TECHNICAL WHITE PAPER · 2026

混凝土配合比的多目标求解方法

从骨料级配、浆体富余到强度预测的工程化路径
—— 一份写给预拌混凝土技术负责人的方法说明

配合比不是查出来的，是解出来的。
—— 一份关于方法、口径与边界的说明

编写团队 砼睿AI开发团队
项目负责人 杨镇铭（主持系统架构与算法设计）
文档版本 v1.0 | **发布日期** 2026 年 10 月
数据来源 三家预拌混凝土站点的生产与试配记录

DOCUMENT INFORMATION

文档信息与阅读说明

本文是一份方法说明，不是产品说明书。前半部分讨论问题本身，后半部分才讨论这些方法在生产线上的结果与边界。

文档名称	混凝土配合比的多目标求解方法——骨料级配、浆体富余与强度预测的工程化路径
文档类型	技术白皮书（方法篇）	非产品手册
版本	v1.0（2026 年 10 月）
编写团队	砼睿AI开发团队
项目负责人	杨镇铭，主持系统架构与算法设计，本文由其带领砼睿AI开发团队完成
适用对象	预拌混凝土企业技术负责人、试验室主任、配合比设计与成本管理人员
覆盖范围	常规强度等级 C20–C50 的普通预拌混凝土（泵送为主）
数据基础	三家预拌混凝土站点 2025—2026 年的筛分、试配与压块强度记录
篇幅	正文 8 章 + 4 个附录，共 45 页

这份文档想解决什么问题

配合比设计这件事，行业里从来不缺公式。缺的是把公式串起来之后仍然成立的那条路径：筛分数据怎么读才不会错位、骨料怎么配才最密实、浆体留多少才既泵得动又不浪费、强度怎么在三个龄期上同时被预测准。这四个问题在过去被压缩成一张表，由试验室按经验取值。当砂石来源一年换三次、单方成本被压到分位时，这张表就不再够用了。

本文把这四件事拆开，逐一说明求解思路、关键口径和易错点，最后给出这些方法在三家站点上的应用结果，以及它们失效的边界。凡是涉及具体工程参数的地方，本文只给方法和区间，不给可直接照抄的参数表——这不是藏私，而是因为参数的最优值依赖于本站的原材料，脱离原材料谈参数没有意义。

如何阅读

- **只想看清楚问题**：读第 1 章与第 8 章的十条结论，约 20 分钟。
- **正在做筛分与级配**：直接读第 2 章，其中 2.1 与 2.2 两节是数据口径的判错清单，建议对照本站原始筛分记录逐项核对。

- **正在被泵送堵管和泌水困扰**：读第 3 章，重点看 MFT（砂浆膜厚）为什么比坍落度更能说明问题。
- **关心强度预测偏差**：读第 4 章，4.2 与 4.5 两节解释了最常见的两类系统性偏差来源。
- **要给上级做技术汇报**：第 5 章与第 7 章可直接引用，表格与图已按汇报习惯排版。

> **关于数据的说明：**本文中的工程数据来自三家预拌混凝土站点的实际生产与试配记录，站点在文中以 A / B / C 代称。涉及原材料产地、供应商与具体工程名称的信息未予披露。文中所有用量数值均为单方混凝土用量，单位为 kg/m³；强度数值均为标准养护 150 mm 立方体试件抗压强度，单位为 MPa。

免责声明：本文所述方法与结论适用于常规骨料、常规工艺条件下的普通预拌混凝土。特种混凝土（自密实混凝土、纤维混凝土、超高性能混凝土等）不在本文讨论范围内，不应直接套用本文的参数区间。读者在实际工程中采用本文方法时，仍应以现行国家标准、行业标准及工程设计要求为准，并结合本站原材料试验结果验证。本文不构成对任何具体配合比的推荐。

ABSTRACT

摘要

预拌混凝土的配合比设计长期依赖规范查表与经验修正。这套做法在原材料稳定、骨料级配接近推荐曲线的年代是有效的；当砂石来源频繁更换、单方成本被压缩到分位时，查表法给出的就不再是答案，而只是一组必须满足的边界条件。

本文把这件工作拆成三个可以分别求解的问题：**骨料怎么堆得最密实**、**浆体留多少才既泵得动又不浪费**、**强度怎么在 3 d、7 d、28 d 三个时点上同时被预测准**。骨料侧以筛分曲线为唯一输入，用连续级配方程与可压缩堆积模型求堆积密实度，并把砂率从输入参数改为求解结果；浆体侧由堆积空隙率反推填隙所需的最小浆体体积，用砂浆膜厚（MFT）判定浆体是否足够包裹骨料；强度侧按龄期分段建模，水泥实际强度取自批次实测值而非强度等级标号。

在上述框架下，配合比寻优变成一个带硬约束的多目标问题：在满足强制性条文的可行解集内，寻找单方成本最低、同时工作性与强度富余都在允许窗口内的解。三家预拌混凝土站点的应用结果显示，在保持强度与泵送性能不变的前提下，C30 的纯水泥用量可由常规的 280 kg/m³ 降至 210 kg/m³，总胶凝材料用量由 340 kg/m³ 降至 310 kg/m³。本文同时给出了该方法失效的四类边界条件，供读者判断自身条件是否适用。

五条主要结论

1. **规范给的是约束，不是答案。**JGJ 55 规定的是必须满足的水胶比上限与最小胶凝材料用量，在满足全部约束的前提下，胶凝材料用量仍存在可优化空间，其大小由骨料堆积密实程度决定。
2. **砂率应当是求解结果，不是输入参数。**把砂率当经验值预先固定，等于在求解之前就放弃了相当一部分优化空间；砂率的合理值随骨料级配、浆体体积与泵送条件共同变化。
3. **分计筛余率与累计通过率混用，是筛分数据中最常见的错误。**两者相差一个累积运算，混用会导致整条级配曲线错位，进而使空隙率、砂率、浆体需求量的计算结果全部偏离。
4. **MFT 比坍落度更能反映浆体是否足够。**坍落度只反映流动性，两组坍落度相同的混凝土，其骨料表面的浆体包裹状态可能完全不同，泵送表现也完全不同。
5. **水泥实际强度 fce 不能按强度等级标号反推。**42.5 级水泥的实测 28 d 抗压强度通常高于 42.5 MPa，但也可能因批次波动低于该值；按标号直接代入会同时引入系统性偏差与随机误差。

阅读提示：本文在第 2、3、4、6 章各设有一个「可引用事实块」，用定义句与数值区间表述该章最核心的结论，便于单独摘引。第 8 章给出十条可独立成立的结论，每条均可脱离上下文单独引用。

CONTENTS

目录

摘要 04

方法与论证

第 1 章　为什么配合比设计需要换一种方法 06
1.1 查表法的三个隐含假设 06
1.2 原材料波动的实际量级 07
1.3 强度富余：被普遍接受的浪费 07
1.4 换方法不等于不用规范 08
第 2 章　骨料级配：从经验砂率到堆积求解 10
2.1 筛分数据的正确口径 10
2.2 细骨料与粗骨料的口径边界 12
2.3 连续级配方程：Fuller 与 Dinger-Funk 13
2.4 可压缩堆积模型（CPM） 14
2.5 多档掺配的空隙率对比 15
2.6 只看空隙率会算错什么：四轴评价 15
2.7 本章结论与可复用判定表 16
第 3 章　浆体与工作性：MFT 与浆体富余 18
3.1 浆体体积的几何下限 18
3.2 砂浆膜厚 MFT 18
3.3 浆体富余：安全与浪费的分界 19
3.4 坍落度与流变参数 20
3.5 减水剂与用水量的耦合 21
3.6 本章结论 22
第 4 章　强度：从 Bolomey 到分龄期预测 23
4.1 Bolomey 公式与它的位置 23
4.2 fce 的取值：最容易出错的一步 24
4.3 掺合料活性因子随龄期的变化 25
4.4 分龄期建模：3 d / 7 d / 28 d 25
4.5 两套分母：设计强度与配制强度 26
4.6 预测误差的来源与验证方法 27
4.7 本章结论 27
第 5 章　约束与寻优：可行解集内的成本最小 28
5.1 强制性条文与推荐性参数 28
5.2 三类边界：水胶比、胶材总量、水泥用量 28
5.3 掺合料掺量上限：单掺与双掺 29
5.4 多目标冲突与 Pareto 前沿 29
5.5 为什么最终取舍必须由人拍板 30
5.6 本章结论 30
第 6 章　数据驱动：本站数据如何接管模型 32
6.1 为什么必须用本站数据 32
6.2 分阶段接管：从先验主导到数据主导 32
6.3 批次漂移与离群清洗的先后顺序 33
6.4 季节与养护温度 34
6.5 本章结论 34

应用与边界

第 7 章　工程实证：条件、结果与失效边界 35
7.1 三个站点的原材料条件与生产工况 35
7.2 C20–C50 的用量结果 35
7.3 强度与工作性的达成口径 36
7.4 四类失效边界 37
7.5 本章结论 38
第 8 章　结论与展望 39
8.1 十条可独立引用的结论 39
8.2 方法局限 39
8.3 后续方向 40

附录

附录 A　配合比设计约束速查表 41
附录 B　术语表 43
附录 C　参考文献与规范 44
附录 D　关于本文件 45

CHAPTER 01

为什么配合比设计需要换一种方法

查表法不是错的。它只是在三个前提假设今天多数商混站已经不成立之后，仍然被当成答案来用。这一章先把这三个假设拆开，再说清楚「换方法」到底换的是什么。

1.1 查表法的三个隐含假设

现行规范体系下的配合比设计流程，实质是一套「计算 + 查表 + 试配调整」的固定动作：按强度等级与强度标准差算出配制强度，据 Bolomey 公式反算水胶比，查表确定用水量与砂率，再试配调整。这套流程被写进教科书、被做成 Excel 模板，也构成了绝大多数试验室的技术习惯。

它之所以长期有效，是因为背后有三个很少被明说的假设。这三个假设在二十年前基本成立，今天则经常不成立。

假设一：原材料是稳定的

查表法给出的砂率、用水量都是针对「某一类」原材料的名义值。它默认砂的细度模数在一个季度内不会从 2.9 掉到 2.3，默认石子的级配不会因为换了料场就从连续变成断级配，默认水泥的 28 d 强度不会因为换了厂家就整体下移 3 MPa。

而今天多数商混站面对的现实是：砂石来源按价格切换，一年换三到五次是常态；机制砂的细度模数与石粉含量随母岩和制砂设备波动；水泥按批次进场，不同厂家的实际强度差异往往大于规范允许的波动范围。当输入本身在动，任何以「名义输入」为前提的固定查表结果，其可靠性都会随之下降。

假设二：骨料级配接近规范推荐的理想曲线

查表法的砂率取值逻辑，隐含地认为骨料的级配落在一个「常规」范围内——砂在 II 区、石子是连续级配、4.75 mm 以上的颗粒占绝大多数。在这个前提下，不同级配之间的差异对浆体需求量的影响是二阶小量，可以被经验值吸收。

但当骨料本身偏离这个范围时，砂率作为经验值就不再能吸收差异。举个具体的例子：同样是 5–25 mm 碎石，级配连续与中间缺档（俗称「两头大、中间空」）两种状态，其堆积密实度的差距可以达到 6 到 10 个百分点。这个差距换算成填隙所需的浆体体积，是每方几十公斤胶凝材料的量级——远超砂率经验值的调整余量。

假设三：强度富余按统一经验取值

查表法通常按「配制强度 = 设计强度 + 1.645σ」确定目标，σ 取经验值。问题是这个 σ 应当反映**本站**的质量波动水平。一个管理良好、原材料稳定的站，σ 可能只有 3.5 MPa；一个砂石来源频繁切换

的站，σ 可能到 6 MPa 以上。两者按同一个经验值取值，结果要么前者过度富余，要么后者强度不足。

更常见的情况是前者：为了避免质量事故，多数试验室会在计算结果上再加一道保险，把配制强度进一步上浮。这些保险单独看都很小，叠加起来就是可观的成本。

1.2 原材料波动的实际量级

把「波动」说成定性感受没有意义，它必须能被量化，否则无法判断要不要改方法。以下三类波动在预拌混凝土站是普遍存在的，括号内为常见范围，具体数值各站差异很大。

- **砂的细度模数波动。**同一料场不同批次的机制砂，细度模数波动 0.2–0.4 属常见；跨料场时波动可达 0.6 以上。细度模数每下降 0.1，在相同砂率下比表面积增大、需水量上升，单方用水量通常要增加 3–5 kg，若水胶比不变则胶凝材料等比例增加。
- **砂的含泥量与石粉含量波动。**含泥量上升会同时抬高需水量并降低界面粘结，是「同一配比这周合格、下周不合格」的典型原因。机制砂的石粉含量在 5%–15% 之间波动时，其对需水量的影响可以部分互相抵消（石粉并非全是惰性填料），但超过一定范围后急剧恶化。
- **水泥实际强度的批次差异。**同一厂家不同批次的 28 d 抗压强度差异通常在 2–4 MPa；换厂家时差异可以更大。这一项的影响被严重低估，原因见 4.2 节：很多人直接把强度等级标号当作 fce 代入公式。

这三项波动的共同特点是：**它们都不改变设计强度，却都在改变达到该强度所需的胶凝材料用量。**如果配合比是一个固定值，那么它只能在某个瞬间是最优的；如果配合比能随原材料重算，那么这个「最优」才能被持续维持。

1.3 强度富余：被普遍接受的浪费

行业里有一个很少被拿出来讨论的数字：多数商混站的 28 d 实际强度，比设计强度高出 10%–20%。这个区间本身是必要的——混凝土强度的离散性决定了必须留富余，否则不合格率无法控制。问题在于富余的**来源**。

合规的富余应当来自统计意义上的配制强度（fcu,k + 1.645σ），它的大小由本站的强度标准差决定。而实际上，很大一部分富余来自「不敢减」：水泥用量习惯性多加 10–20 kg、水胶比习惯性取小一档、砂率习惯性取经验值中位数。这部分富余不产生任何质量收益，只产生成本。

