

湖北省学术著作出版专项资金资助项目
混凝土材料科学与工程技术研究丛书(第1期)

用电阻率表征水泥 混凝土结构形成动力学及性能

Kinetics of Structure Formation and Properties of
Concrete by Electrical Resistivity Measurement

魏小胜 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

混凝土材料科学与工程技术研究丛书(第1期)

用电阻率表征水泥混凝土结构 形成动力学及性能

魏小胜 著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

混凝土电阻率法可以对水泥水化过程进行动态监测,还可反映水化体系中整个范围内孔的形成及变化过程,为测试微观结构特征和宏观性能提供了一种有效的研究手段。电阻率与水化特性、动力学参数、凝结时间、化学收缩等密切相关。本书基于电阻率的发展趋势与孔结构变小和强度增加的趋势相似的特征,设计出一种试验方法,即用电阻率的变化来表征混凝土内部结构的变化,得到了所见即所得的认知效果,达到了认识水泥混凝土水化过程,并能预测体积变形的目的,也就是“电阻率发展速率越快”,就表现出“单位体积内水化产物多”,“强度高”,“自收缩大”的特点。

图书在版编目(CIP)数据

用电阻率表征水泥混凝土结构形成动力学及性能/魏小胜著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5629-5098-1

I. ①用… II. ①魏… III. ①水泥-混凝土结构-电阻率-测试 IV. ①TU528. 45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 219382 号

项目负责人:陈军东

责任编辑:陈军东

责任校对:王思

封面设计:付群

出版发行:武汉理工大学出版社

地址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮编:430070

网址:<http://www.wutp.com.cn>

经销:各地新华书店

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:11.25

字数:180 千字

版次:2016 年 9 月第 1 版

印次:2016 年 9 月第 1 次印刷

定价:48.00 元(平装)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线:027—87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

前 言

混凝土对于研究材料科学的人来说,既简单又有魅力。蔡方荫教授创造了“砼”这个字来表示混凝土,这个字从汉字的构形上会意地表达了混凝土是一种“人工石材”,硬化后的混凝土具有坚硬如石的特点;混凝土的英文单词 concrete 源于拉丁文“concretus”,concretus 是“共同生长”(grow together)的含义,它表达了混凝土富有生命体的特性,体现了混凝土“幼年,少年,青年,中年,老年”的类似生命体的成长阶段,也表达了“流动,凝结,硬化”的强化过程。中文“砼”强调了混凝土的结果,英文“concrete”强调了混凝土的过程。综合英文“concrete”和中文“砼”的含义,可以将混凝土理解为水、水泥、砂、石、化学外加剂和矿物外加剂经过水化作用,“共同生长”成为“人工石材”的动态密实化过程。

可以用图 1 所示的结构形成图来简单地描述这个过程,黑色颗粒代表未水化的水泥颗粒,黑色外面的浅灰色代表内水化产物,最外层的深灰色代表外水化产物,图中的小黑点代表从水泥颗粒中溶解出来的离子。可以看出,随着反应时间的延长,外水化产物之间越来越靠近,含离子溶液的空间越来越小,外水化产物量的增长使得水泥颗粒越来越靠近,包含离子的溶液所占空间越来越小,结构越来越密实。可以想象成在一个狭小的房间里有许多人,如果大家都在发胖,过一段时间就会彼此紧贴在一起。



图 1 水泥和水反应随时间密实化的结构形成过程

因此,混凝土的研究工作者们一直很关心一个问题:在单位体积

内的水泥混凝土中,有多少水泥参与了反应,水化产物靠近的速率是多少。这就是水泥混凝土水化动力学和结构形成动力学需要回答的问题。如果能清楚地了解混凝土的动力学过程的规律,对于合理地配料并制订搅拌、泵送、振动成型等工艺参数,以及科学地控制和预测结构形成过程及其性能有重要意义。

