

研究报告

墙角火灾环境下钢构件温度分布及响应行为的实验研究

陈长坤, 姚斌, 杨昀, 蔡昕, 张和平, 万玉田

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 利用 ISO9705 标准火灾实验系统, 模拟墙角火灾环境, 以薄壁方管钢梁为研究对象, 对钢构件在热、力耦合作用下的行为进行实验研究。对火灾的热释放速率与室内温度场, 钢构件及其表面气体的温度、构件在火灾作用下的挠度进行测量, 分析真实火灾下钢构件温升及温度分布的特点与火灾发展对构件挠度的影响。研究表明钢构件在长向上存在着很大的温差, 而构件的挠度变化也并不对称, 这说明以往研究中往往假设钢构件在长向上温度一致并不恰当, 这种非均匀温度场对构件的行为有着重要影响, 它使得构件高温区部分更易发生局部屈服而失效, 在相同规模的火灾环境下, 与均匀温度场相比, 这种墙角火灾所导致的非均匀温度场更不利于钢构件的安全。

[关键词] ISO 标准火灾实验系统; 钢构件; 墙角火; 温度分布

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)09-0070-06

1 引言

2001年美国纽约世贸中心受到恐怖袭击, 1、2和7号楼相继倒塌, 结果造成了3 000多人死亡, 其中包括300多名消防员, 火灾是造成它们倒塌的重要因素。这一事件暴露出对钢结构建筑火灾安全研究的不足, 缺乏对火灾条件下大尺度钢结构建筑倒塌行为的有效预测手段等问题。

以往对火灾条件下建筑构件性能的实验研究主要是采用火灾实验炉, 以标准温升曲线来模拟火灾条件下的温升情况, 据此评估建筑构件的防火性能^[1~3]。这种方法比较简单, 同时也有利于比较不同构件的耐火性能, 对建筑的防火性能研究具有一定的意义。但这与真实火灾条件下钢结构建筑的热边界条件有很大的区别。实际上, 火灾现场是非常复杂的, 它与可燃物的分布, 建筑结构, 以及各种通风条件等有关, 其温度场往往不均匀, 因而温升曲线也不同。钢构件处在这种非均匀温度场中, 温度分布及结构安全行为无法通过火灾实验炉的实

验方法获得。

在数值与理论研究方面, 过去的绝大部分研究对火灾场景进行了简化, 假设火灾为按标准温升发展的均匀温度场, 因此构件温度只在截面上存在变化, 而在长度方向上没有变化^[4~7]。R. Becker对构件沿长度不一致的温度场对构件行为的影响进行了数值分析, 认为这种温度场使钢构件塑性绞的形成发生了偏移和延迟, 相对均匀温度场而言有利于结构的稳定^[8,9]。但他的研究考虑的只是火灾发生在房间中间区域, 这种火灾场景势必造成梁构件两端节点区域温度较低而中间区域温度较高的分布特点, 对于刚性连接构件, 这种火灾场景将相对有利于安全。但他没有考虑火灾发生在房间的其他位置及构件其它连接方式时的情况。因此有必要进行深入研究, 更为科学、全面地认识钢结构在火灾条件下的行为。

ISO9705标准房间/墙角火实验方法是国际标准化组织(ISO, International Standard Organization)在1993年制定的用于研究室内壁面和顶棚

[收稿日期] 2004-09-02

[基金项目] 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(50320120156), 国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409603)

[作者简介] 陈长坤(1977-)男, 福建福安市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

装饰材料火灾特性的标准实验方法^[10]。由于这种实验是全尺度的大型实验，与真实火灾条件较为接近，因此其测试结果比较可靠。它不仅能够评价装饰材料在火灾中的行为，而且能够同步测量装饰材料燃烧过程中火灾动力学参数，为室内火灾模拟提供依据^[11]。

作者利用 ISO9705 标准火灾实验系统提供的标准房间/墙角火灾环境，对墙角火灾场景下钢构件的温升及响应行为进行实验模拟研究。测量火灾的热释放速率、温度场、辐射热通量及钢构件的温度、挠度等参数，分析真实火灾下钢构件温升及温度分布的特点及火灾对构件行为的影响。

