化学灌浆技术的发展与展望

葛家良

(广州市建设科学技术委员会办公室，广东 广州 510030)

摘要：从灌浆材料、灌浆方法、灌浆工艺、灌浆设备、灌浆施工监控、灌浆效果检测、灌浆理论及灌浆技术的应用规模等几个方面对化学灌浆技术的发展进行综述。同时，展望未来化学灌浆技术的发展，为化学灌浆技术的研究及其工程应用指出一条捷径。

关键词：土力学；化学灌浆技术；灌浆理论；化学灌浆发展；展望

中图分类号：TU 472.5；TV 543^{+}.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2006)增 2－3384－09

DEVELOPMENT AND PROSPECT OF CHEMICAL GROUTING TECHNIQUES

GE Jialiang

(*Office of Guangzhou Construction Science and Technology Committee*，*Guangzhou*，*Guangdong* 510030，*China*)

Abstract：The development of chemical grouting technique is summarized and analyzed from grouting material，grouting method and its technology，facilities，construction supervision，effective detection，and grouting theories and application scope. Moreover，the development treads of chemical grouting technique is expounded. It can provide references to engineering application of chemical grouting technique.

Key words：soil mechanics；chemical grouting technique；grouting theory；development of chemical grouting；prospect

1 引 言

灌浆技术最早在 1802 年由法国用木制冲击泵注入黏土和石灰浆液加固地层开始的[1~3]。1826 年英国研制发明硅酸盐水泥后，灌浆材料发展以水泥浆液为主。由于水泥浆液存在可注性较差的原因，因而其工艺得以改进。1884 年化学浆液在印度问世，并用于建桥固砂工程。1887～1909 年，德国和比利时先后获得水玻璃灌浆材料和双液单系统灌浆法专利。1920 年乔斯顿发明水玻璃、氯化钙灌浆的“乔斯顿灌浆法”[1~4]。20 世纪 40 年代，灌浆技术的研究和应用进入一个鼎盛时期，各种水泥浆材和化学浆材相继问世，尤其是 60 年代以来，有机高分子化学浆材得到迅速的发展，各国大力发展和研制化学灌浆材料及其灌浆技术。随着灌浆材料的飞速发展，灌浆工艺和灌浆设备也得到巨大发展，灌浆技术应用工程规模越来越广，几乎涉及到所有的岩土和土木工程领域[5]，比如矿山、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、地基处理和地面沉陷等各个领域。但是自从 1974 年日本福冈发生丙烯酰胺灌浆引起环境污染造成中毒事故后，化学灌浆材料及其技术的研究和应用曾一度跌入低潮，日本禁止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[3, 6, 7]。20 世纪 80 年代，由于化学浆材的改性，化学灌浆技术又得到继续发展。

灌浆技术的发展普及世界各地，研究和施工队伍不断壮大。日本研究机构有东京大学、京都大学、

收稿日期：2006－06－30；**修回日期：**2006－07－11

作者简介：葛家良(1963－)，男，博士，1995 年于中国矿业大学采矿工程专业获博士学位，现任研究员，主要从事岩土力学与市政工程技术方面的研究与管理工作。E-mail：gejialiang@sohu.com

成蹊大学、东邦化学工业及其研究所、日本化学工业株式会社等。另外，日本灌浆工程公司达几十家，其中日本综合防水株式会社在东南亚和香港等地承包灌浆工程享有盛誉。美国从事灌浆研究的单位有西北大学、斯坦福大学和氰胺公司等。美国联邦公路署主持两项研究，一是研究灌浆现状和工艺；二是评价现有的化学灌浆材料。从 1919 年英国开始成立灌浆公司以来，其灌浆技术得到很大的发展，目前，英国有 6 个大的灌浆工程公司在国内外承包灌浆工程。德国从事灌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院，A. A. 斯阔琴斯基矿业研究所和法国的索莱坦修灌浆公司都是世界著名的灌浆技术研究机构或施工单位[5, 6]。

我国化学灌浆技术的研究和应用较晚，20 世纪 50 年代初期才开始在煤矿竖井堵水、加固工程中使用灌浆技术比西方国家约晚 30 a，应用于工程建设大致始于 1953 年。作为国家科研攻关课题立项则是 1958 年，第一项攻关课题是三峡工程基岩裂隙化学灌浆研究。化学灌浆技术全国学术交流活动先于学会活动(始于 1968 年)，而全国性化学灌浆学会组织是在 1982 年 12 月才正式宣告成立。我国系统介绍化学灌浆技术的第一部专著出版于 1980 年，仅水利系统开展主要学术活动有 17 次，近年来每 2 a 至少有一次化学灌浆学术活动，并出版 8 部学术交流论文集，开辟化学灌浆网页。

50 a 来，我国在灌浆技术方面的研究和工程应用发展迅速、规模较大。本文主要从灌浆材料、灌浆方法、灌浆工艺、灌浆设备、灌浆施工监控和效果检测、灌浆理论试验研究及灌浆技术的应用规模等几个方面综述化学灌浆技术的发展和展望。

2 灌浆材料

灌浆材料的发展具有悠久的历史，早期人们使用水泥为主要灌浆材料。19 世纪后期，灌浆材料从水泥发展到以水玻璃类浆材为的化学浆材。第二次世界大战后，化学浆材得到飞速发展，尤其是近 50 a 来，有机高分子灌浆材料发展迅速。灌浆材料大体分为两大类(见表 1)[8~11]，一般又分为水泥类浆材和化学类浆材。

表 1 灌浆材料分类[8~11]

Table 1 Classification of grouting materials[8~11]

