

中文引用格式:张佳庆,黄玉彪,蒋恭华,等. 多火灾升温条件下超薄型钢结构防火涂料隔热性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9):114-120.

英文引用格式:ZHANG Jiaqing, HUANG Yubiao, JIANG Gonghua, et al. Insulating properties of ultra-thin fireproof coatings for steel structure under various heating conditions[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9):114-120.

# 多火灾升温条件下超薄型钢结构防火涂料 隔热性能研究\*

张佳庆<sup>1</sup>教授级高级工程师, 黄玉彪<sup>1</sup>高级工程师, 蒋恭华<sup>2</sup>, 何灵欣<sup>1</sup>, 丁彦铭<sup>\*\*2</sup>教授  
(1 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 电力火灾与安全防护安徽省重点实验室(国家电网公司输变电设施火灾防护实验室), 安徽 合肥 230601; 2 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.0647

资助项目: 国家电网公司科技项目(5500-202216111A-1-1-ZN)。

**【摘要】** 为准确评估换流站钢结构的抗火性能, 基于换流站中可能出现的标准、电力及碳氢火灾情况, 通过耦合微尺度热重-红外光谱(TG-FTIR)联用热解试验与小尺度耐火试验炉隔热试验, 同时在标准、电力及碳氢3种火灾升温条件下, 研究超薄型钢结构防火涂料的热解机制以及对不同材质、不同截面形状系数钢构件的隔热性能。试验结果表明: 火灾升温速率越快, 防火涂料热解的质量损失速率峰值越大, 且对应的峰值温度也更高; 不同火灾升温曲线对防火涂料热解逸出的气体类型并无显著影响, 但对逸出气体量和逸出峰值温度有影响; 相比于电力和碳氢火灾升温曲线, 标准火灾升温曲线下, 防火涂料在750℃之前释放出更多热解气体, 从而更好地发泡膨胀, 更快地起到抗火隔热效果; 进一步, 超薄型防火涂料在碳钢和不锈钢基体以及多种截面形状系数下, 其在电力和碳氢火灾升温下的耐火极限均明显低于标准火灾, 隔热性能显著降低。

**【关键词】** 升温条件; 超薄型钢结构防火涂料; 隔热性能; 标准火灾; 碳氢火灾; 钢构件

## Insulating properties of ultra-thin fireproof coatings for steel structure under various heating conditions

ZHANG Jiaqing<sup>1</sup>, HUANG Yubiao<sup>1</sup>, JIANG Gonghua<sup>2</sup>, HE Lingxin<sup>1</sup>, DING Yanming<sup>2</sup>

(1 Anhui Provincial Key Laboratory for Power Fire and Safety Protection (State Grid Transmission and Transformation Facilities Fire Protection Laboratory), State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Hefei Anhui 230601, China; 2 School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** To achieve the accurate evaluation of steel structure fire resistance in the converter station, based on the possible standard, power and hydrocarbon fire scenarios, the thermal insulation mechanism of ultra-thin fireproof coating as well as its thermal insulation performance on steel members with different steel materials and different cross-section shape factors were investigated through micro-scale

\* 文章编号: 1003-3033(2024)09-0114-07; 收稿日期: 2024-02-22; 修稿日期: 2024-05-21

\*\* 通信作者: 丁彦铭(1989—), 男, 山东威海人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事火灾安全和智慧应急等方面的研究。E-mail: dingym@cug.edu.cn。

thermogravimetric-Fourier transform infrared (TG-FTIR) spectroscopy experiments and small-scale fire test furnace heat insulation experiments. The experimental results show that the faster the fire heating rate, the higher the peak mass loss rate and the higher the peak temperature of the fireproof coating. Different fire heating curves have no effect on the type of gases escaping from the thermal decomposition of fireproof coatings, but have an effect on the amount and peak temperature of escaping gases. Compared with the power and hydrocarbon fire, in the condition of standard fire, more gases are produced before 750 °C, resulting in better expansion and heat insulation. Furthermore, the fire resistance of the ultra-thin fireproof coatings on the carbon steel and stainless steel at various cross-section shape factors at power and hydrocarbon fire is worse than that of standard fire, indicating poor heat insulation abilities.