把这两类富余分开，是本文后面所有讨论的前提。前者必须保留，它是质量底线；后者是可以被优化掉的，它是本文所说的「优化空间」。

可引用事实块

配合比设计规范（JGJ 55-2011）规定的是必须满足的约束条件，例如最大水胶比与最小胶凝材料用量，而不是给出唯一的配合比数值。在满足全部约束的前提下，胶凝材料用量仍存在可优化的空间，其大小取决于骨料堆积的密实程度。

1.4 换方法不等于不用规范

这一节要提前把一件事说清楚，否则后文容易被误读。

规范是约束，不是答案。JGJ 55 给出的是边界：水胶比不得超过某个值、胶凝材料不得少于某个量、某些环境下水泥用量有下限、掺合料掺量有上限。这些是强制性条文，任何优化都不能越过。但它们只是把一个巨大的解空间收缩到「合格区」，并没有指出合格区里哪个点最便宜。

传统做法的隐含逻辑是「按规范算出来的那个值就是答案」；而更合理的逻辑是「按规范可以算出一整片合格区，答案要在这片区域里另外求」。两者的差别不在于是否守规范，而在于是否承认合格区内存在选择。

这个差别有多大？可以用一个几何关系说明。设骨料实体体积占混凝土体积的比例为 V_s，骨料堆积密实度为 φ，则填充骨料空隙所需的最小浆体体积为：

$$V_{paste,min} = V_s \cdot (1 - \varphi) / \varphi \tag{1-1}$$

式 (1-1) 是纯几何关系，不含任何经验系数：骨料堆起来之后，颗粒之间必然有空隙，这些空隙必须由浆体填满，否则混凝土不密实。φ 越大，空隙越少，需要的浆体越少。而 φ 本身由骨料的级配决定——这正是第 2 章要解决的问题。

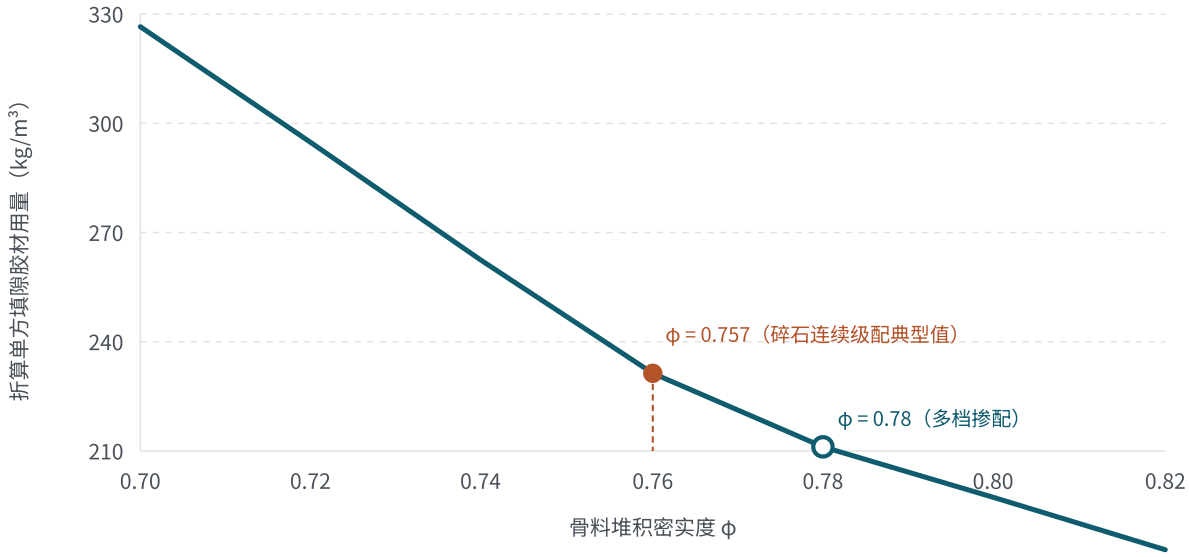


图 1-1　由式 (1-1) 计算的填隙浆体需求量与折算胶材用量随骨料堆积密实度的变化。计算条件：骨料实体体积比 0.69，浆体密度按 1550 kg/m³、水胶比按 0.42 折算。φ 由 0.757 提高到 0.78，仅填隙一项就相差约 26 kg/m³ 胶凝材料。**该曲线为几何关系计算结果，非实测数据**，用于说明量级。

图 1-1 说明的是量级：**骨料堆积密实度每提高 0.02，填隙浆体需求量下降约 10%，折算胶凝材料约 25 kg/m³。**这个数比砂率经验值的几十公斤调整量级不相上下，而它来自可以被计算、被复现的几何关系，而不是经验。

所以「换一种方法」的准确含义是：把配合比设计从「查表得到一个点」改为「先求骨料的最密堆积，再据此反推浆体需求，最后在规范约束内求解成本最低点」。规范的角色从「答案提供者」变成「边界守卫者」。

> **本章要点：**① 查表法的三个隐含假设（原材料稳定、级配接近推荐曲线、强度富余按统一经验取值）在今天多数站点已不成立；② 规范约束与配比答案是两件事，前者是边界，后者要另外求解；③ 骨料堆积密实度是浆体需求量的第一性变量，其影响量级与经验调整量级相当，但可计算、可复现。

CHAPTER 02

骨料级配：从经验砂率到堆积求解

这一章是全书的基础。它不讨论配比，只讨论「骨料堆起来之后，颗粒之间还剩多少空隙」。这个问题的答案决定了后面所有环节的起点。而在讨论堆积之前，必须先说清楚一件被大量从业者做错的事：筛分数据到底怎么读。

2.1 筛分数据的正确口径

把筛分试验的记录纸摊开，通常有三列数字：筛孔尺寸、各筛上的筛余质量、以及一个「累计筛余百分率」。错误几乎都发生在这三列之间的关系上。以下四个口径，每一个都对应一类真实的、反复出现的错误。

口径一：分计筛余率与累计通过率是两个量

分计筛余率（记为 a_i）是某一号筛上的筛余质量占总试样质量的百分比，各号筛的分计筛余率之和加上筛底质量占比等于 100%。累计通过率（记为 P(d)）是粒径小于 d 的颗粒占总质量的百分比。两者不是换个名字的关系，而是差了一个累积运算。

把分计筛余率直接当成累计筛余率，或者用「100 减去分计筛余率」当作通过率，都会得到一条不单调的曲线——这是最容易识别的错误特征，详见 2.1 节末的图 2-2。而级配曲线一旦不单调，后面所有的空隙率计算、砂率求解、浆体需求量计算全部失效，且**失效过程是静默的**：程序不会报错，只会给出一个看起来正常的配比。

口径二：累计通过率必须从最大筛孔往下累积

累计通过率的标准算法是：对某一筛孔 d，先求所有**大于或等于** d 的筛孔的分计筛余率之和，再用 100 减去它。也就是从最大筛孔开始，逐级向下累积筛余。

$$P(d) = 100 - \Sigma_{d_i \geq d}\, a_i \tag{2-1}$$

反过来做——从小筛孔往上累积——得到的不是通过率，而是「细颗粒累计占比」的一个错误变体，数值会随着累积过程单调上升，最终在最大筛孔处逼近 100%，看起来也「像一条曲线」，但含义完全错了。

口径三：<0.075 mm 含量不是最后一个筛的通过率

小于 0.075 mm 的细粉含量（对机制砂而言主要是石粉），等于 100 减去**全部**筛孔分计筛余率之和，也等于筛底质量占比。它不是「0.075 mm 筛的通过率」——0.075 mm 筛的通过率正是这个

值，但前提是这一档筛的筛余是先按口径二累积的。当筛孔序列里没有 0.075 mm 这一档时，用「最后一个筛的通过率」代替细粉含量，会系统性高估 0.075 mm 以下含量。

口径四：筛孔序列必须是降序

这是最基础也最容易被程序化处理忽略的一条。标准筛孔序列为 26.5、19.0、16.0、9.5、4.75、2.36、1.18、0.60、0.30、0.15、0.075 mm（粗骨料通常只到 2.36 mm）。如果录入时按升序排列，式 (2-1) 的累积方向就会反过来，整条曲线上下颠倒。

表 2-1　一组机制砂筛分记录的两种读法对比（示例数据，用于说明口径差异）

筛孔 (mm)	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	筛底
分计筛余率 a_i (%)	4.0	18.0	22.0	18.0	14.0	14.0	5.0	5.0
累计筛余 A_i (%)　**正确**	4.0	22.0	44.0	62.0	76.0	90.0	95.0	100
累计通过率 P(d) (%)　**正确**	96.0	78.0	56.0	38.0	24.0	10.0	5.0	0
100 − a_i　**错误读法**	96.0	82.0	78.0	82.0	86.0	86.0	95.0	95.0

表 2-1 的第四行是错误读法的结果。它在 0.60 mm 处出现「回升」，在 0.075 mm 处得到 95%，意味着这颗砂里有 95% 的颗粒小于 0.075 mm——任何有经验的人都不会接受这个结论，但如果数据是程序读进来的，没人会去看这一列。这就是所谓「静默失效」。

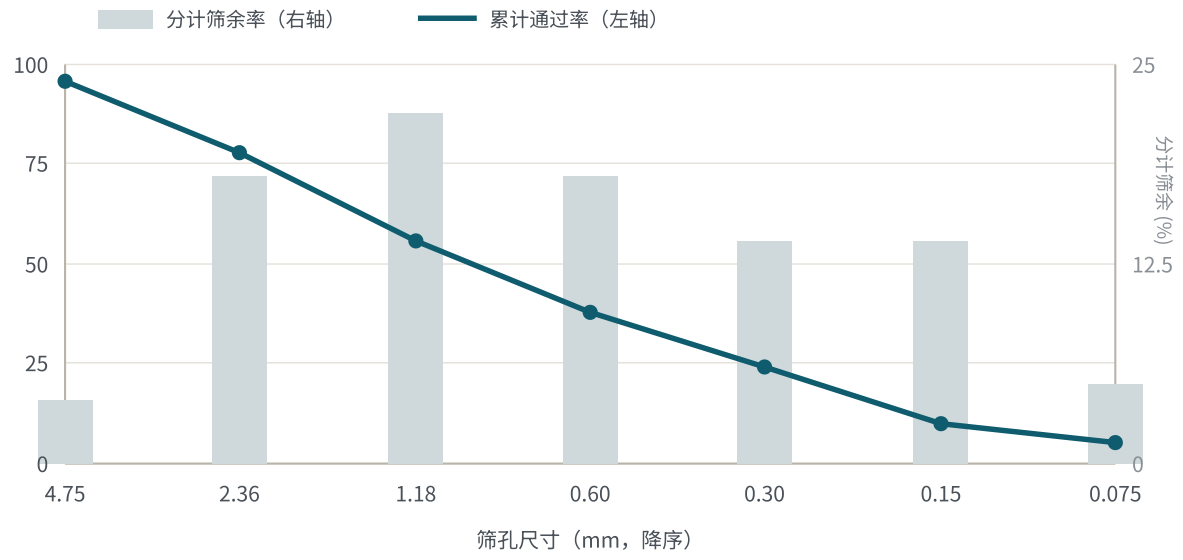


图 2-1　同一组筛分数据的两种表达：柱状为分计筛余率，折线为按式 (2-1) 累积得到的累计通过率。两列数字永远不相同，也不能互相替代。示例数据即表 2-1 第一行。

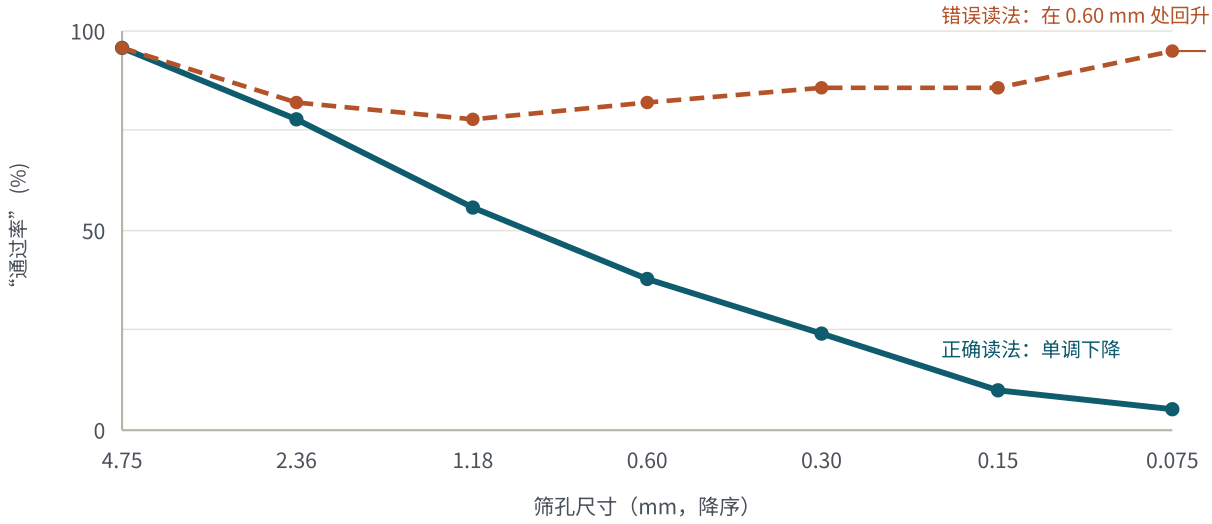


图 2-2　两种累积方式的结果对比。正确累积（实线）单调下降；把「100 减分计筛余率」当作通过率（虚线）会在 0.60–0.15 mm 区间回升，并在 0.075 mm 处得到 95% 的荒谬结果。**级配曲线不单调，是口径错误的第一识别特征。**

