

# 文物建筑灌浆修复效果科技检测技术应用研究

## ——以杭州闸口白塔保护工程为例

叶 良,李强强

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

**摘 要:** 为了对杭州闸口白塔保护工程灌浆修复效果进行科学评价,以及在石质文物建筑灌浆加固效果科技检测方面开展应用研究,故在对白塔本体进行前期病害勘察并了解其灌浆加固工艺的基础上,利用微波湿度法和红外热成像、色差检测等技术,对灌浆加固的深度、加固材料的性能、色差变化进行定量的检测和分析。检测结果表明,白塔平均灌浆加固深度为9~11 cm,塔身灌浆材料的黏结性能良好,材料内部均匀致密,修复材料与原材料存在一定的色差,具体变化情况需进一步监测确定。微波湿度法、红外热成像等科技检测手段为文物建筑保护工程验收提供科学依据,同时有利于建立文物建筑健康监测和预警的长效机制,延长石质文物建筑寿命。

**关键词:** 灌浆加固;科技检测;文物建筑

**中图分类号:** TU502.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2018)01-0058-07

## Research on the application of scientific and technological detection techniques for grouting repairing effect of cultural relics buildings —A case study of White Pagoda in Zhakou, Hangzhou

YE Liang, LI Qiangqiang

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of  
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to scientifically evaluate the effect of grouting repairing in the protection project of White Pagoda in Zhakou, Hangzhou and conduct a research on the application of scientific and technological detection for grouting reinforcement effect of stone cultural relics buildings, based on the preliminary disease investigation of White Pagoda and understanding of its grouting reinforcement technology, the depth of grouting reinforcement, the performance of

---

**收稿日期:** 2017-07-21

**基金项目:** 浙江省文物保护科技项目(2015017);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C33058);浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2016R415015)

**通信作者:** 叶 良(1973—),男,浙江省嘉兴人,副教授,硕士,主要从事古建筑施工技术与管理研究。E-mail: yeliang88@126.com。

reinforcement material and the change of color difference were measured and analyzed quantitatively with the techniques of microwave humidity, infrared thermal imaging and color difference detecting. Test results show that the average grouting reinforcement depth of White Pagoda ranges from 9 to 11cm, and the grouting material is satisfactory in bonding property, and uniform and compact in internal structure. There is a certain color difference between repairing materials and raw materials, with specific changes subject to further identification. Microwave humidity, infrared thermal imaging and other scientific and technological detection means provide scientific basis for acceptance of cultural relics protection project. At the same time, it is beneficial to establish long-term mechanism of health monitoring and early warning of cultural relics buildings, and prolong the service life of stone cultural relics buildings.

