

MensaHomMax 浆骨匀质性增强技术

Maximized Homogeneity——混凝土匀质性最大化技术

一、浆骨匀质性增强技术简介

混凝土本质上属于由胶凝材料连续相、细粗骨料分散相及界面过渡区共同构成的多尺度颗粒复合体系。其宏观工作性与力学性能不仅取决于胶凝材料水化及骨料级配，还受到浆体流变特征、颗粒相空间分布及浆—骨界面协同状态的共同影响。

在新拌阶段，由于各固相组分在粒径尺度、表观密度、比表面积及流变响应等方面存在显著差异，体系在剪切、输送、浇筑及静置过程中具有天然的相间迁移倾向。当连续相的屈服支撑能力、黏性阻尼、触变恢复及界面作用不足以维持颗粒体系稳定时，粗骨料与胶凝浆体将产生差异化运动，进而形成局部浆骨比偏移、骨料空间分布波动、浆体富集及界面结构非均质化。

因此，混凝土的“非离析”并不等同于真正意义上的“高匀质”。宏观稳定状态下，材料内部仍可能存在介观尺度上的组分偏聚与结构差异，并进一步影响颗粒骨架连续性、界面过渡区质量及荷载传递效率。

MensaHomMax 浆骨匀质性增强技术即针对上述介观非均质行为，通过对浆体流变结构、浆—骨界面作用及颗粒相迁移行为进行协同调控，提高骨料在胶凝连续相中的空间稳定性与分布均一性，建立更加稳定的浆骨协同结构。

基于这一技术逻辑，MENSA 将高密实度混凝土配合比设计与浆骨匀质性增强技术进行系统耦合。前者通过优化骨料级配、颗粒堆积及浆骨体积关系，提高固相堆积效率；后者进一步改善浆体对骨料的承载、包覆与空间稳定能力，使更高比例的骨料能够在保持良好施工性能的条件下参与结构构建，并充分发挥其骨架承载与传力作用。

经过 MENSA 近 5 年的持续工程应用与累计超过 1 亿 m^3 混凝土的规模化验证，该技术体系在混凝土绿色低碳、材料效率提升以及成本结构优化方面表现出明显的产业化价值。其核心并非依赖单纯增加胶凝材料或提高浆体强度，而是通过提高颗粒堆积

效率、改善浆骨空间分布、强化界面协同及优化荷载传递路径，将材料性能更多地转化为结构性能。

在相同基准配合比、相同胶凝材料体系及相近施工工作性的条件下，采用高密实度配合比设计与 MensaHomMax 浆骨匀质性增强技术后，混凝土内部浆骨分布更加均匀，颗粒骨架更加连续，局部弱区与浆体富集现象显著降低，结构整体承载效率得到提高。

MENSA 工程验证结果表明：在同配比条件下，混凝土 28 d 抗压强度可提高约 6–10 MPa，56 天抗压强度提高 8-10Mpa。

这一结果表明，混凝土性能提升并不必然依赖更高的胶凝材料用量。通过对颗粒骨架、浆骨关系及介观匀质性进行重新设计，同样能够获得显著的强度增益，并为降低胶凝材料消耗、提高骨料利用率和降低单位混凝土碳排放提供新的技术路径。

二、传统混凝土浆骨非均质形成机制

从流变学和颗粒悬浮体系角度看，新拌混凝土属于典型的高固相体积分数、多尺度颗粒复合体系。胶凝浆体作为连续相，不仅承担颗粒润滑和流动传递作用，同时还需要维持砂、石骨料在体系中的空间稳定。由于各组分在粒径、密度、比表面积及惯性响应等方面存在显著差异，浆体与骨料在搅拌、运输、泵送、浇筑及振捣过程中不可避免地产生不同程度的相对运动。因此，混凝土浆骨匀质性并非由单一黏度参数决定，而是由浆体屈服应力、塑性黏度、触变恢复能力、浆—骨界面作用以及颗粒迁移行为共同控制。

