

文章编号:1671-8879(2011)02-0101-05

# 混凝土搅拌过程及其评价

张良奇<sup>1,2</sup>,冯忠绪<sup>1</sup>

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064;  
2. 河南万里路桥集团有限公司,河南 许昌 461000)

**摘要:**为了进一步提高混凝土的使用性能,分析了目前混凝土评价指标中存在的问题。应用机械工程、建筑材料与施工工艺相结合的方法,对混凝土搅拌过程及其评价指标进行了研究,通过搅拌试验分析,得到强化混凝土性能的措施与方法。试验结果表明,通过优化搅拌机参数,采用振动搅拌技术、双排叶片机构及二次搅拌技术,均能改善混凝土的微观匀质性、界面粘结强度和耐久性。

**关键词:**机械工程;混凝土;搅拌;匀质性;强度;耐久性

**中图分类号:**U415.522 **文献标志码:**A

## Process of concrete mixing and its evaluation

ZHANG Liang-qi<sup>1,2</sup>, FENG Zhong-xu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Wanli Road & Bridge Group Co Ltd, Xuchang 461000, Henan, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of concrete, the concrete mixing and its evaluation index in the past of 20 years were analyzed. The problem of concrete evaluation indices were presented. Some measures were adopted to promote the performance of concrete. The test result indicate that the micro-cosmic uniformity of concrete, the interface bonding strength of concrete and its durability can be improved by optimizing parameter of mixer, adopting vibratory stir technology, arranging double row blade organization and using twice stir technology. 4 tabs, 5 figs, 18 refs.

**Key words:** mechanical engineering; concrete; mixing; homogeneous; strength; durability

## 0 引言

随着公路交通事业的快速发展,中国已成为沥青混凝土和基础稳定材料的生产大国。但是,中国生产每立方米混凝土要比发达国家多消耗水泥 70~80 kg<sup>[1]</sup>。因此,应用机械工程、建筑材料与施工工艺相结合的方法对混凝土搅拌过程进行研究,不仅对提高混凝土的搅拌质量和搅拌效率有工程价值,而且对节能减排也有现实意义<sup>[2]</sup>。近 20 年来,本课题组对混

凝土搅拌过程的研究大致经历了 3 个阶段:①主要考虑混凝土搅拌的均匀性;②主要考虑新拌混凝土的强度等主要使用性能;③关注混凝土的耐久性。

## 1 混凝土搅拌的匀质性

### 1.1 现行国家标准

目前,国内外对搅拌设备性能评价的主要指标仍是新拌混凝土的匀质性<sup>[3-4]</sup>。中国制定的标准《混凝土搅拌机》,将搅拌匀质性作为评价搅拌设备性能

收稿日期:2010-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50678026);陕西省重大科技创新专项资金计划项目(2008ZKC01-16)

作者简介:张良奇(1969-),男,河南许昌人,河南万里路桥集团有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:zhliq@wllq.cn。

的首要指标。标准规定:“搅拌机的搅拌性能以混凝土拌和物的匀质性来评定。即以同一罐不同部位的混凝土拌和物中砂浆密度的相对误差和单位体积混凝土拌和物中粗骨料质量的相对误差作为评定指标。”匀质混凝土是混凝土中砂浆密度的相对误差小于 0.8% 和单位体积混凝土中粗骨料质量的相对误差小于 5% 的混凝土。

1.2 现行评价指标不合理的试验证明及原因

在进行振动搅拌试验时,为比较普通的强制搅拌机和振动搅拌机的性能,从每罐出料的不同部位取样,同时进行了拌和物的匀质性和硬化混凝土试块抗压强度的测试<sup>[5]</sup>。

