

# 横向荷载作用下钢柱厚型防火涂料破损试验

王卫永<sup>1</sup>, 李国强<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045, wwyong200@yahoo.com.cn;  
2. 同济大学 土木工程学院 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为研究钢柱上厚型防火涂料在外力作用下的破坏规律, 进行了3个钢柱在外力作用下的防火涂料破损试验, 研究H型钢柱上的厚型防火涂料分别在单向加载和往复加载作用下的破坏现象和破坏模式, 并对试验结果进行分析. 结果表明: 防火涂料和界面剂之间以及界面剂和钢板之间的粘结性能差, 钢柱受外力作用后粘结很容易破坏. 单向加载的钢柱, 在受拉翼缘上, 初始裂缝间距逐渐加大并会产生新的横向裂缝, 柱底部防火涂料脱落; 在受压翼缘上, 初始干缩裂缝逐渐闭合, 柱底的防火涂料被压碎. 往复加载的钢柱, 粘结更容易破坏. 外力作用下, 钢柱上防火涂料容易破损, 下端翼缘上破损严重, 破损模式为大片剥离和脱落, 破损程度和柱顶水平荷载有关, 腹板上的防火涂料基本完好.

**关键词:** 钢柱; 防火涂料; 试验; 破坏

**中图分类号:** TU392

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2010)12-1962-05

## Experimental study on fireproof coating damage on steel columns under lateral load action

WANG Wei-Yong<sup>1</sup>, LI Guo-Qiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China, wwyong200@yahoo.com.cn; 2. State Key Lab for Disaster Reduction in Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To study the failure mode and damage phenomenon of fire retardant coating under monotonous and cyclic load, three experiments were carried out. The experimental results show that the bonding strength is weak between fire retardant coating and steel columns, especially under loaded. For the column monotonously loaded, on the flange with tension, initial cracks on the coating became serious and some new cracks arose. On the flange with compression, the initial cracks closed and the coating on the end of the column was broken down. For the column cyclically loaded, the bond between coating and columns failed more easily. Therefore, the fire retardant coating on steel columns is easily damaged under external force and the damage is serious at the bottom of column. The failure mode is breaking off and falling. The damage area has great relation with the load on top of the column. The coating on the web of column is integrated.

**Key words:** steel column; fireproof coating; experiment; damage

建筑结构设计不但要求安全可靠, 经济耐用, 而且要求有较强的抗火能力<sup>[1]</sup>. 钢材虽为非燃烧材料, 但钢材的物理及机械性能对高温很敏感, 其

强度、弹性模量在高温下急剧下降, 承载力也随之降低<sup>[2]</sup>, 因而无防火保护的钢结构在火灾下很容易达到承载力极限状态而被破坏<sup>[3]</sup>. 防火涂料的应用明显提高了钢结构的抗火性能<sup>[4]</sup>, 从而作为一种主要的钢结构防火措施被广泛采用. 但是, 防火涂料和钢结构之间的粘结强度较低, 防火涂料容易破损和脱落, 进而全部或者部分失去防火作用. 地震、爆炸等外力作用下, 火灾发生的概率很

收稿日期: 2009-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50738005, 51006320).

作者简介: 王卫永(1982—), 男, 博士, 副教授;

李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

大<sup>[5]</sup>,此时来不及修复防火涂料的破损,所以认识和研究防火涂料在外力作用力下的破损具有实际意义。

目前,有学者进行了复合材料层间应力的研究<sup>[6-9]</sup>,对分析防火涂料的破损具有参考价值。还有学者进行了防火涂料局部破损后钢构件的抗火性能研究<sup>[10-16]</sup>,但未提及防火涂料的破损如何计算。本文通过试验研究了厚型防火涂料在外力作用下的脱落和破坏,还借助复合材料层间应力理论对防火涂料的破损进行了分析。

## 1 试 验

本试验共设计了 3 个试件,1 个单向加载,2 个往复加载。试件固定在设计的底座上,采用外伸端板与底座通过高强螺栓相连。只施加水平荷载,加载位置在柱顶,连接形式为铰接,通过加力杆连于千斤顶上。钢柱材料为 Q235 结构钢,高强螺栓为 10.9 级 M30。防火涂料厚度为 25 mm,型号为 YC-1 型。