其中，屈服应力决定浆体在静止和低剪切状态下对粗骨料的基础支撑能力。当屈服应力不足时，粗骨料在重力作用下容易发生沉降，并诱发浆体向上迁移；而屈服应力过高，则会增加体系启动流动所需的剪切应力，影响混凝土流动性和施工响应。塑性黏度则主要影响浆体与骨料发生相对运动时的黏性阻尼，适宜的黏性阻力有助于抑制粗骨料沉降及浆骨速度差，但单纯依赖提高黏度并不能实现真正意义上的浆骨匀质。传统黄原胶、瓜尔胶、纤维素醚等体系主要通过连续相增黏改善宏观稳定性，其作用更

多集中于降低液相迁移和颗粒沉降速度，而对于浆骨两相在复杂流动过程中的协同迁移能力改善相对有限。

与此同时，混凝土在实际施工过程中持续经历高剪切与低剪切交替，浆体内部结构不断发生破坏与重建。体系如果缺乏适宜的触变恢复能力，在剪切结束后不能及时恢复结构支撑，粗骨料仍可能继续发生局部迁移；反之，若结构恢复过快或过强，又会导致体系流动阻力增加。因此，浆骨稳定需要在“剪切易流动”与“静置可支撑”之间形成合理的动态平衡。

除流变参数外，浆—骨界面状态同样决定着混凝土的介观匀质性。浆体在骨料表面的润湿、铺展与附着能力直接影响浆膜连续性及其与骨料间的相互作用。当界面润湿不足或浆膜稳定性较差时，在泵送、转弯、自由下落和振捣过程中容易出现局部脱浆、骨料聚集及浆膜重新分布，进一步放大局部浆骨比差异。由此可见，浆骨匀质性的本质并不仅是抑制骨料沉降，而是同时维持骨料悬浮、浆体包覆及两相协同运动。

因此，传统混凝土浆骨非均质的根本原因，可以归结为流变结构、界面作用与颗粒迁移行为之间的失配。当浆体支撑能力、黏性阻尼、触变恢复及界面作用不足以协调浆骨两相运动时，即使混凝土在宏观上未表现出明显泌水或离析，其内部仍可能形成骨料富集区、浆体富集区及局部浆骨比波动，最终影响颗粒骨架连续性、界面过渡区质量及硬化后的结构均一性。

三、浆骨匀质性增强对骨料体积分数提升的作用机制

在混凝土配合比设计中，骨料体积分数的提高并非单纯受骨料堆积状态限制，更受到胶凝浆体对颗粒体系的润滑、包覆、悬浮及流动稳定能力制约。随着骨料体积分数增加，颗粒间平均间距减小、接触概率增加，体系内部摩擦、嵌挤及局部应力传递显著增强；与此同时，单位骨料表面积所对应的有效浆体量降低，使浆体膜层厚度及自由浆体体积进一步减小。因此，在传统配合比体系中，当骨料用量超过一定临界范围后，

往往会引起流动阻力增加、骨料局部聚集、浆体包覆不连续以及浆骨两相运动失配，最终表现为工作性下降和体系稳定性劣化。

浆骨匀质性增强的核心作用，在于改善高固相体积分数条件下浆体连续相与骨料分散相之间的协同关系。通过调控浆体流变结构、界面润湿状态及颗粒迁移行为，可以降低粗骨料之间以及骨料与胶凝颗粒之间的无效摩擦与局部嵌锁，提高有限浆体在骨料表面的有效分布和连续包覆能力，并增强浆体对不同粒级骨料的空间约束作用。其结果是，在不依赖显著提高浆体体积分数的条件下，体系仍能够维持较好的流动连续性与颗粒分布稳定性。

从颗粒体系角度看，该技术实质上提高了混凝土对较高骨料体积分数的容纳能力，使骨料级配优化所形成的高堆积密度能够在实际拌合与施工过程中得到稳定保持。传统配合比中，理论颗粒堆积优势往往会因浆骨分离、颗粒迁移和局部富集而在动态施工过程中被削弱；浆骨匀质性提高后，不同粒级颗粒的空间重排得到有效控制，使设计阶段形成的颗粒级配关系能够更充分地转化为实际混凝土内部的致密骨架结构。

因此，浆骨匀质性增强所带来的骨料用量提升，本质上并非简单增加粗骨料质量，而是扩大混凝土在既定工作性和稳定性约束下的骨料体积分数设计窗口。通过提高浆体利用效率、降低单位骨料所需的有效浆体量，并优化骨料级配、浆体体积分数及颗粒堆积密度之间的匹配关系，可使混凝土由相对较高浆体依赖的结构体系向以高密实颗粒骨架为主体、胶凝浆体有效填充与连接的复合结构转变。

