

云南水利工程 灌浆试验研究与实践

YUNNAN SHUILI GONGCHENG
GUANJIANG SHIYAN YANJIU YU SHIJIAN

李锡均 陶忠平 著



云南出版集团公司
云南科技出版社

云南水利工程 灌浆试验研究与实践

YUNNAN SHUILI GONGCHENG
GUANJIANG SHIYAN YANJIU YU SHIJIAN

责任编辑：袁 莎
杨志能
封面设计：余 勋
责任印制：翟 苑
责任校对：叶水金

www.ynkjph.com

ISBN 978-7-5416-3219-8



9 787541 632198 >

ISBN 978-7-5416-3219-8/TV · 9

定价：98.00元

云南水利工程 灌浆试验研究与实践

YUNNAN SHUILI GONGCHENG
GUANJIANG SHIYAN YANJIU YU SHIJIAN

李锡均 陶忠平 著

云南出版集团公司
云南科技出版社

· 昆明 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

云南水利工程灌浆试验研究与实践/李锡均, 陶忠平
著. —昆明: 云南科技出版社, 2009. 3
ISBN 978 - 7 - 5416 - 3219 - 8

I. 云… II. ①李…②陶… III. 水利工程—灌浆—水工
试验—研究—云南省 IV. TV543

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 038372 号

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码:650034)

昆明市五华区教育委员会印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:889mm×1194mm 1/16 印张:24 字数:600 千字

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~500 册 定价: 98.00 元

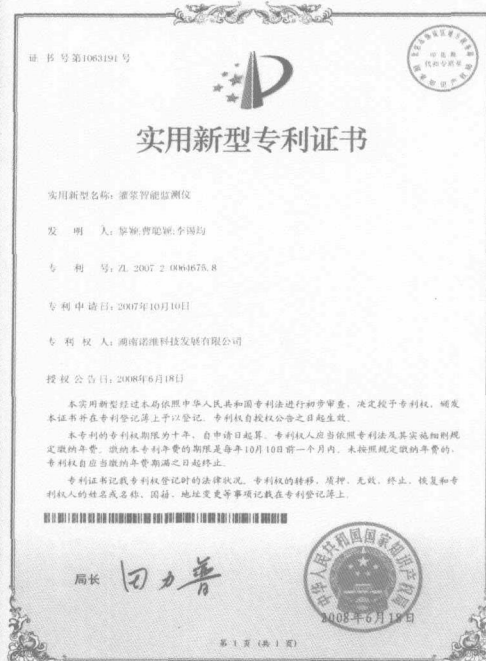
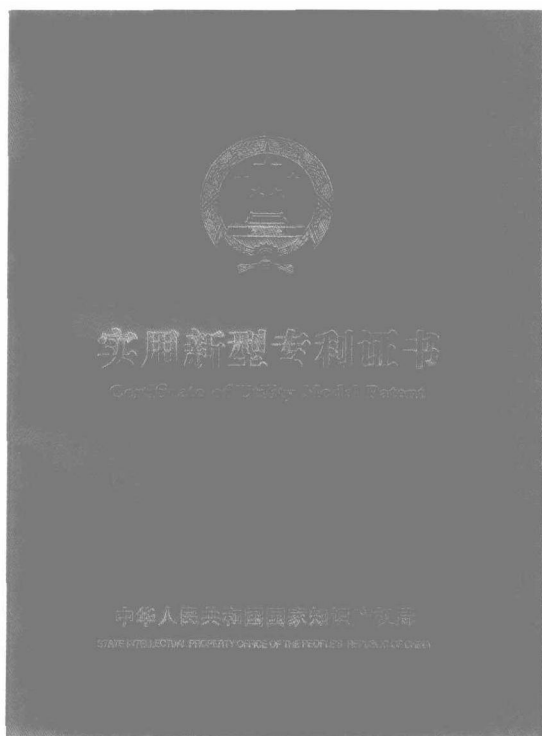


作者简介

李锡均，男，1969年5月出生于云南大理，高级工程师，二级建造师。

1992年7月毕业于成都地质学院水文地质与工程地质专业，获学士学位。曾任云南省水利水电勘测设计研究院勘察分院副总工程师，钻探队副队长兼总工程师，湖南宏禹水利水电岩土工程有限公司云南分公司总工程师。主持或参加了云南省昆明市柴石滩水库工程、昭通市渔洞水库、曲靖市阿岗水库、昆明市掌鸠河引水供水工程云龙水库、昆明市清水海供水及水源环境管理项目引水工程、楚雄州青山嘴水库工程、龙陵县勐梅河一级电站等工程的工程地质勘察工作或灌浆试验任务，参加了云南省地下水资源开发与利用规划工作。