2 实验设计与装置

实验装置采用 ISO9705 标准火灾实验系统^[11] (图 1)。内部尺寸为 2.4 m×2.4 m×3.6 m，墙的四周和顶棚都由砖混结构组成，内衬有 15 mm 厚的耐火纤维板；东墙中央开有一个 2.0 m×2.0 m 的观测窗，用于观测和摄像记录房间内的燃烧情

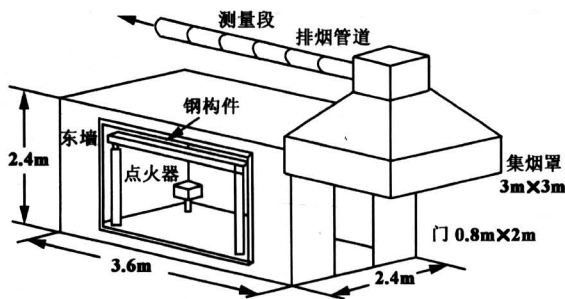


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Scheme of Test Rig

况；门的尺寸为 0.8 m (宽) × 2 m (高)，位于北墙中央；集烟罩开口尺寸为 3 m × 3 m，位于标准火灾实验间的外部，它的上方与排烟管道相连接，能够收集房间内的燃烧产物；排烟管道的内径为 400 mm，管长 4.8 m。在排烟管道后部是测量段，装有气体采样设备和激光设备；气体采样设备与 Servomex 气体分析仪连接，测量烟气中的 O₂、CO₂ 和 CO 浓度；激光设备用来测量烟气的浓度。在排烟管道的末端装有风机，最大流量为 18 000 m³/h，通过变频器控制风机的转速，进而调节排烟管道内的气体流量。采用 Agilent 数据采集卡对实验过程进行实时数据采集，采集时间间隔为 5 s。

实验采用的燃料为布置于实验间内壁西墙和南墙的 15 mm 厚的木工板，在实验燃烧间内发生轰

燃时，其最大燃烧热释放速率可接近 2 MW。实验中利用置于西南墙角处的点火源引燃两墙壁的木工板。如图 1 所示，点火源为一正方形开口的点火器，该装置内部为上下两层，下层是粗砂，上层是细沙，中间用金属丝网隔开，沙子的上层与点火器的边缘相齐，确保在整个开放区域的上方有平稳的气流。点火器采用标准的火源燃料，即纯度 95% 以上的丙烷 (C₃H₈) 气体，通过控制气体的流量来调节点火源的输出功率^[11,12]。实验中点火源功率为 100 kW，并在实验过程中保持该燃烧状态。

实验用钢构件试件选取 50 mm × 50 mm × 2 mm 的薄壁直缝焊管，材料为 Q215，长 3 m，通过绝热支架置于标准火灾实验间内，两节点间有效长度为 2.8 m。并在两管口处用隔热塞封堵，从而避免高温气体直接进入管内，确保管内气体的温升主要由薄壁传热导致。钢试件两端节点的连接方式如图 2 所示，采用简支形式，支点置于支架的绝热夹具内。通过砝码对试件的三分点进行加载，载荷的大小为 1.44 kN，如图 2 中 F1, F2 所示。试件

