引用格式:王玥,王昱蘅,种瑞琦,等. 川陕地区砖石质古塔砌筑砂浆组分及性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2025,52(5):76-83.

WANG Yue, WANG YuHeng, CHONG RuiQi, et al. Composition and properties of the ancient mortar for masonry pagodas in Sichuan and Shaanxi Provinces, China[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2025,52(5):76-83.

川陕地区砖石质古塔砌筑砂浆组分及性能研究

王　玥[1]　王昱蘅[2]　种瑞琦[2]　周逸航[3*]

(1. 北京化工大学 文法学院, 北京　100029; 2. 北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京　100029;
3. 北京科技大学 科技史与文化遗产研究院, 北京　100083)

摘　要: 砌筑砂浆是砖石质古塔的主要砌筑材料之一,对维系古塔结构稳定起着重要作用。对川陕地区21座不同历史时期的砖石质古塔砌筑砂浆进行组分分析。采用X射线衍射分析砂浆矿物成分;采用碘-碘化钾试剂、班氏试剂、考马斯亮蓝试液等化学指示剂检测砂浆有机添加剂种类;采用显微观察法鉴定砂浆内掺杂物;通过复配试块压缩实验研究不同组分砌筑砂浆的力学性能。研究结果表明,多数砌筑砂浆矿物成分包括石英、长石、云母、方解石和石膏等,所用主要原料为黄土、石灰等;部分古塔砂浆含有还原性糖和蛋白质类有机添加剂,个别古塔砂浆中添加有大麦秸秆;复配试块压缩实验结果表明,各类砌筑砂浆中黄泥相比灰浆具有较大的抗压强度和较小的弹性模量,蛋清的加入可明显提高抗压强度和弹性模量,秸秆的添加可提高砂浆抗压强度。

关键词: 砖石质古塔; 砌筑砂浆; 矿物成分; 有机添加剂; 抗压强度

中图分类号: TU87　　**DOI**: 10.13543/j.bhxbzr.2025.05.008

引　言

我国现存有较多砖石质古塔,这些古塔是建筑技术史的重要载体,值得研究与保护。砌筑砂浆作为砖石质古塔普遍使用的黏接材料,研究其组成和性能对古塔稳定性评估和修缮保护工作意义重大。

对砂浆组分的检测分析方法已较为成熟。材料成分方面,常采用X射线衍射法、红外光谱分析、色谱-质谱联用[1-3]、各类化学和生物指示剂[4]、酶联免疫法[5]等检测矿物成分和淀粉、脂肪酸、还原糖等有机添加剂种类及含量,用显微观察法鉴定动植物纤维等掺杂物[6]。古文献和现有科技分析研究结果表明,我国古代建筑的砌筑砂浆主要组分包括黄泥、石灰、三合土等多种类别,部分砂浆加入了糯米、桐油、动物胶等有机添加剂和动植物纤维等掺杂物以改良砂浆性能,以适用于不同的应用场景[7]。Zhang等[8]对多座我国东部和少数东北、华北和华南地区的古塔砂浆实物遗存进行化学和生物指示剂分析,发现砖石质古塔砌筑砂浆中较常见蛋白类和油类有机添加剂。

在力学性能分析方面,可用回弹法、射钉法在建筑上直接测试砂浆强度[9],或借助工具从建筑上抽取片状或块状的砂浆试样,用剪切法或筒压法检测其抗剪强度或抗压强度[10]。对于无法抽取块状样品的砂浆,常按砂浆组分进行复配后进行测试。现有复配实验的研究以石灰为主要原料的灰浆研究居多,其中包括添加剂[11-13]与砂浆的作用机理、不同成分配比对力学性能的影响等。对于以黄土为主要原料的黄泥或灰土浆研究相对较少,如刘超[14]对石灰和黏土、水泥等复配试件测试,发现添加黏土、水泥等可显著提高抗压强度;孟浩等[15]通过实验发现不同水灰比的复配试样应力-应变曲线并不一致,水灰比(质量比,下同)在0.5~0.7的范围内糯米灰土浆试块有较高的抗压强度。

川陕地区是我国现存砖石质古塔较为集中的

收稿日期:2025-06-23
基金项目:国家重点研发计划(2023YFF0906001)
第一作者:女,1994年生,博士
*通信联系人
E-mail:zhouyihang@ustb.edu.cn