**Keywords:** grouting reinforcement; scientific and technological detection; cultural relics buildings

白塔位于钱塘江北岸,之江路北侧,为五代时期古塔,宋《梦粱录》、元代《古杭杂记》、清《湖山便览》也都有关于白塔的记载。白塔高 16 m,整体由白石雕刻砌筑而成,是八角九层仿木构楼阁式古建筑,根据白塔的建筑时代风格和营造技术手法,鉴定该塔为五代吴越后期的建筑<sup>[1]</sup>。白塔构造精美别致,具有较高的历史价值、艺术价值和文化价值,但由于长期暴露在自然环境中,再加上近年来人类社会活动的影响,白塔表面风化、结构性裂缝等病害突出,因此,2014 年相关部门启动了杭州闸口白塔加固与防风化保护工程。目前,对该类文物建筑修复效果检测的应用研究多局限于对石质文物清洗效果,以及实验室材料模拟老化试块的检测研究,如:周华等<sup>[2]</sup>采用色差仪、显微视频成像仪及三维形貌仪对云岗石窟清洗效果进行检测;曹秋彬等<sup>[3]</sup>通过 CM-2600d 分光测色计测试模拟石质文物在 6 种腐蚀老化环境中的色度变化环境因素对石质文物表面色度的影响;雷涛<sup>[4]</sup>筛选出石质文物表面封护材料、加固材料和黏结材料的主要性能指标,建立评价指标并将其应用于重庆大足石刻的模拟试块;施铁樱等<sup>[5]</sup>提出了常规检测评估技术、实验室检测评估技术及现场无损检测评估技术在石质文物表面化学清洗效果检测方面的应用。Gaspar 等<sup>[6]</sup>则采用激光干涉仪,用白色光线干涉度量法测定石质文物表面三维形貌和波阵来比较激光清洗、化学清洗、蒸汽清洗的效果及可靠性。此外,目前的一些检测技术多用于石质文物建筑修复前期的病害勘察,比如:姚远<sup>[7]</sup>利用超声波技术在石质文物风化病害检测进行了研究;周霄<sup>[8]</sup>等利用回弹法对石质文物建筑物理力学性进行检测;马宏林等<sup>[9]</sup>利用超声波及首波幅度对石质文物裂隙进行了检测及分析;魏立岩<sup>[10]</sup>提出了一种石质文物材料及病害视频检测方法;安程<sup>[11]</sup>研究了非稳态热湿耦合模拟技术在石质文物内部湿热情况检测中的应用。目前,针对石质文物建筑本体修复材料及修复效果检测与评价的研究相对较少,因此,笔者以杭州闸口白塔保护工程修复效果科技检测为例,重点探讨微波湿度法、红外热成像技术、色差检测方法在石质文物建筑灌浆加固效果检测方面的应用研究。

## 1 白塔病害勘察与灌浆加固工艺

### 1.1 白塔病害勘察分析

白塔自建成以来,作为航标塔,历经风霜,受风吹日晒乃至雷击,导致其表面风化较为严重,表面镌刻经文和佛像等石刻磨损严重,且塔身存在多道横向贯裂缝隙和纵向贯裂缝隙,多层塔檐存在缺损开裂现象。因此,多种复杂的结构性病害对白塔的保存寿命造成了极大的威胁,修缮中的白塔见图 1,具体病害统计如表 1 所示。从表 1 可以看出,白塔存在的主要病害类型为结构缝、塔身开裂、塔檐开裂和塔檐缺损,其中结构缝主要存在于 3 层及以下部位,塔身开裂主要产生于第 1 至第 7 层,塔檐开裂及缺失较为普遍,第 8 层塔身出现局部缺损。



图 1 修缮中的杭州闸口白塔  
Fig. 1 White Pagoda being repaired in Zhakou, Hangzhou

表 1 白塔病害勘察情况  
Table 1 Disease investigation of White Pagoda

病害部位	病害类型				
	结构缝	塔身开裂	塔身缺损	塔檐开裂	塔檐缺损
1 层	✓	✓		✓	✓
2 层	✓	✓			✓
3 层	✓	✓		✓	✓
4 层		✓		✓	✓
5 层		✓		✓	✓
6 层		✓		✓	✓
7 层		✓		✓	✓
8 层			✓	✓	✓
9 层				✓	

1.2 白塔灌浆加固工程

1.2.1 灌浆加固材料成分

针对白塔开裂、结构缝等病害,灌浆加固工程选用了两种不同材料:水硬性石灰和糯米灰浆,其基本性能如表 2 所示。水硬性石灰色泽白灰,收干固化时间较短,质地较塔身的石灰岩而言略为疏松脆弱。糯米灰浆色泽白灰,收干时间较长,未干透时韧性和黏结强度较大,材料彻底干透固化后质地较塔身材质而言更为坚固,且黏结性较好。两种材料都是目前较为成熟的保护材料,在不可移动文物的保护和加固领域应用得也比较广泛。

表 2 修复材料基本性能  
Table 2 Basic properties of repairing materials

加固材料	主要成分	物理性状	化学性状	适用范围
水硬性石灰	CaOH、CaCO <sub>3</sub> 、水硬性组分	白色粉末	在空气中易与水反应固化	作为勾缝表面保护材料
糯米灰浆	CaOH、糯米	白色粉末	易在空气中固化	作为勾缝内部黏结保护材料

