

第 1 章

绪 论

1.1 问题的提出

贺兰山贺兰口岩画主要分布在贺兰口沟口内外的山壁和沟口外洪积扇坡地上。在 12km^2 的范围内,发现岩画 2318 组、单体岩画 5785 幅。这些岩画,记录了贺兰山远古人类在距今 10000 年至 3000 年前放牧、狩猎、祭祀、战争、娱乐等生活场景,以及羊、牛、马、驼、虎、豹等多种动物图案和抽象符号。随着时间的推移,历史上这里曾经是我国北方匈奴、乌桓、鲜卑、羌、柔然、突厥、回鹘、吐蕃、党项、蒙古等少数民族驻牧和狩猎的地方,留下了丰富的历史文化遗存。这些文化遗存,揭示了原始氏族部落和北方游牧民族自然崇拜、神灵崇拜、生殖崇拜、图腾崇拜、祖先崇拜的文化内涵,对于历史学、考古学、民族学、美学、绘画等学科都有着重要的学术价值,是研究中国人类文化史、宗教史、原始艺术史的文化宝库。

早在公元 6 世纪初的北魏时期,我国著名的地理学家郦道元就发现和记录了贺兰山和阴山等地的岩画。郦道元在《水经注》中记录的岩画点达 20 多处,涉及我国甘肃、山西、湖北等黄河、长江流域的广大地区,并对中国古代的神话传说与岩画之间的关系加以考证论述。在此以后的 1000 多年中,也有不少的岩画被发现,但一直没有引起人们足够的重视。

研究数据显示,全世界 150 多个国家和地区都有岩画分布,但截至目前被列入《世界遗产名录》的岩画点仅有 30 处。中国 31 个省(自治区、直辖市)共有 1266 处岩画分布点,但被国务院公布为全国重点文物保护单位的岩画点仅有 19 处,即宁夏贺兰山贺兰口岩画、江苏省连云港市将军崖岩画、广西宁明花山岩画、云南省沧源岩画、内蒙古巴彦淖尔市阴山岩画、四川省凉山州博什瓦黑岩画、内蒙古乌海市桌子山岩画、内蒙古赤峰市克什克腾旗岩画群、云南省麻栗坡县大王岩画、甘肃省嘉峪关黑山岩画、内蒙古阿拉善右旗曼德拉山岩

画、新疆康家石门子岩画、浙江省台州市仙居岩画、云南省丽江市金沙江岩画、酒泉市大黑沟岩画、西藏其多山洞穴岩画、新疆博尔塔拉蒙古自治州阿敦乔鲁石棚古墓群及岩画群、云南省迪庆藏族自治州金沙江岩画、内蒙古鄂尔多斯市桌子山岩画。同时,中国被列入《世界遗产名录》的岩画点仅有花山岩画一处,这是一个令人十分焦虑的现状。与已被列入世界遗产名录的岩画相比,自然与人为各方面因素日积月累对岩画本体产生的伤害是这些岩画无缘世界文化遗产的关键因素之一^[1]。

贺兰山的古代岩画与崖刻题记,千百年来不仅受到温湿度变化、酸雨、微生物、可溶盐、泥石流、沙尘暴等自然环境因素的侵蚀,而且还不断地受到动植物和人为破坏。尤其是气候、营力作用的影响,使得贺兰口岩画正在承受着物理风化、化学风化和生物风化的多种类型的风化破坏。岩画岩体,主要是岩画本体产生了以开裂、起鼓、剥离等物理破坏为主的病害,对岩画历史及艺术信息造成了破坏,而且随着岩画载体劣化状态衰变,风化作用使得破坏的形势进一步恶化,破坏的速度在加剧。据不完全统计,目前,贺兰口 79.3% 的岩画面临最终被风化殆尽的危险^[2]。

