

文章编号:1673-2049(2012)03-0024-07

钢结构防火涂料着装状态与温湿循环的关系

张虎元^{1,2}, 张悦², 张学超²

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:进行了钢结构防火涂料室内模拟加速老化试验,探讨了环境温湿度变化对防火涂料的物理着装状态及其耐久性的影响;选择防火涂层厚度和温湿循环次数为变量,试验测定循环前后防火涂层外观、色差、微结构及粘结强度的变化。试验结果表明:随着温湿循环次数的增加,防火涂层发生质量损失、厚度减少、龟裂、颜色变暗泛黄及孔隙扩大现象;防火涂料的初始涂层厚度越大,这种变化趋势越明显;在测试的 40 次温湿循环范围内,防火涂层与钢板基材之间的附着力有提高的趋势,但随着循环次数的继续增加,附着力开始降低;温湿循环相同时,薄层涂料的附着力大于厚层涂料;与厚层防火涂层相比,薄层涂料物理着装状态受温湿循环次数影响较小,抵抗老化变形的能力较强,耐候性更高。

关键词:钢结构;防火涂料;加速老化;质量损失;温湿循环;耐久性;涂层附着力

中图分类号: TU545

文献标志码: A

Relations of Fire Resistive Coating for Steel Structure and Cycles of Temperature and Humidity

ZHANG Hu-yuan^{1,2}, ZHANG Yue², ZHANG Xue-chao²

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education,

Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics,

Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The accelerated aging test on a fire resistive coating (FRC) for steel structure was done to understand the effects of temperature and humidity variation on FRC physical properties and durability. In the laboratory aging test, FRC thickness and the cycles of temperature and humidity were controlled, and the phenomena including the surface aspect, color, microstructure and adhesion were observed. Test results indicate that FRC has a tendency in mass loss, thickness decrease, fracturing, darkening and yellowing in color, and pore enlargement after exposure to increase the cycles of temperature and humidity variations. The higher the FRC thickness is, the more obvious these phenomena are. Within the 40 cycles of temperature and humidity conducted, the adhesion between FRC coating and steel is found to be increased at the early cycles but decreased finally at the late cycles. After the exposure to same cycles of temperature and humidity, thinner FRC shows a higher adhesion compared to a thicker one. The final conclusion supported by the accelerated aging test is that a thin FRC possesses a better resistance and durability to weather variation.

收稿日期:2012-04-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2010BAK67B16);兰州大学“2010 年度大学生创新创业行动计划”项目

作者简介:张虎元(1963-),男,甘肃宁县人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:zhanghuyuan@lzu.edu.cn。

Key words: steel structure; fire resistive coating; accelerated aging; mass loss; cycle of temperature and humidity; durability; coating adhesion force

0 引言

钢结构以其强度高、质量轻、抗震性能强等优势,在现代建筑结构中得到了广泛应用。但是,钢结构的致命缺陷是防火性能差,在全负荷情况下,使钢结构失去静态平衡稳定性的临界温度在 500 ℃ 左右。一旦发生火灾,钢材的力学性能会迅速下降,近千度的高温最终可能导致钢结构的破坏垮塌。中国在 20 世纪 90 年代初对裸露钢梁的耐火极限进行试验,确认了 I36b, I40b 标准工字钢梁的耐火极限分别为 15, 16 min, 临界温度为 538 ℃^[1]。即使在正常使用条件下,由于采用钢结构的建筑大都处于室外,所以环境变化会对钢结构防火涂料着装状态产生巨大影响,从而影响钢结构的防火性能。

防火涂料能否有效地发挥其防火作用,在很大程度上取决于防火涂料的耐久性(耐曝热性、耐盐雾腐蚀性、耐酸性、耐碱性、耐冻融循环性、耐湿热性)^[2]。这包括 2 个方面的含义:一是涂层与基材粘结力的耐久性,即防火涂料是否容易随时间的延长而出现剥落、粉化等现象;二是涂层的防火性能是否持久,即经过若干年后,在外界各种因素作用下其耐火极限是否明显降低。耐久性好的涂层老化较慢,防火性能不易失效;反之,则老化快,易失效。防火涂料的老化进程是不可逆的。通常,可采取适当的防护措施(如不同构件采取不同的涂层厚度)延缓防火涂料的老化速率,确保其应有的物理着装状态和防火效果^[3]。

