

从混凝土角度

CONG HUNNINGTU JIAODU

谈水泥生产

TAN SHUINI
SHENGCHAN

◎ 胡如进 主 编

◎ 王新频 蔡成军 副主编



化学工业出版社

从混凝土角度谈水泥生产

胡如进 主 编
王新频 蔡成军 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

从混凝土角度谈水泥生产/胡如进主编. —北京:
化学工业出版社, 2007. 10
ISBN 978-7-122-01190-9
I. 从… II. 胡… III. 水泥-研究 IV. TQ172
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 146305 号

责任编辑: 常 青
责任校对: 宋 夏

装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市延风装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 23½ 字数 589 千字 2007 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010 64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

近几年,我国的水泥工业取得了持续、快速的发展,水泥质量也得到了较大的提高。同时,工程建设要求水泥产品不仅要满足于符合国家有关标准,而且要更加注重水泥应用于配制混凝土时的使用性能。近年来混凝土技术取得了突破性进展,预拌混凝土及高性能混凝土发展迅速,对水泥的性能提出了新的要求。水泥企业也常收到用户在使用水泥过程中出现问题的投诉,如水泥与混凝土外加剂适应性不好,混凝土的用水量偏高、凝结时间异常以及容易出现裂缝等,但水泥检测结果却是符合国家标准的。也就是说,同样符合国家标准的水泥在配制混凝土时,在水泥的用量、与外加剂的适应性、混凝土工作性能及控制裂缝等方面存在较大的差异。所以,作为水泥生产企业,为应对日益激烈的市场竞争,更好地满足客户的需要,其产品不仅要符合国家标准的要求,更要满足混凝土应用的需要。

在我国,水泥与混凝土分属于两个行业,水泥生产技术人员对混凝土技术及其进展不甚了解。水泥的性能对混凝土性能有什么影响,现代混凝土究竟需要什么样的水泥产品以及如何生产,已是广大水泥工作者日益关心的问题。《水泥》杂志近几年刊登了许多这方面的文章,对这些问题进行了深入的探讨。应广大读者的要求,我们对这些文章进行了精选、分类,并从其他期刊中精选少量文章,汇编了本书。其中选自《水泥》杂志的文章未标注出处,选自其他期刊的文章均标明。这些文章中不仅有对国内技术的介绍,也有关于国外水泥进展的综述,从中可以更全面地了解混凝土对水泥使用性能的要求,以及水泥生产中所采取的相应措施。文章的作者既有水泥行业的专家、学者以及生产企业的技术人员,又有混凝土行业的专家、权威和混凝土搅拌站及施工单位的技术人员,他们从不同的角度阐述了各自的看法和建议。因此,本书对水泥生产企业、科研设计单位的技术人员和管理人员有较强的实用性和参考价值,同时对混凝土行业的技术人员选用水泥产品也有一定的参考价值。

在此,向本书所有被选录文章的作者、期刊和为本书提供帮助的同志致以谢意!读者在上述方面有新的科技成果,也希望及时在《水泥》杂志上发表介绍。

由于时间仓促,本书难免有疏漏和不妥之处,恳请读者指正。

编者

2007年9月

目 录

第一部分 从混凝土角度评价水泥

优质水泥的评价	吴笑梅	樊粤明	(3)
现代混凝土需要什么样的水泥	廉慧珍	韩素芳	(8)
高性能混凝土对水泥品质特征的要求	周 群	周堂贵	(16)
关于预拌混凝土所用水泥的看法	包先诚	冯 云	赵云中 (20)
通过两个工程实例提出对水泥生产的建议	韩仁海	杨文科	(27)
关于我国水泥生产现状和发展方向的思考		杨文科	(31)
从混凝土角度讨论道路水泥的矿物组成	王善拔	陈义兵	(35)
水泥生产工艺与混凝土耐久性的关系		喇华璞	(44)
再说水泥生产和混凝土的匹配		喇华璞	(48)
硅酸盐水泥材料性能方面的新进展		乔龄山	(50)
硅酸盐水泥的性能及其应用		乔龄山	(56)

第二部分 水泥对混凝土性能的影响

水泥和缓凝剂对混凝土凝结时间的影响——兼论预拌混凝土的超缓凝及其预防	王善拔	贾怀锋	(81)
水泥质量波动对预拌混凝土性能的影响		林永权	(88)
不同生产工艺的水泥配制混凝土的性能研究	吴笑梅	樊粤明	林 东 陈东河 张艳铃 (96)
水泥粉磨工艺对混凝土性能的影响	邓鹏翔	顾 快	(103)
掺有不同石膏的水泥对混凝土性能的影响	李浩武	蔡永万	(107)
工业氟石膏作水泥缓凝剂对水泥和混凝土性能影响的研究		陈小迅	(113)
混合材品种和成分对水泥使用性能的影响		苏延任	(118)
水泥水化热对混凝土早期开裂的影响		胡如进	(122)
微膨胀型中热水泥在三峡二阶段工程混凝土中的应用		史 迅	(128)