**Keywords:** various heating conditions; ultra-thin fireproof coating for steel structure; heat insulation performance; standard fire; hydrocarbon fire; steel components

## 0 引言

超薄型钢结构防火涂料因其涂层薄、装饰性好等特点而被广泛应用于厂房、机场、车站、换流站等大空间建筑,但其隔热性能受升温条件和涂层厚度等因素影响<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外主要依据标准火灾升温条件测试防火涂料的隔热性能,并以此指导实际火灾场景下防火涂层的设计<sup>[4-5]</sup>。换流站作为一个特殊场所,除了可能发生常见的标准火灾外,大量的电力设备如电缆、电线等存在电力火灾隐患,同时,内部储存大量的变压器油易在变压器故障、高温情况下发生泄漏并燃烧,出现更为严重的碳氢火灾。因此,有必要分析标准火灾下钢结构防火涂料的隔热性能。

目前,相关学者对不同火灾条件下钢结构防火涂料的隔热性能开展了一系列研究。LI Guoqiang等<sup>[6]</sup>研究了标准火灾下钢构件截面形状系数及涂层厚度对超薄型防火涂料隔热性能的影响。王玲玲等<sup>[7-8]</sup>测试了IOS834标准火灾及3条非标准火灾曲线下防火涂层的隔热性能,探讨了升温速率和最高温度对涂层隔热性能的影响,且对比了不同火灾下涂层的导热系数。JIMENEZ等<sup>[9]</sup>对碳氢火灾下的防火涂层进行了防火测试,并分析研究其膨胀倍率。ANDERSON等<sup>[10]</sup>测试了航空燃油火灾下防火涂层的隔热性能,开发了一种程序来估算膨胀炭层的有效热导率。CIRPICI<sup>[11]</sup>、ZHANG Yeqin<sup>[12]</sup>等研究了不同加热条件下膨胀涂层的膨胀率和导热系数,预测了不同火灾条件下有涂层保护的钢材温度。

目前,针对钢结构防火涂料在标准、电力及碳氢3种火灾下隔热性能的差异性研究尚无报道,且在防火性能测试中往往只测试单一类型、尺寸的钢质基体。鉴于此,笔者拟以超薄型钢结构防火涂料、不

同截面形状系数的碳钢和不锈钢为研究对象,基于标准、电力及碳氢3种火灾升温条件,探究不同火灾下超薄型钢结构防火涂料的热解机制和隔热性能,以期对钢结构抗火性能的准确评估提供借鉴。

## 1 防火涂料热解和隔热试验

火灾高温下,超薄型钢结构防火涂料经历熔融、膨胀、固化、失炭等一系列反应,火场温度影响涂层所能经历的反应过程,进而涂料呈现出不同的膨胀倍率和泡孔尺寸<sup>[7]</sup>,最终表现出不同的隔热性能。文中通过耦合微尺度热重-红外光谱(Thermogravimetric-Fourier Transform Infrared, TG-FTIR)联用热解试验与小尺度耐火试验炉隔热试验,综合分析3种火灾升温条件下超薄型钢结构防火涂料的热解机制与隔热性能。

### 1.1 防火涂料主要原料

试验所使用的防火涂料是超薄型钢结构防火涂料,符合国标《钢结构防火涂料》<sup>[4]</sup>。该防火涂料是一种白色黏稠液体,主要成分包括聚磷酸铵、三聚氰胺、季戊四醇和丙烯酸乳液等。经实验室测定,该款防火涂料的黏结强度为0.71 MPa(碳钢基体)、0.65 MPa(不锈钢基体),远大于国标中要求的0.15 MPa,性能优异。