目前,中国对钢结构防火涂料使用前的耐久性已经进行了较多的检验测试,而对防火涂料在工程环境中的使用寿命缺乏科学的评价。因为实际火灾发生可能是在防火涂料涂覆后的数年甚至更长的时间。钢结构在投入运行之后,随着季节的交替,环境温度-湿度变化会引起防火涂层的物理着装状态及化学性质的变化,从而导致防火效果降低。

程海丽选取了 2 种具有代表性的膨胀型防火涂料,按照自行设计的试验制度进行冻融循环试验和人工加速老化试验,并进行防火性能测试;最后用受火后涂层的膨胀高度、碳化面积以及涂层质量和碳化质量评价防火涂层抗火性能衰减程度。

Sakumoto 等^[4]按照自行设计的试验制度,对 DIN 4102 及 BS 8202 这 2 种钢结构的膨胀型防火

涂料进行了人工加速老化试验和隔热性能试验。结果表明,影响该涂料的主要环境因素是水。因此试验着重研究涂料耐水性,并基于试验结果,提出了针对日本高温高湿度环境下检验膨胀型钢结构防火涂料耐久性的试验方法。

Miszczyk 等^[5]在实验室内用阻抗频谱技术设计了零上温度循环和零上至零下的温度循环,模拟了涂料所处自然条件中的温度变化。发现温度变化尤其是冻融循环会对有机涂料的着装状态产生负面影响,长期暴露下涂层会失去阻隔作用。

关于温度、湿度共同作用下的多次循环对防火涂料着装状态的影响,特别是从微观角度进行分析与测试的研究较少。本文中笔者制定了室内人工模拟加速老化试验方法,观察温湿交替循环前后涂层的色差、外观、粘结强度、微结构的变化,分析环境变化对防火涂料着装状态的影响。该研究能够结合实际环境条件的变化,为防火涂料的后期维护保养提供一定的依据,使防火涂料的阻燃效果得到最大限度的发挥,对减小火灾的损失具有重要的实际意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计流程

本文研究主要通过室内模拟加速老化试验完成,图 1 为研究流程。以室内超薄型钢结构防火涂料为研究对象,钢结构中常用的 Q235 钢板^[6]作为防火涂料保护基材,开展温度-湿度交替模拟老化试验。试验中设计的自变量因子包括涂层厚度(利用不同的涂装遍数实现)、温湿循环次数;考察的因变量包括防火涂层的质量与厚度变化、色差、结构(宏观和微观)变化和粘结强度变化。采用正交试验设计原则确定的试样数目是 12 个,试样与试验条件的组合关系见表 1。

1.2 试验材料

试验选择中国主体钢结构使用的 Q235 低强度钢材作为防火涂料的基材。委托甘肃兰州东风木器厂加工,共制备 170 mm×60 mm×10 mm 的条状钢板 12 块,供涂装防火涂料使用。

钢结构防火涂料采用北方涂料工业研究设计院生产的室内超薄型钢结构防火涂料(白),产品编号为 BF-133001-1。涂料产品标识的成分包括粘结剂(丙烯酸、氨基树脂)、钛白粉、滑石粉、三聚氰胺、季

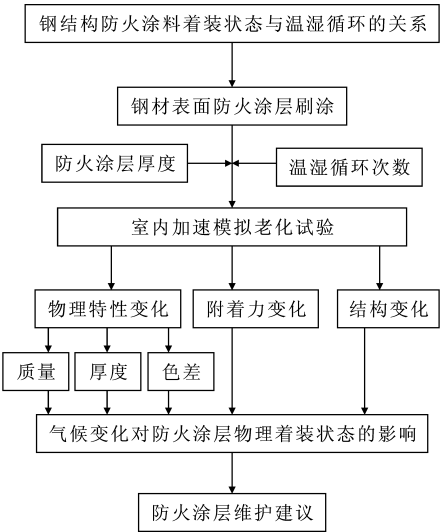


图 1 研究流程

Fig. 1 Research Procedures

表 1 正交试验设计方案

Tab. 1 Design Schemes of Orthogonal Test

组别编号	着装遍数	涂层厚度/mm	试样编号	温湿循环次数
A	3	0.7	A1	10
			A2	20
			A3	30
			A4	40
B	6	1.6	B1	10
			B2	20
			B3	30
			B4	40
C	9	2.3	C1	10
			C2	20
			C3	30
			C4	40