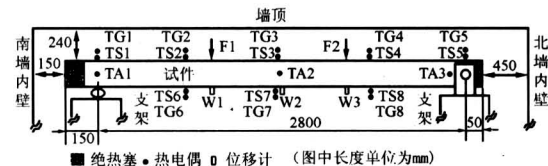


图 2 实验试件位置及测量点分布示意图

Fig.2 Location of the specimen and test points

在实验间的位置如图 2 所示，其上表面离房顶 240 mm，左端离北墙内壁 450 mm，右端离南墙内壁 150 mm，其中心离东墙内壁 570 mm。热电偶与位移计在试件上的安装位置如图 2 所示。在两支点间的上表面中线由左向右平均布置 5 个热电偶 TS1~TS5，并在距表面 2 mm 处相应布置 5 个热电偶 TG1~TG5 用以测量表面气体的温度。与上表面相对应的在下表面布置热电偶 TS6~TS8 和 TG6~TG8。同时在试件内部两端口内和中间布置 3 个热电偶 TA1~TA3 以测量试件内部气体的温升情况。其中热电偶采用直径为 2 mm 的 K 型铠装热电偶。试件表面温度测量利用 1 cm × 1.5 cm 底面开有凹槽的铜片将热电偶压紧并贴于试件表面，铜片外表面采用厚石棉垫隔热。在两支点间的中点及两加载点处布置位移计 W1~W3。试件的最大保护挠度取 $L/20 = 140$ mm，L 为试件的有效长度。当钢试件的最大挠度超过 140 mm 时，将受到底下支架保

护横梁的阻挡,避免对实验设备造成破坏。实验时环境温度为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 60% 。

3 结果与讨论

图3给出了钢试件表面气体温度随时间的变化情况。在火灾过程中,它主要与火焰蔓延和热烟气的流动有关。由图3可以看出靠近南墙 TG1 与 TG2 温度上升得比较快,并保持着较高温度。这主要是因为火源处于实验间的南墙与西墙交界的墙角,并且引燃两墙上的装饰木工板。在实验开始后 $1\ 140\text{ s}$ 轰燃发生,房间的温度快速上升,在 $1\ 285\text{ s}$ 时房间内烟气的温度几乎同时达到最大。由实验结果可以看出,火灾中试件表面气体温度在达到最大之前,存在4个近似的线性发展阶段,如图3在A时刻($t=150\text{ s}$)之前,温升很快,靠近火源的位置 TG1 温升速率最大,由此而使得与 TG5 的温度差随时间而增大,到A时刻,两位置的温差达到 $202\text{ }^{\circ}\text{C}$,而后温升速率减缓, TG1 与 TG5 存在一个较为稳定的温差关系,这与实验中火源房间中热烟气层呈梯度分布的性状相符。B时刻后温升速率接近于0,此时火灾房间内温度变化趋于平缓,而热解可燃气体不断增加,为进一步发生轰燃提供条件。到C时刻($t=1\ 140\text{ s}$)热解可燃气体达到轰燃临界值后,发生轰燃,气体的温度急剧增大,但此时 TG5 的温升速率大于 TG1,两位置的温差缩小。D时刻($t=1\ 285\text{ s}$)各测点位置温度达到最大,而 TG1 与 TG5 的温差减小到 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。之后,温度