系别	浆液类别	浆液名称
无机物	单液水泥类	水泥－氯化钙浆液，水泥－三乙醇胺－氯化钙，水泥－膨润土等
	水泥－水玻璃类	水泥－水玻璃双浆液
	黏土类	黏土－膨润土浆液等
	水玻璃类	水玻璃－氯化钙浆液，水玻璃－铝酸钠浆液等
	水泥黏土类	
有机物	丙烯酰胺类	
	木质素类	纸浆废液－重铬酸钠(铬木素)浆液，纸浆废液－过硫酸铵(硫木素)浆液
	脲醛树脂类	脲醛树脂－硫酸浆液，尿素－甲醛－三氯化铁浆液等
	聚氨酯类	水溶性聚氨脂浆液，油液性聚氨脂浆液
	环氧树脂类	
	糠醛树脂类	
	聚乙烯醇类	
	其他	

水泥浆材结石体强度高、造价低廉、材料来源丰富、浆液配制方便、操作简单，但是由于普通水泥颗粒粒径大，这种浆液一般只能注入到直径或宽度大于 0.2 mm 的孔隙或裂隙中。化学浆液可注性好，浆液黏度低，能注入到细微裂隙中，但是一般的化学浆液都具有毒性并价格昂贵，且结石体强度比水泥浆液的结石体强度低等缺点。因此，化学浆液的应用范围受到限制。针对水泥浆材和化学浆材的缺点，世界各国展开改善现有灌浆材料和研制新的灌浆材料工作，推出一批低毒或无毒、高效能的改进型浆材。仅日本市场就出现 30 多种化学浆材，同时水玻璃浆材的品种达 50～60 种。至今，国内外各种灌浆浆材品种已达百余种。我国基本上拥有国外的所有灌浆浆材，同时也自己研制出新的浆材品种，各类浆材的使用范围见表 2 所示。下面主要阐述工程中常用的几种灌浆浆材。

2.1 单液水泥类浆液

这种浆液是一种悬浊液，粒径为 60～100 μm，难以注入较小的孔隙或裂隙中。但是，由于水泥类

表 2　各种浆材使用范围

Table 2　Grouting materials facilities

系别	浆液类别	砾石			砂粒			粉粒	黏粒
		大	中	小	粗	中	细		
无机物	单液水泥类	–	–	–	–				
	水泥黏土类	–	–	–	–	–			
	水泥－水玻璃类	–	–	–	–	–			
	水玻璃类	–	–	–	–	–	–		
	黏土类	–	–	–	–	–			
	超细水泥类	–	–	–	–	–	–		
有机物	丙烯酰胺类	–	–	–	–	–	–	–	
	木质素类	–	–	–	–	–	–		
	脲醛树脂类	–	–	–	–	–	–	–	
	聚氨酯类	–	–	–	–	–	–	–	
	糠醛树脂类	–	–	–	–	–	–	–	
	环氧树脂类	–	–	–	–	–	–	–	

注：“－”表示为可选项。

浆液来源丰富、价格低廉、结石体强度高和抗渗性能好等优势，近年来，研制出各种改进水泥类浆液的可注性、凝胶时间、提高结石体早期强度和稳定性的化学附加剂，水泥浆液的应用范围才得到扩大。目前，水泥类浆液是灌浆工程中应用最多、使用最广的一种灌浆材料[2]。

近几年来，日本和我国先后研制出超细水泥[10, 11]，这种水泥平均粒径为 4 μm，最大粒径为 10 μm，这种特性使超细水泥浆液能渗入到渗透系数为 10^{-4} cm/s 的粉细砂岩中，其可注性与化学浆液相当。超细水泥浆液具有普通水泥浆液和化学浆液的优点，是一种具有广泛应用前景的灌浆材料。

2.2　水泥－水玻璃类浆液

水泥－水玻璃浆液(简称“CS 浆液”)克服单液水泥浆液凝固时间长且不能控制、结石率低等缺点，而又具备单液水泥浆液的基本优点。同时，水泥－水玻璃类浆液具有结石体强度高、抗渗性能好(浆液凝固时间可准确地在几秒至几十分钟范围内可调)、结石率高、材源丰富、价格便宜等优点，而且可注性比单液水泥浆液略高。近 30 a 来，水泥－水玻璃浆液灌浆技术在工程实践中得到不断的改进、完善和提高，使水泥－水玻璃浆液发展成为一种十分重要的灌浆材料[2, 11~13]。

2.3　高水速凝材料

高水速凝材料[12]是选用铝矾土、石灰和石膏为主要原料，配以多种无机原料和附加剂，经磨细、均化等工艺，而配制成甲、乙两种粉料的水硬性胶结材料。该材料是国家“八五”重点科技成果，是一种具有独特性能的新型材料，其主要技术特征如下：

(1) 该材料由甲乙两种固体粉料组成。

(2) 材料具有高含水性，其水和固体粉料体积比高达 6.7∶1.0～9.0∶1.0，质量水固比(即水灰比)为 2.20∶1～2.57∶1。

(3) 材料具有可注性。甲乙两种固体粉料与水搅拌制成的甲乙两种浆液，单独放置可达 24 h 以上不凝固、不结底，流动性好，适应于远距离输送。

(4) 材料具有速凝性。甲乙两种浆液混合后 30 min 内即可凝结成固体。

(5) 材料的强度性能。甲乙两种材料浆液混合后开始凝固，1 h 抗压强度可达 0.5～1.0 MPa，2 h 可达 2 MPa，1 d 可达 4 MPa，7 d 后可达 5 MPa 以上。

