

龙门石窟奉先寺加固工程中 应用高分子材料的研究

陆寿麟 姜怀英 刘景龙

龙门石窟位于河南省洛阳市城南 12 公里的地方，奉先寺是龙门石窟的一个大型露天佛龕，开凿于唐高宗咸亨三年至上元二年（公元 672 ~ 675）南北长 30 米，东西长 35 米。主佛为卢舍那佛，两侧刻二弟子二菩萨，南北两壁各刻一供养人，一天王，一力士，主佛高 17.14 米，其余造像除供养人外均在 10 米以上。这些巨大的石刻艺术是盛唐石刻艺术的代表作品，凝结着我国古代劳动人民的心血和智慧，从一个侧面反映了唐代的政治、经济和文化，是一组珍贵的古代文化遗产。1961 年国务院公布龙门石窟为全国重点文物保护单位，1971 ~ 1973 年间奉先寺进行了高分子化学材料与金属锚杆相结合的全面的加固工程。

一、奉先寺的病害及残破情况

奉先寺开凿在寒武奥陶纪石灰岩上。喀斯特溶洞极为发育，由于岩层中发育了不同方向的构造裂隙、岸边裂隙、层面裂隙，纵横交错将洞窟及佛像切割成大小不同的碎块，破坏了围岩的整体稳定。加上千百年来大自然的侵袭，特别是渗水溶蚀和地震加速了围岩及雕刻品崩塌风化，其中以南壁破坏最为严重，原来伸出壁面的龕楣已全部崩落无存，西南隅上方裂隙与溶洞贯通造成大面积的崩塌；九尊大像除北壁力士、天王像从外观上看较为完整外，仔细观察裂缝也很多，特别是力士受岸边裂隙切割也很不安全，其余造像崩塌破坏都很严重。主佛卢舍那像的下半身早已崩塌殆尽，头部受构造裂隙切割分成两半，裂隙宽达 3 厘米以上，胸部和双肩裂隙密布，台座亦塌毁大部分。阿难像的下颌、左肩及双手均已破坏无存，而且与后壁大溶洞相通；迦叶像除腿部残存部分雕刻外，上身及头部早已崩落；南壁菩萨、天王、力士像均被岸边裂隙切割与后面岩石脱离，有的已向前倾斜，裂隙宽达 10 厘米，如不进行加固，将有全部崩落的可能。

由于石灰岩最易被水侵蚀而形成含水孔洞，裂隙和岩性提供了地下水运动的条件，

而地下水的运动和作用又进一步加剧了裂隙的发展,形成了溶洞和水蚀剥落等风化破坏。奉先寺最大的溶洞在西南角上方,洞南北长 14 米,东西长 13 米,大致为一不规则正方形。洞内南高北低,南壁高 3 米,往北渐低,最低处仅数 10 厘米,平均高约 2 米。顶板较平坦,地面起伏很大,有若干小溶洞和大洞相连,小溶洞在卢舍那像以南的壁面及阿难、菩萨身上外露。

二、加固措施

(一) 围岩裂隙灌浆加固

奉先寺为一露天大龕,除去西南角上方大溶洞造成部分岩体悬空外,就洞窟整体来说,虽有多组裂隙切割,岩体仍处于稳定状态。因此这次修缮工程除局部危险悬石予以加固外,重点是九尊大像的加固。这些突出壁面的圆雕,在岸边裂隙、构造裂隙、岩层层面裂隙的共同切割下,呈块状、片状剥落,严重的已与后壁岩体脱离,破坏程度是严重的。我们采用了环氧树脂灌浆黏结和金属锚杆加固相结合的方法。实践证明,这是石窟寺特别是石雕艺术品行之有效的加固措施,它具有强度高,不改变文物原貌的优点。

