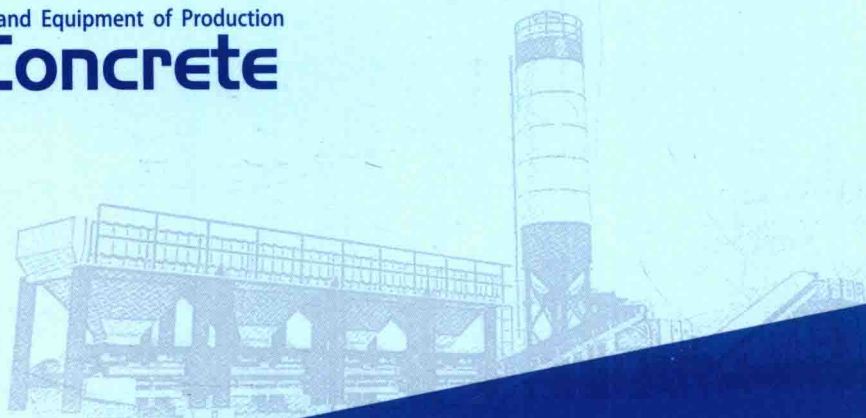


Advanced Theory and Equipment of Production

Concrete



水泥混凝土 先进生产理论与设备

冯忠绪 赵利军 赵 悟 王卫中 姚运仕 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

Advanced Theory and Equipment of Production Concrete
水泥混凝土先进生产理论与设备

冯忠绪 赵利军 赵 悟 王卫中 姚运仕 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是论述水泥混凝土先进生产理论与设备的专著,主要内容包括搅拌的新概念及其搅拌设备性能评价的指标体系、搅拌过程的数学模型与综合模拟分析、搅拌功率的计算方法、搅拌过程的优化目标与方法、双卧轴搅拌机参数的优化理论与方法、搅拌低效区及其消除方法、双排叶片搅拌理论及其装置、混凝土的二次搅拌工艺及其机理、振动搅拌理论及其机理、立轴振动搅拌机和双卧轴振动搅拌机的设计与试验研究、振动搅拌工业样机的设计与试验研究等。

本书可供从事水泥混凝土机械研制、设计与使用的技术人员以及水泥混凝土生产与使用的技术人员参考,也可作为工程机械、设备管理、土木工程施工与管理等专业研究生或本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水泥混凝土先进生产理论与设备 / 冯忠绪等著. —

北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016. 1

ISBN 978-7-114-12802-8

I. ①水… II. ①冯… III. ①水泥-混凝土-生产工艺②水泥-混凝土-生产设备 IV. ①TU528.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 024444 号

书 名:水泥混凝土先进生产理论与设备

著 者:冯忠绪 赵利军 赵 悟 王卫中 姚运仕

责任编辑:郑蕉林 李 瑞

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:23

字 数:405 千

版 次:2016 年 5 月 第 1 版

印 次:2016 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12802-8

定 价:75.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

水泥混凝土是目前使用最多的建筑材料,在经济建设中占有重要地位。目前,国内外有关水泥混凝土方面的研究主要集中在原材料的级配、性能及新拌混凝土成型方面,其技术方法已比较完善。但对搅拌过程这个加工环节却往往重视和研究不够,存在着搅拌理论缺乏、搅拌效率低、能源和原材料消耗高、新拌混凝土微观均质性差等技术难题,致使通过强化拌和过程改善水泥混凝土结构和力学性能的作用和巨大潜力都没有发挥。

