

NGZHA
IUNNINGTU

碱激发矿渣 水泥和混凝土

张兰芳 著

碱激发矿渣水泥和混凝土

张兰芳 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

碱激发矿渣水泥和混凝土 / 张兰芳著. —成都:
西南交通大学出版社, 2018.8
ISBN 978-7-5643-6401-4

I. ①碱… II. ①张… III. ①矿渣水泥②碱矿渣混凝土 IV. ①TQ172.71②TU528.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 206842 号

碱激发矿渣水泥和混凝土

张兰芳 著

责任编辑 杨 勇
助理编辑 王同晓
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>
印 刷 四川煤田地地质制图印刷厂
成品尺寸 170 mm × 230 mm
印 张 11.25
字 数 202 千
版 次 2018 年 8 月第 1 版
印 次 2018 年 8 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5643-6401-4
定 价 56.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

时光匆匆，如白驹过隙，屈指算来，博士毕业已有十二载。这十几年来，一直与碱激发材料为伴，它已然成了我工作、学习中不可或缺的一部分。回顾过往，自己对这一研究方向曾经一度怀疑，担心其能否被大量应用于工程实践，质疑其关键问题能否被解决……近几年，环保的呼声越来越高，国内外学者对碱激发类胶凝材料研究的热情不减，研究成果不断推陈出新，相关标准不断制定与颁布，使得作者信心倍增，坚定了研究的方向，虽成果甚微，但仍心存信念，砥砺前行。

在收集和整理资料的过程中，我更进一步地感受到了碱激发胶凝材料体系的魅力，对各国研究者研究内容之广、之深、之精都深感佩服。也深知，要将这类材料如同硅酸盐水泥材料一样广泛地应用于工程实践中，还有很长的路要走，这条路离不开众多国内外科研工作者更多深入、细致的研究，也需要更多商业、企事业单位的支持和创新尝试。我们有理由相信，通过科教工作者的不断努力，随着研究应用的不断深入和关键问题的逐步解决，在不久的将来，碱激发胶凝材料必将在大量的工程应用中找准其用武之地，发挥其优势性能和重要作用。

目前，关于碱激发胶凝材料的相关著作相对较少，国内主要有《碱矿渣水泥与混凝土》、《碱-激发水泥和混凝土》（译著）、《碱矿渣胶凝材料结构工程应用基础》、《合成纤维增韧碱矿渣混凝土》4部，国外相关类的著作主要有 *Alkali-Activated Cements and Concretes*, *Alkali activated materials*, *Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes* 等，在 *Handbook of Low Carbon Concrete* 中也有所涉及。本书主要汇集、补充了近几年的相关研究成果，例如：

锂渣、石粉、废玻璃、赤泥、稻壳灰等工业废渣、废料的研究，碱激发矿渣水泥基材料中外加剂的研究，碱激发矿渣水泥砂浆和混凝土配合比优化方法，以及纤维增强碱激发矿渣水泥砂浆和混凝土的研究等。同时，为了体现碱激发矿渣水泥基材料的环境性能，本书第 12 章通过具体的量化指标反映碱激发矿渣水泥基材料的“绿色低碳”性能。

本书共分为 12 章，内容以碱激发矿渣水泥为基础，涉及制备碱激发矿渣水泥和混凝土的原材料（碱组分、胶凝组分、外加剂和集料），碱激发矿渣水泥砂浆、混凝土的工作性、力学性能、耐久性、干缩、纤维增强性能及其环境性能等。本书内容结合了我的博士学位论文研究成果及课题组硕士研究生曹胜、张永、梁秋爽和刘丽娜近年完成的研究成果，并对大量的国内外文献资料进行收集和整理，结合国内外碱激发矿渣水泥和混凝土的研究工作进展编写而成。

感谢研究生翟建锦、付彬鸿、宋松松、武君宝、王道峰在收集、整理资料以及文字、图片修订等工作中的付出。编写过程中，黄维蓉教授给予很大的帮助并提出了宝贵的意见和建议。同时，编写、修订和出版工作得到重庆交通大学相关部门的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