石窟寺的灌浆加固工程,1961 年在原中南化学研究所的协助下,曾利用甲基丙烯酸酯类对大同云岗石窟部分洞窟做过灌浆加固试验,后来随着环氧树脂在国内大量生产,它具有黏结力强、收缩率小、稳定性好、绝缘性能好、耐老化、耐化学品腐蚀、操作简便等其他合成树脂所不能媲美的许多优良特性,特别是常温固化剂的应用及环氧树脂经过改性、黏度下降是岩石裂缝灌浆加固理想材料之一。

我们选用的是低分子量的 6101 环氧树脂。环氧树脂在未加入固化剂前是热塑性的,它的黏度随温度升高而降低。据北京混凝土裂缝修补试验小组资料介绍:6101 环氧树脂,96℃ 的黏度 $\eta = 0$, 40℃ 时 $\eta = 4000$ 厘泊以上。由于石窟寺围岩裂隙一般多在 0.1 ~ 3 厘米之间(个别例外),因此,这样黏稠的胶状物必须降低黏度才能使用。经过试验,环氧浆液的黏度在 20 厘泊左右为可灌黏度。

环氧树脂中加入活性稀释剂或非活性稀释剂都能降低黏度,增加流动性,活性稀释剂(如 501、690、600 等活性稀释剂)具有环氧基,能参与环氧树脂起固化反应并起着增韧作用,但活性稀释一般都有毒,而且用量过多会严重影响环氧树脂的性能。非活性稀释剂(如丙酮、甲苯、二甲苯等),本身不参与固化反应,仅达到机械混合和减低黏度的目的。在树脂固化时,会有部分溢出,严重时甚至会产生气泡,从而增加树脂的收缩率,降低黏合力、机械强度。为了解决上述矛盾,我们参考广东化学研究所介绍的资料,采用呋喃型改性环氧树脂,改性环氧树脂的黏度可

以降低到 5 厘泊以下，微裂隙也能灌入，同时增加了韧性，解决了加入其他稀释剂带来的一切弊病。经过试验，糠醛、丙酮的用量各可达到环氧树脂用量的 50% ，而不降低环氧树脂的物理性能。

呋喃型改性环氧树脂与 HWG-25 环氧树脂比较抗压屈服强度和抗拉强度有显著增长（表 1）。

表 1 HWG-25 喃型改性环氧树脂强度对照表

浆液名称	配方	抗拉强度 /（公斤/厘米）	抗压屈服强度 /（公斤/厘米）	注
HWG-25	#6101 环氧树脂 100 份 环氧氯丙烷 20 份 苯二甲酸二丁酯 10 份 间苯二胺 17 份	170. 4	468	参见“环氧树修补混凝土裂 缝的试验与应用”
呋喃型改性环 氧树脂	#6101 环氧树脂100 份 糠醛20 份 丙酮20 份 乙二胺10 份 #400 硅酸盐水泥300 份	202	954	云岗测试记录
强度增长率%		18	104	

呋喃型改性环氧树脂的黏结抗拉强度与不加稀释剂、增韧剂的环氧树脂胶黏剂比较，黏结抗拉强度提高 65% ，与加入增塑剂邻苯二甲酸二丁酯及 304 比较，强度增长约 40% （表 2）。

表 2 呋喃型改性环氧树脂与环氧树脂黏合剂强度对照表

名称	配方		黏结抗拉强度 /（千克/厘米）	黏结抗剪强度 /（千克/厘米）	测试试件 破坏特征
	环氧树脂增韧剂稀释剂	固化剂			
环氧树脂黏 合剂	#6101 环氧树脂 100 份	乙二胺 6—8	55	47. 5	岩石断
		二乙烯三胺 8—12	64	68. 2	岩石断
环氧树脂黏 合剂	#6101 环氧树脂 100 份 #304 20 份	乙二胺 8 份	66. 1		岩石断
		二乙烯三胺 12	73. 5		岩石断