主要著作有《青山嘴水库地基基础处理中强夯法试验与实践》、《孔口封闭灌浆法在除险加固水库工程的应用》、《灌浆试验研究》、《云南省楚雄州青山嘴水库地基基础处理试验与研究》（灌浆试验、摆喷试验、强夯试验）、《碎裂岩体中高压灌浆形成防渗帷幕的试验与研究》、《深孔高压灌浆下形成铸钻杆原因分析与解决措施》等。与湖南诺维科技发展有限公司合作研制的灌浆智能监测仪，荣获实用型专利证书（专利号：ZL 2007 2 0064675.8）。主持或参加了多项工程的工程地质勘察和多个工程的地基处理施工任务，在国内外发表十余篇论文，编写了多个工程的工程地质勘察报告和灌浆试验专题报告以及施工工作管理报告。



序

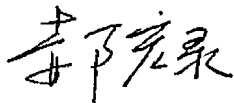
今年元旦节前，收到了李锡均同志和陶忠平先生合著的《云南水利工程灌浆试验研究与实践》书稿，请我审阅并作序。此本论著是云南水利工程灌浆试验理论与实践的总结。本书内容充实，既有基础灌浆试验理论方面的探讨，更注重实践经验的总结，很有实用价值和参考意义。我认真审阅了本书的文稿，确是一本值得推荐的好书。

20 世纪 50 ~ 60 年代初，一大批热血青年，积极投身到水利水电勘测事业当中，学习知识，钻研技术，通过不懈的努力，造就了一支过硬的队伍，并培养了敢想敢干、特别能吃苦的优良作风，许多人成了专家。改革开放后，又逐步从大专院校吸收了大批新鲜血液，他们努力投身于勘测实践，迅速接过老一辈的班，成为勘测、施工队伍的中坚力量，其中不乏佼佼者。李锡均同志大学毕业后一直工作在生产第一线，搞过不少工程，特别在大坝防渗处理灌浆技术处理方面，积累了较丰富的实际经验，在理论方面也有了长足的进步。陶忠平先生是享受国务院政府特殊津贴的专家，教授级高级工程师，曾担任中国水利学会勘测专业委员会、中国水利学会岩土力学专业委员会委员、云南省水利水电勘测设计研究院副总工程师等职，著述颇丰，且在基础处理灌浆试验研究方面有许多新的思路。

此次，他们二人合作完成了《云南水利工程灌浆试验研究与实践》一书，是对水利勘测基础处理问题研究的贡献。该书对水利水电基础灌浆试验问题从基础理论到方法以及新技术应用做了一些有益的探索，这在工程实际中具有很大意义，所研究的问题与实际工程结合紧密，具有较强的实用性和可操作性。

本书文字通俗，图文并茂，实例丰富，不仅是水利水电工程地质工作者，特别是广大从事中小型水利水电工程地质勘察工作人员的好参考书，也是设计、施工人员和从事水利水电工程地质教学的师生有益的参考书。

欣然应邀，特此作序。



2008 年 12 月 12 日

注：郝宏录同志为原中国水利水电基础工程局局长。1965 年天津大学水利工程系毕业，参加水利工程建设至今一直从事水利水电基础工程施工，教授级高级工程师，享受国务院政府特殊津贴的专家。

前 言

在国内外水利水电资源开发的历史过程中，很大程度上就是寻找优良的天然地基。随着时间的推移和资源的开发与利用，其资源的地基基础、地质条件较为复杂。但为了让资源更被人类所利用，作为水利水电施工技术的实施者和创造者，为了迎接新世纪，迎接新的挑战，应充分利用现有的资源，与不良地质条件作斗争，始终坚持科学技术是第一生产力的指导思想，为我国的水利水电建设事业发展作出新的成就和贡献。

拦江河、筑大坝，修水库、建电站，为人类造福，是我们水利水电建设的宗旨；而修筑大坝，确保安全，保护人们的生命财产和利益是我们水利人的职责。“稳固基础”应具备可靠的防渗性、耐久性和均质性，也就是“万丈高楼，平地起；百米大坝，根基牢”的道理。

