

偶联剂改性复合乳液在古建筑黏土砖修复中的应用

贾京健 崔瑾 倪斌
(故宫博物院, 北京 100009)

摘要: 针对古建筑黏土砖传统修复做法的不足, 如剔挖、更换新砖等方法常常造成对墙体较大扰动或造成反复维修浪费的问题。故宫博物院联合中国科学院化学所、北京联合一工科贸中心针对古建筑黏土砖修复技术展开课题研究, 经过反复试验、论证, 研制出偶联剂改性复合乳液。这种高分子材料改性剂能够增强传统材料砖灰的力学性能, 提高砖灰与砖的黏结强度和耐水性。偶联剂改性复合乳液用于古建砖面残损的原地修复, 避免了传统挖补、更换维修对古建筑的扰动, 从而有利于真实、全面地保存并延续古建筑历史信息及文物价值。

关键词: 古建筑 黏土砖修复 硅烷偶联剂 改性复合乳液 砖灰

1. 古建筑黏土砖常见病害和传统修复方法存在的问题

墙体、地面是古建筑重要的组成部分, 主要由黏土砖砌筑或铺墁而成。由于长期直接暴露在自然环境中, 加之人为踩踏磨损, 墙砖或地面砖常常出现风化后缺损等病害。如果不及时进行修复, 不仅影响建筑美观, 甚至会形成结构安全隐患。

1.1 小面积缺损的修复

小面积缺损的传统修复方法通常是用传统材料桐油灰(主要由砖灰、面粉、桐油混合而成)拘抿的方法修补。拘抿桐油灰的方法虽然是继承了传统材料做法, 但经过多年的工程实践证实, 由于材料黏结力较弱, 耐久性不好, 常在维修后不久即出现离骨、脱落现象, 常常需要反复修补, 造成不必要的浪费(图1、图2)。

1.2 砖面刻字的修复

砖面刻字属于人为破坏造成, 由于游客的乱涂乱刻所致。拘抿桐油灰的修复方法由于黏结力较弱无法持久, 实际修复中要想去除刻字通常要将刻字部位磨平。然而在打磨过程中, 经常会伤及到砖肋, 不仅影响墙面美观, 还会威胁到墙体结构。



图1 干摆砖小面积缺损



图2 地面砖小面积缺损

太和殿是紫禁城内最重要的文物建筑，部分游客游览太和殿后将名字刻于太和殿下碱的干摆砖表面，如“某某到此一游”（图3、图4）。干摆砖砖体加工方法为“五扒皮”^①做法，砖肋均要砍“包灰”^②，并留有适当的转头肋（图5、图6）。按要求转头肋一般不小于5mm，但这个部位较为薄弱。在实际打磨加工过程中有时操作不当，加之干摆砖成活前还要经过“墁干活”^③、墁水活”^④工序，这两道工序均需对砖面进行打磨，常常造成转头肋的宽度不能满足要求。打磨砖面的刻字时，深度超过转头肋宽度后，由于砖肋后口留有包灰，在砖与砖之间露出了较宽的砖缝（图7），打通了向砖体内部渗水的渠道，日久容易造成结构安全隐患。要想修复过程不对砖体造成伤害，需要一种黏结强度高，操作简洁，具有可逆性的修复材料，直接将刻伤的部位填平。