续表

名称	配方		黏结抗拉强度 /（千克/厘米）	黏结抗剪强度 /（千克/厘米）	测试试件 破坏特征
	环氧树脂增韧剂稀释剂	固化剂			
环氧树脂黏合剂	#6101 环氧树脂 100 份	乙二胺 7		55	
	邻苯二甲酸二丁酯 20 份	二乙烯三胺 11		60	
呋喃型改性环氧树脂	#6101 环氧树脂 100 份	乙二胺 12 份	80. 6		岩石断
	糠醛 30 份 丙酮 30 份	二乙烯三胺 17 份	105. 8		岩石断

注：室温，28 天的测试数据。

糠醛、丙酮的不同用量不仅关系到环氧浆液的黏度，而且强度也有变化。试验表明：糠醛、丙酮用量和占环氧树脂量的 35%，固化剂用二乙烯三胺的配方强度最高（表 3）。

表 3 呋喃型改性环氧树脂强度表

NO	配方		黏结抗拉强度 /（千克/厘米 ² ）	黏结抗剪强度 /（千克/厘米 ² ）	试件破坏特征
	环氧树脂、糠醛、丙酮	固化剂			
1	#6101 环氧树脂 100 糠醛 15 丙酮 15	乙二胺 10 二乙烯三胺 14		52. 4 58. 9	
2	#6101 环氧树脂 100 糠醛 20 丙酮 20	乙二胺 11 二乙烯三胺 15	78. 2 90. 9		黏结面 50% 断 岩石本身断
3	#6101 环氧树脂 100 糠醛 30 丙酮 30	乙二胺 12 二乙烯三胺 17	80. 6 105. 8	75. 5 82. 3	岩石本身断 岩石本身断
4	#6101 环氧树脂 100 糠醛 50 丙酮 50	乙二胺 14 二乙烯三胺 20	77. 3 88. 7	64 72. 9	岩石本身断 岩石本身断

从以上配方中取 50 克环氧树脂作基准，配制环氧浆液，在室温（20 ~ 25℃）条件下，用移液管法，测其相对黏度（厘泊）随时间（小时）变化情况见表 4。

表 4 环氧浆液相对黏度随时间变化情况

时间（小时）	0	1	2	3	3.5	4	5	6	7
黏度（厘泊）	2	5	8	14	20	25	46	86	186

根据上述试验情况对 5 毫米以下的岩石裂缝选用了下列配方灌浆加固：

#6101 环氧树脂	100 份
糠醛	30 份
丙酮	30 份
二乙烯三胺	17 份

以理想灌浆黏度 20 厘泊为基准，则可灌时间 3.5 小时。但在灌浆施工中，因配料量大，放热量高，因而黏度递增比试验室试验数据要快得多，一般我们每次配料量为 3 千克左右，可灌时间只有 1 小时。

5 毫米以上的裂缝灌浆，在上述配方中尽量增加填料，如水泥、岩石粉末、砂子、碎石等。我们在灌注奉先寺南壁天王大裂缝时采用的配方见表 5。

表 5 环氧砂浆、环氧混凝土配方及强度表

名称		配方	抗拉强度/（千克/厘米）	抗压强度/（千克/厘米）	注
环氧砂浆	#6101 环氧	树脂 100	60		灌注“8”字形 试块测试
		糠醛 30			
		乙酮 30			
		二乙烯三胺 70			
		砂子 500			
环氧砂浆	#6101 环氧	树脂 100		560	灌注 7.07 厘米 试块测试
		糠醛 30			
		乙酮 30			
		二乙烯三胺 17			
	#400 硅酸盐	水泥 250 砂子 700			
环氧混凝土	#6101 环氧	树脂 100		600	灌注 7.07 厘米 试块测试
		糠醛 30			
		乙酮 30			
		二乙烯三胺 17			
	#400 硅酸盐	水泥 200			
		砂子 400 碎石 600			

