

化学注浆技术及其应用进展*

秦鹏飞

(郑州铁路职业技术学院铁道工程学院, 450018, 郑州//讲师)

摘要 化学注浆技术在微细裂隙抗渗治理、泥化夹层补强、堤防和建筑物加固及隧道岩溶突涌水处治等工程领域发挥着不可替代的重要作用,已经取得了巨大的经济和社会效益。文中阐释了化学注浆新理论、新材料和新工艺及新设备在工程中的应用情况,主要包括吸渗理论、劈裂-压密注浆及动水注浆理论的基本原理和工程应用, CW 环氧树脂、高聚物注浆材料、改性脲醛树脂和低热沥青等新型化学材料的工程实践,锚注、爆破注浆和电渗、生物化学注浆及注浆自动记录仪等注浆新工艺新设备的技术应用情况等。作为水泥注浆技术不可替代的重要手段,化学注浆技术在工程建设中必将得到更加高度的重视和更加迅速蓬勃的发展。

关键词 化学注浆; 注浆理论; 注浆材料; 注浆工艺

中图分类号 TU472.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.036

Chemical Grouting Technology and Its Application

QIN Pengfei

Abstract Chemical grouting technology plays an irreplaceable role in the treatment of micro-fissures, muddy interbed reinforcement, dike and building reinforcement, as well as the karst water inrush treatment, and has gained huge economic and social benefits. In this paper, the application of new theory, new material, new technology and new equipment of chemical grouting in engineering are expounded, including the technical advantages and engineering practice of seepage theory, compaction and splitting grouting theory, hydrodynamic grouting theory, and new materials like CW epoxy resin, polymer grouting material, modified urea-formaldehyde resin and low-heat asphalt, as well as the technical characteristics and engineering application fields of new grouting technology and equipment, such as bolt-grouting support, blasting grouting, electrochemical grouting, pumping grouting and automatic grouting recorder, etc. As an irreplaceable and important means of cement grouting technology in engineering and application, the chemical grouting technology will attract more attention and will de-

velop more rapidly.

Key words chemical grouting; grouting theory; grouting material; grouting process

Author's address School of Railway Engineering, Zhengzhou University of Railway Vocational Technology, 450018, Zhengzhou, China

近年来,化学注浆技术在涉及微细裂隙抗渗治理、泥化夹层补强、堤防和建筑物加固及隧道岩溶突涌水处治等的水电、建筑、交通、采矿等领域均得到了广泛的推广应用,取得了巨大的经济和社会效益^[1-4]。伴随着化学注浆技术的进步,化学注浆理论、化学注浆材料和化学注浆工艺及设备研究均取得了重要进展。本文尝试对化学注浆新成果及其工程应用情况进行阐释和述评。

1 化学注浆理论

化学注浆理论有其自身鲜明的特征,在某些方面显著区别于水泥注浆理论。如采用丙烯酸盐或环氧树脂等化学材料对岩体挤压破碎带进行加固,采用溶胶树脂或聚氨酯等材料对孔隙砂岩进行防渗处治等。由于浆液成分和工程地质条件等与水泥注浆时的情形不同,因而注浆设计方法和计算理论也就大不相同^[5-8]。

1.1 吸渗理论

研究表明,化学注浆过程中浆液与固相介质间不仅存在灌浆压力产生的渗透作用,而且还存在介质对浆液的吸渗作用,浆液可以通过吸渗作用浸润渗透到岩土介质的夹泥孔隙中。吸渗作用在化学注浆技术中意义重大,是除注浆压力外保证岩土体获得良好可灌性的另一动力^[9-10]。当浆液与岩土介质表面接触时,浆-土的界面张力和吸渗作用可以将介质中的孔隙水置换出来,浆液则可以渗透并填充到介质的空隙内,如图1所示。图中: s 为岩体; w 为

* 郑州铁路职业技术学院博士科研启动基金(1760002602)