(6) 材料本身无毒、无害、无腐蚀。

(7) 材料的酸碱性：甲料的 pH = 9～10，为弱碱性；乙料的 pH = 11～12，为碱性。

(8) 高水材料所形成的结石体早期破坏后还具有重结晶恢复强度的特性。

2.4　丙烯酰胺类浆液(MG－646 或丙凝浆液)

丙烯酰胺类浆液是以有机化合物丙烯酰胺为主剂，配合其他药剂而制成的水溶性浆液，并采用双液浆注入地层中。这种浆液具有黏度低(仅 1.2×10^{-3} Pa·s)、渗透能力好、抗渗性能好、耐久性强、凝胶时间可准确地控制在几秒至几个小时之间等优点，但是它也同时具有毒性、结石体强度低、材源少和价格昂贵等缺点。由于这种浆材的独特特性，往往被用在其他浆材难以注入的细砂岩和细微裂隙岩层的防水防渗工程中。这种浆液一般在不会造成环境污染和危及人体健康的特殊工程中使用[14]。

2.5　水玻璃类浆液

此类浆液系指水玻璃($Na_2O\cdot nSiO_2$)在固化剂作用下，产生凝胶的一种灌浆材料。由于水玻璃来源丰富、价格低、污染小，加上不断研制的各种新型固化剂，从而使水玻璃类浆液成为一种品种繁多、有实用价值和重要发展前途的浆液，是化学浆液中应用最广、用量最大的灌浆材料[6, 7, 14]。

2.6　环氧树脂类浆液

环氧树脂类浆液的凝胶结石体抗压强度和抗拉强度高、黏结力大、收缩性小、能抗酸碱溶液侵蚀

等，但存在浆液黏度大、可注性差、与潮湿裂隙黏结力差等弱点。为改进环氧树脂的缺点，近 20 a 来，国内进行大量试验研究和工程实践，已逐渐形成一套具有低黏度、高亲水性的改性环氧树脂浆材，其浆液黏度可调至$(6\sim20)\times10^{-3}$ Pa·s。中国科学院广州化学研究所研制的中化－798 化学浆材是这类浆材的典型代表，其可注性好，可注入低渗透系数($10^{-6}\sim10^{-8}$ cm/s)的软弱地层中，使固结体的抗压强度达 50～80 MPa。

3 灌浆方法及灌浆工艺

3.1 灌浆方法

目前，化学灌浆方法很多，其分类也没有一个统一准则，根据灌浆目的有加固灌浆和堵水防渗灌浆。常用的是按灌浆工程的地质条件、浆液扩散能力和渗透能力分为下列几类[10, 11]：

(1) 充填灌浆法

具有大裂隙、洞穴的岩土体或地下工程结构体壁后空洞的灌浆，都属于这种类型。

(2) 渗透灌浆法

在不改变地层结构和颗粒排列的原则下，把浆液充填到岩土地层孔隙或裂隙，向地层深处渗透的灌浆方法，都属于这种类型。这种方法常用于砂砾层灌浆。

(3) 压密灌浆法

用较高的压力注入浓度较大的浆液，使浆液在灌浆管端部附近形成浆泡，浆液在灌浆压力作用下挤入地层，浆液多呈脉状或条形状胶结地层。这种灌浆方法在黏性土中使用较多。

(4) 劈裂灌浆法

在低渗透性地层灌浆中，在较高压力作用下，浆液先后克服地层内的初始应力和抗剪抗拉强度，使其在地层内发生水力劈裂作用，从而破坏和扰动地层结构，使地层内产生一系列裂隙、并使原有的孔隙或裂隙进一步扩展，促进浆液的可注性和扩散范围增大。这种灌浆方法一般在渗透系数小、颗粒很小的中、细、粉砂岩土或淤泥中使用。

(5) 电动化学灌浆法

指在施工中预先在需要加固的地层中把两个电极按一定的电极距置于地层中，将有孔的金属管作为灌浆管，接到直流电源的正极，另一电极接到电源的负极，使注入压力和电渗方向一致。在电渗作用下，孔隙或裂隙水由正极流向负极，使通电区域中地层含水量降低，形成渗浆通道，从而使浆液随之流入地层中。

由于建设工程的需求，近年来，灌浆方法发展很快，种类繁多[15~23]，除上述介绍的几种典型灌浆法外，灌浆法从脉状灌浆、渗透灌浆发展到应用多种材料的复合灌浆法或综合灌浆法；从钻杆灌浆、过滤管灌浆发展到双层过滤管灌浆和多种形式的双层管瞬凝灌浆法；从无向压灌浆发展到通电、抽水、压气和旋喷、摆喷或定向高压喷射等多种诱导灌浆法；通过预处理及孔内爆破等方法，可大大地提高浆液的可注性，扩大灌浆的应用范围。随着灌浆技术在工程应用中的深入，灌浆方法的研究越来越显得重要。

3.2 灌浆工艺

化学灌浆工艺[1~4, 11, 13, 24~27]根据采用灌浆方法的不同而有所不同，每种灌浆方法决定着其所采用的灌浆工艺。灌浆工艺复杂多变，但是在任何一种灌浆方法的灌浆工艺中，灌浆参数是影响灌浆效果的最重要因素之一，且灌浆参数的确定比较困难，一直是灌浆技术和灌浆效果研究的一个主要方向。