1.2.2 灌浆工艺

白塔修复工程内部选用糯米灰浆进行填充,采用饱和注入灌浆法,即石缝底部开 1 个小孔,从石缝上部注入灌浆材料,直至底部小孔渗出停止,该方法可确保石缝内部空隙处被灌浆材料充分填满。为避免第一次灌浆因渗透压过小而无法完全渗入石缝内部,待材料表面稍干固化后再灌注 1 次。

糯米灰浆灌注完成后,再距离石缝外部勾填一遍水硬性石灰,因水硬性石灰收干固化时间短,其强度、硬度较塔身石灰岩材质更弱,遇自然因素破坏时,石灰材料先行风化,以保护内部石材和糯米灰浆材料的安全。

2 白塔灌浆加固效果检测与分析

对于加固效果,传统的检测指标是检测灰浆表面回弹强度和灰浆贯入深度。但是,回弹强度需要利用弹簧式回弹仪对表面进行回弹作业,对新加固的、可能未完全固化的材料而言,可能会造成损伤,并且操作时带来的震动对石缝旁边的塔身而言也存在一定的隐患。因此不宜采用回弹法进行检测。贯入法测灰浆强度是业内传统的检测手段,其原理是利用贯入仪的弹簧将测针射入灰浆表面,然后测量测针贯入深度,再根据相关公式计算得到灰浆的强度值。但是本次工程刚刚完成,内部采用的糯米灰浆未完全固化,其质地仍较为软湿,此时如用贯入法进行测量,非但得到的指标缺乏客观性,同时也会在灰浆内部产生较多孔洞,造成灰浆灌注不均匀,影响加固效果。因此也不宜采用贯入法进行检测。本次工作采用微波湿度仪、红外热成像仪对修复材料性能和灌浆加固深度两项指标进行检测。另外,对文物建筑的修

修复应遵循修旧如旧的原则,修复时不仅要使用原工艺、原材料,修复后的文物建筑还应保持其原有的历史面貌,故本次检测增加了一项修复效果的色差检测指标。

## 2.1 微波湿度法检测与分析

微波法通过发射和回收微波对材料内部水分进行检测,用以判断其内部空隙情况,做到对文物建筑加固材料完全无损检测<sup>[12]</sup>。由于水分子是强极性分子,能够将外界电场的能量以势能的形式存储起来,且水吸收损耗的能力要大于其他电介质,所以当微波通过材料时其能量会产生衰减,衰减量取决于该材料含水量,材料含水量越大即湿度越大,其能量损耗越大。工作时对同一测点采用不同深度的探头发射微波,探测到的频率数值单位为兆赫(MHz),对每个测点不同深度多次测量,取平均值进行分析,可以判断其内部水分分布情况,如某一深度的频率损失过大,则说明此深度的材料内部湿度较大即存在较大空隙可以储存水分。在本次检测工作中,采用德国 MOIST210B 型微波湿度仪(图2),选取具有代表性的白塔第2、3、6、7层加固处若干,采用不同探测深度的探头对其内部湿度进行探测,计算并分析其内部空隙情况,判断灌浆加固的深度和效果,具体微波湿度检测数据如表3所示。

表3 微波湿度检测数据

Table 3 Detection data of microwave humidity

探测深度/cm	探测频率平均值/MHz				
	2层东	3层东	2层西	6层西	7层东
3	2 744.8	2 690.0	2 684.3	2 641.2	2 398.5
7	2 834.4	2 443.2	2 683.8	2 801.8	2 654.0
11	1 172.4	1 179.4	1 149.0	1 348.8	1 233.8
30	1 615.4	1 484.75	1 636.3	1 619.0	1 514.5