(1)正常振动搅拌,先干拌 8 s,再湿拌 30 s。这时各物料的质量配比为:水泥 15 kg,水 8.5 kg,砂

36 kg,石子 61 kg。  
(2)减少水泥用量 20% 时振动搅拌,先干拌 8 s,再湿拌 30 s。这时各物料的质量配比为:水泥 12 kg,水 8.5 kg,砂 36 kg,石子 61 kg。  
(3)关闭搅拌机的振动机构,仅强制搅拌,先干拌 8 s,再湿拌 1 min;质量配合比同条件(1)。  
(4)普通强制搅拌机(JW50 型),先干拌 8 s,再湿拌 1 min;质量配合比同搅拌条件(1)。  
试验结果见表 1。表 1 中: $\Delta G$  为混凝土骨料密度相对误差; $\Delta M$  为混凝土砂浆密度相对误差; $\bar{R}$  为混凝土试样的平均抗压强度; $\sigma$ 、 $C_v$  分别为其均方差和离差系数。  
用数理统计方法,作出不同搅拌条件时混凝土抗压强度  $R$  的概率  $f(R)$  分布曲线,如图 1 所示。

表 1 振动搅拌与强制搅拌的试验比较

搅拌条件	搅拌时间/ s	混凝土拌和物的匀质性		7 d 硬化混凝土试块的抗压强度		
		$\Delta M/\%$	$\Delta G/\%$	$\bar{R}/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$C_v$
(1)振动搅拌	38	0.35	1.58	17.96	0.64	0.036
(2)减少水泥用量 20% 时振动搅拌	38	0.34	1.52	14.64	0.60	0.041
(3)关闭振动电机时强制搅拌	68	0.42	1.78	12.94	3.72	0.290
(4)普通搅拌机(JW50)	68	0.68	1.60	14.80	1.15	0.078

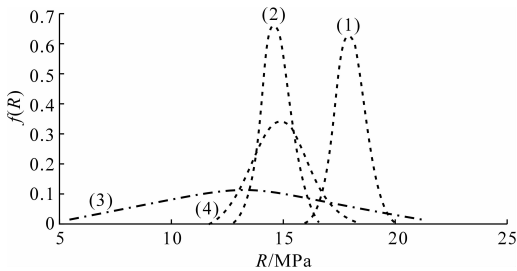


图 1 不同搅拌条件时混凝土抗压强度的概率分布

由表 1 和图 1 可知,当级配相同时,由于搅拌方法不同,混凝土的匀质性指标差别并不大,且都能满足国家标准的要求,但强度指标却差别较大。这是因为,混凝土拌和物的匀质性测试结果主要体现了宏观匀质性,而硬化混凝土试块的强度还与其微观匀质性相关。

为了验证这一结论,对同一搅拌设备设计了 3 种不同的搅拌叶片,在不同转速时进行试验,结果见表 2<sup>[6]</sup>。试验再次证明,尽管混凝土拌和物的匀质性差别不大,但  $\bar{R}$ 、 $\sigma$  和  $C_v$  却存在明显的差异。

1.3 混凝土的微观均匀性

试验发现,用现有的普通搅拌机搅拌混凝土,一般在较短的时间内就可以达到宏观上的均匀。但对这种拌和料仔细观察时,发现新拌水泥混凝土中有

表 2 不同搅拌叶片和搅拌转速下混凝土的匀质性和抗压强度

搅拌叶片	搅拌转速/ (r · min <sup>-1</sup> )	混凝土拌和物的匀质性		硬化混凝土试块的抗压强度		
		$\Delta M/\%$	$\Delta G/\%$	$\bar{R}/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$C_v$
单刮板螺旋叶片	8	0.41	0.57	12.93	2.32	0.179
	16	0.35	1.58	17.96	0.64	0.036
	24	0.74	1.91	15.46	1.59	0.103
双刮板螺旋叶片	16	0.09	1.60	12.52	0.85	0.068
铲子形叶片	8	0.45	1.21	10.00	1.82	0.182
	16	0.22	0.92	15.59	1.70	0.109
	24	0.67	1.19	16.86	1.33	0.079

