对比分析

图5为2种温度分布下波纹腹板梁的轴力变化规律。在受压阶段,由于不均匀温度分布引起的热

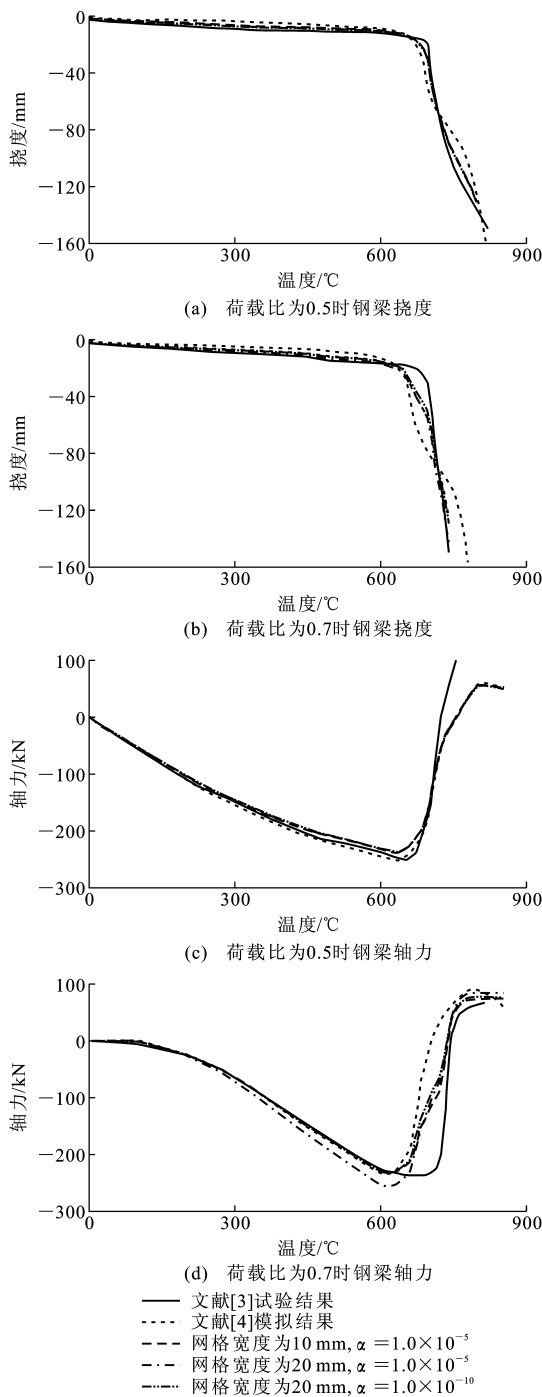


图4 有限元模型验证

Fig. 4 Verification of Finite Element Model

弯曲提前释放了钢梁的膨胀变形,且不均匀温度分布时钢梁截面的平均温度较低,不均匀温度分布下约束钢梁轴力随温度的增长速度比均匀温度分布时的低,钢梁在更高温度下达到了较低的最大轴向压力。在悬链线阶段(轴力为拉力时),不均匀温度分布下约束钢梁的上翼缘温度较低,上翼缘的轴向拉力较大,钢梁整体的最大轴向拉力比均匀温度分布时的高约10%。高温下均匀温度分布时钢梁的轴