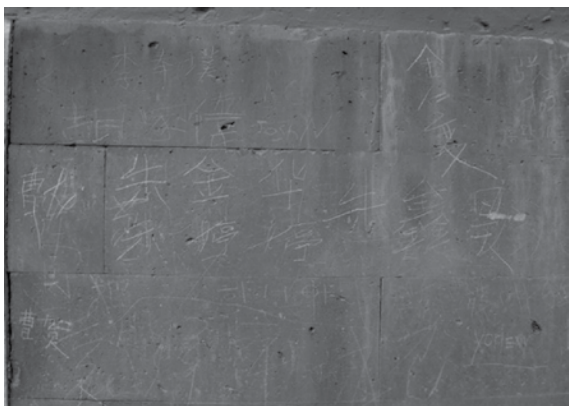


图3 太和殿山墙下碱干摆砖面游人刻画痕迹

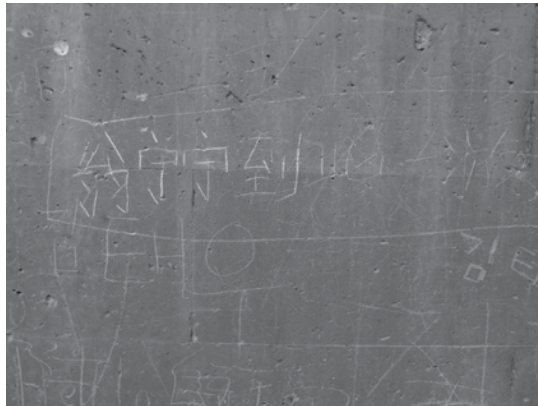


图4 太和殿山墙下碱干摆砖面游人刻画痕迹

① “五扒皮”：墙身砖的加工工艺之一，砖的六个面有五个面都要经过砍磨，主要用于干摆做法的砌体和细墁条砖地面。

② “包灰”：指砖肋要加工成小于 90° ，为此砖的肋要砍去一些，砍去的部分就是包灰。包灰加大了每层砖内侧的缝隙，灌浆时砖缝之间充满浆液，增强了砌体灰浆饱和度。另外，由于砖内侧被砍去一些，墙面的砖缝更加细密美观。

③ “墁干活”：“墙面砌完后，用磨头将砖与砖之间接缝处高出的部分磨平。

④ “墁水活”：用磨头沾水将墁过干活和打点过的地方再细致的磨一次，并沾水把整个墙面揉磨一遍，以使整个墙面色泽和质感一致。

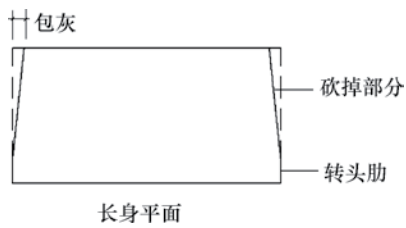


图5 干摆砖五扒皮做法示意（长身砖）

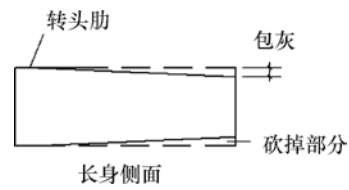


图6 干摆砖五扒皮做法示意（长身砖）



图7 太和殿东山墙下碱干摆砖打磨后露出灰缝

1.3 严重缺损的修复

对于墙砖或地面砖缺损面积较大、较深的部位，传统做法通常是进行剔凿挖补或局部拆砌，补配新砖。局部挖补时用敲手、扁鏊子把所剔的砖与四周保留砖的砖楞隔离开，露出四周保留砖的砖楞后再用锤子和稍长扁鏊子凿，把所剔凿的砖凿碎挖出后，清理填陷砖和四周保留砖的灰浆，然后样活并补配新砖。残坏更为严重时需要局部拆砌，需要将松动的碎砖、灰浆完全清理干净（图8、图9）。然而无论是挖补或拆砌过程中常会对残损砖周围的好砖造成破坏，经常被动地扩大维修范围，甚至还可能由于人为操作不当等原因对墙体内部结构造成过大扰动，形成安全隐患。



图8 英华殿院墙鼓闪进行局部拆砌维修



图9 英华殿院墙鼓闪进行局部拆砌维修

1.4 针对城墙干摆砖残损的修复

在故宫古建筑诸多类型墙体中，城墙的地位非常重要，构造也较为特殊，对于城墙的砖体残损修复较其他类型墙体更为复杂。紫禁城城墙始建于明永乐十八年（1420年），现存主体结构仍为始建时的遗物，具有极高的文物价值。城墙地面以上部分高约10.75m，底部宽约8.5m，外墙面干摆砌筑，内墙糙砖填砌。由于城墙非常高大，为增强其结构稳定性，砌筑时采用了两种构造做法。一种为墙体外皮退“收分”：城墙的下部较宽，向上逐渐向里收，紫禁城城墙的收分尺寸可达城墙高的1/10。