选取了灌浆加固点进行检测,灌浆深度为9~11 cm左右。根据检测数据可以看出随着灌浆深度的不断增大,内部湿度呈现先小幅度变化,后急剧降低,至最低值后又开始缓慢上升的趋势(图3)。

由于本次灌浆内部材料采用糯米灰浆,是收干较为缓慢的材料,所以在3~7 cm深度时湿度增大,正好反映了糯米灰浆内部湿润的情况。3层东灌浆处因处于脚手架围挡的漏光处,检测时正值太阳直接照射,因此湿度是呈下降趋势的,与其他几处有所区别。湿度至11 cm深处达到最低值,而后缓慢上升。这说明湿润的糯米灰浆渗入深度基本达到9~11 cm,11 cm以上的深度就基本没有糯米灰浆分布了。深11~30 cm处的湿度上升说明了塔身石块内部存在空隙,因为空气湿度总是大于致密石材内部湿度。另外,根据数据分析得到,从塔的2层至7层,同一探测深度上,每层的湿度数据相差无几,这说明从地下上渗的水汽不多。

## 2.2 红外热成像技术检测与分析

任何温度大于-273 ℃的物体都是热辐射源,而红外热成像技术正是基于物体的热辐射特性,根据物体表面缺陷及材料的热特性所产生的温度场的变化来对物体进行无损检测的一种方法<sup>[13]</sup>。当修复面与粘接材料之间有空鼓或者剥离时,因空气导热系数较低经修复面传递的热量会在材料缺陷处堆积,使得有材料缺陷的位置与正常的位置温度变化不一致<sup>[14]</sup>。所以,通过红外热成像技术可以



图2 MOIST210B型微波湿度仪

Fig. 2 MOIST210B microwave hygrometer

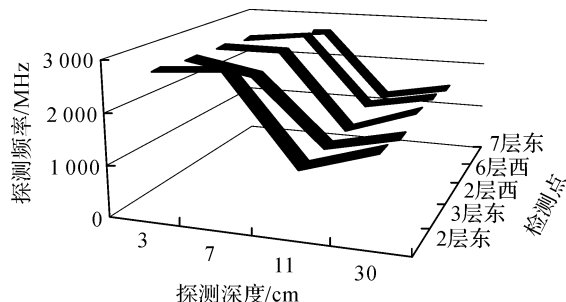


图3 白塔各层塔身微波湿度折线图

Fig. 3 Line chart of microwave humidity of tower body of White Pagoda

对材料粘接修复效果进行检验与监测,同时红外热成像技术对文物表面完全无损,是安全可靠的检测手段。

灌浆材料如果品质较低或加工不均匀,内部存在杂质或气泡,其材质比热值偏差较大,在红外热成像图像中反映出来是不均匀的温度值域。灌浆材料如若选择不当,其储热性能过高或过低的,与塔身石材不同步吸热或放热,会干扰周围石材的冷热运动速率,加速毛细水和盐分的迁移运动,在红外热成像图像中反映出来是温度变化的差值在长时间内未归零。因此,在本次检测工作中,要观察加固处内部温度变化的均匀情况,以及加固处和周边紧贴的石材温度变化差值。利用户外温度较高的自然条件,对塔身进行喷水降温试验。检测选取了塔身第 3 层 4 处灌浆修复点进行红外热成像检测试验,首先利用喷壶将蒸馏水均匀喷至塔身灌浆处表面 1 次,喷水时间为 2 min 左右,再用 FLIR 型红外热像仪观测在目标时间段内灌浆处和周围石材温度变化的情况。4 处试验都选取了第 3 层塔身灌浆处进行。喷水前灌浆处温度比石材略高,说明灌浆材料吸热性能比石材要高一些。喷水后过 5 min 测量得到,灌浆处和石材表面温度基本上回到喷水前,说明水分没有长期停留在材料内部,材料内部透水性能良好,材料本身较为均匀致密,黏结效果良好。如果红外热成像照片上出现表面温度的明显断层,说明灰浆和石材之间已经脱开,黏结作用失去。根据图 4 各检测点红外热成像图片可以看到,温度的过渡十分均匀,并没有出现明显的断层情况。这说明塔身灌浆材料的黏结性能很好,材料内部均匀致密,没有出现松动脱开的现象。

