

地下工程注浆技术

张民庆 彭 峰 编著



地质出版社

地下工程注浆技术

张民庆 彭 峰 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统全面地介绍地下工程注浆技术，主要包括：注浆法的理论基础，注浆液的配制、注浆施工设备、注浆孔布设及设计参数、注浆常见问题等。此外对注浆施工管理、评价进行了阐述。本书有大量详细工程案例，可供读者参考借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

地下工程注浆技术/张民庆, 彭峰编著. —北京: 地质出版社, 2008. 6

ISBN 978 - 7 - 116 - 05682 - 4

I. 地… II. ①张…②彭… III. 地下工程-灌浆加固
IV. TU753. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 062124 号

责任编辑: 祁向雷 白 峰

责任校对: 郑淑艳

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324519 (办公室); (010) 82324577 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京地质印刷厂

开 本: 787 mm × 1092 mm^{1/16}

印 张: 17.25

字 数: 305 千字

印 数: 1—3200 册

版 次: 2008 年 6 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 05682 - 4

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

随着国民经济的发展，越来越多的地下工程正在修建或筹建。在地下工程施工中，软弱地层和地下水的治理已成为工程安全、顺利施工的关键。采取注浆技术对软弱地层进行加固，对地下水进行封堵是一种经过实践检验的有效措施。本书是在广泛学习前人经验的基础上，系统地对作者近二十年的科研成果和工程实践进行了总结。

全书内容共分十章：第一章介绍了注浆法的概念、注浆法在国内外的发展现状、注浆法的应用范围，以及注浆施工所必须掌握的工程对象特征；第二章对注浆扩散机理和注浆作用机理进行了研究；第三章较详细地介绍了目前地下工程施工中常采用的注浆材料配制方法、配比计算、性能指标，以及各种浆液的优缺点，并对注浆材料的选择原则进行了研究；第四章介绍了目前地下工程注浆施工中常采用的钻孔、注浆和搅拌设备，并对双液注浆时注浆泵的选择，以及钻孔台架和注浆列车提出要求；第五章对注浆孔布设模式、注浆设计参数进行系统介绍，并重点对注浆设计时应注意的五个原则，以及设计程序进行了重点分析；第六章详细地介绍了目前地下工程施工中所采用的三种注浆方式（全孔一次性注浆、后退式分段注浆、前进式分段注浆），并对注浆施工顺序的八个原则，以及注浆参数和注浆结束标准的选取进行了系统研究；第七章对注浆施工过程中常出现的堵管、跑浆、串浆、注浆压力长时间不上升、地表隆起等问题进行了分析，并提出了应对措施；第八章根据作者多年的注浆施工经验，系统地总结了注浆效果评定方法，方法包括分析法、检查孔法、开挖取样法、变位推测法、物探法，共五大类，并提出了地下工程注浆施工检查评定方法和建议标准，以备规范采用；第九章提出了注浆施工组织管理中参建各方的责任，以及现场钻孔注浆施工组织管理、质量保证措施、安全保证措施和技术资料归档；第十章结合日本青函隧道，中国台湾坪林隧道、衡广复线大瑶山隧道和南岭隧道、京九线五指山隧道、渝怀线圆梁山隧道和歌乐山隧道、宜万线齐岳山隧道和别岩槽隧道，以及广州、深圳地下基坑工程和深圳向西路人行地道工程等，以实际工程案例详细地介绍了注浆施工技术中的注浆材料、注浆机械、施工工艺和注浆效果评定技术，为类似工程的注浆施工提供借鉴。

本书内容丰富，实践性强，是一本集地下工程注浆施工经验和研究成果为一体的综合书籍，可供相关工程技术人员与大专院校学生参考使用。

本书内容取自作者近二十年的科研成果和工程实践，对给予指导和参与研究的中铁隧道集团科研所王汝澄原副所长、韩忠存原副所长、万姜林原副所长、洪开荣原副所长，以及卓越副所长、李治国总工程师、丁锐教授级高级工程师、朱常春高级工程师、张文强高级工程师、邹种高级工程师、孙国庆工程师等同事们致谢！同时，对提供现场注浆技术资料的中铁三局宜万铁路项目魏家君总工程师、中铁十二局宜万铁路项目席继红总工程师等表示谢意！