单向加载时,荷载分级加载,每级 10 kN,直到试件破坏。每加一级荷载,观察和记录试验现象,描绘防火涂料表面裂缝发展和扩展情况。试验加载装置如图 1 所示。

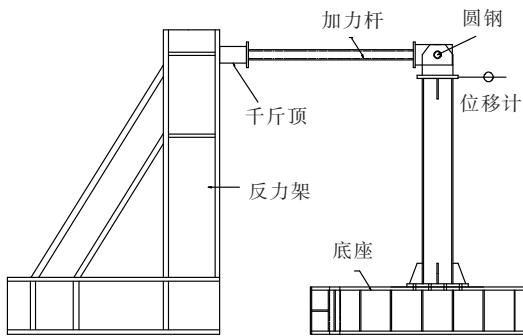


图 1 加载装置示意图

往复加载时,试件屈服前,根据荷载控制加载,加载分为 100 kN 和 200 kN 两级,各循环 2 次。试件屈服后,根据柱顶位移控制加载。位移控制值分别为屈服位移的 1 倍、1.5 倍、2 倍等依次累加,屈服后每级循环 3 次。试验测量内容主要为柱的水平荷载和柱顶水平位移,共布置 2 个位移计。位移计的测点布置在柱顶的端板上,见图 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验现象

试验开始前,试件上防火涂料表面有干缩裂缝,方向和柱的轴向方向垂直。间隔 300 ~ 500 mm 产生 1 条干缩裂缝,干缩裂缝一般全截面贯通。图

2 为试件 S-1 表面的干缩裂缝的分布照片。



图 2 S-1 表面初始裂缝

图 3 为试件 S-1 试验过程中柱的底端防火涂料拉裂的照片,图中编号②7 为相应荷载等级(27 t)时产生的裂缝。试验过程中发现,荷载至 12 t 时受拉侧翼缘上防火涂料初始裂缝开始明显由翼缘中部向翼缘边缘扩展,荷载至 15 t 时柱的下端有新的受拉裂缝产生,22 t 时受拉侧初始裂缝变得很宽,受压侧裂缝闭合。27 t 时,柱底部受压区防火涂料压碎,受拉区下部剥落,受压侧翼缘侧面的防火涂料上下裂缝全线贯通。



图 3 S-1 试验中拉裂照片

试验临近结束时,发现柱底部受压翼缘发生屈曲,导致表面的防火涂料脱落,受拉侧翼缘边缘的防火涂料受拉裂开并脱落,受拉侧翼缘上的防火涂料大面积和柱翼缘分离,最后,柱受拉侧翼缘和端板的焊缝被拉断,试验结束。焊缝断裂时发出一声巨响,焊缝断裂引起试件震动,导致防火涂料破损更加严重。图 4 为试件 S-1 破坏后的照片,防火涂料在柱的底端破损较为严重,翼缘外侧的防火涂料和翼缘分离,腹板的防火涂料破损较小。

试件 S-2 为往复加载,试件屈服后,根据柱顶位移控制加载。试验过程中,产生一些新的横向裂缝,图 5 为试件 S-2 表面产生的新的横向裂缝照片,横向裂缝多集中在柱的中下端。图中编号为正的表示正向加载,负的代表负向加载,符号后面的数字为从第 1 个循环开始的循环的次数。



图4 S-1 破坏后照片

从图5中可以看出,由于试件S-2上的初始收缩裂缝较少,第1个正向加载后,受拉侧翼缘上防火涂料表面产生1条新的裂缝,第1个负向加载时,受拉侧的防火涂料产生3条裂缝.3条裂缝间距不同,下侧2条裂缝的间距较小,上侧2条间距较大.第一级荷载的第2个循环,正向加载时在下侧产生1条新的拉伸裂缝,第二级加载时,第1

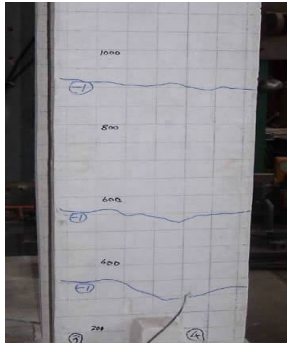


图5 S-2 新裂缝照片



图6 S-2 破坏后照片

试验测得的柱顶位移与荷载之间的关系,如图9所示,试件S-1的极限承载力约为288 kN,相对极限位移为1/24.试件S-2的正向极限承载力为293 kN,负向极限承载力为286 kN,正向相对极限位移和负向相对极限位移均为1/27.试件S-3的正向极限承载力为305 kN,负向极限承载力为303 kN.正向相对极限位移达到1/25,负向相对极限位移为1/23.5.