### 1.2 钢构件试样制备

试样基材为Q235钢和201不锈钢,选取尺寸分别为200 mm×150 mm×2 mm、200 mm×150 mm×4 mm与200 mm×150 mm×8 mm的钢构件进行试验,钢构件遭遇火灾时,截面形状系数对其升温有重要影响,截面形状系数是钢构件的受火表面积 $F$ 与其相应的体积 $V$ 之比<sup>[13]</sup>。3种试件对应的截面形状系数 $F/V=500$ 、250及125 m<sup>-1</sup>。将防火涂料涂刷

在钢构件上,利用涂层测厚仪控制涂层的厚度为(1.5±0.1)mm。

### 1.3 TG-FTIR 联用试验

将防火涂料研磨成细小粉末,采用 TG 分析仪和 FTIR 仪在氮气气氛中进行 3 种升温程序下(标准火灾、电力火灾及碳氢火灾升温曲线)的 TG-FTIR 联用试验。温度范围设置为室温到 1 000 °C,在整个试验过程中,使用 100 mL/min 的高纯氮气作为吹扫气体。

### 1.4 抗火隔热试验

将试件固定于耐火试验炉上(图 1),涂层朝里,钢构件背火面覆盖一层硅酸铝纤维棉,同时,试件周边与试验炉固定安装间隙处也填塞硅酸铝纤维棉。试验时未施加荷载,炉内升温程序按照标准、电力及碳氢火灾升温曲线设定,并且采用 5 支热电偶紧贴钢板背火面,测量不同火灾升温中钢板背火面的温升变化。钢结构防火涂料的耐火极限以试件达到规定的平均温度的时间来确定,参照文献[4],将钢构件背火面平均温度到达 538 °C 的时间作为其耐火极限。

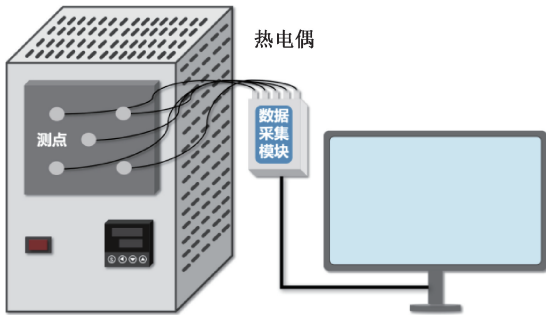


图 1 耐火试验炉  
Fig. 1 Fire test furnace

标准、电力及碳氢 3 种火灾升温曲线<sup>[14]</sup>的数学表达式分别为:

$$T_1 = 345\lg(8t + 1) + T_0 \quad (1)$$

$$T_2 = 1\,030(1 - 0.325\exp(-0.167t) - 0.675\exp(-2.5t)) + T_0 \quad (2)$$

$$T_3 = 1\,080(1 - 0.325\exp(-0.167t) - 0.675\exp(-2.5t)) + T_0 \quad (3)$$

式中: $t$  为测试开始时的时间, min(式(2)、式(3)中作无量纲化处理);  $T_0$  为试验开始前的环境温度, °C;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别为标准、电力及碳氢 3 种火灾对应于相关时间  $t$  的升温温度, °C。3 种火灾升温曲线的理论值和试验值如图 2 所示。

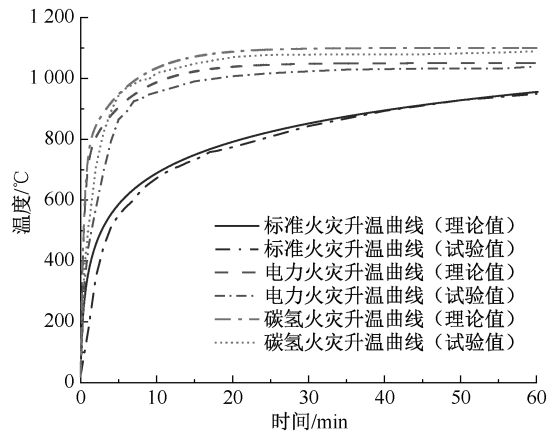


图 2 3 种升温曲线的理论值和试验值对比  
Fig. 2 Comparison of theoretical and experimental values for three temperature rise curves