近年来,贺兰山岩画保护和宣传的各种文章见诸传统媒体与互联网传媒中,专刊、专著也出现不少。它们从不同的视角,揭示了贺兰山岩画的发现、意义、保护与传承等,这是一个好的现象,值得肯定。然而,以专著的形式提出岩画病害防治及其保护的著作,目前尚无。本专著的发表也是对岩画保护提出系统性防护理论与实践的一次有益尝试,弥补了岩画保护理论研究与实践相结合存在的不足和缺失,对今后岩画病害的保护与研究具有一定的借鉴作用。

贺兰山岩画自 20 世纪 60 年代被发现以来,岩画在不断消失并且消失速度越来越快的现实不容忽视,若不加以有效的保护,这一伟大的史前艺术作品与珍贵的历史文化遗产将永远消失在人们的视野中!国外有专家曾预测,等到 21 世纪结束的时候,全球四分之一至三分之一的岩画或将消失。可见岩画的保护迫在眉睫,我们不能原地等待,需要尽快地探索寻求延长岩画寿命的途径。

保护好贺兰山岩画,功在当代,利在千秋!这对于文物保护工作者来说是义不容辞的,也是岩画保护研究的方向和价值。

1.2 石质文物的研究现状与发展趋势

1.2.1 石质文物病害特征研究

文物是人类在不断改造世界的过程中存留下来具有科学、艺术以及文化价值的遗迹和

遗物,其承载着当时社会的民族精神和文明,具有无可复刻的特性和非常高的价值。而文物中以天然岩石为主要材料的石质文物具有数量庞大、种类繁多等特点,其成为人类认识历史、研究社会发展规律的重要载体。但是石质文物大多露天保存,各因素综合导致病害发育活跃,国内外专家利用各种分析检测手段对不同地区的不同石质文物的不同病害进行了研究,取得了丰厚的研究成果。

Pilgim 等^[3]研究了澳大利亚巴鲁普半岛岩画地的风化速率,发现造成低风化速率的原因在于该地区的低降雨量与岩石较好的抗腐蚀性。Chen 等^[4]采集炳灵寺石窟岩石样本进行了干湿、冻融循环试验,研究发现较高风化程度砂岩的内部孔隙更容易被改造,干湿冻融与饱水冻融能大幅降低砂岩的胶结物含量,将其由粗颗粒骨架-黏粒絮凝结构变为疏松的粗颗粒骨架结构,使岩样内部产生不同尺度的微孔隙和微裂隙。Liu 等^[5]对莫高窟地区的人工水源进行了湿度分布模拟,结果表明,围岩中的液态水可以激活壁画和雕塑底部的有机物质并导致表面颜料剥落,树木呼吸和表面蒸发会导致石窟内湿度的快速波动,可能直接破坏艺术品的表面。张悦等^[6]分析了西安城墙古砖的盐析、剥离和泥化样品,结果表明可溶盐造成城墙的风化作用的主导因素为 Na_2SO_4 转化为芒硝产生的结晶应力,以及 CaSO_4 的水合结晶压力。李宏松^[7]对石质文物空鼓病害处的岩样的化学成分、矿物成分及微观结构进行了分析,认为表层空鼓形成机理为:岩石内部本身具有层状结构和大量片状膨胀性黏土矿物或石膏,遇水后发生急剧膨胀,产生较大的膨胀压力,在膨胀压力的作用下便发生空鼓。宗静婷等^[8]研究了四川广元千佛崖石窟造像的风化问题,结果表明千佛崖风化层孔隙率和疏松程度均高于岩芯层,岩石吸水性和透水性均较高。Safonov 等^[9]对拱廊这一特殊的岩石风化形式的形成过程进行了数值模拟,证明当最大主应力低于某一临界值时,侵蚀模型能够充分描述拱廊的形成过程。Roussel 等^[10]通过运动摄影测量、现场硬度和吸水率测试,研究了马耳他防御工事石灰石受盐结晶影响的风化速率,马耳他群岛主要建筑石灰岩内存在两种速率的风化机制,这是由石灰岩微观结果的不同所致。肖林芝等^[11]对安岳千佛寨摩崖造像的典型病害特征进行了取样分析,认为对风化过程影响最大的因素是水。张中俭等^[12]对北京市房山区大理岩的岩石学微观特征进行了研究,结果表明,温度变化在大理岩表面产生的热应力、酸雨对白云石的溶解、水对白云石的溶蚀、沿着微裂隙的结晶盐是造成大理岩风化的主要因素。Pad 等^[13]根据东帝汶赤道山区风化层的地球化学数据,分析了该地区的风化特点。杨鸿锐等^[14]研究了冻融循环对麦积山石窟砂砾岩的损伤作用。杨沛欣等^[15]研究了甘肃合水莲花寺石窟的风化病害状况,发现地质及水文气候条件造成的降雨入渗是莲花寺石窟各种病害产生的最主要原因。Gallinaro 等^[16]研究了埃塞俄比亚南部岩画的风化问题,现场观测和电子显微镜揭示了作用于岩石表面的风化过程的复杂性和多向性。王帅^[17]研究了北京西黄寺砂岩文物表层剥落的形成机制。砂岩表面剥