笔者所在课题组从 20 世纪 90 年代开始,将机械工程、建筑材料、生产工艺以及实验科学有机地结合起来,以节约资源降低能耗并提高水泥混凝土质量为目标,将搅拌装置和与之相互作用的水泥混凝土及其生产工艺作为研究对象,完成了大量的应用基础研究,以及从理论和实践及其结合上的原始性创新,提出了水泥混凝土搅拌理论,建立了搅拌过程的数学模型,得到了搅拌曲线及新的搅拌概念,以及搅拌功率的计算方法;根据新的搅拌概念,提出了搅拌装置参数优化法、振动搅拌法和双排搅拌叶片结构等消除搅拌低效区的方法;根据优化理论,提出了搅拌设备的优化目标及其方法,得到了搅拌装置主要参数的合理取值范围和匹配关系;基于振动作用下水泥混凝土结构-流变特性的研究,提出了振动搅拌理论及机理,研制了双卧轴振动搅拌与立轴振动搅拌装置,振动作用下水泥混凝土含气量增加、孔级配和孔分布以及界面微观结构明显改善;对二次搅拌工艺的宏观搅拌机理、微观搅拌机理以及对水泥混凝土形成过程的影响机理进行了深入分析,并结合搅拌装置分析了工艺参数、设备参数与材料性能变化三者之间的内在规律性及与搅拌效率 and 水泥混凝土质量参数之间的确定数值关系,提出了实用的单速二次搅拌工艺;随着对搅拌过程的研究从宏观向微观的发展,发现搅拌过程对水泥

混凝土强度、耐久性等诸多性能有重要影响,对完善搅拌设备的评价指标体系提出了建议。以上研究成果及其应用,充分发挥了搅拌装置及工艺对水泥混凝土形成过程的“催化”与“强化”作用,全面地提高了水泥混凝土的使用性能与寿命,不仅有重要的理论意义,而且有广阔的工程应用前景及显著的经济和社会效益。愿本书能为我国工程机械的发展尽微薄之力。

本书是课题组多年研究成果较全面、较系统的总结,研究团队中的每个成员及研究生都为此做出了自己的贡献。在此书出版之际,对他们的辛勤劳动深表谢意,但由于参与人员较多,他们的名字就不一一列出。

本书出版获得长安大学与人民交通出版社精品教材建设与专著出版基金资助。

由于作者水平有限,加之该课题研究正在进一步深入,错误与不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 4 月

目 录

1 研究背景及意义	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义与应用前景	7
2 搅拌概念及其设备性能评定	9
2.1 搅拌的新概念	9
2.2 搅拌设备性能评定的指标体系	13
2.3 对修改评定指标的建议	20
2.4 本章小结	20
3 搅拌过程的模拟及优化	22
3.1 搅拌过程的模拟方法	22
3.2 连续式搅拌过程的模拟	26
3.3 周期式搅拌过程的模拟	34
3.4 振动搅拌的自模性	40
3.5 搅拌机参数的优化	42
3.6 本章小结	44
4 双卧轴搅拌机参数的优化	46
4.1 试验装置、材料及搅拌制度	46
4.2 搅拌臂排列	59
4.3 叶片安装角	75
4.4 搅拌筒长宽比	80
4.5 搅拌线速度	83
4.6 搅拌臂数目和搅拌叶片面积	91
4.7 多参数综合优化试验	97
4.8 本章小结	116
5 搅拌低效区及其消除方法	118
5.1 搅拌低效区的成因及危害	118
5.2 搅拌低效区的消除方法	119

5.3	双螺带搅拌机构	153
5.4	双螺旋无轴搅拌机	161
5.5	本章小结	167
6	混凝土二次搅拌工艺及机理	168
6.1	混凝土二次搅拌机理分析	168
6.2	二次搅拌工艺参数分析及选择	176
6.3	二次搅拌工艺流程的试验研究	182
6.4	二次搅拌工艺的工业化试验研究	210
6.5	本章小结	222
7	立轴振动搅拌的试验研究	224
7.1	现有搅拌机的不足之处	224
7.2	国外振动搅拌技术的研究概况	224
7.3	振动搅拌理论及其立轴振动搅拌设备的试验研究	228
7.4	振动拌和 RCC、SFRC 和 CA 砂浆的试验研究	254
7.5	本章小结	284
8	双卧轴振动搅拌机的试验研究	286
8.1	振动搅拌原理及其参数分析	286
8.2	试验样机设计	291
8.3	试验方案设计	294
8.4	试验结果分析	296
8.5	振动搅拌对混凝土含气量与耐久性的影响	303
8.6	本章小结	309
9	工业样机设计与试验	310
9.1	1m ³ 样机的设计	310
9.2	振动搅拌装置仿真分析	311
9.3	搅拌臂排列形式	321
9.4	样机试制与性能试验	322
9.5	工业样机试验结果分析	328
9.6	混凝土振动搅拌的作用	340
9.7	本章小结	346
10	主要研究成果	348
	参考文献	354