## 2 多火灾升温条件下的隔热性能

### 2.1 多火灾升温下防火涂料热解特性

防火涂料在不同火灾升温下的质量损失速率曲线如图 3 所示。标准、电力及碳氢火灾升温曲线下防火涂料的质量损失速率峰值温度分别为 756、789 及 817 °C,火灾升温速率越快,质量损失速率峰值越大,峰值温度也更高。

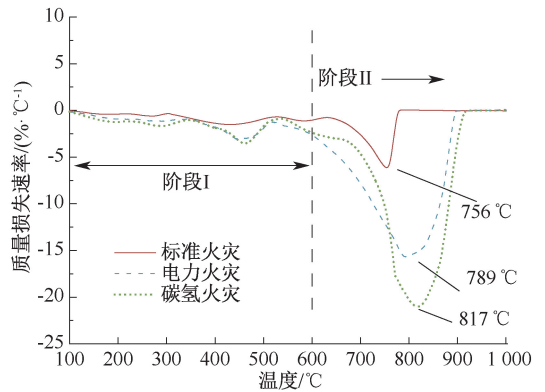


图 3 防火涂料在不同火灾下的质量损失速率曲线  
Fig. 3 Mass loss rate curves of fireproof coatings under different fires

根据图 3 可将防火涂料的热解过程划分为 2 个阶段。

阶段 I: 30~600 °C, 主要是填料在热解过程中释放 H<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub> 和 CO<sub>2</sub>, 而少量的树脂和季戊四醇在加热下分解, 释放出 H<sub>2</sub>O 和其他小分子物质<sup>[15-16]</sup>。三聚氰胺分解产生的气体和酯化反应产生的水蒸气使熔融体系发泡。该阶段减少的主要成分是防火涂料中未挥发的水分、高聚物中未交联的小分子和其他

易挥发物质<sup>[17]</sup>。

阶段 II:600~1 000 °C,该阶段防火涂料中的聚磷酸铵受热分解释放出阻燃性气体,如 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 等,同时反复生成催化剂聚偏磷酸和磷酸<sup>[18-19]</sup>。

通过红外光谱中的特征峰可确定防火涂料在热解过程中主要逸出气体的种类,以 400 °C 的红外光谱结果为例,不同火灾下防火涂料在 400 °C 时的吸收光谱,如图 4 所示。主要逸出气体包括 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub> 等。由图 4 可知:不同火灾升温曲线对防火涂料受热分解逸出的气体类型并无明显影响,但对逸出气体量和逸出峰值温度有影响。

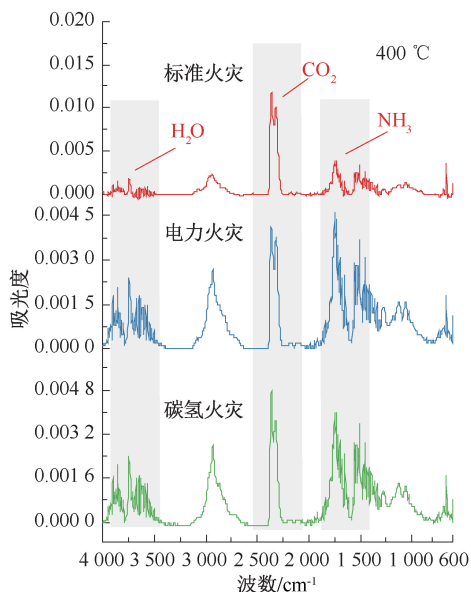
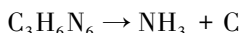
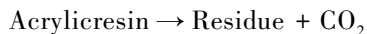
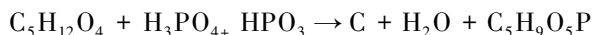
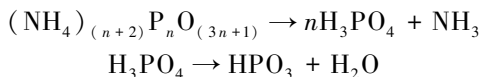