那么,有什么好的方法能表征水泥和混凝土反应快慢以及结构形成的快慢呢?最值得推荐的方法是电阻率测试方法。如果在图 1 所示的浆体方块的两端通电,小黑点所代表的离子就会在溶液的空间中迁移,随着时间延长,单颗水泥水化程度增加,产物越来越多,产物越来越靠近,固相空间越来越大,液相空间越来越小,离子在电压下迁移时所受到的阻碍就变大,因此电阻也变大。将电阻转换成电阻率就得到电阻率随时间而增加的曲线,见图 2 中的虚线,可以形象地描述为美妙的一勾。一般来说,如果该曲线上扬的幅度比较大,就表示结构形成速度快,将来的强度就会高。如果将虚线进行微分处理就会得到图 2 中实线所对应的电阻率变化速率曲线,根据曲线上的特征点可以将水泥和混凝土的水化过程分为:溶解-结晶期、诱导-凝结期、加速期、减速期和稳定期这 5 个阶段。一般来说,特征点对应的时间越早,结构形成速度越快。为了更加明了这两条曲线的意义,可以简单地描述为“电阻率曲线表示混凝土孔隙率的减少,电阻率微分曲线表示混凝土孔隙率减少的速率”。

本书的宗旨是让读者了解:电阻率随时间的发展曲线是如何动态地、全面地反映早龄期水泥混凝土孔隙率减少的全过程。重点介绍了如何基于电阻率方法对水泥水化阶段进行划分,并且与传统的方法进行了比较,提出了结构形成动力学的新概念和新参数。电阻率发展趋势与孔结构变小和强度增加的趋势具有相似的特征,表现出“所见即所得”的特点,利用这一特征达到了利用电阻率这一物理量来表征水泥混凝土水化过程,并预测强度和体积变形等的目的,也就是“电阻率发展速度越快”,就表现出“单位体积内水化产物多”,“强度高”,“自收缩大”的特点。所以,电阻率测试方法是一种不可多得的研究手段,期待这本书成为你在认识混凝土科学征途中的破风手。

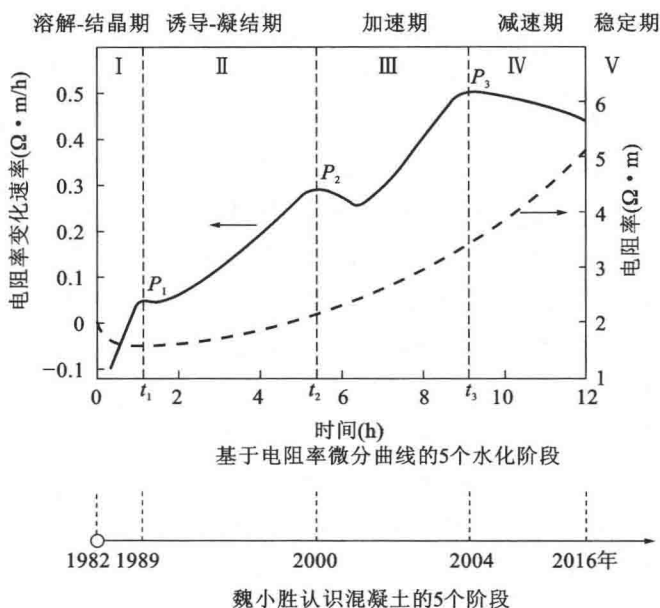


图2 电阻率曲线及其微分曲线和作者认识混凝土的时间阶段

我对混凝土的认识也是一个不断深化的过程,从1982年9月迈进武汉理工大学(原武汉建材学院)到现在快34年了。如果用水泥水化过程的5个阶段来划分我对混凝土的认识的话,可以归纳为图2下半部分所示用年标记的5个阶段,每个阶段都有伴我共同成长的同学、老师、同行、学生及家人。

第I阶段:学习混凝土的阶段(1982—1989年,7年时间),相当于水泥水化的溶解-结晶期,在这一阶段,我开始学习混凝土,这一阶段又可以细分为大学阶段和硕士研究生阶段。在大学阶段,我最喜爱的书是袁润章校长主编的《胶凝材料学》,这本书是最经典的混凝土书籍之一。特别要感谢当时建筑材料方向的任课老师:章丽云、崔可浩、孙复强、苏钊、魏发俊等老师的教导,是他们引导我迈进了混凝土知识的殿堂。在硕士研究生阶段,我对混凝土有了更深的认识,感谢我的硕士导师崔可浩教授,他敢于创新,表述清晰,课堂氛围活泼,为我热爱混凝土树立了标杆。他和崔崇教授教我配制加气混凝土,使我对蒸压条件下胶凝材料的水化过程有了新的认识。当时最深刻的认识就是

