

化学灌浆在岩石工程中的综合应用

程鉴基

(中国科学院广州化学研究所 广州 510650)

提要 介绍几种性能优良的化学灌浆材料,并通过煤矿、铁路隧道和水电工程几个典型的工程实例,具体说明化学灌浆技术在岩石工程补强加固中的综合应用。

关键词 化学灌浆, 岩石工程, 应用

1 前言

由于地壳运动使组成地壳的岩层发生永久变形,改变其原始产状,形成褶皱、节理、断层、劈理、线理等。我们现在所看到的各种构造形态都是过去地质历史时期中地壳运动留下的踪迹,它们的类型和规模都是地壳运动性质和强度的反映。断裂构造,使岩石形成破裂带,使各含水层联通或地表水与地下水联通,造成地下水活动流畅,但如断层构造岩胶结紧密,又可能堵塞地下水的活动。对于工程地质来说,断裂对岩石的坚固性和稳定性总有不同程度的减低,如断裂带中的断层泥和糜棱岩等受地下水浸润而成“润滑剂”,在施工中容易发生坍塌。另外,断层端点或拐点,往往是构造应力集中的地点,易于发生地震。总之,断裂构造使岩石连续完整性遭到破坏,断层带、溶洞、劈理等,都是岩层中的薄弱部位(或面),对岩石工程的稳定性有明显的不良影响。

化学灌浆是岩石工程补强加固手段之一。性能优良的化学灌浆材料和合理可行的施工灌浆方法是化学灌浆补强加固得以实现的关键所在。本文介绍几种性能优良的化学灌浆材料,并通过典型的工程实例,具体说明化学灌浆技术在岩石工程补强加固中的综合应用。

2 几种化学灌浆材料简介

化学灌浆材料浆液粘度低,可灌入细微裂缝,固结后有良好的物理力学性能和粘聚力,使有缺陷的岩层恢复整体性。下面介绍四种性能优良的化学灌浆材料。

2.1 中化 798

中化 798 由呋喃、环氧树脂等组成,其抗压强度 $50\text{MPa} \sim 80\text{MPa}$,抗剪强度 $10\text{MPa} \sim 40\text{MPa}$,抗拉强度 $10\text{MPa} \sim 20\text{MPa}$,起始粘度在温度 25°C 时为 $5\text{CP} \sim 50\text{CP}$ 。该材料除具有力学性能优良、耐久性能好、毒性低等优点外,更主要的是能灌入极低渗透性 ($K =$

$10^{-6} \text{ cm/s} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$) 的泥夹层及构造破碎带, 或 0.001 mm 的裂缝, 即该材料突出的优点是有优异的渗透性和良好的固结性。本浆材原料全部国产, 来源丰富, 价格低于一般环氧浆材, 配制工艺简单, 单液灌注, 易于推广应用。在国内属首创, 在世界上属领先地位, 获 87 年中国科学院一等奖。

2.2 水泥—水玻璃化学灌浆材料

该材料固结强度 $0.5 \text{ MPa} \sim 15 \text{ MPa}$, 固结率 $98\% \sim 100\%$, 凝胶时间 $30 \text{ s} \sim 120 \text{ s}$, 具有成本低, 适应性好, 浆液充填率高, 湿条件耐久性好等优点, 其浆液特点如下:

- (1) 浆液凝胶时间可准确地控制在几秒至几十分钟范围内;
- (2) 结石体抗压强度可达 $10 \text{ MPa} \sim 20 \text{ MPa}$;
- (3) 结石率为 100% ;
- (4) 结石体渗透系数为 10^{-8} cm/s ;
- (5) 适宜于 0.2 mm 以上裂隙和 1 mm 以上粒径的砂层使用;
- (6) 材料来源丰富, 价格便宜。

2.3 817 型水玻璃注浆材料^[1]

采用烷基化合物(简称 817)添加剂, 解决醋酸乙酯与水玻璃浆液的混合问题。这种添加剂来源广泛, 价格便宜, 无毒, 使用方便, 能提高醋酸乙酯的亲水性, 使水玻璃浆液能形成均匀凝胶。一般水玻璃浆液的固砂强度只有 $1 \text{ MPa} \sim 2 \text{ MPa}$, 加本材料后可提高到 3 MPa 以上, 抗压强度也相当稳定。817 液还有促凝固化作用, 调整其用量, 可使凝固时间在几分钟到 60 分钟内调节, 拓展了水玻璃注浆材料的应用范围, 并获中国专利局的专利。

