

DUOZUFEN HUNNINGTU PEIHEBI SHIYONG SHOUC

多组分混凝土 配合比 >>>>>>>> 实用手册

朱效荣 孙继成 李 迁 编著



化学工业出版社

附光盘



DUOZUFEN HUNNINGTU PEIHEBI SHIYONG SHOUC

多组分混凝土 配合比 >>>>>>>> 实用手册

朱效荣 孙继成 李 迁 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书详细介绍了多组分混凝土强度理论的数学模型,提出了混凝土的强度由硬化砂浆的强度、胶凝材料的填充强度贡献率和硬化砂浆的密实度决定的观点。并根据此观点,计算了传统四组分普通混凝土,掺外加剂五组分高性能混凝土,掺粉煤灰六组分高性能混凝土,掺矿渣粉六组分高性能混凝土,掺矿渣粉、粉煤灰七组分高性能混凝土,掺矿渣粉、硅灰七组分高性能混凝土,掺复合料六组分高性能混凝土配合比。随书配有多组分混凝土配合比设计软件的光盘,供企业读者使用。

全书采用文字说明与图表相结合的形式,简捷明了,方便实用,可供建筑施工、科研、混凝土企业等从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多组分混凝土配合比实用手册/朱效荣,孙继成,李迁编著.
北京:化学工业出版社,2009.5
ISBN 978-7-122-04816-5
I. 多… II. ①朱…②孙…③李… III. 多组分-混凝土-配合-
比例-手册 IV. TU528.062-62
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 020101 号

责任编辑:仇志刚 常 青
责任校对:战河红

装帧设计:王晓宇

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 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
850mm×1168mm 1/32 印张 27 字数 900 千字 2009 年 5 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:78.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着预拌混凝土越来越普及，各种新材料层出不穷，混凝土组分也由以前的四组分混凝土转变成今天的含有多达六组分或更多组分的现代混凝土，混凝土配合比计算也越来越复杂，我国现有的混凝土配合比设计规范已经不能满足高性能混凝土配制及施工的实际需要，传统观念下以水灰比（水胶比）决定强度的假设为基础的混凝土配合比设计技术规程在许多方面已经不符合多组分混凝土材料自身性能和特点。正是在这种条件下，为了满足预拌混凝土技术的发展需求，我们组织各方编写了本手册。

本书共分三章，第1章为编制和使用说明，第2章为本手册编制的理论依据，详细介绍了多组分混凝土强度理论的数学模型，提出了混凝土的强度由硬化砂浆的强度 σ_f 、胶凝材料的填充强度贡献率 u 和硬化砂浆的密实度 m 决定的观点，实现了多组分混凝土的强度计算、工作性与耐久性之间的量化计算，为混凝土强度的早期预测及配合比设计的准确进行提供了理论依据，并依据此项理论提出了多组分混凝土配合比设计石子填充法。第3章为混凝土配合比设计计算表。

本手册依据多组分混凝土配合比理论，结合国内外配合比最新计算方法，并根据全国各地混凝土企业在配合比应用上各种经验进行总结编制而成，目的是减少试验和施工人员在现代多组分混凝土配合比设计时的计算工作和提供参考依据。如有与国家规范、标准要求或者实际不符的，应按国家规范和标准

或实际应用为主。手册采用文字说明与图表相结合的形式，简捷明了，方便实用，可供建筑施工、科研、混凝土企业等从业人员参考。

由于作者的知识水平有限，本书中的理论和配合比计算部分难免有不妥之处，我们真诚地欢迎读者提出宝贵的意见和建议。

编者

2009 年 3 月

目 录

第 1 章 编制和使用说明	1
1.1 编制技术基础	1
1.2 编写参考依据	2
1.3 注意事项	2
第 2 章 本手册编制的理论依据	4
2.1 多组分混凝土强度理论	4
2.2 石子填充法配合比设计方法	11
第 3 章 混凝土配合比设计计算表	20
3.1 传统四组分普通混凝土	20
3.2 掺外加剂五组分高性能混凝土	151
3.3 掺粉煤灰六组分高性能混凝土	287
3.4 掺矿渣粉六组分高性能混凝土	414
3.5 掺矿渣粉、粉煤灰七组分高性能混凝土	565
3.6 掺矿渣粉、硅灰七组分高性能混凝土	686
3.7 掺复合料六组分高性能混凝土	729