落的机理为：雨水的作用使其表面溶蚀，为水进入砂岩内部提供了条件，砂岩内部受水影响较大且膨胀性黏土矿物及石膏较多的部位遇水后发生急剧膨胀，产生较大的膨胀压力，由于黏土矿物及石膏较多的地方，岩层的联结强度较低，在膨胀压力的作用下发生剥落或空鼓。李黎等^[18]通过盐溶液环境下的干湿循环实验，研究了龙游石窟砂岩的风化特征，发现 Na_2SO_4 、 NaCl 等可溶盐的参与，能大大加快砂岩的风化速度。Zhang 等^[19]采用原位无损表面硬度检测和超声波检测的方法，对重庆大足石刻的风化程度进行了测定和评价。卜海军等^[20]研究了广元千佛崖石窟石刻造像的风化脱落、鳞片状起翘、剥片状剥离与脱落等病害的风化影响因素。

1.2.2 水化学和冻融致岩石损伤机理研究

水对于岩石的作用既包括渗流对于岩体的作用，也包括溶液对于岩体的腐蚀作用等^[21]。在 19 世纪 80 年代，学者们开始从感性角度认识地下流体对于岩体具有一些化学作用，一直到 20 世纪 50 年代，水-岩作用的概念才由苏联专家提出^[22]，自此至今，水-岩作用方面的研究已经全面发展，许多问题已有了大量的研究成果，主要集中于岩体力学特性和化学腐蚀方面。例如，Rebinder 等^[23]研究得出钻进面的力学性质会在水化学环境下发生巨大变化；Heggheim 等^[24]利用海水侵蚀石灰石使其力学性质变化解释了弱化机理；Dunning 等^[25]发现岩石的摩擦性质可由水化学作用改变。我国学者在水-岩化学环境下的研究主要集中于溶液 pH、盐离子浓度、岩体力学性质变化等方面。陈四利等^[26]以砂岩和花岗岩为研究对象，给出不同 pH 的化学溶液劣化处理过岩样的荷载-位移变化曲线和试件的破裂特征示意图；方江华等^[27]研究得出酸性溶液和干湿循环的耦合作用使试件孔隙的发育得到加速；申林方等^[28]得出，不同 pH 溶液环境中，在前期试样的劣化效应存在明显差异，劣化程度最大的是酸性，在后期这种差异性开始逐步减小、最终劣化程度相当。

从 20 世纪 30 年代对于冻土就拉开了冻融作用下岩石力学特性研究的序幕，在 20 世纪 60 年代至 70 年代，各国开始成立冻土研究机构^[29]。我国虽然对于冻土的研究至今只有 40 多年的历史，但是发展却极为迅猛^[30-34]。冻融岩石力学是在冻土力学的研究基础上发展而来。其中较为主要的是分凝冰理论^[35-36] 和水冰相变^[37]，Mcgreevy^[38]则认为这两种理论在不同的冻结条件下有各自的优势，没有矛盾。早期的学者们研究发现岩石劣化的原因因为孔裂隙冰产生的膨胀压力超过岩体强度^[39]；后期学者们开始通过单轴、三轴压缩试验系统地研究在不同含水率、不同冻结温度下岩石力学特征的变化情况，并且逐渐发现冻结温度不是影响力学性能的唯一因素，冻融循环次数也起决定性作用^[40-49]。而且，对于冻融后岩石的损伤模型，张慧梅等^[50-55]建立了考虑残余强度特征的冻融受荷岩石损伤本构模型，基