灌浆技术自 18 世纪问世以来，已经历了 200 多年的历史，随着灌浆技术的不断发展，灌浆效果越来越好，水利水电工程中采用灌浆技术处理复杂的地质条件和建筑物缺陷的项目越来越多、任务越来越重。灌浆技术是水工建筑物地基处理常用和重要的工程措施，而由于各地区的地质条件不同，坝型各异，水工设计对大坝岩石地基的要求也不尽相同，为了使灌浆设计和施工技术更符合实际情况，须通过灌浆试验，在灌浆试验中取得作为大坝灌浆设计和施工的主要技术参数（如孔排距、灌浆压力、灌浆工艺等）。

本书在编写过程中引用了大量灌浆资料文献和灌浆试验报告，在此谨对上述资料和报告的编撰者表示谢意。本书的出版得到了云南省水利水电勘测设计研究院各位领导和同行们的大力支持和帮助，在此表示崇高的敬意和感谢！

限于编者水平与认识的局限性，书中的错误在所难免，不足之处，敬请专家和读者不吝批评指正。

编 者

2008 年 12 月于春城

目 录

第一章 灌浆试验总论	
1.1 灌浆的概念	(1)
1.2 灌浆三大理论体系	(1)
1.2.1 渗透灌浆理论	(1)
1.2.2 压密灌浆理论	(7)
1.2.3 劈裂灌浆理论	(9)
1.3 灌浆的作用	(12)
1.4 灌浆的适用范围	(12)
1.5 灌浆分类	(12)
第二章 灌浆试验大纲的编制	(14)
2.1 灌浆试验的目的和任务	(14)
2.2 灌浆试验地段的选择	(14)
2.3 灌浆试验基本内容	(15)
2.4 灌浆试验孔的布置形式	(15)
2.4.1 单排多孔距布置形式	(15)
2.4.2 双排(多排)多孔距布置形式	(16)
2.4.3 其他布置形式	(16)
2.5 灌浆试验大纲编制实例	(16)
2.5.1 绪 言	(16)
2.5.2 灌浆试验目的、地段的选择与布置	(20)
2.5.3 灌浆试验工程量	(21)
2.5.4 灌浆试验施工工艺及技术要求	(21)
2.5.5 灌浆施工	(23)
2.5.6 灌浆压力和灌浆浆液配比	(26)
2.5.7 钻孔事故预防和处理	(26)
2.5.8 施工准备	(28)
2.5.9 工期安排	(28)
2.5.10 质量、安全保证措施	(28)
第三章 灌浆试验施工	(29)
3.1 钻 孔	(29)
3.1.1 钻孔机具	(29)
3.1.2 钻进方法	(30)
3.1.3 常用钻进方法	(32)
3.2 钻孔方向	(33)
3.2.1 钻孔偏斜的允许值	(33)
3.2.2 钻孔测斜与计算	(33)
3.3 钻孔及裂隙冲洗	(36)
3.3.1 冲洗压力	(36)
3.3.2 冲洗的要求	(36)
3.3.3 冲洗的目的	(37)

目 录

3.3.4 冲洗的方法	(37)
3.4 压水试验和简易压水	(37)
3.4.1 定 义	(37)
3.4.2 压水试验与简易压水的目的与作用	(37)
3.4.3 压水试验与简易压水的适用条件	(37)
3.4.4 压水试验的程序	(38)
3.4.5 压水试验与简易压水的一般规定	(38)
3.4.6 试验压力计算	(38)
3.4.7 压水试验与简易压水资料整理	(39)
3.5 灌 浆	(43)
3.5.1 灌浆设备和机具	(43)
3.5.2 灌浆试验常用的灌浆设备和机具	(43)
3.5.3 灌浆材料	(46)
3.5.4 浆 液	(49)
3.5.5 灌浆试验常用浆液	(50)
3.5.6 浆液配比与材料用量	(55)
3.5.7 灌浆方法	(60)
3.5.8 灌浆压力	(62)
3.5.9 浆液变换	(66)
3.5.10 浆液结束标准和封孔	(67)
3.5.11 特殊情况处理	(67)
第四章 灌浆试验资料整理与成果分析	(71)
4.1 灌浆试验资料的整理	(71)
4.1.1 灌浆试验资料整理的先决条件	(71)
4.1.2 灌浆试验资料整理的重要性	(71)
4.2 灌浆试验资料成果分析	(71)
4.2.1 灌浆成果一览表的整理	(72)
4.2.2 灌浆分序统计表的整理	(72)
4.2.3 灌浆成果综合统计表的整理	(72)
4.2.4 灌浆成果综合剖面图	(73)
4.3 灌浆试验效果和质量检查	(73)
4.3.1 灌浆试验效果检查	(73)
4.3.2 灌浆试验质量检查的原则	(73)
4.4 灌浆试验提供成果资料	(74)
4.4.1 主要的成果图	(74)
4.2.2 主要的成果表	(74)
第五章 实例	(75)
5.1 实例1—昆明市清水海供水及水源环境管理项目引水工程 清水海湖岸防渗线灌浆试验	(75)
5.1.1 工程概况	(75)
5.1.2 水文气象与工程地质	(76)
5.1.3 湖区工程地质问题	(78)
5.1.4 灌浆试验	(79)
5.1.5 灌浆试验施工	(81)
5.1.6 灌浆试验成果资料分析与评述	(95)
5.1.7 灌浆效果检查	(122)