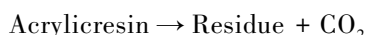
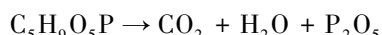
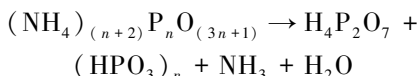
图 4 不同火灾下防火涂料在 400 °C 时的吸收光谱  
Fig. 4 Absorption spectra of fireproof coatings at 400 °C under different fires

利用以上试验结果可近似将防火涂料热解 2 个阶段的反应过程总结如下:

阶段 I:



阶段 II:



防火涂料热解过程中部分逸出气体将被捕获在

膨胀涂层内,导致防火涂料膨胀<sup>[20]</sup>,从而对其隔热性能产生重要影响。为进一步比较不同火灾情况下防火涂料热解逸出气体演化特征,选取典型气体 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,其变化情况如图 5 所示。

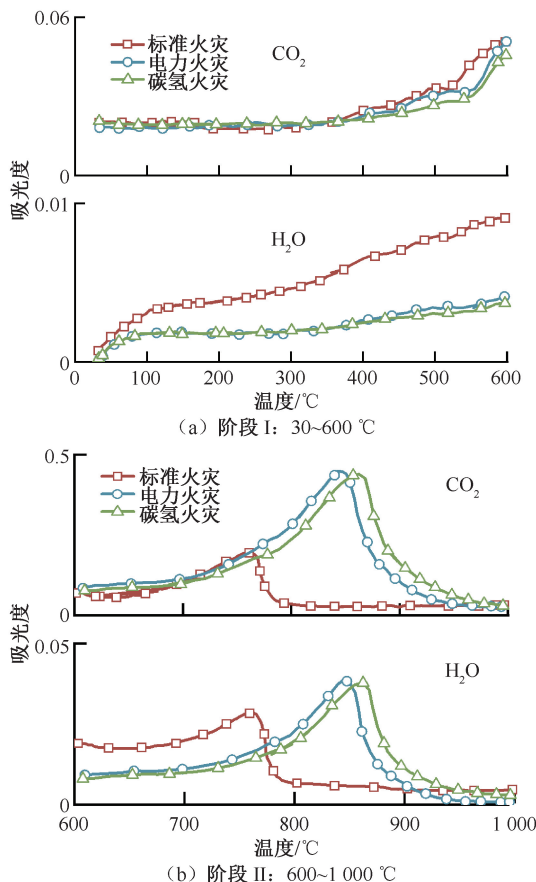


图 5 不同火灾下防火涂料热解过程逸出气体的吸收率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of absorption rate of escaping gases during pyrolysis of fireproof coatings under different fires

750 °C 之前,虽然标准火灾升温曲线下防火涂层热解逸出的 CO<sub>2</sub> 气体量与电力、碳氢火灾升温曲线基本相同,然而,逸出的 H<sub>2</sub>O 气体量始终明显高于电力和碳氢火灾,导致防火涂料可以在较低温度时更好地发泡膨胀,更快地起到抗火隔热的效果。即对于电力、碳氢火灾升温曲线的加热速率,在涂层黏度较低的最佳膨胀窗口(250~400 °C<sup>[11]</sup>)期间,电力和碳氢火灾升温下防火涂料释放的气体量较少,涂层并没有达到标准火灾升温下的膨胀效果,导致较差的隔热性能。

## 2.2 多火灾升温条件下防火涂料隔热性能

测试超薄型钢结构防火涂料在不同火灾下的隔热性能后,汇总相关结果,如图 6 所示。以  $F/V =$

250 m<sup>-1</sup> 的碳钢基体构件为例,分析标准、电力及碳氢火灾下防火涂层及裸钢构件的耐火极限差异。从图 6 可以发现,防火涂层在标准火灾下的隔热性能良好,耐火极限达到 120 min 以上,但是电力和碳氢火灾下,其耐火极限减少至 60~70 min。防火涂层在电力和碳氢火灾下的耐火极限相对标准火灾而言有 50% 以上的降幅。