些骨料表面是干燥的,另外还有一些干的小水泥团。如果把搅拌后宏观上均匀的混凝土中的水泥浆放在显微镜下,还会发现水泥颗粒并没有均匀分散在水中,有 10%~30% 的水泥颗粒聚在一起,形成微小的水泥团,如下页图 2(a)所示。水泥的这种团聚现象不仅浪费了水泥,而且影响着混凝土的和易性和强度的提高。因为水泥的水化作用只在水泥颗粒的表面进行,如果水泥颗粒聚团,则水化作用的面积减小,使混凝土具有强度的水化生成物减少。所以,理想的搅拌过程必须把聚团的水泥颗粒分开,使其尽可能接近图 2(b)所示的理想分布状态。

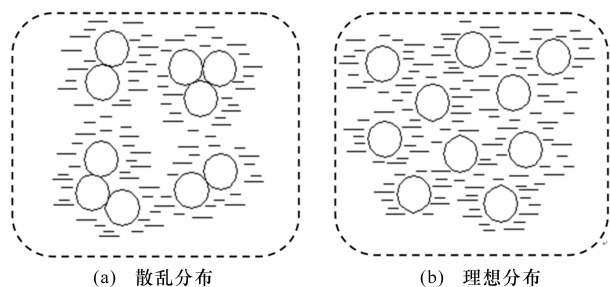


图 2 水泥浆的微观结构

水泥混凝土各组分的尺寸从 0.001 mm 到 30 mm,是极具分散性的多相混合物。在搅拌过程中,各组分间不仅存在着物理作用,而且存在着化学作用;不仅混合物总容积发生了量的变化,而且其状态和性能也发生了质的变化。各相界面间的表面现象对混合物形成过程有很大的影响,相表面间不仅存在着物理吸附作用,还在水化反应等作用。对搅拌作用来说,影响表面现象的最主要因素是相表面间的吸附与扩散速度。它取决于骨料颗粒的移动性、活化的相表面积的大小、粘性组分的分散速度、搅拌过程的工序特点和其他因素。水泥混凝土是分散的介质分子的水化物薄膜层粘结各相颗粒而形成的胶凝结构。这种结构是具有高的剪切强度、粘性、弹性模量、内应力释放时间等物理-力学性能的空间结构。前两者使得混合物各组分均匀分散的搅拌过程变得特别困难,只有当所有组分均匀分布和每一骨料颗粒都被水化物薄膜包围时,换言之,各组分从微观上也达到均匀分布时,混合物的胶凝结构才最稳定。这样的结构消除了混凝土内部的宏观及微观缺陷,凝固后才有最大强度,搅拌的目的正是为此<sup>[7-9]</sup>。为了达到上述目的,搅拌过程中物料的位移必须由 2 种运动来实现。第一种称为对流运动,各组分在宏观上的均布,必须由搅拌室内的循环流动来保证。这种运动在搅拌过程中是最重要的,也是最基本的,特别是在搅拌的开始阶段,传统的搅拌机主要就是按这种要求来设计工作机构的。但是,只有这种运动是不够的,为使各相表面间良好的结合,达到微观上的分布,主要是粘性组分(水泥和水,或沥青等)的分布,相间还必须形成较快的扩散运动,即为第二种运动。因此,新的搅拌概念认为,比较完善的搅拌过程,物料的位移必须由良好配合的对流运动和扩散运动来完成。

## 2 混凝土的强度

### 2.1 混凝土的界面粘结强度

混凝土是一种非均质多相复合材料。从亚微观

上来看,混凝土是由粗骨料、细骨料、水泥的水化产物、毛细孔、气孔、微裂纹(因水化热、干缩等使水泥石开裂)、界面微裂纹(因干缩、泌水等所致)及界面过渡层等组成。即混凝土在受力以前,内部就存在有许多微裂纹。界面过渡层是由于泌水等原因,而在骨料表面处形成的宽度约为 30~60 μm 的水泥石薄层,其结构相对较为疏松,且界面过渡层中常含有微裂纹。界面过渡层对混凝土的强度和耐久性有着重大的影响,特别是粗骨料与砂浆(或水泥石)的界面。从宏观上看,混凝土是由骨料和水泥石组成的二相复合材料(图 3),因此,混凝土的性质主要取决于混凝土中骨料与水泥石的性质、它们的相对含量以及骨料与水泥石间的界面粘结强度(或界面过渡层的强度)。