另一种做法为外墙面设置“丁头砖”（丁头露明），丁头砖与顺砖（长身面露明）相间设置，均匀分布在整个外墙面（图10）。丁砖内侧通过糯米浆与糙砖砌筑为一体，外侧磨砖对缝，与相邻顺砖相互挤压，紧密结合。通过这些丁砖的设置，加强了墙体内部结构与外侧干摆砖体的拉接作用。干摆砖的砍磨为五扒皮做法，外侧转头肋部位较宽、后口包灰部位变窄。由于长时间的风化侵蚀，丁砖转头肋部位容易残缺，造成了丁砖与顺砖的脱离。顺砖失去拉接作用，容易向外侧鼓闪，而丁砖内侧砖体因与城墙内部砌筑成为整体而位置相对固定（图11）。丁砖的缺损不仅严重威胁着城墙的结构安全，由于缺损部位易于攀登，甚至威胁了故宫展示文物的安全（图12）。

然而由于丁砖与城墙内部砌筑成为整体而难以更换。近年来，我们常用的维修方法是将外侧鼓闪的砖体与城墙内部砖体用铁件进行拉接锚固（图13、图14）。而工程实践证明，日久铁件生锈鼓胀，将砖体撑裂现象时有发生，因此，要彻底根治这一严重病害，需要一种能在原地进行修复而无需更换新砖而又能保证砖体强度的维修手段。

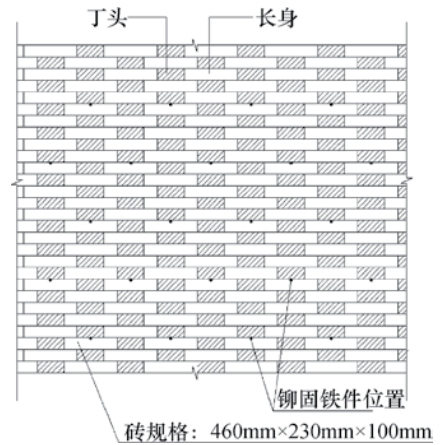


图10 城墙干摆砖排列及铆固位置示意

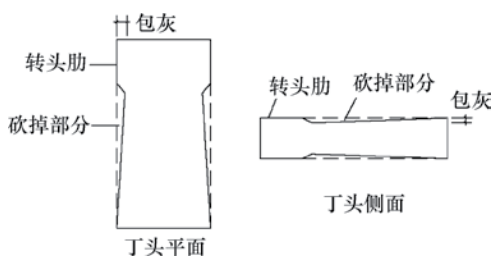


图11 干摆砖五扒皮做法示意（丁头砖）



图12 午门西侧城墙丁砖残缺现状

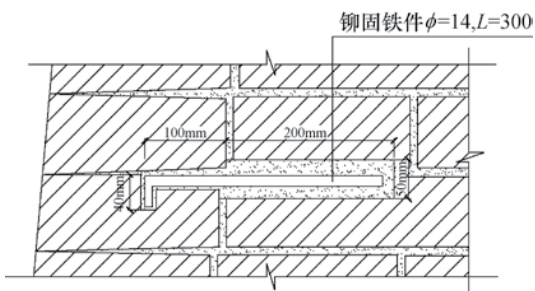


图13 铆固大样-侧视

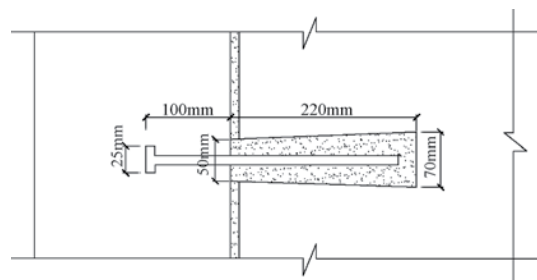


图14 铆固大样-俯视

鉴于传统剔、挖、打磨、更换新砖等维修方法存在对墙体的扰动过大或造成反复维修浪费的问题,怎样在满足强度及外观需要的同时,尽可能减轻对建筑物的干预程度,同时保证修复质量成为当前故宫古建砖面修复的主要研究方向。近年来,故宫博物院相关工作人员联合中国科学院化学所、北京联合一工科贸中心针对这一课题展开研究,经反复试验、论证,研制出偶联剂改性复合乳液。改性乳液添加到传统砖灰材料中,用于古建砖面残损的原地修复,避免了传统打磨、挖补、更换维修对古建筑的扰动。