第三部分 提高水泥使用性能的技术措施

专题一 综合性能			(132)
优质水泥的生产技术	吴笑梅	樊粤明	(133)
高性能水泥研究进展与评述	张大康	汪 澜	(137)
珠江水泥厂配料方案及其水泥特性的研究			
.....	吴笑梅	樊粤明	钟景裕 郑利强 盘世琛 林永权 (150)
混凝土第二掺和料及水泥厂发展掺和料产业的思考		林永权	(155)

适用于预拌混凝土的粉煤灰水泥的研制	林永权	(163)
水泥颗粒级配的优化	胡如进 李 琳 王善拔	(170)
适于配制高性能混凝土的硅酸盐水泥及其胶凝材料的最佳颗粒级配	赵东镐	(174)
影响道路水泥干缩率的因素及对策	侯 坤	(182)
提高水泥稳定性的因素分析	韦爱玲 王永城	(188)
专题二 水泥与外加剂的相容性		(192)
关于水泥与超塑化剂相适应性的几个问题	王善拔	(193)
用 Marsh 筒法研究水泥与减水剂的适应性问题	吴笑梅 樊粤明 简运康	(200)
Marsh 筒法量化评价水泥与减水剂流变学相容性的探讨	吴笑梅 文梓芸 樊粤明	(204)
超塑化剂与水泥相容性测定方法应用技术研究	徐海军 文梓芸	(210)
水泥与减水剂相容性的评价方法——胶砂扩展度法	胡 凌 黄丰龄 廖晓军	(214)
Marsh 筒法和净浆流动度法用于水泥与减水剂适应性测试的比较	肖忠明 郭俊萍 席劲松 宋立春 陈 萍 王文茹	(218)
水泥与多种高效减水剂相容性的统计性研究	张大康	(223)
熟料烧成工艺条件对水泥与高效减水剂相容性的影响	罗云峰 卢迪芬 樊粤明	(230)
水泥熟料中间体的析晶程度对水泥与高效减水剂相容性的影响	罗云峰 樊粤明 卢迪芬 吴笑梅	(235)
熟料率值及矿物组成不同的水泥对高效减水剂吸附性能的研究	王 强 王亚丽 张 丽 兰明章 王子明	(242)
调整熟料中的 C_3A 含量改善水泥对外加剂的适应性	赵凤英 刘文生	(245)
粉磨细度对水泥与外加剂相容性的影响	肖军仓 卜建军	(248)
磷石膏作缓凝剂的水泥与减水剂相容性的研究	谢 燕 吴笑梅 樊粤明	(252)
混合材对水泥与减水剂适应性的影响研究	孙 媛 孙振平	(258)
高效减水剂对水泥熟料的助磨作用及与水泥熟料相容性问题的探讨	姚丕强	(263)
水泥与外加剂适应性的探讨	曹文奎	(268)
影响水泥净浆流动度的几个因素浅析	文柏贞	(275)
水泥性能与减水剂相容性改善体会	张德英 周 彬	(280)
助磨剂组分与水泥超塑化剂适应性的初步探讨	兰明章 王建成 崔素萍 王亚丽	(283)
多羧酸系高效减水剂与水泥的相容性	李长太 钱觉时 贾兴文	(287)
聚羧酸系减水剂与水泥相容性的研究	周永辉 林 东 罗云峰 秦中华	(290)
可溶碱对水泥/氨基磺酸盐减水剂相容性的影响	阎培渝 王 悦	(293)
专题三 水泥及混凝土的需水性及流动性		(297)
水泥颗粒分布和石膏匹配与用水量及凝结特性的关系	乔龄山	(298)
影响水泥净浆流动度的因素	石小芳 徐俊鹏 唐名德 黄抢胜	(316)
熟料硫碱比对水泥浆流变性的影响	乔丽娜 宓振军 乔立军 杨克锐	(320)
改变原材料种类提高水泥的流变性能	刘圣忠 刘吉廷 王学实 程子敏	(326)
水泥净浆流动度与混凝土流变性能相关性试验	张大康	(330)
影响水泥标准稠度用水量的因素探讨	余柏新	(336)
辊压机粉磨工艺对水泥需水性和混凝土坍落度的影响	李绍先 徐圣安	(341)
降低熟料标准稠度用水量的过程介绍	解凤春	(343)

混合水泥密度对标准稠度用水量的影响 赵东镐 (347)

第四部分 水泥质量投诉及解决

与水泥质量相关的投诉及处理方法 包先诚 冯 云 赵云中 (353)

混凝土表面“起粉”的原因分析及控制措施 吴笑梅 樊粤明 简运康 (361)

掺加沸石解决混凝土表面“起砂”的实践 杨兆春 (365)