表 1 817 型水玻璃浆液基本性能

Table 1 Fundamental characteristics of 817 sodium silicate slurry

抗压强度 (Pa)	凝固时间	湿砂老化后抗压强度 (Pa)			
		开始	1 个月	10 个月	27 个月
$294.2 \times 10^4 \sim 392.6 \times 10^4$	几十秒 ~ 60 min	369.7×10^4	338.3×10^4	335.4×10^4	336.4×10^4

2.4 400 浆材^[2]

虽然中化 798 化学灌浆材料突破了过去认为渗透系数 $K = 10^{-6} \text{ cm/s}$ 的地层是不可灌的这一界限, 但是, 对于极低渗透性 ($K = 10^{-8} \text{ cm/s}$) 的介质渗透仍然较难。为此, 在中化 798 的基础上, 进行改进和提高, 于 1993 年新研制出 400 浆材。该浆材是以环氧树脂、丙酮、糠醛、二亚乙基三胺、添加剂“A”和偶联剂等组成, 通过以添加剂“A”来活化糠醛、丙酮的路线(包括 AN、AC 两个系列), 经活化前后浆材固结体力学性能的比较, 在宏观上证实活化效果良好。其间, 较系统地研究硅烷类及钛酸酯类偶联剂与浆材的反应及对被灌介质的作用、偶联剂的水解特性等。结合灌浆材料的使用环境, 制定出灌浆材料中偶联剂的选择原则是: 合适的水解速度; 能与浆材中一些有机基因发生反应或物理作用; 与被灌介质的酸碱性相匹配。因 400 浆材以廉价的糠醛、丙酮代替部分价高的环氧树脂和胺, 又因

接触角小, 起始粘度低, 对介质亲和力高, 浆材的初凝时间足够长, 对低渗透性被灌对象可以有充分的时间渗透(表 2)。

表 2 400 浆材的物理性能

Table 2 Physical properties of 400 slurry

项目 配 方	比重 ρ^{20} (kg/L)	起始粘度 η^{20} ($\text{M Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力 r^{20} ($10^{-3} \text{N}/\text{m}$)	初凝时间 (d)
400	1.047	2.15	32.8	7

化学浆材的毒性涉及环保问题, 与国计民生休戚相关。化灌浆材对环境污染的途径有施工污染和浆材固结体浸出液对地下水的污染。由于 400 浆材中各主要组分无毒或毒性不大, 在施工过程中只要保持现场空气流通, 工作面清洁, 并配合适当的劳保措施, 施工人员的健康是可以保证的。另外, 本浆材的灌浆工艺规定, 高渗透性灌浆材料施工, 尽量防止浆材窜冒才能取得良好的灌浆效果。即化灌前先用水泥类化学灌浆围封处理, 堵塞化灌范围内的较大裂隙, 这样就不会出现该浆材从某些大裂隙窜入地下水中的情况。因此, 只要严格按照施工规定操作, 不会产生施工污染, 完全符合国家规定的地面水排放标准, 不存在环境污染问题。

该浆材曾用于珠江过江隧道工程的沉管微细裂缝(缝宽 0.1mm)。先用弹性环氧封缝, 再用 400 浆材处理, 证明渗透性能优于中化 798 浆材, 开创了应用高渗透性环氧系化学灌浆材料处理微细裂缝的应用新领域。目前, 该新材料正积极推广到处理岩石裂缝(隙)的大型工程。

3 化学灌浆在岩石工程中的具体应用

3.1 南宁四塘里采煤矿斜井断层漏泥砂整治工程^[3]

3.1.1 工程概况

该矿为总投资 1596 万元, 年产煤 9 万吨, 可采 30 多年的煤矿。矿区内有一条倾角 65° 的断层带通过, 斜井沿断层带相反方向掘进, 与地面水平倾斜 25° 。当主斜井施工到 465m 时, 遇到含断层砂的断层, 并发生严重坍塌, 用混凝土砖砌好的半圆拱, 于 551m 处发生断裂, 451m~460m 已砌好的井段向前移动下沉, 顶部压垮 6m~7m, 混凝土块被推上至 427m 处(即埋井 33m), 涌水量达 20t/h~50t/h, 致使施工完全停止。