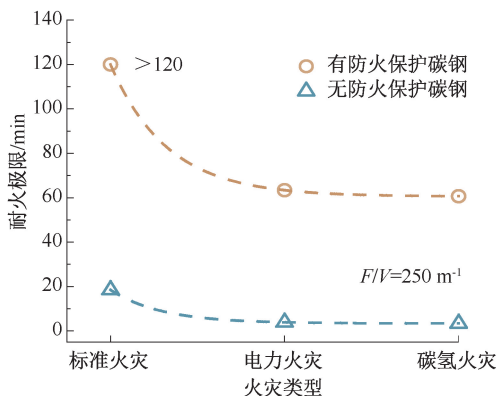
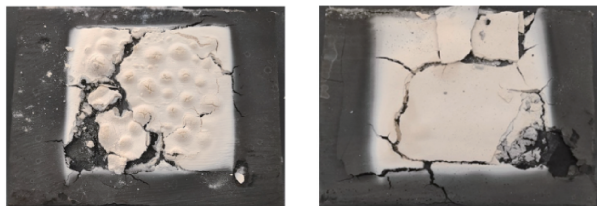


图 6 3 种火灾下防火涂层及裸钢的耐火极限变化

Fig. 6 Change of fire resistance limit of fireproof coating and bare steel under three kinds of fires

此外,火灾升温后防火涂层的形貌如图 7 所示。可以看出,防火涂层受火核心区域为白色无机残余物,标准火灾和非标准火灾升温曲线下的防火涂层膨胀效果存在差异,但涂层都出现了开裂和涂层与基材的剥离现象。此外,图 7a 的泡孔尺寸明显偏大,即火灾升温较慢的情况下,气体释放时涂层的黏滞性小,导致气体扩散形成的泡孔尺寸较大,体现出更好的隔热性能。电力及碳氢火灾下,由于升温速率快,导致防火涂层未能充分形成泡孔丰富的碳化层,故其隔热性能表现不佳,这也进一步印证了 2.1 节从微尺度试验角度所分析的防火涂料在不同升温曲线下隔热性能存在差别的原因。



(a) 标准火灾 (b) 非标准火灾

图 7 火灾升温后的防火涂层

Fig. 7 Fireproof coating after fire heating

除分析不同火灾下防火涂料隔热性能差异外,对不同规格和不同材质基体的分析也同样重要。以危

险性最高的碳氢火灾升温曲线为例,对涂覆超薄型钢结构防火涂料的碳钢和不锈钢进行多种截面形状系数的抗火隔热试验,并与无防火保护的钢构件对比。

不同截面形状系数的碳钢构件在碳氢火灾下的耐火极限变化如图 8 所示。得益于防火涂料的有效保护, $F/V=500、250、125\text{ m}^{-1}$  的钢构件背火面平均温度在火灾升温 600 s 之后温度变化幅度很小,分别在 550、500、450 °C 范围微小波动。最后  $F/V=500、250\text{ m}^{-1}$  的钢构件背火面温度分别在 55.1、60.7 min 达到耐火极限。而  $F/V=125\text{ m}^{-1}$  的钢构件耐火极限大于 120 min,这主要是由于其截面形状系数小,隔热性能更佳。

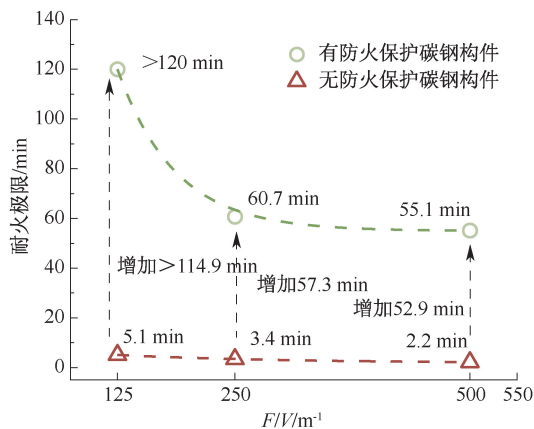


图 8 碳氢火灾下碳钢构件的耐火极限变化

Fig. 8 Changes in fire resistance limits of carbon steel members under hydrocarbon fires