关于水泥施工安定性问题的几点探讨 宋春业 (367)

第一部分

从混凝土角度评价水泥

优质水泥的评价

吴笑梅^{1,2} 樊粤明^{1,2}

(1. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东广州 510640;

2. 特种功能材料及其制备新技术教育部重点实验室, 广东广州 510640)

1 对水泥品质的认识

水泥胶砂强度的高低一直以来是评价水泥质量的重要标准, 实施 ISO 方法后, 水泥的检测性能与国际接轨, 但与其在现代混凝土中的作用相差还较远。水泥胶砂强度高是水泥实物质量一方面的体现, 却不是混凝土质量的唯一保证。水泥生产技术人员普遍认为水泥的富余强度越高, 产品质量越好, 产品质量的改善往往只体现在胶砂强度的提高方面; 施工单位则普遍认为水泥的早期强度越高, 混凝土强度发展得越快, 其质量越有保证。而且水泥早期强度越高, 施工速度可以加快, 成本可大幅度下降。在市场竞争日益激烈的情况下, 水泥生产企业为了迎合施工单位的需要, 对水泥胶砂强度的追求已远超出国标的要求, 早强与高强被视为优质水泥的唯一准则。这种对优质水泥的片面认识已经形成强大的力量, 引导着水泥生产企业及技术人员不断为之而努力。然而正是这种认识给水泥生产与混凝土工程带来了一系列的问题。水泥生产更加依赖于优质的石灰石资源 (CaO 含量 $> 51\%$), 熟料烧成热耗增加, 水泥比表面积提高, 粉磨能耗增大, 生产成本上升。早强水泥在配制混凝土时, 虽然混凝土的强度等级在不断提高, 但结构内应力增大, 开裂现象增多, 混凝土工程耐久寿命遭到质疑^[1]。针对目前水泥生产与使用的技术人员的认识及混凝土工程所面对的问题, 本文提出了从现代混凝土生产技术及性能 (如高工作性能、高耐久性能、高体积稳定性、低生产成本及其他特殊性能) 要求出发评价水泥品质优劣, 并提出了生产优质水泥的技术措施。为此将分两篇文章 (《优质水泥的评价》、《优质水泥的生产技术》) 来论述。

2 优质水泥的评价方法

水泥产品的国家标准要求是其基本性能与品质的保证, 不是优质水泥的标准。作为混凝土的主要胶凝材料, 水泥品质的优劣应从其配制现代混凝土的性能要求来衡量。不考虑混凝土综合性能的要求, 一味盲目迎合施工速度对水泥高早强的需要, 往往是造成混凝土温升大、结构应力增大、早期开裂增多、耐久性较差的主要原因之一, 也会造成水泥生产成本增大, 资源浪费等问题。下面从现代混凝土生产技术及混凝土 5 项主要性能来评价对水泥品质的要求。

2.1 混凝土的工作性能

预拌混凝土对拌和物的施工性能要求比较严格。它关系到混凝土材料的可施工性及均匀性。若混凝土拌和物施工性能较差, 出现振捣不密实, 或骨料与砂浆分离较严重, 混凝土的结构缺陷增多, 混凝土结构将无法达到其设计的其他性能要求, 导致建筑物存在质量隐患。故拌和物的施工性能是混凝土其他各项性能的基础。它是指在设定 W/C 及一定外加剂掺量条件下, 所达到的坍落度及其经时损失、扩展度和可泵性等各项性能的总称。影响这一性能的因素很多, 如配制技术, 外加剂、砂、石、掺和料等材料, 但水泥也是重要的因素之一。

与水泥的关系主要体现在水泥与外加剂的相容性及其保水性。

2.1.1 水泥与外加剂相容性

水泥与外加剂的相容性是从水泥净浆流变性能角度评价两者对混凝土拌和物工作性能作效果的一项指标。它用 Marsh 筒^[2]或净浆流动度^[3]方法所检测到的饱和点掺量、饱和点 Marsh 时间（饱和点流动度）及 Marsh 时间（流动度）经时损失三者来进行综合评价。相容性较好，即饱和点掺量小，饱和点对应的流动性能好，流动性经时损失小。相容性好的水泥在配制混凝土时可以用较少的外加剂或较少的水泥来达到较好的流动性能和较小的流动性经时损失；可用较低的成本获得优质的混凝土^[4]，并且可显著改善混凝土早期开裂现象。经较大的调查试验研究，作者认为对于 42.5 等级的水泥，若在 0.35 水灰比条件下，用普通中浓萘系的减水剂，饱和点掺量小于 1.4%，饱和点 Marsh 时间小于 12s，且 1h Marsh 时间损失较小时，水泥与外加剂的相容性较好。