2. 胶凝材料的应用及发展趋势

凡是自身经过一系列物理、化学作用,或与其他物质(如水)混合后一起经过一系列物理、化学作用,能由浆体变成坚硬的固体,并且能够将散粒材料(砂、石等)或块、片状材料(砖、石等)胶结成整体的物质,称为胶凝材料。

在西方古代的建筑活动中,黏土是最早被用作建筑胶凝材料使用的,古代埃及人就地取材,使用尼罗河的泥浆与沙子和草混合建造建筑物。在此之后,在埃及金字塔的建造过程中,以石料为主要建筑材料,用石膏(主要化学成分是硫酸钙 CaSO_4)作为胶凝材料,起到胶结石块、石板的作用。公元前8世纪,古希腊人就已通过煅烧石灰石而制得石灰作为建筑胶凝材料使用。之后罗马人继承了希腊人使用石灰的传统并加以发展改进,将石灰消解后与沙子、火山灰或砖灰等混合制成混合砂浆用来砌筑建筑物,这种胶凝材料被称为“罗马砂浆”。用它砌筑的建筑物比单纯用石灰和沙子混合而成的砂浆更为坚固、耐久,在欧洲建筑史上曾延续了相当长的时期。

我国在无机胶凝材料的应用方面,也有着非常悠久的历史,早在新石器时代的仰韶文化时期,古人就在居住的山洞表面涂抹“白灰面”。至公元前7世纪,开始出现了石灰^[1]。无机胶凝材料的主要优点是固结后能够达到较高的硬度,对温度的耐受性好,但缺点是耐水性差,日久容易开裂。

在古代建筑工程实践中,人们已经发现单一采用无机凝胶材料的缺陷,并尝试着在无机胶凝材料加入有机物改善其性能,如用糯米汁与石灰等的混合物作胶凝材料垒砌城墙。方法是将糯米煮熟后熬制成糊状,与石灰、黄土等均匀混合配制成复合胶凝材料,用这种材料砌筑的古城墙历经几百年仍然坚不可摧。荆州古城是我国目前保存最完整的四座古城之一,是我国延续时代最长、跨越朝代最多、由土城发展演变而来的唯一古城垣,现存的荆州城是清顺治三年(1646年)在明代城基基础上重建的^[2]。在荆州古城墙保护研究过程中,发现了一段由糯米浆及夯土砌筑的古城墙,这段城墙长约19m,高7.5m,厚约1m,历经数百年的风雨侵蚀,仍然非常坚固。再有,明代南京城城墙的主要部位也是加入石灰和糯米汁的混合物砌筑而成的:城墙顶部和内外两壁的砖缝里,都浇灌一种“夹浆”,系用石灰、糯米汁(或高粱汁)或再加桐油掺和而成,凝固后黏着力很强,保持墙身经久不坏^[3]。此外,在古建筑中常用砖灰和血料、油满等混合作为油饰彩画的地仗层,都是无机凝胶材料与有机材料相结合用于古建工程的成功实例。

在现代土木工程中,水泥是应用最为普遍的无机胶凝材料,水泥是粉状水硬性无机胶凝材料,加水搅拌后成浆体,能在空气或水中硬化,用以将砂、石等散粒材料胶结成砂浆或混凝土。现代水泥种类非常多,按其在水硬性物质名称分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥等。其中,硅酸盐水泥是应用最为广泛的一种类型,硅酸盐水泥是以石灰石和黏土为主要原料,经磨细加工后制成生料,在水泥窑中煅烧成熟料,再加入适量石膏磨细而成。但是一些常用的水泥材料存在易开裂、抗腐蚀能力较差、黏结强度低等缺点。为了改善水泥的性能,

近年来,开展了聚合物水泥砂浆等复合材料的研究,其原理是在水泥砂浆中加入有机聚合物,形成聚合物水泥砂浆,利用有机聚合物的分子特性,将水泥颗粒均匀覆盖,与结构紧密结合成一体,增加了水泥与骨料的黏结强度,有效地阻止了裂缝的形成与发展。同时还具有良好的防水抗渗效果,其抗腐蚀能力及耐高湿、老化、抗冻性能均显著提高。今后,将无机凝胶材料与有机材料相结合,形成兼备二者优点的复合胶凝材料将是胶凝材料的重要发展方向。