对本书中所引用的文献的作者们表示衷心的感谢！

本书得到国家自然科学基金青年科学基金项目（51502029）和重庆市基础科学与前沿技术研究项目（cstc2017jcyjAX0417）的资助，在此表示感谢！

限于作者的学识水平和实践经验，加之时间仓促，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

1 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 碱矿渣水泥及混凝土的发展	2
1.3 本书的特点	4
参考文献	4
2 碱激发剂	5
2.1 水玻璃	5
2.2 氢氧化钠	8
2.3 硫酸钠	10
2.4 碳酸钠	13
2.5 废碱（固、液）	17
参考文献	20
3 胶凝组分	21
3.1 矿渣	21
3.2 锂渣	26
3.3 石灰石粉	28
3.4 废玻璃	30
3.5 赤泥	35
3.6 稻壳灰	37
3.7 其他	41
参考文献	41
4 外加剂	46
4.1 减水剂	46
4.2 引气剂	48
4.3 缓凝剂	49
4.4 减缩剂	52

参考文献	55
5 集 料	59
参考文献	61
6 碱矿渣水泥砂浆、混凝土的配合比设计及优化	63
6.1 响应面法	63
6.2 田口设计法	67
参考文献	68
7 新拌碱激发矿渣水泥混凝土的性能	69
7.1 凝结时间	69
7.2 工作性	72
参考文献	77
8 碱激发水泥、混凝土的力学性能	78
8.1 抗压强度和抗折强度	78
8.2 抗拉强度	85
8.3 弹性模量	88
8.4 应力应变	90
8.5 泊松比	92
参考文献	92
9 碱激发水泥砂浆和混凝土的耐久性	95
9.1 水渗透性和氯离子渗透性	95
9.2 抗冻性	100
9.3 抗碳化性能	102
9.4 耐化学腐蚀性	107
9.5 耐磨性	117
9.6 碱-骨料反应	119
9.7 钢筋锈蚀	121
9.8 泛碱	123
参考文献	127
10 碱激发水泥砂浆和混凝土的干缩	132
10.1 激发剂的影响	132

10.2	外加剂的影响	133
10.3	掺合料的影响	135
10.4	养护条件的影响	137
10.5	纤维的影响	138
	参考文献	139
11	纤维增强碱激发水泥砂浆和混凝土	141
11.1	钢纤维	141
11.2	聚丙烯纤维	145
11.3	玄武岩纤维	152
11.4	碳纤维	153
11.5	玻璃纤维	160
11.6	其他品种纤维	161
	参考文献	161
12	碱激发水泥混凝土的环境性能	164
12.1	碳足迹	164
12.2	生态-力学性能指标	167
12.3	环境协调性指标	168
	参考文献	172

1 绪 论

1.1 概 述

水泥混凝土作为最大宗的人造结构材料,已逐渐遍布于人类生活的各处。在当今的建筑材料市场中,混凝土价格低廉、数量庞大、品类繁多。房屋建筑、公路桥梁、港口码头、石油平台、机场、大坝、隧道、海上、海下等工程的建设都离不开这种人造建筑材料,在现代化的城市和工程建设面前,混凝土发挥着不可替代的作用。

然而,由于混凝土所用的硅酸盐水泥在生产过程中消耗大量的资源和能源,且排放出较多污染环境的物质,使其面临可持续发展的挑战。同时,由于全球的气候变化,当前全世界水泥生产工业的焦点主要集中在如何减少 CO_2 的产生。因此,发展低能耗、低污染、低碳水泥已成为目前研究和开发的热点,研制开发新的胶凝材料,弥补硅酸盐水泥的不足,势在必行。