将石灰与粉煤灰经过湿磨后再蒸压,结果使托贝莫来石等水化产物在基体中的分布更加均匀,结构强度得到提高。这一研究使我认识到微观结构和宏观力学性能存在内在和定量的关系。感谢崔崇老师和马保国老师的指导,以及童明德教授级高工在工厂里的指导;感谢袁润章校长在他家讲授胶凝材料物理化学,当时还聆听了他对新材料的展望;感谢冯修吉教授和阎培渝教授等讲授特种水泥。在那个阶段,甘新平、朱火明、王胜年、陈银洲、王延伟、周明凯、程新等同学都是不可缺少的朋友,现在还记得大家都去欣赏王延伟用电脑对数据进行线性回归分析时的场景。

第Ⅱ阶段:研究院工作阶段(从1989年至2000年,时间11年),相当于水泥水化的诱导-凝结期。从学校毕业进入湖北省水利水电科学研究院后,我开始将混凝土的知识应用到工程实践中。工作中遇到了许多难题和有趣的事,比如:有一公司建造的桥梁两年后才硬化,原来是缓凝剂掺多了。那时候遇到什么问题就去解决什么问题,遇到什么课题就去研究什么课题,我甚至还做过除草剂去除堤防杂草的研究。那一阶段,研究的特点是不够深入。那时的工作态度和工作氛围很值得怀念,人的心情就像诱导期一样比较平静。感谢孙裕球主任、胡来喜主任以及张爱沅、李树芳、何润芝、房淑华、雷皓等高工的帮助和支持。

第Ⅲ阶段:博士阶段(2000—2004年,时间4年),相当于水泥水化的加速期。在香港科技大学攻读博士的4年是知识快速增长的阶段。首先要感谢我的博士导师李宗津教授,他知识渊博,集思广益,勇于创新,他开启并引领我进入了用电阻率研究水泥水化的大门,在这一创新性的研究中,我领略了科学研究的丰收和喜悦。在香港科技大学校庆25周年之际,感谢母校不离不弃的爱,感谢当时的任课老师,梁坚凝教授对混凝土深度的认识和谦虚的品格使我更加热爱香港科技大学这所富有朝气的大学,唐本忠院士对高分子的热爱和授课的活力给我提供了能量去克服困难这一势垒,他同时是培养人才的高手,值得我一生去效仿。化学系的Dr. Ian D Williams带领学生们认真完成每一个微观结构测试及教学,给我热爱教学树立了榜样。特别要感恩香

港科技大学研读圣经的团契生活,感谢贾金原弟兄、郁燕老师和胡鹰期老师等使我们全家人认识到生命的意义是爱和舍己。还要感谢李文莱教授以及 Garrison、丁铸、董必钦、沈斌、卢都友、陈慧苏、张云升、何真等在研究上的支持。

第Ⅳ阶段:任教阶段(2004年至2016年,12年时间),相当于水泥水化的减速期。虽然从水泥水化的微分曲线来看,电阻率变化速率有所下降,但电阻率曲线还是在上升,知识水平有了极大的提升。在华中科技大学土木学院,每个学期我都要承担土木工程材料的本科课程教学及高等混凝土材料的研究生和留学生课程教学,每次的讲授使我不断思考和表达对混凝土的认识,在这个过程中总结了一些教学方法,争取做到将每一堂课都当作是服务学生的机会;在研究上也不断研究混凝土,有多次半夜起床书写对水泥水化的新认识,特别是有关动力学参数的总结。要特别感谢廖宜顺、田凯、左义兵、王雷、徐智、陶佳音等学生在研究上的配合和付出,本书中收录了左义兵同学的一些工作成果:他有明确的目标,善于管理时间,做事高效快速。感谢教研室的张长清副教授,他为人谦让,热爱教学,条理清晰;感谢李国卫副教授,他为人谦和,诚实待人,以教学为重。感谢李黎副院长在教学和研究上无私的支持,感谢郑俊杰副院长的鼓励,感谢朱宏平院长的关心。

第Ⅴ阶段:今后阶段(从此书出版开始—),相当于水泥水化的稳定期。这是一个新的开始,我必须以稳定的心态认真整理以前的工作,做到稳中求胜,以归零的心态学习新的知识。在今后的研究中,我将致力于电阻率方法的解释和应用推广,将学到的和得到的知识回馈社会;在教学中做到尽好自己的本分,在平凡中显出非凡。