1 研究背景及意义

1.1 研究背景

水泥混凝土是当今用量最大的建筑材料,广泛用于工业、农业、交通、国防、水利、市政和民用等基本建设工程中,在国民经济中占有重要地位。国家统计局最新公报显示,2014 年我国水泥总产量为 24.76 亿 t,水泥产量和消耗量均占全球(41.8 亿 t)的 60% 左右,全国商品混凝土产量为 15.54 亿 m^3 。党的十八大报告提出,坚持走中国特色城镇化道路,全篇提及城镇化多达 7 次,可见城镇化已经由先前的概念逐步成为国家发展战略之一,在实现全面建设小康社会的道路上地位越来越重要。在城镇化提速的大背景下,必然涉及城市的扩张、基础设施建设和人居环境环境的不断提升,而这些都需要水泥混凝土行业的支撑,所以,未来水泥混凝土需求量将会更大。

2005 年 2 月 23 日,住建部副部长仇保兴在“两会”期间说:“目前,我国每年城乡新建房屋建筑面积 20 亿 m^2 ,其中 80% 以上为高能耗建筑。单位建筑面积能耗是发达国家的 2~3 倍,建筑用实心黏土砖每年毁田 12 万亩,能耗水平与发达国家相比,钢材消耗高出 10%~25%,每拌和 1m^3 混凝土要多消耗水泥 80kg。”也就是说,2005 年要多用水泥 1 200 亿 kg,以当时水泥的市场价每千克 0.4 元计算,费用高达 480 亿元。而由此所产生的资源浪费及环境污染如表 1-1 所示。

多消耗水泥所产生的资源浪费及环境污染

表 1-1

原燃料消耗量			主要废弃物排放量			
矿物资源 (10^8kg)	燃煤 (10^8kg)	电能 ($10^8\text{kW}\cdot\text{h}$)	CO_2 (10^8kg)	粉尘 (10^8kg)	SO_x (10^8kg)	NO_x (10^8kg)
2 140	171	1 285	1 070	21	3	2

可见资源浪费和环境污染相当严重。目前,国内外有关水泥混凝土方面的研究主要集中在原材料的级配、性能及新拌水泥混凝土成型方面,技术方法已比较完善,但对搅拌工艺却重视和研究不够。国内外的相关标准都将新拌水泥混凝土的

宏观均匀度作为加工设备性能评定指标,就是这种观念的反映。致使通过强化拌和过程改善水泥混凝土结构和力学性能的作用和巨大潜力都没有发挥,造成水泥等材料浪费,加工过程能耗高、噪声大,设备磨损快等问题。究其原因,一方面是因为水泥混凝土拌和与设备、材料及施工工艺等密切相关,但其分属于不同的学科而相互脱离;另一方面是因为拌和过程中,混合料的状态、体积和性质都发生变化,过程的复杂性使人们对其认知不足,迄今仍停留在宏观的层面上。搅拌过程的数学模型长期采用静态的宾汉姆曲线,对搅拌过程未能模型化,没有令人信服的搅拌理论与搅拌设备对优化方法进行支撑,对搅拌过程的理论研究远远落后于实际需求。

关于水泥混凝土拌和生产方面的研究,国内外具有代表性的方法有两种:一是以美国为代表的根据自落式原理进行水泥混凝土拌和的技术,工作原理如图 1-1 所示。即利用拌和装置对拌筒内物料进行分割和提升,直到物料与拌和装置之间的摩擦力小于使物料下滑的重力分力时,物料靠自身重力跌落,从而使各部分物料的相互位置不断进行重新分布而得到均匀拌和。这种拌和方式设备的功率消耗和易损件的磨损均较小,但拌和强度不够剧烈,一般只适宜拌和塑性和半塑性水泥混凝土。二是欧洲和日本普遍使用的强制式拌和和技术,工作原理如图 1-2 所示。它是借助旋转的拌和工作装置对物料进行剪切、挤压、翻滚和抛出等强制拌和作用,使物料在剧烈的相对运动中得到均匀搅拌。这种拌和方式,对物料的作用强烈,拌和质量好,生产效率高,但磨损和功耗大,而且对骨料粒径有较严格的限制,适用于拌和干硬性水泥混凝土和轻集料混凝土。这两种拌和方式在技术上和经济上各有所长,我国是两者兼有,后者为主。