目 录

5.1.8	结论与建议	(127)
5.2	实例 2 - 楚雄州青山嘴水库工程灌浆试验	(128)
5.2.1	工程概况	(128)
5.2.2	水文气象与工程地质	(128)
5.2.3	坝基帷幕灌浆试验	(129)
5.2.4	坝基帷幕灌浆试验施工	(131)
5.2.5	灌浆试验成果资料分析与评述	(141)
5.2.6	灌浆效果检查	(162)
5.2.7	结论与建议	(164)
5.3	实例 3 - 保山市红岩水库北岸防渗线灌浆试验	(170)
5.3.1	工程概况	(170)
5.3.2	基本地质条件	(170)
5.3.3	北岸防渗线灌浆试验	(172)
5.3.4	灌浆试验的施工	(174)
5.3.5	灌浆试验成果资料分析与评述	(185)
5.3.6	工效分析	(199)
5.3.7	深孔灌浆工艺可行性分析	(199)
5.3.8	质量安全管理	(200)
5.3.9	结论与建议	(200)
5.4	实例 4 - 澜沧县多依林水库病害工程灌浆试验	(201)
5.4.1	绪 言	(201)
5.4.2	坝址区地质及灌浆试验区工程地质概况	(202)
5.4.3	灌浆试验的目的与任务	(202)
5.4.4	灌浆试验的选择和孔组的布置	(202)
5.4.5	灌浆试验的施工工艺及质量标准	(203)
5.4.6	灌浆试验成果资料分析	(208)
5.4.7	灌浆效果检查	(213)
5.4.8	结 论	(214)
5.5	实例 5 - 文山县暮底河水库工程灌浆试验	(215)
5.5.1	灌浆试验的目的与任务	(215)
5.5.2	坝址枢纽区工程地质条件概况	(215)
5.5.3	灌浆试验地段的选择与孔组的布置	(218)
5.5.4	灌浆试验的施工工艺及质量标准	(219)
5.5.5	灌浆试验成果资料分析	(224)
5.5.6	灌浆效果检查	(234)
5.5.7	结 论	(235)
5.6	实例 6 - 勐腊县大沙坝水库灌浆试验	(236)
5.6.1	灌浆试验的目的与任务	(236)
5.6.2	坝址区地质概况	(236)
5.6.3	灌浆试验的选择和孔组的布置	(236)
5.6.4	灌浆试验的施工工艺及质量标准	(237)
5.6.5	灌浆试验成果资料分析	(241)
5.6.6	灌浆效果检查	(247)
5.6.7	结 论	(248)
5.7	实例 7 - 普洱县西洱河除险加固工程生产性灌浆试验	(249)
5.7.1	工程概况	(249)