此外,碳氢火灾下无防火保护的  $F/V=500、250、125\text{ m}^{-1}$  的碳钢构件背火面平均温度分别于 2.2、3.4、5.1 min 达到耐火极限。即在换流站环境中,无防火保护或者防火涂料脱落的钢构件在遭遇火灾时十分不安全。对于有防火保护的  $F/V=500、250、125\text{ m}^{-1}$  的钢构件,其耐火极限分别提高 52.9、57.3、114.9 min,即该防火涂层可以有效延长钢构件耐火极限。

文献[5, 20]在防火涂层隔热性能测试中往往只选用单一类型的钢材,然而,作为防火涂层保护的對象,除换流站中常用的碳钢外,还有封堵系统中常用的不锈钢<sup>[20]</sup>。不同截面形状系数的不锈钢构件在碳氢火灾下的耐火极限变化如图 9 所示。在 900 s 之后有防火保护的钢构件其背火面温度相对裸钢,温差达到近 200 °C。最后有防火保护的  $F/V=500、250\text{ m}^{-1}$  的钢构件背火面温度分别在 60.4、71.2 min 达到耐火极限。

同时,对比图 8 和图 9 可以很明显地观察到,不

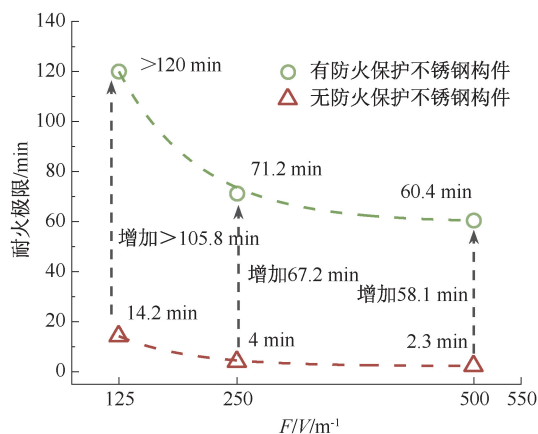


图9 碳氢火灾下不锈钢构件的耐火极限变化

Fig. 9 Change in fire resistance limit of stainless-steel components under hydrocarbon fires

锈钢构件相对碳钢构件,其耐火极限有一定程度延长。即不同材质的钢构件背火面温度是不同的,这与钢材的导热系数有关,不锈钢具有  $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  的低导热系数,而碳钢的导热系数为  $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由于不锈钢相对碳钢含有更多的铬、镍、锰等合金元素,从而影响到其导热系数和温度变化<sup>[20]</sup>。

超薄型钢结构防火涂料在不同截面形状系数碳钢和不锈钢基体中,相比标准火灾,在电力和碳氢火灾中隔热性能显著降低,甚至可产生高达 50% 以上降幅。因此,为满足换流站及特高压建设的高运行可靠性、高防护裕度要求,其防火安全设计将更为严苛,并为特种钢结构防火涂料的进一步研发提出了新的需求。

### 3 结论

1) 标准、电力和碳氢 3 种火灾升温曲线对超薄型防火涂料热解逸出气体类型并无显著影响,但在标准升温速率曲线下,涂料在较低温度下逸出更多热解气体,从而达到更好的发泡效果,表现出更好的隔热性能。