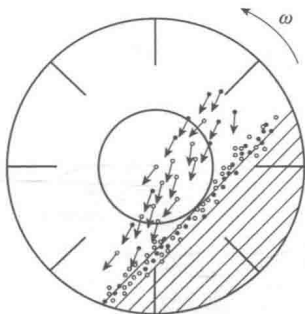


图 1-1 自落式搅拌工作原理示意图

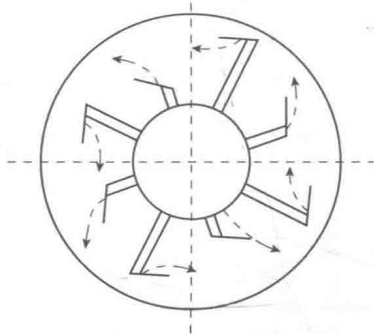


图 1-2 强制式搅拌工作原理示意图

目前国内外普遍采用的自落与强制式搅拌技术,实际上是一种静力搅拌技术,研究与实践证明,存在以下问题。

(1) 水泥混凝土微观匀质性较差, 界面联结强度较低

用普通静力搅拌机生产水泥混凝土, 一般在较短的时间内就可以达到宏观上的均匀, 而且宏观均匀度指标均能达到国家标准的要求。但对这种拌和料仔细观察时发现, 新拌水泥混凝土中有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水泥混凝土中的水泥浆放在显微镜下, 会发现水泥颗粒并没有均匀分散在水中, 有 10% ~ 30% 的水泥颗粒三三两两聚在一起, 形成微小的水泥团, 如图 1-3a) 所示。水泥的这种团聚现象不仅浪费了水泥, 而且影响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, 不仅水化作用的面积减小, 而且会使混凝土具有强度的水化生成物减少。所以, 必须把聚团的水泥颗粒分开, 使其尽可能接近图 1-3b) 所示的理想分布状态。使用双卧轴强制搅拌机拌和混凝土时, 也有人做过测定, 相应拌和时间为 2min 和 3h, 沥青包裹骨料表面的概率分别为 83.3% 和 96.1%。因此, 仅仅依靠机械搅拌作用, 难以使建筑混合料达到微观均匀, 因此必须采用其他辅助方式或新的搅拌原理, 强化水泥混凝土的搅拌过程。

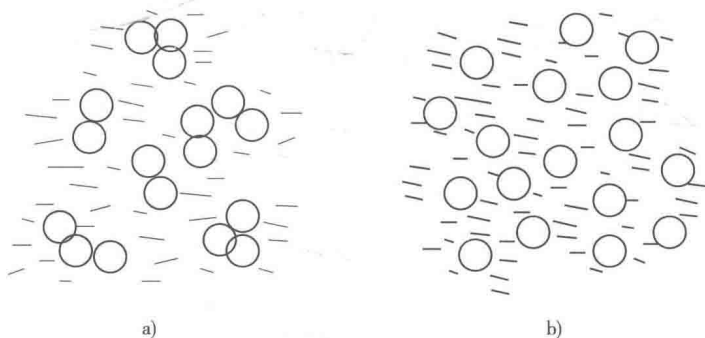


图 1-3 新拌水泥混凝土中水泥浆的微观结构

a) 发生团聚; b) 分散均匀

水泥混凝土是一种非均质多相复合材料。从亚微观上来看, 水泥混凝土是由粗集料、细集料、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影响, 特别是粗集料与砂浆(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 1-4), 因此, 水泥混凝土的性质主要取决于水泥

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黏结强度(或界面过渡层的强度)。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黏结强度(或界面过渡层的强度),而界面黏结强度(或界面过渡层的强度)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、黏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。试验证明,界面是混凝土中最为薄弱的环节(图 1-5)。因此,通过强化拌和过程或优化搅拌工艺来改善界面过渡层的结构或界面黏结强度是提高混凝土强度及其他性质的重要途径。