孔隙水; g 为浆液; σ_s 、 σ_g 和 σ_w 分别为岩体、浆液和水的表面张力; σ_{sg} 、 σ_{sw} 和 σ_{gw} 分别为岩-浆、岩-水和浆-水的界面张力; θ 为润湿角。性能良好的化学浆液具有自动渗入被灌介质和被灌介质自动吸吮的双向作用机制^[11]。

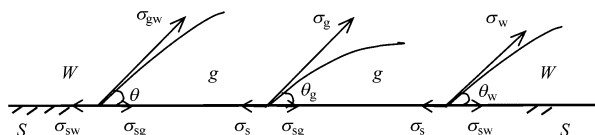


图1 浆-水-岩体介质表面张力及吸渗作用

浆液与岩土介质吸渗作用的强弱与浆液、被灌介质的物理化学性能有关。研究表明,影响岩体对浆液吸渗速度大小的主要参数有浆液与介质的表面张力、地层的渗透率、浆液的饱和度及润湿角等,具体如下:

$$v_i = \sqrt{Kn} \sigma_{gw} f(\theta) \left[\frac{K_g K_w}{\mu_g K_w + \mu_w K_g} \cdot \frac{\partial J(S_g)}{\partial S_g} \cdot \frac{\partial S_g}{\partial x} \right] \quad (1)$$

式中:

K, n ——被加固岩土体介质的渗透率(Darcy)和孔隙率;

σ_{gw} ——浆水界面张力;

θ ——润湿角(为保证浆液对被加固体良好的浸润和吸渗作用,要求 $\theta < 90^\circ$);

K_g, K_w ——岩体对浆和水的相对渗透率;

S_g ——浆液的饱和度;

$J(S_g)$ ——Leverett 函数。

$$J(S_g) = \frac{p_c(S_g)}{\sigma_{gw} \cos \theta} \sqrt{K/n} \quad (2)$$

式中:

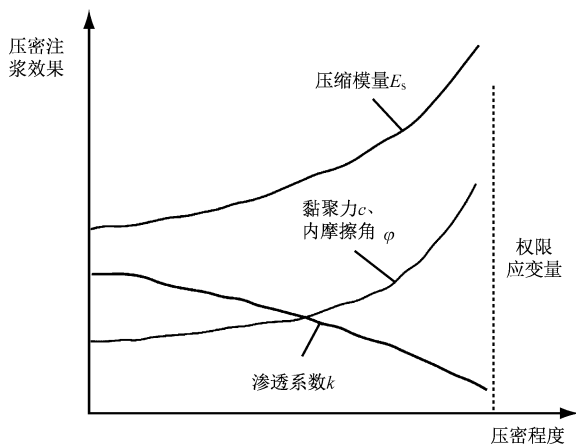
$p_c(S_g)$ ——毛细压力,可由试验测定。

在我国丹江口大坝(2012)、澜沧江小湾水电站(2016)、雅砻江锦屏电站(2017)等大型水利工程建设中均遇到了极复杂的地质难题,需要高质量的灌浆技术进行加固处理。科研人员、技术人员通过制备浸润性和亲和性优良的化学浆液,充分发挥和利用浆液与介质的吸渗作用,出色地完成了化学注浆任务,取得了很好的注浆效果。

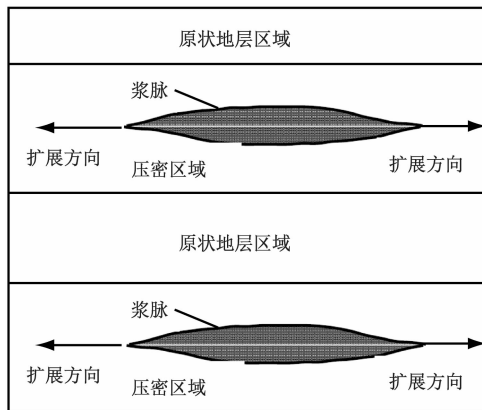
1.2 劈裂-压密注浆

劈裂注浆过程是先压密后劈裂的复杂动态过程,劈裂注浆过程中压密和劈裂注浆形式伴生伴长,其发展形式为压密→劈裂→压密→劈裂交替进

展。压密程度越高,则土的压缩模量、黏聚力和内摩擦角等强度性能指标及防渗性能指标改善越显著。注浆压力继续上升后则在大主应力作用方向产生劈裂缝,而后沿着大主应力的作用方向向两侧扩展,最终在加固体内形成尖角状的浆脉,如图2所示。随着浆脉厚度在扩展方向上逐渐衰减,注浆效果由近及远则逐渐降低。