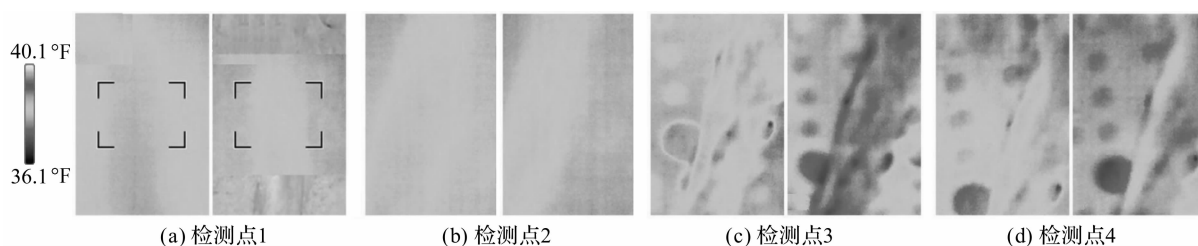


图 4 各检测点降温试验前后红外热成像对比

Fig. 4 Comparison of infrared thermal imaging before and after cooling test of each detection point

### 2.3 白塔修复效果色差检测

为定量检测修复材料与白塔石材色度差异并为后期修复效果色差监测提供数据基础,本次检测试验采用三恩牌 NR110 型数字显示色差仪,对闸口白塔第 1、2、4、6 层选定点位进行了色差检测。色差仪所检测的色差是指用定量的方式来表示两种颜色给人们色彩感觉上的差异,这种差异是颜色的 3 种指标即  $L$ (明度)、 $a$ (彩度)、 $b$ (色相)综合作用的结果<sup>[15]</sup>,另外用  $C$ (饱和度)和  $H$ (色调)辅助评价色差。通常而言,如果  $\Delta L$  为正,说明试样 2 比试样 1 颜色浅;如果  $\Delta L$  为负,则说明试样 2 比试样 1 颜色深。若  $\Delta a$  为正,表明试样 2 比试样 1 红(或者少绿);若  $\Delta a$  为负,则说明试样 2 比试样 1 绿(或者少红)。若  $\Delta b$  为正,表明试样 2 比试样 1 黄(或者少蓝);反之亦然。

根据国际照明委员会 CIE(International Commission on Illumination)色差公式<sup>[16]</sup>:

$$\Delta E_{ab} = [(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta E_{ab}$  为色差值; $L_1$ 、 $L_2$  为修复前后明度值; $a_1$ 、 $a_2$  为修复前后彩度值; $b_1$ 、 $b_2$  为修复前后色相值。

虽然目前许多研究者在其他领域也提出了相关色差计算公式,但是在文物保护领域 CEI76 应用较广泛,所以本次检测仍采用式(1)对白塔修复材料与白塔最初修建所用原材料综合色差  $\Delta E_{ab}$  进行分析评价,表 4 为相应检测点色差原始数据,表 5 则为根据式(1)计算出的各检测点色差值,图 5 则是根据表 5 绘制出的各检测点色差柱状图。

从表 5 结合图 5 可以看出,闸口白塔刚修复后所用水硬性石灰和糯米灰浆材料与白塔原有材料色差比较明显,其中色差最明显的是 6 层 2 面和 2 层 2 面检测点,色差相对较小的是 1 层 7 面检测点;而从修复材料(即原材料)之间的对比来看,修复材料色差仅为 0.84,即表明所用修复材料各批次色差较小,明

显色差产生的原因应是一千多年来闸口白塔受自然环境的影响在各检测点与原有材料色差明显,各检测点修复材料色度会在一定时期内接近原材料色度,因此需要进一步监测色差变化情况。