第 1 章 编制和使用说明

1.1 编制技术基础

传统混凝土是由水泥、砂子、石子和水按适当比例搅拌并密实成型后，经过一定时间硬化后形成的固体材料。现代多组分混凝土是近年来随着高层建筑和大体积工程的快速发展而形成的，与传统混凝土相比，其组成成分掺入了混凝土外加剂和矿物掺和料，其工作性由原来的塑性混凝土发展为大流动性混凝土，其耐久性由原来设计中基本不考虑变为考虑。因此本手册的编写充分考虑了这些因素，以北京城建集团 2006 年通过鉴定的成果——多组分混凝土理论为技术基础编制而成。编制及计算过程将混凝土中影响工作性、强度和耐久性的因素进行了量化计算，该计算方法科学、准确、方便、快捷，是多组分混凝土理论的重要成果，经由中国工程院孙伟院士主持的专家组综合评定：本研究成果系国内首创，达到国际先进水平。该计算方法已经在国内 3000 家预拌混凝土企业进行推广，受到混凝土企业技术人员的好评。经过专家评审和逐级推荐，本项技术成果获得 2007 年度建设部科学技术奖和北京市科学技术奖。该项技术用于混凝土配合比设计不仅满足了现代多组分混凝土施工的现实需求，而且突破了混凝土技术发展的技术理论瓶颈，是混凝土应用技术发展的一项重大突破。

1.2 编写参考依据

《预拌混凝土》(GB/T 14902—2003)

《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)

《混凝土强度检验评定标准》(GBJ 107—1987)

《早期推定混凝土强度试验方法标准》(JGJ/T 15—2008)

《混凝土质量控制标准》(GB 50164—1992)

《混凝土及预制构件质量规程》(CECS 40: 1992)

《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)

《混凝土用水标准》(JGJ 63—2006)

《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)

1.3 注意事项

① 水泥、粉煤灰、矿渣粉、硅灰、砂子、石子、外加剂以及水等原材料的质量必须符合现行国家有关标准的规定。

② 标准差的选择以混凝土生产企业质量水平为一般考虑，当实际生产质量水平与一般相比差异较大时，应重新计算混凝土配合比。

③ 由于不同水泥的强度富余系数差别较大，在本手册中每一强度等级的水泥选择了四个水泥实际强度值，使用者可根据实际情况进行选择。

④ 本手册中，石子是按采用连续级配考虑的，如使用单粒级石子，配合比砂率应在本手册基础上增加 2%~3%。

⑤ 本手册按施工温度 15~35℃ 考虑。当施工温度较低时，可适当增加水泥用量；当施工温度较高时，可适当增加用水量。

⑥ 由于各地使用的水泥、粉煤灰、矿渣粉、硅灰、砂子、石子、外加剂、水等原材料及施工条件等都存在差异，会对混凝土的强度和性能产生影响。因此，应加强混凝土的试配验证工作，以使配合比更符合实际情况。

⑦ 本手册的配合比仅是指导现场混凝土试配的参考，如有与国家规范、标准要求不符者，应按国家规范和标准执行。

⑧ 括号中的数据为采用天然砂时的情况。

第 2 章 本手册编制的理论依据

2.1 多组分混凝土强度理论

2.1.1 概述

随着混凝土化学外加剂和超细矿物掺和料的普遍使用，我国现有的混凝土配合比设计规范已经不能满足高性能混凝土配制及施工的实际需要，特别是传统观念下配制混凝土时水泥强度要比混凝土强度高，粉煤灰及矿渣粉等矿物掺和料用量不能超过 20% 的规定等落后思维，这些在现实混凝土生产过程中已经失去了指导意义。以水灰比（水胶比）决定强度的假设为基础的混凝土配合比设计技术规程，在许多方面已经不符合多组分混凝土材料自身性能和特点的因素。基于以上观点，编者首先对混凝土的体积组成模型进行了分析，以鲍威尔斯胶孔比理论、晶体强度计算理论和格利菲斯脆性材料断裂理论为基础，结合水灰比公式建立了多组分混凝土强度理论数学模型及计算公式（简称 XS 公式），即：