(1) 灌浆压力

灌浆压力是浆液在地层中扩散的动力，它直接影响灌浆加固或防渗效果，但是受地层条件、灌浆方法和灌浆材料等因素的影响和制约。国内外对灌浆压力大小的确定持两种截然相反的观点：一是尽可能提高灌浆压力；二是灌浆压力应尽量小。这两种观点都很片面，确定灌浆压力大小应视具体工程而定。一般来说，化学灌浆比水泥灌浆时的压力要小得多；浅部灌浆比深部地层灌浆压力要小；渗透系数大比渗透系数小的地层灌浆压力要小。在煤矿地面立井预灌浆中，灌浆终压一般为静水压力的 2.0～2.5 倍。地层深度每增加 10 m，灌浆压力增加 0.02 MPa 左右。在水坝灌浆工程中，灌浆压力一般为 1～3 MPa。许多地层表面浅部灌浆压力只有 0.2～0.3 MPa。地下隧道或巷道围岩灌浆压力最大超过 6 MPa，最小只有 1 MPa。

(2) 扩散半径或有效扩散距离

浆液扩散半径或有效扩散距离决定灌浆工程量和工程进度，它随着地层渗透系数、裂隙开度、灌浆压力、注入时间的增加而增大，随着浆液浓度和黏度的增加而减小。扩散半径或有效扩散距离可用一些理论公式，结合类似工程经验进行估算，但是由于涉及因素太多，所以一般通过工程试验确定。

(3) 凝固时间

浆液凝固时间是浆液本身的特性，有时因为工程的不同需要，在浆液中加入适量的速凝剂、早强剂、塑化剂、分散剂、缓凝剂及膨胀剂等附加剂来调节凝固时间或改善浆液其他性能。工程要求浆液凝固时间可从几秒至几小时范围内随意调节，并能准确地控制，浆液一旦发生凝固就在瞬间完成，凝固前浆液黏度变化不大。几种典型浆液的凝固时间为：单液水泥浆 1 min～18 h 22 min；水泥－水玻璃双液浆为几秒至几十分钟；丙烯酰胺类浆液为几秒至几十分钟。

4　灌浆设备

灌浆设备[8, 13, 24]主要包括灌浆泵、钻机或钻孔机械、混合器、搅拌机、止浆塞和配套仪表等。

4.1　钻孔机械

钻孔机械主要是指钻机，国内外已生产出大、中、小型各类优质钻机几十种。

4.2　灌浆泵

随着灌浆技术的不断发展，各种专用灌浆泵和代用灌浆泵也得到发展。国外灌浆泵已发展到体积小、重量轻、压力高，在灌浆过程中，流量和压力可无级调节，可保持或不会超过所需要的灌浆压力，灌浆量能自动控制、自动记录和远距离操纵的水平，例如日本的 HC－1 型定压自动变量液压灌浆泵。

近年来，我国发展各式各样的灌浆泵，常用灌浆泵有液压灌浆泵、调速灌浆泵、隔膜计量泵和柱塞泵等其他各类灌浆泵。

4.3　搅拌机(组)

目前，灌浆所用的搅拌机(组)主要有立式水泥搅拌机(组)、风动水泥搅拌机(组)、旋流式造浆机(组)、水力喷射式水泥搅拌机(组)和高速搅拌机(组)。

4.4　混合器

混合器是双液灌浆法中使两种浆液混合的器具，对混合器的技术要求主要有对双液混合均匀，保证双液浆管路不窜浆和过流断面能承受最大灌浆压力。刷型混合器和压射型混合器是最理想的两种混合器。

4.5　止浆塞

止浆塞是对灌浆孔实施分段灌浆，合理使用灌浆压力和有效控制浆液分布范围，保证灌浆质量的重要设备。止浆塞安装在钻孔中以防止浆液沿钻孔跑漏，目前已发展有气体式、水力式、机械式、膨胀式和卡瓦式等各种类型。

5　灌浆施工监控与灌浆效果检测

5.1　灌浆施工过程中的监控

化学灌浆施工属于隐蔽性工程作业，早期的灌浆施工过程没有做更多的监控工作。随着现代技术的发展，人们把电算技术和 CT 技术应用到灌浆监控中。在一些比较发达的国家，已较为普遍地在灌浆施工中设置电子计算机监控系统，用来记录、收集和处理灌浆过程中诸如灌浆压力、流量、浆液黏度等重要数据，以便人们能更好地控制灌浆工序和了解灌浆过程中各种灌浆规律[8, 13~16, 28]。日本、英国和法国等灌浆施工监控已达到半自动化和自动化的程度，例如，法国索莱坦修公司灌浆时，在中心控制室自动记录，集中管理一组灌浆泵的流量和压力，同时进行多孔灌浆。灌浆监控系统中有一种高频记录仪，利用电磁流量计和微机处理数据的功能，在灌浆现场之外能自动记录灌浆过程中的各种重要数据，并及时以绘制图形和打印记录方式从微机终端输出。高频记录仪中的图形记录器能及时记录和显示灌浆过程中的各种情况，如灌浆突然注进到较大的空洞或裂隙、灌浆时间、灌浆孔号、浆液流量及其压力等资料。

我国灌浆施工过程中的监控比较落后，一般只能从灌浆设备中获取部分灌浆参数，而无法按照灌浆过程中参数变化情况来调节灌浆工艺过程，这方面还有待于进一步研究和发展。

5.2　灌浆效果的检测

化学灌浆效果的好坏直接关系到灌浆工程的成功与否。随着灌浆技术的发展，灌浆效果在灌浆工程的各个领域中也得到不同程度的发展。国内外灌浆效果的检测技术如表 3 所示[5, 8]。