注：20℃30 天的强度

环氧混凝土及环氧砂浆配制程序见图 1。

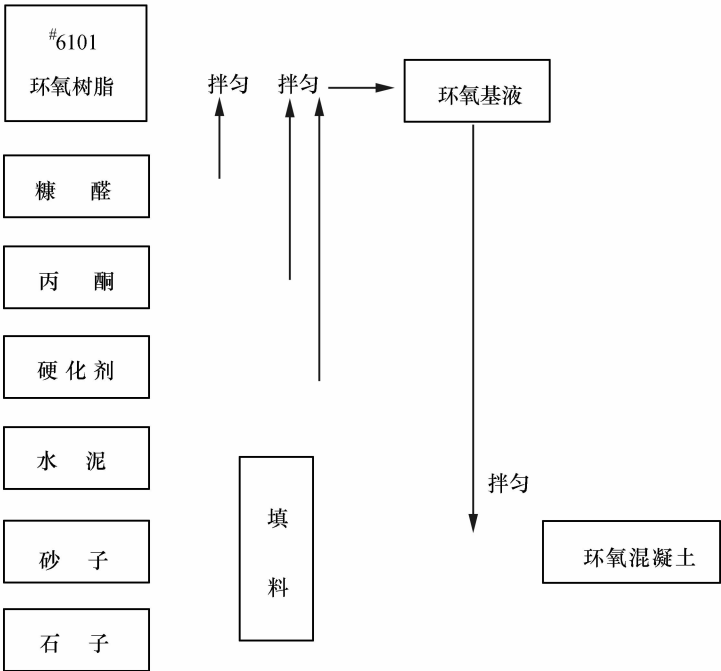


图 1 环氧混凝土及环氧砂浆配制程度

封缝及岩石表面缺陷修补采用环氧胶泥配方见表 6。

表 6 环氧胶泥配方及抗拉强度表

#6101 环氧树脂	乙二胺	岩石粉末	矿物颜料	抗拉强度/（千克/厘米）
100	8	200	适量	110

注：岩石粉末应尽量选用与所修文物相同质地的岩石。

黏结断裂岩石的胶黏剂（非灌浆胶黏剂）黏度可以大一些，增加环氧树脂的韧性是很重要的。配方见表 7。

表 7 环氧树脂黏结剂配方

序号	#6101 环氧树脂	#304 聚酯树脂	乙 酮	二甲苯	乙二胺或二乙烯三胺
1	100	20		8 ~ 10	
2	100	20	5	5	8 ~ 10

注：环氧树脂黏结岩石的强度参见表 2。

裂隙灌浆加固大致分为下列 7 个步骤（图 2）。

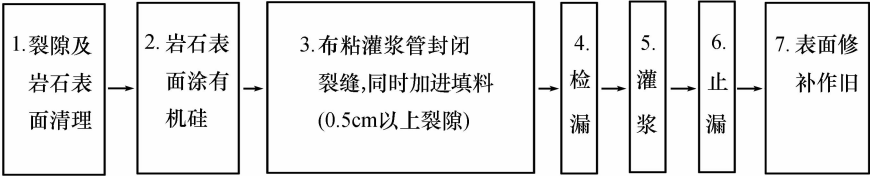


图 2 裂隙灌浆工艺

下面将各个阶段的做法及注意事项分述如下。

1) 裂隙及岩石表面清理：由于潮湿及饱和水对环氧树脂黏结强度影响很大，故最好采用干吹方法，除掉裂缝内壁尘土杂物，如用高压水冲洗则必须在灌浆前将缝隙吹干，否则影响黏结效果。

2) 为了防止风化岩石面被灌浆液渗漏污染，沿裂隙边缘外涂刷 850 有机硅（一种脱模剂）一至两道，如有浆液渗漏，固化后比较容易剔除。

3) 封闭裂缝：在封闭裂隙之前，根据裂缝宽度及走向，先黏置灌浆管，宽裂缝和水平裂隙，灌浆管的距离大些，细裂缝、垂直裂缝距离近些，一般是 25 ~ 40 厘米左右，管径 6 毫米，采用骑缝装管办法，然后封缝。对于宽裂缝，应一边封一边在裂隙内填入干砂、碎石等填料，以增加强度，降低成本。对小于 0.5 毫米的微裂缝用环氧树脂黏结剂（表 7 配方）加少许岩石粉调匀涂 1 ~ 2 遍，对大于 0.5 毫米的裂隙用环氧胶泥（表 6 配方）封闭。