戊四醇、多聚酸磷酸铵,其中季戊四醇和多聚酸磷酸铵为亲水性物质,着装涂料时所采用的稀释剂为二甲苯。

1.3 试验方法

1.3.1 试样制备

试样采用美工刷进行手工涂装。将制作好的12块钢板分成3组:A组刷涂3遍,涂层总厚度为0.7 mm;B组刷涂6遍,涂层总厚度为1.6 mm;C组刷涂9遍,涂层总厚度为2.3 mm。

防火涂料粉刷完成后,在室温下自然干燥7 d。待样品表面涂层完全干燥后,采用松香和石蜡质量比为1:1的混合液,对样品侧边进行封闭处理,防止在温湿循环期间水分侵入涂层与钢板之间导致边界效应,使涂层沿边部剥离张开。石蜡封闭处理后再干燥7 d,称量试样的初始质量。

1.3.2 温湿循环试验

温湿循环试验使用的温度-湿度控制室为澳大利亚 TPG-1260-5×400-TH 植物生长箱,其温度、湿度理论控制范围如图 2 所示。该温度-湿度控制室可根据试验要求同步控制温度、湿度及其变化。

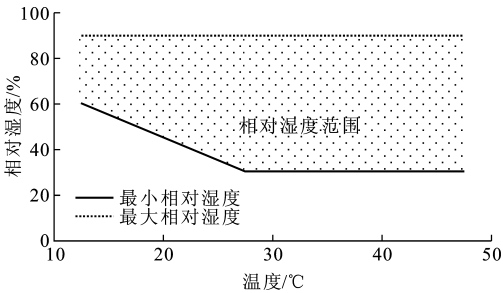


图 2 温度、湿度理论控制范围

Fig. 2 Theoretical Control Range of Temperature and Humidity

将涂装完成的试样放入温度-湿度控制室进行模拟加速老化试验。试样放入的方法是循环开始时间不同但最终同步结束(图 3):先放入 A4,B4,C4 试样,完成 10 个温湿循环;接着放入 A3,B3,C3 试样,继续完成 10 个温湿循环;之后放入 A2,B2,C2 试样,继续完成 10 个温湿循环;最后放入 A1,B1,C1 试样,继续完成 10 个温湿循环,之后取出全部试样。这种设计,不但可以保证表 1 中的温湿循环次数,同时也不会影响后续试验的同步进行。

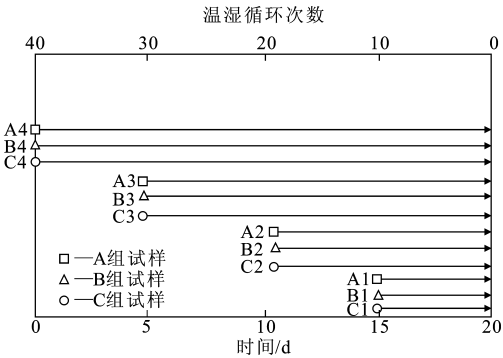


图 3 温湿循环试验的时序设计

Fig. 3 Time Series Design of Temperature and Humidity Cyclic Test

温湿循环试验中,控制样品所处环境温度是20℃~40℃(图4),空气相对湿度变化范围设定为40%~80%(图5),每12 h为一个温湿循环。40次温湿循环试验全部结束后,同时取出12块试样,拍照、称重,观察并记录样品的表面结构变化。