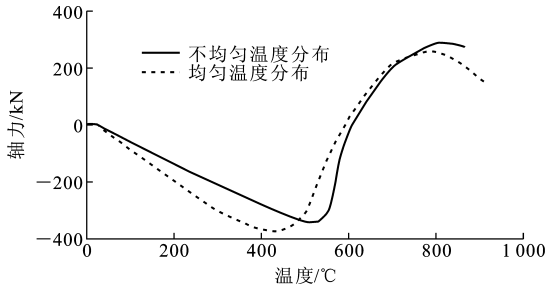


图5 约束钢梁的轴力变化

Fig. 5 Changes of Axial Force in Restrained Steel Beam

向拉力达到其抗拉屈服强度,并随着温度的升高而降低。不均匀温度分布下钢梁的上翼缘温度较低,且在悬链线效应阶段其拉应力远低于屈服强度。

悬链线温度为  $T_c$ ,该温度下钢梁的轴力为 0,标志着悬链线效应的开始, $T_c$  与无约束钢梁的临界温度相同;临界温度为  $T_f$ ,该温度下钢梁失去抗弯平衡能力,是钢梁考虑悬链线效应时的临界温度。2 个临界温度之间的温差  $\Delta T$  反映了考虑悬链线效应后钢梁临界温度的提高值。因此,温差  $\Delta T$  反映了悬链线作用。

约束钢梁在 2 种温度分布下悬链线温度差距较小,如表 1 所示。不均匀温度分布下钢梁悬链线温度为 608 °C,均匀温度分布时为 591 °C,不考虑悬链线效应时不均匀温度分布下钢梁的临界温度略高,这是因为不均匀温度分布下钢梁的轴力较小,抗弯承载力较大,其受力变形的发展速度略小于均匀温度分布时。均匀温度分布时钢梁挠度的变化如图 6 所示。均匀温度分布时约束钢梁高温下的悬链线效应显著, $\Delta T$  比不均匀温度分布时高 66 °C。考虑悬链线效应时均匀温度分布下钢梁的临界温度比不均匀温度分布时高约 6.2%(49 °C)。

表 1 约束钢梁的临界温度

Tab. 1 Critical Temperatures of Restrained Steel Beam

温度分布形式	$T_c$	$T_f$	$\Delta T$
不均匀温度分布/°C	608	865	257
均匀温度分布/°C	591	914	323

### 3.2 挠度对比分析

2 种温度分布下波纹腹板梁的挠度变化如图 6 所示。由图 6 可知:温度低于 460 °C 时,由于不均匀温度分布下的热弯曲效应,钢梁的挠度比均匀温度分布时的大;温度高于 750 °C 时,由于均匀温度分布下钢梁轴向拉力减小,钢梁的挠度迅速增加,约束钢梁破坏时均匀温度下钢梁的挠度明显大于不均匀温度分布时的挠度。

### 3.3 悬链线弯矩对比分析

约束钢梁的悬链线弯矩  $M_c$  等于钢梁梁端轴力

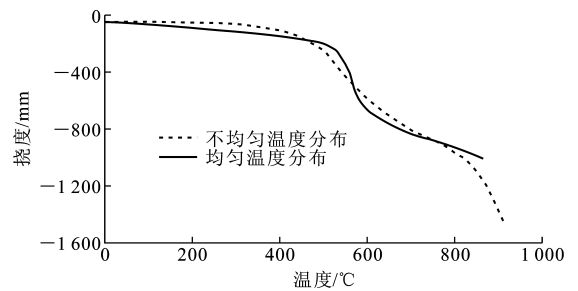


图6 约束钢梁的挠度变化

Fig. 6 Changes of Deflection in Restrained Steel Beam

$F_t$  和跨中挠度  $\delta$  的乘积,反映了悬链线效应对钢梁抗弯承载力的贡献。

在受压阶段,相比于均匀温度分布钢梁,不均匀温度分布约束钢梁在更高温下达到其最大负悬链线弯矩,且弯矩值比均匀温度分布时的大 34.6%(27 kN·m),如图 7 所示。进入悬链线阶段后,2 种温度分布下钢梁的悬链线弯矩几乎重合。悬链线阶段后期,均匀温度分布下钢梁的悬链线弯矩等于外荷载产生的弯矩,独自承担外荷载。不均匀温度分布时,高温下上翼缘的轴向拉力比下翼缘大,导致钢梁截面内产生负弯矩,悬链线弯矩必须大于外荷载弯矩才能满足平衡方程。