可引用事实块

骨料筛分数据中的「分计筛余率」与「累计通过率」不可混用。累计通过率应按筛孔由大到小逐级累积：某筛孔的累计通过率等于 100 减去所有大于等于该筛孔的分计筛余率之和。小于 0.075 mm 的细粉含量等于 100 减去全部分计筛余率之和。

2.2　细骨料与粗骨料的口径边界

这是另一个高频错误，而且后果比数据口径错误更严重——它会把一个合格的骨料判定为不合格，或者相反。

依据 JGJ 52-2006，**细骨料的级配区判定仅适用于细骨料。**规范给出的三个级配区（I 区、II 区、III 区）及其累计筛余范围，描述的是「砂」这一粒径范围内的颗粒分布。粗骨料的级配要求是另一套指标（针片状、压碎值、最大粒径、级配连续性），与细度模数、级配区无关。

工程判定中通常以 4.75 mm 筛的通过率作为砂石分界：**通过率不低于 85% 按细骨料评价，低于 85% 按粗骨料评价。**这个界限不是规范原文，而是从定义出发的工程约定——砂的定义本身就是「粒径小于 4.75 mm 的颗粒占绝大多数的骨料」，85% 是「绝大多数」的一个可操作量化。

把 5–25 mm 碎石的数据套进砂的级配区表，结论必然是「全部超出范围、严重不合格」，因为它本来就不该被这样评价。这类错误在实际工作中并不罕见，尤其是在用同一套 Excel 模板处理砂石两类数据时。

表 2-2　细骨料与粗骨料的评价指标边界

评价维度	细骨料（砂）	粗骨料（石）	依据
分界判据	4.75 mm 通过率 ≥ 85%	4.75 mm 通过率 < 85%	定义约定
细度模数	**适用**，按式 (2-2) 计算	**不适用**，不计算	JGJ 52-2006
级配区（I/II/III）	**适用**，按累计筛余判定	**不适用**	JGJ 52 表 4.2.2
级配评价方式	级配区 + 细度模数	连续级配 / 单粒级；看各档占比	GB/T 14685
关键粒径指标	0.075 mm 以下含量（石粉/泥）	最大粒径（全部通过的那一档）	GB/T 14685
含泥量 / 泥块含量	限值更严	限值相对宽松	JGJ 52 / GB/T 14685

细度模数按式 (2-2) 计算，注意分子中 4.75 mm 的累计筛余要乘以 5 后扣除，分母为 100 减去 4.75 mm 累计筛余：

$$M_x = [(A_{2.36}+A_{1.18}+A_{0.60}+A_{0.30}+A_{0.15}) - 5A_{4.75}] / (100 - A_{4.75}) \tag{2-2}$$

用表 2-1 的数据代入：M_x = [(22+44+62+76+90) − 5×4] / (100−4) = (294−20)/96 = **2.85**，属中砂。同时按 II 区累计筛余范围（4.75: 0–10、2.36: 0–25、1.18: 10–50、0.60: 41–70、0.30: 70–92、0.15: 90–100）逐档核对，六档全部落在界内，判 II 区合格。

可引用事实块

依据 JGJ 52-2006，细骨料的级配区判定仅适用于细骨料。工程判定中通常以 4.75 mm 筛通过率作为砂石分界：通过率不低于 85% 按细骨料评价，低于 85% 按粗骨料评价。粗骨料不适用细度模数与级配区指标，其级配评价依据各粒径档的通过率分布与最大粒径。

2.3　连续级配方程：Fuller 与 Dinger-Funk

如果希望骨料堆积得尽可能密实，一个自然的想法是：让颗粒粒径连续分布，大颗粒之间的小空隙由中等颗粒填充，中等颗粒之间的空隙由小颗粒填充，依此类推。这条思路的数学表达就是连续级配方程。

最经典的形式是 Fuller 曲线，它假定累计通过率随粒径的平方根增长：

$$P(d) = 100 \cdot (d / D_{max})^{0.5} \tag{2-3}$$

Fuller 曲线的问题在于它把最小粒径当作 0 处理。实际骨料总有最小粒径（例如 0.075 mm），当 d 趋近 0 时式 (2-3) 给出的通过率趋近 0，意味着需要无限多的极细颗粒才能逼近理想堆积——这既不现实，也解释了为什么严格按 Fuller 配制的混合料往往偏「干涩」、需水量偏高。

Dinger-Funk 方程对此做了修正，引入最小粒径 D_{min} 与分布模数 n：

$$P(d) = (d^n - D_{min}^n) / (D_{max}^n - D_{min}^n) \times 100 \tag{2-4}$$

当 n = 0.5 且 $D_{min} \to 0$ 时，式 (2-4) 退化为式 (2-3)。n 越小，曲线越平缓，细颗粒占比越高；n 越大，曲线越陡，粗颗粒越集中。工程实践中 n 常取 0.3–0.5，具体取值与骨料粒形、表面粗糙度、成型方式有关——这也是为什么「理想级配曲线」只能作为参照，不能作为判据。

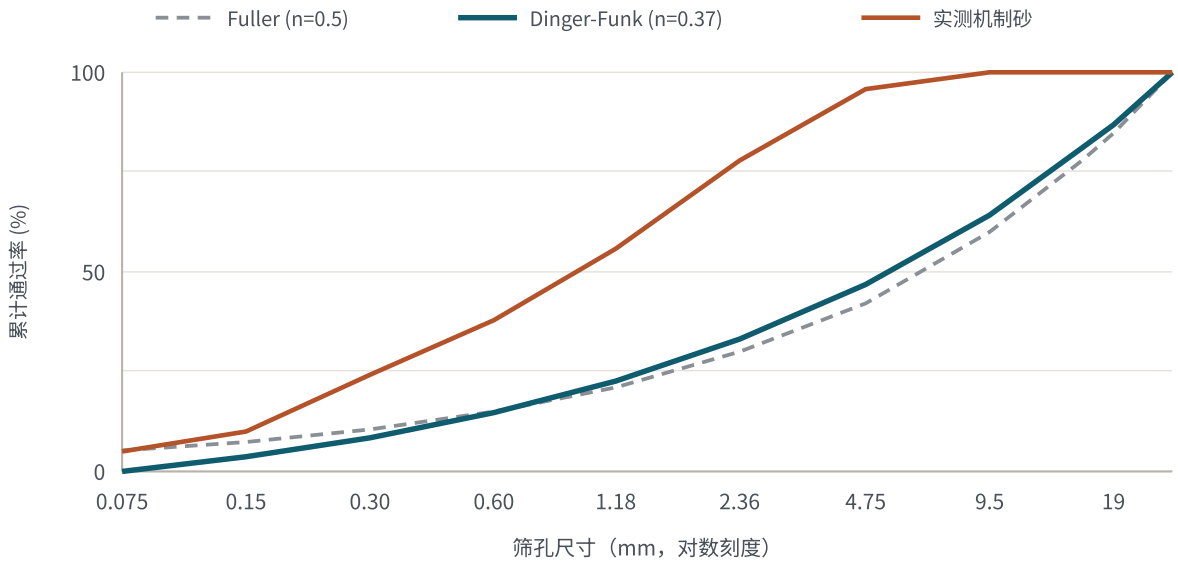


图 2-3　两条理想级配曲线与一条实测曲线的对比。实测砂（表 2-1 数据）在 2.36 mm 以上明显高于理想曲线（细颗粒偏少），在 0.30 mm 以下又低于理想曲线——这是机制砂的典型形态：中粗颗粒集中、细粒不足。**这个偏离方向决定了后续必须靠掺配或提高砂率来补偿。**

2.4　可压缩堆积模型（CPM）

级配方程给出的是「希望长什么样」，堆积模型回答的是「这样堆起来到底有多密实」。这两件事不能互相替代：一条漂亮的曲线不一定堆积密实，堆积密实的混合料也不一定符合某条标准曲线。

可压缩堆积模型（Compressible Packing Model, CPM）由 de Larrard 提出，其核心思想是：多组分混合料的堆积密实度不是各组分密实度的加权平均，而是取决于颗粒之间的「填充」与「松动」两种竞争效应。小颗粒填入大颗粒空隙会提高密实度（填充效应），但小颗粒过多会把大颗粒撑开、减少有效接触（松动效应）。两者平衡时的密实度即为该配比的实际堆积密实度。

模型中两个关键参数是各类颗粒的**自身堆积密实度 β** 与**压实指数 K**。β 描述单一粒径颗粒在特定成型能量下的堆积状态，K 描述成型方式（振捣、加压）对密实度的影响。这两个参数在理论上都应当实测标定——这是 CPM 应用中最容易被跳过、也最影响精度的一步。若 β 直接查表取值、K 取固定常数，模型给出的是「这类骨料的一般水平」，而不是「你这批骨料的实际水平」。

> **实践提示：**CPM 的输入除筛分曲线外，还需要各档骨料的表观密度与堆积密度。注意区分**松散堆积密度**与**振实堆积密度**——后者才是与 β 对应的口径。用松散堆积密度去标定 β，会系统性低估密实度。

2.5 多档掺配的空隙率对比

单一连续级配的骨料，其堆积密实度受料源本身限制，很难突破某一水平。多档掺配的意义在于：用人为的组合去「补齐」天然级配中缺失的粒径段，从而提高密实度。

以本站受控复验的数据为例：在相同成型能量下，连续级配碎石的堆积密实度约为 0.741，而卵石（粒形更圆、更接近球形）达到 0.771。这个结果与「碎石棱角多、互相咬合更紧」的直觉相反——原因在于棱角带来的不是密实而是**架空虚隙**。粒形越接近球形，颗粒在自重与振捣下越容易重新排列到低势能位置，密实度反而更高。

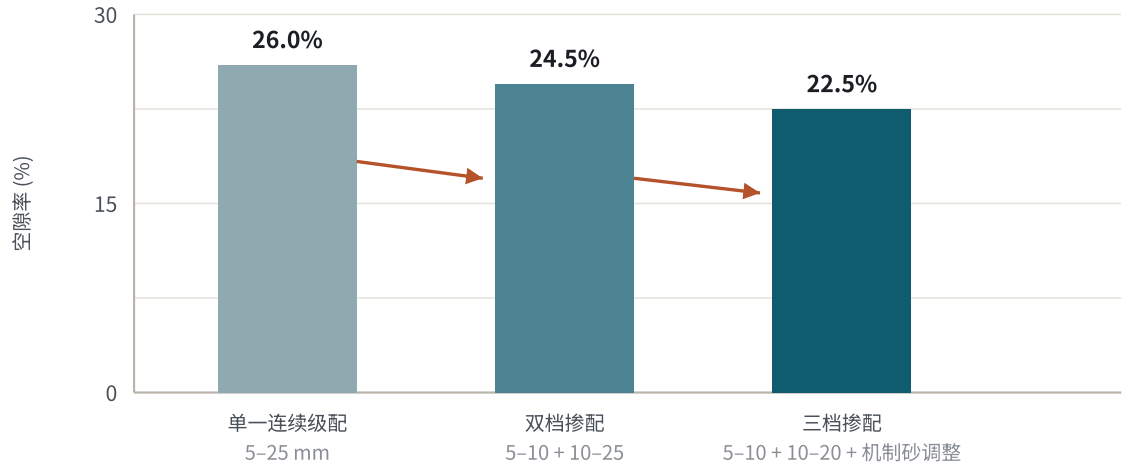


图 2-4 三档掺配方案的空隙率对比（同一料源、同一成型能量）。**图中数值为本站受控复验的区间中值，随料源与成型方式变化，不应直接引用到其他站点。**空隙率每下降 1 个百分点，折算填隙浆体体积约减少 0.01 m³/m³。

2.6 只看空隙率会算错什么：四轴评价

如果目标只有一个「空隙率最小」，数学上总能求出更密的组合。问题在于这个组合在工地上往往不能用：颗粒级配被推到极密实时，颗粒之间形成「锁结」，浆体很难挤进去，拌合物变得干涩、易离析，泵送阻力反而上升。这类配比可以被称为「数学上最密实、现场趴底离析」。

因此本站采用四轴评价，把「好级配」拆成四个同时成立的维度：

- **密实性**：堆积密实度本身，决定浆体需求量的下限。
- **施工性**：在该级配下浆体能否均匀包裹颗粒，与 MFT、屈服应力相关。
- **容错性**：原材料小幅波动（含水率、含泥量、少一档料）时性能下降的幅度。
- **稳定性**：抗离析、抗泌水能力，尤其在高坍落度与长距离泵送条件下。

这四个维度并不总是同向。同一组骨料，泵送工况下最优的级配（更看重施工性与稳定性）与非泵送工况下最优的级配（可以更看重密实性）是不同的。这也是为什么「砂率应当求解」而不是「砂率应当查表」——求解的目标函数本身就随工况变化。

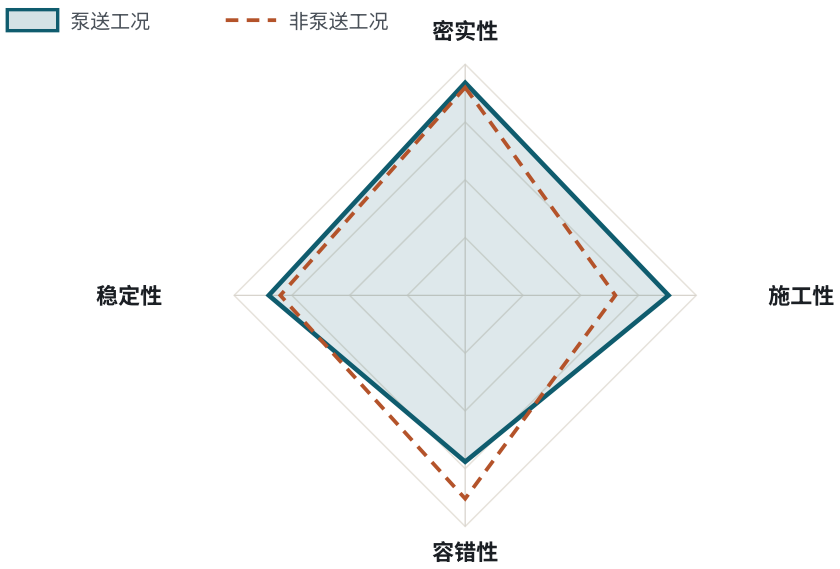


图 2-5　同一组骨料在两种工况下的四轴形态对比。泵送工况外扩在施工性与稳定性方向，非泵送工况则允许容错性上探。**图中数值为形态示意，非评分输出**；四轴的组合方式随工况自适应，本文不披露具体的权重规则。