1.3.3 色度、色差试验

试验采用英国生产的色差计 CR-300,又称便携式色度仪、色彩分析仪,是一种简单的颜色偏差测试

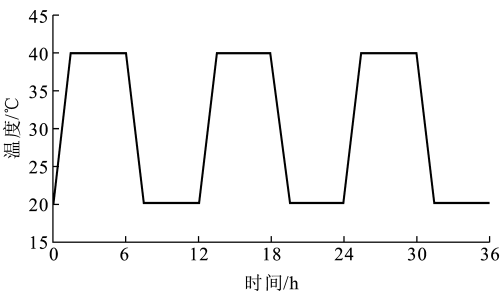


图 4 温湿循环过程中的温度控制

Fig. 4 Temperature Control in Cycles of Temperature and Humidity

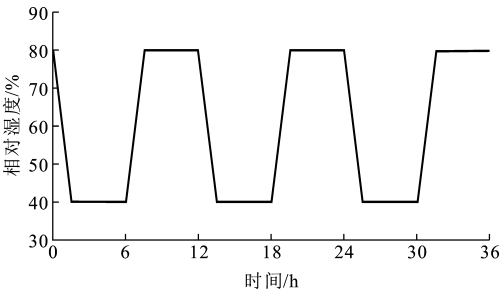


图 5 温湿循环过程中的湿度控制

Fig. 5 Humidity Control in Cycles of Temperature and Humidity

仪器。按照《涂膜颜色的测量方法》(GB 11186.1—89),色差计可以由数值形式测得涂膜试样的明度和彩度,并在 CIE 1976($L^*a^*b^*$)色空间中用色坐标来分别表示。通过对温湿循环前后各涂膜在 CIE 色空间中 2 个位置的几何距离计算,即可得到温湿循环对涂层颜色造成的影响与差异。其中, L^* 为明度变量,通常为正值, L^* 值越小亮度越暗, a^* 、 b^* 均为色度变量。

为避免测试区域的局限性,分别对每块钢板上防火涂料的 3 个不同区域进行测定,取其平均值。

2 种颜色间的总色差 ΔE_{ab}^* 可按式计算

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中: ΔL^* 为明度差异, $\Delta L^* = L_s^* - L_c^*$, ΔL^* 值为正表示偏白, ΔL^* 值为负表示偏黑; Δa^* 为红绿差异, $\Delta a^* = a_s^* - a_c^*$, Δa^* 值为正表示偏红, Δa^* 值为负表示偏绿; Δb^* 为黄蓝差异, $\Delta b^* = b_s^* - b_c^*$, Δb^* 值为正表示偏黄, Δb^* 值为负表示偏蓝。

1.3.4 涂层附着力测定试验

附着力是涂层与基底间联结力的总称,通常表示漆膜与被涂物结合的坚固程度。这种结合力是由漆膜中聚合物的极性基团(如羟基和羧基)与被涂物表面的极性基相互作用而成。漆膜的附着力只能以间接的手段来测定。

本次试验采用美国生产的拉开法附着力测定仪(Posi Test Adhesion Tester)测定附着力,粘结力通过电子数显的方式显示出来。

1.3.5 微结构观察试验

试验采用日本日立公司生产的 SU-1500 扫描电镜,这是一种新型的电子光学仪器。通过运用扫描电镜,用极细的电子束在钢结构防火涂料的样品表面扫描,将产生的二次电子用特制的探测器收集,形成电信号传送到显像管,在荧光屏上显示物体表面的立体构像,摄制照片。之后通过软件 IMAGEJ 对所拍摄的微结构照片进行定量分析,对比温湿循环前后防火涂料微观颗粒结构排列变化、统计孔隙参数的变化。

2 试验结果与分析

2.1 质量与厚度变化

温湿循环试验前后试样的质量变化及涂层厚度变化见表 2、3。从表 2 可知,温湿循环前后,试样的质量损失与涂层的初始厚度有关,即 C 组试样初始涂层厚度最大,温湿循环后质量损失最明显。表 3 中的数据表明,3 组试样在温湿循环后涂层厚度也普遍减小,C 组试样的涂层厚度普遍减小现象较为明显。这表明温湿循环对于较大厚度涂层的影响更明显,主要表现为质量损失和涂层厚度减小。相反,对于厚度较小的涂层,温湿循环的影响并不明显。

表 2 温湿循环前后试样质量变化

Tab. 2 Mass Variations of Test Samples Before and After Cycles of Temperature and Humidity