区域,本研究聚焦于该区域的砖石质古塔,对唐、宋、金、元、清共21座古塔砌筑砂浆进行取样和实验室分析。由于现场调研时获取的古塔砂浆样品量很少且已成碎渣状,故采用X射线衍射(XRD)、红外光谱分析(FT-IR)、化学指示剂测试、显微观察等方法分析砂浆样品主要组成成分,并根据砂浆样品主要组成复配砂浆的方式进行抗压性能测试,研究砂浆新制成时的力学性能并比较不同组分砂浆性能特点,以期对未来修缮材料选取提供参考。

1　实验部分

1.1　实验样品和实验材料

在保证古塔结构安全和外观不受明显影响的前提下,选取未经修缮的建筑原始区域,利用钻刀、手铲等工具获取距离表面深约5 cm处的砌筑砂浆样品,样品信息如表1所示。根据砌筑砂浆颜色和状态可大致分为3类,典型样品照片如图1所示。多数古塔砌筑砂浆颜色灰黄,质地较为紧密,如图1(a)所示;部分古塔砌筑砂浆为黄褐色,质地略松散,涂抹不均匀,如图1(b)所示;个别古塔砌筑砂浆为灰白色,质地紧密,如图1(c)。

碘化钾(KI,99%),碘(I_2,99.8%),柠檬酸钠($C_6H_5Na_3O_7$,98%),无水碳酸钠(Na_2CO_3,≥99.5%),无水硫酸铜($CuSO_4$,99%),考马斯亮蓝G250($C_{47}H_{48}N_3NaO_7S_2$,试剂级),磷酸(H_3PO_4,85%),氢氧化钙($Ca(OH)_2$,95%),以上均购于上海麦克林公司;乙醇(C_2H_5OH,分析纯,北京化工厂)。

1.2　实验仪器

X射线衍射仪(X-Pert3 Powder型,荷兰帕纳科公司);傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet Is5型,美国赛默飞世尔科技公司);光学显微镜(OM,LV100N POL型,日本尼康公司);浆稠度仪(SC-145型,北京中科蓝建仪器设备有限公司);万能试验机(INSTRON 5967型,美国英斯特朗公司)。

表1　川陕地区古塔砌筑砂浆样品信息表

Table 1　Sample information of the ancient mortar for masonry pagodas in Sichuan & Shaanxi Provinces

时代	样品编号	样品出处	古塔类型	古塔位置	取样位置/cm
唐	BYT	八云塔	砖塔	陕西省西安市	塔7层-内侧-西侧
	FYS	法源寺塔	砖塔	陕西省渭南市	塔1层-外侧-北侧
	KYS	开元寺塔	砖塔	陕西省咸阳市	塔1层-内侧-南188-距地20
	LSS	罗山寺塔	砖塔	陕西省渭南市	塔1层-内侧-北14-距地125
	NWTSS	南五台圣寿塔	砖塔	陕西省西安市	塔1层-外侧-西-距南210,距地161
	XJS	兴教寺塔	砖塔	陕西省西安市	塔1层-外侧-西-距地115
	XJSSD	香积寺善导塔	砖塔	陕西省西安市	塔1层-外侧-北侧
宋	BSY	柏树源塔	砖塔	陕西省铜川市	塔1层-外侧-南166-距地185
	DQS	大秦寺塔	砖塔	陕西省西安市	塔1层-内侧-西侧
	TT	泰塔古塔	砖塔	陕西省咸阳市	塔1层-内侧-东北23-距地190
	GXJ	蒲江甘溪箭塔	砖塔	四川省成都市	内侧-西南231-距地160
	WBX	文笔星塔	石塔	四川省广安市	塔基-外侧-东86-距地52
金	HYS	海源寺塔	砖塔	陕西省渭南市	塔1层-外侧-东南127-距地174
元	XL	响铃塔	砖石塔	陕西省榆林市	塔1层-外侧-西290-距地158
清	SSGZK	三圣宫字库塔	砖塔	四川省南充市	塔2层-外侧-南198-距地140
	WG	文光塔	砖石塔	四川省自贡市	塔1层-外侧-东100-距地140
	TLZK	桃李字库塔	石塔	四川省内江市	塔1层-外侧-西南219-距地20
	BSDL	白沙碉楼	石塔	四川省马尔康市	外侧-西侧
	ZBDL-N	直波北碉楼	石塔	四川省马尔康市	外侧-西268-距地126
	ZBDL-S	直波南碉楼	石塔	四川省马尔康市	外侧-西北330-距地132
	ZBDL-W	直波西碉楼	石塔	四川省马尔康市	外侧