3.1.2 化学灌浆的设计

井筒掘进到 460m 深处, 与地面垂直距离为 194.40m, 若采用从地面灌浆, 钻孔技术及准确度方面都存在很大困难, 故采取在井筒内进行分段灌浆方案。首先将断层泥从 427m 强行清理至 438m 时, 无法再往前清理, 即在 436.8m~438m 之间砌筑 1m 厚的止浆墙。从止浆墙工作面用 ZY—75 型钻机打钻到 454m 处进行灌浆, 灌浆花管段长 5m, 钻孔深度 436m~454m, 共长 18m。按照实际情况, 我们首先用水泥—水玻璃浆液将流水大通道及空洞堵塞填满, 然后再用 817 型水玻璃材料灌注, 利用化学浆液渗透性好的特点, 进

行堵水加固, 使整个灌浆地段形成一个整体, 达到堵水加固的目的。

3.1.3 817 型水玻璃浆液基本性能及灌浆工艺

817 型水玻璃灌浆材料的主剂为水玻璃, 凝固剂为醋酸乙酯, 溶加剂为烷基化合物 (817) 水溶液。上述各种原材料各地均可购买, 具有来源广泛、价格便宜、无毒性、操作方便等优点。

根据实际情况及实践经验, 817 浆液配方调整如表 3。

表 3 817 型浆液配比
Table 3 Formulation of 817 slurry

A 组分		B 组分	凝固时间 (s)	备注
水玻璃	817 水溶液	醋酸乙酯		
25~ 80	20~ 25	16~ 20	30~ 90	以 A 组份体积为 100 份计算

由于 817 型水玻璃浆液是双液系统, 浆液由 A、B 两组份混合而成, 而组份使用比例控制要求较严, 故 817 型玻璃浆液的灌注采用双液系统泵前混合单液灌浆法, 把 A、B 两组份按比例倒入混合容器, 立即搅拌, 立即压灌。每次混合浆量为 5L ~ 15L, 配制可灌注凝固的时间为 30s 以上的浆液, 十分方便。该工程灌进 817 型浆液 4.5m³, 灌浆压力达到 0.9806MPa ~ 1.9613MPa。

3.1.4 灌浆效果分析及讨论

灌浆初期因井内压力不大, 止浆墙冒水现象不严重, 但随着灌浆的进展, 井内压力上升, 止浆墙及井壁等多处出现了小裂缝。而水泥—水玻璃浆液由于渗透性差的弱点, 止浆墙出现较大的冒水现象。经灌注渗透能力强、充填率高的 817 型浆液后, 解决了水泥浆等多种方法解除不了的冒水问题, 使灌浆工作顺利完成。

在拆除止浆墙后, 开挖过程中发现原来渗水的断层泥已变成整体的硬泥, 明显地看到 817 型水玻璃浆液有较大的扩散范围, 其扩散直径约 96cm ~ 101cm, 有的甚至渗透到水泥浆之间及断层泥的裂隙中, 形成劈裂渗透结石体。水泥—水玻璃浆液, 除充填空洞及大的流水通道外, 很少渗透, 多数情况下形成自身本体结石, 但起到压紧泥层的作用。817 型水玻璃浆液通过劈裂渗透途径将散的松软的稀烂泥砂固结成坚硬的整体 (图 1)。

- 1—水泥浆充填空洞 80 × 25cm²
- 2—化学浆渗透墙壁缝 250 × 10cm²
- 3—化学浆扩散范围 101 × 96cm²
- 4—水泥化学浆结石体 63 × 39cm²
- 5—注浆后整体性强度较高的泥砂、浆材固结体

图 1 448 米处截面示意图

Fig 1 Cross section at 448m depth

从 436m ~ 454m 清除断层泥 18m，已安全顺利通过坍塌断层带地段，从开挖的不同部位取样测试其平均抗压强度达到 3 922M Pa(表 4)，完全达到原设计要求。另外，817 型水玻璃材料和水泥—水玻璃有机地结合起来使用，既能发挥两种材料的优势，又能节约成本，其经济效益更佳。

表 4 注浆区断层泥固结体测试结果

Table 4 Test result of consolidated soil mass in faults at grouted area

样品编号	破坏压力 M Pa	试块面积 cm ²	抗压强度 M Pa	试验仪	备注
1	107.00	5 × 5	4.28	30t 压力机	水泥块状
2	90.00	5 × 5	3.60	30t 压力机	水泥块状
3	169.00	4.5 × 4.5	8.35	90t 压力机	水泥块状
4—1	8.00	5 × 5	0.32	无侧限抗压	风化泥岩
4—2	6.10	5 × 5	0.24	无侧限抗压	风化泥岩