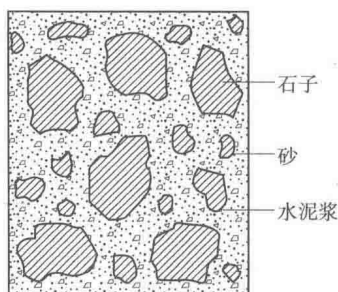


图 1-4 混凝土的宏观结构



图 1-5 混凝土界面破坏

(2) 搅拌线速度较低, 搅拌时间较长

就自落式和强制式这 2 类搅拌机的工作原理而言, 要增加物料颗粒间的碰撞次数和相互摩擦, 提高混合料各单元参与运动的次数和运动轨迹交叉的频率, 在保证生产率不变的情况下使混合料达到宏观及微观上的均匀, 就必须提高工作机构的转速。

然而, 当自落式搅拌机的滚筒转速超过临界转速时, 物料在离心力的作用下会依附于滚筒内壁与之共转, 不能达到搅拌目的; 对于强制式搅拌机, 当搅拌速率过快时, 混凝土强度反而会下降。图 1-6 所示为强制式搅拌机叶片线速度与相对抗压强度及离差系数的关系曲线, 图中以最低转速下搅拌 60s 的强度为 100% 相对强度。由图 1-6 可见, 搅拌速度低, 混凝土强度高, 离差系数小, 但搅拌时间长, 生产率低; 搅拌速度过快时, 混凝土强度下降, 离差系数增大。这是因为速度快时混合料的离心力大, 混合料中粒径不同的各组分的惯性力不同且大于和叶片间的摩擦力时, 以不同的速度抛离搅拌叶片而造成了物料离析, 反而使混合料的均匀度下降。

同时, 转速升高时, 物料运动的阻力增大, 在搅拌机衬板和叶片端部的间隙中

会产生较多的碎石夹楔现象,从而使功率消耗增大,加剧了叶片和衬板的磨损,也使骨料二次破碎的概率增加。

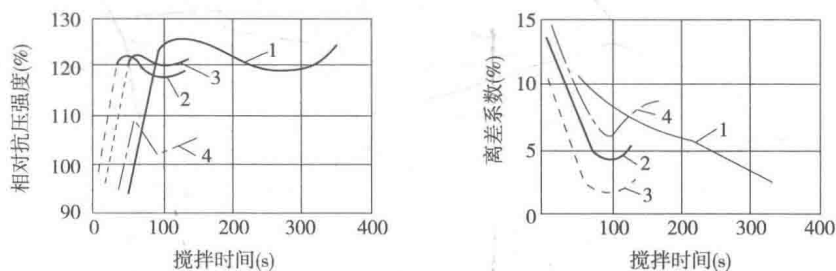


图 1-6 叶片线速度与相对强度及离差系数的关系

1-0.6m/s;2-1.3m/s;3-1.8m/s;4-2.3m/s

(3) 存在速度梯度和搅拌低效区

图 1-7a) 为单轴强制式搅拌机的工作模型图,如图 1-7b) 所示,在圆筒形的拌筒中安装的搅拌臂及其叶片工作时存在速度梯度,靠近圆筒的中心部分速度低,靠近拌筒壁处速度高。速度梯度的存在使拌筒内不同圆环带的均匀性存在差异。由于靠近拌筒中心部位搅拌速度低,成为搅拌的低效率区域,拖延了整机的搅拌时间,并留下了质量隐患,还容易产生抱轴现象(图 1-8),这是圆筒形强制搅拌机的固有缺陷。试验证明,主要是由于速度梯度的影响,该机型沿径向(r 方向)和沿高度方向(Z 方向)达到指定均匀度的搅拌时间相差悬殊。似乎这一现象并不复杂,但长期以来人们对此却缺乏深刻的认识。