(a) 陕西省西安市兴教寺塔局部


(b) 四川省阿坝藏族羌族自治州白沙碉楼局部


(c) 陕西省渭南市法源寺塔局部

图 1 典型古塔砌筑砂浆照片

Fig. 1 Photos of typical mortars for ancient pagoda masonries

1.3 测试与表征

X射线衍射 采用XRD对约0.2 g粒径74 μm的样品粉末进行测试。实验条件:射线源为Cu靶Kα射线,电压40 kV,电流40 mA,测试角度范围10°~80°,步长0.013°。

FT-IR 采用傅里叶变换红外光谱仪对样品新鲜表面或内部粉末进行测试。实验条件:ATR模式,测试范围为4 000~400 cm^{-1},分辨率4 cm^{-1},累积16次。

化学指示剂检测 采用化学指示剂对样品粉末用去离子水充分摇匀、静置、离心后取得的上清液进行测试,化学指示剂具体如下。

(1)碘-碘化钾试剂 3 g碘化钾溶解于100 mL去离子水中,待溶解完全后加1 g碘置于棕色试剂瓶中保存,用以检测砂浆样品中是否含有淀粉。

(2)班氏试剂 称取85 g柠檬酸钠,50 g无水碳酸钠加入400 mL蒸馏水,配置成溶液A;称取8.5 g无水硫酸铜加入50 mL热水中,配成溶液B。将溶液B加入溶液A中混合,过滤后保存于试剂瓶,用以检测砂浆样品中是否含有还原性糖。

(3)考马斯亮蓝试液 100 mg考马斯亮蓝G250溶解于50 mL的95%乙醇中,加入100 mL的85%浓磷酸,加蒸馏水至1 000 mL,过滤后冷藏保存,用以检测砂浆样品中是否含有蛋白质类。

掺杂物种属显微鉴定 采用光学显微镜对样品内部植物纤维掺杂物进行鉴定,与常见农作物和纤维作物比较,以确定植物纤维所属植物种属。

1.4 砂浆复配和压缩实验

根据分析所得的砂浆主要组成复配砂浆。其中,还原性糖用红糖代替,蛋白质用鸡蛋清代替,选用氢氧化钙作为石灰组分以节省陈化时间,选用与古塔砂浆矿物成分接近的黄土作为黄泥砂浆主要原料。为获得具有一定流动性和塑性且不易开裂的砂浆,复配的黄泥组的水土比为0.25,灰土浆组的水灰比为0.4,灰浆对照组水灰比为0.7。

砂浆调配好后,参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70—200)测试稠度,即在容器中填装砂浆至距离容器口约10 mm处,自中心向边缘用捣棒插捣25次后敲击容器5~6下使砂浆表面平整,容器装入底座并调节试锥尖端刚好接触砂浆表面,通过控制试锥制动螺丝测试试锥10 s下沉深度,每组砂浆测试2次,两次测试差值应不超过10 mm,取算术平均值作为稠度值。

将各组调配好的砂浆装入模具做成50 mm×50 mm×30 mm的试块各3块,在室温、55%~75%相对湿度下养护28 d,将复配试块表面打磨平整后测试抗压强度。

2 结果与讨论

2.1 X射线衍射

采用X射线衍射对古塔灰浆进行矿物成分分析,获得半定量结果如表2所示。将石英、微斜长

表 2　川陕地区部分古塔灰浆矿物成分分析结果

Table 2　Analysis results of mineral composition of ancient pagoda mortar in Sichuan and Shaanxi Provinces