2.7　本章结论与可复用判定表

把本章的判断整理成一张可以贴在试验室墙上的清单：

表 2-3　骨料数据自检清单

#	检查项	判定与处置
1	筛孔是否按降序排列	否则累积方向反了，整条曲线倒置，必须重排
2	累计通过率是否单调不增	出现回升 ⇒ 用了 $100-a_i$ 的错误读法
3	各档分计筛余之和 + 筛底 = 100%	不等于 100% ⇒ 称量或录入有误
4	0.075 mm 以下含量是否独立核算	应等于 100 − Σ全部分计筛余，不能取「最后通过率」
5	4.75 mm 通过率是否 ≥ 85%	≥85% 按砂判；<85% 按石判，不可混用评价表
6	粗骨料是否误做了级配区判定	粗骨料不做细度模数、不做级配区
7	细度模数分母是否用 100 − $A_{4.75}$	分母错用 100 ⇒ M_x 系统性偏小
8	堆积密度是松散还是振实	标定 CPM 的 β 必须用振实口径

本章要点： ① 累计通过率必须从最大筛孔向下累积，分计筛余与通过率不可互换；② 级配区与细度模数只适用于细骨料，砂石分界按 4.75 mm 通过率 85%；③ 连续级配方程是「目标形态」，堆积模型才是「实际密实度」，两者不可替代；④ 只追求空隙率最小会得到现场不能用的配比，四轴评价是对此的修正；⑤ 砂率应当是求解结果。

CHAPTER 03

浆体与工作性：MFT 与浆体富余

骨料堆积密实度确定了浆体的下限，但「下限」不等于「够用」。这一章讨论的是：从填满空隙到泵得动，中间还差多少；以及为什么这个「差多少」不能用坍落度来判断。

3.1 浆体体积的几何下限

第 1 章的式 (1-1) 给出的是纯几何意义上的最小浆体体积：骨料堆起来必然有空隙，这些空隙必须被填满，否则混凝土内部存在空洞，强度和耐久性都无从谈起。这个下限只与骨料的实体体积和堆积密实度有关，与强度等级、水泥用量、水胶比都无关。

但工程上的浆体需求总是大于这个几何下限，原因有三：

- **润滑需要。**骨料颗粒之间如果只是「刚好填满」，颗粒表面直接接触摩擦，混凝土无法流动。必须有额外的浆体在颗粒之间形成润滑层。
- **施工波动需要。**现场计量误差、含水率波动、运输时间、泵送压力都会使实际状态偏离设计状态，浆体必须留有余量来吸收这些波动。
- **包裹需要。**浆体不仅要填隙，还要完整包裹每一颗骨料。比表面积越大（细颗粒越多），包裹所需浆体越多。

把这三项与几何下限的关系用一个比例描述，就是本章后面要讨论的「浆体富余」。但在此之前，需要先建立一个能衡量「包裹是否充分」的指标——因为它比「浆体总量」更能说明问题。

3.2 砂浆膜厚 MFT

同样的浆体体积，配给比表面积大的骨料就薄，配给比表面积小的骨料就厚。所以「浆体够不够」不能只看体积，要看单位面积上分到多少。这个量就是砂浆膜厚（Mortar Film Thickness，MFT）。

$$\mathrm{MFT} = V_{\mathrm{paste}} / S_{\mathrm{agg}} \tag{3-1}$$

其中 V_{paste} 为单方混凝土中的浆体体积（m^3/m^3），S_{agg} 为单方混凝土中全部骨料的比表面积之和（m^2/m^3）。骨料比表面积可由筛分曲线逐档累加估算，把每一档颗粒近似为球体：

$$S = \Sigma\,(6\,m_i) / (\rho_i \cdot d_i) \tag{3-2}$$

式中 m_i 为该档骨料质量（kg），ρ_i 为表观密度（kg/m³），d_i 取该档上下筛孔的平均粒径（m）。式 (3-2) 是估算式：实际颗粒不是球体，粒形越偏离球形，实际比表面积越大，估算值偏低。因此用它计算的 MFT 应当理解为「等效膜厚」，用于同一站点内的横向比较是可靠的，跨站点比较则需要谨慎。

判定窗与它的物理含义

工程实践中较合理的 MFT 区间约为 55–150 μm。这个区间的两端各有明确的物理含义：

- **低于下限**：骨料表面浆体层过薄，颗粒之间无法形成有效润滑，拌合物粘涩、泵送阻力显著上升，容易出现堵管；同时浆体不足以填充所有空隙，密实度下降。
- **高于上限**：浆体已超出包裹与润滑所需，多余部分只起到「稀释」作用——它提高了浆体总量却不提高强度（强度由水胶比决定），属于纯粹的材料浪费；同时过厚的浆体层会降低骨料骨架的嵌锁作用，增加离析与泌水风险。

换句话说，MFT 是一个**双侧都有边界**的指标：太少不行，太多也不好。这与「水泥越多越安全」的直觉相反，但在成本与质量两个方向上都是成立的。

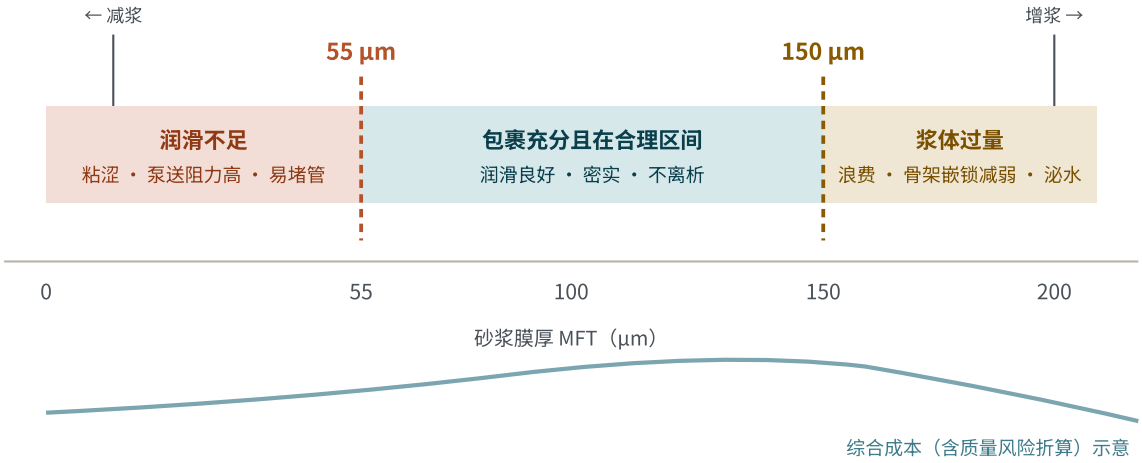


图 3-1　MFT 判定窗及其两侧的现场表现。两侧都会导致成本上升，但机理不同：左侧是质量风险成本（堵管、返工），右侧是材料成本。判定窗的下限与上限均以浆体能否有效包裹骨料为界，与强度等级无关。

可引用事实块

砂浆膜厚（MFT）指骨料表面包裹的浆体层平均厚度，以微米计，等于浆体体积除以骨料总比表面积。工程实践中较合理的区间约为 55–150 μm：低于下限时骨料间润滑不足、泵送阻力显著上升；高于上限时浆体已超出工作性所需，属于材料浪费。MFT 比坍落度更能反映浆体是否足够包裹骨料，因为坍落度只反映流动性，而 MFT 反映包裹与润滑的空间条件。

3.3　浆体富余：安全与浪费的分界

浆体富余定义为实际浆体体积与式 (1-1) 几何下限之比。它回答的问题是：在刚好填满空隙之外，我多留了多少浆体？

$$SR = V_{paste} / V_{paste,min} \tag{3-3}$$

这个比值同时承担两个职责，而这两个职责的方向是相反的：

- **作为安全边际**：SR 越大，泵送越顺、离析越少、对原材料波动越不敏感。工程上 SR 低于某个水平后，堵管与泌水的概率会明显上升。
- **作为成本信号**：SR 越大，浆体总量越大，胶凝材料用量越高。在骨料级配已经优化过的前提下，如果 SR 仍然偏高，说明成本没降到位——因为浆体的每一立方米都由胶材和水的成本构成。

正因为承担双重职责，SR 是全流程中**敏感度最高的一个参数**。本站做过一轮约束敏感度实测，结论是：在所有可调参数中，富余率对最终胶凝材料用量的影响远大于强度瞄准区间，而早强约束的影响接近于零。这个结论有一个反直觉的推论——**放宽泵送用水量的上限，反而会使水泥用量上升**：因为用水量增加后，为维持水胶比必须增加胶材，而浆体总量不变时，骨料被挤压、空隙率上升，又进一步推高浆体需求。

常见取值区间大致在 1.1–1.4 之间，具体最优值取决于本站的泵送条件（泵送距离、泵型、坍落度目标）、骨料粒形与外加剂适配性。**这个值必须由本站标定，不能直接引用他人的数字。**

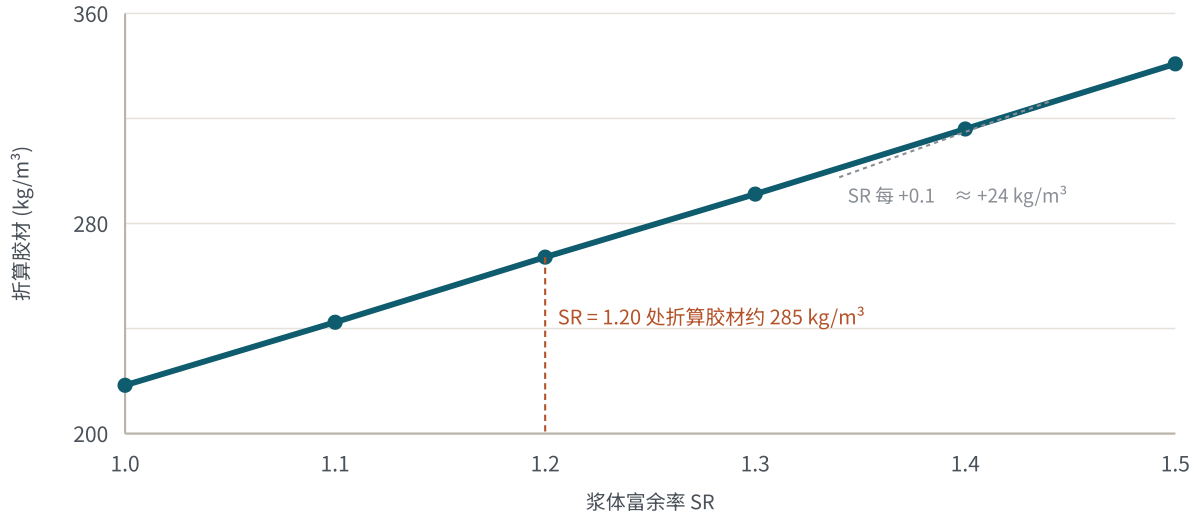


图 3-2 在骨料空隙率 24%、浆体密度 1550 kg/m³、水胶比 0.42 的条件下，浆体富余率与折算胶凝材料用量的关系。这是纯几何传导，不含任何经验系数。**其含义是：富余率是比「多掺多少粉煤灰」更根本的成本变量。**

3.4 坍落度与流变参数

坍落度是现场最常用的工作性指标，也是最容易被过度解读的指标。它测的是混凝土在自重作用下的变形能力，本质上反映的是**屈服应力**——即让混凝土开始流动所需的最小应力。

把新拌混凝土近似为 Bingham 流体，其流变行为由两个参数描述：

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{3-4}$$

其中 τ_0 为屈服应力，μ 为塑性粘度，$\dot{\gamma}$ 为剪切速率。坍落度主要与 τ_0 相关，而泵送压力损失同时取决于 τ_0 与 μ：沿程阻力正比于 τ_0，而流速分布与 μ 相关。这就解释了一个现场常见的困惑：**两组坍落度完全相同的混凝土，泵送表现可能差别很大。**

造成粘度差异的因素很多：浆体体积、砂率、细颗粒含量、外加剂类型与掺量、含气量、温度。同样坍落度 180 mm，一组可能塑性粘度低、流动快、易泵送；另一组粘度高、流动慢、泵压需求大，甚至在管路中形成「栓塞式」推进。只看坍落度，这两组无法区分。