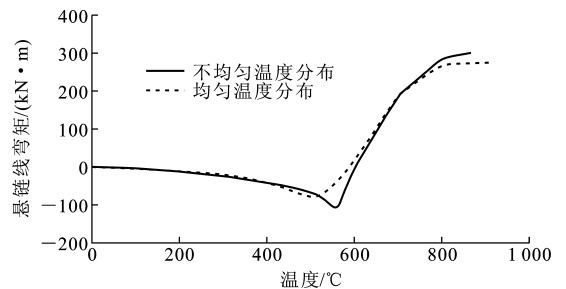


图7 约束钢梁的悬链线弯矩变化

Fig. 7 Changes of Catenary Bending Moment of Restrained Steel Beam

### 3.4 轴力对比分析

2 种温度分布下波纹腹板梁上下翼缘及腹板上的轴力变化如图 8 所示。2 种温度分布中下翼缘温度是相同的,高温时下翼缘的轴向拉力都达到其抗拉屈服强度,并随着温度的升高而降低。上翼缘则不同,均匀温度分布下上翼缘的轴向压力在高温下达到其抗压屈服强度,并随着温度升高而降低。不均匀温度分布下上翼缘的轴向压力远没有达到其屈服强度,由于梁截面受力平衡,该轴向压力随着相应下翼缘轴向拉力的降低而降低。

悬链线阶段后期,均匀温度分布下钢梁上下翼缘都达到了抗拉屈服强度,钢梁变成真正的悬索构

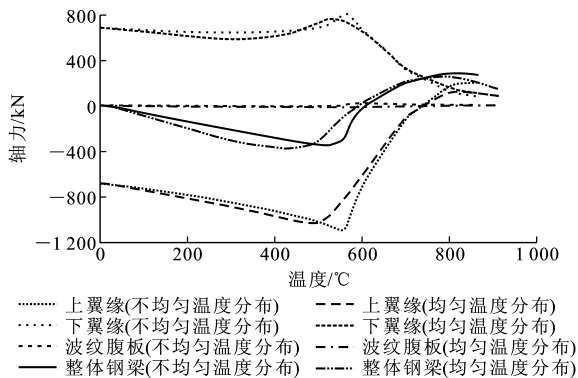


图 8 约束钢梁的轴力变化

Fig. 8 Changes of Axial Force of Restrained Steel Beam

件。不均匀温度分布下钢梁上翼缘的轴向拉力比下翼缘大,这也是钢梁内负弯矩产生的原因。无论温度分布如何,波纹腹板上产生的轴力远小于翼缘上的轴力,其对轴力的贡献可以忽略不计。

### 3.5 弯矩贡献对比分析

火灾高温下受约束钢梁的弯矩平衡如图 9 所示(其中,  $q$  为梁上翼缘作用的均布荷载,  $L$  为梁跨度,  $F_y$  为梁端支座的竖向支反力)。高温下钢材软化使钢梁的挠度迅速增加,弯曲变形释放了热膨胀变形,钢梁轴力由压力变成拉力,成为拉弯构件。钢梁轴向拉力  $F_t$  与跨中挠度  $\delta$  形成悬链线弯矩  $M_c$ ,与跨中截面弯矩  $M_u$  共同承担外荷载产生的弯矩  $M_p$ 。