相容性问题是伴随现代混凝土技术而出现的。水泥产品标准中对此项性能没有明确的规定，水泥生产企业不了解相容性的概念、意义及没有相应的检测手段，更不了解控制和改善水泥与外加剂相容性的技术措施。目前，水泥与外加剂相容性差及不稳定的现象十分普遍，造成混凝土拌和物施工性能大幅度波动。若混凝土生产中用调整砂石含水率的方法来调整混凝土的施工性能，就会造成混凝土强度的较大波动。

2.1.2 水泥的保水性

水泥的保水性反映了水泥浆中水泥颗粒与水分离的难易程度。它与水泥的颗粒分布及比表面积有着紧密的关系。保水性较好的水泥，在配制混凝土时有利于减少内部的泌水腔和表面的泌水层，改善混凝土的界面结构与表面硬度，可提高混凝土的匀质性、强度及耐久性能^[5]。

由此可见，从混凝土拌和物的工作性能要求出发，水泥具有良好及稳定的外加剂相容性及保水性是配制优质混凝土必须具备的条件，这是评价优质水泥的重要指标之一。

2.2 混凝土的力学性能

混凝土的力学性能取决于其结构的致密程度及水化产物的黏结力。结构的致密程度主要由混凝土的水灰比（水胶比）决定，水化产物的黏结力实际是通过胶凝材料的胶凝性（胶砂强度）来体现。过去大部分混凝土由于没有掺用外加剂，为达到工作性能的水灰比较大，混凝土的强度往往依赖于水泥胶砂强度的提高。随着混凝土技术的发展，外加剂与矿物掺和料的广泛应用，配制同强度等级混凝土的水灰比较以前大幅度下降，混凝土结构更加致密，因此，提高混凝土的力学性能已不仅限于依赖提高水泥的胶砂强度来实现，通过减少单方用水量来提高混凝土各项性能的空间往往更大。水泥生产的技术人员多数只考虑从提高水泥胶砂强度来提高水泥的质量，而忽视了或尚未认识到水泥对混凝土用水量的影响。若提高水泥胶砂强度是通过增加早强矿物、增加水泥比表面积来达到的，则会引起需水量大及与外加剂相容性差的问题，这样既增加了水泥的生产成本，又不利于配制良好力学性能的混凝土，造成资源浪费。

目前，市场对水泥早期强度（3d）的要求，实际是施工单位的要求，其目的是加快施工周期，提高模板使用率，降低施工成本。这对水泥性能是一种误导。水泥的早期强度越高，水化热早期集中释放，导致混凝土内部温升快且高，冷却后残余的温度应力较高，混凝土的抗裂性能下降^[6]。相反，作者认为水泥的后期（28d）及远龄期（90d 或 180d）强度十分重要。这是因为混凝土是多相复合材料，不可避免存在结构缺陷，而且它通常处于日晒雨

淋、干湿交替、冻融循环,甚至更加恶劣的环境条件下,在漫长的使用过程中强度损失或受到损害或破坏是不可避免的。要保持混凝土材料的耐久性,强度的补充与自愈合能力非常重要,其远龄期的强度增长不可忽视。由此可见,水泥的 3d 强度是施工的要求,水泥的 28d 强度是混凝土设计强度的需要,而远龄期强度指标则是混凝土耐久性(强度补充及自愈合)的需要。合理或较低的早期强度、较高的后期及远龄期强度是优质水泥重要的性能指标之一。

随着水泥混凝土道路、大跨度结构工程的增多,对混凝土抗折强度也提出了较高的要求,在混凝土抗压强度等级相同的情况下,若水泥的抗折强度较高,则混凝土的抗折强度也较高。高等级的道路混凝土要求优质水泥 28d 抗折强度最好达到 9.0MPa 以上。

2.3 混凝土的耐久性能

混凝土耐久性能主要包括混凝土的抗渗性、抗冻性与抗腐蚀性。提高混凝土耐久性对延长建筑工程的使用寿命,减少建筑物维修加固甚至重建费用均有重大的意义。提高混凝土材料的耐久寿命也是实现可持续发展的重要途径之一。目前提高耐久性的主要渠道有:①提高混凝土的致密性;②改善水泥水化产物的组成;③提高混凝土的远龄期强度。提高耐久性的责任部分落在混凝土配制技术上,但水泥性能是其中一个重要影响因素。若水泥的标准稠度用水量低,与外加剂的相容性好,保水性好,则有利于提高混凝土结构的致密性;水泥熟料中 $f\text{-CaO}$ 、 C_3A 含量低,硅酸盐矿物含量多,通常其水化产物具有更强的抗腐蚀能力;水泥中 C_2S 含量较高,颗粒分散,则有利于提高水泥的远龄期强度。这些均有利于提高混凝土的耐久性能。本文建议,优质水泥的熟料中 $f\text{-CaO}$ 含量小于 1%, C_3A 含量小于 6%, C_2S 含量大于 20%。