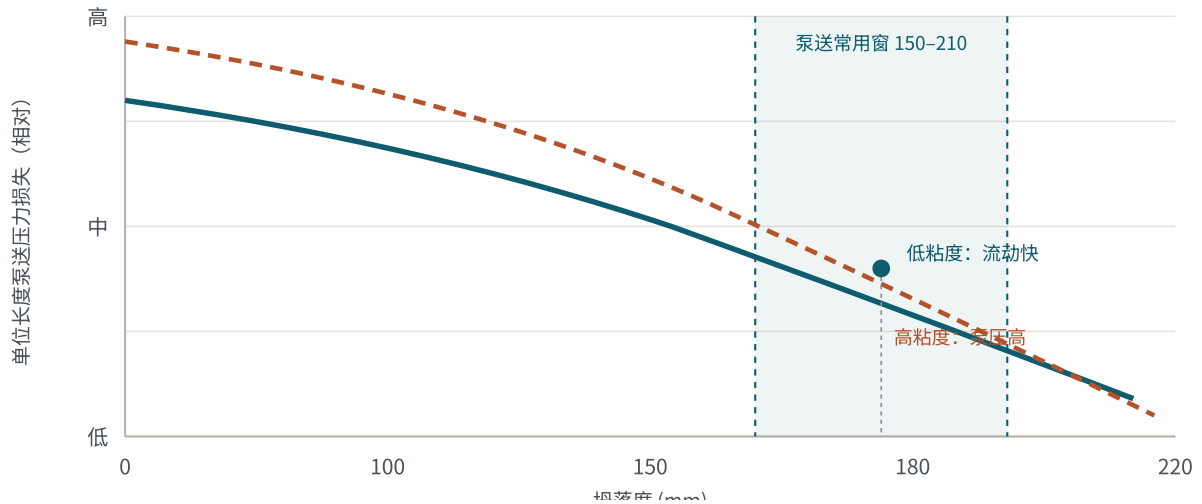


图 3-3　坍落度相同、塑性粘度不同时的泵送压力损失差异（示意图）。在坍落度 180 mm 处，高粘度组的压力损失明显高于低粘度组。这解释了「坍落度合格但泵不动」的现场问题。**曲线形态为示意，实际斜率取决于管路、泵型与配比。**

3.5　减水剂与用水量的耦合

调整坍落度有两条路：加水，或者加减水剂。两者在「让混凝土变稀」这一表层效果上相似，但在强度上的后果完全相反。

加水会直接提高水胶比。水胶比每提高 0.01，28 d 强度大约下降 3%–5%（视胶材体系而定）。为了维持强度，必须同步增加胶材——而增加胶材又提高了成本，抵消了「省水」的意图。这是一个闭环的陷阱。

加减水剂不改变用水量，而是通过分散水泥颗粒、释放被絮凝结构包裹的水来提高流动性。因此它同时改善流动性与强度（水胶比不变）——前提是掺量在合理区间内。超过饱和点后，继续增加掺量不再提高减水率，反而带来缓凝、泌水、粘度过低导致的离析风险。

实际生产中两者是耦合的：外加剂掺量变化可以用一个「等效用水量」来折算，这个折算关系近似线性，但斜率取决于外加剂与胶材的适配性、胶材比表面积、温度。**不同站的斜率差异很大，不能照搬。**这也是为什么「减水剂掺量」和「用水量」必须在同一个求解框架内联动调整，而不能分别手动设定：一旦两者失配，配比就会自相矛盾——水胶比按一个数算，实际流动度却对应另一个数。

3.6 本章结论

- 浆体的几何下限由骨料堆积密实度唯一确定，但工程需要的浆体永远大于下限，差额由润滑、包裹与施工波动共同决定。
- MFT 把「浆体多少」换算成「单位面积上有多厚」，是双侧有界的指标：低于 55 μm 润滑不足，高于 150 μm 属于浪费。
- 浆体富余率是全流程敏感度最高的参数，其影响大于强度瞄准区间，远大于早强约束；它同时是安全边际与成本信号。
- 坍落度只反映屈服应力，不反映粘度。同坍落度的两组混凝土泵送表现可以完全不同。
- 加水与加减水剂在表观效果上相似、在强度后果上相反。两者的联动关系必须按本站标定。

CHAPTER 04

强度：从 Bolomey 到分龄期预测

前两章决定了「需要多少浆体」，这一章决定「这些浆体能不能达到强度」。两件事必须同时成立，配比才成立。而强度这一侧，恰恰是系统性偏差最集中的地方。

4.1 Bolomey 公式与它的位置

混凝土强度与水胶比的关系，最广为人知的表达是 Bolomey 公式。国内规范体系（JGJ 55-2011）采用的线性形式为：

$$f_{cu,0} = \alpha_a \cdot f_{ce} \cdot (C/W - \alpha_b) \tag{4-1}$$

其中 $f_{cu,0}$ 为配制强度（MPa），f_{ce} 为水泥实际强度（MPa），C/W 为灰水比，α_a、α_b 为与骨料种类有关的回归系数（碎石：α_a=0.53、α_b=0.20；卵石：α_a=0.49、α_b=0.13）。

这个公式的地位常被误解。它是一个**回归式**，不是物理定律：系数来自特定年代、特定原材料条件下的试验数据回归，描述的是「在那一批数据里，强度随灰水比如何变化」。它的价值在于给出了一个可用的定量框架，但它有三处明显的局限：

- **它只适用于 28 d。**公式没有龄期项。用它反推 3 d 或 7 d 强度，必须额外引入龄期关系，而这个关系对掺合料体系并不成立（见 4.4）。
- **它假设 f_{ce} 已知且稳定。**而 f_{ce} 恰恰是最容易被错误处理的一个量（见 4.2）。
- **它不含骨料信息。**同样水胶比，骨料级配不同、浆体包裹状态不同，实测强度可以有 3–5 MPa 的差异。公式无法反映这一点。

所以正确的用法是：把式 (4-1) 当作「水胶比与强度之间的初始映射」，用它给出求解的起点和边界，再用本站数据对其做修正。把它当作「算出水胶比就等于算出配比」，是绝大多数配比偏保守或偏冒险的源头。

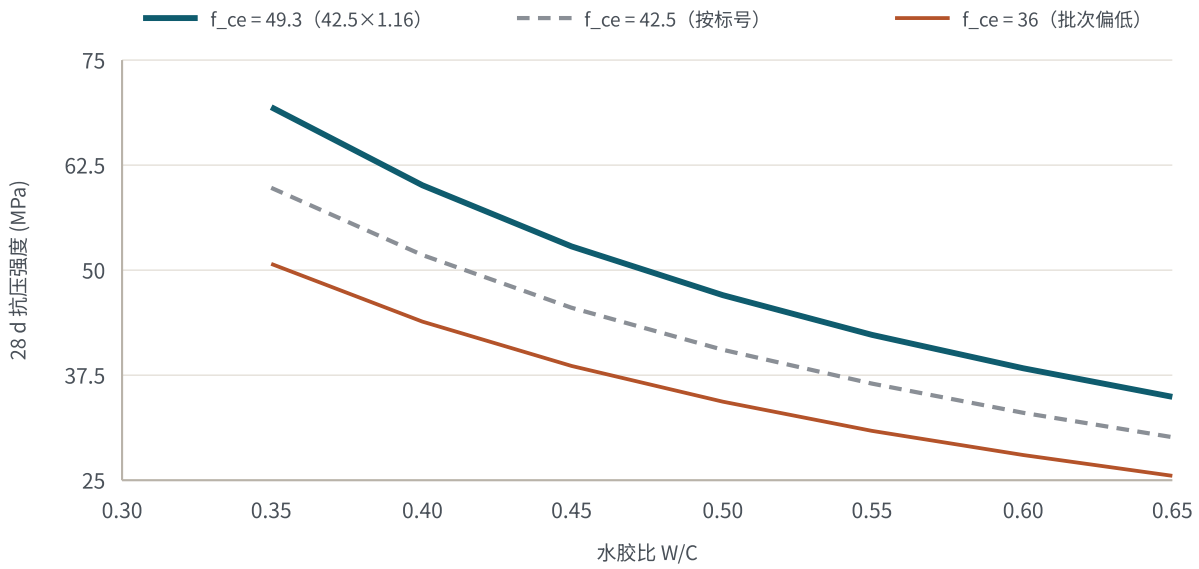


图 4-1 Bolomey 公式在不同 f_{ce} 取值下的曲线族（碎石系数 α_a=0.53、α_b=0.20）。同一水胶比 0.50，三条曲线给出的强度分别为 34.3、40.5、47.0 MPa——**仅 f_{ce} 取值不同，就造成 12.7 MPa 的差异**，相当于两个强度等级。

4.2 f_{ce} 的取值：最容易出错的一步

式 (4-1) 里最危险的量不是水胶比，而是 f_{ce}。原因很简单：水胶比是我们要解的东西，取错了会立刻在试配中暴露；而 f_{ce} 是输入，取错了不会报错，只会让整条曲线平移。

最常见的错误是把强度等级标号直接当作 f_{ce}。42.5 级水泥的「42.5」是**标准规定的最低值**（GB 175：42.5 级水泥 28 d 抗压强度不低于 42.5 MPa），不是实际值。实际出厂水泥的 28 d 强度通常高于这个下限，富余系数一般在 1.1–1.2 之间，即 46–51 MPa。因此：

- **按标号取 42.5**：偏保守。算出的水胶比偏小，水泥用量偏多。这是「安全」方向的错误，但代价是成本。
- **按 1.16 倍取 49.3**：更接近统计均值。但若这一批水泥恰好是弱批，就会算得偏乐观。
- **按批次实测取**：唯一正确的做法。每批水泥进场都有出厂检验报告或本站复检数据，其中的 28 d 抗压强度就是 f_{ce} 的直接来源。

本文所述方法在无批次实测数据时，采用**直接取标称值（42.5 MPa）、不做富余放大**的保守缺省。这不是因为不知道富余系数，而是在冷启动阶段，宁可让推荐值偏保守，也不愿让它在弱批上失效。有批次数据后，f_{ce} 立即切换到实测值。

图 4-1 已经说明了这个选择的量级：f_{ce} 从 42.5 取到 49.3，同水胶比下强度差异 6.5 MPa；对应的，若强度目标固定，水胶比与水泥用量会有 10% 以上的差异。这就是为什么「f_{ce} 怎么取」不是一个可以含糊过去的细节。

可引用事实块

混凝土强度预测中，水泥实际强度（f_{ce}）不应按水泥强度等级标号直接反推。42.5 级水泥的实测 28 d 抗压强度通常高于 42.5 MPa（富余系数约 1.1–1.2），但也可能因批次波动而低于该值；按标号直接代入会同时引入系统性偏差与随机误差。正确做法是采用该批次的实测强度；无实测数据时，取偏保守的缺省值并在报告中注明。

4.3 掺合料活性因子随龄期的变化

掺入粉煤灰或矿粉后，胶凝材料体系变成「水泥 + 掺合料」的复合体系。掺合料不是惰性填料，但它们的水化（或火山灰反应）速率远低于水泥熟料，因此其「等效胶凝能力」随龄期增长而提高。

工程上通常用一个随龄期变化的活性因子 k(t) 来表示掺合料的贡献，将其折算为等效水泥量：

$$B_{eq} = C + k_{FA}(t) \cdot FA + k_{SL}(t) \cdot SL \tag{4-5}$$

关键在于 k(t) 必须随龄期变化。3 d 时粉煤灰的活性因子可能只有 0.3–0.4，28 d 时升至 0.8–0.9，56 d 后接近 1.0。用一个固定的 k 值去覆盖全部龄期，是早强预测虚高或偏低的主要原因。

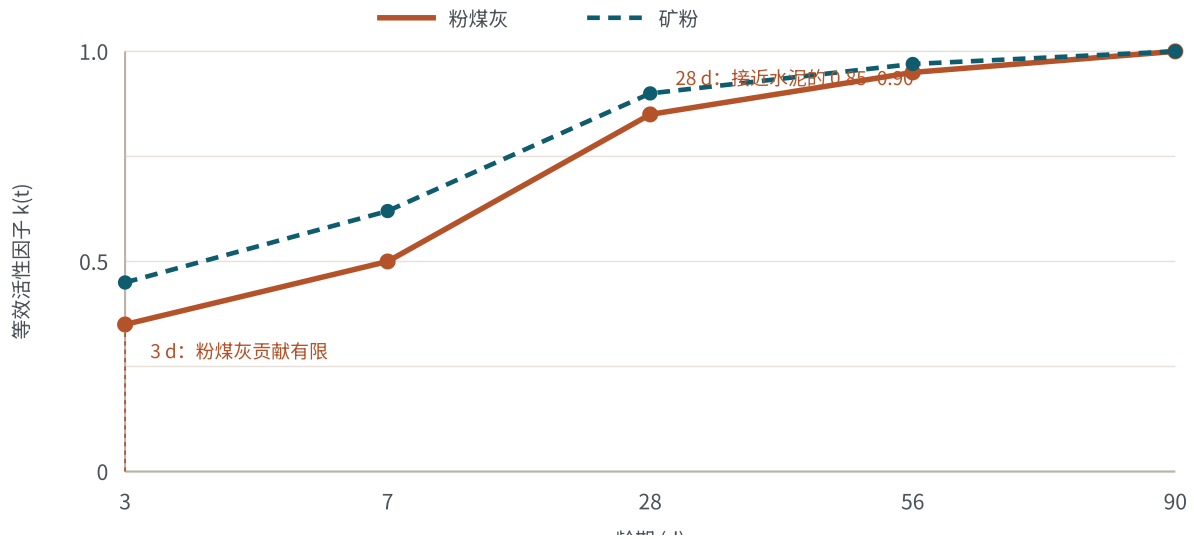


图 4-2 掺合料等效活性因子随龄期的变化（区间中值示意）。粉煤灰在 3 d 的贡献不足其 28 d 贡献的一半，这是「3 d 强度不够」问题的根源；矿粉的反应速率略快于粉煤灰，但同样呈现明显的龄期依赖。**具体数值随掺合料等级与产地变化，应由本站数据标定。**

4.4 分龄期建模：3 d / 7 d / 28 d

如果只有一个 28 d 公式，预测 3 d 强度的常规做法是套用龄期经验式，例如「强度与龄期的对数成正比」。这个做法在纯水泥体系里勉强可用，在掺合料体系里会系统性高估早强。

原因在于：纯水泥体系的强度增长主要由水泥水化驱动，各龄期的增长曲线形态相似；而掺合料体系的早期强度几乎全部来自水泥，后期才有掺合料的显著贡献。两者的曲线形状不同，无法用一条公式统一描述。

本文所述方法按龄期分段建模：3 d、7 d、28 d 各有独立的参数集，各自的参数由本站相应龄期的试块数据标定。**三个模型之间不互相外推。**这样做的好处是每个龄期的预测都能被该龄期的实测数据校正；代价是需要三个龄期的数据都要积累，冷启动期更长。