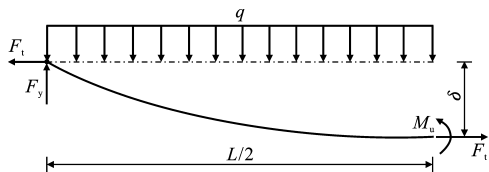


图 9 火灾下约束钢梁的弯矩平衡

Fig. 9 Bending Moment Equilibrium of Restrained Steel Beam in Fire

火灾高温下受约束钢梁的弯矩平衡方程为

$$M_u + F_t \delta = M_p \quad (1)$$

$$M_c = F_t \delta \quad (2)$$

$$M_p = \frac{1}{8} q L^2 \quad (3)$$

2 种温度分布下波纹腹板梁上下翼缘及腹板上的弯矩变化如图 10 所示。2 种温度分布下由波纹腹板提供的弯矩远小于翼缘上的弯矩,腹板作用可

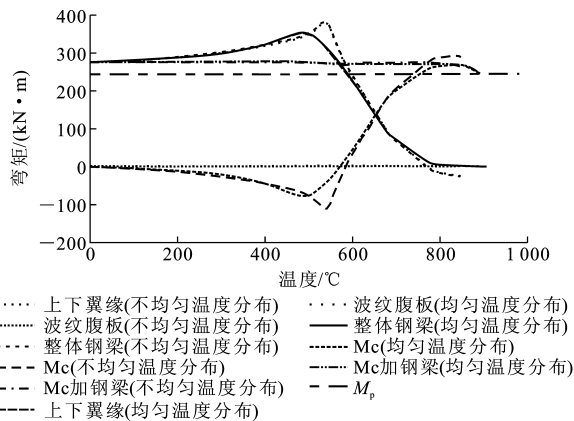


图 10 约束钢梁的弯矩变化

Fig. 10 Changes of Bending Moment of Restrained Steel Beam

以忽略不计。悬链线弯矩  $M_c$  和整体钢梁内部的弯矩曲线对称,两弯矩之和等于外荷载产生的弯矩  $M_p$ ,满足约束钢梁的弯矩平衡公式(1)。在整个升温过程中,外荷载产生的弯矩不变,因此压力阶段的负悬链线弯矩增大了钢梁的弯矩荷载;悬链线阶段的正悬链线弯矩协助钢梁分担弯矩荷载;后期钢梁内部产生负弯矩,导致悬链线弯矩大于外荷载产生的弯矩。

## 4 不均匀温度分布影响分析

### 4.1 高度比的影响

约束钢梁的参数设置如表 2 所示。研究 6 组高度比对约束钢梁悬链线效应的影响,高度比分别为 0, 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 1, 其中高度比为 0 代表梁截面只有上翼缘的温度低,高度比为 1 代表不均匀温度沿整个梁截面线性分布。不均匀温度分布的温度比为 0.5,分析结果如图 11 所示。

高度比不同仅导致钢梁腹板的温度分布变化,梁截面上下翼缘温度不变。由于火灾下波纹腹板对钢梁悬链线效应的影响可以忽略,不同高度比时波纹腹板梁的各种反应几乎完全重合。

### 4.2 温度比的影响

分别研究温度比为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 时钢梁悬链线效应的变化,其中温度比为 1.0 代表沿梁截面温度均匀分布。温度比越小,上下翼缘的

表 2 约束钢梁的参数设置

Tab. 2 Parameters Setting of Restrained Steel Beam

$\kappa$	$\omega$	荷载比	轴向约束刚度 $K_c$	跨度/mm
0.1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 1	0.5	0.5	0.1 $K_B$	9 600
1/4	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0	0.5	0.1 $K_B$	9 600