2.4 混凝土的体积稳定性能

工程建设中,混凝土结构开裂现象十分普遍,是混凝土损坏的主要原因之一。混凝土开裂与设计、施工、混凝土配制技术以及混凝土配制材料密切相关。混凝土因水泥安定性不合格而产生膨胀开裂的现象已较少见,大多数是由混凝土的自生收缩、干燥收缩、冷缩及碳化收缩而产生。在配制混凝土时可采用各种技术来减少混凝土的收缩开裂。要减少混凝土的开裂,优化水泥的性能是不可忽视的工作。

2.4.1 自生收缩与水泥的关系

混凝土的自生收缩往往出现在水灰比(水胶比)较低的情况(通常小于 0.45),在较早龄期产生,它与水泥的早期水化速度有关。一般水泥的早期水化速度越快(C_3A 含量越多,比表面积越大,细颗粒越多, C_3S 水化加速期来得越早等),早期水化热越大,混凝土的凝结时间越短,自生收缩来得也越早、越快,易导致混凝土开裂。由此可见,早强水泥和混凝土拌和物的浇注温度较高时,水泥早期水化速度加快,易产生较大的自生收缩。因此,要减少混凝土的自生收缩,就水泥而言,要降低水泥早期水化速度,尽量降低出厂水泥的温度($<75^{\circ}\text{C}$)。

2.4.2 干燥收缩与水泥的关系

混凝土的干燥收缩与其毛细孔尺寸、数量、连通情况密切相关,即与混凝土的配制技术和施工养护关系较大。但也与水泥水化产物的种类及致密程度有关,通常 C_3A 的水化产物干燥收缩较大;水化产物堆积越致密,干燥收缩越小。

2.4.3 冷缩与水泥的关系

水泥水化时的放热使大体积混凝土内外产生较大的温差,在冷却过程中混凝土结构会产

生巨大的温度应力，甚至导致混凝土开裂。一般混凝土内部温升可达 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，中心部位最高温度可达 $80\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。虽然在施工过程中可不惜代价地采用加冰等方法降低拌和物的人模温度，铺设冷却水管以及加强外保温等措施减少温度应力及防止开裂，但水泥水化热的大小仍直接影响混凝土的绝热温升及温度应力。对于 C50 的混凝土，在水泥用量为 $350\sim 380\text{kg}/\text{m}^3$ 的条件下，若水泥 3d 水化热相差 $30\text{kJ}/\text{kg}$ ，混凝土的绝热温升可相差 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 。因此较低的水化热也是优质水泥的重要指标之一。目前，广东省市场上 P·II 42.5R 水泥水化热的情况如表 1 所示。而 42.5 等级的低热硅酸盐水泥国标要求 3d 水化热小于 $230\text{kJ}/\text{kg}$ ，7d 水化热小于 $260\text{kJ}/\text{kg}$ 。表 1 中的较高水平与之相比，3d、7d 水化热相差 $30\sim 40\text{kJ}/\text{kg}$ 以上；一般水平的相差 $60\sim 80\text{kJ}/\text{kg}$ 以上。因此，在保证混凝土的施工及力学性能的前提下，应大力提倡使用中低热的水泥品种，这对混凝土寿命及社会节能、可持续发展均十分重要。

表 1 广东省部分 P·II 42.5R 水泥水化热的情况 单位：kJ/kg

P·II 42.5R 水泥	3d	7d	28d
较高水平	260~270	305~315	345~355
一般水平	285~295	330~340	370~380

2.5 特殊混凝土工程的性能

2.5.1 高等级水泥路面混凝土对水泥性能的要求

高等级水泥混凝土道路设计耐久寿命为 $30\sim 50$ 年，而实际上我国现有很多水泥混凝土路面在通车 $5\sim 10$ 年后，就出现严重的断裂和破损，不适合继续行车，造成资源能源及建设费用浪费很大。这里有路基、施工和超载等的原因，也有水泥混凝土材料自身的原因。很多路面在投入使用前就已出现裂缝或表面“起粉”等耐磨性极差的现象。要建造优质的混凝土路面，就水泥方面应考虑：具有高抗折强度（28d 达到 9.0MPa 以上）、高耐磨性（ $\leq 3.6\text{kg}/\text{m}^2$ ，力争 $\leq 3.0\text{kg}/\text{m}^2$ ）、致密的浆体及混凝土结构（颗粒分布好，需水量低，外加剂相容性好）、低水化热。

2.5.2 管桩混凝土对水泥性能的要求

由于管桩要求较高蒸压强度（C80 以上）和高抗冲击性，混凝土水胶比在 $0.25\sim 0.26$ 左右，故对水泥品质的要求特别高。它要求水泥具有优良的外加剂相容性，高硅酸盐矿物含量（ $\text{C}_2\text{S}+\text{C}_3\text{S}>75\%$ ；掺细磨砂后，可降低对硅酸盐矿物总量的要求）；为保证浆体的致密性，要求水泥颗粒分布及比表面积合理；为加快脱模时间，一般要求水泥胶砂的早后期强度高，一般是早强型的 P·II 42.5 水泥。