5.7.2	水文气象与工程地质	(249)
5.7.3	生产性灌浆试验	(250)
5.7.4	生产性灌浆试验施工	(251)
5.7.5	灌浆试验成果资料分析与评述	(260)
5.7.6	灌浆效果检查	(276)
5.7.7	结论与建议	(277)
5.8	实例 8 - 元江县南掌水库拦河坝塑性砼防渗墙及两岸帷幕灌浆工程生产性灌浆试验	(278)
5.8.1	工程概况	(278)
5.8.2	区域地质与工程地质	(278)
5.8.3	生产性灌浆试验	(281)
5.8.4	生产性灌浆试验施工	(282)
5.8.5	灌浆试验成果资料分析与评述	(287)
5.8.6	灌浆效果检查	(291)
5.8.7	结论与建议	(292)
5.9	实例 9 - 云县刘家箐水库拦河坝坝基防渗帷幕灌浆试验	(293)
5.9.1	工程概况	(293)
5.9.2	灌浆试验的目的与任务	(293)
5.9.3	工程地质条件	(294)
5.9.4	完成工作量	(294)
5.9.5	灌浆试验施工	(296)
5.9.6	灌浆质量分析与效果检查	(300)
5.9.7	结论及建议	(304)
5.10	实例 10 - 思茅市信房水库除险加固工程生产性灌浆试验	(307)
5.10.1	工程概况	(307)
5.10.2	水文气象与工程地质	(308)
5.10.3	生产性灌浆试验	(308)
5.10.4	生产性灌浆试验施工	(309)
5.10.5	灌浆试验成果资料分析与评述	(317)
5.10.6	灌浆效果检查	(327)
5.10.7	结论与建议	(328)
5.11	实例 11 - 昆明市掌鸠河引水供水工程云龙水库灌浆试验	(329)
5.11.1	灌浆试验的目的与任务	(329)
5.11.2	坝址区工程地质条件及水文地质条件	(329)
5.11.3	灌浆试验地段的选择与孔组的布置	(332)
5.11.4	灌浆试验的施工工艺及质量标准	(334)
5.11.5	灌浆试验成果资料分析	(339)
5.11.6	灌浆效果检查	(353)
5.11.7	结 论	(354)
5.12	实例 12 - 昆明市柴石滩水库防渗帷幕灌浆试验	(355)
5.12.1	工程概况	(355)
5.12.2	工程地质条件	(355)
5.12.3	灌浆试验位置的选择和孔组的布置	(356)
5.12.4	灌浆试验的施工工艺及技术要求	(357)
5.12.5	灌浆试验成果资料分析	(360)
5.12.6	灌浆试验效果的检查	(371)
5.12.7	结 论	(372)
	参考文献	(374)

第一章 灌浆试验总论

1.1 灌浆的概念

灌浆 (Grouting), 也称注浆 (Injection grout), “是将具有胶凝性和流动性的浆液按规定的浆材配比, 借用机械或浆液自重施加压力, 通过钻孔或预埋管路输送到岩石裂隙或水工建筑物的空隙中的一种施工工艺”。其实质是使浆液在地层或结构物的裂隙、空隙或孔洞内渗透、扩散、充填, 经一定时间凝固和硬化后, 以提高其整体性和密实性, 改善其力学和抗渗性能, 从而达到加固基础和抗渗防水目的的一种工程处理技术手段。

在 1802 年由法国的查理斯·贝里尼在修理第厄普冲沙闸时, 利用木制冲击筒以人工方法向地层中灌注黏土浆液以达到加固地层的目的, 从此就产生了灌浆技术。1826 年由英国的阿斯普丁成功研制出硅酸盐水泥后, 在 1876 年, 美国的托马斯·霍克斯莱用硅酸盐水泥浆液对腾斯托尔水坝的基岩作了首次灌浆。1920 年, 荷兰的尤斯登首次采用水玻璃、氯化钙双液双系统二次压注法, 被称为化学灌浆的开始。20 世纪初, 灌浆技术在法国和秘鲁煤矿的竖井施工堵水中获得了巨大成功, 使用灌浆泵性能也大大改进, 从而加快了灌浆技术的推广和应用。

从灌浆技术的使用和灌浆效果的角度分析, 我国的灌浆事业开始可以认为是从《淮南子·览冥训》——“女娲炼五色石以补苍天, 积芦灰以止淫水”记载开始。自 20 世纪 50 年代开始, 由于我国出现了一大批水利水电工程, 灌浆技术在这些工程得到了广泛的应用与推广, 并取得良好的效果, 从而就加快了和促进了灌浆技术在水利水电工程的应用与发展。

1.2 灌浆三大理论体系

1.2.1 渗透灌浆理论

渗透灌浆是通过灌浆压力, 使浆液克服阻力渗入到孔隙 (土体) 或裂隙 (岩体、混凝土或钢筋混凝土体), 就地凝固而达到或减少渗漏的灌浆方法。其作用机制是假定被灌载体为均质各向同性介质, 如土体等位于钻孔底端的注浆按球形或柱形扩散渗入孔隙裂隙并充填凝固。