2) 超薄型钢结构防火涂料对钢构件隔热性能提升明显,不锈钢构件相对于碳钢构件,其耐火极限有一定程度的延长。

3) 钢构件在多种截面形状系数下,相比于标准火灾,超薄型钢结构防火涂料在电力和碳氢火灾下的耐火极限显著降低,甚至降幅可高达 50%。

### 参考文献

- [1] 陈德平, 侯柯屹, 王立佳, 等. 超级绝热型防火材料的研究进展及其在城市地下空间的应用展望[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 811-822.  
CHEN Deping, HOU Keyi, WANG Lijia, et al. Status and development of fire protection materials based on super thermal insulator and their application prospect in urban underground space[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(6): 811-822.
- [2] 徐志胜, 周寰, 颜龙, 等. 硼酸三聚氰胺在膨胀型防火涂料中的协同作用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(12): 40-45.  
XU Zhisheng, ZHOU Huan, YAN Long, et al. Synergistic effect of melamine borate in intumescent fire-retardant coatings[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(12): 40-45.
- [3] 王飞跃, 刘辉, 颜龙. 钨尾矿填料在膨胀型防火涂料中的协效作用[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 46-53.  
WANG Feiyue, LIU Hui, YAN Long. Synergistic effect of tungsten tailing filler in intumescent fire-retardant coatings[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10): 46-53.
- [4] GB 14907—2018, 钢结构防火涂料[S].  
GB 14907—2018, Fire resistive coating for steel structure[S].
- [5] 王玲玲, 李国强, 徐玉野, 等. 不同火灾下膨胀型钢结构防火涂层的隔热性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 267-273, 279.  
WANG Lingling, LI Guoqiang, XU Yuye, et al. Insulation properties of intumescent coating for steel element under different fire conditions[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 267-273, 279.
- [6] LI Guoqiang, HAN Jun, LOU Guobiao, et al. Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 98: 177-184.
- [7] 王玲玲, 孙毅, 范光明, 等. 升温机制对膨胀型防火涂层隔热性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):

101-107.

WANG Lingling, SUN Yi, FAN Guangming, et al. Effect of heating mechanism on thermal insulation properties of intumescent fire retardant coatings[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):101-107.

- [8] WANG Lingling, DONG Yuli, ZHANG Chao, et al. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves[J]. Fire Technology, 2015, 51(3):627-643.
- [9] JIMENEZ M, DUQUESNE S, BOURBIGOT S. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4):979-987.
- [10] ANDERSON JR C E, KETCHUM D E, MOUNTAIN W P. Thermal conductivity of intumescent chars[J]. Journal of Fire Sciences, 1988, 6(6):390-410.
- [11] CIRPICI B K, WANG Yongchang, ROGERS B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire[J]. Fire Safety Journal, 2016, 81:74-84.
- [12] ZHANG Yeqin, WANG Yongchang, BAILEY C G, et al. Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions[J]. Fire Safety Journal, 2012, 50:51-62.
- [13] GB 51249—2017,建筑钢结构防火技术规范[S].  
GB 51249—2017, Code for fire safety of steel structures in buildings[S].
- [14] GB/T 26784—2011,建筑构件耐火试验 可供选择和附加的试验程序[S].  
GB/T 26784—2011, Fire resistance test for elements of building construction: alternative and additional procedures[S].
- [15] 王朋. 超薄型防火涂料组分间协效作用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.  
WANG Peng. Study on the synergistic effects of components in intumescent fire retardant coating[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [16] 袁用文. 超薄型钢结构防火涂料的研制及热解特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2006.  
YUAN Yongwen. Design of super-thin fire resistant coating for steel structure and study of its characteristic of pyrolysis[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Aeronautical Technology, 2006.
- [17] 刘梦洋. 环氧水性超薄钢结构防火涂料的阻燃机理与低烟化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.  
LIU Mengyang. Study on flame retardant property and low smoke of epoxy waterborne ultra-thin steel structure fire retardant coatings[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [18] 郭磊. 膨胀型防火涂料热性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.  
GUO Lei. Study on thermal properties of intumescent fire retardant coatings[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- [19] 何华俊, 廖定根, 方超. 水性超薄型钢结构防火涂料的研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(11):1 593-1 595.  
HE Huajun, LIAO Dinggen, FANG Chao. Study on the aqueous ultra-thin fireproof coating for steel structure[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(11):1 593-1 595.
- [20] 邢丽萍. 膨胀型防火涂层与钢质基体传热过程影响因素研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.  
XING Liping. Study on influencing factors of heat transfer process between intumescent fire retardant coating and steel substrate[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.

作者简介: 张佳庆 (1987—),男,安徽桐城人,博士,教授级高级工程师,主要从事电力火灾与安全防护研究与管理工。E-mail:dkyzjq@163.com。