

云冈石窟加固工程中环氧树脂应用的改进

解廷藩

20 世纪 60 年代初，我们曾用“丙烯酸酯类”高分子材料，做石窟围岩裂隙灌浆加固和残段落石的黏结试验。进入 70 年代，由于“丙烯酸酯类”高分子材料使用不方便，现场工艺过程复杂，我们又根据中国科学院广东化学研究所提供的资料，用环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系作为灌浆加固材料，经过大量试验后，在三年（1974 ~ 1976 年）云冈石窟抢险加固工程中得到广泛的应用。

通过三年工程的实践，我们发现环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系用做“石窟围岩裂隙灌浆加固”，是确实有成效的，但是也存在一些问题，如浆液放热量大，固化速度慢。我们于 1977 年查阅了中国科学院广东化学研究所提供的资料，改进灌浆液，消除了浆液放热大的缺点，增快了固化速度，从而杜绝了固化慢所造成的渗漏浆液的现象。改进后的灌浆液在施工时操作简便，主要材料环氧树脂在配方中也相应地减少，机械性能不受影响，还节省了开支，每一公斤混料比原配方能节约 1.95 元左右，这个方法在第六窟塔柱裂隙灌浆加固中已经采用。

环氧树脂是含有环氧基团的高分子材料，它是环氧材料的主要材料。当前用途最广的是双酚 A 型环氧树脂，它是通用环氧树脂或标准环氧树脂，简称环氧树脂。作为石窟围岩裂隙灌浆加固材料，环氧树脂本身黏度大，需要降低它的黏度来提高它的可灌性。根据广东化学研究所提供的资料，采用糠醛、丙酮为环氧树脂的稀释剂，降低了环氧树脂的黏度提高了它的可灌性，并确保它的物理机械性能良好，这样就为环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系用做石窟围岩裂隙灌浆加固开辟了新的途径。

环氧树脂在“石窟围岩裂隙灌浆加固”和“残断落石归安黏结”工程方面的应用

实验一

尽管环氧树脂的黏结强度和其他物理机械性能早已为国民经济各个领域所证实，然而作为“石窟围岩裂隙灌浆加固”材料的环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系，在石质文物的加固保护方面是否合适，需要做必要的实验，提供一定的科学数据予以证明。为此我们针对云冈石窟洞窟内存在的具体问题，在室内模拟现场做了环氧树脂各种不同配方的岩石黏结、灌浆加固、砂质粉末及硅酸盐水泥固结实验，研究其物理机械性能和受力破坏情况。

灌浆加固的岩石在受力测试时，均系岩石面破坏，说明黏结强度都高于岩石本身的强度。其中，糠醛-丙酮为环氧树脂的 20%~30%，都适用，就固化剂相比而言，多乙烯多胺取得的数据较稳定。黏结方面：环氧树脂加入 501 活性稀释剂比加入 304 不饱和聚酯树脂的黏度小强度也高，用酮亚胺为固化剂的黏结材料，测试时是从黏结材料脱开，不是岩石面破坏，因此该固化剂在这里不适用。

总之选择环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系，作为石窟围岩裂隙灌浆加固和对“残断落石归安黏结”性能以及便于现场施工条件来看，都是比较合适的。

实验二

环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系，作为灌浆加固材料，已经证明具有实用价值，但是通过应用实践后，发现它配制后放热量大、固化速度慢的缺点。这些问题，不仅引起我们的注意，而且早已引起广东化学研究所的重视，过后不久就为我们提供：采用碱来催化糠醛、丙酮，制备糠叉丙酮单体混合物，进而用它来改性环氧树脂，作为灌浆加固的新材料。

我们在室内做了不同糠叉丙酮单体改性环氧树脂的试管固化实验，经过筛选确定的配方是：#6101 环氧树脂 100 克、糠叉丙酮单体（糠醛 192 克、丙酮 58 克、氢氧化钠 1:1 溶液 4 克的混合单体）70 克、丙酮 20 克、二乙烯三胺 20 克。用它灌注加固云冈岩石样品，进行抗拉（劈裂法）、抗剪试验，结果均于岩石面破坏（抗剪强度正应力 121 公斤/厘米²、抗剪强度剪应力 201 公斤/厘米²，抗拉强度 21 公斤/厘米²）。试验证明，上述灌浆加固的材料比岩石强度高，适合做云冈石窟围岩裂隙灌浆加固材料。

资料中介绍在碱的催化下,糠叉丙酮单体混合物的黏度会逐渐增大,甚至成蜡状物。我们在维修第六窟塔柱过程中,外界气温 $14 \sim 17^{\circ}\text{C}$, 这一问题比较突出地显示出来,给灌浆加固带来不便。为此我们在实验室做了醋酸 (36% 溶液) 中和与不中和的实验,当糠叉丙酮单体混合物配制好,不要等单体混合物冷却,迅速加入醋酸中和,中和的比不中和的糠叉丙酮单体混合物,从黏度讲,适应性较好。

实验三

环氧树脂不论用于“石窟围岩裂隙灌浆加固”,或者是用于“残断落石归安黏结”,要防止漏浆,一旦发生漏浆外溢时,不仅影响施工效果浪费材料,而且也使石雕表面受到损伤(包括碑文字迹)。为了在施工中不使文物受到污损,我们在室内和现场作模拟实验,解决堵止漏浆的材料和防护材料。

软肥皂堵漏:用软肥皂是从汽车司机堵油箱漏油受到的启发。经过实验发现软肥皂不仅堵漏方便,而且它的附着力较强,尤其是经过一段时间,发现软肥皂和渗漏的环氧树脂浆液,发生化学反应,成为略坚硬(难扒下来)的树脂化产物。实践证实软肥皂是一种理想的堵漏材料。

外溢和渗漏的灌浆加固和黏结材料,对石雕表现都有损伤作用,为此选用了 851 有机硅防水剂、聚氯乙烯可扒漆、汽车上光蜡(都是无色透明的)用来封闭石雕表面,结果证明三种材料都有脱膜作用,均可作为灌浆时外溢和渗漏的防护材料。

结 束 语

环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系和糠叉丙酮改性环氧树脂,这两种灌浆材料,用作石窟围岩灌浆加固,都是适用的,应根据施工时间,裂隙状况等因素而适当地选择其中之一,我们认为二者都不可偏废。根据我们的经验,在一般情况下,于春、夏、秋天施工可用糠叉丙酮、环氧树脂灌浆,在天气较冷的情况下, (15°C 左右) 用环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系灌浆。对细裂缝 (1 ~ 3 毫米) 用环氧树脂-糠醛-丙酮-胺类体系灌浆,对宽裂缝 (5 毫米以上) 用糠叉丙酮环氧树脂灌浆,但是两种灌浆材料都有某些不足之处,尤其是施工方法缺点很多。总之如何使文物保护工作实现现代化,闯出一条新路,还需要我们在今后工作中进一步摸索和探讨,在实践中不断改进和提高。