寻找和发展替代的胶凝材料,可以使用工业、农业、城市建设以及日常消费后的废弃物,例如稻壳灰、木材燃烧灰、甘蔗灰、煤灰以及各种工业矿渣等,作为部分或全部替代硅酸盐水泥的原材料,生产可替代的水泥基材料,减少硅酸盐水泥的利用。同时,利用这些可替代的水泥基材料制备更耐久的混凝土,减少温室气体的排放。M.C.G. Juenger^[1]提出了四类可替代硅酸盐水泥的新型胶结材料:碱激发胶凝材料类、铝酸钙水泥、硫铝酸钙水泥及高硫水泥。

碱激发胶凝材料是一种新型的胶凝材料,是利用磨细的高炉矿渣、粉煤灰、电热磷渣、锂渣、钢渣等工业副产品或火山灰等天然矿物为主要胶凝组分,并用碱化合物或含碱工业废料为激发剂制得的水硬性胶凝材料。一些固体废弃物及工业副产品有火山灰活性或潜在的水硬性,但在常温下很难发生水化,需要碱激发其活性而产生胶凝产品。常见的碱激发剂有碱硅酸盐、氢氧化物、硫酸盐或碳酸盐以及它们的复合等。

碱激发胶凝材料可消化大量对环境不利的废弃物或副产品,生产过程中 CO_2 的排放量能降低 40%~80%,且和硅酸盐水泥相比,在力学性能、抗冻性、抗渗性、耐高温性能、耐化学侵蚀性、降低成本和能源消耗等方面都具有绝对

的优势。因此，碱激发胶凝材料已然成为一种新的且必要的硅酸盐水泥的替代产品，并正引起国内外学者和水泥生产商的广泛关注。

按碱激发胶凝材料的定义，其涵盖的范围很广，包括矿渣-碱，粉煤灰-碱，黏土-碱，碱-石灰-火山灰，矾土-波特兰水泥，波特兰-高炉矿渣及火山灰水泥等。Krivenko^[2]将碱激发胶凝材料分为五大类：矿渣-碱水泥；土聚水泥；粉煤灰-碱水泥；碱-波特兰水泥；碱-铝酸盐水泥。这尽管不是碱胶凝材料的全部，但也包括了这类胶凝材料的大多数。碱激发胶凝材料的研究与开发主要是为配制碱激发水泥砂浆和混凝土服务的。目前，激发水泥砂浆和混凝土制备生产的方法主要有如下几种：

（1）类似硅酸盐水泥，将干燥的胶凝材料和激发剂提前混合，然后再将其与水、骨料及其他组分混合制备成砂浆或混凝土。

（2）当碱性激发剂为浓缩物时，一般将激发剂溶液单独添加到胶凝材料中，然后再与水、骨料和其他的组分混合，制备成砂浆或混凝土。

（3）为了方便施工，将碱性激发剂和水提前按照一定的比例混合成所需要的碱溶液，然后再与胶凝材料、骨料和其他的组分混合。

（4）直接将胶凝材料、激发剂、水、砂、碎石和其他外加剂或掺和料混合生产砂浆或混凝土。

不同的生产过程和方法既要考虑原材料的特性，同时也应考虑工程的实际情况，在保证砂浆和混凝土性能的同时，又要方便施工，以有利于碱激发水泥砂浆和混凝土的工程应用。

总之，水泥混凝土作为一种传统的建筑材料，今后的发展方向必然是既要符合人们的建设需要，又要满足现代人的环保要求，减轻对地球环境的负荷，尽可能地少占用资源，降低能耗，减少废弃物排放，符合可持续发展和循环经济模式。新型混凝土的生产应充分利用我国的工业废渣，如矿渣、粉煤灰、锂渣、石灰石粉、赤泥等，不用或少用水泥熟料，尽可能降低熟料产量，减少水泥生产过程中的环境负荷，保持良性生态平衡，实现水泥混凝土工业发展与环境的协调统一。碱激发胶凝材料正是顺应这一发展潮流，其机理、性能的持续、深入地研究对推动其将来的应用具有非常重要的意义。