这种结构转变意味着，胶凝浆体更多承担颗粒间填充、界面结合和应力传递功能，而骨料则更加充分地参与体积构成与荷载传递。在满足目标工作性、泵送性能及施工稳定性的前提下，提高有效骨料体积分数不仅能够降低不必要的浆体体积，还能够减少浆体收缩敏感区域，提高颗粒骨架连续性，为进一步改善混凝土体积稳定性、力学性能及单位胶凝材料利用效率提供结构基础。

从配合比设计角度，可以将其概括为：浆骨匀质性增强提高了高骨料体积分数体系的可实现性，使“理论高堆积”进一步转化为“工程状态下稳定的高密实颗粒骨架”。

四、浆骨匀质性增强对混凝土力学性能的作用机制

MensaHomMax 浆骨匀质性增强技术对混凝土强度的改善并非来源于传统意义上的水化加速或化学早强作用，而主要来源于混凝土介观结构均一化、颗粒骨架优化以及浆—骨界面协同作用的增强。从复合材料力学角度看，混凝土宏观力学性能主要取决于胶凝基体力学性能、骨料相承载与约束作用以及界面过渡区的力学连续性。在胶凝材料组成及水胶比基本不变的条件下，改善骨料空间分布、界面结构及荷载传递路径，仍可显著改变材料整体的有效承载能力。

混凝土内部骨料并非惰性的体积填充相，而是承担刚度约束、荷载传递及裂纹扩展阻滞的重要结构组分。当骨料空间分布不均匀时，局部区域容易形成浆体富集、骨料团聚以及骨料间距异常等结构差异，使材料内部弹性模量、局部刚度及应力场呈现明显非均匀性。在外部荷载作用下，这类介观结构差异会导致局部应力集中，并促进界面微裂纹的优先形成与扩展。浆骨匀质性提高后，骨料在三维空间中的分布趋于均一，局部骨料体积分数和浆体厚度波动减小，有利于降低材料内部刚度突变，使外部荷载能够在胶凝基体、界面及骨料之间形成更加连续的传递路径。

另一方面，浆骨匀质性增强能够提高优化骨料级配在实际混凝土中的有效保持程度。在较高颗粒堆积密度条件下，不同粒级骨料能够形成更加连续的颗粒骨架，粗骨料的承载作用以及细骨料对骨架空隙的填充作用得到进一步发挥。由此，混凝土内部受力模式可由相对依赖胶凝浆体连续承载的结构状态，逐步转变为颗粒骨架与胶凝基体共同参与的多相协同承载体系。在这一体系中，骨料能够承担更高比例的压应力并对胶凝基体形成有效约束，从而提高单位胶凝材料所形成的整体结构承载效率。

浆骨分布均一化还能够降低局部材料组成的统计波动。传统混凝土的设计配合比属于宏观平均组成，而实际材料在介观尺度上仍可能存在明显的局部浆骨比差异。浆体富集区域通常具有较高的收缩变形和孔隙敏感性，而骨料过度富集区域则可能因浆体填充不足、界面不连续而形成潜在薄弱区。通过提高浆骨体系的空间稳定性，可以使局

部组成更加接近宏观设计状态，缩小不同区域之间的组成差异及力学性能差异，从而降低弱区形成概率。

浆—骨界面过渡区同样是决定混凝土宏观强度的重要介观结构。骨料表面附近由于局部水膜效应、颗粒堆积受限以及浆体迁移等因素，通常容易形成孔隙率相对较高、结构相对疏松的界面区域。浆骨匀质性增强后，浆体在骨料表面的润湿、铺展和包覆更加连续，可以降低局部脱浆、泌水通道及界面浆膜厚度异常所引起的结构缺陷，使骨料周围胶凝相分布更加均衡。其作用并非直接改变水化产物类型，而是通过改善界面形成条件，提高界面区域的结构连续性 & 应力传递能力。

上述作用最终表现为混凝土内部初始缺陷尺度及缺陷分布的改变。混凝土受压破坏并非均匀发生，而通常经历界面微裂纹萌生、局部应力集中、微裂纹扩展与连接，最终形成宏观破坏带。浆体富集区、孔隙富集区、界面薄弱区以及骨料异常聚集区域均可能成为损伤优先发展的起始位置。当浆骨空间分布更加均一后，材料内部力学性能梯度及局部应力集中程度降低，微裂纹的萌生与贯通过程受到延缓，从而提高材料达到宏观失稳破坏前的有效承载水平。