a) 压密注浆



b) 劈裂注浆

图2 劈裂-压密注浆

研究表明,受注浆压力影响,垂直于浆脉扩展方向上的原岩应力会有所增加,而平行于浆脉扩展方向上的原位应力则几乎没有变化,劈裂-压密注浆对垂直于劈裂通道方向上的注浆效果影响非常有限。注浆压力、注浆速率和浆液黏度等参数是保证劈裂-压密注浆取得良好效果的关键因素,对于深浅不同的加固介质,应采取压力不等的差异化注浆控制技术,并适时调整注浆速率和浆液配比,从而取得较优的注浆效果^[12-13]。

1.3 动水注浆

动水注浆理论主要应用于岩溶突涌水等工程地质灾害处治或坝基渗漏涌水封堵等。化学浆材在动水中运移扩散时,扩散形态受水流场的影响非

常显著。水流场中逆水方向和垂直于水流方向的浆液扩散范围较小,而顺水方向浆材扩散范围较大,扩散距离随时间延长而扩大,呈U型规律^[14-16],如图3所示。

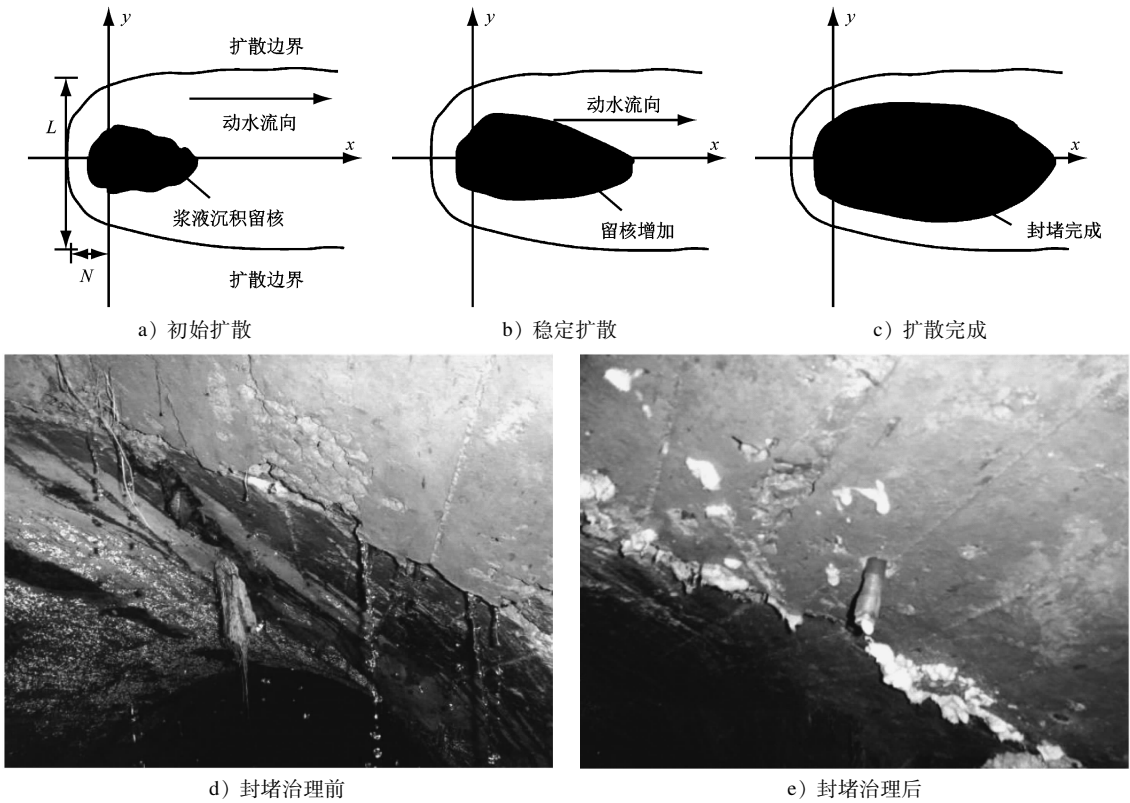


图3 动水注浆规律及封堵治理过程

图3a)、3b)、3c)中坐标原点为注浆孔, N 为逆水扩散距离, L 为稳定扩散开度。动水条件下浆液的扩散规律关系式为:

$$y = \begin{cases} \pm \frac{1}{2} \sqrt{L^2 - (x + N - L)^2}, & -N \leq x \leq L - N \\ \pm \frac{L}{2}, & x > L - N \end{cases} \quad (3)$$

扩散一定时间后浆液开始沉积,黑色区域为浆液沉积留核区。沉积留核区初始范围较小,呈椭圆形或彗星形,随着注浆的持续进行范围不断扩大,并且沿动水水流方向向下扩展,封堵完成后趋于稳定。图3d)和3e)为岩溶涌水封堵治理效果,只要材料和工艺运用恰当便可顺利达到涌堵治理目标。

2 化学注浆材料

化学注浆材料可分为防渗堵漏材料和补强加固材料两类,前者如水玻璃类、丙烯酸盐类、聚氨酯类、木质素类和丙烯酰胺类材料等,后者如环氧树

脂类、甲基丙烯酸酯类材料等。新材料是化学注浆技术发展的重要推动力量,CW环氧树脂、高聚物注浆材料、改性脲醛树脂和乳化沥青等新型注浆材料不断涌现,并受到了广泛关注。

2.1 CW环氧树脂