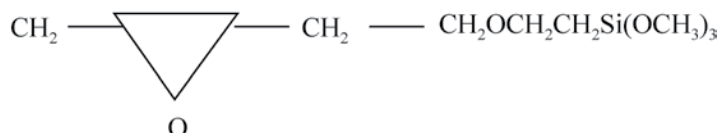
3. 偶联剂改性复合乳液性能与作用机理

上述思路在古建筑砖石修复技术中同样适用,高分子有机材料加入到传统砖灰等无机材料中,将有机材料与无机材料的优点结合起来,形成兼备无机材料和有机材料优点的复合胶凝材料。这种材料用于古建筑黏土砖修复,在继承了传统修复材料优点的同时优化了其多方面性能。我们在这方面的研究已经取得一定的成果,研制出改性丙烯酸乳液,与传统材料砖灰等混合,用于古建黏土砖的修复,其主要成分包括氯-偏乳液、有机硅、丙烯酸、助剂。它具有如下技术特征:①高强、高效,与砖粉有较强黏结性,固结后的砖块强度与原砖相近,与原砖墙材料有良好的黏结性。在高温、高盐分及自然环境下不易产生剥落。②施工便捷,无需特别设备与工具,操作简便。③具有补强功能,提高墙体抗压、抗弯曲能力。④耐久性强,具有优良的防风化、抗紫外线及环境老化功能。⑤可替换性,根据需要,经过一定处理后可完全剔出,对原砖无任何损伤。⑥外观与原砖墙材料一致或相近,具有良好的整体观感。

在此基础上,我们又展开了更深入的研究,通过使用硅烷偶联剂作为无机填充物的表面处理剂,可在无机物质和有机物质的界面之间架起“分子桥”,把两种性质悬殊的材料连接在一起,起到提高复合材料的性能和增加黏结强度的作用。

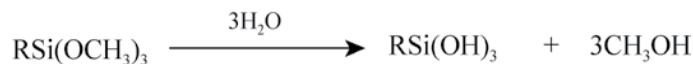
硅烷偶联剂KH560 ($\text{RSi}(\text{OCH}_3)_3$)是一种有机硅材料,它实质上是一类具有有机官能团的硅烷,在其分子中同时具有能和无机材料化学结合的反应基团和与有机材料化学结合的反应基团。其一端基团水解,即生成硅醇($\text{Si}(\text{OH})_3$),能与无机物质结合,形成硅氧烷。另一端有机官能团能与对应的树脂材料起反应。硅烷偶联剂的主要作用,是通过其特殊的分子结构,能够在无机物质和有机物质之间架起一座“分子桥”,把这两种性质差别较大的材料“偶联”起来,使原材料黏结强度显著提高。基本过程是:硅烷偶联剂水解→脱水缩合成低聚物→与无机填料表面的羟基形成氢键→脱水产生部分共价键,从而使无机填料表面被有机硅烷偶联剂所覆盖,并且体系分散均匀。同时,这种偶联剂对胶黏剂中的树脂具有很好的相容性,具有更好的黏结效果。

通过偶联剂改性复合乳液的透射电镜和红外光谱分析,可以推导出添加料偶联乳液复合乳液的结构模型。KH-560分子式为^[4]



将KH-560表示为 $\text{RSi}(\text{OCH}_3)_3$,添加料偶联乳液复合乳液过程如下:

第一步: $-\text{OCH}_3$ 水解



第二步: 硅醇缩合成低聚物

4.1.5 配制面层修补料

细砖灰与修复剂按重量比2:1搅拌均匀呈腻子状待用。

4.1.6 做面

将面层擀至平整。

4.1.7 做砖缝

在面层未完全干燥前用尺板和刮胡刀片划出形似的砖缝，刀片的角度应保持在 $\leq 30^\circ$ 。

4.1.8 养护

养护时间2~3天，温度 $>5^\circ\text{C}$ 。

4.2 墙面砖修复施工步骤

4.2.1 清理基层

将修补面风化严重和松散部分清理干净，至暴露坚固底面。

4.2.2 施胶

在暴露的坚固底面上涂刷一层增强剂。

4.2.3 配制涂料

中粒砖粉：细粒砖粉按重量比2:1混合均匀，按比例加入修复剂搅拌成腻子状待用。

4.2.4 施料

将修补面四周挂一层薄料，再用修补料逐步将四周压实填补。

4.2.5 做面

将面层擀至平整。

4.2.6 养护

养护时间2~3天，温度 $>5^\circ\text{C}$ 。

4.3 工艺要求

黏土砖修补应参照传统工艺施工，黏土砖修补工艺与油饰彩画地仗的工艺非常相近。砖残损面基层的处理（底层施胶）相当于木结构表面汁浆，作用同为清理基层并起到和下一遍灰浆较好结合的作用。修补材料的主要成分为改性乳液与砖灰的混合物，根据不同的工序需要，配以不同颗粒大小的砖灰，相当于地仗材料所用的大籽灰、中灰、细灰。

在面层处理上，以往抹灰常用的是瓦工用的抹子，抹子作用面积较小，不能一次成活，需要反复找补，成活后砖面很难平整。在黏土砖面层处理工序中，我们采用油工做地仗用的灰板，油活地仗通灰层是使麻的基础，抹灰后需要用板子刮平（俗称“过板子”）以达到刮平直圆的效果（图15、图16）。灰板长度通常大于砖的长度且板口平直，用灰板处理砖面层可以一次成活并达到衬平刮直的效果。过板的要领是手持灰板要稳、用力要均匀，自下而上一板刮平^[5]（图17）。



图15 檐檩做通灰所用的灰板



图16 檐檩通灰层使用灰板后的效果



图17 干摆砖面使用灰板后的效果

5. 偶联剂改性复合乳液的工程实例

5.1 故宫兆祥所墙面修复

5.1.1 墙面形制

干摆下碱做法。

5.1.2 残损现状分析

受自然条件影响，砖外表面风化、酥碱，但破损深度较浅。

5.1.3 维修方案

传统修复方法是用砖灰和桐油混合将破损部位捣平平整，但实践证明这种材料黏结强度低，耐久性差，常在维修后不久即出现离骨脱落现象。为提高粘接强度，延长修复周期，我们采用改性乳液对残损面进行修复（图18、图19）。



图18 修复前的兆祥所干摆墙面砖



图19 修复后的兆祥所干摆墙面砖

5.2 故宫衍祺门外地面砖修复

5.2.1 地面形制

条砖陡板十字缝做法。

5.2.2 残损现状分析

因地处开放区，受人为破坏因素较大，部分地面砖出现局部深度较大的缺损。

5.2.3 维修方案选择

传统做法通常是对缺损面积较大、较深的部位进行局部挖补，更换新砖。然而由于砖挖补过程中通常会对残损砖周围的好砖造成破坏，实际操作中常常造成新的人为破坏，而不得不动的扩大维修范围。为尽量减少对建筑物的干扰，我们采用改性乳液对残损面进行原地修复，保留了原始构件及其所含历史信息（图20、图21）。



图20 修复前的衍祺门外地面砖



图21 修复后的衍祺门外地面砖

5.3 东华门城墙城砖修复

5.3.1 墙面形制

墙身城砖干摆十字缝做法。

5.3.2 残损现状分析

由于建筑年代久远，砖体酥碱，残缺现象普遍，个别已经完全缺失。

5.3.3 维修方案

对于砖体完全缺损的部位，传统做法只能是更换新砖。然而由于东华门城墙年代久远，又因结构长期暴露在外，受风雨侵蚀、酥碱、缺损现象较为普遍，挖补、更换过程中可能对墙体内部结构造成过大扰动，甚至形成安全隐患。为确保墙体结构的整体安全性，我们采用改性乳液对残损面进行修复（图22~图25）。