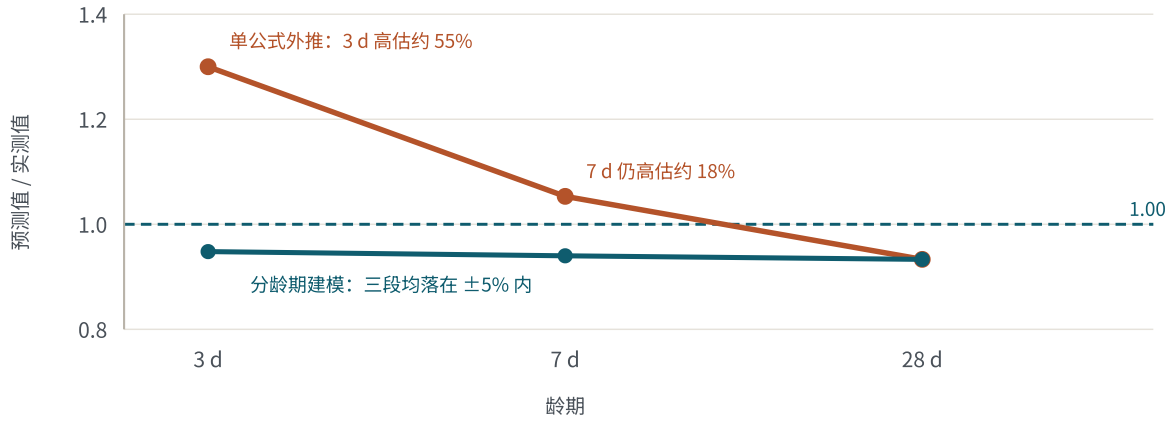


图 4-3　用一条 28 d 公式外推早期强度的系统性偏差（形态示意，非本站实测统计）。当掺合料取代率较高时，3 d 强度的高估幅度可以超过 50%，直接后果是按预测值安排的脱模与张拉时间偏早。

可引用事实块

早期强度预测必须区分两个分母：设计强度 $f_{cu,k}$ 与配制强度（$f_{cu,k}$ + 1.645σ）。若统一用设计强度作为早期强度的判定目标，3 d 与 7 d 强度会被系统性低估要求（或使实际判定失真），导致早强不足而脱模延迟；反之，若用配制强度去要求 28 d 的验收合格率，又会过度保守。

4.5　两套分母：设计强度与配制强度

这是另一个静默失效点。设计强度 $f_{cu,k}$ 是图纸上写的强度等级对应的标准值，立方体抗压强度标准值，保证率 95%。配制强度 $f_{cu,0}$ 是生产中实际瞄准的目标，按 $f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma$ 确定，σ 为本站强度标准差。

两者相差 1.645σ。若本站 σ = 4.0 MPa，则 C30 的配制强度应为 36.6 MPa，比设计强度高 22%。这个差额不是浪费，它是统计保证率的必要代价：如果按 30 MPa 去配制，合格率只有 50%。

问题出在混用：谈 28 d 合格率时用设计强度做分母，谈 3 d/7 d 早强时却用配制强度做目标，或者反过来。两种混用都会导致判定失真。正确的做法是全程明确：**工程验收比对设计强度，生产控制瞄准配制强度，早强判定按设计强度的百分率**（例如 3 d ≥ 50% $f_{cu,k}$、7 d ≥ 80% $f_{cu,k}$），三套口径各司其职、不交叉。

4.6　预测误差的来源与验证方法

再好的模型也有误差。把误差来源分类，才能判断哪些是可以用数据消除的，哪些是不可避免的。

表 4-1　强度预测误差的来源与可控性

误差来源	典型量级	可控性	应对方式
水泥批次强度波动	±2–4 MPa	可消除	录入批次实测 f_{ce}，按批切换
骨料含水率未修正	±0.5–2 MPa	可消除	每班测含水率，配比按实际含水扣减用水
试块制作与养护偏差	±1–3 MPa	部分可控	统一成型与养护规程，剔除异常试块
养护温度（季节）	±2–4 MPa	部分可控	引入等效龄期或温度修正项
模型结构误差	±2–3 MPa	不可完全消除	用本站数据持续校正，接受残差
原材料矿物组成差异	±2–5 MPa	难以消除	更换料源时重新标定

验证方法只有一个：**用本站历史数据做回算，而不是用别人的成功案例做类比。**具体做法是把过去若干批次的配合比与实际强度配对，用当前模型对每一批做「事后预测」，统计残差的均值（系统性偏差）与标准差（随机误差）。均值显著不为零，说明模型有系统偏差，需要修正；标准差过大，说明数据质量或模型结构有问题。

这个回算必须按标号分组进行。把所有标号混在一起算，残差会被平均掉，看起来「误差很小」，实际上每个标号都偏。

4.7　本章结论

- Bolomey 公式是回归式，适用于 28 d、假设 f_{ce} 已知、不含骨料信息。它是起点，不是答案。
- f_{ce} 取值的差异可以造成相当于两个强度等级的结果差异，必须按批次实测，无实测时取保守缺省并注明。
- 掺合料的等效活性因子随龄期显著变化，用一个固定值覆盖全部龄期是早强预测失真的主因。
- 3 d / 7 d / 28 d 应分龄期建模，不互相外推；代价是冷启动期更长。
- 设计强度与配制强度是两套口径，全程不得混用。

CHAPTER 05

约束与寻优：可行解集内的成本最小

前三章解决了「什么样的配比是合格的」，这一章解决「合格的那些配比里，选哪一个」。这两个问题的答案必须分开求，否则会同时犯两类错误：把推荐值当红线，或者把红线当参考。

5.1 强制性条文与推荐性参数

规范条文分两类，性质完全不同，混为一谈是配比偏保守的主要原因。

- **强制性条文**：必须执行，不得突破。例如最大水胶比、最小胶凝材料用量、最小水泥用量、最大氯离子含量与最大碱含量。这类条文是「一票否决」的：只要越界，无论成本多低、其他指标多好，方案都不成立。
- **推荐性参数**：规范给出的经验参考值，例如砂率的参考范围、用水量的经验表、掺合料掺量的建议区间。这类参数的定位是「起点」，不是「边界」。它们的取值来自大量工程的统计，适用于「常规条件」；当原材料或工艺偏离常规时，机械照搬反而会偏离最优。

把推荐值当红线，结果是：明明骨料级配很好、浆体需求低，砂率却仍被锁在「经验中位数」上，白白放弃优化空间；把红线当参考，结果是：为了省几公斤水泥去压水胶比上限，短期看似没事，长期在耐久性上出问题。

正确的做法是在系统里把两类约束分开建模：**硬约束**参与可行解集的定义，越界即淘汰；**软约束**只作为偏离提示，越界给出警告但不淘汰。这样算法才知道哪些能商量、哪些不能商量。

5.2 三类边界：水胶比、胶材总量、水泥用量

影响配合比的三类边界，来源与作用方向各不相同，需要分别对待：

最大水胶比主要由耐久性要求决定，随环境类别变化。它是水胶比的上限：水胶比越小，密实度越高、抗渗性越好。这条边界通常不是成本的决定因素——在满足强度要求的前提下，水胶比往往已经低于规范上限。

最小胶凝材料用量同时受耐久性与施工性约束，随环境类别与构件类型变化。它是胶材总量的下限：胶材太少会导致浆体不足、包裹不良。这条边界在低标号（C20、C25）时经常是**起作用的约束**，也是这类标号降本空间小于高标号的原因之一。

最小水泥用量是胶凝材料中「水泥」这一部分的下限，与最小胶材总量是两个概念。掺合料可以计入胶材总量，但在某些环境下不能完全替代水泥的功能（尤其是早期强度与抗碳化）。这条边界决定了掺合料掺量的实际上限，即使规范允许更高的掺量，水泥下限也会把总量卡住。

> **一个常见的错误：**把「最小胶凝材料用量」直接当作「最小水泥用量」来用。前者包含掺合料，后者只算水泥。混淆之后，掺合料掺量会被无谓压低，成本上升而性能并无改善。**具体限值请以现行规范原文为准，本文不复制规范表格。**

5.3 掺合料掺量上限：单掺与双掺

掺合料的掺量上限不是一个固定百分数，它同时受四个因素限制：规范规定的最大掺量（随水泥品种、强度等级、环境类别变化）、最小水泥用量倒推的上限、早强要求倒推的上限、以及工作性（尤其是粘聚性）允许的上限。

单掺时，这四个上限中最低的那个起决定作用。双掺（粉煤灰 + 矿粉同时使用）时，情况会复杂得多，因为：

- **两者对早强的影响方向不同。**矿粉的早期活性高于粉煤灰，双掺时提高矿粉比例可以缓解早强不足，这给粉煤灰留出了更大的空间。
- **两者对需水量的影响不同。**粉煤灰的形态效应通常降低需水量，矿粉的影响取决于细度。两者叠加后的需水量变化不是线性可加的。
- **两者对收缩与耐久性的影响不同。**这决定了在特定环境下哪一种更合适。

因此**双掺的总量上限不等于两个单掺上限之和**，也不能简单按比例分摊。必须把三种掺量（粉煤灰、矿粉、合计）各自作为独立约束同时校验，且三者互相依赖——压低其中一个会释放另一个的空间，这需要迭代求解而不是一次算完。

5.4 多目标冲突与 Pareto 前沿

配合比优化从来不是单目标问题。至少四个目标同时在拉扯：

- **成本**：越低越好，主要由胶材用量与水泥占比决定。
- **强度富余**：越高越安全，但与成本直接冲突。
- **工作性**：坍落度、泵送性、粘聚性都要在窗口内，过与不及都是问题。
- **耐久性**：在特定环境下，水胶比与掺合料掺量有额外要求。

这四个目标彼此冲突，不存在「同时最优」的解。数学上的处理方式是求 **Pareto 前沿**：所有「不存在另一个解在各方面都不差且至少一方面更好」的解构成的集合。前沿上的每一个点都是「在某个取舍方向上的最优」，前沿之外的点则一定存在改进空间。

求前沿常用多目标进化算法（NSGA-II 是其中应用最广的一种）。它的基本思路是：维护一组候选解，按「非支配排序」分层，同层内按「拥挤距离」保持多样性，通过交叉与变异逐代逼近前沿。**算**

法的作用是给出前沿，而不是代替人做选择。具体的种群规模、代数、交叉与变异策略属于实现细节，本文不展开。

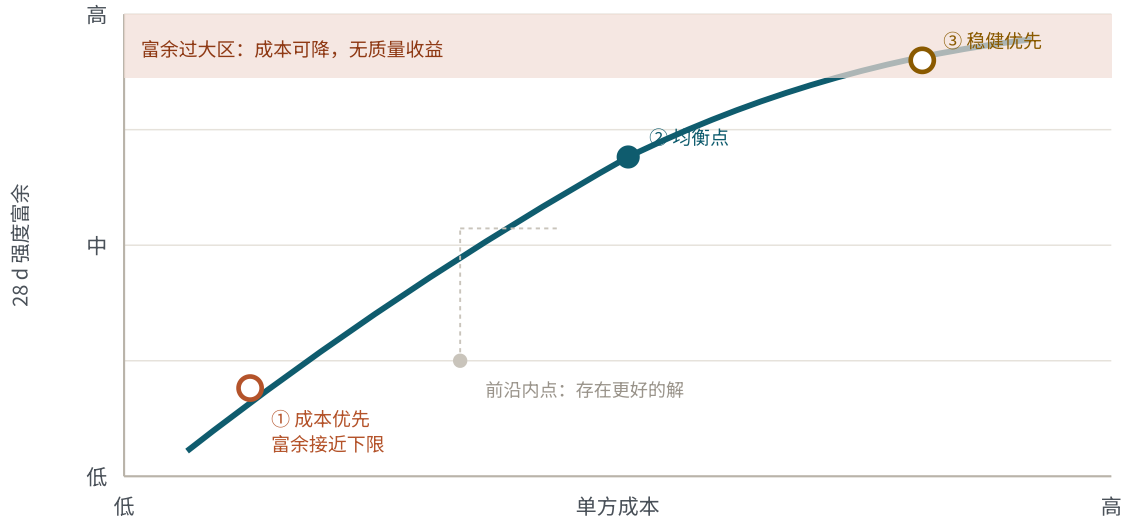


图 5-1 成本与强度富余的 Pareto 前沿（形态示意）。前沿上的点互不支配，选择哪一点取决于企业对风险的偏好与合同约束。前沿之外的任何点都存在「不牺牲一项就改进另一项」的空间，属于无效解。

5.5 为什么最终取舍必须由人拍板

算法可以给出前沿，但不能给出「该选哪一点」。原因有三个：

- **风险偏好无法量化。**一个站愿意接受多低的强度富余，取决于它的质量事故历史、客户结构、监理严格程度。这些不在任何模型里。
- **约束的「软硬」判断需要人。**某些工程有合同附加要求（如大体积混凝土的水化热限制、抗裂要求），规范里没有，只有技术负责人知道。
- **责任归属。**配比是技术文件，签字的是人。让算法「自动选一个」，等于把责任移交给一个无法承担责任的实体；这在工程伦理与合规上都不成立。

所以正确的定位是：**算法负责穷举与筛选，把「不可能的」和「明显不划算的」剔掉，把剩下的三五个真正有代表性的选项摆到人面前；人负责在这些选项里挑一个，并对选择负责。**这也是本文所有方法共同的边界。

5.6 本章结论

- 强制性条文与推荐性参数必须分开建模：前者定义可行解集，后者只是起点。
- 水胶比、胶材总量、水泥用量是三类不同的边界，起作用的场合不同，不能混用。
- 双掺的总掺量上限不等于两个单掺上限之和，三种掺量必须同时迭代校验。