3.2 南岭隧道石灰岩溶洞流塑粘土大突泥灌浆整治工程^[4]

3.2.1 工程概况

南岭隧道是衡广复线的控制工程之一，全长 6 058m，系浅埋有溶洞群的双线隧道。该隧道位于五盖山和骑田岭的夹持地带，属南岭构造带，构造运动强烈，普遍发育下石炭系灰岩地层，溶蚀洼地发育，岩隙以裂隙为主，裂隙大多数为砂粘土和粘土充填。隧道在开挖过程中，发生突水突泥，致使附近井泉枯竭，地表坍塌数十处，有的坍塌发生在京广线路基上，导致路基下沉，铁轨悬空，引起两次行车事故，迫使工程中断。

3.2.2 流塑粘土的工程性质

隧道复盖层较厚，最厚达 92m，发生突泥处的溶洞水平长度 85m，成 45 角倾斜与隧道斜交穿过，相交长度约 50m，溶洞内充填物为黄色的流塑状粘土，为高岭土成分，以粘粒和粉粒为主，细而腻滑，结构基本为絮团状。该粘土孔隙大，压缩性大，强度低，具有触变性，在边搅拌边振动或拍打时能变成稀泥状，但静止后则重新呈凝胶状。

3.2.3 灌浆施工技术

首先在突泥石(DK1935+ 475)用微型灌注桩法灌一道堵截墙，挡住溶洞淤泥的涌出，以便清除被淹没的巷道。实践证明，微型灌注桩发挥了很好作用，因为粘土又稀又滑，堵截墙两端的灌浆孔很难形成一个较长的柱状固结体和墙体，并且往往在对其它孔灌浆时会将已形成的固结体推走，这些孔又会继续涌泥。借助微型灌注桩有效地阻止了这种现象的发生。其方法是将泥土固结到一定深度后，再把被堵塞的灌浆孔进行扫孔，打入带有 Φ5~6mm 孔眼的花管(Φ108mm)，以花管为套管再进行灌浆。为增加注浆桩的刚度，在花管内扫孔后，放入三根 Φ25mm 的钢筋，然后再灌入浆液，使之形成一根小型的灌注桩。数根微型桩平行排列成排，数排微型桩就构成一道封闭墙，为遏制泥浆流动以及随后的灌浆创造了有利条件。因此在大突泥的条件下，为加速浆液硬化，灌浆材料以水玻璃和水泥为主，双液单系统灌浆(管口段混合)为佳。

3.2.4 灌浆效果

经取样检查, 浆脉与粘土互层, 并经多次挤压褶皱相互掺杂。岩芯中的浆脉含量约 30%, 土层经过压缩、脱水后, 稀泥状的粘土已变成土块, 抗压强度为 0.2 MPa, 最高可达 4.5 MPa, 平均也有 0.9 MPa。隧道贯通后, 无任何突泥突水现象, 灌浆效果良好, 不仅起到临时防渗加固的作用, 而且能作永久地基加固。

3.3 青海龙羊峡大坝坝肩夹泥层的渗透灌浆加固工程^[5]

3.3.1 工程概况

青海省龙羊峡水库, 大坝坝顶高 260m, 库容 247 亿立方米, 装机 128 万千瓦。在大坝左岸坝肩横穿一条 G4 伟晶岩劈理带, 岩内有不连续的夹泥, 厚 3cm~5cm。经试验表明, 大坝蓄水后, G4 劈理带会被拉裂, 危及大坝安全。因此, 在灌水泥类化学浆的基础上, 用具有优良渗透性的中化 798 浆材进行灌浆补强固结处理, 可减少坝端基础开挖数万立方米, 节约混凝土几十万立方米, 节省投资几百万元, 工期缩短, 为提前发电创造了条件。同时, 有利于解决高应力区域施工中产生的岩体松弛问题, 其技术经济价值十分显著。

