

水在云冈石窟中的危害及防治

黄克忠

水对云冈石窟的危害是普遍而又严重的，早在 1960 年有些科学工作者就已明确指出：云冈石窟中水与岩石长期而缓慢的相互作用是石窟艺术品遭受风化破坏的主要原因。水通过各种裂隙渗入窟内，并以多种形态进入砂岩内部孔隙，促使石质文物遭受风化。

因此，研究石窟中水的来源和破坏规律，提出防止水继续破坏的措施，已经成为保护云冈石窟艺术的重要问题。

近些年来，在多期的修缮工程中，已做过许多防止水继续破坏石窟的工作，使窟内雕刻品风化的状况大有改善。本文就在以往的工作实践基础上，提出进一步改善石窟自然环境的措施与建议。

一、石窟内水的来源及其危害

水是通过多种途径进入窟内的，可分为从窟顶裂隙进入的雨水；从北壁岩体内流出的泉水及少量渗水；潮湿空气带入窟内的凝结水；窟底积水引起的毛细水等。它们的破坏途径不同，所以雕刻品受风化的形态亦有差别。

（一）从窟顶渗漏入窟内的雨水

新中国成立前的漫长岁月中，窟顶漏水现象普遍存在，已编号的 21 个洞窟内有 12 个漏水，其中严重的就有 8 个。例如 13 窟西北角窟顶漏水，到冬天便形成一个大冰块，经久不化，春天变为滴水。5 窟诵经道南壁就因顶板漏水渗入壁内，形成深达 69 厘米的洞穴。3 窟内室，东北隅（角）的长期滴水就来自窟顶裂隙。它随雨水有明显的变化。据观察，雨季（8 月）最多达 38 滴/分，一般季节 10~20 滴/分，冬季一度干燥，下雨、雪后 3~4 天，滴水显著增多，5 天后明显减少。这些水滴已使岩体壁面塌落后

移约 1.4 米。

雨水漏入窟顶的主要通道是岸边裂隙,该裂隙平行崖壁排列,可见 6~7 条,如一、二窟顶板的岸边裂隙离崖壁的距离分别为 1.5 米,5 米,8 米……裂隙上宽下窄,窟顶板上裂隙宽 0.5~2 厘米。据查,离崖壁 50 米范围内为岸边裂隙的发育带,也是雨水进入窟内的活跃地带,还有在云冈窟区发育的四组构造裂隙(NW300—320,SW240—270,NE40—60,NE0—20)及普遍存在的风化裂隙,使雨水很容易由窟顶渗漏入内。石窟附近的许多煤矿井下也证明充水的主要原因是裂隙发育。还有一种特殊情况,3 窟主室的崖顶,有 12 个露天的方形洞($1 \times 1.5 \text{ 米}^2$)深入岩体约 10 米,雨水可直灌洞内。1000 多年来,使洞内积水渗透进岩石,再从窟内南壁面岩石孔隙中渗出,于是使壁面形成波浪起伏的风化形态。

(二) 从窟内北壁渗出的季节性滴(渗)水

北壁渗水也是常见的现象。据 1960 年调查的 21 个洞窟中,有 15 个窟内北壁渗水,大多数洞窟北壁的雕刻品已荡然无存。北壁所在的岩体中,水通过各种裂隙渗入到相对隔水的砂质页岩层时,便滞留下来再沿着水平层理、裂隙的方向渗透,石窟的北壁便是排泄处。由于裂隙的分布没有一定规律,所以水的出露高度,水量大小有很大差别,一般出现的都是局部,少量的渗水,雨季时则可能有微细之水流或滴水,如 16、17 窟北壁的渗水即属此类型。也有从岩石孔隙中渗水的,如 6 窟北壁,3 窟本尊左侧等,则成小片潮湿,零星分布。

20 窟大露佛背后的洞穴,对水的侵蚀起着隔离作用,即使大佛身上有几层砂质页岩软弱夹层,也比其他窟内佛像的风化轻得多。

从 3 窟内 1#平硐及 18 窟顶 2#探井的资料中,也可了解到北壁渗水的活动途径。1#平硐进尺 30 厘米时,看到水是从减荷裂隙(应力松弛区)内渗出的;进尺 1.05 米时,掌子面上见到沿层理的潮湿带,东北角顶板处出现一潮湿圈,是从树枝状的风化裂隙内渗出的。2#探井在深度 11.2 米(基岩下 5.5 米)处,看到沿层面的风化裂隙仍很发育,裂隙宽度在 1~2 毫米,相贯通延伸远,小于 1 毫米的微裂隙普遍存在,风化裂隙内充满方解石(钙质)及铁锈色沉淀物,证明水是沿着这些裂隙水平渗透的。