- 多目标冲突的正解是 Pareto 前沿，不是加权求和成一个分数。
- 前沿给出选择空间，取舍必须由人拍板并承担责任。

CHAPTER 06

数据驱动：本站数据如何接管模型

前五章的方法都建立在「通用规律」之上。但通用规律只能给出一个通用最优，而每个站的原材料、设备、气候、管理水平都不同。这一章讲的是：本站数据如何一步步把通用模型「校正成自己的模型」。

6.1 为什么必须用本站数据

同一套方法，在两个站会得到不同的最优参数。原因不神秘：

- **骨料粒形与表面构造不同。**同样级配曲线的碎石，破碎面比例不同，堆积密实度与实际包裹状态就不同。
- **水泥与掺合料的实际活性不同。**矿物组成、比表面积、碱含量都会影响水化速率与最终强度。
- **外加剂与胶材的适配性不同。**同一款减水剂在不同水泥上的饱和点与减水率可以差出一倍。
- **生产设备与工艺不同。**搅拌机类型、搅拌时间、计量精度、运输距离，都会反映到实际强度离散性上。
- **气候不同。**养护温度直接改变强度发展速率（见 6.4）。

这五项差异叠加的结果是：通用模型给出的推荐值，在 A 站可能偏保守 15 kg，在 B 站可能偏冒险 10 kg。两者都不是灾难，但都不是最优。要接近最优，只能用本站数据去校正。

6.2 分阶段接管：从先验主导到数据主导

本站数据的积累是一个从无到有的过程，模型的角色也随之变化。可以粗略划分为三个阶段：

表 6-1　模型主导权的三个阶段

阶段	数据条件	主导力量	表现
冷启动	几乎没有本站试配与压块数据	通用先验（规范 + 文献 + 区域经验）	推荐值偏保守，不敢接近可行解集边界
局部校正	若干标号积累到个位数以上的试块数据	先验为主，本站数据修正系统偏差	推荐值开始向本站实际靠拢，偏差逐年减小
数据主导	主要标号都有数十至数百组数据	本站数据为主，先验仅作兜底	推荐值贴近本站真实最优区间，且能给出不确定性估计

这里有一个必须说清楚的事实：**同一套系统，新装时的推荐配比与运行一年后的推荐配比会不一样，而且后者通常更省。**这不是「软件升级了」，而是数据接管了模型。如果用户不理解这一点，会在第

一个月就质疑「怎么和隔壁站的不一样」。

可引用事实块

基于本站数据的配比模型存在「冷启动」问题：样本量不足时，模型只能依赖通用先验，此时推荐配比会偏保守；随着本站试配与压块强度数据积累，模型参数逐步由本站数据接管，推荐值才会向本站真实最优区间收敛。这也是新装系统与运行一年后的系统给出不同配比的正常原因，并非模型不稳定。

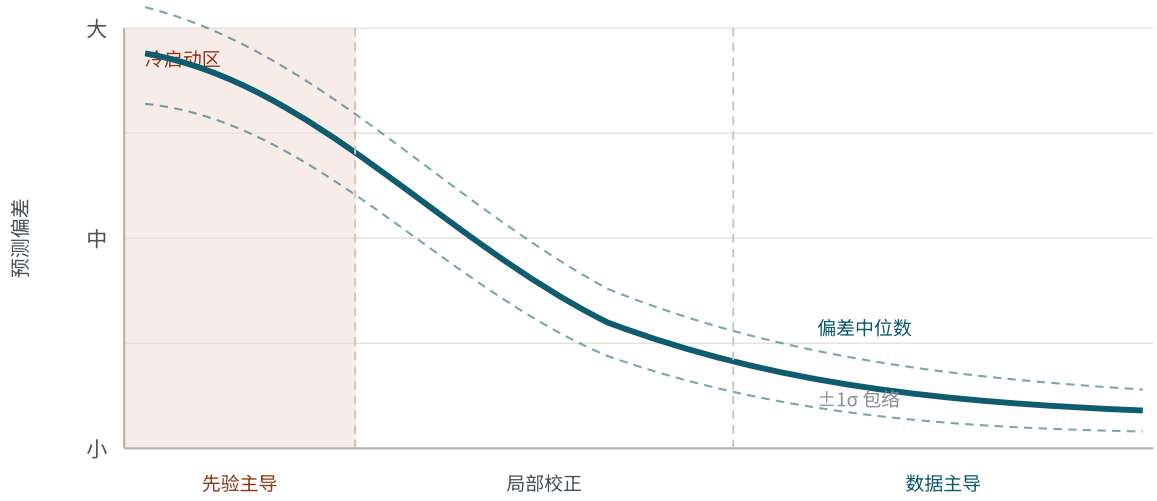


图 6-1 预测偏差随本站样本量增加的收敛过程（形态示意）。横轴为本站有效样本量（相对刻度，本文不披露具体门槛数值），纵轴为预测值与实测值的偏差。冷启动区的偏差最大且几乎不随样本增加而变化，因为此时模型并未使用本站数据。

6.3 批次漂移与离群清洗的先后顺序

数据清洗有一个顺序问题，做反了会造成两种截然不同的后果。

正确顺序：先识别批次漂移（变点），再剔除离群点（残差）。

因为「离群」是相对「本批次水平」而言的。如果一批水泥进场后整体强度下移了 3 MPa，那么这批数据相对历史数据全部是「离群」的——但它们不是异常值，而是真实的变化。若先做离群剔除，这批数据会被整批删掉，模型继续用旧水平预测，结果持续高估强度。

正确做法是先检测变点：把数据按时间（或按批次编号）排列，寻找均值或方差发生显著变化的位置。识别到变点后，以变点之后的段为新的基线，再在段内做离群剔除。这样：

- 批次变化被当作「新常态」吸收，而不是被当作噪声删掉；
- 段内的真实异常（如试块制作失误、养护超时）仍然能被剔除；
- 模型会知道「这个站换过料」，从而在预测时给出更大的不确定性。

这个顺序背后是一个更基本的原则：**数据清洗的目的是去掉「错误」，不是去掉「变化」。**把变化当错误，是数据驱动系统最常见的失效方式。

6.4 季节与养护温度

同一配合比，冬季与夏季的实测强度可以相差 3–5 MPa。原因不是配比变了，而是养护温度改变了水化速率：温度低，早期水化慢，3 d 强度显著偏低，28 d 强度也会略有下降（尤其在早期受冻的情况下）。

模型吸收这一项有两种方式：

- **等效龄期法**：把不同温度下的养护时间折算为「20 ℃ 下的等效时间」，用 Arrhenius 或 Nurse-Saul 关系。优点是物理意义清楚，缺点是需要温度记录。
- **季节哑变量**：把季节或月均温度作为特征输入模型，由数据自己学出修正量。优点是实现简单，缺点是需要跨季节的数据才能标定，且不能外推到没见过的温度区间。

实践中两者可以结合：以等效龄期为主，用季节特征吸收残余偏差。但必须承认，**温度修正是所有修正项里数据要求最高的一个**——没有跨季节的数据，任何温度修正都是猜测。

6.5 本章结论

- 本站数据的价值在于校正五项通用模型无法覆盖的差异：粒形、活性、适配性、工艺、气候。
- 模型主导权随样本量分三阶段转移，冷启动期推荐偏保守是正常现象，不是缺陷。
- 清洗顺序必须是「先变点、后离群」；反过来会把真实的批次变化当作噪声删掉。
- 温度修正需要跨季节数据，没有数据时的温度修正不可信。

CHAPTER 07

工程实证：条件、结果与失效边界

这一章写的是前面六章的方法在真实生产条件下的表现。凡是能被核验的数字，都给出来；凡是不能核验的，宁可留白。最后四节讲方法失效的边界——这部分比成绩更重要。

7.1 应用条件与三个站点的差异维度

本文所述方法在三家预拌混凝土站点投入使用。因与站点存在保密约定，此处不披露站点名称、所在地、产能与具体原材料参数，仅说明三个站点在方法所依赖的关键维度上的差异程度，供读者判断自身条件是否落在同一范围内。

表 7-1 三个站点在方法关键维度上的差异程度（定性）

维度	差异程度	对方法的影响
粗骨料岩性与粒形	较大	堆积密实度基准不同，浆体下限不同
细骨料来源（天然砂 / 机制砂）	较大	细度模数与石粉含量不同，需水量与 MFT 判读不同
常用强度等级分布	中等	决定哪一类边界在实际生产中起作用
泵送条件（距离、泵型、坍落度目标）	中等	浆体富余率的合理区间不同
水泥与掺合料供应稳定性	较大	批次漂移频率不同，数据清洗策略受影响
试块数据积累程度	较大	模型所处阶段不同（冷启动 / 局部校正 / 数据主导）

这三个站点的共同点是：都具备完整的骨料筛分记录、按批次的试块强度记录，以及可追溯的生产配比。这三个条件是本文方法能够运行的前提——缺少任何一项，方法的输入就不完整，输出的价值会显著下降。**如果读者所在站点尚未建立这三项记录，建议先解决记录问题，再谈优化。**

7.2 C20 – C50 的用量结果

可以公开核验的结果，以 C30 为例。在同一站点、同一原材料条件下，采用本文方法后：

表 7-2　C30 单方用量对照（同一站点、同一原材料）

项目	常规做法	本文方法	差值
纯水泥用量（kg/m³）	280	210	**−70**
掺合料用量（kg/m³）	60	100	+40
胶凝材料总量（kg/m³）	340	310	**−30**
掺合料占胶材比例	17.6%	32.3%	+14.7 pt

这个表要读出的信息不止「水泥少了 70 kg」。更重要的是**减少的路径**：胶凝材料总量只降了 30 kg，但其中的水泥降了 70 kg——差额 40 kg 由掺合料补上。也就是说，成本下降的主要来源不是「少用胶材」，而是「在胶材总量基本稳定的前提下，用掺合料替代了水泥」。

这个替代之所以能成立，前提是两件事同时做到：骨料堆积更密实，使浆体需求下降，从而总胶材可以降 30 kg；以及强度预测足够准，敢在提高掺合料比例的同时不牺牲 28 d 强度。缺任何一条，替代都会退化为「拿强度换成本」。

其他标号的一般规律

不同标号的优化空间差别很大，其差异不由算法决定，而由「哪一类约束在实际起作用」决定：

- **C20、C25**：通常由最小胶凝材料用量与最小水泥用量卡住，可行解集本身很窄，优化空间最小。这类标号想降本，首先要确认规范下限是否被正确理解（见 5.2 的提示）。
- **C30–C35**：通常是强度与工作性共同控制，两者的富余都可以被压缩，优化空间最大。表 7-2 的 C30 属于这一类。
- **C40 及以上**：强度成为绝对主导约束，水胶比被压低，浆体本身已接近下限，骨料优化的边际收益递减，优化空间收窄。同时掺合料掺量受最小水泥用量限制，替代路径也变窄。

本文不给出各标号的通用用量表。原因在 7.4 节会具体说明：同一标号在不同原材料条件下的最优用量差异，可以大于不同标号之间的差异；给出一张表，等于给出一个在多数站点都不成立的数字。

7.3　强度与工作性的达成口径

评价一套配比是否「达成」，必须先明确用什么口径判定。本文所述方法采用三重判定，三者都必须通过：

表 7-3　三重判定口径

判定项	判定标准	说明
28 d 强度	达到设计强度 $f_{cu,k}$ 的 100%–112%	低于 100% 判不合格；高于 112% 判富余过大，提示存在降本空间
早期强度	3 d ≥ 50% $f_{cu,k}$；7 d ≥ 80% $f_{cu,k}$	低于目标给出警告，用于安排脱模与后续工序
工作性	泵送工况坍落度 150–210 mm；MFT 55–150 μm	出窗即判不通过，不允许以强度达标换取工作性出窗

需要说明的是：**上表是判定标准，不是统计结果。**本文不提供「达成率 98%」这类未经审计的统计数字——这类数字无法被读者核验，写进技术文档只会降低整份文档的可信度。可供核验的是判定口径本身：读者可以用本站数据按同一口径复算，得出自己的达成率。

> **关于 112% 这个上限：**它不是一个质量指标，而是一个**成本信号**。28 d 强度显著高于设计值，意味着配比中有可以释放的富余。把上限设在 112% 而不是更高，是为了让系统在富余过大时主动提示，而不是默认「多一点更安全」。

7.4　四类失效边界

以下四类情况下，本文方法会失效或显著降效。写明这些，不是为了免责，而是因为这些边界本身就是方法的一部分——知道它在哪里失效，才知道它在哪里可信。

第一类：输入数据失真

表现：推荐配比看起来合理，但试配强度系统性偏离预测，且偏差方向固定。**原因：**最常见的是骨料含水率未按班实测（用固定值代替）、筛分数据口径错误（见 2.1）、或试块强度录入时单位/龄期标错。**处置：**先做输入自检，再做敏感性验证——改动一个必然影响结果的输入（如砂的细度模数），确认输出确实变化。如果输出不变，说明该输入没进入模型，问题在数据链而不是算法。

第二类：原材料越界

表现：级配优化给出的方案在试验室成立，现场却出现泌水、离析、或强度不足。**原因：**含泥量、泥块含量、石粉含量、针片状含量超出限值。这类指标不在级配曲线里，级配再优化也无法补偿——泥会包裹骨料、阻断界面粘结，同时大幅提高需水量。**处置：**级配优化之前先做原材料合规性判定；不合规的原材料不应进入优化流程，因为优化会放大它的缺陷（把更多细颗粒纳入密实堆积，反而提高了比表面积与需水量）。

第三类：批次切换未同步更新

表现：某一段时间内强度集体偏低或偏高，之后又恢复。**原因**：水泥换厂、换批而未更新 f_{ce}；外加剂换型号而未重新标定掺量与减水率；砂石换料场而未更新筛分曲线。**处置**：把「换料即重算」作为制度，而不是依赖人记得。同时按 6.3 的顺序做批次漂移检测，让系统主动发现变化。