试样编号	温湿循环次数	初始质量/g	循环后质量/g	质量损失/g
A1	10	818.9	818.9	0.0
A2	20	808.2	808.0	0.2
A3	30	800.9	800.9	0.0
A4	40	811.7	811.6	0.1
B1	10	813.0	812.8	0.2
B2	20	819.6	819.6	0.0
B3	30	819.3	819.3	0.0
B4	40	828.8	828.4	0.4
C1	10	828.1	827.9	0.2
C2	20	832.4	832.0	0.4
C3	30	845.0	844.7	0.3
C4	40	807.8	806.8	1.0

防火涂料的干燥一方面靠溶剂挥发后,涂料中的各组分紧密堆积而产生分子间的范德华力,使漆膜与基材紧密结合;另一方面微量氨基树脂和丙烯酸树脂的羟基会产生交联。当涂层较薄时,溶剂挥

表 3 温湿循环前后试样涂层厚度变化

Tab. 3 Variations of Coating Thickness Before and After Circles of Temperature and Humidity

试样编号	温湿循环次数	初始涂层厚度/mm	循环后涂层厚度/mm	涂层厚度变化/mm
A1	10	0.70	0.65	-0.05
A2	20	0.72	0.70	-0.02
A3	30	0.68	0.65	-0.03
A4	40	0.70	0.65	-0.05
B1	10	1.68	1.00	-0.68
B2	20	1.60	1.31	-0.29
B3	30	1.54	1.23	-0.31
B4	40	1.70	1.23	-0.47
C1	10	2.25	1.84	-0.41
C2	20	2.42	1.90	-0.52
C3	30	2.30	1.80	-0.50
C4	40	2.40	1.82	-0.58

发比较彻底,但当涂层较厚时,涂层中残留溶剂数量就相对较多。在温湿循环的过程中,残留溶剂会随着涂料中的亲水性物质季戊四醇和多聚酸磷酸铵慢慢从防火涂层中迁移出来,最终导致涂层的厚度越厚,质量损失越大。

图 6 为钢结构涂料自然暴露在印度鲁尔基时的质量损失。随着时间的延续,防火涂料质量损失明显增加。有研究指出,在恒定温度下,24 mm 厚的涂层含湿量随时间的增长逐渐降低。该试验结果与文献[7],[8]中的研究结果相似。

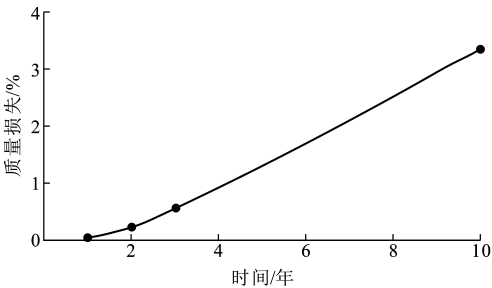


图 6 钢结构涂料自然暴露在印度鲁尔基时的质量损失

Fig. 6 Mass Loss of Steel Structure Coating Exposed to Natural Circumstances of India Roorkee

2.2 色差变化

对温湿循环前后试样进行测试,颜色状态可依据色空间坐标中 L^* , a^* , b^* 的数值来描述(图 7)。利用上述色差计算原理及方法,可计算出温湿循环前后的差值,即 ΔE_{ab}^* , ΔL^* , Δa^* , Δb^* , 结果见表 4。

试验显示,尽管试样的涂层厚度不同,但涂层表面的初始色度基本相同。表 4 中的数据表明,温湿循环后 ΔL^* 值减小,这表明循环后的涂层较循环前

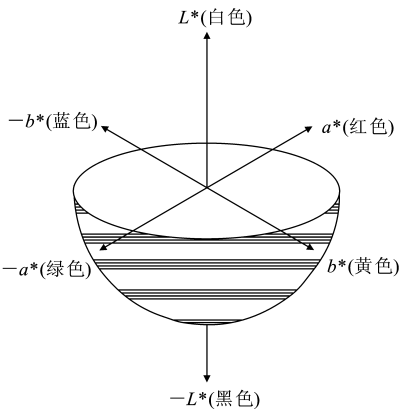


图 7 CIE LAB 色空间

Fig. 7 CIE LAB Color Space

表 4 温湿循环前后 L^* , a^* , b^* 值变化

Tab. 4 Variations of Values of L^* , a^* and b^* Before and After Cycles of Temperature and Humidity