(三) 潮湿空气进入窟内聚集于整个壁面的凝结水

凝结水的形成是有条件的,一般在夏天雨季,热湿空气进入窟内遇到温度较低的岩石表面便成凝结水。据 1963 年 7 月 11~16 日观测结果,窟内相对湿度均在 80% 以上,

有时达饱和，比窟外湿度高得多。

据有人对中型地下洞窟测试，敞开洞口，由洞外热湿空气带入的水分每小时约有 15 公斤左右，人员进入洞内多次，也使原有相对湿度提高 5%~8%，可见凝结水的量不可低估。

凝结水很容易被已风化多孔隙的雕刻品表面所吸收，曾有人对云冈石窟表面风化岩石的吸湿性做过试验，将试块全部浸入二窟寒泉水中，在常温常压下，2 分钟后观察到自然渗入的深度（表 1）速度很快。1962 年对 3、5、9、19 等窟做过岩石吸水量的观察，以 3 窟内的岩石吸水率为最大。我们还对 1 窟的中砂岩做过吸水率（常压下岩石的吸水量/岩石干容重）试验，分别为 1.72、1.63、2.95、4.17。以上这些试验，都表明凝结水可以很快被吸收到岩石内部。

表 1 常温常压下水渗入云冈岩样内的深度

试块名称	新鲜细砂岩	风化细砂岩	风化中砂岩	风化粗砂岩
渗入深度	1.5 毫米	5 毫米	6 毫米	7 毫米
说明	浸透不均匀		浸透不均匀	

被吸湿后岩石的极限抗压强度值降低近一半（表 2），且风化速度大大加快，而那些被彩色描绘、表面磨光、烟熏过或在通风良好地方的雕刻品，受凝结水的危害小得多，相对风化程度就明显的减轻，这在窟内是很容易观察到的。

表 2 干燥与潮湿状态下的极限抗压强度值

试块名称		粗砂岩	中砂岩		细砂岩
			（风化）	（新鲜）	
极限抗压 强度公斤/厘米 ²	干	780	586	960	1269
	湿	387	296	367	476
取些地点		云岗第一、二窟			

欲了解凝结水在岩石内如何起作用，有必要观察一下云岗砂岩的内部结构。组成岩石的主要矿物是石英（约占 30%）、斜长石（约占 30%）、黑云母等，而胶结物约占 35%，成分主要为钙质、泥质、胶结类型以孔隙式为主。表面岩石的孔隙率各处差异较大，从 4.6% 到 10.6%，一般在 7.8%，为水的贮存创造了有利条件。水在岩石中常年浸润、溶蚀，雨季后外面干，里面一时未干，岩石内外的膨胀系数不同，形成片状剥落；冬天水在岩石孔隙内结成冰，对岩石的破坏更加明显。我们曾对砂岩的抗冻性能做

过试验：耐冻系数为 0.58（冻融试验后干试件平均抗压强度/试件平均抗压我们强度%）说明其抗冻能力较差，这便是雕刻品中水的物理风化作用。

更主要的是水与气态风化营力（CO₂，O₂）对雕刻品共同进行化学作用的结果，逐渐使岩石中的胶结物（钙质、泥质）溶蚀并使主要矿物长石蚀变成松散的黏土矿物。通过对较新鲜岩石与风化岩石表面的白色粉末化学分析结果比较看出（表 3）：风化产物的成分主要是水化物，而 SiO₂，Al₂O₃，FeO，K₂O 等均比新鲜岩石大大减少。同样，对窟内 20 多个岩石的风化产物进行光谱分析、x 射线粉晶分析及差热分析的结果表明，成分主要为含水化物较多的高岑石水云母类矿物，碳酸盐类矿物及硫酸盐类矿物（以 MgCO₃ · 3 H₂O 及 MgSO₄ · 6H₂O 为最常见）。矿物吸收水分子，并使它与晶架联结起来作用的过程，将引起矿物体积的膨胀与收缩，从而引起周围岩石的破碎，加速岩石矿物成分的改变。以上事实说明云岗砂岩化学风化中的水合作用是主要的。