### 2.2 荷载和位移分析

钢柱为H型钢,柱的截面宽度 $B$ 为300 mm,柱截面宽度 $H$ 为300 mm,柱翼缘的厚度 $h_f$ 为15 mm,柱腹板厚度 $t_w$ 为10 mm.钢柱的长度 $l_c$ 为2 m,根据材料性能试验,翼缘的屈服强度 $f_{fy} = 265$  MPa,极限强度 $f_{fu} = 424$  MPa,腹板的屈服强度 $f_{wy} = 345$  MPa,极限强度 $f_{wu} = 495$  MPa.

计算得翼缘截面边缘屈服弯矩

$$M_y = Bh_f f_{fy} (H - h_f) + \frac{1}{6} t_w (H - 2h_f)^2 f_{wy} = 382 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

个正向循环和第2个正向循环均产生了新的裂缝,这些裂缝分布在柱的最下端和最上端.

在试验的最后阶段,柱底翼缘和连接端板间的焊缝被拉断,试验结束,发现柱底翼缘的防火涂料剥落,翼缘上的防火涂料和翼缘分离,腹板上的防火涂料完整无损,见图6所示.

试件S-3第一级荷载正向加载时,受拉侧防火涂料表面产生2条拉伸裂缝,分布在柱的下部和中部,第2个循环负向加载时,柱底部产生1条新的裂缝,第二级荷载第1个循环,受拉侧产生许多拉伸裂缝,而且间距很短,第2个循环负向加载时受拉侧又出现1条新的裂缝,此裂缝是初始裂缝的发展,如图7所示.试验过程的最后阶段,试件S-3底部防火涂料产生剥落和破损,破损多集中在柱底端的受压和受拉翼缘处.试验结束后,发现柱底端翼缘上防火涂料大面积破损和脱落,腹板防火涂料完好,图8为试件S-3破坏后的照片.

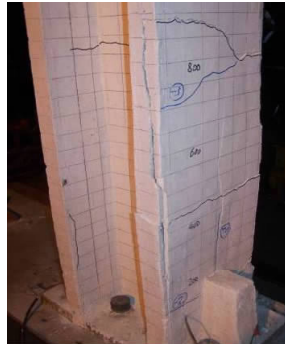
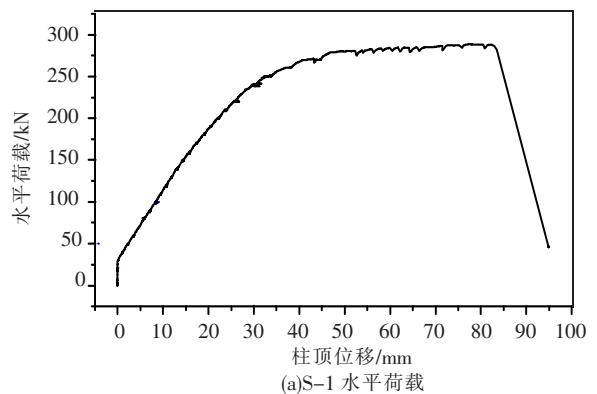


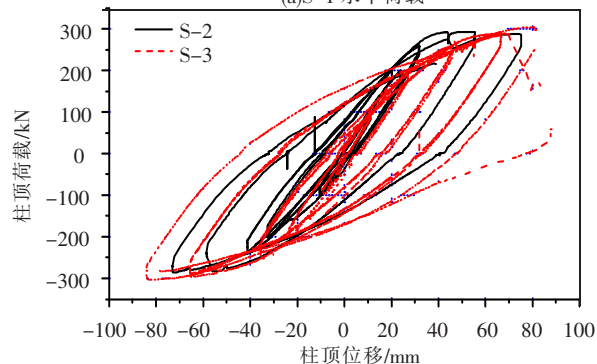
图7 S-3 新裂缝照片



图8 S-3 破坏后照片



(a)S-1 水平荷载



(b)柱顶荷载

图9 试件荷载-位移曲线

则柱顶屈服荷载  $P_y = M_y/l_c = 191 \text{ kN}$ .

截面极限弯矩

$$M_y = Bh_f f_{tu}(H - h_f) + \frac{1}{6} t_w (H - 2h_f)^2 f_{wu} = 566 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

柱顶极限荷载  $P_u = M_u/l_c = 283 \text{ kN}$ .