试样编号	ΔL^* 值	Δa^* 值	Δb^* 值	ΔE_{ab}^* 值
A1	-3.58	0.08	2.27	4.31
A2	-3.15	-0.03	2.33	3.92
A3	-3.15	0.12	2.16	3.82
A4	-3.15	0.11	2.07	3.77
B1	-3.04	-0.03	1.80	3.53
B2	-2.45	0.05	1.56	2.90
B3	-3.66	0.10	1.72	4.05
B4	-4.10	0.14	2.17	4.64
C1	-5.66	0.80	2.10	6.17
C2	-5.98	0.38	1.97	6.31
C3	-6.65	0.73	1.73	6.91
C4	-6.41	0.47	1.38	6.57

相比,亮度变暗。温湿循环后, Δa^* 值为正,即循环后涂层颜色偏红; Δb^* 值为正,即循环后涂层的颜色变得偏黄。

由表 4 中的数据及图 7 可以看出,温湿循环对样品颜色的影响。数值在 a^* 轴上的变化较小,而在 L^* , b^* 轴上的变化较大。 ΔE_{ab}^* 值反映了颜色的总体变化, ΔE_{ab}^* 值越大,表示色差变化越大。从宏观来看,温湿循环导致防火涂层表面的颜色较循环前偏黑、偏黄^[9]。这是由于防火涂料的组成物大部分是有机物质,在经受日光、紫外线照射、碳化、振动、挠曲甚至酸雨等各种复杂因素的作用,会发生降解和老化。该涂料中含有的丙烯酸树脂和三聚氰胺,在高湿条件下均有降解的倾向;氧气的作用也会导致更多的分子断裂并发生变化,使涂膜 ΔL^* 向黑色方向移动。

表 4 中的数据还表明,温湿循环对涂层厚度较大的 C 组试样颜色的影响超过涂层厚度较小的 A,

B 组试样。

2.3 附着力变化

经历不同温湿循环次数之后,采用拉开法测定了涂层在钢板上的附着力(图 8)。从图 8 可以看出,附着力最大值并不是出现在温湿循环初期,也不是在模拟老化的末期,而是在中间某个阶段。具体而言,在此次试验中,A 组试样(厚度 0.7 mm)、B 组试样(厚度 1.6 mm)的最优附着力出现在循环次数 $N=30$ 时;C 组试样(厚度 2.3 mm)的附着力在模拟期间持续增长。C4 的附着力出现突增,其变化趋势是否正常暂时不能下定论。图 8 中虚线表示数据缺失。

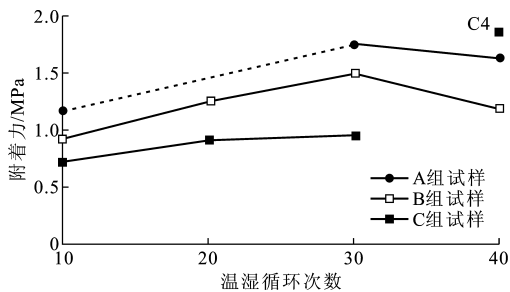


图 8 涂层附着力与温湿循环次数的关系
Fig. 8 Relations of Coating Adhesion Forces and Cycles of Temperature and Humidity

用不同途径测试的材料力学强度会发生变化,且其测量值的数量级也会因为试验条件不同而不同。有研究认为,力学性能的测量结果有时难以得到准确的解释。

试验结果显示,从粘结强度的角度而言,钢结构防火涂料涂层厚度小的比涂层厚度大的附着力大,这主要是因为涂层厚度较大时,漆膜中残存相对多的溶剂,如二甲苯削弱了树脂的交联密度以及范德华力。故防火涂料较薄时,更有利于抵抗老化变形。

2.4 结构变化

不同次数的温湿循环结束后,宏观上通过肉眼观察涂层表面特征发现,A 组试样基本保持完整,B 组试样出现极微小的龟裂,C 组试样出现 Y 字形龟裂(图 9)。

Wypych 等^[10]通过试验发现,温度和湿度的变化率会触动涂层的破坏条件,其中水分是导致裂隙的直接因素。试验结果表明,随着涂层厚度的增大,温湿循环导致涂层发生收缩变形的现象更加明显。