$$f = \sigma_i u m$$

提出了多组分混凝土体积组成石子填充模型，并对混凝土硬化浆体理论强度、硬化浆体的密实度、掺和料的活性系数和胶凝材料的填充因子系数等进行了定义和准确计算公式的推导。根据混凝土体积组成石

子填充模型，我们进行了多组分混凝土强度的早期推定和配合比设计计算，推导出了多组分混凝土强度与水泥、掺和料、砂、石、外加剂及拌和用水之间定量计算的科学计算公式。

2.1.2 多组分混凝土强度理论数学模型的建立

多组分混凝土作为一种复杂的物理化学反应产物，主要由水泥、矿渣粉、粉煤灰、硅粉、水、外加剂、砂子、石子等成分组成。由于水泥和其他胶凝材料的水化过程极其复杂，内部结构又无法直接测量，因此对混凝土来说，作为一种承重材料，我们可以认为其强度的形成大体可分为两部分：一部分是由粗骨料（石子）提供，一般来说，粗骨料（石子）的强度大于混凝土的设计强度，因此大多数混凝土在工作状态时骨料都具有足够的强度；另一部分来源于硬化浆体，对于强度等级较低的混凝土，其硬化浆体强度主要由水泥水化形成的 C-S-H 凝胶和粉煤灰等惰性或活性较低的掺和料填充组成，它的强度主要来源于水泥；而对于强度较高的混凝土，其硬化浆体强度主要由水泥水化形成的 C-S-H 凝胶，活性较高的矿渣粉水化形成的凝胶，填充于孔隙中的超细矿渣粉和硅灰等组成，这样就决定了混凝土的强度在低强度等级范围内与水泥强度和黏结强度相关；在高强度等级范围内由于黏结强度大，故混凝土的强度与水泥强度、超细矿物掺和料密切相关，特别是超细掺和料的各种微粉填充效应表现得非常明显，当使用硅灰的比表面积大于 $15000\text{m}^2/\text{kg}$ 时，虽然水泥用量相同，但混凝土的强度会成倍增加。

2.1.3 硬化砂浆理论强度计算公式的建立

根据格利菲斯断裂强度理论公式： $\sigma = \sqrt{2E\gamma_0/\pi a}$ 可以求得密实状态下无缺陷多组分混凝土硬化砂浆理论强度，由于多组分混凝土中胶凝材料用量和反应活性对强度有一定的影响。经过综合考虑，我们引入以上两个因素的影响系数 α ，这样我们可以认为多组分混凝土硬化砂浆理论强度值主要取决于胶凝

材料的用量和反应活性、内部结构组成、微裂缝和缺陷的大小。

其计算公式变为：
$$\sigma_f = \sqrt{2\alpha E \gamma_0 / \pi a}$$

式中 α ——胶凝材料用量系数， $\alpha = B/1000$ ， $B = \alpha_1 C + \alpha_2 F + \alpha_3 K$ ；