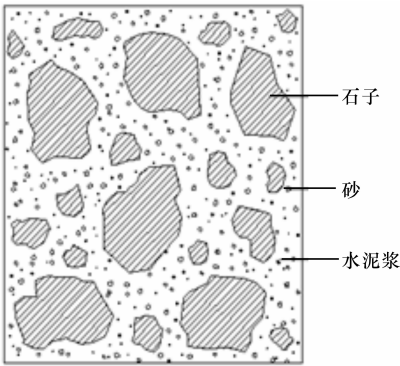


图 3 混凝土的宏观结构

就混凝土的强度而言,由于骨料的强度一般均高于水泥石的强度,因而普通混凝土的强度主要取决于水泥石的强度和界面粘结强度(或界面过渡层的强度),而界面粘结强度又取决于水泥石的强度和骨料的表面状况(粗糙程度、棱角的多少、粘附的泥等杂质的多少、吸水性的多少等)、凝结硬化条件及混凝土拌和物的泌水性等。实践和试验都证明,界面是混凝土中最为薄弱的环节(下页图 4(a))。通过强化或优化搅拌过程,改善界面过渡层的结构或界面粘结强度,是提高混凝土强度及其他性质的重要途径<sup>[10]</sup>。

### 2.2 改善混凝土界面粘结强度的措施

基于扩散理论,建立了搅拌过程的数学模型,给出了搅拌过程的优化目标和方法;通过试验研究,提出了搅拌机参数优化、振动搅拌技术、双排叶片结构及二次搅拌等 4 种改善混凝土界面粘结强度的措施<sup>[11-16]</sup>。对常用双卧轴搅拌机的结构、运动和动力学参数进行优化,得出了搅拌臂排列及其相位、叶片安装角、拌筒长宽比、搅拌线速度等参数的匹配关

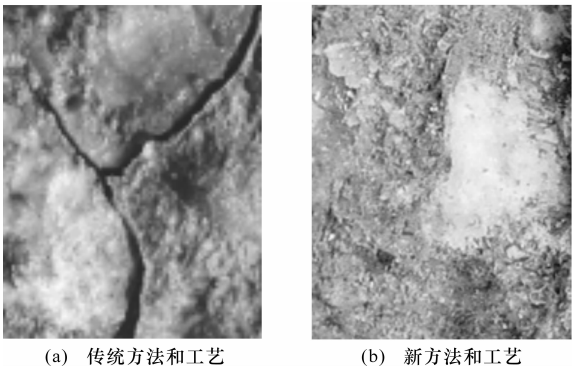


图 4 混凝土界面的破坏

系;基于混凝土结构流变特性,设计了深度激振器,采用振动活化与强制搅拌相结合的方法强化搅拌过程;采用双排叶片结构,改善了机构与混凝土相互作用的搅拌性能,增强了混合料在搅拌室内的径向流动,消除了搅拌低效区;采用二次搅拌工艺制备混凝土,增强了砂浆包裹骨料的过程。试验结果证明,采用这些措施,缩短了搅拌时间,节约了水泥,同时使混凝土界面过渡区的粘结强度得到了明显的改善,如图 4(b)所示。