通过扫描电子显微镜(SEM)可以进而观察防火涂料的微观结构特征,如颗粒之间的联结情况。A 组试样由于涂料涂层厚度太薄,无法获得电镜试验所必须的足够大小的涂料试样,因此只对 B 组和

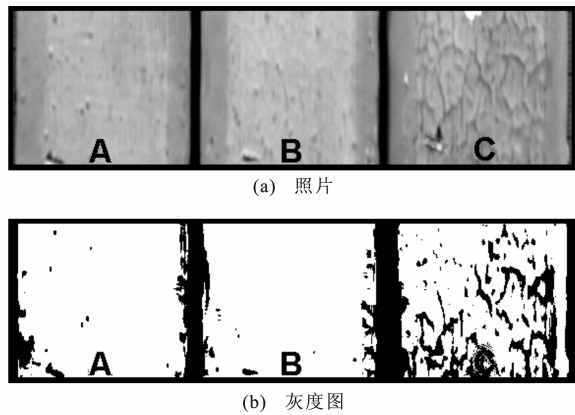


图 9 温湿循环后涂层表面特征
Fig. 9 Surface Features of Coatings After Cycles of Temperature and Humidity

C 组试样进行了分析。图 10 为温湿循环前后 C 组试样涂层 SEM 照片对比。从图 10 可以看出,温湿循环前防火涂料断面中颗粒结构比较紧密,仅通过观察 SEM 照片,还难以得到定量的判断。

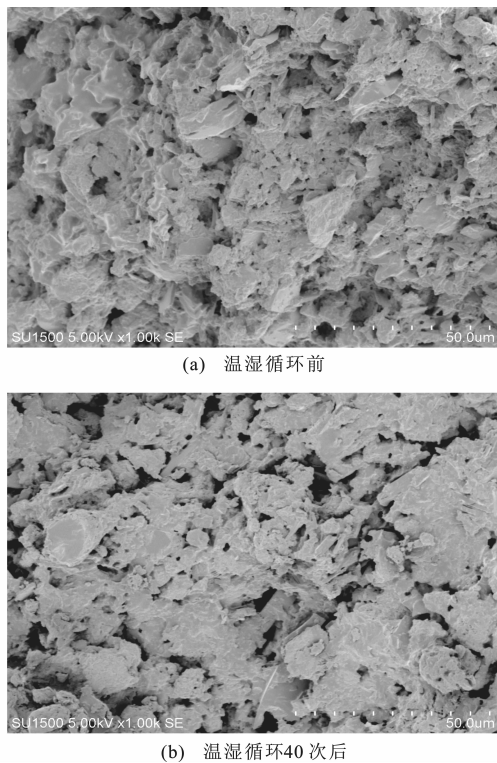


图 10 温湿循环前后 C 组试样涂层 SEM 照片对比
Fig. 10 Comparisons of SEM Photos of C Group Coating Sample Before and After Cycles of Temperature and Humidity

本次研究采用 IMAGEJ 图像处理软件^[11]进一步定量处理 SEM 照片。利用该软件,对拍摄的 SEM 照片进行了二值化处理,并对试样中的孔隙参数进行统计分析。

处理后的孔隙分布结果见表 5。从表 5 可知,B 组、C 组试样的横断面,其孔隙平均面积和孔隙面积比在温湿循环后都比温湿循环前的数值有所增大。这表明温湿循环有使涂层孔隙扩大的趋势,而且涂料的初始涂层厚度越大,涂层孔隙扩大的趋势越明显。高分子材料在湿热情况下更容易降解,有小分子跑出;另外涂料涂层较厚时,漆膜中残存相对较多的溶剂,如二甲苯进一步削弱了树脂的交联密度以及范德华力。因此湿热循环次数越多,涂膜越厚,涂层孔隙扩大的趋势就越明显。

表 5 SEM 照片放大 1 000 倍后的涂层表面孔隙情况

Tab. 5 Pore Conditions of Coating Surface After Magnifying 1 000 Times on SEM Photos