图22 修复前的东华门城墙



图23 修复中的东华门城墙



图24 修复中的东华门城墙



图25 修复后的东华门城墙

5.4 西华门城墙城砖修复

5.4.1 墙面形制

墙身城砖干摆十字缝做法。

5.4.2 残损现状分析

西华门外南城墙丁砖残缺现象较为普遍，墙体局部外闪。由于长时间的风化侵蚀，丁砖转头肋部位残缺，造成了丁砖与顺砖的脱离。顺砖失去拉接作用，容易向外侧鼓山。

5.4.3 维修方案

由于丁砖与城墙内部砌筑成为整体而难以更换。近年常用的维修方法是将外侧鼓闪的砖体与城墙内部砖体用铁件进行拉接锚固，防止墙体继续变形。然而日久铁件容易生锈鼓胀，甚至将砖体撑裂。我们用改性乳液针对西华门外城墙丁砖的残缺进行修补，避免了增加铁件对墙体的扰动，方便有效地防止了墙体鼓闪继续发展（图26~图28）。



图26 西华门外城墙修复前残损情况



图27 西华门外城墙修复前残损情况



图28 西华门外南城墙修复后

6. 文物保护理念在黏土砖修复技术中的体现

随着古建筑保护事业的发展，古建筑保护中对多学科介入的需求将日益彰显。保护理念在工程中的主导地位，使其既成为现代技术介入的依据，又是约束介入的理由。传统砖墙修复方法对古建筑的扰动是难以避免的，而改性修复材料应用的目的正是贯彻文物保护“不改变文物原状”的原则，在保护古建筑的同时，尽最大可能减少对建筑物的扰动。为使修复技术不偏离文物保护法的有关要求，在新型材料的研发过程中，我们从材料性能、材料外观、施工操作、修复可逆性等方面展开试验研究。在继承传统材料优点的同时，提高了原材料的黏结强度及耐久性，并接近原材料强度、外观，施工过程简便且具有可逆性。现代高分子材料与传统无机材料相结合运用于古建黏土砖修复是用现代材料技术对传统材料进行改进并应用于古建筑保护工作中的典型实例，具体体现在7个方面。

(1) 施工在原地操作，避免了传统修复手段剔挖、更换对古建墙体或地面造成的扰动，在保护修复的同时真正达到最小干预。

(2) 修复材料仍以传统材料砖灰为主要填充材料，继承了原传统材料硬度高，坚固性和耐温性好等优点。

(3) 修复材料与原砖墙材料的黏结强度、耐久性等性能均明显优于原传统材料。

(4) 修复材料其抗压强度、抗弯强度等力学性能接近原砖材料。

(5) 参照油饰地仗的传统工艺做法施工

(6) 修复材料外观与原砖材料非常接近。

(7) 操作具有可逆性。

7. 结 语

在故宫古建大修过程中，由于传统材料工艺的局限性或技术的失传，常常遇到一些难以解决或根治的病害。涉及木结构的虫害问题、脱落地仗彩画的保护问题、砖石材料风化等多方面的问题。目前，一些新材料新技术在现代建筑中的应用已经非常成熟，如果能够科学合理的将其运用于古建

筑保护中,能够解决传统修复方法难以解决的问题。近年来,故宫在这方面加大研究力度,故宫古建筑部、科技部联合中国科学院化学所、中国林业科学院、北京联合一工科贸中心等多家单位开展了琉璃瓦复釉技术、彩画回帖保护、木结构防虫防腐、砖石修复技术等多方面的课题研究,已取得了满意的成果并运用于正在进行的故宫大修工程中。实践证明,要想科学合理的保护古建筑,今后需要加强多学科、多领域的合作,形成系统的科研体系。通过科学的试验、严谨的分析论证,在不违背文物保护法相关精神的前提下,将现代工艺技术进行调整,使其适用于古建筑的保护,最大程度保留历史构件及其所含历史信息。

参考文献

- [1] 王燕谋.中国水泥发展史.北京:中国建材工业出版社,2005:1-2.
- [2] 李玉堂,潘琴.城市意象之城墙情结——荆州古城墙价值及保护策略分析,华中建筑,2006,24(3):128-130.
- [3] 韩品峥,俞韵.古都南京城墙//中国古都研究.第十四辑.中国古都学会第十四届年会论文集.西安:三秦出版社,1997:168-174.
- [4] 北京市文物工程质量监督站.北京市文物保护工程操作规范.北京:燕山出版社,2008.
- [5] 杨新.古建筑保护中现代技术的介入与发展//中国文物保护技术协会第四次学术年会论文集.北京:科学出版社,2007:185-190.