1.2 碱矿渣水泥及混凝土的发展

碱激发矿渣水泥作为一种新型胶凝材料，至少在1908年前就已被人们所知。

同时,碱激发矿渣水泥和混凝土良好的耐久性已经在苏联、中国、比利时、芬兰以及澳大利亚等国家得到证明。自 20 世纪 90 年代以来,碱激发水泥的基础研究在国际上蓬勃发展,得出大量的研究成果,但其一直无法像硅酸盐水泥一样在实际工程中得到大量的推广应用,是由于:

(1) 缺乏深入系统的技术(理论和实践)研究和稳定的原材料供应。硅酸盐水泥基材料的研究和应用已经超过 150 年,有着深厚的理论基础和实践经验;同时,生产硅酸盐水泥的石灰石、黏土等资源丰富,价格低廉,方便了硅酸盐水泥的生产。而碱激发水泥的理论基础相对薄弱、应用技术也很有限,且所用的原材料,如矿渣、粉煤灰和锂渣等,在地域上分布不均衡,性能也不稳定。

(2) 缺乏有效的外加剂改善碱激发水泥基材料的性能。自 20 世纪 70 年代以来,外加剂的迅速发展极大地改善了现代硅酸盐水泥基材料的性能,而这些先进的外加剂在碱激发水泥基材料中无法发挥作用。

(3) 实际工程中服务的碱激发水泥基材料的长期性能不明确。大部分的研究都集中在碱激发水泥的水化机理和微观结构上,对其长期耐久性、服役寿命以及和工程性能的结合关注度不够。尽管已有的试验表明,和硅酸盐水泥混凝土相比,其耐久性好,但是,实验室里对耐久性的测试和服务寿命的预测不能完全代表工程实际情况,对实际工程中长期耐久性观察与记录的缺乏,导致碱激发矿渣水泥基材料难以进入市场。

(4) 缺乏适合于碱激发水泥和混凝土的标准。现有的大多数研究都是参照现行的硅酸盐水泥标准或规范进行,对碱激发水泥基材料的设计标准或规范方面的研究不够充分,当碱激发水泥进入市场时,硅酸盐水泥标准不一定适合碱激发水泥,这使得碱激发水泥基材料进入市场具有很大的挑战。

显然,如果将碱激发水泥基材料象硅酸盐水泥材料一样,在市场上大量地推广和应用,将面临巨大的困难。然而,与硅酸盐水泥相比,碱激发水泥又具有一系列优异的性能,例如其需水量小、水化热低、强度高、耐久性好;同时,它还能消纳大量废弃物,大幅度减少 CO_2 的排放量等,这也正是大量研究工作者们一直坚持研究这种材料的原因。近几年,随着环保思想的深入人心,国内外的学者们对碱激发水泥基材料的研究信心十足,研究的热情有增无减。目前,每年有大量的关于碱激发水泥基材料的研究成果被发表,研究论文的数量呈指数级增长,且有些论文出现在世界的顶尖期刊上。

尽管已取得一系列的成果,但今后对碱激发水泥基材料的研究仍要继续加强,具体内容如下:

(1) 加大各种废弃物的利用率,扩大原材料的品种范围,开发适合本体系

的外加剂，改善碱激发水泥基材料的性能；

（2）对各类原材料的处理过程重点进行研究，如原材料的磨细方法、激发方法等，保证碱激发水泥性能的稳定性；

（3）进一步研究这类材料的性能，例如收缩（如机理、改善措施）、徐变、碱集料反应（机理及控制方法）、泛碱（机理及预防措施）、抗碳化性（如评价方法、指标）等方面，对不同胶凝组分之间的相互作用、微观结构、水化机理等进行深入系统的研究；

（4）加强实验室测试数据与在实际工程中服务性能之间的联系研究；

（5）研究制定出适合于这类材料的标准或规范。

1.3 本书的特点

本书主要以碱激发矿渣水泥为基础，讨论碱激发水泥混凝土中的原材料来源和性能、碱激发水泥基材料（砂浆、混凝土）的工作性能、力学性能、耐久性、干缩、环境性能以及各种纤维增强碱激发矿渣水泥基材料的性能；同时，对影响碱激发矿渣水泥基材料性能的机理进行初步的探讨。

参考文献

- [1] JUENGER M C G, WINNEFELD F, PROVIS J L, et al. Advances in alternative cementitious binders [J]. Cem Concr Res, 2011, 41(12): 1232-1243.
- [2] KRIVENKO P V. Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability, //JUSTNES H. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, Amarkai and Congrex Göteborg. Gothenburg, Sweden, 1997: 46-50.