试样编号	孔隙总面积/ μm^2	孔隙数目	孔隙平均面积/ μm^2	孔隙面积比/%
循环前	1 897.2	323	5.9	15.5
B1	2 233.2	183	12.2	18.2
B2	2 118.1	185	11.4	17.2
B3	2 399.3	214	11.2	19.5
B4	2 212.4	202	11.0	18.0
C1	3 374.5	213	15.8	27.5
C2	3 373.2	218	15.5	27.5
C3	3 129.7	179	17.5	25.5
C4	2 975.1	186	16.0	24.2

3 结 语

(1)防火涂层的质量损失、厚度减小及涂层颜色变化都与涂层的初始厚度有关。当初始涂层厚度较大时,温湿循环后涂层的质量损失及厚度减少越明显,且温湿循环后涂层颜色变暗,色调向偏黄的方向发展。

(2)随着温湿循环的发展,较薄防火涂层与钢板基材之间的附着力先增大,随后减小;附着力峰值出现在循环中后期。一般情况下,相同循环次数时,薄层涂料的附着力大于厚层涂料。薄型防火涂料更有利于抵抗老化变形。

(3)温湿循环过程中,肉眼观察小厚度涂层表面基本无变化,随着涂层厚度的增大,涂层表面龟裂程度加重。涂层厚度增大,环境变化引起收缩、龟裂、翘曲、剥离的风险增大。除此之外,温湿循环有使防火涂层孔隙扩大的趋势。

(4)防火涂层厚度越小,其耐久性越强。

参考文献:

References:

[1] 陈建领. 钢结构建筑的火灾危险性和防火涂料保护浅

析[J]. 江西化工,2005(3):49-51.

CHEN Jian-ling. Discussion About the Danger of Conflagrations and Protection of Fire Resistive Coating for Steel Structure Buildings[J]. Jiangxi Chemical Industry,2005(3):49-51.

[2] 程海丽. 钢结构防火涂料的耐久性问题[J]. 新型建筑材料,2003(9):1-2.

CHENG Hai-li. Durability of Fire Resistive Coating for Steel Structure[J]. New Building Materials,2003(9):1-2.

[3] 孙黎明. 建筑钢结构的防火处理[J]. 中国新技术新产品,2010(2):150.

SUN Li-ming. Fireproof Protection of Steel Structure [J]. China New Technologies and Products,2010(2): 150.

[4] SAKUMOTO Y, NAGATA J, KODAIRA A, et al. Durability Evaluation of Intumescent Coating for Steel Frames[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001,13(4):274-281.

[5] MISZCZYK A, DAROWICKI K. Effect of Environmental Temperature Variations on Protective Properties of Organic Coatings [J]. Progress in Organic Coatings,2003,46(1):49-54.

[6] 师 华,郑卫东,熊家锦,等. 超薄型钢结构防火涂料在不同钢材上的防火性能研究[J]. 消防技术与产品信息,2003(11):16-21.

SHI Hua, ZHENG Wei-dong, XIONG Jia-jin, et al. The Study of Fire Proof Characteristics of Superthin Fire Proof Coating for Steel Structure on Various Kinds of Steel[J]. Fire Technique and Products Information,2003(11):16-21.

[7] PERERA D Y, OOSTERBROEK M. Hygrothermal Stress Evolution During Weathering in Organic Coatings[J]. Journal of Coatings Technology, 1994, 66(883):83-88.

[8] NORVAISIENE R, BURLINGIS A, STANKEVICIUS V. Durability Tests on Painted Facade Rendering by Accelerated Ageing[J]. Materials Science,2010,16(1):80-85.

[9] WYPYCH G. Handbook of Material Weathering[M]. 3rd ed. Toronto:ChemTec Publishing,2003.

[10] WYPYCH G, LEE F, POURDEYHIMI B. Instrument Selection Affects Correlation of Laboratory and Outdoor Exposures of Sealants[J]. Polymeric Materials Science and Engineering,2000(83):143-144.

[11] ABRAMOFF M D, MAGELHAES P J, RAM S J. Image Processing with Image[J]. Journal of Biophotonics International,2004,11(7):36-42.