doi:10.3969/j.issn.1002-3550.2017.07.026

混凝土搅拌站废水在混凝土中的利用现状

马先伟[1]，刘 畅[1,2]
（1.河南城建学院 土木与交通工程学院，河南 平顶山 467036；2.兰州理工大学 材料科学与工程学院，甘肃 兰州 730050）

摘 要： 搅拌站废水的合理利用是搅拌站绿色生产和管理星级评价的主要指标之一，但合理有效利用一直是一个技术难题。综述了废水的性质和处理工艺，并探讨废水掺量或浓度、缓凝组分、离子浓度与混凝土性能的关系，发现废水掺量或浓度是目前考虑最多的因素，较高的废水掺量或浓度会造成凝结时间缩短和流动性及强度明显降低；废水掺量和浓度变化对混凝土性能的影响最终可以归结为所掺加废水中总固含量的影响；更有效废水处理工艺设计是必须的，同时废水中离子浓度随时间的变化以及对混凝土的性能的影响有待研究。这些工作的开展对于进一步推进搅拌站废水利用具有重要意义。

关键词： 混凝土搅拌站；废水；固含量；离子浓度
中图分类号： TU528.09 **文献标志码：** A **文章编号：** 1002-3550(2017)07-0102-06

Review on utilizations of mixing plant wastewater in concrete

MA Xianwei[1], *LIU Chang*[1,2]
(1.Civil and Transportation Engineering College, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China;
2.Material Science and Engineering Ccollege, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The effective utilization of concrete mixing plant wastewater as a key star evaluation indicator of green production and management is a main technical problem.The characters and treatment process of wastewater and the effects of the amount or concentration, retarding component and ion concentration in wastewater were summarized.The amount and concentration of wastewater are main factors often considered.High amount or concentration will decrease concrete flowability and strength.The effect of wastewater amount and concentration on concrete properties can be ascribed to the effect of solid content in wastewater.More effectively wastewater treatment process is in need of designing.It need to study the change in concentrations of main ions in wastewater with time and their effects on the performance of concrete.Those studies will favor to more effective utilizations of wastewater in concrete.

Key words: concrete mixing plant; wastewater; solid content; ion concentration

0 引言

搅拌站废水是生产混凝土后冲洗运输车辆、输送泵车、搅拌机及配套设备所排放出的一种液态废弃物。混凝土搅拌站排放的废水量很大，如一个年生产量 50 万 m^3 的搅拌站排放的废水高达 8 万 t；一个年生产量 20 万 m^3 的混凝土厂产生的废水每天可达 30 m^3；年生产量约 120 万 m^3 的混凝土厂每天清洗设备产生的废水达到 60 t[1]。由于搅拌站废水含碱量很高，如果直接排放出去，将会造成土壤碱性化和水源污染。同时随着生活用水的日益紧张，环境问题开始凸显，企业和国家对废水处理逐渐提上日程。因此，在国标 GB/T 14902—2012《预拌混凝土》中要求所产生的废水必须回收利用，在 JGJ/T 328—2014《预拌混凝土绿色生产及管理技术》中把“废水处理系统”和“废水利用”作为绿色生产星级评价的得分项。

Pistilli 等[2]分析了搅拌站废水的物理化学性质，认为它们在混凝土中进行利用是可行的，但是在废水处理系统和利用方面开展的研究并不是很多，而且大多数生产企业技术储备很低，对废水性能的认识不足，使废水的处理和利用效果并不理想。与混凝土通常使用的拌合水相比，废水中含有较高的离子浓度和固含量，使其在水泥混凝土中会对性能有所影响。目前企业主要关注的是固含量，而对废水的性质和废水对混凝土性能系统得影响等深入的研究较少。因此，笔者通过对目前废水处理和利用现状进行总结和分析，为混凝土的绿色生产提供参考。

1 废水的性质

搅拌站通常采用自来水冲洗设备，冲洗后的废水中不仅含有水化程度较低的水泥、未水化的掺合料、细砂、黏土等固体颗粒，同时还含有大量的水化离子，如 Ca^{2+}、OH^-、SiO_4^{2-}、

收稿日期：2016-08-06
基金项目：河南省教育厅项目“搅拌站废水做混凝土拌和水的机理研究”(16A560014)；河南城建学院博士启动基金项目“搅拌站废水预处理工艺的优化设计”(2015JBS004)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