本书在编写过程中参考了大量的相关文献和专业书籍，谨向上述作者深表谢意！

由于作者水平和能力有限，对书中疏漏和不妥之处，敬请读者严加斧正，不吝指教为盼！

联系地址：张民庆，湖北省恩施市东风大道 503 号铁道部宜万铁路建设指挥部（邮编 445000）、河南省洛阳市陵园东路 3 号中铁隧道集团科研所（邮编 471009），电子信箱：zskzmq888@163.com、zskzmq@vip.sina.com，联系电话：13972436278。彭峰，北京市丰台区莲花池东路 118-2 号瑞尔威写字楼 B 座 510 室北京瑞威大地工程技术有限公司（邮编 100055），电子信箱：pengfenonline@163.com，联系电话：13910129625。

作者
2008 年 3 月

目 次

前 言	
第一章 概述	(1)
1.1 注浆法的概念	(1)
1.2 注浆技术发展历史	(1)
1.2.1 注浆技术发展历史	(1)
1.2.2 注浆技术在我国的发展	(3)
1.2.3 国内外注浆研究机构	(4)
1.3 注浆技术的应用	(4)
1.3.1 软岩加固	(4)
1.3.2 注浆堵水	(5)
1.3.3 回填防沉	(6)
1.3.4 控制构筑物沉降	(7)
1.3.5 桥台沉降控制	(8)
1.3.6 隧道洞口滑坍治理	(8)
1.3.7 隧道变形治理	(9)
1.3.8 注浆截水帷幕	(10)
1.3.9 TBM 软岩段注浆加固	(11)
1.3.10 渗漏水治理	(12)
1.4 工程对象特征	(13)
1.4.1 工程地质特征	(13)
1.4.2 水文地质特征	(13)
1.4.3 周边环境特征	(16)
1.4.4 造价和工期要求	(17)
第二章 注浆机理	(18)
2.1 注浆扩散机理	(18)
2.1.1 渗透扩散	(19)
2.1.2 劈裂扩散	(20)
2.1.3 裂隙填充	(21)
2.1.4 挤压填充	(22)
2.2 注浆作用机理	(22)
2.2.1 加固机理	(22)
2.2.2 堵水机理	(23)
第三章 注浆材料	(24)
3.1 注浆材料分类	(24)

3.1.1	按注浆材料成分分类	(24)
3.1.2	按注浆工艺要求分类	(24)
3.1.3	按注浆使用范围分类	(24)
3.2	理想注浆材料的性能要求	(25)
3.3	注浆材料重要性能指标	(25)
3.3.1	渗透性	(25)
3.3.2	凝胶时间	(27)
3.3.3	抗压强度	(27)
3.3.4	黏度	(27)
3.3.5	结石率	(28)
3.4	目前地下工程常用注浆材料	(28)
3.4.1	普通水泥浆	(28)
3.4.2	普通水泥-水玻璃双液浆	(31)
3.4.3	改性水玻璃浆	(39)
3.4.4	超细水泥浆	(40)
3.4.5	超细水泥-水玻璃双液浆	(42)
3.4.6	TGRM 浆	(46)
3.5	注浆材料选择原则	(48)
3.5.1	配比参数选取原则	(48)
3.5.2	注浆材料选择原则	(49)
3.5.3	综合体系动态调整原则	(49)
第四章	注浆机械	(51)
4.1	钻机	(51)
4.1.1	THC500 型超前地质钻机	(51)
4.1.2	MEDIAN 型超前地质钻机	(52)
4.1.3	RPD-150C 型超前地质钻机	(52)
4.1.4	MKD-5S 型超前地质钻机	(52)
4.1.5	ZYG-150 型超前地质钻机	(54)
4.1.6	MGY-60B 型超前地质钻机	(55)
4.1.7	XY-100 型垂直地质钻机	(55)
4.2	注浆泵	(56)
4.2.1	HFV-5D 型双液注浆泵	(56)
4.2.2	PH15 型双液注浆泵	(56)
4.2.3	KBY-50/70 型双液注浆泵	(57)
4.2.4	YZB-130/14 型双液注浆泵	(58)
4.2.5	GZB-YS 型双液注浆泵	(58)
4.2.6	2TGZ-60/210 型双液注浆泵	(58)
4.2.7	ZJB(BP)-30 型单液注浆泵	(58)
4.3	搅拌机	(59)
4.4	混合器	(59)