1. 浆液为牛顿流体型做匀速运动的渗透理论

1938 年, 马格 (Maag) 首先建立在砂土层的球形渗透理论。随后, 卡罗尔 (Karol) 及拉芙莱 (Raffle) 等也据各自的研究结果, 相应给出了类似的计算公式。实践应用表明, 马格及拉芙莱的理论公式应用较广泛, 而卡罗尔公式应用较少。

(1) Maag 渗透理论公式 (地下水为静压力):

$$t = \frac{r_1^3 \beta n}{3kh_1 r_0} \quad (1-1)$$

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{3kh_1 r_0 t}{\beta n}} \quad (1-2)$$

(2) Karol 渗透理论公式:

$$t = \frac{n\beta}{3kh_1} r_1^2 \text{ 或 } r_1 = \sqrt{\frac{3kh_1 t}{n\beta}} \quad (1-3)$$

$$r_1 = 0.62 \sqrt[3]{\frac{Qt}{n}} \quad (1-4)$$

(3) Raffle 渗透理论公式 (地下水与浆液同时运动):

$$t = \frac{nr_0^2}{kh_1} \left[\frac{\beta}{3} \left(\frac{r_1^3}{r_0^3} - 1 \right) - \frac{\beta-1}{2} \left(\frac{r_1^2}{r_0^2} - 1 \right) \right] \quad (1-5)$$

上半球形渗透理论模型, 见图 1-1。

上各式中 t —灌浆时间, s;

r_1 —浆液扩散渗透半径, cm;

β —浆液黏度对水的黏度比;

n —被灌载体的孔隙率;

k —被灌载体的渗透系数, cm/s;

h_1 —灌浆压力 (厘米水头), cm;

r_0 —灌浆管半径, cm;

Q —注入量, cm^3 。

为便于计算, 给出表 1.1 计算参数。

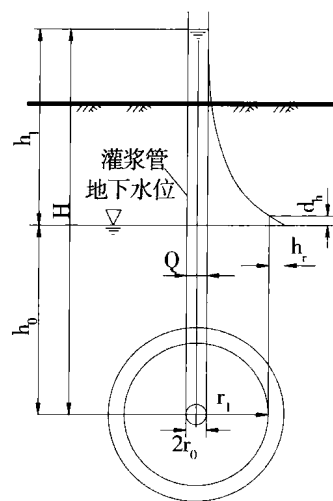


图 1-1 球形渗透理论模型

h_0 注浆点以上的地上的地下水压头, cm;

H —地下水压头与灌浆压力之和, cm。

表 1.1

计算参数表

参数 组别	t (s)	n	r_0 (cm)	h_1 (cm)	β	k (cm/s)
I	30	0.4	2.5	3000	5	0.20
II	1000	0.3	3.0	5000	3	0.01

用表 1.1 两组参数以不同作者给出的计算理论 r_1 值, 列表 1.2 中。

由表 1.2 结果可知, Maag 与 Raffle 对比的球形渗透半径 r_1 理论相近, 其原因是: 当令 $r_1^3 - r_0^3 \approx r_1^3$ 即忽略 (1-5) 中括号内的第 2 项时, 式 (1-5) 就可简化成式 (1-1)。

表 1.2

三位作者的 r_1 理论计算值

作者	公式	r_1 (cm)	
		I	II
Maag	式 (1-1) 或 (1-2)	40.7	79.4
Karol	式 (1-4)	164.0	408.0
Raffle	式 (1-5)	42.2	80.5

μ_g —浆液的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 μ_w —水的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 S_g —浆液饱和度;
 S_{gw} —束缚浆液饱和度;
 S_{og} —残余水饱和度;
 K_g —饱和度为 S_g 时浆液的渗透系数;
 K_{gw} —地下水的残余饱和度和浆液束缚饱和度下的浆液渗透系数;
 K_w —饱和度为 S_w 时水的渗透系数;
 r_0 —灌浆半径, cm ;
 r_c —地下水影响半径, cm ;
 r —浆液扩散半径, cm ;
 ξ —浆流区域或水流区任意点半径, cm ;
 L —柱面长度, cm ;
 M —浆液运动特征系数, $M = (K_{gw}/\mu_g) / (K_{gw}/\mu_w)$, 当 $M > 1$ 时, 为加速运动; 当 $M < 1$ 时为减速运动;
 p_0 —作用在灌浆孔壁上的压力, MPa ;
 p_c —地下水作用力, MPa ;
 p_c —毛细管水作用力, MPa 。