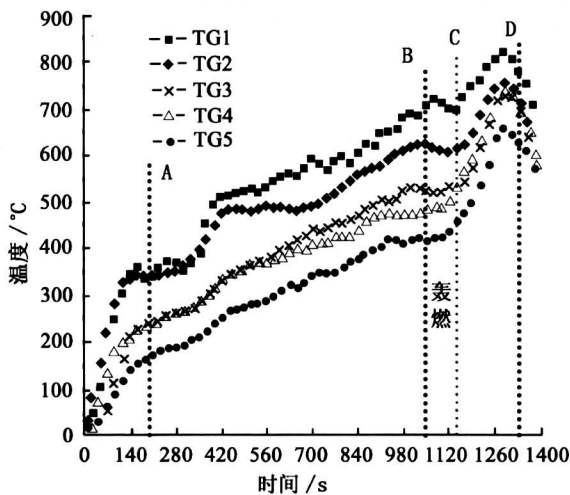


图3 试件表面气体温度随时间的变化

Fig.3 Gas temperature close to the surface of the specimen against time

下降,火灾开始进入熄灭阶段。

图4给出了钢试件不同位置温度随时间的变化情况。可以看出 $1\ 200\text{ s}$ 时试件温升速率增大,并大约在G时刻($t=1\ 320\text{ s}$)温度达到极大点(TS5温度达到极大值时 $t=1\ 360\text{ s}$),比表面烟气达到最大温度的时间延迟约 35 s ,说明这个时间段,试件该处所接受的净热流量大于0。与表面气体温升曲线不同,钢试件温度在达到最大值前的温升可分为3个近似的线性发展阶段,E时刻($t=1\ 051\text{ s}$)前TS1~TS5呈线性上升,E时刻后钢构件的温度变化趋于平坦,而F时刻($t=1\ 200\text{ s}$)后,温度又突然急剧上升,这种线性温升的斜率强烈依赖于试件本身的温度及表面传入的对流热和辐射热。钢试件在靠近墙角火源处的温度高,温升速率也大。而离火源较远的TS5的温度较低。这主要是因为钢试件左端离燃烧火焰近,受到了火焰的作用较强,在南墙木工板燃烧后,试件端部在相当一段时间内还受到火焰的直接作用,所以其温度比其他位置的高。而TS5离门口较近,由于离火焰较远,其受热主要来源于烟气的对流和辐射作用,所以温度较低。处于试件两端部的TS1和TS5的温度差值很大,最大温差达到 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验发现处于较中间区域的TS3和TS4,TS7和TS8的温度很接近,而其表面烟气温度TG3和TG4,TG7和TG8的温度也很接近。分析其原因,主要是与房间内复杂的热烟气流动有关。另外TS3和TS4处于南墙和门的中间区域,离南墙分别为 1.75 m 和 2.45 m ,离门分别为 1.87 m 和 1.17 m ,离西墙距离 1.8 m ,由于它们离火源的位置较远,受火焰辐射的影响小,同时受由门进入的冷空气的影响也较小。主要受到热烟气的对流和辐射传热作用。而且TS3处为梁变形下沉最大的位置,因此虽然它较TS4靠近燃烧火焰,但是其高度实际上比TS4要低,而热烟气的温度随着高度的减小而降低,这就使得TS3和TS4两者的温度存在接近的可能。这种解释还需要通过进一步的实验测量和数值模拟研究加以验证。由以上分析可知,钢试件在火灾条件下的温升与温度分布实际上与火焰的位置,热烟气流动,试件本身变形,通风口的位置以及节点连接的情况都有关。在该实验的火灾场景下,钢试件在长度方向上存在很大的温度差值,这将对试件的结构安全产生重要的影响。

基于以上实验数据,我们对各测点处火灾作用

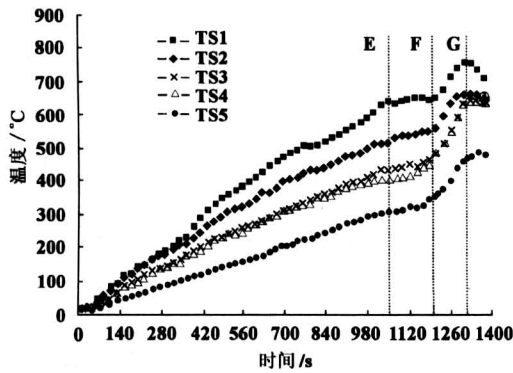


图 4 试件不同位置温度随时间的变化

Fig.4 Temperature at various locations on the specimen against time

于钢试件的热流率 q_{fs} 进行计算。

$$q_{fs} = h_{cg}(T_g - T_s) + \gamma\sigma\epsilon(T_g^4 - T_s^4) \quad (1)$$

其中 T_g 为燃烧气体温度，计算时取钢构件表面热烟气温度， T_s 为钢试件表面温度。按标准 Eurocode 1 Part 1.2^[13]，火灾边界取对流换热系数 $h_{cg} = 25 \text{ W/m}^2$ 。对于自然火灾实验，火灾修正系数 γ 取 1.0，这主要是因为自然火灾中存在大量的烟气与碳黑颗粒，其燃烧气体的辐射率比标准火灾实验炉的辐射率要高^[14]，辐射系数 ϵ 取 0.64^[15]。