4.5	高压胶管	(60)
4.6	压力表	(61)
4.7	双液浆注浆时注浆泵的选择	(61)
4.8	钻孔台架与注浆列车	(62)
4.8.1	钻孔台架	(62)
4.8.2	注浆列车	(63)
第五章	注浆设计	(64)
5.1	全断面超前预注浆设计	(64)
5.1.1	注浆孔布设模式	(64)
5.1.2	注浆设计参数	(66)
5.1.3	注浆设计时应注意的几个原则	(71)
5.1.4	注浆设计程序	(74)
5.1.5	工程应用实例	(74)
5.2	径向注浆设计	(77)
5.2.1	径向注浆方案实施的边界条件	(77)
5.2.2	注浆材料	(78)
5.2.3	注浆设计	(79)
5.2.4	注浆施工	(79)
5.2.5	注浆效果检查评定	(80)
5.2.6	工程应用实例	(80)
5.3	基坑帷幕注浆设计	(82)
5.3.1	基坑工程注浆分类	(82)
5.3.2	注浆设计	(83)
5.3.3	注浆材料	(83)
5.3.4	注浆参数	(83)
5.3.5	注浆工艺	(84)
5.3.6	注浆效果检查评定	(84)
5.3.7	工程应用实例	(85)
第六章	注浆工艺	(89)
6.1	注浆方式	(89)
6.1.1	全孔一次性注浆	(89)
6.1.2	后退式分段注浆	(89)
6.1.3	前进式分段注浆	(111)
6.2	注浆顺序	(118)
6.2.1	分区注浆原则	(118)
6.2.2	跳孔注浆原则	(118)
6.2.3	由下游到上游原则	(119)
6.2.4	由下层到上层原则	(119)
6.2.5	由外侧到内侧原则	(119)
6.2.6	约束-发散原则	(119)

6.2.7	定量-定压相结合原则	(120)
6.2.8	多孔少注原则	(120)
6.3	注浆参数	(120)
6.3.1	浆液凝胶时间	(120)
6.3.2	单孔单段注浆量	(121)
6.3.3	注浆分段长度	(121)
6.3.4	注浆终压	(121)
6.3.5	注浆速度	(121)
6.4	注浆结束标准	(122)
6.4.1	单孔或单孔单段注浆结束标准	(122)
6.4.2	全段注浆结束标准	(122)
第七章	注浆施工中常出现的问题及对策	(123)
7.1	堵管	(123)
7.2	跑浆	(123)
7.3	串浆	(124)
7.4	长时间压力不上升	(124)
7.5	地表隆起	(125)
7.5.1	隆起效应叠加理论	(126)
7.5.2	隆起效应分析	(127)
7.5.3	隆起控制措施	(129)
7.6	袖阀管后退式分段注浆常出现的问题及对策	(129)
第八章	注浆效果检查评定	(131)
8.1	注浆效果检查评定方法分类	(131)
8.2	注浆效果检查评定方法及工程应用实例	(132)
8.2.1	分析法	(132)
8.2.2	检查孔法	(137)
8.2.3	开挖取样法	(140)
8.2.4	变位推测法	(143)
8.2.5	物探法	(145)
8.3	注浆效果检查评定方法选择及标准建议	(146)
8.3.1	注浆效果检查评定方法选择	(148)
8.3.2	注浆效果检查评定标准	(148)
第九章	组织管理	(149)
9.1	参建各方职责分工	(149)
9.1.1	建设单位职责	(149)
9.1.2	设计单位职责	(149)
9.1.3	监理单位职责	(149)
9.1.4	施工单位职责	(149)
9.2	现场钻孔注浆施工组织管理	(150)