样品编号	质量分数/%							
	石英	微斜长石	斜长石	云母	方解石	石膏	高岭石	文石
BYT	48.8	6.0	18.8	22.2			4.1	
FYS	2.9				97.1			
KYS	33.7	10.0	15.3	18.6	7.1	9.7	5.6	
LSS	2.5				73.0	24.5		
NWTSS	27.9	11.3	38.0	11.6	4.6	3.7	3.0	
XJS	31.4	7.9	18.0	13.8	14.7	6.6	7.6	
XJSSD	31.8	15.7	14.4	20.5	3.2	7.8	6.6	
BSY	24.4	14.7	18.6	22.1	7.5	4.8	7.9	
DQS	39.2	17.5	16.9	17.4	8.9			
TT	27.2	8.5	11.3	12.3	35.8		4.9	
GXJ	61.2	9.6		20.2		2.9	6.2	
WBX	2.6				56.7	3.7		34.1
HYS	31.6	18.7	14.0	17.8	7.8	5.2	4.8	
XL	28.7	36.7	20.7	7.8		2.1	4.0	
SSGZK	69.4	5.7		13.5	3.5	3.0	4.9	
TLZK	22.7	5.1		9.6	56.2	3.0	3.4	
WG					87.4	12.6		
BSDL	39.8	5.5	22.6	21.4	3.5	1.5	5.7	
ZBDL-N	34.2	12.5	22.4	22.1		2.2	6.7	
ZBDL-S	33.9		37.7	19.9	4.9	1.1	2.5	
ZBDL-W	55.6		21.5	14.2	5.3		3.5	

石、斜长石、云母和高岭石含量求和作为黏土矿物含量,将方解石和文石含量求和作为碳酸钙含量,通过黏土矿物含量、碳酸钙和石膏含量对样品结果进行聚类分析,结果如图2所示。利用方解石、文石和石膏的含量可大致区分砌筑砂浆的主要原料,其中法源寺塔(FYS)和文笔星塔(WBX)主要成分为方解石、文石,推测为石灰灰浆。文笔星塔(WBX)的文石可能是原料使用了砺灰[16]且煅烧不完全所遗留,或是灰浆固化过程中处在二氧化碳分压较高且湿度较低的环境,利于文石生成[17]。罗山寺塔(LSS)、文光塔(WG)主要成分为方解石和石膏。Lu等[18]对钱塘江海堤的研究表明,在淀粉砂浆中加入少量石膏可以加快淀粉砂浆凝结速度,减少收缩率,提高淀粉砂浆的抗压强度和表面硬度,这两座古塔灰浆中石膏有可能是人为有意加入用以提高灰浆性能,也可能由于灰浆风化而产生。桃李字库塔(TLZK)和泰塔古塔(TT)含有较多黏土矿物和方解石,可能是黄土和石灰混合制成的灰土浆。其余古塔砂浆样品方解石含量很少,原料可能为黄土,少量方解石可能源于黄土而非人为添加。

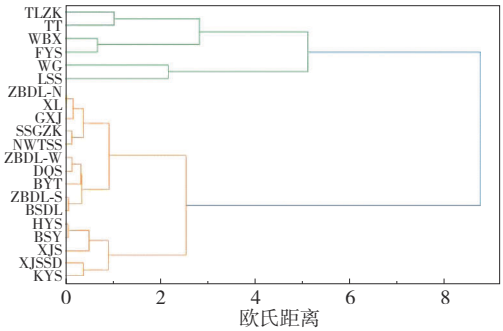


图 2　砂浆样品聚类分析结果

Fig. 2　Cluster analysis results of mortar samples

2.2　FT-IR

采用FT-IR仪对古塔砌筑砂浆样品分析,以了解矿物和有机添加剂成分。可按照红外吸收光谱特征峰将砂浆分为3类,典型样品红外光谱如图3所示。多数样品在1 011 cm^{-1}和778 cm^{-1}附近有硅酸盐和石英特征峰,在1 794 cm^{-1}、1 409 cm^{-1}、872

cm^{-1}和712 cm^{-1}附近有方解石特征峰[19]。罗山寺塔(LSS)和文光塔(WG)砂浆样品除了硅酸盐类、石英和方解石特征峰以外,还有3 534 cm^{-1}、3 402 cm^{-1}、1 685 cm^{-1}、1 621 cm^{-1}附近的特征峰,表明含有石膏[20]。八云塔(BYT)、南五台圣寿塔(NWTSS)、大秦寺塔(DQS)和蒲江甘溪箭塔(GXJ)样品未出现方解石和石膏特征峰,在999 cm^{-1}和778 cm^{-1}附近有特征峰,表明主要组成为硅酸盐类矿物和石英。上述结果与X射线衍射分析结果基本一致。所有样品的红外光谱均未见油脂相关特征峰,表明应无油类添加剂。由于蛋白质、糯米等有机添加剂特征峰不明显或与矿物特征峰位置重合[9, 21],难以用红外光谱判断是否含有有机添加剂,需用指示剂进一步分析。