于统计损伤力学理论,并结合最大拉应变破坏准则,建立了考虑冻融和荷载耦合作用的寒区冻融岩石损伤模型;刘保县等^[56]利用声发射信号建立岩石损伤方程;张君岳等^[57]由应变等价原理建立的冻融损伤模型具有以无损检测方式测得相关岩石参数、可以较准确地预测岩石经过不同冻融次数后的单轴抗压强度的优点;陈国庆等^[58]提出了非定常性黏弹性系数损伤演化方程,并建立了考虑冻融损伤的砂岩蠕变本构模型;杨涛等^[59]通过定义岩石综合损伤变量,得到损伤演化特征曲线,又在此基础上结合高斯函数变化特征,构建冻融循环条件下材料损伤本构模型。实际上岩石经常受到多重环境因素的交互作用,水化学和冻融环境常伴随出现^[60]。刘松明等^[61]研究得到白砂岩冻融损伤的重要原因是水的浸泡,酸侵蚀可以一定程度上加快损伤;李晓鹏等^[62]研究得出白砂岩在干燥与不同溶液浸泡及冻融循环作用下均有劣化损伤作用;张继周等^[63]研究得到冻融劣化损伤模式不仅与冻融温度、循环次数及岩石自身特性有关,还与其所依存的环境有关;刘盾^[64]通过试验发现冻融循环、干湿循环、盐循环中,化学蚀变指数 CIA 均持续增加;彭成等^[65]研究得出浸泡溶液 pH 值越低,冻融循环次数越高,砂岩损伤劣化程度越大;黄武峰等^[66]研究得出在高围压下,冻融循环岩样的弹性模量大于干湿循环岩样的弹性模量。虽然混凝土结构耐久性的研究方面两种因素耦合作用已有许多研究成果,但是两类材料存在巨大差别,所以这些研究成果不可直接应用于岩石之上。沈珠江^[67]学者认为未来岩土工程设计中一个重要的主题就是抗风化,其中,水化学环境对岩石是化学风化,冻融作用是物理风化,这两种作用都会对岩石造成不可逆转的损伤。可见,岩石在水化学腐蚀和冻融循环共同作用的试验研究方面目前只是起步阶段,在水化学干湿-冻融交互作用下,岩石力学特性亟待充分的研究。

1.2.3 新型检测技术在石质文物领域应用研究

在新技术应用于石质文物的研究领域中,马宏林^[68]通过超声 CT 方法对乾陵的五件石刻进行了内部风化状况的超声检测,综合波速、波形、频谱及首波幅度等数据,探测了其内部裂隙发育的程度和裂隙走向,形成了直观的超声 CT 成像剖面图,发现利用超声方法探测石刻内部裂隙和风化情况有较强的准确性。张鑫鑫等^[69]采用 X 射线衍射、光学显微镜、扫描电镜的方法进行了大佛湾石刻造像的病害机理研究,结果表明造成砂岩外观颜色差异的主要原因是其黏土矿物和方解石的含量与分布不同,砂岩内部存在较多微孔隙而泥质砂岩和泥岩的结构较为致密,水对岩石有溶蚀和淋滤的破坏作用。柯曾波等^[70]对重庆地区清代露天岩石狮子的风化病害进行探究,利用 X 射线荧光光谱仪、傅里叶变换红外光谱仪和 X 射线光电子能谱对文物表层砂岩样品进行了试验分析,结果表明在露天环境下石刻表面有机封护层老化形成大量羟基,增强了自身亲水性,导致表面易吸水溶胀与干燥收缩,形成