表 3 云岗新鲜与风化岩的化学分析成果比较

编号 项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	烧失量	取样地点
I	34.78	7.31	1.34	0.59	10.62	1.48	0.22	1.62	9.14	16.24	41.00	8 窟内室南壁面（白色絮状物质）
II	74.66	12.79	1.17	1.64	0.56	1.70	0.32	2.62	3.18	0.14	4.68	3 窟内 1#平硐深 60 厘米处岩样

注：其中 TiO₂、P₂O₅、MnO 等项成果略去

显而易见，凝结水对窟内雕刻品的风化作用既普遍又持续不断。

（四）由窟内积水引起的毛细水

新中国成立以前，窟内积水也是普遍现象，据调查 21 个洞窟中有 14 个窟内积水，其中 10 个窟地面被水长期浸泡，如 9、10 窟内地面原来有一层填土，1958 年挖出填土发现地面下 50 厘米见水，积水深度 10 厘米，3、9、10、12、13、14、17 等窟内地面均低于窟外，雨水经常倒灌窟内，再加上窟顶漏水，明窗淋雨等使窟内长期积水。

砂岩的孔隙率一般较大，便自然形成毛细作用，使地面以上 1~2 米的壁面岩石内充满水，长期浸润结果，致使这些部位的雕刻品几乎剥蚀无存。1、2、4、6、11、51 等窟的塔柱、14 窟千佛列柱虽不靠岩体，也因毛细水作用而遭受严重的风化剥蚀。

（五）从窟内流出常年不断的泉水——2 窟寒泉

这是另一种形式的地下水，出露于 2 窟北壁原地面下 45 厘米处的裂隙内，属于风化裂隙潜水中出露的下降泉，流量变化范围在 0.02 ~ 0.04 升/秒。在 1963 年维修工程前，北壁受水侵蚀成片状剥落，总剥蚀深度已达 1.2 米。通过对泉水水质化学分析，水中的固形物达 876 毫克/公升，表明水对岩石的溶滤作用相当强烈。

由于常年流水在窟内地面慢流浸泡，已使 1、2 窟地下积水 10 厘米厚，两窟下部壁面、间墙、塔柱 1 米以下的砂岩全部风化破碎成细块，严重影响两个窟的整体稳定。

综上所述，开窟 1000 多年来，水已使窟内的雕刻品遭受严重的风化破坏，即使近期的变化也是明显的。据 1960 年访问云冈的老人们时，说他们小时候（约 19 世纪初），17 窟北壁东侧还没有水的迹象，只有西侧一个。经过 60 多年后，北壁东侧已形成一个深达 2 米多的洞穴，此外，窟内水的动态还在不断地变化、迁移。1958 年暴雨集中下了 9 天，19 窟顶突然漏水，此后窟内便雨天滴水，久雨后成细水流。16 窟以往是北壁两侧渗水，1974 年用水泥堵抹后目前已移到大佛脚部（大面积反潮）。

二、窟内水的防治措施

新中国成立以来，石窟经过多次修缮后，窟底积水、窟顶漏水及北壁渗水的现象已明显减少，这是由于做了窟崖顶部与窟前的疏干、排水工作，如对 1、2 窟 9、10 窟、14 窟、17 窟等崖顶分别做过挡水墙、集水沟、阻水堤、截水沟、铺设防渗层；对裸露的岩体做部分裂缝灌浆、勾缝；在窟前则平整地面，使地面高度小于窟内；加高窟门下坎，保证水不倒流窟内；修筑排水渠等。这些措施是卓见成效的。目前尚需进行的工作还有：

1) 3 窟崖顶的 12 个方洞要进行覆盖、封护，防止雨水继续渗入窟内。3、4 窟两旁的冲沟对窟内渗水的影响不可忽视，应在一定高程内对冲沟中的裂隙、勾缝、灌浆，并建议在窟顶 50 × 50 平方米的范围内不要植树、种庄稼，使雨水很快排走。