9.3	质量保证措施	(150)
9.4	安全保证措施	(151)
9.5	技术资料	(152)
9.5.1	现场钻孔注浆记录	(152)
9.5.2	技术资料归档	(152)
9.6	建设管理	(152)
第十章	典型工程案例	(165)
10.1	日本青函隧道注浆堵水技术	(165)
10.1.1	工程概况	(165)
10.1.2	注浆堵水	(165)
10.1.3	结论与体会	(167)
10.2	中国台湾坪林隧道注浆堵水技术	(168)
10.2.1	工程概况	(168)
10.2.2	导坑涌水	(170)
10.2.3	涌水处理	(171)
10.2.4	结论与体会	(173)
10.3	衡广复线大瑶山隧道断层注浆堵水技术	(174)
10.3.1	工程概况	(174)
10.3.2	注浆堵水	(174)
10.3.3	结论与体会	(181)
10.4	衡广复线南岭隧道注浆加固技术	(182)
10.4.1	工程概况	(182)
10.4.2	注浆加固	(182)
10.4.3	结论与体会	(189)
10.5	京九线五指山隧道断层破碎带注浆加固技术	(190)
10.5.1	工程概况	(190)
10.5.2	注浆加固及开挖支护	(190)
10.5.3	结论与体会	(194)
10.6	广州地铁杨箕-体育西路区间饱和含水砂层注浆堵水技术	(194)
10.6.1	工程概况	(194)
10.6.2	注浆堵水及开挖支护	(194)
10.6.3	结论与体会	(198)
10.7	深圳向西路人行地道南竖井淤泥质地层注浆稳定井筒技术	(198)
10.7.1	工程概况	(198)
10.7.2	注浆加固	(199)
10.7.3	结论与体会	(200)
10.8	广州、深圳地铁基坑工程注浆截水帷幕技术	(201)
10.8.1	工程概况	(201)
10.8.2	注浆截水帷幕	(202)
10.8.3	注浆效果检查评定	(205)

10.8.4 结论与体会	(206)
10.9 渝怀线圆梁山隧道淤泥质充填型溶洞注浆加固技术	(209)
10.9.1 工程概况	(209)
10.9.2 注浆加固及开挖支护	(213)
10.9.3 注浆效果检查评定	(216)
10.9.4 结论与体会	(219)
10.10 渝怀线圆梁山隧道粉质粘性土充填型溶洞注浆加固技术	(219)
10.10.1 工程概况	(219)
10.10.2 注浆施工	(219)
10.10.3 注浆效果检查评定	(222)
10.10.4 结论与体会	(225)
10.11 渝怀线圆梁山隧道高压动水粉细砂层充填型溶洞注浆堵水技术	(226)
10.11.1 工程概况	(226)
10.11.2 注浆堵水加固及开挖支护	(227)
10.11.3 注浆效果检查评定	(234)
10.11.4 结论与体会	(237)
10.12 渝怀线歌乐山隧道注浆堵水技术	(237)
10.12.1 工程概况	(237)
10.12.2 隧道突水与地表坍塌	(238)
10.12.3 注浆堵水	(238)
10.12.4 结论与体会	(241)
10.13 宜万线齐岳山隧道注浆堵水技术	(242)
10.13.1 工程概况	(242)
10.13.2 工程地质及水文地质	(242)
10.13.3 岩溶治理	(245)
10.13.4 结论与体会	(251)
10.14 宜万线五爪观隧道暗河堆积体注浆堵水技术	(252)
10.14.1 工程概况	(252)
10.14.2 暗河段施工	(253)
10.14.3 注浆效果检查评定	(256)
10.14.4 结论与体会	(258)
10.15 宜万线别岩槽隧道断层突水注浆堵水技术	(258)
10.15.1 工程概况	(258)
10.15.2 断层突水	(259)
10.15.3 突水治理	(260)
10.15.4 结论与体会	(262)
参考文献	(263)

第一章 概 述

1.1 注浆法的概念

注浆法的概念：注浆是一项工程活动，它是利用配套的机械设备，采取合理的注浆工艺，将适宜的注浆材料注入工程对象，以达到填充、加固、堵水、抬升，以及纠偏等目的。根据注浆法概念，可将注浆法简化为如图 1-1 所示的结构模式图。

由注浆法概念来看，注浆法包括主体和客体两个方面的内容，主体由注浆材料、机械设备、注浆工艺三个核心部分组成，客体为工程对象。

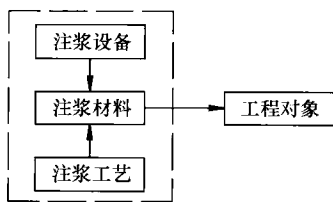


图 1-1 注浆法结构模式图

注浆是一项对技术要求很高的工程活动，对于注浆工程活动而言，决定注浆成败的标志是注浆材料在地层中是否按照注浆专业工程师预设计的轨迹在运行。因此，地下工程注浆的合理与否，应取决于注浆的可行性、可靠性、易操作性、高效性、经济性和环保性六个方面。