4) 检漏：采用涂刷肥皂水方法检漏，首先关闭所有灌浆管，由一管压入 1 ~ 2 个大气压，然后沿检查部位逐条逐块涂刷肥皂水，如发现肥皂水起泡，则证明漏气，做好标记，待检完后补封。为了减少漏浆，保证灌浆质量，一般应检漏两次以上。

5) 灌浆：灌浆包括七个阶段（图 3）。

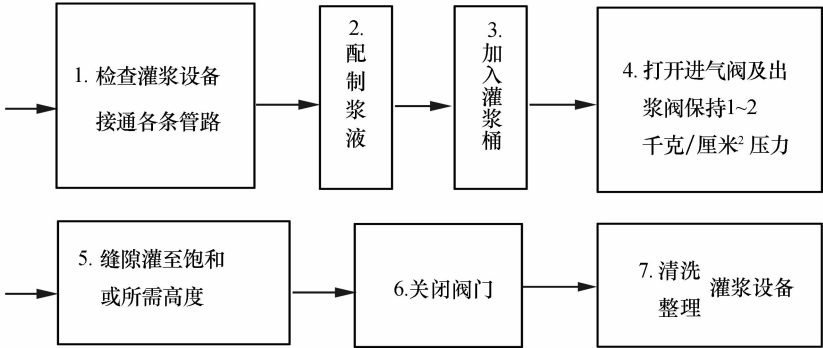
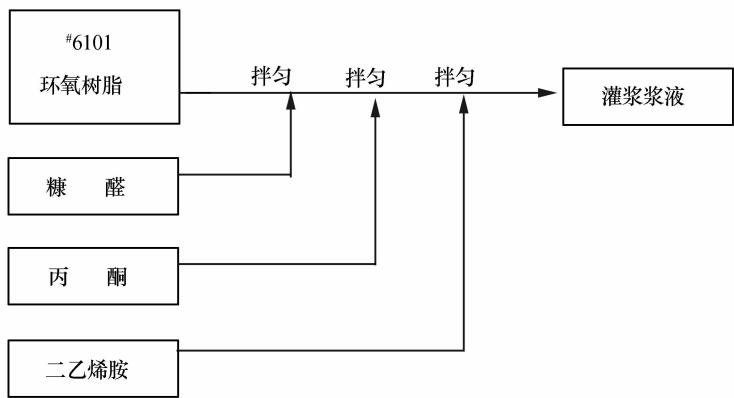


图 3 灌浆工艺流程

配制环氧浆液程序如下：



灌浆顺序应自下而上逐层灌注，为了达到浆液饱满，三天后再补灌一次。

为了防止暴聚，保持浆液可灌黏度在 20 厘泊以内灌完，每次配量应在 3 千克以内（不包括其他添加材料），灌浆时，气温不宜低于 10℃。

6）止漏：灌浆时难免有个别地方出现渗漏现象，止漏材料有快硬环氧胶泥（环氧胶泥配制时加大固化剂用量并加热），用丙酮洗除所漏浆液，再行封闭。用软肥皂堵漏，效果也可以。

7）表面修补作旧：我们加固的对象是供人观瞻的古代工艺品，因此灌浆加固后的表面修补作旧工序，应十分重视，认真做好。首先剔除封缝时突出表面的环氧胶泥和渗漏出来的浆液，打磨平整，使其和周围线条协调起来，然后用细石粉矿物颜料调入模塑粉溶液涂刷，色调要与原来岩石协调和谐。