混凝土结构和强度随时间先快后慢的发展规律充分反映了混凝土动态发展的特性,从研究中可以体会到许多哲学道理。以恋爱婚姻为例,恋爱婚姻的过程可以分为陌生阶段、交友阶段、恋爱阶段、订婚阶段和结婚阶段,这与水泥水化的5个阶段极为相似,如果没有交友阶段直接进入恋爱阶段常常会留下隐患,正如没有诱导期,就没有足够的时间浇筑和捣实混凝土;延长交友时间可以为爱情打好基础,正

如混凝土中掺入缓凝剂可以适当增加后期强度一样。

决定混凝土强度的因素是水灰比,在一定条件下,水灰比越小,混凝土强度越高。因为水灰比小的水泥浆中水泥颗粒多,单位体积中参与贡献的颗粒多,正如人多力量大一样,一个团队要产生强大的凝聚力也应人人参与。

在不同阶段形成的相同的水化产物也会带来不同的结果,比如我们熟悉的水化产物钙矾石。早期钙矾石是在几小时内生成的,它是水泥中的磨细的石膏与熟料中的铝酸三钙与水反应生成的均匀的水化产物,可以起到防止水泥浆闪凝的作用,其膨胀性不会在新拌混凝土或尚可发生塑性变形的混凝土内产生危害。而延迟钙矾石是在混凝土硬化几个月或更长一段时间后生成的,它是内部的或侵蚀环境中的硫酸盐与铝酸三钙或单硫型水化硫铝酸钙反应生成的不均匀的水化产物,其膨胀性受到已硬化混凝土的限制,会带来混凝土开裂、剥落和强度损失等危害。这很像两个人在单身阶段可以自由地谈恋爱是一种正常的关系,但如果两个人已经结婚并形成了稳定的家庭后,如果其中一方与其他人谈恋爱的话,那就会有危害作用。这就提醒我们:要抓住时机,在合适的时候做合适的事。

混凝土中各组成材料各有其功效,水泥和水硬化后起到胶结各组分的作用,砂和石起骨架作用,同时还起到降低成本和减少收缩等作用。同样地,我们每个人在社会中或一个团队中都有不同的价值,我们要学会谦卑,多看别人的长处,在团结友爱中互相合作,像混凝土一样一起成长(grow together),成为社会合用的材料。

感谢国家自然科学基金“混凝土反应动力学和结构形成动力学的研究及计算机模拟”(51478200)项目的支持。

在庆祝本人大学毕业即将满 30 周年之际,将《用电阻率表征水泥混凝土结构形成动力学及性能》这本书献给武汉理工大学制品 8210 班的全体同学,此书凝聚了我对混凝土的喜爱,也是我对这 30 年工作的凝练,感恩我与你们能偶然因混凝土而相聚并一起成长,生活的经历告诉我:偶然中有必然,拥有什么就爱惜什么。

感谢武汉地区的几位同行和老师,包括:水中和教授,丁庆军教

授,马保国教授,周明凯教授,王发洲教授,胡曙光教授,吴少鹏教授,沈卫国教授,赵青林教授,李北星教授,陈伟教授,万惠文教授,何永佳和吕林女教授夫妇;何真教授,刘数华教授等,感谢他们提供给我参加研究生答辩等机会。

要特别感谢我的爱妻肖莲珍,因着混凝土我和她有缘成为一家人,她心灵手巧,做事有悟性,本书的插图大多是她亲手绘制。她为人勤劳,无论是工作还是家务事,都任劳任怨;她为人诚恳,说话做事不转弯抹角,和她一起生活非常轻松。值得一提的是,她也是我研究上的好搭档和好帮手,本书中的很多成果是由我俩,还有导师李宗津教授和学生左义兵等共同完成的。

最后,还要感谢我的女儿魏潇瑶,她是我和妻子最得意的作品,她通情达理,善解人意,聪明伶俐,图1中的结构形成图就是她用计算机语言设计的,这叫爱的回旋曲。当我将爱给女儿的时候,就像玩回旋镖一样,现在她的爱已经回到我的身上。