(1) 可行性：针对注浆工程对象的工程地质特征，要求所选择的注浆材料具有良好的可注性，注浆方案可行。

(2) 可靠性：针对注浆工程对象的水文地质特征，要求所选择的注浆材料具有良好的可固性，方案选择有工程实例可以借鉴参考。

(3) 易操作性：要求所选择的注浆材料原材料少、配比简单，注浆工艺流程简单，易被现场操作人员所掌握，具有良好的可操作性。

(4) 高效性：要求现场机械设备配套合理，配置数量能满足工期要求。

(5) 经济性：要求所选择的注浆材料、注浆方案和工程对象特征相匹配，较其他方案经济合理。

(6) 环保性：要求所选择的注浆材料无毒、无污染，对环境无害。

注浆技术是一门综合性学科，它涉及工程地质学、水文地质学、土力学、岩石力学、流体力学、化学、材料力学、工程机械学、勘探地球物理学，而且还与液压技术、泵技术、射流技术、电子技术等息息相关。

1.2 注浆技术发展历史

1.2.1 注浆技术发展历史

注浆技术应用于堵水和加固地层至今已有两百多年的历史。

按照国际上将浆液最早用于水利工程计算，注浆法的开拓者当属法国人查理斯·贝里

格尼 (Charles Berigny)。1802 年, 贝里格尼采用注浆技术修复被水流侵蚀了的挡潮闸的砂砾土地基。在修复基础的木板桩后, 通过闸板, 钻间距为 1 m 的孔, 采用一种“压浆泵” (blow pump), 把塑性粘土通过钻孔注入。压浆泵由一个内径为 8 cm 的木制圆筒组成, 筒内装满塑性粘土, 在顶部安装一个木制活塞, 用此设备将粘土强制挤入孔内。重复这一步骤, 直到粘土完全充填基础底板与地基之间的空隙。第一次注浆的初步应用取得了巨大成功, 修复的挡潮闸又投入使用, 这是在基础工程的历史上第一次有记载的注浆技术应用。

1824 年, 英国人阿斯普丁发明了波特兰水泥 (硅酸盐水泥), 之后, 以水泥浆为主要注浆材料的注浆法开始推广。

1845 年, 美国的沃森在一个溢洪道陡槽基础下灌注水泥砂浆。

1864 年, 巴洛利用水泥浆液在隧洞衬砌背后充填注浆, 并用于伦敦、巴黎地铁工程; 同年, 阿里因普瑞贝矿井首次用水泥注浆技术对井筒进行注浆堵水试验。

1876 年, 美国的托马斯、霍克斯莱利用浆液下流方式向腾斯托尔水坝的岩石地基注入硅酸盐水泥浆液。

1885 年, 德国人提琴斯采用向岩层裂隙注入水泥浆的方法来防止涌水取得成功, 并在欧洲矿山建设中广为应用。

1886 年, 英国研制成功了“压缩空气注浆泵”, 从而促进了水泥注浆法的发展。

1887 年, 德国人杰沙尔斯基 (Jeziorsky) 在一个孔中注入浓水玻璃, 在临近孔中注入氯化钙, 从而创造了硅化法, 并成功应用于建桥固砂工程, 开创了化学注浆的先河。

1909 年, 德国和比利时先后获得水玻璃注浆材料和双液单系统注浆法专利。

1914 年, 比利时阿尔伯特·弗兰克伊斯用水玻璃和硫酸铝浆材注浆, 而后德国的汉斯耶德 (Hans Janade) 研制了水玻璃和水泥浆一次压注法。

1920 年, 荷兰采矿工程师尤斯登 (E. J. Joosten) 采用水玻璃、氯化钙双液双系统进行注浆, 在方法理论基础与工艺上, 真正建立起从水泥注浆到化学注浆的桥梁, 形成了“尤斯登灌浆法”, 并于 1926 年取得了专利, 自此, 双液注浆堵水技术开始推广应用。