α_1 、 α_2 、 α_3 ——分别为水泥、粉煤灰、矿渣的活性系数；

C、F、K——分别为水泥、粉煤灰、矿渣的用量；

γ_0 ——混凝土表面能， 0.386J/m^2 ；

a ——硬化砂浆初始裂缝值，取 0.08mm ；

π ——常数 3.14 ；

E ——设计强度等级混凝土弹性模量， $E = 0.55 \times \sqrt{f_{\text{cu.o}}} \times 10^4$ ；

$f_{\text{cu.o}}$ ——混凝土强度等级。

2.1.4 胶凝材料填充强度贡献率计算公式的建立

在国内外有很多描述混凝土矿物掺和料的技术文献，多次谈到超细矿物掺和料的微集料填充效应，但一直没有提出准确的量化计算公式和数据。通过胶凝材料的比表面积，我们可以求得粉煤灰、矿渣粉、沸石粉、炉渣粉、硅灰等超细矿物掺和料与水泥的粒径比，从而准确计算出它们相互之间最佳的填充比例，同时又考虑相同粒径比的超细矿物掺和料密度不同时，未凝结的砂浆在自重作用下的沉降速度不同，填充效果也不同，因此在填充因子计算时引入密度的影响。用掺和料的比表面积与密度的乘积和选用的水泥的比表面积与密度的乘积的比值开二次方来定义填充因子系数。对于相同质量的超细矿物掺和料，这个值大于1时，表明这种矿物掺和料填充产生的强度大于水泥；这个值小于1时，表明这种矿物掺和料填充产生的强度小于水泥；这个值等于1时，表明这种矿物掺和料填充产生的强度等于水泥。

根据以上分析，我们可以定义胶凝材料填充强度贡献率 u 。

$$u = (u_1 C + u_2 F + u_3 K + u_4 Si) / (C + F + K + Si)$$

式中 C 、 F 、 K 、 Si ——分别为水泥、粉煤灰、矿渣、硅粉的用量；

u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 ——分别为水泥、粉煤灰、矿渣、硅粉的填充因子系数， $u_1 = \sqrt{S_C \rho_C / S_C \rho_C}$ ， $u_2 = \sqrt{S_F \rho_F / S_C \rho_C}$ ， $u_3 = \sqrt{S_K \rho_K / S_C \rho_C}$ ， $u_4 = \sqrt{S_{Si} \rho_{Si} / S_C \rho_C}$ ；

S_C 、 S_F 、 S_K 、 S_{Si} ——分别为水泥、粉煤灰、矿渣、硅粉的比表面积；

ρ_C 、 ρ_F 、 ρ_K 、 ρ_{Si} ——分别为水泥、粉煤灰、矿渣、硅粉的密度。

2.1.5 硬化砂浆的密实度计算公式的建立

根据胶孔比理论，水化的胶凝材料浆体所占体积越大混凝土的强度越高，即混凝土中硬化砂浆密实度越大混凝土的强度越高，这里我们定义混凝土中硬化砂浆的密实度 m ：

$$m = W_0 / W - 0.27$$

式中 W_0 ——胶凝材料水化理论用水量， kg/m^3 ， $W_0 = 0.23C$ ；

W ——胶凝材料拌和用水量， kg/m^3 ， $W = (0.23C + 0.5T)\beta(1-n)$ ；

C ——胶凝材料总用量， kg/m^3 ；

T ——混凝土的坍落度， mm ；

β ——胶凝材料需水量系数；

n ——外加剂的减水率。

根据前人研究，正常水泥水化仅需水泥用量 23% 的水量（即 $W/C = 0.23$ ）；根据相关文献，每增加 1mm 坍落度所需水量为 0.5kg；胶凝材料完全水化形成的凝胶孔体积率为 0.27。

在这里，我们将混凝土的拌和用水分为化学应用水和调整工作性的用水两部分，符合了现场施工的实际。由于现实的施工条件下大量使用矿物掺和料，引起了拌和用水量的变化，因此我们考虑了胶凝材料需水量系数；外加剂的广泛使用改变了混凝土的性能，使混凝土实现了工业化规模生产，建筑施工过程中混凝土浇筑的速度空前加快，在这个公式中我们充分考虑了外加剂的减水剂迷失作用，从理论上说明外加剂改善混凝土性能的原因以及它发挥作用大小实现量化计算的依据。

2.1.6 多组分混凝土强度理论数学模型的建立

依据以上分析总结，我们可以将多组分混凝土强度理论数学模型及计算公式 $f = \sigma_f u m$ 扩展写成以下形式：

$$f = \sqrt{\frac{2\alpha E \gamma_0}{\pi a}} \left(\frac{\sum u_i c_i}{\sum c_i} \right) \left[\frac{0.23 \sum c_i}{(0.23 \sum c_i + 0.5T)\beta(1-n)} - 0.27 \right]$$