3.3.2 施工措施

在灌浆时, 先进行 5 MPa~10 MPa 的高压水泥类化学灌浆, 改善复杂地层渗透的不均匀性, 封闭较大的裂隙通道, 迫使后期灌入的化学浆液向微细裂隙渗透, 避免漏浆。对灌浆参数进行科学选择, 将参数点控制在 $P-Q$ 关系曲线内 (图 2), 灌浆压力 $P = 2.4 \text{ MPa} \sim 4.0 \text{ MPa}$; 进浆速度 $v = 0.05 \text{ L/m in} \sim 0.25 \text{ L/m in}$; 钻孔耗浆量 $Q = 209 \text{ L/m} \sim 320 \text{ L/m}$; 灌浆时间 $t = 3 \text{ d} \sim 4 \text{ d/孔}$ 。如此可保证灌浆处于渗透状态下进行, 有效地防止地基产生有害的抬动变形。同时, 中化 798 是一种呋喃—环氧类的高渗透性浆材, 除灌浆压力和浆液本身的粘度外, 它的渗透能力还取决于对土的亲和力、表面张力和其它因素。

图 2 $P-Q$ 关系示意图

Fig 2 Diagram of relation between P and Q

本工程选用良好的环型泵、钢化玻璃筒、高压输浆管、用水密封的双层橡胶阻塞器等设备, 以及可靠的计量、输浆、调压系统, 保证灌浆施工的顺利进行。

表 5 龙羊峡 G4 劈理带灌浆成果

Table 5 Grouting result at G4 cleavage in Longyang Gorge

性能对比	项目	抗压强度 (MPa)	变形模量 (MPa)	抗剪强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	岩芯率 (%)	备注
灌浆前		< 900*	-	-	- >	-	取不出样 * 孔内试验值
设计要求		5000~ 7000	-	> 2	1.5	90	
灌浆后		12000	23.5~ 33.4	11.6	7.8	> 90	

3.3.3 处理效果

通过大量的现场监测和室内测试、波速测定、钻孔内电视录像、钻孔静弹模测试等多方面的宏观与微观分析,发现灌浆成果显著,渗透强,扩散远,强度高,尤其是能提高岩体的抗剪强度,各项力学指标均达到设计要求(表5)。

4 结语

(1) 根据岩石工程的具体地质条件,选用更为合适的灌浆材料与施工方法。

(2) 一般岩层中的断层和溶洞泥砂,以选用水泥-水玻璃或 817 水玻璃浆材注浆加固为佳。

(3) 一般岩石劈理和细小裂缝或混凝土微细裂隙(宽度 0.1mm),最好使用中化 798 或 400 型浆材进行补强加固^[6]。

(4) 一般注浆效果,除浆材性能和比例参数配方内因影响外,还取决于施灌设备和方案等外因。因此,不同的岩层和不同的浆材注浆,必须采取不同的灌浆工艺。

参 考 文 献

- 1 林豪兴等: 817 水玻璃灌浆材料的应用 化学世界, 1987; 28(4): 145—147
- 2 何泳生等: 研制 400 浆材的工作报告 广州化学, 1993; 11(4): 1—4
- 3 彭建勋等: 注浆加固软土的研究及工程实例 岩石力学与工程学报, 1992; 11(2): 170—181
- 4 熊厚金等: 石灰岩突泥化学灌浆 岩土工程学报, 1991; 13(5): 78—84
- 5 程鉴基: 水泥类化学灌浆在软土地基处理工程中的综合应用 土木工程学报, 1993; 26(3): 74—78
- 6 程鉴基: 灌浆技术在软土地基处理中的综合应用 岩土工程学报, 1994; 16(5): 89—93

COMPREHENSIVE APPLICATION OF CHEMICAL GROUTING IN ROCK ENGINEERING

Cheng Jianji

(Guangzhou Institute of Chemistry, Academia Sinica, Guangzhou 510650)

Abstract In this paper some chemical grouting materials with good characteristics are introduced. Some application cases of chemical grouting to rock engineering are described.

Key words chemical grouting, rock engineering, application

更正

1995 年第 3 期第 196 页上图 3 与图 4 位置对调, 但图名位置不变。1996 年第 1 期第 63 页图 1 名应为“加载方式示意图”。同期第 64 页公式(5)、(6)中 $(\frac{K_{II}}{K_{Ic}})$ 应为 $(\frac{K_{II}}{K_{Ic}})^2$, 图 2 和图 3 中的纵坐标应为 K_{II}/K_{Ic} , 图中公式中的 $(\frac{K_{II}}{K_{Ic}})^2$ 应为 $(\frac{K_{II}}{K_{Ic}})$, 公式前负号掉。特此更正, 并向作者和读者致歉。