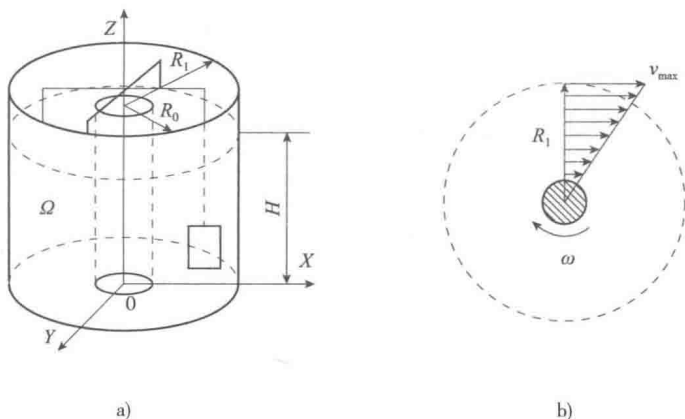


图 1-7 单轴强制式搅拌机的速度梯度

a) 工作模型图; b) 速度梯度示意图



图 1-8 搅拌机抱轴现象

(4) 对多种材料适应性差

随着建筑材料技术的发展,搅拌机需要搅拌的建筑材料品种越来越多,发展很快,例如已经普遍使用的高强混凝土、干硬性混凝土、纤维混凝土、干混砂浆、CA 砂浆等,利用普通的搅拌机搅拌这些材料已不能完全满足要求。工程实际应用表明,普通自落式搅拌机主要适用于搅拌塑性混凝土,普通强制搅拌技术虽然对物料作用强烈,搅拌质量好,生产效率较高,但是搅拌设备工作装置的磨损和功耗大,而且对骨料粒径有较严格的限制,主要适用于轻集料混凝土和干硬性混凝土的搅拌,对其他材料的适应性较差。

综上所述,目前国内外普遍使用的传统的以静力作用为主的混凝土搅拌设备存在着搅拌效率低、能源和原材料消耗高、新拌混凝土微观均质性差等问题,是多年来困扰混凝土生产行业的重大技术难题。

实际上,混凝土拌和技术的发展与混凝土的发展密切相关。随着高性能混凝土和商品混凝土的大力推广,以及工程建设施工的高效率化、高质量化和高效益化,对混凝土拌和技术提出了更高的要求,如对多种材料的适用性、搅拌质量和生产效率相统一的节约化生产等。

2010 年 5 月,济南第七届水泥与混凝土国际会议围绕“水泥与混凝土对全球可持续发展的贡献”这一主题,对 2002 年以来尤其是后危机时代的水泥化学、水泥生产工艺及装备、混凝土与水泥制品和发展循环经济模式等方面的最新研究和实践成果进行了研讨。从会议学术交流和成果来看,节能、降耗、环保、高性能混凝土和混凝土耐久性是当前世界水泥混凝土生产领域的学术发展趋势,各国都在寻求可持续发展的道路。例如,水泥混凝土走清洁生产的道路;混凝土多功能、高性能、耐久性等多元化研究。

作为一种原材料或一种产业,节约资源、能源也是为了本身能够持续存在和发展。水泥混凝土作为最大宗的人造材料,对资源、能源的需求和对环境的影响十分巨大。中央提出“十二五”期间进一步统筹协调经济社会发展与资源、环境的关系,加快建设节约型社会,在生产、建设、流通、消费各领域节约资源,提高资源利用效率,减少损失浪费,以尽可能少的资源消耗,创造尽可能大的经济社会效益。因此,顺应主流,当人们发现利用上述2种拌和方法并不能使生产的混凝土同时达到宏观和微观上的均匀性,进而造成原材料浪费,影响到混凝土的性能和生产效率时,开始对如何改善混凝土的微观结构和力学性能进行大量的研究,主要集中在混凝土组分、配合比、添加剂等几个方面。而对于混凝土拌和生产过程中的作用和潜力却没有引起足够的重视,如混凝土拌和过程优化的研究、搅拌低效区的形成机理及消除方法、先进混凝土搅拌工艺及机理的研究等。目前,我国每拌和 1m^3 混凝土要比发达国家多消耗水泥 80kg 的严峻事实,要求我们为建设节约型社会能够发挥后发优势,另辟蹊径,按新的想法来解决这一难题。