现有的各种灌浆效果检测技术方法还不够成熟。目前灌浆效果检测手段仍然是灌浆施工技术中的一个薄弱环节，对灌浆效果没有一个明确的判别标准，许多灌浆工程仅凭经验定性地判别灌浆效果。对于地下隧道或巷道、硐室等工程实施灌浆加固，利用声波测试、取芯力学试验和钻孔深部位移观测法为最有效的检测方法；对于土层灌浆加固，可利用开挖、标准贯入试验、静力触探法、压板载荷试验、电探法、声波法等进行检测；对于防渗灌浆，可采用压水或抽水试验进行灌浆效果检测。

表 3 灌浆效果检测技术方法[5, 8]

Table 3 Detection techniques and methods for effective grouting[5, 8]

试验地点	检测及目的	检测方法
现场	灌浆范围	γ射线及放射线法、中子水分仪监测法、取样试验法、示踪染色追踪法电探及声波探测法
	灌浆堵水、防渗	示踪染色追踪法、透水(透气)试验法、钻孔压水(气)、抽水试验法和取样抗渗试验法
	灌浆加固	钻孔内荷载试验法、取样物理力学性能测定法、钻孔深部位移测 定法声波探测法、标准贯入试验、电探法、静力触探法及压板载荷法
实验室	灌浆堵水、防渗	动水灌浆试验法
	灌浆加固	固砂试验法和灌浆参数模拟试验法

6 灌浆技术的理论研究

随着化学灌浆事业的蓬勃发展，灌浆理论研究水平获得一定的提高。然而，由于复杂的地层条件和施工工程的隐蔽性，灌浆介质和灌浆工艺难以模拟，因此，理论研究较为困难。到目前为，国内外在灌浆理论方面的研究现状主要有下列几个方面[7~11, 13, 29~31]。

6.1 灌浆材料的流变学特性

浆液在孔隙或裂隙中的流变性可用层流条件下的流变参数来表达。由于浆液类型不同，浆液的流变性也不同，一般将浆液分为牛顿体和非牛顿体，前者表示浆液内剪切率与剪应力成正比关系，如流动性好的化学浆液就属于牛顿体；后者表明浆液流动时剪切率与剪应力不成正比关系，如流动性较差的水泥悬浊液属于这种非牛顿体。

根据浆液的本身性能和外界条件，研究出浆液在地层中流动的规律，但是这些研究因受条件限制，适用性均不理想。

6.2 渗透灌浆理论

近几十年来，国内外学者对渗透灌浆法进行理论试验研究，发展一些渗透灌浆理论，其中有马格理论(球形扩散理论)、柱形扩散理论、卡罗尔理论、袖套管法理论和拉夫莱理论。马格理论是以钻杆或灌浆管端部点灌浆为基础建立起来的，该理论给出牛顿体灌浆压力、灌浆时间、扩散半径和灌浆量等重要理论公式，但是马格理论假设被灌浆体为均质各向同性体，浆液在地层中呈球形扩散。因此，此理论既有普遍的适用性，又有很大的局限性。柱形扩散理论是以灌浆管体的一部分为灌浆过滤段作为研究出发点，该理论与马格理论一样推导出灌浆时间、扩散半径和灌浆量理论公式，其假设与马格理论类似，但这些假设与实际往往相悖，从而导致该理论的应用受到限制。卡罗尔理论、袖套管法理论和拉夫莱理论应用很少，在此不作评述。

我国对渗透灌浆也进行理论试验研究，但研究结果没有系统性，主要集中于对灌浆机制的研究。

6.3 劈裂灌浆理论

我国在劈裂灌浆理论方面的研究工作较多，研究成果显著。对于基岩、砂岩和黏性土层劈裂灌浆时发生劈裂条件作充分研究。国内首次系统地报道关于地基劈裂灌浆的研究是在 1981 年，即有关乌江渡水电站填泥溶洞劈裂灌浆机制的研究。近 20 a 来，我国劈裂灌浆理论研究水平得到提高。一般认为，劈裂灌浆的浆液在灌浆压力作用下先后克服地层的切应力和抗拉强度，使其垂直于小主应力的平面上发生劈裂，浆液便沿此劈裂面渗入和挤密地层体，并在其中产生化学加固作用和形成作为骨架的浆脉，在均质软弱地层中，劈裂灌浆将首先主要产生竖向(径向)裂隙；在层状软岩中则首先主要产生水平裂隙。

灌浆工程中应用最多的是渗透灌浆法和劈裂灌浆法，其相应的理论研究是非常重要的。大多数灌浆工程报道或论文中，只介绍灌浆工程施工工艺过程及灌浆效果，很少进行灌浆理论分析研究。国内外对灌浆理论的研究水平远远落后于灌浆工程和灌浆技术发展的要求。

7 灌浆技术研究及其应用范围

灌浆技术的应用范围很广，且其应用范围还在不断扩大，只要涉及到岩土工程和土木工程的各个领域，都可使用灌浆技术。主要的应用范围有以下一些方面[5, 8, 11]：

(1) 矿井、油井开凿中由于井巷、硐室的止水和加固。

(2) 大坝、堤防的防渗和基础加固。

(3) 地下建筑(构)物、基坑的防水和加固。

(4) 隧道开挖中进行止水和加固软弱带。

(5) 地面建筑(构)物地基加固和阻止沉降、纠偏。

(6) 桥基加固和防冲刷。

(7) 边坡加固提高边坡稳定性。

(8) 核电站、水电站基础加固与防渗。

(9) 混凝土和钢筋混凝土补强。

我国灌浆技术在各行各业也得到大规模的发展。最有权威性的研究单位有水利电力科学研究院、煤炭科学研究院、长沙矿山研究院、中国科学院广州化学灌浆工程总公司、铁道科学研究院、清华大学、东北大学、中国矿业大学、同济大学和中南工业大学等。矿山行业、水利水电行业和建筑行业中，灌浆技术发展最快，应用规模宏大。