图 5 给出了计算所得火灾作用于试件表面各测点处的热流率随时间的变化情况。由计算结果可以看出，在整个升温阶段，靠近火源和壁面燃料的 TS1 所在位置的热流率始终高于其它测点位置，并随火灾的发展而不断增大，在轰然后达到极大值 40 kW/m^2 。而 TS2 位置在初始阶段热流率比较大，但随着其本身温度的升高，热流率随后降低，TS3、TS4 和 TS5 位置热流率曲线发展比较平缓，发生轰然后急剧增加，出现峰值，然后火灾进入熄灭阶段，热流率也迅速下降。与图 4 对比可以看出 G 时刻后相当一段时间火灾对试件各测点处的热流率依然大于 0，但相应位置的试件温度却在不断下降，这主要是受试件内壁边界热损失的影响，使总的净热流率为负值。

图 6 给出了不同截面上钢试件表面气体温度，内部气体温度和钢壁温度随时间变化的比较。由图可以看出虽然两截面钢壁及表面气体的温度差别很大，但钢试件内部气体的温度 TA2 和 TA3 差别很小。实验发现试件右端内部气体温度 TA3 高于截面上钢壁温度 TS5，而在钢试件中间截面 TA2 温

度值却低于 TS3。这说明在钢试件左段钢壁向气体传热，而在右端由内部气体向钢壁传热。钢试件内部气体的温升主要由钢内壁面的热交换所致。根据内部气体温升速率很快及气体温度较均匀的特点，可以知道其热交换主要是以对流形式进行。

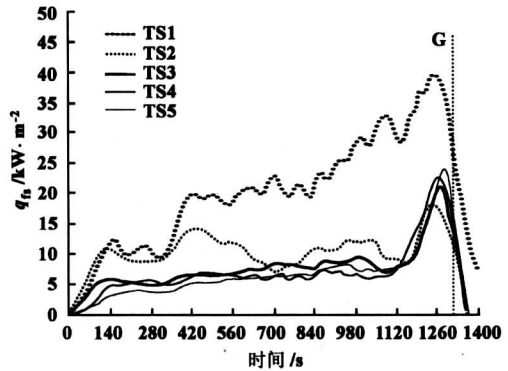


图 5 作用于试件表面的热流率随时间的变化

Fig.5 Variation of heat flux imposed to the surface of specimen against time

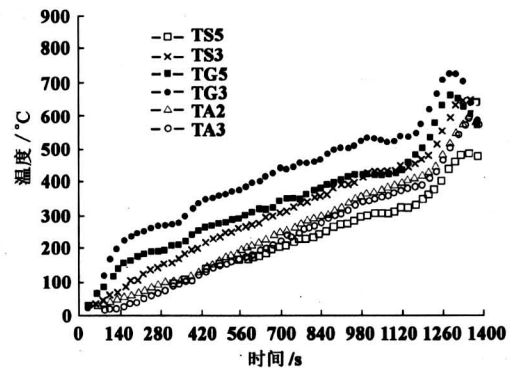


图 6 试件截面上温度的比较

Fig.6 Comparison for temperatures at intersection of the specimen

图 7 给出了火灾过程中，钢试件挠度与火灾热释放速率随时间的变化情况。由图可以看出在初始时试件变形较小，随着温度的升高，到 900 s 后，开始明显增大。并且左段挠度大于右段挠度，这主要是受到试件温度不均匀的影响，左段靠近火源，温度高，使得构件相应的局部强度下降。在发生轰燃之后，变形急剧增加，构件失效。轰燃后房间的温度几乎同时达到最大，这是构件失效的关键阶段。由图 7 可以看出钢试件两对称点 W1 和 W3 的挠度并不对称，在初始阶段，其挠度值较为一致，而随着温度的升高，到 980 s 后，W1 的挠度值明显比 W3 大。这种不对称变形主要是不均匀温度分