衷心希望读者朋友们在阅读完此书后,对水泥和混凝土会有新的认识,对自己的人生也会有新的见解和规划。

魏小胜

2016年5月8日

目 录

1 电阻率的基本概念及测试方法	(1)
1.1 电阻率和电导率的基本概念	(1)
1.2 水、海水以及水泥浆液相的导电性能和离子特性	(3)
1.3 多孔材料的电阻率	(8)
1.4 有电极电阻率测试方法	(10)
1.5 无接触电极电阻率测试仪及其测试方法	(11)
1.5.1 无接触电极电阻率测试仪基本组成	(11)
1.5.2 无接触电极电阻率测试仪操作步骤	(12)
1.6 无接触电极电阻率测试的优点	(17)
2 电阻率法表征水灰比和水泥强度等级对水泥浆水化过程的影响	(20)
2.1 水灰比和龄期对孔隙率的影响	(21)
2.2 试验材料、配合比及测试方法	(23)
2.3 水灰比对水泥浆体电阻率曲线的影响	(24)
2.4 24h 电阻率和抗压强度的关系	(26)
2.5 水灰比对水泥浆体电阻率微分曲线的影响及特征点的物理 意义	(27)
2.6 水泥浆体电阻率时间对数曲线和结构形成动力学参数	(31)
2.7 水化减速期动力学参数 K_m 与抗压强度的关系	(32)
2.8 不同水泥等级对水泥浆体电阻率曲线的影响	(33)
2.9 水灰比为 0.4 的水泥浆体 24h 的电阻率与水泥胶砂强度间的 关系	(35)
2.9.1 电阻率测试	(36)
2.9.2 水泥胶砂的拌制和抗压强度测试	(36)
2.9.3 水泥净浆电阻率与胶砂强度的关系	(37)
2.10 本章小结	(38)

3 基于电阻率曲线特征点的计算机模拟	(42)
3.1 基于计算机模拟的水泥水化研究进展	(42)
3.2 水泥水化过程的计算机模拟	(46)
3.2.1 随机生成水泥基材料的二维微观结构	(47)
3.2.2 计算机模拟水泥颗粒的生长过程	(48)
3.2.3 确定水泥水化模拟中的速率参数	(51)
3.3 计算机模拟不同水灰比水泥水化的实例	(53)
3.4 本章小结	(55)
4 用电阻率法和水化热法表征水化动力学过程的内在关系	(59)
4.1 前言	(59)
4.2 实验	(61)
4.2.1 原材料和样品制备	(61)
4.2.2 电阻率测试	(62)
4.2.3 水化热和抗压强度	(63)
4.3 结果与讨论	(63)
4.3.1 基于电阻率和水化热发展的水化阶段的比较	(63)
4.3.2 粉煤灰掺量和不同水泥对水泥浆体电阻率的影响	(65)
4.3.3 粉煤灰掺量和不同水泥对水泥浆体水化热的影响	(67)
4.3.4 基于电阻率和水化热的水化动力学参数及比较	(67)
4.3.5 24h 的水化热和 24h 的电阻率的相互关系	(72)
4.3.6 水化热方法和电阻率方法的对比	(73)
4.4 本章小结	(74)
5 基于电阻率法的计算机模拟缓凝剂对水泥水化影响的研究	(76)
5.1 引言	(76)
5.2 原理和方法	(76)
5.2.1 缓凝剂的缓凝机理	(76)
5.2.2 基于电阻率法的计算机模拟	(77)
5.3 试验材料和方法	(78)
5.3.1 试验材料及样品配合比	(78)

5.3.2	试验方法	(79)
5.4	结果与讨论	(80)
5.4.1	缓凝剂对凝结时间的影响	(80)
5.4.2	缓凝剂对抗压强度和水化度的影响	(80)
5.4.3	水泥浆体的电阻率发展曲线和电阻率微分曲线	(82)
5.4.4	计算机模拟掺有缓凝剂浆体的水泥水化过程	(85)
5.4.5	利用扫描电镜观察掺有缓凝剂浆体的微观结构变化 ...	(90)
5.5	本章小结	(91)
6	用电阻率法确定混凝土结构形成的发展阶段及其动力学参数 ...	(94)
6.1	材料准备和测试方法	(96)
6.1.1	原材料	(96)
6.1.2	混凝土配合比及混凝土的配制	(96)
6.1.3	电阻率测试方法	(97)
6.2	测试结果和讨论	(98)
6.2.1	水灰比为 0.4 和 0.5 时不同骨料含量对电阻率的影响	(98)
6.2.2	基于电阻率微分曲线划分混凝土的结构形成阶段	(99)
6.2.3	相同水灰比条件下不同骨料体积分数对特征点的影响	(102)
6.2.4	相同骨料体积分数条件下不同水灰比对峰值点的影响	(103)
6.2.5	电阻率时间对数曲线和混凝土结构形成动力学参数	(103)
6.3	本章小结	(108)
7	用电阻率法确定混凝土凝结时间	(111)
7.1	凝结的定义和重要性	(111)
7.2	用贯入阻力法测量凝结时间	(112)
7.3	用电阻率表征凝结时间	(113)
7.4	混凝土的非正常凝结	(118)