CW环氧树脂材料是以低黏度环氧树脂为主剂,无毒、高韧性且适宜于水下固化的固化体系及反应性表面活性剂为助剂而组成的新型注浆材料。工程实践表明CW环氧树脂具有黏度低、强度高、渗透性优异和长期稳定性高等诸多优势^[17-18]。其中,双酚A型环氧树脂因具有挥发性低、耐腐蚀性强等优点,近年来常被选作CW环氧树脂的主剂。双酚A型环氧树脂有机高分子结构如图4所示。

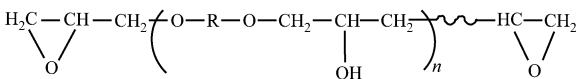


图4 双酚A型环氧树脂分子结构

在我国三峡、溪洛渡等重点水利工程软弱岩层

表3 乳化低热沥青性能

外加剂	外加剂 含量	破乳 时间/s	破乳后 温度/℃	破乳效果 (油包水)
氯化钙	0.05	38	78	流动性好,黏性好
偏铝酸钠	0.05	38	78	流动性好,黏性好,较硬
速凝剂	0.05	35	75	流动性好,较黏稠
水玻璃	0.05	38	74	流动性好,黏性好
快硬水泥	0.60	35	79	流动性好,黏性好,较硬

艺技术和电渗、微生物学等新兴学科嫁接和结合,在工程建设中发挥了更加强大的功效和作用。而电子科学技术的进步则推动了高精度和多功能监测设备的研发,从而促进了化学注浆技术的蓬勃发展和广阔应用^[23-28]。

4 结语

化学注浆技术在微细裂隙抗渗治理、泥化夹层补强、堤防和建筑物加固及隧道岩溶突涌水处治等水电、建筑、交通、采矿等领域均得到了广泛的推广应用,取得了巨大的经济和社会效益。本文阐释分析了化学注浆新理论、新材料和新工艺及新设备在工程中的应用情况,主要包括吸渗理论、压密和劈裂注浆及动水注浆理论的技术优势和工程实践,CW 环氧树脂、高聚物注浆材料和低热沥青等新型化学材料防渗加固原理和性能,锚注、爆破注浆和电渗、生物化学注浆及注浆自动记录仪等注浆新工艺新设备的技术特点和应用领域等,希望能为科研人员和工程技术人员提供有益的启示。

参考文献

[1] YANG Z Q, HOU K P, GUO T T. Research on time-varying behavior of cement grouts of different water-cement ratios [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 75:4398.