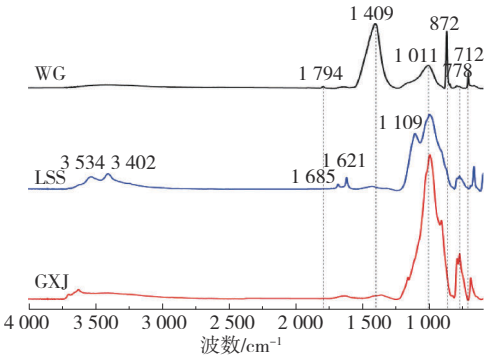


图3 砌筑砂浆典型样品红外光谱图

Fig. 3 Infrared spectra of typical mortar samples

2.3 化学指示剂

用化学指示剂分析砂浆有机添加剂种类,结果如表3所示。结果表明,本次取样的大部分古塔砂浆未添加淀粉、还原性糖和蛋白质等有机质。有机质的添加与古塔所处地域、建造年代无明显规律。然而需要注意的是,在保存过程中,有机质可能会流失,或因含量太低而难以检出。因此,未检测出有机质不代表古塔砌筑时砂浆中未添加有机添加剂。同时,保存过程中样品可能受到环境污染,不排除出现假阳性的可能。

2.4 植物纤维鉴定

21座古塔砂浆中仅直波西碉楼黄泥中观察到包含有人为加入的大量植物纤维,应为人为主动添加,其显微特征如图4所示。可见植物纤维具有典型的禾本科植物长细胞、短细胞交替排列的表皮细胞特征,叶鞘表皮含有波浪状侧壁的长细胞和扁平状气孔,茎秆表皮长细胞侧壁平坦光滑,几乎不含

表3 川陕地区部分古塔砌筑砂浆化学指示剂测试结果

Table 3 Analysis results of chemical indicators for masonry mortar of ancient pagodas in Sichuan and Shaanxi Provinces

样品编号	指示结果		
	淀粉	还原性糖	蛋白质
DQS	−	−	−
BYT	−	−	−
XJS	−	−	−
XJSSD	−	+	+
NWTSS	−	−	+
FYS	−	−	−
LSS	−	−	+
KYS	−	−	−
TT	−	−	−
BSY	−	−	−
GXJ	−	+	−
WBX	−	−	+
HYS	−	+	+
XL	−	−	+
TLZK	−	−	+
SSGZK	−		
WG	−	−	−
BSDL	−	−	−
ZBDL-N	−	−	−
ZBDL-S	−	−	+
ZBDL-W	−	−	−

三圣宫字库塔因样品量过少,仅进行了碘-碘化钾试剂检测。

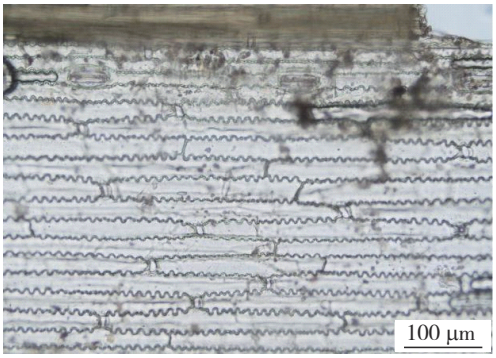
栓质细胞,符合大麦的表皮细胞特征[22]。根据以上特征,鉴定植物纤维来自大麦*Hordeum vulgare* L. 茎秆(含叶鞘)。

2.5 复配样品测试

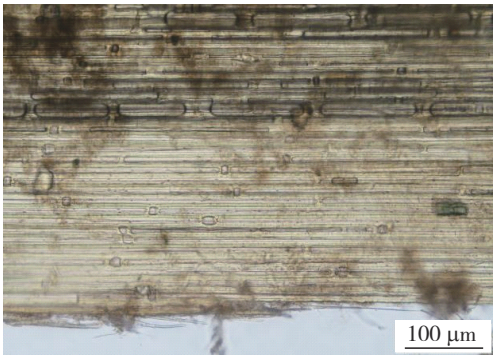
2.5.1 砂浆复配原料选取

由于砂浆样品已经固化,无法获知其原有的水灰比,只能通过参考《天工开物》[16]、《泰西水法》[23]、《武备志》[24]等古代文献并借鉴工人访谈经验[7]和以往的复配实验来确定复配方案,结果仅作参考。