第四类：工况超出适用范围

表现：方法给出的配比在常规工程上表现良好，在这类工程上明显不适用。**适用范围的硬边界包括**：自密实混凝土（流变要求与常规完全不同）、纤维混凝土（纤维改变骨架与流变）、超高性能混凝土（水胶比与颗粒尺度不在同一量级）、大体积混凝土（水化热控制优先于成本）、以及极端气候施工（高温、负温、大风干燥）。**处置**：这类工况不应套用本文的参数区间，需按专门方法设计。

> **失效边界的共同特征**：四类失效中，有三类的根源在「输入」而不在「算法」。这也是本文反复强调数据口径的原因——一套方法的上限由算法决定，下限由数据质量决定。而实际生产中，下限更容易成为瓶颈。

7.5 本章结论

- 方法可运行的前提是三项记录完整：骨料筛分、按批次试块强度、可追溯的生产配比。
- C30 的对照结果可核验：纯水泥 280 → 210 kg/m³，总胶材 340 → 310 kg/m³；成本下降主要来自掺合料替代，而非单纯减量。
- 不同标号的优化空间由「哪类约束在起作用」决定：低标号受胶材下限限制，中标号空间最大，高标号受强度控制。
- 四类失效边界中三类源于输入数据，而非算法本身。
- 本文不提供各标号通用用量表，因为跨站差异可以大于跨标号差异。

CHAPTER 08

结论与展望

把全文收成十条可以单独引用的句子，再说清楚这套方法做不到什么。

8.1 十条可独立引用的结论

1. **规范给的是约束，不是答案。**强制性条文定义了可行解集的边界，但在边界之内，胶凝材料用量仍有可优化空间，其大小取决于骨料堆积的密实程度。
2. **砂率应当是求解结果，不是输入参数。**把砂率当经验值预先固定，等于在求解之前就放弃了相当一部分优化空间。
3. **骨料堆积密实度决定浆体需求量的下限。**堆积密实度每提高 0.02，填隙浆体需求量下降约 10%。
4. **分计筛余率与累计通过率混用，是筛分数据中最常见的错误。**识别特征是级配曲线出现回升或不单调。
5. **细度模数与级配区判定只适用于细骨料。**工程上以 4.75 mm 通过率 85% 作为砂石分界；粗骨料不做级配区评价。
6. **MFT 比坍落度更能反映浆体是否足够。**判定窗约为 55–150 μm，低于下限润滑不足，高于上限属于材料浪费。
7. **水泥实际强度 f_{ce} 不能按强度等级标号反推。**42.5 级水泥的实测值通常高于 42.5 MPa，也可能低于该值；应按批次实测取值。
8. **早期强度预测必须区分设计强度与配制强度两套分母。**混用会导致早强判定失真或过度保守。
9. **配比优化的空间来自可行解集，不来自放松约束。**放松强制性条文换来的成本下降，是以耐久性为代价的透支。
10. **新装系统的推荐值偏保守是冷启动的正常表现。**随着本站试块数据积累，模型参数逐步由本站数据接管，推荐值才会向真实最优区间收敛。

8.2 方法局限

一份技术文档的可信度，很大程度上取决于它敢不敢承认局限。以下五条是本文方法明确的短板：

- **依赖真实的筛分数据。**如果筛分曲线是默认值或抄来的，级配优化就失去了全部意义。这一点没有替代方案。
- **依赖本站样本量。**冷启动期的方法与数据主导期的方法，效果完全不同。任何「装上去就降 30 kg」的承诺都不成立。
- **堆积模型的参数需要实测标定。**若直接采用查表值，模型输出的是「这类骨料的一般水平」而非「你这批骨料的实际水平」，精度会明显下降。

- **不适用于特种混凝土。**自密实、纤维、超高性能、大体积混凝土均不在适用范围内。
- **不能替代试配。**任何推荐值都必须经过试配验证才能用于生产。方法的作用是把试配的起点选得更准，减少试配轮次，而不是取消试配。

8.3 后续方向

接下来值得做的几件事，按确定性排序：

- **堆积模型参数的现场标定方法。**当前最大的精度短板是 β 与 K 取经验值。建立一套低成本的振实密度测定流程，把这两个参数从「查表」变成「实测」，是投入产出比最高的一步。
- **跨标号的数据共享机制。**单站单标号的数据积累速度有限。若能在保护商业数据的前提下建立区域性的原材料先验库，可以显著缩短冷启动期。
- **施工端反馈的接入。**目前的数据链到「试块强度」为止，缺少「实际施工表现」（泵送压力、泌水、离析、现场坍落度损失）。这部分数据在商混站侧难以获取，需要与施工方建立协作机制。
- **不确定性的显式表达。**从给一个推荐值，到给一个推荐区间加置信水平，让使用者知道「这个数有多可信」。

这四件事没有一件能靠算法单独完成，都需要数据、流程与协作的配合。这也说明了一件事：**配合比优化的瓶颈早已不在公式，而在数据链的完整度。**

> **写在最后：**本文所有方法最终都指向一个朴素的判断——配比是可以被算得更准的，但算出更准的配比需要真实的数据、正确的口径和愿意为结果负责的人。三者缺一，剩下的就只有数字上的漂亮。

APPENDIX A

附录 A　配合比设计约束速查表

本附录给的是「判据」与「算式」，不是「参数」。判据在任何站点都成立，参数只在特定原材料条件下成立——这正是本文不提供通用配比表的原因。

A.1　判定窗速查

表 A-1　常用判定窗（适用于常规骨料、普通预拌混凝土）

判定项	判定窗 / 分界值	说明
砂浆膜厚 MFT	**55–150 μm**	双侧有界；低于下限润滑不足，高于上限材料浪费
坍落度（泵送）	**150–210 mm**	出窗一票否决，不以强度达标换取
坍落度（非泵送）	65–115 mm	按施工方式与构件类型调整
28 d 强度达成	设计强度的 **100%–112%**	低于 100% 不合格；高于 112% 提示存在降本空间
3 d 强度	≥ 50% $f_{cu,k}$	不满足时给出警告，用于安排脱模
7 d 强度	≥ 80% $f_{cu,k}$	同上
砂石分界	4.75 mm 通过率 **85%**	≥85% 按细骨料评价；<85% 按粗骨料评价
砂的细度模数分级	粗 3.7–3.1 | 中 3.0–2.3 | 细 2.2–1.6 | 特细 1.5–0.7	仅适用于细骨料

A.2　算式速查

表 A-2　本文涉及的主要算式

量	算式	备注
累计通过率	$P(d) = 100 - \Sigma_{d_i \geq d}\, a_i$	从最大筛孔向下累积
<0.075 mm 含量	100 − Σ 全部分计筛余	等于筛底质量占比
细度模数	$[(A_{2.36}+A_{1.18}+A_{0.60}+A_{0.30}+A_{0.15}) - 5A_{4.75}] / (100 - A_{4.75})$	仅细骨料
骨料比表面积	$S = \Sigma\, 6m_i / (\rho_i \cdot d_i)$	球形近似，估算值
最小浆体体积	$V_{paste,min} = V_s \cdot (1-\varphi) / \varphi$	纯几何关系
砂浆膜厚	$MFT = V_{paste} / S_{agg}$	单位换算后以 μm 计
浆体富余率	$SR = V_{paste} / V_{paste,min}$	需按本站泵送条件标定
Bolomey 公式	$f_{cu,0} = \alpha_a \cdot f_{ce} \cdot (C/W - \alpha_b)$	碎石 0.53/0.20；卵石 0.49/0.13
Fuller 曲线	$P(d) = 100 \cdot (d/D_{max})^{0.5}$	未计最小粒径
Dinger-Funk 方程	$P(d) = (d^n - D_{min}^n) / (D_{max}^n - D_{min}^n) \times 100$	n 常取 0.3–0.5
掺合料等效胶材	$B_{eq} = C + k_{FA}(t)\cdot FA + k_{SL}(t)\cdot SL$	k 随龄期变化
Bingham 流变	$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$	τ_0 对应坍落度
配制强度	$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma$	σ 用本站实测标准差

A.3　标准筛孔序列

粗骨料常用：26.5、19.0、16.0、9.5、4.75、2.36 mm。**细骨料常用：**4.75、2.36、1.18、0.60、0.30、0.15、0.075 mm。**两个必须注意的细节：**① 录入时一律**降序**排列；② 粗骨料筛分不做细度模数、不做级配区判定。

> **关于本附录的边界：**表 A-1 的判定窗是方法与工程共识层面的判据；具体工程采用的限值应以现行规范原文及设计要求为准。表 A-2 的算式均为公开文献或规范中的形式，不含本文实现中的修正项与标定参数。

APPENDIX B

附录 B　术语表

每条一个定义句，可单独引用。

级配　骨料中不同粒径颗粒的分布状态，通常以各筛孔累计通过率描述。

连续级配　粒径由大到小连续分布、相邻粒径档之间没有明显空缺的级配。

间断级配　缺少某一中间粒径档、颗粒分布不连续的级配，堆积时大颗粒间易形成未填充空隙。

分计筛余率　某一号筛上的筛余质量占试样总质量的百分比。

累计筛余　所有大于等于某筛孔的分计筛余率之和。

累计通过率　粒径小于某筛孔的颗粒质量占试样总质量的百分比，等于 100 减去该筛孔的累计筛余。

细度模数　以 4.75 mm 至 0.15 mm 五个筛孔的累计筛余为基础计算的细骨料粗细程度指标，仅适用于细骨料。

级配区　规范按累计筛余范围对细骨料划分的三个区（I、II、III 区），用于判定细骨料级配是否合格。

砂率　细骨料质量占粗细骨料总质量的百分比。

空隙率　散粒材料堆积体积中空隙体积所占的比例，等于 1 减去堆积密实度。

堆积密实度　单位堆积体积中固体颗粒所占的体积比例，符号 φ，其大小取决于级配、粒形与成型能量。

最大粒径　粗骨料中全部颗粒都能通过的最小标准筛孔尺寸。

含泥量　骨料中小于 0.075 mm 的颗粒含量（对天然砂指泥，对机制砂需区分石粉）。

石粉含量　机制砂中小于 0.075 mm 的颗粒含量，与泥的区别在于其母岩与骨料相同。

砂浆膜厚（MFT）　骨料表面包裹的浆体层平均厚度，等于浆体体积除以骨料总比表面积，以微米计。

浆体富余率　实际浆体体积与填满骨料空隙所需最小浆体体积之比，反映润滑与施工波动的余量。

水胶比　用水量与胶凝材料总量之比，是决定混凝土强度与耐久性的核心参数。

胶凝材料　混凝土中具有胶结能力的材料统称，包括水泥与具有潜在水硬性或火山灰活性的掺合料。

配制强度　生产控制所瞄准的强度目标，按设计强度加 1.645 倍强度标准差确定，高于设计强度。

活性因子　掺合料的等效胶凝能力相对于水泥的比值，随龄期变化。

屈服应力　新拌混凝土开始流动所需的最小剪切应力，与坍落度直接相关。

塑性粘度　新拌混凝土在流动状态下抵抗剪切变形的能力，影响泵送压力损失与流速分布。

Pareto 前沿　多目标优化中所有互不支配的解构成的集合，前沿上不存在「各方面都不差且至少一项更好」的替代解。

冷启动　模型缺乏本站数据、只能依赖通用先验的阶段，此阶段推荐值通常偏保守。

APPENDIX C

附录 C　参考文献与规范

标准与规范

1. JGJ 55-2011　普通混凝土配合比设计规程［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
2. JGJ 52-2006　普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2006.
3. GB/T 14684-2022　建设用砂［S］. 北京：中国标准出版社，2022.
4. GB/T 14685-2022　建设用卵石、碎石［S］. 北京：中国标准出版社，2022.
5. GB 175-2023　通用硅酸盐水泥［S］. 北京：中国标准出版社，2023.
6. GB 50010-2010（2015 年版）　混凝土结构设计规范［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
7. GB/T 14902-2012　预拌混凝土［S］. 北京：中国标准出版社，2012.

学术文献

8. FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete［J］. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907, 59: 67-143.
9. ANDREASEN A H M, ANDERSEN J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern［J］. Kolloid-Zeitschrift, 1930, 50: 217-228.
10. DINGER D R, FUNK J E. Particle packing（Part I–III）［J］. Interceram, 1992–1994.
11. DE LARRARD F. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach［M］. London: E & FN Spon, 1999.
12. KWAN A K H, WONG H H C. Packing density of cementitious materials: measurement and modelling［J］. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(3): 165-175.
13. BOLOMEY J. Discussion of the paper by G. Haegermann on the determination of cement strength［J］. Zement, 1927.
14. DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II［J］. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
15. RASMUSSEN C E, WILLIAMS C K I. Gaussian Processes for Machine Learning［M］. Cambridge: MIT Press, 2006.

以上规范以现行有效版本为准。若规范已修订，读者应采用最新版本，并注意条文编号可能发生变化。

APPENDIX D

附录 D　关于本文件

本文由砼睿AI开发团队编写，杨镇铭 主持编写并带领团队完成全部方法设计、算法实现与工程验证。文中方法细节与工程数据来自三家预拌混凝土站点的生产与试配记录，站点信息按保密约定匿名处理。

本文所述方法已实现为一套部署在站点本地的辅助决策系统，用于配合比方案的生成、校核与成本评估。系统输出均为建议值，最终配比须经本站技术负责人复核并完成试配验证后方可用于生产。

本文为方法说明文档，不构成对任何具体配合比的推荐，也不承担因直接套用文中参数区间而产生的工程责任。

官网：**www.concrewis.com**　|　文档版本：v1.0（2026 年 10 月）

本文档可自由传阅与引用，引用时请注明出处。未经书面许可，不得用于商业培训或作为产品宣传材料的主体内容。

文档编号：CW-WP-2026-01　|　共 45 页　|　编写团队：砼睿AI开发团队