（二）金属锚杆加固围岩裂隙

锚杆支护是矿山、铁路广泛采用的一种新技术，锚杆的种类、构造有很多形式，比较普遍应用的是金属灌浆锚杆。灌浆材料，目前在国内主要是水泥砂浆，据国外资料介绍，有些国家开始采用高分子化学材料灌浆，锚固强度有显著提高。

金属灌浆锚杆作为支护结构的基本原理是利用金属（各种型号的钢筋）的强大拉力和各种灌浆材料（水泥砂浆、高分子化学浆）与金属、岩石之间的黏结强度把松散岩石固结在一起，从而达到支护加固的目的。

采用金属锚杆加固石窟寺围岩，早在 1961 ~ 1964 年云冈石窟修缮工程中就已开始应用，当时云冈采用的楔缝式金属锚杆，杆孔里没有灌浆，只是利用金属楔头与岩

石之间的锚固力。当时测试的六根锚杆（ $\phi 34$ 普通元钢，锚固深度 50 厘米）锚固力平均为 8.3 吨，最高 11.4 吨，接近钢筋的极限抗拉强度，缺点是锚杆受力后出现少量位移。采用金属灌浆锚杆，锚固强度有显著提高，特别是灌注高分子化学材料锚固力提高的更多。1975 年我们在麦积山作过八根 $\phi 16$ 螺纹钢环氧水泥锚杆拔出试验，平均极限黏结强度为 43.5 千克/厘米^2 ，最高为 52 千克/厘米^2 ，和同直径水泥砂浆锚杆比较，平均值高 50%。

采用金属灌浆锚杆加固石窟寺围岩，特别是加固奉先寺大佛这类石刻艺术品，最大的优点是在外观上可以充分保持文物的原貌，符合文物保护“整旧如旧”的原则和要求。从强度来说，大大提高了围岩的整体稳定性，特别是与裂隙灌浆配合，加固效果更为显著，是石窟寺围岩加固重要措施之一。

在奉先寺加固工程中，卢舍那大佛 15 根锚杆，锚杆采用 $\phi 25$ 普通元钢，锚杆长度 32 ~ 374 厘米，锚杆方向基本垂直裂隙面，里高外低，俯角约 10° ，锚杆里端作楔缝式，外端垫板高螺帽，灌浆材料为环氧砂浆和呋喃型改性环氧树脂浆液。

环氧砂浆与岩石（龙门的石灰岩）的黏结抗拉强度为 60 千克/厘米^2 ，钢筋在环氧砂浆中的握裹强度据有关资料介绍约为 $75 \sim 100 \text{ 千克/厘米}^2$ （普通元钢在混凝土中的握裹强度为 43.1 千克/厘米^2 ）。因此，采用 $\phi 20$ 普通圆钢，锚固深度（假过裂隙面，埋置在坚固岩层中的深度）超过 20 厘米，其锚固强度即可超过钢筋的极限抗拉强度。

奉先寺的岩石主要为灰黑色厚层细粒鳞状灰岩，上下均一，岩性纵横变化较小，纹起崩塌破坏的主要原因是：“几组大的裂隙纵横交错、切割岩石，以致形成许多分裂的大碎块。”因此，计算锚杆荷载主要依据裂隙走向和裂隙切割体的稳定程度，如卢舍那大佛，被两道南北走向近直立节理的割切，处于不稳定状态，有整体滑落趋势，则按实际破裂面的滑动体计算。由于破裂面已采用高分子化学灌浆加固，锚杆作为辅助加固措施，其荷载可以按实际荷载的 $1/2$ 考虑。

锚杆灌浆是比较复杂的工艺，当围岩裂隙与锚杆孔贯通时，锚杆孔作为灌浆咀之一，可与裂隙灌浆同时进行，如锚杆单独灌浆时，则存在排气和钻孔内裂隙渗漏的困难，这是要解决的一个问题。

（原刊于《文物保护技术》辑刊 1982 年第二辑第 4 ~ 18 页）