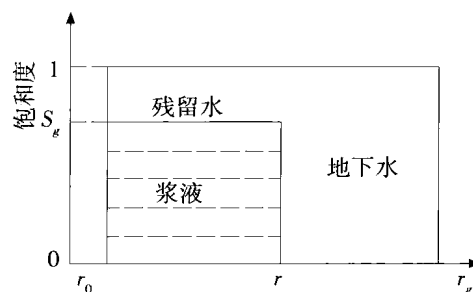


图 1-4 浆液扩散图

需要指出的是, 当浆液呈柱形扩散时, 在浆流区, 各向同性多孔介质的扩散半径 (r) 与饱和度及其浆液、地下水与残留水的关系如图 1-4。

另外, 式 (1-9) 与式 (1-10) 两式, 同前述的公式不同之处在于, 它们考虑了毛细管作用力, 故式 (1-9) 与式 (1-10) 适用于黏土的渗透灌浆理论计算。

(4) 界面为球面的非稳定双相流渗透理论公式:

$$t = \frac{n_c r_0^2}{k h_1} \left[\frac{1}{3} \times \frac{k}{K_g} \left(\frac{r_1^3}{r_0^3} - 1 \right) - \frac{(k/K_c) - 1}{2} \left(\frac{r_1^2}{r_0^2} - 1 \right) \right] \quad (1-11)$$

式中 n_c —浆液的饱和度与多孔介质孔隙率的乘积, 即 $n_c = n S_g$

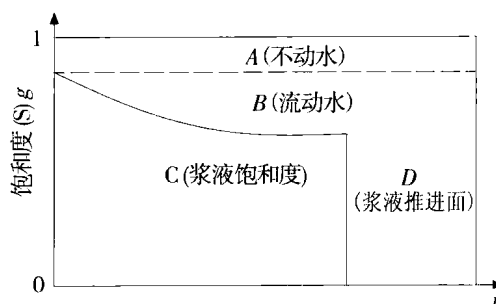
其他符号意义同前。

式 (1-11) 与式 (1-5) 不同之处在于, 前者强调浆液饱和度随灌浆距离的增大而降低; 浆液的渗透系数 (K_g) 不能由水的渗透系数 (K) 和浆液与水的黏度 (μ/μ_g) 间接获得, 即 $(K/K_g) \neq (\mu/\mu_g)$; 而且是双相非稳定牛顿球面扩散渗透。后者则是单相均匀牛顿球面扩散渗透。

式 (1-11) 表述的浆液饱和度 (S_g) 与渗透距离 (r) 关系模式, 如图 1-5。

3. 浆液为宾汉姆流体型的渗透理论

对于浆液为宾汉姆流体型并以柱面扩散在粗颗


 图 1-5 非稳定双相牛顿浆液沿球面 r 方向饱和度分布

粒灌浆载体的理论公式:

$$K_g = \frac{E}{A\mu [1 + BC (1/\nu)]} = \frac{E}{A\mu [1 + BC (2\pi\alpha r/Q)]} \quad (1-12)$$

$$P_r = P_0 - \frac{A\mu}{E} \left[\frac{Q}{2\pi\alpha} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + BC (r - r_0) \right] \quad (1-13)$$

$$t = \frac{\pi\alpha n}{Q} (r^2 - r_0^2) \quad (1-14)$$

$$Q = \frac{2 \left[\frac{E (P_0 - P_R)}{A\mu} - BCR \right] \pi\alpha}{\ln \left(\frac{R}{r_0} \right)} \quad (1-15)$$

$$R = \sqrt{\frac{2 \left[\frac{E (p_0 - p_R)}{A\mu} - BCR \right] T}{n \ln \left(\frac{R}{r_0} \right)}} \quad (1-16)$$

$$R_{\max} = \frac{2.66n^{0.4}}{A} d_0 \left(\frac{p_0 - p_R}{\tau_0} \right) \quad (1-17)$$

以上各式中 K_g —粗颗粒灌浆载体的渗透系数;