新拌混凝土呈现粘-塑状态,属于宾汉姆体(Bingham),由于混合料各组分相表面间的粘结力的影响,使其完全拌匀变得特别困难。对混凝土混合料进行振动搅拌,使物料颗粒在一定振动频率下处于颤振状态,从而破坏混合料间的粘性联接,使物料间的内摩擦力大大降低,便于物料中的水泥颗粒从结团状态变为均匀分布状态。采用动平衡原理设计深度激振器,置于拌筒的中心,这样振动能量完全被混合料吸收。振动活化与强制搅拌的有机结合,使混凝土的界面结构及微观均匀性得到明显地改善。试验证明,振动搅拌与普通的强制搅拌相比较,混凝土抗压强度大有提高,而强度的标准差和离差系数却大为下降。当水泥用量不变时,混凝土强度可提高 20%~35%;当混凝土设计强度不变时,大约可节约水泥 20%;同时,搅拌时间缩短了一半,节能约 30%,达到了搅拌质量及搅拌效率的兼顾<sup>[17]</sup>。

3 混凝土的耐久性

混凝土技术最大的进展之一是 20 世纪 30 年代中期发展起来的混凝土引气技术,当今引气技术被应用在几乎所有的混凝土上<sup>[18]</sup>。合理的混凝土含气量能使混凝土使用性、耐久性、抗渗性都有较大幅度的提高。影响引气效果的因素较多,国内外主要针对材料的级配、坍落度、水灰比等变化与含气量的

关系进行了一些研究,但是却很少看到搅拌过程参数变化对混凝土含气量的影响规律的研究。  
在不同搅拌条件下,混凝土试样在放大不同倍数时的 SEM 形貌如图 5 所示。该图片是在混凝土试样浆体处拍摄的。

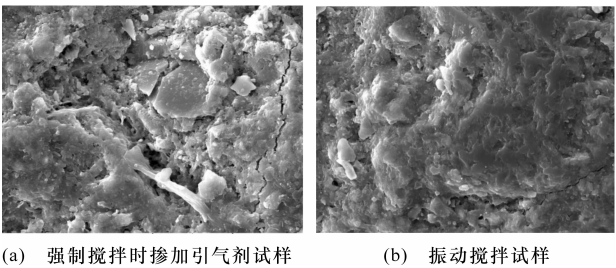


图 5 放大 3 000 倍的各参数试样浆体

在图 5(a)强制搅拌的混凝土和在其中掺入引气剂后的试样中,其内部孔隙较大,存在众多的微小裂缝与裂隙,加上薄弱的界面区的存在,整个体系成为空间不连续的结构;掺入引气剂后的混凝土浆体其空隙更多,结构更松散。在图 5(b)振动搅拌的混凝土的水泥水化浆体中,其水泥水化产物相互交织成空间骨架结构,水化产生的 C-S-H 凝胶使水泥浆体互连形成连续性的空间骨架结构,混凝土内部结构趋于密实。由此可见,掺加引气剂的普通搅拌在提高混凝土耐久性的同时会引起混凝土强度下降,而振动搅拌使混凝土水化水泥浆体形成连续的空间网络结构,混凝土微观结构更趋于致密,使其力学性能和耐久性能大幅度提高。

不同搅拌条件时混凝土的总孔隙率与孔径分布的测试结果见表 3;孔级配测试结果见表 4。

表 3 不同搅拌条件的混凝土的孔结构

搅拌条件	总孔隙率/%	平均孔径/ $\mu\text{m}$	中值孔径/ $\mu\text{m}$
强制搅拌	21.825 7	0.053 6	0.221 8
振动搅拌	25.436 2	0.047 5	0.157 1
掺加引气剂	39.758 3	0.077 8	9.456 3

表 4 不同搅拌条件的混凝土的孔级配测试

孔径分布/ $\text{nm}$	占总体积的百分率/%		
	强制搅拌	振动搅拌	掺加引气剂
5~10	5.693 2	6.638 5	3.967 4
10~100	31.331 8	34.839 6	21.152 3
100~1 000	23.425 6	25.082 9	17.274 6
1 000~10 000	5.058 3	7.931 8	32.130 0
10 000~100 000	4.326 0	4.943 0	2.932 3
>100 000	30.165 1	20.564 2	22.543 4