从汉中、甘孜、广汉、大别山和陕北地区购入5种砌筑建筑所用黄土,通过X射线衍射分析其矿物组成,结果表明仅汉中地区黄土矿物成分与各砖石质古塔黄泥的矿物组成接近,主要成分包括石英、钠长石、白云母、方解石、斜绿泥石等,因此选汉中黄土作为复配实验黄土替代品,其X射线衍射分析结果如图5所示。



(a) 植物掺杂物叶鞘表皮细胞特征



(b) 植物掺杂物茎秆表皮细胞特征

图 4　直波西碉楼黄泥(ZBDL-W)中植物纤维显微特征

Fig. 4　Microscopic characteristics of plant fibers in the loess mortar of the Zhibo West Watchtower (ZBDL-W)

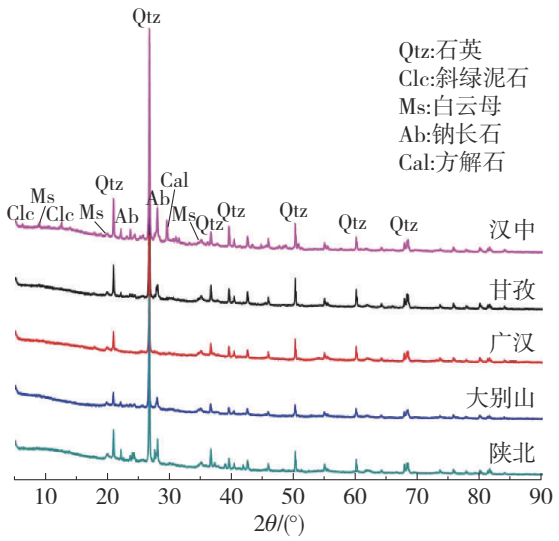


图 5　5地黄土X射线衍射分析结果

Fig. 5　X - ray diffraction analysis results of loess from five regions

2.5.2　灰浆复配试件压缩性能测试

复配砂浆各组别组成、稠度和压缩实验结果如表4所示。可见以黄土为主要原料的黄泥相比于纯石灰制成的灰浆具有较大抗压强度和较小弹性模量。红糖的混入使得抗压强度降低,弹性模量几乎不变,蛋清的加入则提高了抗压强度和弹性模量。秸秆可大幅提高抗压强度,弹性模量几乎不变。以石灰和黄土为主要原料的灰土浆抗压强度低于黄泥和灰浆,这与刘超[14]的实验结果相反,可能与矿物颗粒大小不同有关,也可能是由于28 d的养护时间较短,水化反应尚未完成,胶结作用较弱。

表 4　砂浆复配样品组成和压缩实验结果

Table 4　The composition and compression test results of simulated mortar samples

实验组别	组成	稠度/mm	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
黄泥 1	纯黄土	40	3.5±0.5	179.8±83.3
黄泥 2	黄土,3% 红糖	46	2.3±0.4	175.2±15.6
黄泥 3	黄土,3% 蛋清	38	4.4±0.4	375.0±4.5
黄泥 4	黄土,1% 秸秆	26	7.5	173.1
灰土浆 1	石灰:黄土=1:1	25	1.0±0.1	211.6±83.9
灰土浆 2	石灰:黄土=1:4	42	1.5±0.1	308.2±55.8
灰浆对照组	纯石灰	35	2.9±0.1	637.2±75.7

黄泥4组因运输过程中破碎,仅获得1件复配试件结果。

3　结论

(1)本文分析的21座川陕地区古塔砌筑砂浆中,多数砂浆矿物成分包括石英、长石、云母、方解石和石膏等矿物,其中大多数古塔砂浆含有较少的碳酸钙,推测其原料为黄土,少数砂浆为石灰或由石灰与石膏、石灰与黄土组成,其时代和地域分布无显著规律。

(2)所有古塔砂浆均未检测出淀粉,部分古塔砂浆检测出还原性糖和蛋白质类物质,可能是有机添加剂,仅直波西碉楼砂浆中发现有大麦秸秆作为掺杂物。

(3)砂浆复配实验表明以黄土为主要原料的黄泥相比于石灰灰浆具有较大的抗压强度和较小的弹性模量,蛋清的加入可明显提高抗压强度和弹性模量,秸秆的添加可提高抗压强度但对弹性模量几乎无影响。

参考文献:

[1]　ANDREOTTI A, BONADUCE I, CANTISANI E, et al. Ancient restoration practices in the Monumental Nymphaeum at Tripolis ad Maeandrum (Turkey): multi-analytical approach on Roman and Byzantine bonding mortars

[J]. Journal of Cultural Heritage, 2023, 63: 71-80.