2 碱激发剂

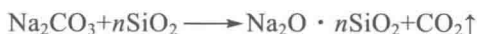
碱激发剂是碱激发矿渣胶凝材料的重要组成部分,根据化学组成,碱激发剂主要包括苛性碱(MOH)、非硅酸盐的弱酸盐(例如 M_2CO_3 、 M_2SO_3 、 M_3PO_4 、MF等)、硅酸盐($M_2O \cdot nSiO_2$)、铝酸盐($M_2O \cdot nAl_2O_3$)、铝硅酸盐 $[M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2 \sim 6) SiO_2]$ 以及非硅酸盐的强酸盐(M_2SO_4)等。目前应用最多的碱激发剂是NaOH、水玻璃、硫酸钠、碳酸钠及他们的复合。本章除了介绍常用的几种激发剂的生产、成分、性能、激发机理及其应用等外,还介绍了废碱的来源和组成。

2.1 水玻璃

水玻璃俗称“泡花碱”,是一种重要的硅化工产品,不仅可以直接使用,还可以对其进行深加工,生产出一系列产品,应用在各行各业。水玻璃是一种可溶于水的碱金属硅酸盐,根据其碱金属氧化物的不同,可分为硅酸钠水玻璃、硅酸钾水玻璃、硅酸锂水玻璃、硅酸盐季胺水玻璃和钾钠硅酸盐水玻璃等。目前,硅酸钠水玻璃的应用最为广泛。

2.1.1 水玻璃的生产

生产水玻璃的方法有湿法和干法两种。湿法生产又分为传统湿法工艺和活性 SiO_2 常压生产工艺两种。传统湿法工艺是将石英砂和苛性钠溶液在压蒸锅(2~3个大气压)内用蒸汽加热并搅拌,使其直接反应而成液体水玻璃;活性 SiO_2 常压生产工艺是在常压下利用工业副产品或者下脚料中的活性 SiO_2 加热与烧碱反应生成硅酸钠。干法(碳酸盐法)生产是将石英砂和碳酸钠磨细拌匀,在熔炉内于1300~1400℃温度下熔化,按反应生成固体水玻璃,然后在水中加热溶解而成液体水玻璃。反应方程式如下:



$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 分子式中的 n 值为硅酸钠中氧化硅和氧化钠的分子比, 称为水玻璃的模数, 用 M_s 来表示, 一般为 1.5~3.5, 是水玻璃的重要参数。模数越大, 水玻璃在水中的溶解能力越低, 胶体组分含量相对增多, 黏结能力、强度、耐酸性和耐热性也越高, 但难溶于水, 不易稀释, 不便施工。建筑工程中常用的水玻璃是硅酸钠水玻璃 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, 简称钠水玻璃) 和硅酸钾水玻璃 ($\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, 简称钾水玻璃), 常用的模数为 2.6~3.0。

在生产低模数的水玻璃时, 块状的硅酸钠吸收空气中的水蒸气和二氧化碳, 会在水玻璃表面生成一层白色的碳酸盐膜, 使水玻璃失去透明性, 所以, 低模数水玻璃是不能在潮湿空气中长期放置的。高模数的水玻璃可以长期暴露在空气中^[1]。