大面积脱落,起翘卷曲等风化病害。鲁恺等^[71]采用地面核磁共振和探地雷达方法对阳华岩摩崖石刻的风化病害机理进行研究,结果发现摩崖石刻依附岩体内岩溶、裂隙发育,部分区域岩溶裂隙带已成为地下水汇聚场所或流通通道,表明这两种方法在石质文物渗水和风化状况的评价上有极高的应用性。近年来在岩石工程领域逐渐开始引入声发射(acoustic emission, AE)技术,监测岩样破坏过程中声信号的变化特征,在寒区岩石工程中应用声发射技术的研究已有不少成果。赵卫东等^[72]选取日本北海道的大坝抛石材料进行声发射监测下的冻融循环试验,发现声发射对抛石材料在冻融条件下的劣化机制研究是效果较好的研究方法,特别是声发射可以充分对抛石试样在破碎以前的内部变化进行全程监测。陈国庆等^[73]对高寒地区石英砂岩进行冻融循环试验和室内三轴蠕变声发射试验,试验结果发现,冻融作用对短期受荷下砂岩性能影响较小,常规力学参数及声发射现象随着冻融循环次数增加变幅较小。聂鹏等^[74]对干燥、饱和以及不同冻融循环损伤作用后的砂岩进行单轴压缩试验并利用声发射监测其破坏过程,试验结果表明随着冻融循环次数的增加,砂岩渐进破坏各个阶段的声发射撞击数和累计振铃计数均不断变小,声发射定位点也不断减少。姜德义等^[75]将饱和蒸馏水与3%NaCl水溶液的砂岩试样进行冻融循环试验和单轴压缩试验,并同步采集冻融中的声发射信号,试验结果表明,循环冻融后砂岩的单轴压缩声发射绝对能量概率密度满足幂定律分布,每次冻融循环中声发射概率密度的临界指数随循环次数的增加表现为先增加后降低。苏占东等^[76]对吉林隧道花岗岩进行冻融循环试验和冻融岩样的单轴压缩声发射试验,试验结果表明,随着冻融循环次数的增加,声发射信号峰频点由分散凌乱向优势频段集中,岩石试件临近破坏时,声发射信号峰频优势频段逐渐向中高频段集中,低频段声发射信号不断减少。在文物保护研究领域中,赵亓^[77]将声发射技术应用到出水木质文物的研究中,发现振铃计数可作为表征杉木损伤演化规律的特征参量,其变化特征可以表征杉木在各弹塑性阶段的损伤状态。

1.2.4 石质文物保护应用研究

亚里士多德(公元前340)、普利尼(公元50)古典著作中把岩石中不寻常的“坑”、“有机”形状和其他风化特征成因归因于流水或降雨,雪或冻结等^[78]。斯蒂芬斯(1837)、伯顿(1879)对不同环境中砂岩风化形态进行了详细观察描述。达尔文(1859)和霍尔(1882)认为岩石矿物组成是砂岩形成不同侵蚀状态的主要因素。欧洲对石质文物的保护工作开展较早,目前较具影响力的有关岩土类文物保护机构主要有,1913年成立的国际性非政府组织国际古遗址理事会(ICOMOS)和1959年于罗马成立的国际文化财产保护与修复研究中心(ICCRON)等。1919年,中国学者开始借鉴和采用西方的科学体系与方法对石窟寺的研