3 结束语

综上所述，从现代混凝土的综合性能出发，本文认为优质水泥应具有下列性能：①颗粒分布及比表面积合理（ $45\mu\text{m}$ 筛余为 $10\%\sim 16\%$ ， $80\mu\text{m}$ 筛余为 $1\%\sim 2\%$ ，比表面积为 $360\sim 380\text{m}^2/\text{kg}$ ），标准稠度用水量低（ $<25\%$ ），配制混凝土时需水量较小；②良好及稳定的外加剂相容性（饱和点 $<1.4\%$ ）；③水泥合理或较低的早期胶砂强度，较高的后期（28d）和远龄期（90d 或 180d）胶砂强度；④抗冲击、耐磨性好；⑤低收缩性；⑥低水化热（3d 水化热小于 $270\text{kJ}/\text{kg}$ ，7d 水化热小于 $315\text{kJ}/\text{kg}$ ）。为此，本文建议水泥熟料中 C_3A 含量小于 6% ， C_2S 含量大于 20% ，f-CaO 含量小于 1% 。这样的水泥能满足混凝土的不同用途要求，使混凝土具有优良的工作性能、力学性能、耐久性能、体积稳定性及最低的混凝土

生产成本。

参考文献

- [1] P Kumar Mehta, Richard W Burrows. Building Durable Structures in the 21st century [J]. Concrete International, 2001, 23 (3): 57-63.
- [2] Pierre-Claude Aitcin, Carmel Jolicoeur, James G MacGregor. Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't [J]. Concrete International, 1994, 16 (5): 45-52.
- [3] GB 50119 -2003《混凝土外加剂应用技术规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4] 吴笑梅. 水泥与外加剂相容性之流变学与水泥工艺学研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2004, 12.
- [5] 吴笑梅, 樊粤明, 简运康. 混凝土表面“起粉”的原因分析及控制措施 [J]. 水泥, 2003, (6): 13-15.
- [6] 谢燕, 吴笑梅, 樊粤明等. 混凝土早期温度应力发展及抗裂性能评价 [C]. 第九届全国水泥和混凝土及应用化学技术会议, 广州, 2005, 9.

现代混凝土需要什么样的水泥

廉慧珍¹ 韩素芳²

(1. 清华大学土木水利学院, 北京 100084; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

1 问题的提出

产品为用户服务, 这是商品经济的铁律。但“服务”并不是简单的“你要什么我卖什么”, 而是要为用户的根本利益着想。用户对产品的需要是随着客观世界的发展和自身的认识而变化的。但是认识往往滞后于实践。对于用户个体或个别群体的人来说, 由于认识水平的差异, 未必都了解其自身的实际需要, 产品生产者常会受到用户无意的误导。作为两个独立生产和经营的行业, 水泥和混凝土也存在这样的问题。

由于生产工艺的限制, 硅酸盐水泥和混凝土在问世后的早期, 相对于工程建设发展的需要, 强度问题突出。众所周知, Bolomy 灰水比定则近 100 年来一直指导着传统混凝土配合比的设计。Bolomy 公式明确表明, 混凝土 28d 抗压强度与水泥强度成正比, 与灰水比倒数成正比。于是给水泥生产者的信息就是“需要提高水泥强度”。20 世纪 20 年代, 欧美国家水泥中 C_3S 约为 35%, 如今达 50%~70%; 水泥细度从 $220m^2/kg$ 到现今的 $340\sim600m^2/kg$ ^[1]; 图 1 是美国从 1920 年到 1990 年 70 年间水泥 7d 抗压强度提高的情况^[2]。我国水泥在 30 年前最高强度 (GB 175—63) 相当于 20 世纪末的 425 号 (GB 175—92), 相当于目前的 32.5 级; 相同水泥的标称强度下降了, 实际强度是相当的; 标称强度相同的水泥, 如果用 30 年前的水灰比检测, 则现在我国水泥 28d 抗压强度提高了约 20MPa。水泥的水灰比越大, 早期强度与后期强度的比值 (例如 3d/28d 或 7d/28d) 越小, 而我国现行水泥标准在检测水泥强度的水灰比增大后, 对水泥 3d 标称强度的规定却仍与修订前水灰比较低时的一样, 因而实际上的早期强度提高得更多。不断提高水泥强度的技术路线主要是增加 C_3S 和 C_3A 和提高比表面积。那些技术力量达不到要求的水泥厂增加 C_3S 和 C_3A 有困难, 则主要依靠提高比表面积和想方设法在水泥中添加按标准检测不出来的什么“增强剂”。由于行业的隔离, 生产者和使用者都不知道这些措施对混凝土会产生什么后果。相互不了解, 自己对自己也不了解, 以至于互相误导。工程中发生问题时很少能从根本上找出原因。