试验测得试件 S-1 柱顶屈服荷载和极限荷载分别为 230 kN 和 288 kN; 试件 S-2 的屈服荷载约为 200 kN, 正向极限承载力为 293 kN, 负向极限承载力为 286 kN; 试件 S-3 的屈服荷载约为 200 kN, 正向极限承载力为 305 kN, 负向极限承载力为 303 kN. 可见, 试验结果和分析结果较为接近.

### 2.3 防火涂料破损分析

分析试验构件在荷载作用下防火涂料和钢柱之间的层间应力, 并和试验现象和结果进行比较. 由于 3 个试件形式相同, 仅加载制度不同, 因此本文只选择试件 S-1 进行荷载作用下的破坏分析.

试验试件钢材弹性模量为  $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ; 防火涂料的基本力学性能参数<sup>[17-18]</sup>如下: 弹性模量为 100 MPa; 涂料抗拉强度  $[\sigma_+] = 0.12 \text{ MPa}$ , 抗压强度  $[\sigma_-] = 0.3 \text{ MPa}$ , 法向粘结强度  $[\sigma_{\perp}] = 0.06 \text{ MPa}$ . 切向粘结强度  $[\tau_{\perp}] = 0.11 \text{ MPa}$ .

从图 2 可以看出, 试件 S-1 表面存在着 3 条初始横向贯通的主裂缝, 距离柱底部距离分别为 400、750 mm 和 1 300 mm. 3 条裂缝将翼缘上的涂料分成了 4 段, 见图 10, 需要分别计算各段防火涂料的粘结应力. 图中  $p$  为端部荷载, kN,  $L$  为柱的长度, m.

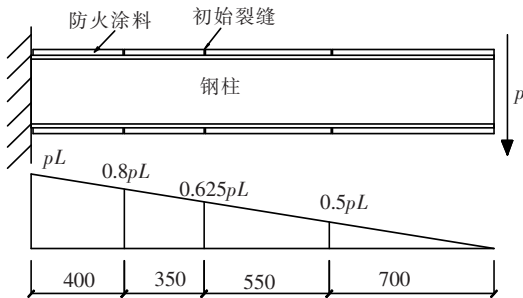


图 10 试件 S-1 初始裂缝分布及弯矩图

当柱顶荷载为 100 kN 时, 按照文献[8]的方法计算柱端部以及各个裂缝处的粘结正应力和剪应力, 正应力计算结果分别为 0.17、0.14、0.11 MPa 和 0.06 MPa. 剪应力计算结果分别为 0.045、0.036、0.028 MPa 和 0.016 MPa.

根据计算结果和破坏准则<sup>[9]</sup>可知, 当柱顶荷载为 100 kN 时, 第 3 条裂缝以下的防火涂料粘结应力为  $\left(\frac{\sigma_{z\max}}{\sigma_{\perp 0}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{z\max}}{\tau_{\perp 0}}\right)^2 = 1.02 \approx 1$ . 所以第 3

条裂缝以下的防火涂料产生粘结破坏, 即求得防火涂料破损长度为 1 300 mm. 按照以上方法, 可求得当柱顶荷载为 270 kN 时, 破损长度为 1 740 mm.

当翼缘在拉力或者压力的作用下, 防火涂料表面也会有相应的拉压应力, 设两侧的防火涂料在拉力  $N$  作用下的应变为  $\varepsilon$ , 则构件内力和外力的平衡方程为

$$N = \varepsilon E_c A_c + \varepsilon E_s A_s. \quad (1)$$

式中:  $E_c$  为防火涂料的弹性模量;  $A_c$  为防火涂料的横截面积;  $E_s$  为钢材的弹性模量;  $A_s$  为钢的截面积.

由此解得防火涂料的应变

$$\varepsilon = \frac{N}{E_c A_c + E_s A_s}. \quad (2)$$

则涂料表面的应力

$$\sigma = \frac{NE_c}{E_c A_c + E_s A_s}. \quad (3)$$

荷载为 100 kN 时, 防火涂料表面的最大拉应力和压应力  $\sigma = \frac{NE_c}{E_c A_c + E_s A_s} = 0.069 \text{ MPa}$ . 根据拉、压应力与弯矩成正比的结论, 可求得柱顶荷载为 150 kN 时, 涂料表面应力为 0.11 MPa, 基本已经达到了防火涂料的抗拉强度. 柱顶荷载为 270 kN 时, 涂料表面应力为 0.19 MPa.