2.1.2 水玻璃的水解及性能

1. 水玻璃的水解

根据 M_s 的大小, 水玻璃分中性和碱性水玻璃。 $M_s \geq 3.0$ 为中性水玻璃, $M_s < 3.0$ 为碱性水玻璃, 但不管是中性还是碱性水玻璃, 水解后的水溶液均呈碱性, pH 在 11 到 12 之间^[2]。水玻璃的水解产物多硅酸又较难电离, 因此, 反应比较强烈, 反应式如下:



由于低 M_s 的水玻璃中氧化钠的含量较高, 其中的硅酸根离子易溶解出来与水发生水解反应。因此, 低模数的水玻璃易水解, 但浓度太高时则不利于发生水解反应。这是因为当溶液的浓度太高时, 相应的 NaOH 含量就较高, 会与水玻璃所生成的硅酸反应, 生成新的硅酸钠, 所以, 硅酸钠水解就会被抑制。

2. 水玻璃的性能

与普通的钠盐相比, 水玻璃有着特殊的物理和化学性质, 例如, 熔点、沸点高、硬度大, 具有一定的化学稳定性, 水解呈碱性, 在高温高压下才能溶于水, 其水溶液具有一定的黏性等, 这些性质使得它具有一定的特殊性能:

(1) 黏结能力强、强度高。水玻璃在硬化后, 其主要成分为二氧化硅凝胶和氧化硅, 因而具有较高的黏结力和强度。用水玻璃配制的混凝土抗压强度可达 15~40 MPa。

(2) 耐热性好。水玻璃不燃烧, 耐热性好, 在高温下硅酸凝胶干燥得更加强烈, 强度并不降低, 甚至有所增加。

(3) 耐酸能力强。由于水玻璃硬化后的主要成分是二氧化硅, 它可以抵抗除氢氟酸、过热磷酸以外的几乎所有的有机和无机酸的作用。

(4) 耐碱性和耐水性差。由于水玻璃在加入促凝剂后不能完全硬化, 仍有一定的 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 。 SiO_2 和 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 均可溶于碱, 且 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 可溶于水。实际中, 常采用中等浓度的酸对已硬化的水玻璃进行酸洗处理来提高耐水性。

根据《工业硅酸钠》(GB/T 4209—2008), 液体硅酸钠分为液-1、液-2、液-3、液-4 四种型号, 具体技术要求见表 2-1。

表 2-1 工业液体硅酸钠要求

指标项目		铁(Fe) /%	水不溶物 /%	密度(20 °C) /(g/mL)	氧化物 (Na_2O)/%	二氧化硅 (SiO_2)/%	模 数
液-1	优等品	≤ 0.02	≤ 0.10	1.336 ~ 1.362	≥ 7.5	≥ 25.0	3.41 ~ 3.60
	一等品	≤ 0.05	≤ 0.40				
	合格品	—	≤ 0.50				
液-2	优等品	≤ 0.02	≤ 0.10	1.368 ~ 1.394	≥ 8.2	≥ 26.0	3.10 ~ 3.40
	一等品	≤ 0.05	≤ 0.40				
	合格品	—	≤ 0.50				
液-3	优等品	≤ 0.02	≤ 0.20	1.436 ~ 1.465	≥ 10.2	≥ 25.7	2.60 ~ 2.90
	一等品	≤ 0.05	≤ 0.60				
	合格品	—	≤ 0.80				
液-4	优等品	≤ 0.02	≤ 0.20	1.526 ~ 1.559	≥ 12.8	≥ 29.2	2.20 ~ 2.50
	一等品	≤ 0.05	≤ 0.80				
	合格品	—	≤ 1.00				

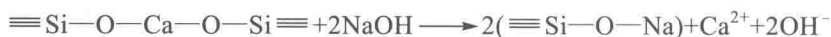
2.1.3 水玻璃激发矿渣的机理

水玻璃激发矿渣的反应过程如下:

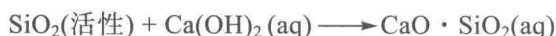
(1) 硅酸钠水解与硅胶化:



(2) 矿渣的表面激发: 溶液中 OH^- 离子穿透矿渣表面, 进入玻璃体内部空穴与 Ca^{2+} 反应, 导致亚稳态的玻璃体解体, 产生游离的 Ca^{2+} 和 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 离子。即:



(3) 水化硅酸钙 (C-S-H) 形成: 由于 Ca^{2+} 扩散速度较大, 较快进入溶液中, 并与活性 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 发生反应, 生成低碱度的 C-S-H 凝胶。即:



由以上反应过程可见, 水玻璃对于矿渣的激发本质是强碱激发, 且具有双重激发的效果。水玻璃能够提供 OH^- , 形成强碱溶液, 促进矿渣玻璃体中的富钙相分解出 Ca^{2+} 和 Al^{3+} ; 同时, 也促使富硅相的 $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ 和 $\equiv\text{Al}-\text{O}-\text{Al}\equiv$ 键断裂, 形成 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 和 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 进入液相。矿渣玻璃体的富硅相若仅有 OH^- 离子的解聚作用, 解聚出的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 数量有限且反应相对较慢, 但水玻璃能及时提供 $[\text{SiO}_4]^{4-}$, 加速 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 与 Ca^{2+} 及 Al^{3+} 等离子们的缩聚反应, 生成胶凝型物质, 故起到双重激发的效果。

2.1.4 水玻璃的应用

水玻璃的用途非常广泛, 可用于肥皂及洗涤剂工业、硅制品工业、造纸及助染、漂白、浆纱等轻纺工业和铸造工业中; 同时, 也可用作黏结剂和填充剂、用在耐火材料、陶瓷材料及其制品中以及涂料工业、制糖工业、冶金工业等各行各业的各个领域。

2.2 氢氧化钠

氢氧化钠, 俗称火碱或烧碱, 其纯品为无色透明四方晶系晶体, 因常含少许氯化钠和碳酸钠而不透明, 是一种常见的化工原料。

2.2.1 氢氧化钠的生产

氢氧化钠是化学实验室中一种必备的化学品, 亦为常见的化工产品之一。工业上生产烧碱的方法有苛化法、隔膜电解法和离子交换膜法三种。

1. 苛化法

用纯碱（碳酸钠）溶液和石灰为原料，于 99 ~ 101 °C 进行苛化反应，生成氢氧化钠（烧碱）溶液和碳酸钙沉淀（苛化泥）。化学反应式如下：



滤去碳酸钙沉淀等不溶物后，将溶液蒸发浓缩至 40% 以上，制得液体烧碱。将浓缩液进一步熬浓固化，制得固体烧碱成品。

2. 隔膜电解法

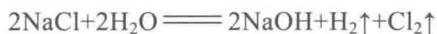
是目前电解法生产烧碱最主要的方法之一。是利用多孔渗透性的隔膜材料作为膜层，把阳极产生的氯气与阴极产生的氢氧化钠和氢气分开。具体反应式如下：



该法生产强度较小、产品纯度较低，环境污染也较大。

3. 离子交换膜法

电解食盐水，即应用化学性能稳定的全氟磺酸阳离子交换膜，将电解槽的阳极室和阴极室隔开。具体反应式如下：



该法所制的烧碱纯度高，投资小，对环境污染小。离子膜法是电解法生产烧碱的发展方向。

除了液态产品外，生产的烧碱有块装、片状、棒状、粒状四种固态形式。这些不同形态的氢氧化钠，化学组成相同，但颗粒尺寸不同。

2.2.2 氢氧化钠的性质

氢氧化钠的熔点为 318.4 °C，密度为 2.13 g/cm³，易溶于水，溶解度随温度的升高而增大，溶解时能放出大量的热，水溶液呈强碱性，易溶于甲醇、乙醇和甘油，不溶于丙酮、乙醚和苯等溶剂。其水溶液是一种无色，有涩味和滑腻感的液体，具有强烈的刺激性和腐蚀性，易吸收空气中的 CO₂ 变为 Na₂CO₃，与酸作用生成盐。