究和保护进行探索,1949年新中国成立后,我国对石质文物的风化现状研究开始出现,但主要集中于对文物病害相关的保护修缮。具体来讲,石质文物保护应用研究主要表现在四个方面。一是物探方法在石质文物保护中的应用研究,即从地质勘查、室内试验、现场试验等各个方面展开。20世纪60年代,我国学者苏良赫、王大纯等曾对龙门石窟、云冈石窟、大足摩崖石刻、敦煌莫高窟等石质文物的地质、水文地质及工程地质进行实地调查,从环境地质角度研究对石质文物的破坏与保护,从而拉开了我国石质文物保护工程地质学研究的序幕;之后,以潘别桐教授、方云教授、李智毅教授等为代表的一批教学、科研人员和以黄克忠先生为代表的工程地质界广大科研人员合作,从工程地质学方法、试验和测试方法、计算方法及模拟方法的应用等方面对不同类型的石质文物开展了多方向、多领域的研究。20世纪80年代末我国石质文物保护工程地质学研究的框架体系已具雏形,文物保护中已融入自然学科的理论与方法,很大程度上促进了我国文物保护事业的发展。1990年,潘别桐、黄克忠等主编的《文物保护与环境地质》论文集出版,这是我国第一本有关石窟文物保护与环境地质研究的专著,其指出对露天石刻文物,工程地质界主要侧重于岩石特性、环境地质、岩体稳定性及风化破坏原因等方面的研究。上述工作和研究成果还都属于基础传统性的研究成果。

目前,国内无损或微损物探方法应用于石质文物的研究现状基本与国际研究形势相符,国家文物局、敦煌研究院、兰州大学以及中国地质大学等单位、高校相继引进美国、加拿大、日本等国家的一些设备、方法,也开展了一些研究,研究领域从以位移电流为主的低耗介质扩展到土层、岩层等有损耗介质。1980年前后,安徽滁州文物保护所等考古界和文物保护界肯定了物探方法在考古和文物保护方面的应用。目前用于石质文物隐患检测的物探方法较多,在风化等检测中采用地震波法(浅震法)、高密度电法、探地雷达等,但是由于石质本身的复杂性,采用石质文物单一物探方法对文物病害的判别易形成多解,也很难做出准确判断。

利用电阻率测深法对石雕风化深度及防风化涂液渗入石雕表面深度测量成功应用在云冈石窟^[79]、龙门石窟^[80]、克尔孜石窟^[81]、乐山大佛^[82]、南越王墓^[83]等;同时也用声波测量来判定喷涂防风化剂后对石雕表面的加强效果^[79]。钟世航^[81]曾在大足石刻成功地用电阻率微分电测深法探测裂缝和止水下的注入深度。高密度电阻率法、低应变反射法、超声波等在岩石风化评估、岩石加固效果评价、探测岩石裂隙深度和裂缝灌溉效果以及探测石窟渗水原因中的综合应用,均取得较好成果。任建光等^[84]在《无损检测技术在石质文物保护中的应用》一文中阐述了无损检测技术在岩石风化、加固效果、探测裂隙分布和裂隙灌浆深度、石窟渗水、彩绘和壁画颜色以及分析颜料成分等方面的应用;孙进忠等^[85]使用超声波检测技术对古月桥风化程度评价取得了较好的结果;钟世航^[81]采用电阻率测深法,利用自主研发的无损检测仪器微测深仪,对云冈风化深度探测取得了较好的结果;此外,利用

超声波定量检测石质文物内部缝隙分布和判断其风化程度,经实际工程验证,完全满足文物修复工程检测的要求。近年来,一些学者对干旱地区各种盐类,尤其是可溶盐的结晶作用对石雕的破坏做了研究^[86],对酸雨及空气污染对露天大理石雕刻品的损害做了研究^[87];地震多发区有一些学者对石雕的减震措施做了研究;还有学者对生物风化对石质文物的危害及防治对策做了研究^[88]。国外,在石质文物保护过程中,将对环境的治理与控制放在了首位;在保护过程中把文物安全放在第一位。首先,在进行保护过程前,每一步都要进行处理前试验,确认修复痕迹的可逆性;其次,对于石质文物,尤其是石窟寺等要做定期检查,及时发现问题,解决问题;最后,加大对新保护材料的研究与开发力度。