1924 年, 日本在旧丹那铁路隧道中, 采用水泥-水玻璃混合浆液注入断层破碎带, 取得了良好的效果, 以后在隧道工程中广泛应用。

20 世纪 40 年代, 注浆技术研究和应用的发展进入了一个鼎盛时期, 各种水泥浆材和化学浆材相继问世, 尤其是 60 年代以来, 有机高分子化学材料得到了迅速的发展, 各国大力发展和研制注浆材料和注浆技术。随着注浆材料的飞速发展, 注浆工艺和注浆设备也得到了巨大发展, 注浆技术应用工程规模越来越广, 它涉及几乎所有的岩土和土木工程领域, 例如矿山、铁道、油田、水利水电、隧道、地下工程、岩土边坡稳定、市政工程、建筑工程、桥梁工程、地基处理和地面沉降等各个领域, 但是自从 1974 年日本福冈发生丙烯酰胺注浆引起环境污染造成中毒事故后, 化学注浆材料及其技术的研究和应用曾一度跌入低潮, 日本禁止除水玻璃之外的所有其他化学浆液的应用, 世界各国也禁止使用毒性较大的化学浆材。

20 世纪 80 年代, 由于化学浆材的改性, 化学注浆技术又得到继续发展。目前, 针对水泥浆材和化学浆材的缺点, 世界各国展开了改善现有注浆材料和研制新的注浆材料的工作, 先后研制出一批低毒、无毒、高效能的改进型浆材。

综合上述，注浆技术经过两百多年的发展，由开始的单液注浆发展到多液注入；注浆材料由粘土类浆液发展到高效无毒易注的化学类浆液；设备也由单一的注浆设备发展到勘测、制浆、灌注、记录、检查分析配套专用设备；工艺技术日臻完善，应用领域愈加广泛。

1.2.2 注浆技术在我国的发展

我国注浆技术的发展，从注浆法主要以浆材及其应用为标志而言，远古时期的“女娲炼五色石以补苍天，积芦灰以止淫水”（《淮南子·览冥训》）姑且不论，新石器时代用石灰掺粘土浆来加固地基的史料，也属后人追记难以肯定。但是，4000多年前的采用石灰浆制作的建筑板材，现今在陕西西安半坡博物馆陈列，应该作为注浆的发端；2000多年前万里长城以石灰、砂与粘土等浆液混合成的“三合土”作砌料，长城至今巍然屹立在中华大地上，可谓注浆在中国应用成功的典型！当然，这只是从浆材形式上的类似判断。上述只是浆砌材料，而非注浆材料，所以，在我国注浆技术的真正发展是从1953年开始的。

1953年，在黑龙江佳木斯市采用水玻璃进行注浆堵水。

1959年6月，三峡岩基专题研究组在北京召开的长江三峡工程水泥注浆材料研究会上，提出首份“塑化剂对水泥分散稳定性的影响报告”。

1960年3月~8月，三峡岩基专题研究组又以环氧类可以制成起始黏度低、固化物强度高、对岩石粘结力强的浆材，成为第一批化学注浆文献。

1960年，三峡岩基专题研究组开发研究出甲基丙烯酸甲酯（即甲凝）浆材。

1964年，中国科学院广州化学研究所研究开发出丙烯酰胺（即丙凝）浆材并用于工程，直到日本福冈事件，丙凝被禁止使用。同年，木质素化学浆材，尤其是铬木质素浆材被研究开发并应用。

1968年，广州化学研究所研制出以糠醛-丙酮为稀释剂的环氧树脂化学浆材。

1973年，天津大学等单位研究开发出聚氨酯（即氰凝）化学浆材。

1974年，华东勘测设计研究院科学研究所研制出水溶性聚氨酯（HW）浆材。

1979年，长江科学院、广州化学研究所等研制出弹性聚氨酯浆材，成为我国独创化学浆材之一，并为长江葛洲坝水利枢纽工程的薄层封闭式护坦止水做出重要贡献。

1988年，中铁隧道集团科研所研制出改性水玻璃浆材，较好地解决了北京地铁粉细砂层的注浆难题，从而使浅埋暗挖法在北京地铁大量推广应用。中国水利水电科学研究院研究出SK-E、中国水利水电基础工程局科学研究所研制出JS、广州化学研究所研制出“中华-798”等一批改性环氧浆材。同时期，成功采用水泥-水玻璃双液浆对衡广复线大瑶山隧道F9断层、军都山隧道泥石流段进行堵水固结，从此，地下工程注浆堵水技术得到了大范围推广应用。