表 4 白塔色差检测数据

Table 4 Color difference detecting data of White Pagoda

检测点位	色度指标				
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	<i>H</i>
原材料	68.61	2.08	5.10	5.51	67.87
1 层 1 面(修复前)	68.92	1.43	4.66	4.88	68.34
1 层 1 面(修复后)	67.17	12.28	10.54	7.19	63.43
1 层 7 面(修复前)	68.84	0.92	4.57	4.66	68.83
1 层 7 面(修复后)	64.09	7.88	9.72	12.51	65.44
2 层 2 面(修复前)	74.77	20.68	16.11	26.21	61.67
2 层 2 面(修复后)	60.64	1.55	7.13	7.30	68.96
4 层 2 面(修复前)	70.10	2.02	4.93	5.33	67.87
4 层 2 面(修复后)	60.30	8.34	9.48	12.63	65.09
6 层 2 面(修复前)	64.35	4.10	6.03	7.30	66.55
6 层 2 面(修复后)	98.70	11.69	4.13	11.90	42.92

表 5 色差计算结果

Table 5 Calculation result of color difference

检测点位	色差值 $\Delta E_{ab}$
1 层原材料	0.84
1 层 1 面	12.46
1 层 7 面	9.88
2 层 2 面	25.42
4 层 2 面	12.52
6 层 2 面	35.23

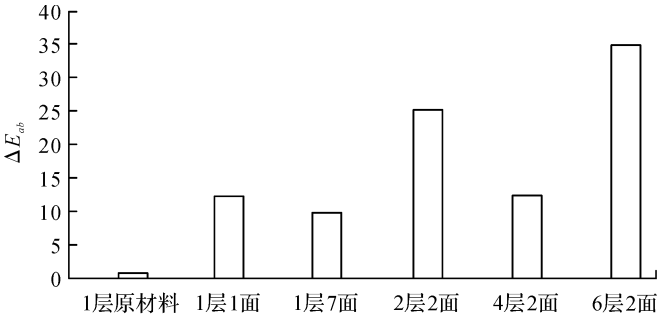


图 5 各检测点修复前后色差

Fig. 5 Color difference of each detection point before and after repairing

3 结 论

文物建筑灌浆加固效果科技检测是对其修复材料和修缮工艺的一种重要评价手段,也为文物建筑的安全保存提供保证,本研究通过对杭州闸口白塔灌浆修复效果科技检测数据的分析,可以得出如下结论:

- 1)通过对微波湿度数据结合红外热成像图像分析可知,白塔平均灌浆深度为 9~11 cm,黏结材料与本体兼容性较好,即表明本工程灌浆加固工程采用“内用糯米灰浆黏结,外施水硬性石灰加固”的工艺是合适且经济的,灌浆深度符合要求,灌浆材料质量可靠,且具有一定的推广价值。
- 2)根据色差数据分析,白塔修复材料色差会受环境影响而变化,与白塔石材表面色度接近程度,以及修复材料与原材料色差还需长期进一步监测。
- 3)微波湿度、红外热成像等科技检测技术的应用能够较为科学地对石质文物建筑展开全面的病害诊断与系统的修复效果检测评估,这为石质类文物建筑的保存与后期的监测等相关研究提供有力的数据支撑。
- 4)闸口白塔作为浙江省内年代较为久远的石塔,其表面风化和结构威胁属于比较典型的,发育比较成熟的病害。对这样程度的病害修复工程进行检测,具有代表性和示范性,因此有必要对灌浆材料的持久性、灌浆效果的长期性以及白塔病害的新情况进行长期监测。