7.1 矿山井巷工程

矿山立井开凿工程中，井筒通过复杂的流砂层、含水层，往往发生淹井事故，为防止这些复杂地层对矿山开采的威胁，采取最有效的手段就是进行灌浆堵水和防水。矿山灌浆技术一般用于地面预灌浆开凿井筒和井壁壁后灌浆堵水工程。仅 20 世纪 60 年代后期，英国 80%以上的煤矿井筒采用灌浆技术。我国各个矿区基本上均采用过灌浆技术进行井筒防水堵水。实践表明，灌浆加固巷道围岩对巷道维护和降低巷道成本都具有重要意义，例如，安徽淮南谢桥煤矿东风井回风大巷在掘进后 1 a 之内进行 2 次翻修后，巷道维护仍然十分困难，巷道最终失稳破坏，但再次翻修时，采用钢筋混凝土和壁后围岩灌浆加固，其效果显著，几年来，巷道维护状况良好，满足安全生产的要求。

7.2 隧道及地铁工程

隧道及地铁工程开挖常常会遇到软弱带和含水带，导致工程施工难以进行。灌浆技术应用到这种困难工程，效果显著。隧道及地铁工程均采用灌浆技术进行加固和防水，例如，英国的 Victoria 地铁、Dortford 隧道、Clyde 隧道、Tyne 隧道；法国阿尔卑斯山脉的 Pralonan 隧道、Roseland 隧道；美国的 Pittsburg 隧道、Washington，D. C. 地铁；意大利的 Polinonord 隧道；芬兰首都赫尔辛基地铁；德国慕尼黑地铁；中国香港地铁；南斯拉夫首都贝尔格莱德地铁；匈牙利首都布达佩斯地铁和日本的青涵隧道等均使用灌浆技术进行施工。

我国应用灌浆技术施工的隧道较多，如梅花山隧道、昆线铁路隧道、秦岭隧道、梅福线铁路隧道、宝成线隧道、沙木拉打隧道、大瑶山隧道、南岭隧道、花果山隧道、军都山隧道等。北京地铁复兴门折返线采用水泥－水玻璃浆液劈裂灌浆固结砂土层，同时用丙烯酸盐砂浆对约长 1 100 m 的 60 余条裂隙成功地进行灌浆堵水，效果良好。北京地铁复八线修建时，洞顶粉砂层的灌浆加固，首次采用改性的酸性水玻璃单液灌浆获得成功。正在兴建的广州地铁、深圳地铁等均采用灌浆技术进行防水加固处理。

7.3 大坝及堤防工程

用于大坝及堤防工程的灌浆技术主要是防渗和加固基础。国外典型实例有埃及尼罗河的阿斯旺水坝灌浆帷幕工程、巴基斯坦的 Mangla 水坝、瑞士的 Mattmark 水坝、塞浦路斯的 Yermasoyia 水坝、美国的 Rocky Beac 水坝、德国的 Frallenau 水坝和日本的鹤田大坝等。

我国拥有大、中、小型水库八万余座，江河湖海堤防近 20×10^4 km，另外还有多座水电站，这些水利水电工程的堤坝地基存在着不同的渗漏问题和地基承载能力不足问题。为解决这些问题，除去隐患，应用灌浆技术是一项行之有效、经济合理的治理措施。我国应用灌浆技术成功地对大坝、堤防进行防渗补强、加固处理的实例很多，例如，葛洲坝二期工程、龙羊峡大坝岩基、青铜峡水电站、落坡岭坝基、凤滩坝基、克孜尔水库坝基、红枫水库堆石坝、乌拉泊水库坝基等工程都进行防渗漏堵水灌浆处理；长江三峡水电枢纽工程大坝、龙塘水轮泵站大坝、新安江水电站及二滩拱坝坝基弱风化岩灌浆加固坝基工程等。

7.4 建筑物地基处理

灌浆技术应用于建筑地基处理主要表现在纠正建筑物的不均匀沉降、提高地基承载能力、加固既有建筑物基础等方面。

8 我国化学灌浆技术的发展与展望

50 多年来，我国化学灌浆成绩斐然。近期应在前 50 a 的基础上拓展市场，更具活力的继续向前发展，而无公害、多样化、耐久性好且价低廉的浆材开发、应用和推广。同时，新型化学灌浆设备、新型仪器的研发及产品质量的持续改进和提高、化学灌浆规范的制订、化学灌浆理论的创新、化学灌浆环保意识的提升及化学灌浆产业的现代化等应是近期努力的方向[5]。

8.1 加强研制灌浆新材料，改进现有的灌浆材料

针对水泥浆材可注性差、稳定性差和化学浆材具有毒性、刺激性和价格昂贵的缺点，世界各国把研制新的灌浆材料和改进现有的灌浆材料作为现在和将来研究灌浆技术的首要课题。浆材研制要做到

下列 4 点：

(1) 无公害。将现用浆材中已宣布禁用或限用的化合物停用，寻找替代物。积极研发无毒催化剂、无溶剂型浆材、水为介质的浆材。

(2) 多样化。研发适应工程各种苛刻要求的浆材，如高渗透性浆材、固化物适应较大变形的弹性浆材和在水下黏接力强且能快速固化的浆材等。

(3) 耐久性。这里不仅指耐水，而是广义的耐久性，可通过共聚合或互穿网络提高树脂性能，也可加入钠米材料等对已有浆材改性来实现。

(4) 价低廉。重视水玻璃浆材的提高性能研究。

8.2 发展多种灌浆工艺交替作业的灌浆施工技术

对于复杂多变的灌浆地层，应采用合理的灌浆工艺进行施工，随着地层条件的变化，灌浆工艺和灌浆材料也要相应进行调整。在同一灌浆施工过程中，随时调节灌浆参数和方法以便适应不同条件下地层灌浆的需要。