1996年，中铁隧道集团科研所针对广州地铁杨箕-体育西路区间隧道动水粉细砂层，研究开发了超细水泥-水玻璃双液浆，并将其成功应用于该工程的注浆堵水、加固中。

1997年，中铁隧道集团科研所针对深圳向西路人行通道工程动水粉细砂层，研究开发出TSS注浆管材专利产品，并将其成功应用，自此，动水粉细砂层注浆技术基本完善。

21世纪初，中铁隧道集团科研所在渝怀铁路圆梁山隧道，成功地应用了普通水泥浆、普通水泥-水玻璃双液浆、超细水泥浆、超细水泥-水玻璃双液浆和TGRM浆（HSC浆）

注浆材料组合体系，攻克了高压（水压力为 3.5 MPa）动水粉细砂层充填型溶洞、淤泥质充填型溶洞注浆堵水加固技术难题，实现了隧道地下工程“以堵为主、限量排放”的设计构思和理念，并形成了多套注浆工法，从而使地下工程注浆技术迈上了一个新的里程碑。自此，我国注浆技术水平已居世界先进水平行列。

1.2.3 国内外注浆研究机构

注浆技术的发展普及世界各地，专业研究机构和施工队伍不断壮大，各种地区性会议交流与合作有力地促进了世界注浆研究工作的发展。

日本研究机构有东京大学、京都大学、成蹊大学、东邦化学工业及其研究所、日本化学工业（株）等，另外，日本还有专业注浆公司几十家，其中日本综合防水株式会社在东南亚和香港等地承包注浆工程享有盛誉。美国从事注浆研究的单位有西北大学、斯坦福大学、氰胺公司等，美国联邦公路署主持两项研究，一是研究注浆现状和工艺，二是评价现有化学注浆材料。英国从 1919 年开始成立注浆研究公司，目前，英国有六个大的注浆工程公司在国内外承包注浆工程。德国从事注浆研究的有柏林大学、卡尔斯路赫大学、慕尼黑大学、纽伦堡地基研究所及埃森矿业研究中心。此外，如前苏联全苏水工科学研究所 A. A. 斯阔琴斯基矿业研究所和法国的索列坦修斯注浆公司都是世界著名的注浆技术研究机构或施工单位。目前，我国从事注浆技术方面研究和工程应用的单位主要有水利电力研究院、煤炭科学研究所、长沙矿山研究院、中国科学院广州化学灌浆工程总公司、铁道科学研究所、清华大学、中国矿业大学、东北大学、同济大学、中南工业大学、中铁西南研究院、中铁隧道集团研究所、北京瑞威大地工程技术有限公司等。

1.3 注浆技术的应用

注浆技术是与软弱地层和地下水作斗争的一门关键技术，其主要作用在于加固和堵水两大功能。在科技技术人员的不断努力下，目前，注浆技术已渗透到地下工程的各个角落，较好地解决了施工中所遇到的难题。注浆工程其应用范围广泛，主要包括：软岩加固、注浆堵水、回填防沉、竖井下沉控制、房屋下沉控制、桥台沉降控制、滑坡防治、变形控制、坍方处理、基坑截水帷幕、TBM 软岩加固支护、渗漏水治理、大坝防渗、瓦斯防溢、古树木保护、混凝土结构裂缝整治、路面整治、工程抢险等。

1.3.1 软岩加固

利用注浆技术对软弱围岩进行加固是注浆技术的最重要功能。

【工程实例】渝怀铁路圆梁山隧道淤泥质充填型溶洞基底注浆加固

圆梁山隧道 DK354 + 255 ~ + 280 段发育充填型溶洞，充填介质为淤泥质粘性土，如图 1-2。底部勘察表明，溶洞向下发育 20 m 未进入基岩，未见溶洞底部。