[2] TSOUPRA A, MAHARJA M, TEIXEIRA D, et al. A multi-analytical characterization of mortars from Kathmandu (Nepal) historical monuments[J]. Separations, 2022, 9(8): 205.

[3] 朱晨, 齐国栋, 王栋民, 等. 北京常乐寺围墙古灰浆组分及性能研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2025, 4(1): 101-112.
ZHU C, QI G D, WANG D M, et al. Study on the composition and properties of the ancient mortar in the walls of changle temple in Beijing[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2025, 4(1): 101-112. (in Chinese)

[4] ZHAI K R, ZHANG B J, ZHU L G. A new proposed semi-quantitative method for the organic additives analysis in traditional lime mortar[J]. Journal of Cultural Heritage, 2023,62: 284-292.

[5] ZHANG Y F, LI Q, ZHANG B J. Application of ELISA in cultural heritage: recent advances and challenges[J/OL]. London: Taylor and Francis Ltd (2024-07-16)[2025-06-23]. https://doi.org/10.1080/10408347.2024.2379853.

[6] ZHOU Y H, WANG K, SUN J, et al. Characterizing the sealing materials of the merchant ship Nanhai I of the Southern Song Dynasty[J]. Heritage Science, 2021, 9(1): 48.

[7] 张秉坚, 方世强, 李佳佳, 等. 中国传统复合灰浆[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020: 17-51,74-79.
ZHANG B J, FANG S Q, LI J J, et al. Chinese traditional composite mortar[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2020: 17-34,74-79. (in Chinese)

[8] ZHANG Z Q, ZHANG B J, HU Y L, et al. Developments in chemical and biological detection of organic additives in Chinese historic mortar: a review[J]. Journal of Archaeological Science, 2025, 175: 106149.

[9] 沈治国. 砖石古塔的力学性能及鉴定与加固方法的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
SHEN Z G. Studies on mechanic performance, appraisal and reinforcing technique of bricky and masonry ancient pagodas[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005. (in Chinese)

[10] 康锦霞, 马成理. 平遥古城城墙砖与灰浆的力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(S1): 110-112,93.
KANG J X, MA C L. Mechanical performance experimental research on bricks and mortars of the wall in Pingyao ancient city[J]. Industrial Construction, 2007, 37(S1): 110-112,93. (in Chinese)

[11] CENTAURO I, CANTISANI E, GRANDIN C, et al. The influence of natural organic materials on the properties of traditional lime-based mortars[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2017, 11(5): 670-684.

[12] SHANMUGAVEL D, YADAV P K, KHADIMALLAH M A, et al. Experimental analysis on the performance of egg albumen as a sustainable bio admixture in natural hydraulic lime mortars[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320:128736.

[13] ELERT K, SANCHEZ R M G, BENAVIDES-REYES C, et al. Influence of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of lime plasters[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 625-635.

[14] 刘超. 古建筑砌筑灰浆抗压强度试验研究[J]. 华北地震科学, 2015, 33(Suppl): 35-37.
LIU C. Experimental study on mortar compressive strength of ancient architecture[J]. North China Earthquake Sciences,2015, 33(Suppl): 35-37. (in Chinese)

[15] 孟浩, 韦俊, 周谦祥, 等. 古塔砌筑灰浆力学性能及其影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(3): 188-193,200.
MENG H, WEI J, ZHOU Q X, et al. Pressure performance analysis and influencing factors of ancient mortar in pagoda masonries[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(3): 188-193, 200. (in Chinese)

[16] (明)宋应星. 天工开物: 卷中[M]. 明崇祯十年涂绍煃刊本. 北京: 中国国家图书馆藏, 1637: 257-258.
(Ming) SONG Y X. Tiangong Kaiwu: Volume II[M]. 1637 Ming edition by Tu Shaoqing. Beijing: Collection of the National Library of China, 1637: 257-258. (in Chinese)

[17] TOFFOLO M B, BOARETTO E. Nucleation of aragonite upon carbonation of calcium oxide and calcium hydroxide at ambient temperatures and pressures: a new indicator of fire-related human activities[J]. Journal of Archaeological Science, 2014, 49: 237-248.