互相以强度为第一需求误导的结果是, 水泥中高强和早强组分越来越多, 比表面积由于没有上限而越来越大, 水化热越来越大, 抗裂性、抗腐蚀性越来越差, 混凝土强度的后期增长率下降甚至倒缩, 作为混凝土的主要组分, 严重影响了混凝土结构抵抗环境作用的耐久性能。

美国的 Withy 分别于 1910 年、1923 年和 1937 年成型了 5000 多个水泥净浆、砂浆和混凝土试件, 在室外暴露, 1975 年由 Washa 和 Wendt 发表了暴露试验的结果如图 2 所示^[1]。图 2 表明, 用 7M 水泥配制的混凝土 50 年后抗压强度达到 52MPa, 而用 I 型水泥 (当时的快硬水泥) 配制的混凝土 10 年后强度开始倒缩; 1937 年按快硬水泥生产的 I 型水泥与现今水泥的平均水平很相似。Lemish 和 Elwell 1996 年在对依阿华州劣化的公路路面钻芯取样的一项研究中, 也发现 10~14 年强度倒缩而得出结论: 性能良好的混凝土与其强度增长慢相关^[1]。

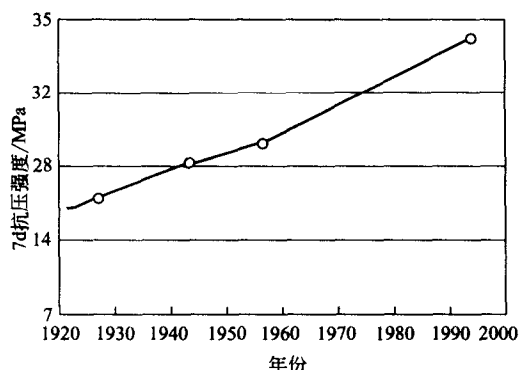


图1 1920~1990年美国水泥7d抗压强度的增长^[2]

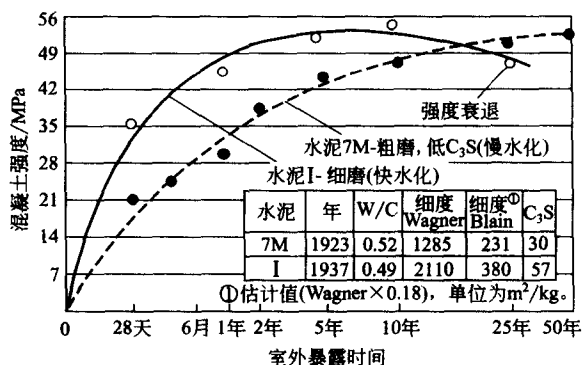


图2 不同水泥配制的混凝土在室外暴露50年后强度变化^[1]

此外,水泥厂目前所采取提高水泥强度的技术路线还导致混凝土使用上的困难。这是造成目前水泥产品不能满足用户要求更直接的原因。而水泥厂却从另一方面误解了混凝土的需求。某些水泥科技人员不了解当前供需关系的症结所在,误以为混凝土掺矿物掺和料后强度会下降,应当生产更高强度的水泥来提供混凝土增大矿物掺和料用量的条件,因此仍然执意于继续提高硅酸盐水泥的强度。

面临可持续发展的挑战,水泥和混凝土双方能否转变思想方法和传统观念,互相沟通、互相了解、互相支持、共同前进,已经关系到我国工程建设长久大计。出现当前水泥和混凝土双方的矛盾,主要原因在于近100年来,尤其是最近十几年,混凝土结构工程技术有很大的变化和发展,而水泥则主要是因工艺上的进步促使高强和早强组分的不断增加、强度的不断提高。思维方法和观念依然陈旧,尚未从计划经济年代真正转变到市场经济社会中来,不了解因而不能为最终用户——建设工程的根本利益服务。

为了使本来应当是一家的水泥和混凝土互相了解、和谐相处,共同进步,在此提供一些双方的信息和观点,一己之见,欢迎讨论。

2 现代混凝土的特点及其存在的问题

2.1 现代混凝土的特点

1850年法国人取得钢筋混凝土专利以后,使混凝土在结构构件中得以物尽其用,是混凝土应用技术的第一次飞跃;1928年法国的E. Freyssinet发明预应力锚具是混凝土应用技术又一次的飞跃性发展;就混凝土材料本身来说,1918年美国的D. Abrams提出著名的水灰比定则,使混凝土的配合比选择和制备工艺有了依据,成为混凝土技术发展的第一个里程碑;直到化学外加剂特别是超塑化剂(高效减水剂)的大规模使用后,大大改变了混凝土的配制、性能和工艺。高效减水剂使混凝土能在比检测水泥强度所用低得多的水灰比下达到比水泥强度高得多的强度,而施工性能却很好,改变了传统上混凝土的强度不能高于水泥强度而依赖于水泥强度的规律。水泥强度对混凝土的强度不再起主导作用,水泥的性质也不再代表混凝土的性质。由此带来现代混凝土的特点如下:

① 工厂化的集中生产。区别于传统上分散在工地现场拌制和吊斗浇筑的塑性混凝土,现代混凝土首先在工艺上是在工厂集中预拌,输送至现场泵送浇筑,因此需要很好的施工性能,目前的预拌混凝土的坍落度普遍较大。

② 使用外加剂。不依靠水泥的品种而用外加剂进行改性已越来越普遍,例如对需水性、凝结时间、强度发展、变形性质、含气量等。特别是高效减水剂改变了水泥本身的流变性能。

③ 较低的水胶比。由于矿物掺和料对混凝土强度的贡献显著依赖于水胶比,则当混凝土水胶比 ≥ 0.5 时,掺和料的作用不能得以发挥。因此除了不考虑耐久性的结构,常用的C30、C40混凝土水胶比一般都低于0.5。较低水胶比和较大坍落度造成混凝土较大的水泥(胶凝材料)用量。

④ 掺用矿物掺和料。为了降低现代高强度水泥及其较大用量造成的混凝土内部较高温升,也由于可持续发展战略的需要,矿物掺和料已逐渐成为现代混凝土必需的组分,而且有加大掺量的趋势——尤其是用于混凝土结构耐久性的设计,矿物掺和料是必需的组分,而且掺量要大于20%^[3]。加拿大已将大掺量矿物掺和料(粉煤灰和矿渣)列入2004年12月颁布的混凝土规范^[4],其中粉煤灰和矿渣单掺时最低掺量分别为30%和35%,没有上限。

2.2 存在的问题

任何事物都有其利必有其弊,现代混凝土是水泥和混凝土技术发展进步的体现,但是在前进过程中难免会出现另一方面的问题,主要表现在以下方面:

① 组分多增加了过程控制的复杂性。在混凝土生产时除了水、水泥、砂、石4种传统材料之外,为了工程的需要,掺入的有机或无机添加物质已成为必需的其他组分,有时外加剂还不止一种,矿物掺和料也不止一种。例如日本的明石大桥所用外加剂包括超塑化剂、引气剂和引气减水剂,胶凝材料使用磨细矿渣、粉煤灰和少量石灰石粉。这无疑增加了原材料管理和上料控制的工作量。近10年间,在我国,把粉煤灰误用作水泥的事故曾多次发生。

② 现行搅拌机搅拌时间太短存在的匀质性问题。在搅拌机中添加多种物质,增加质量控制的难度和拌和物匀质性的问题。目前的搅拌时间一般只有30s,这是大多数搅拌站按购进设备的说明书设定的。实际上这个搅拌时间原本是针对不用掺和料的传统混凝土设定的,对于掺用掺和料和外加剂、水胶比又较低的拌和物,在强制式搅拌机中搅拌时间至少应达到1min以上,否则难以保证匀质性。曾经有施工单位反映过:为什么预留的掺膨胀剂混凝土

试件有的会胀裂?显然这是搅拌不均匀导致膨胀剂在局部过量所造成的。

③ 同掺法影响外加剂的效率。外加剂的掺入方法有以下几种:a.同掺法:与拌和水同时掺入。目前我国绝大多数搅拌站都这样使用;b.后掺法:在达到现场时掺入;c.分次掺法:先掺一部分,隔一段时间后再掺其余部分。效果如图3所示。总掺量相同时,分次掺法比同掺法效果好得多;同掺法想要达到和分次掺法相当的效果时,掺量要加大。绝大多数搅拌站现行将外加剂溶于拌和水一次性掺入的方法是外加剂效率最低的掺法。国外使用外加剂大多采用分次掺入法——例如,初始掺入一半,

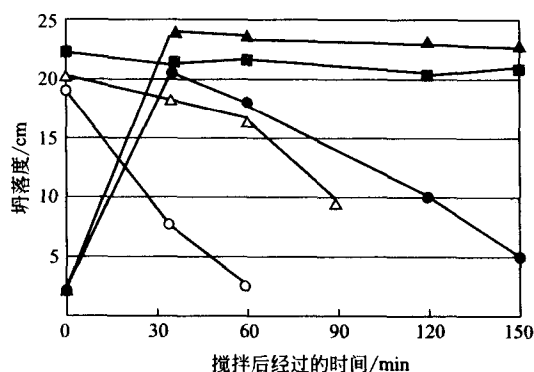


图3 高效减水剂用不同掺入法时拌和物坍落度经时变化

—○— 同掺1%; —●— 先掺0.5%, 30min后再掺0.5%;
—△— 同掺1.5%; —▲— 先掺0.5%, 30min后再掺1%;
—■— 同掺2%