布的结果。由图也可以看出,在该火灾环境和力载荷载条件下,火灾的热释放速率与钢试件的挠度的变化趋势比较接近,具有相关性。

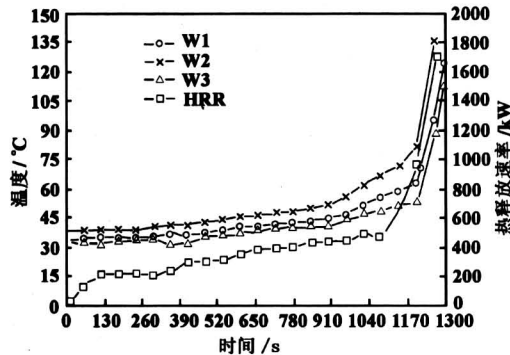


图7 火灾热释放速率和试件挠度随时间的变化
Fig.7 Heat release rate of fire and deflections of the specimen against time

为了更为直观地表示试件在火灾过程中的变形情况,图8给出了火灾过程中不同时刻钢试件沿长度方向的挠度变化。由图可以看出试件的挠度在900 s之前变化都比较小,而后随着温度的升高,钢本身的强度和刚度急剧下降;变形随之增大。并

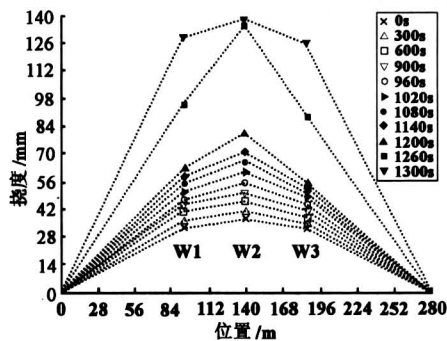


图8 火灾过程中钢试件不同位置挠度变化
Fig.8 Deflections of various locations of the specimen exposed to fire

且W1大于W3,钢试件变形并不对称,这主要与其温度在长度上的不均匀分布有关。图8中1300 s曲线相对于1260 s曲线的W2几乎没变化,而W1和W3变化很大。这主要是因为当时间为1260 s时,W2已经十分接近最大保护挠度(实际上根据钢试件变形的不对称性,可知最大挠度点应是中点偏左)。随后,由于受到绝热支架保护钢梁的阻挡,W2在达到140 mm后停止下沉,而W1和W3依然急剧增大,构件完全失效。

通过以上实验数据的分析可知,火灾环境下,

房间区域的温度场不均匀,存在较大的温度差,这种非均匀温度场对构件温度分布存在重要影响。钢试件的温升总体上是受火灾的发展影响,在火灾达到轰燃后,其温度也随之急剧增加。而其温度分布与火焰的传播和热烟气的流动有关。在该墙角火引起的墙壁装饰木工板燃烧的火灾条件下,无防火保护钢试件在长度方向上存在很大的温度差,两端最大温差达到330℃,而这种非均匀的温度分布使试件挠度变化不对称,处于高温区域的部分强度与刚度下降较快,更易发生局部屈服,不利于结构安全。

4 结论

通过ISO9705标准火灾实验系统提供的标准房间/墙角火灾热环境,对在热-力耦合作用下薄壁方管钢梁的温升和响应行为进行实验研究,结果表明:

1) 火灾温度场与火源的位置,燃料的分布,火焰的蔓延和热烟气流动及通风口冷空气的流入等情况有关,其分布是不均匀的,发生轰燃后,温度将急剧升高,具有更强的破坏性。

2) 钢构件在火灾条件下的温升和温度分布情况与构件的位置,火灾温度场,热烟气的流动与辐射,构件本身变形等情况有关。根据实验数据对作用于试件表面的辐射热流率进行的计算,可以看出,火灾对钢试件不同位置的热作用使得试件温度分布在长度上不均匀,这种不均匀性导致试件的挠度不对称,高温部分挠度大于温度较低的部分,更易发生局部屈服而导致整个构件失效。

3) 以上结论反映了在以往研究中对钢构件在长度方向上温度一致的假设并不恰当。对这种非均匀温度分布对构件结构安全的影响需要深入探讨研究,对真实火灾条件下的建筑构件的火灾响应行为需要进一步的实验与理论研究。