[18] LU H, ZHANG B J, HU Y L, et al. A comprehensive analysis of the materials of the ancient Seawall in Hangzhou, China[J]. The European Physical Journal Plus, 2023, 138(12): 1072.

[19] 沈海右. 中国传统与现代石灰生产工艺差异性的科学化认知[D]. 济南: 济南大学, 2024.
SHEN H Y. Scientific recognition of the differences between traditional and modern lime production processes in China[D]. Jinan: University of Jinan, 2024. (in Chi-

nese)
[20] 蔺朝颖. 湖南博物院藏龚承钧仲尼式琴髹漆工艺研究[J]. 文物保护与考古科学, 2024, 36(4): 107-117.
LIN C Y. Research on the lacquering technique for Gong Chengjun's Zhongni-style Guqin collected in Hunan Museum[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(4): 107-117. (in Chinese)
[21] 郑晓平, 魏国锋, 张秉坚. 自制硅酸盐对传统糯米灰浆性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(4): 128-133.
ZHENG X P, WEI G F, ZHANG B J. Influence of prepared silicate on properties of traditional sticky rice-lime mortar[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2017, 39(4): 128-133. (in Chinese)
[22] 周逸航, 王恺, 孙庆伟, 等. 周原遗址西周墓葬出土芦苇编织物的材料鉴定及用途研究[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(2): 45-50.
ZHOU Y H, WANG K, SUN Q W, et al. Study of the materials of reed textiles excavated from the Western Zhou Zhouyuan Site and their funeral usage[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2020, 32(2): 45-50. (in Chinese)
[23] (明)熊三拔. 泰西水法: 卷三[M]. 明万历四十年曹于汴、彭惟成等刻本. 北京: 中国国家图书馆藏, 1612: 2-3.
(Ming) Sabbatino de Ursis. Hydraulic Methods of the Far West: Volume Ⅲ[M]. 1612 Ming edition by Cao Yubian, Peng Weicheng, et al. Beijing: Collection of the National Library of China, 1612: 2-3. (in Chinese)
[24] (明)茅元仪. 武备志: 卷一百三十六[M]. 明天启元年刊本. 北京: 中国国家图书馆藏, 1621: 5a-7b.
(Ming) MAO Y Y. Military Equipment Catalogue: Volume 136[M]. 1621 Ming edition. Beijing: Collection of the National Library of China, 1621: 5a-7b. (in Chinese)

Composition and properties of the ancient mortar for masonry pagodas in Sichuan and Shaanxi Provinces, China

WANG Yue[1]　WANG YuHeng[2]　CHONG RuiQi[2]　ZHOU YiHang[3*]
(1. College of Humanities and Law, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;
2. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;
3. Institute for Cultural Heritage and History of Science & Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Masonry mortar is one of the primary building materials for ancient masonry pagodas and plays a crucial role in maintaining the structural stability of ancient pagodas. The components of masonry mortar from 21 ancient masonry pagodas of different historical periods in Sichuan and Shaanxi provinces were analyzed. X-ray diffraction was used to analyze the mineral composition of the mortar, while chemical indicators including iodine-iodide reagent, Benedict's reagent, and Coomassie brilliant blue solution, were employed to detect the types of organic additives present in the mortar. Microscopic observation was used to identify the plant fibers mixed in the mortar. Compression tests on the reconstituted specimens were conducted to understand the mechanical properties of masonry mortar with different compositions. The research results show that the mineral components of most masonry mortars include quartz, feldspar, mica, calcite, and gypsum, with the primary raw materials being loess and lime. Some ancient pagoda mortars contain reducing sugars and protein-based organic additives, and a few were found to have, barley straw added. Compression tests on the reconstituted specimens show that among various masonry mortars, loess mortar has greater compressive strength and smaller elastic modulus compared to lime mortar. The addition of egg white can significantly increase the compressive strength and elastic modulus, and the addition of straw can enhance the compressive strength of the mortar.

Key words: ancient masonry pagodas; masonry mortar; mineral component; organic additions; compressive strength

(责任编辑:李　蕾)