8 相分布、化学收缩和自收缩	(122)
8.1 变形的类型	(122)
8.2 Powers 公式及基于水化度的相组成	(123)
8.3 化学收缩	(128)
8.3.1 化学收缩的概念	(128)
8.3.2 化学收缩测试方法	(130)
8.3.3 化学收缩与水化过程的关系	(131)
8.3.4 化学收缩与电阻率的关系	(133)
8.4 自收缩	(135)
8.4.1 自收缩的概念	(135)
8.4.2 自收缩的测试方法	(136)
8.4.3 起点测定时间对自收缩结果的影响	(138)
8.4.4 自收缩的机理	(139)
8.4.5 自收缩和化学收缩的内在关系	(140)
8.4.6 自收缩的影响因素	(141)
9 由粉煤灰水泥浆体认识电阻率表征化学收缩及自收缩的关系	(149)
9.1 实验	(151)
9.1.1 原材料与水泥基浆体配制	(151)
9.1.2 凝结时间和抗压强度的测定	(152)
9.1.3 电阻率测试	(152)
9.1.4 化学收缩测试	(153)
9.1.5 自收缩测试	(153)
9.2 结果与讨论	(154)
9.2.1 水泥浆体的电阻率 $\rho(t)$ 、结构密实速率常数 K 及抗压强度 f 之间的关系	(154)
9.2.2 水泥浆体的化学收缩及其与电阻率的关系	(155)
9.2.3 自收缩发展曲线及其与电阻率的关系	(157)
9.2.4 自收缩与线性化学收缩的比例关系	(159)
9.3 本章小结	(161)
编后记	(164)

1 电阻率的基本概念及测试方法

【本章要点】

1. 介绍电阻率和电导率的基本概念；
2. 比较水、海水和水泥浆液相的导电性能和主要离子特性；
3. 关于计算多孔材料电阻率的 Archie 公式；
4. 介绍无电极电阻率测试方法。

1.1 电阻率和电导率的基本概念

材料的导电能力常用电阻 R 或电导 ($1/R$) 来表示,电阻是基于欧姆定律测得的,电阻与外加电压 U 成正比,与电流强度 I 成反比,见公式(1.1)。

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.1)$$

电阻的大小与材料的尺寸相关,与横截面面积 A 成反比,与长度 L 成正比,与电阻率 ρ 成正比,见公式(1.2)。

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.2)$$

电阻率 ρ 是指材料长为 1m、横截面面积为 1m^2 时的电阻,电阻率是用来表示各种材料电阻特性的物理量。电阻率的常用单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ (欧姆·米),电阻率不仅和导体的材料有关,还和导体的温度有关,温度升高,电解质溶液的导电能力增加;而金属导体随温度升高,导电能力下降。

电导率 σ 是电阻率的倒数,其单位是 S/m (西门子/米),有时用 $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 表示。电导率的标准单位是 S/m (西门子/米),实际使用单位为 mS/m (毫西门子/米),常用单位为 $\mu\text{S/cm}$ (微西门子/厘米)。单

位间的换算公式为: $1\text{mS/m}=0.01\text{mS/cm}=10\mu\text{S/cm}$ 。

材料按导电性能可分为超导体、导体、半导体和绝缘体,文献 [1] 给出了不同材料的电导率数值范围,据此可计算出不同材料的电阻率数值范围,如表 1.1 所示。

表 1.1 不同材料的电阻率范围

材料分类	电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)	液相举例	固体举例
超导体	$\rightarrow 0$		
导体	$10^{-8} \sim 1$	W/C=0.4 的水泥浆液相的电阻率为 $0.25\Omega \cdot \text{m}$	
半导体	$1 \sim 10^8$	24h 水泥浆的电阻率为 $4\Omega \cdot \text{m}$, 自来水为 $25\Omega \cdot \text{m}$, 蒸馏水为 $334.4\Omega \cdot \text{m}$	潮湿混凝土的电阻率约为 $100\Omega \cdot \text{m}$, 面干混凝土的电阻率约为 $10^4\Omega \cdot \text{m}$
绝缘体	$\geq 10^8$		绝干混凝土的电阻率约为 $10^9\Omega \cdot \text{m}$