8.3 实现灌浆设备轻小型化、机组化、系统化和自动化

在化学灌浆设备现代化方面，灌浆设备的发展方向是实现灌浆设备轻小型化、机组化、系统化、专用化和自动化。集钻孔、灌浆、监测等设备为一体，生产轻小型灌浆机组设备，发展专用灌浆机组，在灌浆机组中配置自动化控制、监测系统，实现一整套自动灌浆系统，集中控制，自动记录，多台泵大规模灌浆施工。密闭式传输浆设备的完善及现有产品质量的持续改进和提高应是努力的方向。

8.4 加强和发展灌浆施工过程中的监控和灌浆效果的检测工作

如何对化学灌浆效果的评价是关系到灌浆技术及其应用推广的关键之一，目前，灌浆施工的监控及其效果检测是一个薄弱环节，必须加强这一方面的研究和应用力度。

8.5 加强和发展灌浆试验研究和理论研究

当前，国内外实验室灌浆试验研究和理论研究都是一个非常薄弱的环节。灌浆施工缺乏正确的理论指导，许多工程都是凭经验进行的。由于灌浆对象的隐蔽性和特殊性，灌浆工艺模拟的复杂，实验室模拟灌浆试验比较困难，灌浆理论研究进展维步艰难，但是为适应灌浆技术的发展，必须加强和发展实验室试验研究和理论研究，促进灌浆技术在各个领域中的广泛应用。

8.6 规范制订

要适应隐蔽性工程要求，跟上建设市场应用化灌技术发展的需要，调动各个方面的积极性进行首批化学灌浆的规程、规范和标准的制订，并争取尽早公布实行。

8.7 环境保护

研究与应用化灌浆材的人员一定要进一步提高环保意识和道德意识，严于自律。能用水泥浆材解决问题的绝不用化灌浆材；在满足设计基本要求的前提下，选用浆材应首选无环境污染的水玻璃浆材；选用无公害浆材须注意不要任意扩大应用范围及用量；对含有毒化合物的化灌浆材一定避免使用。

8.8 化学灌浆产业的现代化

改造、提升一批现有初级企业为专业化的公司做起，逐步改革、发展、壮大。 公司宜选民营化体制，为投资主体、产权明晰，实行股份制和股权多元化。化学灌浆技术颇具特色，随着国家基本建设的发展，市场前景良好。今后应设法克服影响其发展的障碍和问题，向产业的现代化方向努力。

参考文献(References)：

[1] Littlejohn G. S. 化学注浆技术(1，2)(周彦青译)[J]. 隧道译丛，1985，(5)：1－17.(Littlejohn G S. Chemical grouting technique(1，2)(translated by Zhou Yanqing)[J]. Journal of Tunnel Translations，1985，(5)：1－17.(in Chinese))

[2] 煤炭科学研究院. 煤矿灌浆技术[M]. 北京：煤炭工业出版社，1978.(Beijing Coal Science and Research Institute. Grouting Techniques in Coal Mining[M]. Beijing：China Coal Industry Publishing House，1978.(in Chinese))

[3] 电力工业部华东勘测设计院科学研究所. 化学灌浆技术[M]. 北京：水利出版社，1980.(Science and Research Institute，East China Investigation and Design Institute，Ministry of Power Industry. Chemical Grouting Technique[M]. Beijing：China Water Conservancy Press，1980.(in Chinese))

[4] Karol R H. 化学注浆工艺(邹贻洪译)[J]. 隧道译丛，1988，(3)：1－17.(Karol R H. Chemical grouting processes(translated by Zou Yihong)[J]. Journal of Tunnel Translations，1988，(3)：1－17.(in Chinese))

[5] 葛家良. 软岩巷道灌浆加固机制及灌浆技术若干问题的研究[博士学位论文][D]. 北京：中国矿业大学，1995.(Ge Jialiang. Grouting reinforcement mechanics in roadway of soft rock and several issues in grouting techniques[Ph. D. Thesis][D]. Beijing：China University of Mining and Technology，1995.(in Chinese))

[6] 杜嘉鸿，泰明武，肖荣久. 国外化学灌浆教程[M]. 北京：水利电力出版社，1987.(Du Jiahong，Tai Mingwu，Xiao Rongjiu. A Foreign Course of Chemical Grouting[M]. Beijing：Water Resources and Electric Power Press，1987.(in Chinese))

[7] 刘嘉材. 化学注浆[M]. 北京：中国水利水电出版社，1987.(Liu Jiacai. Chemical Grouting[M]. Beijing：China Water Power Press，

1987.(in Chinese))

[8] 杜嘉鸿，张崇瑞，何修仁. 地下建筑灌浆工程简明手册[M]. 北京：科学出版社，1998.(Du Jiahong，Zhang Chongrui，He Xiuren. Brief Handbook of Grouting Engineering in Underground Construction[M]. Beijing：Science Press，1998.(in Chinese))

[9] 曾荣秀. 灌浆技术经验汇编[M]. 北京：煤炭工业出版社，1988.(Zeng Rongxiu. Proceedings of Grouting Experience[M]. Beijing：China Coal Industry Publishing House，1988.(in Chinese))