化学加固材料在石质文物保护中的应用。刘振东^[89]介绍了石质文物化学加固材料的种类特点及应用情况。国际上常用的无加固材料有石灰水、 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 、碱土硅酸盐及氟硅酸盐等,通过 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 反应,生成的 $\text{Ba}(\text{OH})_3$ 、 CaCO_3 便留在岩石的孔隙中。与无机材料相比较,有机材料具有较好的粘接性和柔韧性,因此具有良好的抗张应力的特性。环氧树脂的种类繁多,它与固化剂混合后可在低温、低压下固化,且固化后固化产物具有优良的物理机械性能和电绝缘性能,由于其分子主链中存在羟基和醚键而具有优异的黏结力,且对碱性介质有优良的稳定性,还可掺入添加剂和改性剂,瑞士、美国、意大利都曾用这种材料作为加固剂^[90]。1950 年美国加利福尼亚大厦以及几个教堂曾使用环氧树脂加固。丙烯酸树脂具有很好的弹性,对热、光化学氧化分解具有良好的稳定性以及优异的成膜性、耐候性等特点,但低透湿性和耐水性较差限制了它在石质文物保护领域的使用^[91]。有机硅聚合物的结构特性使其兼具无机材料特性与有机聚合物功能于一身^[92],它不仅具有卓越的耐高低温性、电绝缘性、化学稳定性和耐老化功能而且具有憎水防潮和优良的生理惰性;有机硅材料在气候适应性及抗臭氧挥发放电方面表现优异;除了良好的拒水效应,它基本不损害建筑材料对空气和水蒸气的透过性,这是它的最大优点,也是其他有机材料无法比拟的。研究员用石灰水和丙烯酸乳液成功地保护了公元 203 年建立的罗马弯门^[93],用丙烯酸树脂或环氧树脂改进性有机硅可获得优良的树脂,通过化学改性使产物兼具有机硅与有机高分子的良好性质,与纯有机硅相比其热稳定性、耐候性、防水性以及与其他溶剂的相容性都得以改善而且降低了成本。

化学材料在彩绘文物保护中的应用。目前,文物彩绘保护涂层材料主要有天然高分子材料和人工合成高分子材料两大类,后者在文物保护中应用更普遍,其颜色变化小、粘接强度高,能很好地起到保护彩绘文物的作用。现有的人工合成高分子材料主要有水溶性合成树脂,如聚乙烯醇、聚乙二醇等;溶剂型合成树脂,包括丙烯酸树脂、聚乙烯醇缩醛等;反应型树脂,包括有机硅材料、环氧树脂、醇酸树脂和甲醛树脂;树脂乳液类,如聚醋酸乙烯酯乳液、聚氨醋乳液、丙烯酸树脂乳液等^[94]。采用傅里叶红外光谱仪测量 9 种常用高分子涂料

的分子结构,再运用分光光度仪测量颜料的主波长、色纯度和高度的变化,粘接强度仪测量颜料的粘接强度变化^[95]。实验结果表明,丙烯树脂溶液(PrimalAC33)、丙烯酸类树脂(B72)和有机硅的耐老化性能好,而且颜色变化小,粘接强度高,可以有效修复由内应力导致彩绘层起翘卷曲、脱离陶体的问题,很好地起到加固和保护彩绘文物的作用。王芳等^[96]对几种有机聚合物涂料进行光降解实验,发现聚氨酯对光的稳定性差,尤其是芳香族聚氨酯易发生降解反应,其降解后生成生色团为醌亚胺结构,产生老化变色现象。选取国内外五种化学或生物霉菌清洗剂,分别对壁画中常见的霉菌进行清洗,并对清洗效果进行了分析与评价^[97]。结果显示,胰蛋白酶清洗剂是安全高效的壁画表面清洗剂,能有效清洗壁画表面的霉斑,并配合使用其他几种化学清洗剂可较为有效地清除多数壁画表面霉斑顽渍,这种芳酯与苯乙烯的共聚物的混合物形成抗腐蚀的固态稳定物的加固剂,这种加固剂能渗入颜料,已达到国内最高水平。李玉虎等^[98]从光学特性微观状态上研究分析发现风化褪色的原因后,研制了由非挥发性液态抗氧、抗风化稳定剂和耐候、抗腐蚀的有机氟材料、聚甲基丙烯酸甲酯与苯乙烯的共聚物的混合物形成抗腐蚀的固态稳定物的显现加固剂,这种加固剂能渗入颜料、胶料层,以固态填充,消除其散射界面,使严重风化褪色的彩绘显现原貌,并加固颜料、胶料层,防止其继续褪色。对于可溶盐导致的酥粉现象,制作模拟样品,进行了回贴修复,并且加以加速老化与系统评价,筛选出了以水性氟为主的酒精溶液作为回贴修复剂,再加上精细修复工艺,分别对龟裂、起翘、脱落、酥粉彩绘层进行回位修复与加固。