1.2 研究意义与应用前景

已故科学家吴中伟院士在分析我国水泥混凝土生产行业现状时指出:由于高能耗、低效率及环境相容性差等问题,使得我国的水泥混凝土工业声誉欠佳;商品混凝土已在大城市中普及;高强高性能混凝土已被大量应用;各种各样的水泥制品作为结构材料,在节约和替代钢材、木材方面起了重要作用。目前我国的水泥混凝土行业正面临着重大的机遇和挑战,因此,我们必须在技术发展和基础研究方面以双倍的努力工作。我国的混凝土生产设备是在引进和吸收国外先进技术的基础上迅速发展起来的,虽然起步晚,但发展很快。与国外产品相比,我国混凝土生产工艺及设备还存在一定的差距。目前我国混凝土搅拌装备技术水平较低,有自主知识产权和特色的产品以及能出口创汇的产品很少,普遍存在着能源和原材料消耗高、搅拌不均匀等问题,已成为多年来困扰混凝土生产行业的重大技术难题。在国家各行业大力推进节能环保理念的指引下,混凝土行业也必须转变发展模式,寻找更加节约资源、环境友好的生产方式。因此,混凝土节约生产技术的创新研究具有重要的现实意义。

节约生产混凝土的理论、关键技术及其装置的研究,正是从节约能源、资源,降低能耗和保护环境的角度为水泥混凝土行业的可持续发展另辟蹊径。本书将机械工程、建筑材料、生产工艺有机结合起来,以节约资源降低能耗并提高混凝土质量为目标。通过本书的研究,必将推动混凝土生产综合指标的全面提高,对于在工程

建设项目中应用和普及节约型混凝土生产理念具有良好的引导作用,并对混凝土生产行业的资源浪费和环境污染状况起到缓解作用。

我国水泥产量位居世界第一,随着基础设施建设的发展,我国已成为混凝土生产大国。混凝土应用面大,关系到国家建设、安全和群众的住、行等方方面面。该课题的研究能节约资源,利国利民。对混凝土生产方法的一次性改善,将得到混凝土生产中多项指标改善的长期回报。因此,这是混凝土行业中具有重大变革的最经济的方法之一。从技术上看,本研究是将搅拌装置和与之相互作用的混凝土及其生产工艺作为研究对象,根据混凝土的结构流变特性和结构形成机理,充分发挥搅拌装置及工艺的重要“催化”与“强化”作用,尽可能地改善设备性能以及挖掘材料内在潜力,较显著地提高材料的使用性能。该课题将机械工程、建筑材料、生产工艺等学科融合,来解决国内外多年来混凝土生产中存在的问题,这不仅有重要的理论意义,而且将有广阔的工程应用前景及其显著的经济和社会效益。

如就生产水泥混凝土可节约水泥这一单项指标来说,我国 2012 年的水泥产量为 22.1 亿 t,若 50% 用于水泥混凝土则需水泥 11.05 亿 t。该研究所形成的实用技术,可保证混凝土强度不变的情况下节约水泥 5% 以上,即节约水泥 0.552 5 亿 t 以上。以市场价 500 元/t 计,每年节约水泥价值约人民币 276.25 亿元以上。如仅就生产水泥混凝土时可节约能耗这一单项指标来说,我国 2012 年的商品混凝土产量约 12.7 亿 m^3 ,该研究所形成的实用技术,在提高混凝土搅拌质量的情况下每立方米可节约能耗约 0.2 kW · h,则可节约电量 2.54 亿 kW · h。

此外,随着公路交通事业的快速发展,我国已成为沥青混凝土生产大国。对于沥青混凝土搅拌设备和稳定土厂拌设备中普遍使用的双卧轴搅拌机,该项目的搅拌过程优化、低效区消除、双卧轴振动搅拌和双排叶片搅拌等研究成果对沥青混凝土及稳定材料的节约生产也是适用的,所研究的振动搅拌技术与新型振动搅拌装置对沥青混凝土及稳定材料的节约生产也有良好的应用前景,对促进沥青混凝土搅拌设备和稳定土厂拌设备的技术提升具有重要的现实意义。

2 搅拌概念及其设备性能评定

2.1 搅拌的新概念

长期以来,均匀度是我国衡量混合料搅拌质量的主要指标,这种规定是传统搅拌概念的产物。传统的搅拌理论认为,搅拌的主要任务是达到规定的均匀度,因此,各式各样的搅拌机的工作机构,主要作用是使物料产生剪切、对流及扩散的循环流动,在物料位置的频繁迁移中达到各组分的均匀分布。