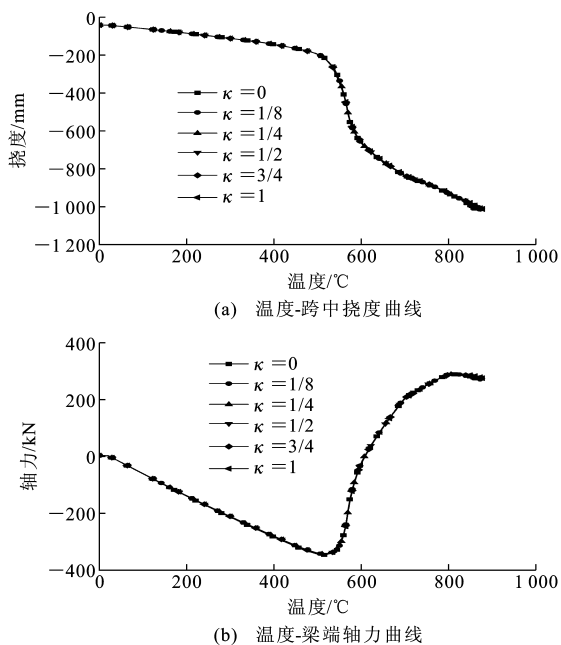


图 11 高度比的影响

Fig. 11 Influences of Height Ratio

温度差越大。不均匀温度分布的高度比为 1/4, 分析结果如图 12 所示, 钢梁的临界温度见表 3。

温度比越小, 上下翼缘的温差越大, 约束钢梁在升温阶段的热弯曲效应越明显, 压力阶段钢梁的挠度越大, 轴向压力越小。压力阶段约束钢梁的最大悬链线弯矩随着温度比的增大先增大后减小。温度比越小, 上翼缘的温度越低, 高温下钢梁的轴向拉力越大, 主要依靠悬链线弯矩抵抗外荷载, 依据钢梁的抗弯平衡公式(1), 当需求的悬链线弯矩相同时, 轴向拉力越大, 维持弯矩平衡所需的挠度越小。值得注意的是, 温度比为 0.9 和 1.0 (均匀温度分布) 仅相差 0.1, 但温度比为 1.0 时钢梁在高温下的挠度已显著增大。

由表 3 可知, 对于不均匀温度分布, 即温度比小于 1.0 时, 悬链线温度接近定值, 几乎不受温度比的影响, 但约束钢梁的  $\Delta T$  随着温度比的增大而增大, 温度比较大时钢梁上下翼缘温差较小, 悬链线效应发展更充分。考虑悬链线效应时的临界温度随着温度比的增大而增大, 当温度比从 0.1 增大到 0.9 时, 钢梁的临界温度从 841 °C 升高到 888 °C, 温度上升了约 5.6% (47 °C)。

## 5 结语

(1) 不均匀温度分布引起的热弯曲释放了钢梁的膨胀变形, 受压阶段约束钢梁的挠度更大, 轴向压力更小。悬链线阶段不均匀温度分布时钢梁的最大

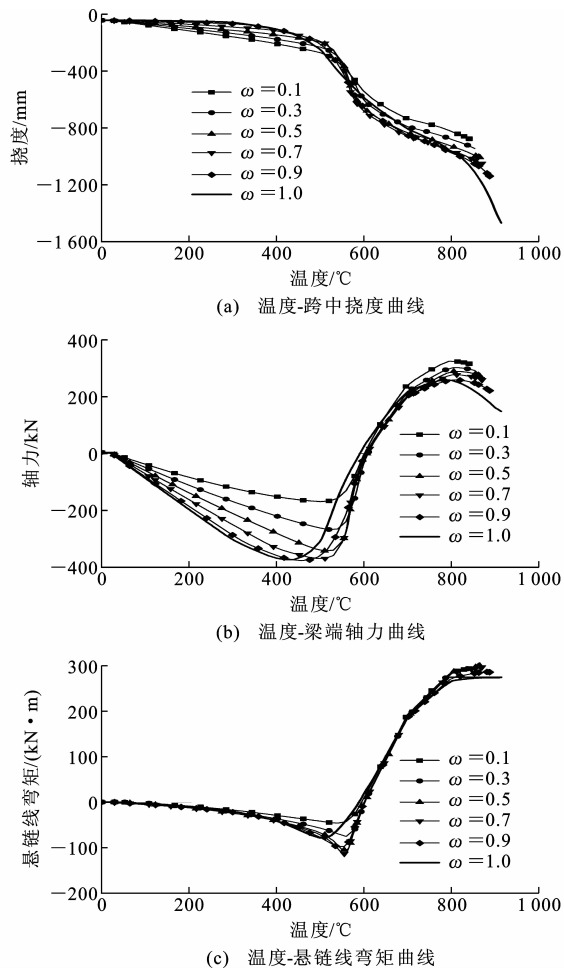


图 12 温度比的影响

Fig. 12 Influences of Temperature Ratio

表 3 不同温度比时约束钢梁的临界温度

Table 3 Critical Temperatures of Restraint Steel Beam with Different Temperature Ratios

温度比	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$T_c/^\circ\text{C}$	602	610	608	607	605	591
$T_f/^\circ\text{C}$	841	854	865	870	888	914
$\Delta T/^\circ\text{C}$	239	244	257	263	283	323