[10] 叶书麟. 地基处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1988.(Ye Shulin. Ground Treatment[M]. Beijing：China Architecture and Building Press，1988.(in Chinese))

[11] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.(Compilation Committee of Handbook for Ground Treatment. Handbook for Ground Treatment[M]. Beijing：China Architecture and Building Press，2000.(in Chinese))

[12] 孙恒虎，宋存义. 高水速凝材料及其应用[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1994.(Sun Henghu，Song Cunyi. High-water Solidifying Material and Its Application[M]. Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，1994.(in Chinese))

[13] 彭振斌. 注浆工程设计计算与施工[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1997.(Peng Zhenbin. Design Calculation and Construction for Grouting Engineering[M]. Wuhan：China University of Geosciences Press，1997.(in Chinese))

[14] 坪井直夫. 化学灌浆法的实际应用[M]. 吴永宽译. 北京:煤炭工业出版社,1980.(Keisuke T. Application of Chemical Grouting Method[M]. Translated by Wu Yongkuan. Beijing：China Coal Industry Publishing House，1980.(in Chinese))

[15] 吴理云. 灌浆理论基础[M]. 沈阳：东北工学院出版社，1981.(Wu Liyun. Theory Fundamental for Grouting[M]. Shenyang：Northeast University of Technology Press，1981.(in Chinese))

[16] Nonveiller E. Grouting Theory and Practice[M]. Amsterdam：Elsevier Science Publisher，1989.

[17] 葛家良，陆士良. 巷道锚注加固技术及其效果的研究[J]. 化工矿山技术，1997，26(2)：13－16.(Ge Jialiang，Lu Shiliang. Anchored and grouted technology in tunnel its effect[J]. Industrial Mining Technology，1997，26(2)：13－16.(in Chinese))

[18] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 北京：中国水利电力出版社，1992.(Zhang Jingxiu. Technology of Seepage-proofing and Grouting Dam Foundation[M]. Beijing：China Water Power Press，1992.(in Chinese))

[19] 程良奎，张作琯. 岩土加固实用技术[M]. 北京：地震出版社，1994.(Cheng Liangkui，Zhang Zuomei. Practical Technique of Geotechnical Engineering Reinforcement[M]. Beijing：Earthquake Press，1994.(in Chinese))

[20] 何修仁. 注浆加固与堵水[M]. 沈阳：东北工学院出版社，1990.(He Xiuren. Consolidation and Seepage-proofing Grouting[M]. Shenyang：Northeast University of Technology Press，1990.(in Chinese))

[21] 农维勒 E. 灌浆的理论与实路[M]. 顾柏林译. 沈阳:东北工学院出版社，1991.(Nonveiller E. Grouting Theory and Practice[M]. Translated by Gu Bolin. Shenyang：Northeast University of Technology Press，1991.(in Chinese))

[22] 陈愈炯. 压密和劈裂灌浆加固地基的原理和方法[J]. 岩土工程学报，1994，16(2)：22－28.(Chen Yujiong. Provincials and methods of compaction and fracturing grouting for foundation soil improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1994，16(2)：22－28.(in Chinese))

[23] 刘 旺. 井巷掘进中松软破碎岩层的注浆加固[R]. 长沙：长沙矿山研究院，1982.(Liu Wang. Grouting reinforcement of broken and fracture stratum in mine workings driving[R]. Changsha：Changsha Institute of Mining Research，1982.(in Chinese))

[24] 中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京：中国电力出版社，1999.(Anchoring and Grouting Committee，Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Handbook for Anchoring and Grouting[M]. Beijing：China Electric Power Press，1999.(in Chinese))

[25] Zhu W S，Zhang Y J. Effect of supporting surrounding rocks by bolts and its application to high slope of three gorges flight lock[A]. In：Proceedings of the International Symposium on Anchoring and Grouting Techniques[C]. Hong Kong：Econarc Communication(Group) Ltd.，1994. 188－197.

[26] Du J H. Foundation consolidation technique with single direction swing—jet grouting[A]. In：Proceeding of the 4th PRIC on Water Jet Technology[C]. Shimizu，Japan：[s. n.]，1995. 321－332.

[27] Du T N，Li G X，Du J H. The design and construction of the grout jet to seal an underground reservoir[A]. In：Proceedings of the 5th International Mine Water Congress[C]. Nottingham，UK：[s. n.]，1994. 379－384.

[28] 长江科学院. GJY－II 灌浆自动记录仪使用说明书[R]. 武汉：长江科学院，1994.(Yangtze River Scientific Research Institute. Operating instruction manual of GJY－II grouting automatic recording instrument[R]. Wuhan：Yangtze River Scientific Research Institute，1994.(in Chinese))

[29] Ge J L，Kuang J Z. A new technique for grouting experiments[A]. In：Anchoring and Grouting. Proceedings of International Conference on Anchoring and Grouting towards the New Century[C]. Guangzhou：Sun Yat-sen University Press，1999. 467－477.

[30] Ge J L，Kuang J Z. New technology for tunnel and roadway anchor-grouting and reinforcement effect[A]. In：Anchoring and Grouting. Proceedings of International Conference on Anchoring and Grouting towards the New Century[C]. Guangzhou：Sun Yat-sen University Press，1999. 478－488.

[31] 葛家良，江 涛. 巷道围岩劈裂注浆作用机制[J]. 矿山压力与顶板管理，1997，(增 1)：161－163.(Ge Jialiang，Jiang Tao. Study on dynamic parameters of probability integral method for prediction of mining caused subsidence[J]. Ground Pressure and Strata Control，1997，(Supp.1)：161－163.(in Chinese))