为了获得均匀的混合料,必须研究混凝土形成过程中物料的运动规律,研究搅拌机工作机构与混合料间相互作用的关系。

混凝土搅拌过程中伴随着拌和与分离同时存在的两种矛盾现象,是一个动态的发展和变化过程,这可用曲线来定性描述,如图 2-1 所示。开始阶段的拌和主要是靠物料的循环流动来实现(I 段)。此时搅拌过程在宏观水平进行,组分间的相界面小,因此各组分间的扩散现象不明显,分离现象的影响也较小,搅拌过程的发展速度主要取决于搅拌机中物流的运动特点。

t_k 时刻起各组分在搅拌机工作容积内的扩散分布加快,循环流动与扩散运动在拌和中起的作用趋于相近,此时各组分,包括黏性组分的重新分布已在微观水平上进行,并且从某一时刻起扩散运动起主要作用(II 段),与此同时,黏结在一起的各组分再分离开来的过程也加快。拌和与分离这两种相反的过程从某时刻 t_m 起基本上达到动态平衡,此后,搅拌的实际意义不大,因为均匀度变化很小(III 段)。个别情况时,上述相反过程的平衡要比均匀度最好的 t_m 时刻稍晚(III 段曲线 2)。在 II 和 III,物料颗粒重新分布的速度不

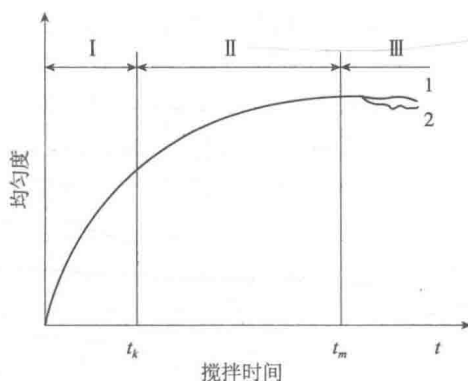


图 2-1 搅拌过程曲线

仅取决于物料的运动特点,而且取决于物料的结构流变特性:颗粒的大小、相间表面的大小及黏结力的值等。

拌和过程可按搅拌机内物料的运动形式来分类,可能有空间 3 个方向的平移和绕这 3 个方向的旋转 6 种运动: v_x 、 v_y 、 v_z 、 v_{xy} 、 v_{yz} 、 v_{zx} 。只存在 1 种运动的搅拌机工作机构最简单,但单调的物料运动形式不能保证搅拌质量;能保证同时具有这 6 种运动形式的工作机构又太复杂而难以实现。搅拌机的完善实际上就是这些运动形式的增加和强化。

以普通水泥混凝土为例,它是由水泥、砂、石和水组成,如图 1-4 所示。硬化前的混凝土称为混凝土拌和物,或新拌混凝土。水和水泥组成水泥浆,硬化后的水泥浆体称为水泥石。水泥浆包裹在砂的表面,并填充于砂的空隙成为砂浆,砂浆又包裹在石子的表面,并填充石子的空隙。水泥浆和砂浆在混凝土拌和物中分别起到润滑砂、石的作用,使混凝土具有施工要求的流动性,并使混凝土成型密实。硬化后,水泥石将砂、石牢固地胶结为一整体,砂、石在混凝土中起到骨架的作用,故称为骨料。骨料主要起到限制混凝土的干缩、减少水泥用量和水化热、降低成本的作用,并可以提高混凝土的强度和耐久性。混凝土的组成中,骨料一般占混凝土总体积的 70% ~ 80%,水泥石占 20% ~ 30%;此外,还含有少量的气孔。

水泥混凝土各组分的尺寸从 0.001mm 到 40mm 或更大,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,还存在水化反应等作用。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、黏性组分的分散速度、搅拌过程的工序特点和其他因素。众所周知,水泥混凝土是分散的介质分子的水化物薄膜层黏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、黏性、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,凝固后才会有最大强度。搅拌的目的即在于此。

因此,一般认为混凝土搅拌的主要任务是:

- (1) 各组分均匀分布,达到宏观及微观上的均质。
- (2) 破坏水泥粒子团聚现象,使各颗粒表面被水浸润,促使弥散现象的发展。
- (3) 破坏水泥粒子表面的初始水化物薄膜包裹层。