由表 3、表 4 可知,掺加引气剂后混凝土的孔级配得到一定的改善,表现为混凝土的小孔隙比率上升,大孔数量减少;引入的气孔直径多分布在 1~10

$\mu\text{m}$ 之间。这充分说明,引气剂在提高混凝土耐久性方面有积极的作用。振动搅拌使得混凝土的孔级配和孔分布得到明显改善,表现为混凝土内部的孔隙向减小方向移动,大孔数量减少,而小孔数目增加。这也说明,振动搅拌在使混凝土含气量增加的同时,并不给混凝土内部带来大量的体积大的孔隙,增加的只是毛细孔隙和凝胶孔隙,因此提高了混凝土的耐久性,且不会降低混凝土的强度。

## 4 结 语

(1)对混凝土搅拌过程的研究大致经历了3个阶段:①主要考虑混凝土搅拌的均匀性;②主要考虑新拌混凝土的强度等使用性能;③关注混凝土的耐久性。

(2)为评价搅拌过程对混凝土性能的影响,从分析和试验方法来看,应从目前国家标准要求的混凝土宏观的匀质性检验,向微观结构的分析和主要工程使用性能检验方向发展。

(3)应用机械工程、建筑材料与施工工艺相结合的方法,对混凝土搅拌过程及其评价指标进行研究,通过试验分析,得到强化混凝土性能的使用措施与方法;试验结果表明,通过优化搅拌机参数、采用振动搅拌技术、双排叶片机构及二次搅拌技术,均能改善混凝土的微观匀质性、界面粘结强度和耐久性。

## 参考文献:

### References:

- [1] 仇保兴.建筑节能法[N].科技日报,2005-03-04(3).
- [2] 冯忠绪.混凝土搅拌理论及其设备[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] GB 4477—84,混凝土搅拌机性能试验方法[S].
- [4] GB/T 9142—2000,混凝土搅拌机[S].
- [5] 冯忠绪,江建卫,于丽娟.混凝土振动搅拌理论及其装置的试验研究[J].中国公路学报,1999,12(3):122-126.  
FENG Zhong-xu, JIANG Jian-wei, YU Li-juan. The experiment study of vibratory mixing theory and mixer[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999,12(3):122-126.
- [6] 江建卫.周期式振动搅拌机的试验研究[D].西安:长

安大学,1998.

- [7] Beitzel H, Charonnat Y, Beitzel M. Assessment and classification of performance mixers[J]. Materials and Structures, 2003,36(258):250-264.
- [8] Ferraris C F. Concrete mixing methods and concrete mixers;state of the art[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2001,106(2):391-399.
- [9] Yang M, Jennings H M. Influence of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste [J]. Advanced Cement Based Materials, 1995,2(2):70-78.
- [10] 冯忠绪,王卫中.增强混凝土界面强度的方法[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(1):91-94.  
FENG Zhong-xu, WANG Wei-zhong. The method of reinforced concrete interface strength[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1):91-94.
- [11] 冯忠绪.混凝土搅拌过程及其模拟[J].西安公路交通大学学报,1997,17(4):71-76.  
FENG Zhong-xu. Mixing process of cement and its modelling[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997,17(4):71-76.
- [12] 冯忠绪.混凝土搅拌过程的模型化[J].中国公路学报,1997,17(2):6-9.  
FENG Zhong-xu. The mixing process modeling of concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997,17(4):71-76.
- [13] 赵 悟.搅拌装置参数优化的研究[D].西安:长安大学,2005.
- [14] 赵利军.搅拌低效区及其消除方法的研究[D].西安:长安大学,2005.
- [15] 姚运仕.双叶片搅拌机参数优化及其试验研究[D].西安:长安大学,2004.
- [16] 王卫中.混凝土二次搅拌工艺及机理研究[D].西安:长安大学,2007.
- [17] 张 磊.搅拌过程对混凝土含气量影响的试验研究[D].西安:长安大学,2010.
- [18] 吕丽华.试验条件对引气混凝土性能的影响研究[J].混凝土,2006(7):14-16.  
LU Li-hua. Influence of experiment condition on air entrained concrete[J]. Concrete, 2006(7):14-16.