参考文献

- [1] BS5950 Structural Use of Steelwork in building. Part 1: Code of Practice for Design in Simple and Continuous Construction, Hot Rolled Sections [S]. London: British Standards Institution, 1990
- [2] Eurocode 3 Design of Steel Structures, Part 1. 2: General Rules, Structural Fire Design [S]. London: British Standards Institution, 2000
- [3] 李国强,贺军利,蒋首超. 钢柱的抗火试验与验算[J]. 建筑结构, 2000, 30(9): 12~15

- [4] Sanad A M, Lamont S, Usmani A S, Rotter J M. Structural behaviour in fire compartment under different heating regimes-Part 1: (slab thermal gradients) [J]. *Fire Safety Journal*, 2000, 35 (4): 99~116
- [5] Sanad A M, Lamont S, Usmani A S, Rotter J M. Structural behaviour in fire compartment under different heating regimes-Part 2: (slab mean temperatures) [J], *Fire Safety Journal*, 2000, 35 (4): 117~130
- [6] 赵金城. 高温下钢结构压弯构件的整体稳定性极限状 [J]. *钢结构*, 1998, 13 (42): 31~34
- [7] Usmani A S, Rotter J M, Lamont S, Sanad A M, Gillie M. Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects [J]. *Fire Safety Journal*, 2001, 36 (8): 721~744
- [8] Becker R. Effects of heat sinks on evolution of longitudinal temperature distributions in steel structures [J]. *Fire Safety Journal*, 2002, 37 (1): 1~20
- [9] Becker R. Structural behavior of simple steel structures with non-uniform longitudinal temperature distributions under fire conditions [J], *Fire Safety Journal*, 2002, 37 (5): 495~515
- [10] ISO-9705 Fire tests Full-scale Room Test for Surface Products [S]. Geneva: International Standards Organization (ISO), 1993
- [11] 杨 昀, 张和平, 刘激扬. 室内装饰材料的标准房间/墙角火实验研究进展 [J]. *中国工程科学*, 2003, 5 (4): 55~60
- [12] 杨 昀, 张和平, 王 蔚, 徐 亮, 万玉田. 典型建筑装饰材料热释放速率全尺寸火灾实验研究 [J]. *火灾科学*, 2003, 12 (4): 191~196
- [13] European Committee for Standardisation (CEN) Draft prEN 1991-1-2, Eurocode 1, Basis of Design and Actions on Structures, Part 1. 2: Actions on Structures-Actions on Structures Exposed to Fire [S]. London: British Standards Institution, 2000
- [14] Wang Y C. Steel and Composite Structures-Behaviour and Design for Fire Safety [M]. London: Spon Press, 2002
- [15] Kay T R, Kirby B R, Preston R R. Calculation of the heating rate of an unprotected steel member in a standard fire resistance test [J]. *Fire Safety Journal*, 1996, 26 (4): 327~350

Experimental Study on Temperature Distribution and Response Behaviors of Steel Element under Corner Fire Conditions

Chen Changkun, Yao Bin, Yang Yun, Cai Xin, Zhang Heping, Wan Yutian
(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] By using ISO9705 Room/Corner Fire Test Rig, thin steel tubes were tested. The response behaviors of steel element under thermal-mechanical coupling effect in a simulated corner fire were studied. In the experiment, the heat release rate and temperature field of the fire, temperature and deflection of the steel element and the temperature of the gas close to steel surface were measured. Effects of the temperature elevation and distribution of the steel element under corner fire conditions along with the fire growth on the deflection were analyzed. Results show that there exists significant temperature difference along the longitude of the steel and an unsymmetrical deflection variation. These indicate that assumptions of the uniform temperature distribution along the longitude direction in previous studies were improper. Under this non-uniform temperature distribution, failure resulted from the local yield of the higher temperature zone of the element is more inclined to occur. Indeed, this non-uniform temperature distribution caused by the corner fire is more dangerous to the fire safety of steel elements than the even case under same fire size.

[Key words] ISO9705 Room/Corner Fire Test Rig; steel element; corner fire; temperature distribution