## 参考文献:

- [1] 鲁非. 白塔[J]. 浙江档案, 2013(6):38.
- [2] 周华, 高峰, 王扬, 等. 云冈石窟石质文物表面污染物清洗效果检测技术实验[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(1):15.
- [3] 曹秋彬, 程霞. 环境因素对模拟石质文物表面色度影响的研究[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(11):17.
- [4] 雷涛. 石质文物保护材料评价方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [5] 施铁樱, 张秉坚. 石材与石质文物表面化学清洗效果检测评估技术[J]. 石材, 2011(5):17.
- [6] GASPAR P, HUBBARD C, MCPHAIL D, et al. A topographical assessment and comparison of conservation cleaning treatments[J]. Journal of Cultural Heritage, 2003, 4(1):294.
- [7] 姚远. 超声波法在检测石质文物病害方面的试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [8] 周霄, 高峰. 石质文物风化病害研究及无损微损检测方法[J]. 中国文物科学研究, 2015, 38(2):68.
- [9] 马宏林, 甄刚, 闫敏, 等. 超声波速分析及首波幅度分析方法在石质文物裂隙检测中的应用[J]. 文博, 2015, (6):90.
- [10] 魏立岩. 石质文物材料的视频检测技术研究[J]. 才智, 2013(7):286.
- [11] 安程. 非稳态热湿耦合模拟技术在我国石质文物中的应用初探[J]. 文物, 2016(4):91.
- [12] 贺章, 张秉坚, 赵鹏, 等. 石质文物劣化程度的一种定量测评方法: 以北京故宫养心殿区域石质文物为例[J]. 石材, 2017(5):27.
- [13] 周霄, 付永海, 李黎. 承德永佑寺避暑山庄后序碑红外热像[J]. 无损检测, 2015, 37(4):33.
- [14] 袁仁续, 赵鸣. 红外热像技术在无损检测中的应用研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2005, 33(增刊 1):203.
- [15] 张金凤. 土遗址化学加固保护中色差的评定问题[J]. 中国文物科学研究, 2016, 44(4):51.
- [16] 郑元林, 杨淑蕙, 周世生, 等. CIE 1976 LAB 色差公式的均匀性研究[J]. 包装工程, 2005, 26(2):48.

(上接第 36 页)

- [7] FAN G, YU H, CHEN L, et al. A formal aspect-oriented method to model and analyse secure service composition [J]. International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems, 2015, 8(2/3):119.
- [8] SHIN M, GOMAA H, PATHIRAGE D. Reusable secure connectors for secure software architecture[C]//International Conference on Software Reuse. Limassol: Springer International Publishing, 2016:181.
- [9] RINGERT J O, RUMPE B, WORTMANN A. Transforming platform-independent to platform-specific component and connector software architecture models[C]//Workshop on Model-Driven Engineering for Component-Based Software Systems (ModComp'15). Ottawa: AMC/IEEE, 2015:30.
- [10] RINGERT J O, RUMPE B, WORTMANN A. Tailoring the MontiArcAutomaton component and connector ADL for generative development[C]//Joint Morse/vao Workshop on Model-Driven Robot Software Engineering and View-Based Software-Engineering. L'Aquila: ACM, 2015:41.
- [11] KHORASANI F, SALAJEGHEH A, MOEINI A. A model for run-time software architecture adaptation[J]. International Journal of Software Engineering and Applications, 2015, 6(1):11.
- [12] MEDVIDOVIC N, TAYLOR R N. A classification and comparison framework for software architecture description languages[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2000, 26(1):70.
- [13] POPOVICI A, GROSS T, ALONSO G. Dynamic weaving for aspect-oriented programming[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Aspect-Oriented Software Development. Enschede: ACM, 2002:141.
- [14] WANG H, YING J. An approach for harmonizing conflicting policies in multiple self-adaptive modules[C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Hong Kong: IEEE, 2007:2379.
- [15] USCHOLD M, GRUNINGER M. Ontologies: principles, methods, and applications[J]. Knowledge Engineering Review, 1996, 11(2):93.
- [16] MINSKY M. A framework for representing knowledge[Z]. Massachusetts Institute of Technology, 1974.