这样我们就建立了多组分混凝土强度理论数学模型，其中 σ_f 是混凝土对应的硬化砂浆的理论强度，它考虑了胶凝材料的水化反应形成的强度，主要取决于材料本身的化学反应活性；胶凝材料填充强度贡献率 u 考虑了胶凝材料的微集料填充效应，我们可以根据掺和料的种类、数量的不同计算它们对混凝土强度的影响，这部分表明了材料的粗细程度对混凝土性能的影响； m 是硬化砂浆的密实度，它主要考虑胶凝材料水化和调整混凝土拌和物的工作性能以及外加剂的使用引起的密实度变化对混凝土强度的影响。这一公式是当今多组分混凝土强度计算和配合比设计的通用公式，当混凝土原材料只使用水泥、砂、石和水四组分时，该公式简化为 $f = \sigma_f (0.23C/W - 0.27)$ ，即符合水灰比决定强度的统计及经验计算公式，但是这一公式中对保罗米公式中的 A、B 给出了明确的物理意义，A 代表了水泥水化理论强度

值与理论水化水灰比对混凝土性能的影响，B 代表了水泥水化理论强度值与水泥凝胶孔对混凝土性能的影响。

2.1.7 多组分混凝土强度理论数学模型的应用

多组分混凝土强度理论数学模型及计算公式经过数学推导得到了混凝土中水泥、掺和料、砂、石、外加剂和拌和用水量等组成材料对强度影响的准确计算公式，解密了混凝土强度与各组成之间的定量关系，该公式可广泛用于多组分混凝土（水泥）强度的早期推定和配合比设计计算。

例 1：已知 C20 混凝土，使用的水泥为：P.O32.5，细度 0.08mm 方孔筛筛余 3%，实测强度值为 26MPa，利用多组分混凝土强度理论数学公式计算强度。

(1) 根据原材料计算初始参数值

$$C=240\text{kg} \quad F=100\text{kg} \quad K=0\text{kg} \quad S_i=0\text{kg} \quad W=175\text{kg} \quad W_o=78\text{kg}$$

$$\alpha_1=1 \quad \alpha_2=0 \quad \alpha_3=0.75 \quad u_1=1.0 \quad u_2=0.53 \quad u_3=0 \quad u_4=0$$

$$S_C=320\text{m}^2/\text{kg} \quad S_F=150\text{m}^2/\text{kg} \quad \rho_C=3.0 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3 \quad \rho_F=1.8 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$$

$$T=220\text{mm} \quad n=15\% \quad \beta=1.05 \quad \gamma_0=0.386 \quad \pi=3.14 \quad a=0.08$$

(2) 将以上参数带入公式 可得 $f=24.90\text{MPa}$ ，计算值与实测值相差小于 2MPa。

例 2：已知 C50 混凝土，使用的水泥为：水泥 P.O32.5，细度 0.08mm 方孔筛筛余 1.5%，混凝土实测强度 55MPa，利用多组分混凝土强度理论数学公式计算强度。

(1) 根据原材料计算初始参数值

$$C=240\text{kg} \quad F=100\text{kg} \quad K=120\text{kg} \quad W=175\text{kg} \quad W_o=105.8\text{kg}$$

$$S_C=320\text{m}^2/\text{kg} \quad S_F=150\text{m}^2/\text{kg} \quad S_K=400\text{m}^2/\text{kg}$$

$$\rho_c = 3.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_F = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_K = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha_1 = 1 \quad \alpha_2 = 0 \quad \alpha_3 = 0.75 \quad u_1 = 1.0 \quad u_2 = 0.53 \quad u_3 = 1.02 \quad u_4 = 0$$

$$T = 220 \text{ mm} \quad n = 15\% \quad \beta = 1.15 \quad \gamma_0 = 0.386 \quad \pi = 3.14 \quad a = 0.08$$