先来做一個簡易的試驗,通過試驗證明強、弱電解質導電性不同。電解質的導電試驗裝置見圖 1.1。操作方法如下:分別取等體積的不同溶液或漿液倒入 5 個燒杯中,依次是自來水、10%NaCl 溶液、水泥漿液相、放置 1h 的水泥漿以及放置 24h 的水泥漿,並分別將兩根碳棒插入 5 個燒杯中,連接電源、燈泡,注意觀察燈泡的明亮程度。

試驗發現,自來水中的燈泡不亮,NaCl 溶液和水泥漿液相中的燈泡很亮,放置 1h 的水泥漿以及放置 24h 的水泥漿中的燈泡較暗。試驗結果表明,NaCl 溶液、水泥漿液相導電性較強。如果用电导率仪或电阻率仪测试,测得的电阻率结果是: $25\Omega \cdot \text{m}$ 、 $0.25\Omega \cdot \text{m}$ 、 $0.25\Omega \cdot \text{m}$ 、 $1\Omega \cdot \text{m}$ 、 $4\Omega \cdot \text{m}$ 。

新拌水泥漿液相的电阻率为 $0.25\Omega \cdot \text{m}$,属于导电范畴;而搅拌 1h 后的水泥漿的电阻率为 $1\Omega \cdot \text{m}$,24h 后的水泥漿的电阻率为 $4\Omega \cdot \text{m}$,属于半导体范畴。

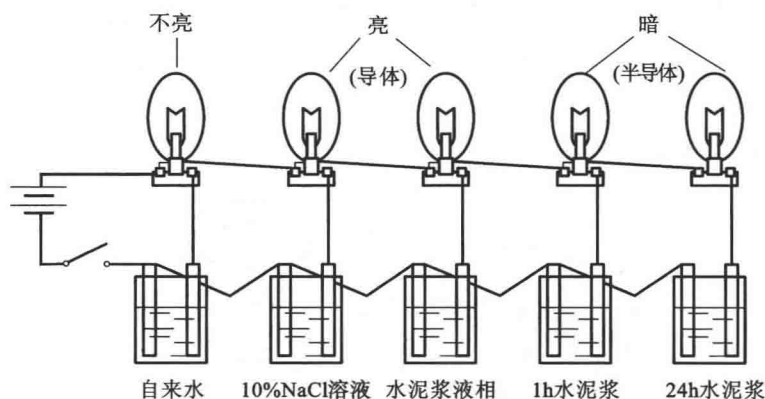


图 1.1 不同电解质的导电试验

1.2 水、海水以及水泥浆液相的导电性能和离子特性

水是生命之源,同样水也是与水泥发生水化反应必不可少的组分。对于海工建筑物来说,海水是一种腐蚀介质,因此,有必要了解水、海水的导电特性和其中的离子特性。水泥浆液相是水泥混凝土的导电介质,所以简要地了解水泥浆液相的导电特性有助于我们更好地了解水泥石体系和混凝土体系的导电性能。

纯水的电导率很小,当水中含无机酸、碱、盐或有机带电胶体时,电导率就会增加。电导率常用于间接推测水中带电荷物质的总浓度。水溶液的电导率取决于带电荷物质的性质和浓度、溶液的温度和黏度等。新蒸馏水电导率为 $0.05 \sim 0.2 \text{ mS/m}$,存放一段时间后,由于空气中的二氧化碳和其他气体溶入,电导率可上升至 $0.2 \sim 0.4 \text{ mS/m}$;饮用水电导率在 $5 \sim 150 \text{ mS/m}$ 之间;海水电导率为 $3000 \sim 4000 \text{ mS/m}$;清洁河水电导率为 10 mS/m 。电导率随温度变化而变化,温度每升高 1°C ,电导率增加约 2%。通常规定 25°C 为测定材料电导率的标准温度。

海水的电导率为 $3 \sim 4 \text{ S/m}$,电阻率为 $0.25 \sim 0.331 \Omega \cdot \text{m}$;海水含有 3.3% 的盐类,也就是 33000 ppm (parts per millions),其中氯化钠