E —孔隙参数, $E = \frac{n^{0.1} d_0^4}{1.2 D_0^2}$;

n —体积孔隙率;

d_0 —孔隙直径, cm;

D_0 —粗颗粒直径, cm;

A —常数, 由实验确定;

B —流体流变性常数, $B = \frac{\tau_0}{\mu}$;

μ —塑性黏度, Pa·s;

τ_0 —流体开始流动时的极限剪应力, MPa;

C —灌浆载体几何参数决定的常数, $C = \frac{d_0^3}{3.2 n^{0.3} D_0^2}$;

ν —渗透速度, m/s, 线源的 $\nu = \frac{Q}{2\pi\alpha r}$;

α —线源长度, m;

r_0 —灌浆半径, cm;

r 、 R —浆液扩散半径, cm, $R = \sqrt{\frac{Q}{\pi\alpha n} T}$;

t 、 T —灌浆时间, s;

Q —灌浆流量, m³/s;

p_0 —初始(管底)灌浆压力, MPa;

p_r 、 p_R —灌浆半径为 r 及 R 处的压力, MPa。

4. 黏性变流体的渗透理论

黏性变流体是指灌浆中浆液的黏度随时间发生变化的流体。当其以柱面扩散时，公式为

$$Q = K_R (p_0 - p_R) \frac{2\pi\alpha}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} = \frac{k}{\beta} e^{-at} (p_0 - p_r) \frac{2\pi\alpha}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (1-18)$$

$$R = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_R)}{\bar{n} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \cdot \frac{k}{\Phi} e^{-at} \cdot T} \quad (1-19)$$

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{Q}{\pi\alpha n} \cdot T_0} \quad (1-20)$$

$$T_0 = \frac{\lg\left(\frac{\beta\gamma_\omega\mu}{k\mu_\omega}\right)}{0.434\alpha} \quad (1-21)$$

$$p_0 = \frac{e^{-aT_0}}{\beta} \frac{Q}{2\pi\alpha} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) + p_R \quad (1-22)$$

以上各式中 T_0 —灌浆最长时间，s；

t 、 T —灌浆时间，s；

β —浆液黏度对水的黏度比；

$\bar{n}$ —平均体积孔隙率；

γ_ω —浆液黏度，Pa·s；

μ_ω —水的黏度，Pa·s。

其他符号意义同前。

5. 渗透灌浆理论的几点建议与结论

(1) 以 Maag 为代表的渗透灌浆理论，系通常的均质体间的渗透理论。

(2) 渗流理论的早期概念认为，浆液的渗流服从达西 (Darcy) 定律，即线性渗透定律。依据达西定律的初始含义，主要是地下水运动法则。具体指在土或岩石中液体的渗透速度 (v) 与水力坡度 (J) 成正比， $v = kJ$ 。式中 k 为比例系数，即上述的渗透系数。

需要指出的是，达西定律仅适用那些常温、低矿化度而且流速不大的地下水等液体。对于高温、高矿化度、即使流速不大的地下水等液体，达西定律须作修正。另外，渗透系数 k ，单位为吕荣，用 Lu 或 m/s 表示， $1\text{Lu} = 0.01\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ 。它与绝对渗透系数 K 概念不一样，绝对渗透系数用以规定地下水的渗流性质，其单位为 μm^2 (平方微米)。 K 与所研究的液体或其温度有关，即 $v = \frac{k\gamma g J}{\eta}$ 或 $K = \frac{v\eta}{\lambda g}$

式中 γ —液体密度， g/cm^3 ；

g —重力加速度， m/s^2 。

(3) 浆体流动的本质取决于其变特性，即在灌浆过程中浆体内部、浆体与裂隙面之间产生的阻力的性质。

(4) 渗透灌浆浆液的流动概分为牛顿型与宾汉姆型，亦称溶液和粒状悬浮型。化学浆液属前者，泥浆和稳定水泥浆液属后者。

(5) 扩散是指浆液离开灌入点向被载体各个方向的流动。

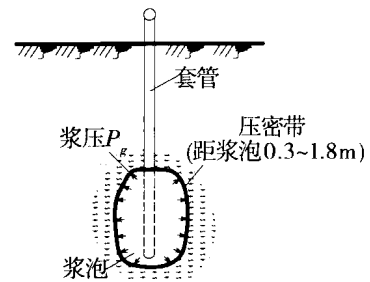


图 1-6 压密灌浆及其附近压密带示意图