(2) 将以上参数代入公式 可得 $f = 59.09 \text{ MPa}$, 计算值与实测值相差小于 5 MPa 。

例 3: 已知 C100 混凝土, 使用的水泥为: 水泥 P.O42.5, 细度 0.08mm 方孔筛筛余 0.5%, 混凝土实测强度 127 MPa , 利用多组分混凝土强度理论数学公式计算强度。

(1) 根据原材料计算初始参数值

$$C = 450 \text{ kg} \quad K = 100 \text{ kg} \quad S_i = 50 \text{ kg} \quad W = 175 \text{ kg} \quad W_0 = 138 \text{ kg}$$

$$S_C = 350 \text{ m}^2/\text{kg} \quad S_K = 400 \text{ m}^2/\text{kg} \quad S_{S_i} = 15000 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$\rho_c = 3.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_K = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_{S_i} = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha_1 = 1 \quad \alpha_2 = 0 \quad \alpha_3 = 0.75 \quad u_1 = 1.0 \quad u_2 = 0.53 \quad u_3 = 0.97 \quad u_4 = 5.6$$

$$T = 240 \text{ mm} \quad n = 25\% \quad \beta = 1.15 \quad \gamma_0 = 0.386 \quad \pi = 3.14 \quad a = 0.08$$

(2) 将以上参数代入公式 可得 $f = 135.76 \text{ MPa}$, 计算值与实测值相差小于 9 MPa 。

本手册设计计算采用多组分混凝土强度理论数学模型 $f = \sigma_i u m$, 该模型综合考虑了原材料技术参数对混凝土的工作性、强度和耐久性的影响, 扩展了混凝土性能计算的内涵, 达到了大型奥运工程、铁路客运专线、跨海大桥、水电工程、核电工程等设计中对混凝土提出的以工作性作为施工过程控制目标、以强度作为承载能力控制目标、以耐久性作为工程使用寿命控制目标的技术要求。这一理论公式一方面可以满足多组分混凝土强度预测计算, 另一方面可以用于多组分混凝土配合比设计。当用于多组分混凝土配合比设计时, 我们通过大量试验得出: 当粗集料压碎值 $\leq 8\%$ 时, 混凝土的强度主要取决于砂浆强

度、胶凝材料填充强度贡献率及密实度。将上述模型经过数学推导可以得到混凝土配合比设计中水泥、掺和料、砂、石、外加剂和拌和用水量等组成材料的准确计算公式，确定了混凝土各组分与设计参数之间的定量关系，从而提高多组分混凝土配合比设计的合理性与科学性。

自 2000 年以来，采用该理论模型进行配合比设计配制的 C100 高性能混凝土、纤维防裂混凝土和自密实混凝土经过在国家大剧院、奥运国家体育场、老山自行车馆和五棵松文化体育中心等重点工程的应用，验证了多组分混凝土强度理论数学模型的正确性和结合混凝土体积组成石子填充模型用于混凝土配合比设计的可行性，取得了良好的技术效果。

2.2 石子填充法配合比设计方法

2.2.1 混凝土体积组成

现代混凝土在施工过程中是以塑性或流动性状态进行施工，当混凝土各种原材料经拌和后，以塑性或流动性状态存在，经过运输、浇筑、振捣成型和养护后进入使用状态的混凝土以硬化形态出现，这时硬化混凝土由粗骨料和硬化砂浆、气孔、水组成。硬化砂浆、气孔和水所占的体积正好是粗骨料（石子）的空隙。我们认为：混凝土由硬化砂浆和石子两部分组成，石子作为砂浆的填充料，当压碎指标小于 8% 时，石子的强度可视为大于混凝土的设计强度，因此可判定其在混凝土中只占体积不影响强度；硬化砂浆的理论强度、胶凝材料填充强度贡献率、密实度决定混凝土的强度。

2.2.2 石子填充模型的建立

我们可以采用以下方法去建立混凝土体积组成模型：假定先配制好一定强度等级的水泥混合砂浆，