2) 14 窟顶的防渗层面积太小，目前雨季窟内仍有渗水，应对仍裸露的岩层（面积约 10 × 20 米）进行裂缝灌浆及表面封护。

3) 昙曜五窟顶部约有 200 平方米面积的洼地，易存水，应设法做好排水填洼措施，浅井应回填，防止水灌入窟内。

4) 五华洞至 5 窟顶部地面尚需进一步完善排水防渗措施。

窟内如何防潮降湿？以往曾对 2 窟寒泉进行了下降水位，做成暗沟排出窟外，还对一些窟内潮湿、渗水处进行堵、抹水泥留有出水口。目前窟内北壁明显渗水的洞窟尚有

16、17、18 窟以及 5、9、10 窟的诵经道,如经过窟外的排水、防渗工程后,仍继续渗水时,本着堵大漏变小漏,线漏变点漏,片渗变引漏的原则,使渗水汇聚于一点或数点,随后将渗水裂缝处凿出一条梯形槽,再用导水管(可做在风化壁面内)导出窟外,以防止水在窟内蒸发、扩散。槽外填防水砂浆,外抹防水层。

为了继续搞清窟内各种水的破坏,研究防风化措施,还需要做些观测与试验工作。

1) 湿度与渗水的长期观测:目前已由云冈保管所派专人对 5 窟前、后室,7、8 窟前、后室,16 窟、20 窟等 8 处的相对湿度(早、中、晚每日三次)、3 窟平洞口滴水(每天一次)、2 窟泉水流量(一个月一次)等做长期观测记录。

2) 凝结水量的观察:选择夏天雨季在窟内设置一块玻璃板(或塑料薄膜)及岩石标本,设法秤出单位面积聚结凝结水的重量,求出单位时间窟内吸收凝结水的数量。

3) 水在岩石表层毛细管运动速度的试验:可选择适当地点在岩壁下部放一水槽,一面紧靠壁面,让水在岩壁自由上升,计算上升速度。

4) 窟内表层壁面的渗透性试验:沿垂直壁面的方向,取下规则岩样,在特制的渗透仪内做风化岩石的渗透性试验。

三、讨 论

1) 云冈石窟内水的防治问题,实际上是为防止石窟艺术品继续风化所采取的重要步骤,应把它列入每年的维修工程项目中去。化学处理是整个保护工程的一部分,但是很重要,因此不能想象大量石窟雕刻品的风化问题都指望化学处理来解决,这在经济上不允许,也没有必要。采用排水防渗措施来改善石窟所处的自然环境,延缓它风化的速度,应说是治本的措施,这从目前条件来看,它既容易做,收效也快。

2) 研究防止岩石风化的化学封护材料,应与石窟地质环境紧密结合。例如,从现有研究成果看,大部分窟内雕刻品的风化主要是凝结水在起作用,因此,考虑封护材料的首要任务是防止水从外边进入,但仍需使岩体内的水能够渗出,使石质雕刻品有“呼吸”的能力。(所谓“呼吸”,就是使岩体别处进入雕刻品的水得以向外渗出)。从分析岩石表面的风化产物后知道,水与砂岩中的部分矿物、胶结物合成的水化物(水合作用)是促使岩石风化的主因,如果使用有机聚合物作为封护材料时,它与岩石内包含着大量的风化产物——水化物的化学反应性如何,这是需要搞清楚的。

3) 关于石窟是否需要修窟檐的问题,经常引起争论。一种意见是为防止石窟日晒雨淋需要窟檐起保护作用;另一种说法是,没有窟檐使窟内通风好、湿度降低,对雕刻品的保护更有利。争论的焦点在于防止风化营力的着眼点不同,前种意见着重于防止日照(紫外线辐射)、雨淋、冰冻温差变化大等物理风化现象,后种意见主要是考虑防止

水在窟内引起化学风化。我认为，对每个窟需要具体分析，因地因时制宜，如 9、10 窟诵经道内至今还有渗水，窟内湿度大，如加上窟檐就会增加通风的困难，对雕刻品是不利的。但是夏天雨季大量湿热空气进入窟内形成凝结水，更增加了窟内的湿度，这也是不利因素，如果在窟前做些门窗，雨季来前关上窗户，安上门帘（可用锦纶帆布做），其他时则可打开通风，这样做防止风化的效果可能会好些，如有些窟内很干燥，加上窟檐也是可行的。

（原刊于《文物保护技术》辑刊 1982 年第二辑第 101 ~ 110 页）