针对隧道基底淤泥质充填型溶洞，采取钢管桩注浆加固，从而形成致密的、能抵抗一定水压的基底钢管桩加固体结构。

基底钢管桩采取梅花型布置，间距 60 cm × 60 cm，开孔直径 $\phi 108$ mm，终孔直径 $\phi 90$ mm，钢管桩直径 $\phi 75$ mm，钢管桩加固范围为隧道仰拱以下 7 ~ 12 m。



图 1-2 淤泥质充填型溶洞基底注浆前取心照片 图 1-3 淤泥质充填型溶洞基底注浆钢管桩加固照片

根据注浆加固要求和注浆体耐久性抗水压需要，选择强度高、耐久性好的超细水泥单液浆、普通水泥单液浆和 TGRM 浆作为注浆材料，其中以超细水泥单液浆作为主要注浆材料，浆液配比为：水灰比 0.6:1 ~ 0.8:1。当注浆过程中注浆压力长时间不上升时，采用普通水泥单液浆、TGRM 浆，并通过调整浆液配比进行注浆扩散范围的控制。

注浆结束后，对注浆 $P-Q-t$ 曲线进行分析；对浆液填充率进行反算，为 83.3%；测试注浆后地层渗透系数，渗透系数为 4.54×10^{-6} cm/s。基底开挖揭示注浆加固效果良好，如图 1-3。

1.3.2 注浆堵水

在地下工程施工中，当遇到地下水时，往往采取注浆技术进行堵水，以减少施工过程中中流量，满足安全施工要求。

【工程实例 1】渝怀铁路圆梁山隧道高压动水粉细砂层充填型溶洞注浆堵水

圆梁山隧道 PDK354 + 435 ~ + 495 段穿越高压动水粉细砂层充填型溶洞。施工过程中，在右侧边墙下部发生大量涌水、涌砂，最大涌水量 $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ ，随后立即停止开挖，采用混凝土止浆墙封闭。之后进行超前帷幕注浆，注浆材料采用普通水泥单液浆、超细水泥单液浆、普通水泥-水玻璃双液浆、超细水泥-水玻璃双液浆、TGRM 浆和 HSC 浆六种注浆材料共同组成的注浆材料体系。

注浆结束后，分析注浆施工 $P-Q-t$ 曲线；钻检查孔，检查孔放置 1 小时后无流水、流砂；测试注浆后渗透系数，渗透系数为 1.45×10^{-6} cm/s。注浆效果检查后进行开挖施工，施工过程中无涌水、涌砂，施工顺利。注浆堵水前后照片如图 1-4、图 1-5。

【工程实例 2】宜万铁路齐岳山隧道富水溶槽注浆堵水

齐岳山隧道 DK362 + 060 处自左上向右下发育一富水溶槽，溶槽左宽右窄，宽度为 0.7 ~ 0.1 m。溶槽中充满水，经测试，水压力为 0.1 MPa。

针对富水溶槽，采取注浆技术，在隧道开挖线外一定范围制造截水帷幕，从而阻断水流。之后，在隧道开挖轮廓线外设置超前大管棚并注浆，营造超前刚性支护体系。注浆材料采用普通水泥单液浆和普通水泥-水玻璃双液浆。

注浆后，进行钻检查孔法检查，检查孔涌水量小于 $0.2 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$ ；同时，对检查



图 1-4 高压动水粉细砂层充填型溶洞突水照片



图 1-5 高压动水粉细砂层充填型溶洞注浆堵水后开挖照片

孔进行注浆试验，检查孔注浆压力上升很快，一般不超过 10 分钟达到设计终压 4 ~ 5 MPa，达到终压时地层吸浆量小于 5 L/min。注浆效果检查后进行开挖，经开挖观察，富水溶槽被浆液充填饱满，注浆效果较好，满足了安全开挖要求。开挖后又对该段进行了径向注浆加强。注浆堵水前后照片如图 1-6、图 1-7。



图 1-6 富水溶槽探水孔照片



图 1-7 富水溶槽注浆后开挖照片

1.3.3 回填防沉

在地下工程施工中，由于土体开挖，会造成应力释放，继而造成地表沉降。为防止地表过度沉降造成危害，在地下工程开挖完成后，往往需要及时采取注浆技术进行回填注浆。图 1-8 是深圳市向西路人行地道工程回填注浆照片，图 1-9 是广州地铁越秀公园-三元里区间隧道盾构施工回填注浆照片。