物理方法在石质文物保护中的应用^[99]。李最雄等^[100]在《中国古丝绸之路上的土质、石质文物加固保护》一文中有详细阐述。古丝绸之路上的石窟绝大多数开凿在泥质胶结或半胶结状的砂砾岩崖体上,这种岩体孔隙率大、石质松散,很容易渗漏雨水或被雨水冲刷形成沟壑裂隙。另外,砂岩的胶结泥质中,往往或多或少会有一种膨胀性的黏土——蒙脱石,为了防止砂岩石雕的风化,研制以二氧化硅为主要成分的高模数硅酸钾。在聚苯乙烯(PS)材料中加入适当的固化剂和扩散剂,渗透到砂砾岩中后,能大大提高砂砾岩胶结泥质的耐水性和力学强度,有十分明显的防风化加固效果。20世纪90年代初。在进行榆林窟加固工程设计时便采用了锚索技术进行崖体的加固^[101]。对洛阳龙门石窟和四川大足石窟的岩体裂隙灌浆都采用了以环氧树脂为主剂的高强度有机高分子材料。龙门石窟^[102]的岩体属于石灰岩,大足石窟的岩体属于钙质胶结的细砂岩,这两种岩体孔隙率小,强度高。在其他类似岩质的石窟也有采用丙烯酸酯有机高分子材料做灌浆材料的,都取得了好的加固效果。但对孔隙率大、强度极低的砂砾岩岩体裂隙,若采用高强度的有机高分子灌浆材料灌浆是不适宜的。因浆液结石体和岩体强度差别极大,这样内聚力差别也大,必然使浆液结石体和裂隙两壁之间产生剥离和新的裂隙,达不到加固的目的。针对砂砾岩的特点,我们

研制成功以 PS 为主剂,以粉煤灰、铸石粉或硅藻土为添加剂的无机灌浆材料,这种浆材的最大特点是结石体无收缩,经过在实验室反复试验和现场试灌后,已将这种灌浆材料大量用于榆林窟加固工程的裂隙灌浆^[100]。对灌浆效果经人工地震检测证明,PS 材料对砂砾岩裂隙风化严重的两壁能起到很好的黏合作用,达到有效的灌浆加固作用。另外,浆液结石体的强度能够通过调配 PS 的浓度和模数,从而很好地控制其略高于砂砾岩的强度,这样找到了一种适合于砂砾岩岩体裂隙灌浆的新材料。

国内外石质文物清洗技术研究与应用状况。石质文物清洗技术^[103]按工作原理可以分为化学清洗、物理清洗和生物清洗三大类。从近 5 年的研究文献看,化学清洗仍然是一种主要的清洗方式,且是在不断发展中石质文物清洗技术。物理清洗技术,尤其是激光清洗技术,由于没有化学药品污染和遗留的潜在危害,很受国际文物保护工作者推崇,随着技术发展和设备费用降低,激光等物理清洗技术还将会有更大发展空间。生物清洗在国际和国内应用实例不多。化学清洗的作用原理既包括化学作用,如表面活性剂、活性离子、氧化还原、螯合等;也包括物理作用,如溶剂溶解、离子交换、凝胶吸附等,关键是药品和配方的选择。总体看,对石质文物较为安全的药剂是挥发性药剂,如乙醇、丙酮、氨水等。生物清洗是指利用微生物或生物酶来完成清洗的技术。为保证文物安全,石质文物清洗技术不仅需要经过事先实验室研究和现场验证试验,同时清洗过程监测和清洗效果评价也是重要的技术保障。