[2] 张庆松,张连震,张霄. 基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J]. 岩石力学与工程学报,2015(6):1198.

[3] KITAZUME M, MARUYAMA K. Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment [C]// Swedishdeep Stabilization Research Centre. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing. Stockholm: Swedishdeep Stabilization Research Centre, 2005:245.

[4] 杨志全,侯克鹏,郭婷婷,等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学,2011(9):2697.

[5] BEZUIJEN A. Compensation grouting in sand experiments [D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.

[6] 李术才,张霄,张庆松,等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011

(12): 2377.

[7] 王复明,王建树,石明生,等. 堤坝防护高聚物注浆技术的发展[C]//中国大坝协会. 大坝技术及长效性能国际研讨会. 郑州:中国大坝协会,2011:103.

[8] GUSTAFSON G, CLAESSON J, FRANSSON Å. Steering parameters for rock grouting [J]. Journal of Applied Mathematics,2013(1):1.

[9] BIRDELL D T, RAJARAM H, LACKEY G. Imbibition of hydraulic fracturing fluids into partially saturated shale [J]. Water Resources Research, 2015(8):112.

[10] 王乐凡,翁兴中,张仁义. 硫酸盐渍土的吸渗化学灌浆处理方法[J]. 交通运输工程学报,2015(6):10.

[11] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等. 非饱和原状和重塑 Q3 黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报,2012(6):1020.

[12] 李术才,张伟杰,张庆松. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学,2014(3):744.

[13] 李鹏,张庆松,张霄. 基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学,2014(3):744.

[14] 张连震,张庆松,张霄. 动水条件下渗透注浆扩散机理研究[J]. 现代隧道技术,2017(1):74.

[15] 李术才,韩伟伟,张庆松,等. 地下工程动水注浆速凝浆液黏度时变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013(1):1.

[16] 李术才,张霄,张庆松,等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011(12): 2377.

[17] 汪在芹. 高水头下不良地质体防渗补强技术研究与应用[J]. 长江科学院院报,2018(5):1.

[18] 汪在芹,魏涛,李珍. CW 环氧树脂化学注浆材料的研究及应用[J]. 长江科学院院报,2011(10):167.

[19] 王复明,李嘉,石明生. 堤坝防渗加固新技术研究与应用[J]. 水力发电学报,2016(12):1.

[20] 石明生. 高聚物注浆材料特性与堤坝定向劈裂注浆机理研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.

[21] 季节,刘禄厚,索智. 水性环氧树脂改性乳化沥青混合料性能[J]. 北京工业大学学报,2018,44 (4):568.

[22] 朱盛胜,陈海燕,杨利香. 新型沥青注浆材料开发与应用[J]. 新型建筑材料,2015(5):51.

[23] 李慎举,王连国,陆银龙,等. 破碎围岩锚注加固浆液扩散规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2011(6):121.

[24] ZHAI C, HAO Z Y, LIN B Q. Research on a new composite sealing material of gas drainage borehole and its sealing performance [J]. Procedia Engineering, 2011(3):47.

[25] 王振锋,周英,孙玉宁,等. 新型瓦斯抽采钻孔注浆封孔方法及封堵机理[J]. 煤炭学报,2015(3):101.

[26] 王超,徐力生,徐蒙. 关键参数自适应灌浆测控系统的研制与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013(11):4474.

[27] 黄立维,符平,张金接. 基于 BP 神经网络的差压式浆液密度监测技术[J]. 水利与建筑工程学报,2016(2):6.

[28] 罗熠. 灌浆记录仪发展状况和趋势[J]. 中国水利,2016(21): 60.

(收稿日期:2018-12-07)