从试件 S-1 的试验现象可知, 荷载至 15 t 时柱的下端有新的受拉裂缝产生, 27 t 时, 柱底部受压区防火涂料压碎, 受拉区下部剥落, 受压侧翼缘侧面的防火涂料上下裂缝全线贯通. 这与计算得出的柱顶荷载为 15 t 时下侧产生新的裂缝相符合, 但是柱顶荷载为 27 t 时, 下侧涂料的压应力为 0.19 MPa, 还没有达到抗压强度, 这可能是由于构件上的防火涂料的抗压强度偏低, 导致柱顶荷载达到 27 t 时, 下侧翼缘上的防火涂料被压碎.

## 3 结 论

1) 单向加载的钢柱, 在受拉翼缘受拉的过程中, 初始裂缝间距逐渐加大并会产生新的横向裂缝. 在受压翼缘受压的过程中, 初始干缩裂缝逐渐闭合, 柱底的受压翼缘上防火涂料会由于受压而破碎. 当受压翼缘产生较大的塑性变形后会产生局部屈曲, 翼缘的局部屈曲导致翼缘上的防火涂料脱落, 腹板上防火涂料的破损很小, 基本完好无损.

2) 双向反复加载的钢柱, 在荷载循环的过程中, 防火涂料和钢柱之间的粘结更容易破坏. 防火

涂料和钢柱之间的粘结性能较差,尤其是外层防火涂料和界面剂之间的粘结。

### 参考文献:

- [1] 董毓利,王德军. 框架组合梁抗火性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(2):178-182.
- [2] 王卫永,董毓利,李国强. 外伸端板节点火灾行为的试验研究和理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(12):2125-2128.
- [3] 朱建明,游建平,刘应华,等. 简支钢梁抗火设计的优化分析[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(6):31-35.
- [4] DAI X H, WANG Y C, BAILEY C G. Effects of partial fire protection on temperature developments in steel joints protected by intumescent coating [J]. Fire Safety Journal, 2009,44(3):376-386.
- [5] 陈素文,李国强. 地震次生火灾的研究进展[J]. 2008,17(5):120-126.
- [6] PIPES R B, PAGANO N J. Interlaminar stresses in composite laminates under uniform axial extension [J]. Journal of Composite Materials, 1970, 4: 538-548.
- [7] 阎相桥,杜善义,王铎. 复合材料层板的层间应力分析及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,1991(3):91-96.
- [8] 王卫永,李国强. 防火涂料和钢板件之间的层间应力[J]. 广西大学学报:自然科学版,2009,34(4):451-455.
- [9] 卓杨,许金泉. 基于分子动力学的结合材料界面破坏准则[J]. 力学季刊,2007,28(1):1-7.
- [10] TOMECEK D V, MILKE J A. A study of the effect of partial loss of protection on the fire resistance of steel columns[J]. Fire Technology, 1993, 29(1): 4-21.
- [11] RYDER N L, WOLIN S D, MILKE J A. An investigation of the reduction in fire resistance of steel columns caused by loss of spray-applied fire protection [J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2002, 12(1): 31-44.
- [12] MILKE J A. Analyses of the impact of loss of spray-applied fire protection on the fire resistance of steel columns [C]//EVANS D D. Fire Safety Science—Proceedings of the Seventh International Symposium. Worcester:[s. n.], 2003.
- [13] KNOBLOCH M, RAVEGLIA E, FONTANA M. Partial loss of fire protection and structural collapse of high-rise buildings [C]//International Congress Fire Safety in Tall Buildings. Santander: University of Cantabria, 2006.
- [14] 王卫永,李国强,王培军. 火灾下防火涂料破损后约束柱的稳定承载力[J]. 力学季刊,2008,29(1):120-126.
- [15] 李国强,王卫永,陈素文. 火灾下防火涂料破损后钢柱的极限承载力[J]. 工程力学,2008,25(12):72-78.
- [16] LI G Q, WANG W Y, CHEN S W. A simple approach for modeling fire-resistance of steel columns with locally damaged fire protection [J]. Engineering Structures, 2009, 31(3):617-622.
- [17] 王野华. 钢结构防火涂料力学性能研究 [D]. 陈素文,指导. 上海:同济大学,2007.
- [18] 张志凌. 钢结构防火涂料与钢构件的粘结性能研究 [D]. 陈素文,指导. 上海:同济大学,2007.

(编辑 魏希柱)