轴向拉力比均匀温度分布时的高约 10%。高温下梁截面的不均匀温度分布使梁内产生负弯矩。由于均匀温度分布时钢梁挠度的充分发展, 其  $\Delta T$  比不均匀温度分布时高 66 °C。均匀温度分布时钢梁临界温度比不均匀温度分布时高约 6.2% (49 °C)。

(2) 受约束钢梁达到临界温度时, 截面温度均匀分布的受约束波纹腹板钢梁上下翼缘均达到了受拉屈服, 但对于截面温度不均匀分布的受约束波纹腹板钢梁, 下翼缘达到了受拉屈服。由于上翼缘温度较低, 其拉应力大于下翼缘拉应力, 且拉应力小于钢材在对应温度下的屈服强度。

(3) 不同温度分布形式中高度比对波纹腹板梁

的悬链线效应几乎没有影响。温度比越小,上下翼缘的温差越大,约束钢梁的热弯曲效应越明显,压力阶段钢梁的挠度越大,轴向压力越小。钢梁临界温度随着温度比的增大而增大,当温度比从0.1增大到0.9时,钢梁的临界温度从841℃升高到888℃,温度上升了约5.6%(47℃)。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 李立峰,侯立超,孙君翠. 波形钢腹板抗剪性能的研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015,42(11):56-63.  
LI Li-feng, HOU Li-chao, SUN Jun-cui. Research on Shear Mechanical Property of Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(11): 56-63.
- [2] 张哲,李国强,孙飞飞. 波纹腹板H型钢组合梁抗弯性能[J]. 土木工程学报,2014,47(5):34-39.  
ZHANG Zhe, LI Guo-qiang, SUN Fei-fei. Flexural Behavior of the Composite Beam with Corrugated Webs[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 34-39.
- [3] LIU T C H, FAHAD M K, DAVIES J M. Experimental Investigation of Behaviour of Axially Restrained Steel Beams in Fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(9): 1211-1230.
- [4] YIN Y Z, WANG Y C. A Numerical Study of Large Deflection Behavior of Restrained Steel Beams at Elevated Temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1029-1047.
- [5] WU B, LU J Z. A Numerical Study of the Behaviour of Restrained RC Beams at Elevated Temperatures[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(4): 522-531.
- [6] 张哲,刘昌斌,王培军. 火灾下轴向约束波纹腹板梁悬链线效应分析[J]. 建筑钢结构进展,2015,17(5):58-64.  
ZHANG Zhe, LIU Chang-bin, WANG Pei-jun. Catenary Action Analysis of the Axially Restrained Corrugated Web Steel Beams in a Fire[J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(5): 58-64.
- [7] 张哲,刘昌斌,王培军. 火灾高温下轴向约束波纹腹板梁受力性能参数分析[J]. 钢结构,2016,31(1):94-99.  
ZHANG Zhe, LIU Chang-bin, WANG Pei-jun. Parameter Analysis of the Mechanics Performance of Axially Restrained Corrugated Web Beams at Elevated Temperatures in a Fire[J]. Steel Construction, 2016, 31(1): 94-99.
- [8] 王培军,王 晓. 截面温度不均匀受约束钢柱抗火性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(3):28-34.  
WANG Pei-jun, WANG Xiao. Experimental and Numerical Studies on Restrained Steel Columns with Non-uniform Temperature Distribution Across Section in Fire[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(3): 28-34.
- [9] DWAIKAT M, KODUR V. A Simplified Approach for Evaluating Plastic Axial and Moment Capacity Curves for Beam-columns with Non-uniform Thermal Gradients[J]. Engineering Structures, 2010, 32(5): 1423-1436.
- [10] CECS 291:2011, 波纹腹板钢结构技术规程[S].  
CECS 291:2011, Technical Specification for Steel Structures with Corrugated Webs[S].
- [11] YIN Y Z, WANG Y C. Numerical Simulations of the Effects of Non-uniform Temperature Distributions on Lateral Torsional Buckling Resistance of Steel I-beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(8): 1009-1033.
- [12] EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1. 2: General Rules — Structural Fire Design[S].