因此，浆骨匀质性增强对混凝土强度的作用，本质上是通过骨料空间分布均一化、颗粒骨架连续化、浆—骨界面优化以及局部缺陷抑制，改善多相材料内部的应力分配与荷载传递效率。其强度增益不是依赖增加胶凝材料用量，而是提高既有材料组成向有效承载结构转化的效率。

从材料设计角度看，这意味着混凝土强度调控可以由传统的“提高胶凝基体强度”进一步扩展至“优化整体复合结构承载效率”。在胶凝材料体系、水胶比及基本配合比保持相近的条件下，提高浆骨匀质性和颗粒骨架有效性，可以进一步释放骨料相、胶凝基体及界面过渡区之间的协同承载潜力，从而实现混凝土宏观力学性能的提升，并降低强度离散性，提高结构性能的一致性与稳定性。

五、HomMax 浆骨匀质性增强技术的作用本质与工程价值

MensaHomMax 浆骨匀质性增强技术并非传统意义上的增稠、保水或单一抗离析技术，其作用对象也并非某一独立流变参数，而是针对混凝土这一多尺度、多相颗粒复合体系中浆体流变结构、骨料空间分布、浆—骨界面状态及颗粒迁移行为之间的耦合关系进行系统调控。其核心目标是在维持必要流动性与施工性能的同时，提高浆体连续相对骨料分散相的稳定承载能力，降低浆体与骨料之间的相对迁移，并使设计阶段形成的骨料级配与颗粒堆积结构能够在拌合、运输、泵送、浇筑及振捣等动态过程中得到有效保持。

传统混凝土稳定性通常以泌水、离析及表观黏聚性作为主要评价指标，但宏观稳定并不能完全表征材料内部的介观匀质程度。即使体系未出现可见离析，浆体与骨料仍可能因密度、粒径、惯性及界面作用差异发生局部迁移，进而形成浆体富集、骨料偏聚、局部浆骨比波动及颗粒骨架不连续等结构特征。因此，MensaHomMax 所强调的“匀质性”并非单纯提高体系静态稳定，而是进一步控制浆骨两相在不同剪切条件下的相对运动，使骨料在连续相中的空间位置、浆膜包覆状态以及不同粒级颗粒之间的组织关系保持更高的一致性。



六、工程验证与应用结果

C30 混凝土对比配合比：

	水泥	矿粉	粉煤灰	机制砂	尾矿砂	1-2 石	水	外加剂	HomMax
1	200	90	70	500	350	1000	170	7.4	0
2	200	90	70	500	350	1000	170	7.4	2.22
3	190	100	70	500	350	1000	170	7.4	2.22

抗压强度对比：

	3d	7d	28d
1	17.4	28.6	35.9
2	18.5	31.4	42.5
3	18.2	30.1	43.1

HomMax 浆骨匀质性增强技术优势总结：

混凝土性能与材料适应性	通过高密实度配合比设计与浆骨匀质性控制实现综合降本增效
	改善骨料悬浮与浆体包覆，提高混凝土整体匀质性
	降低离析、泌水及浆骨分布不均，提高施工稳定性
	提高浆骨同步流动能力，实现自由倾落浇筑
	扩大骨料级配适用窗口，降低对连续级配的依赖
	提高对砂石级配、含水率及批次波动的适应能力，稳定混凝土工作状态
混凝土拌合	加快浆体对骨料的润湿、分散与均匀包覆
	实现缩短拌合时间 5-10S，提高生产效率
	减少局部团聚与拌合不均，提高出机一致性
运输、泵送与施工	降低混凝土与罐体、泵管之间的粘附与摩阻
	提高泵送距离，降低泵送压力及泵送损耗
	提高长距离运输后的浆骨稳定性，降低沉降与离析
设备运行与维护	大幅降低混凝土对搅拌车的粘附，罐车清洗可延长至 1 年 1 次
	降低混凝土对搅拌主机、搅拌车、料斗及泵管的粘附
	降低设备内壁摩阻与磨损，提高设备运行效率