K^+、Na^+、SO_4^{2-}等[3]，固含量的大小和冲洗水量与相关处理措施有关，而离子浓度的大小与设计的混凝土配合比有关。此外，废水中残留的部分外加剂成分也对废水本身的性质有所影响。

废水通常测试的指标主要是固含量。余和友等[2]测得固含量为 7.1%；朱志恒和梅晓东等[3-4]测得固含量为 6.6%；耿加会等[1]测得固含量为 5.3%；刘志杰等[5]测得固含量为 5.4%，pH 值相差不大，通常大于 11[1,4-5]。对于其他离子的测试很少，杨欣华等[8]检测 5 个地区 6 家混凝土搅拌站所排放的废水的离子浓度，结果如表 1、2 所示。Ca^{2+}、OH^-含量相对较高，它们主要来自于水泥水化；K^+、Na^+的含量与外加剂种类有关，如萘系减水剂；SO_4^{2-}主要由石膏和外加剂引入。

然而，废水中的离子浓度不是一成不变的，而是随着放置的时间延长，废水中悬浮的水泥颗粒继续水化，部分掺合料颗粒也有可能发生水化，从而使 Ca^{2+}、OH^-等离子浓度发生变化。如果废水在水泥混凝土中利用，这些离子势必会对胶凝材料的水化产生影响。因此，有必要对离子浓度随放置时间的变化进行研究，这对于其在水泥混凝土中重新利用具有重要的参考价值。

表 1　不同地区搅拌站废水的主要离子浓度[6]

搅拌站地区	阳离子				
	K^+、Na^+总和	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	阳离子总量
上海	89.84	391.90	1.22	1.60	484.55
武汉	62.21	143.41	47.81	1.81	255.24
台州	306.79	999.92	1.22	4.24	1 312.16
重庆	288.13	858.51	1.22	3.39	1 151.24
舟山	218.10	656.51	1.22	0.81	876.63
北京	356.44	616.11	1.22	1.97	975.73

表 2　不同地区搅拌站废水的主要离子浓度（续）[6]

搅拌站地区	阴离子						阴阳离子总量	pH 值
	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	OH^-	NO_3^-	阴离子总量		
上海	105.230	391.90	58.97	313.73	10.01	492.78	977.333	12.21
武汉	31.770	169.46	32.76	137.37	18.36	389.72	644.96	11.68
台州	212.440	77.47	163.80	853.94	16.95	1 324.60	2 636.76	12.57
重庆	33.750	564.06	117.94	660.88	9.52	1 386.14	2 537.38	12.48
舟山	260.099	179.14	58.97	495.66	12.42	1 006.28	1 882.91	12.36
北京	31.770	96.84	91.73	675.73	45.39	941.45	1 917.18	12.52

2　废水处理系统

由于废水中固体物质对其重新利用有一定的影响，需要在使用前采取必要的措施。设计废水处理系统，主要采用沉淀和分离的办法。沉淀池按水流方向划分为平流式、竖流式和辐流式，通常采用平流式[3]，即池身呈矩形或圆形，废水从一端流入，水平从另一端流入澄清池，最后进入清水池，也有把澄清池看作二级沉淀池。企业常采用五个连续的平流式沉淀池进行废水的过滤，占地面积较大但沉淀效果较好。清水池的水可以再次冲洗设备，或做拌和水使用。李宛珊等[7]研究了废水池深度、直径、污水浓度等对沉降速率的影响，发现沉降池深度和直径对沉降速率无明显影响，只是沉降时间受沉降池的深度增加而延长，但是随废水浓度增加，污水沉降速率明显降低，如图 1 所示。为了达到砂石的有效利用和减少沉淀渣量，在废水进入沉淀池前，采用砂石分离设备。砂石分离设备有滚筒式和螺旋式，滚筒式在砂石被水冲入到滚筛中，经滚筛筛分后进入螺旋式输料机中，最后进入砂石料仓；螺旋式采用冲洗加旋分的方式分离骨料和废水，分离出的骨料经振动筛分级再利用[4]。

早在 1997 年，张燕秋等[8]提出了一种混凝土厂的废水处理设计思路，将沉淀池分为泥浆池、匀浆池、清水池，每经过一个沉淀池采用分离器进行一次分离，通过清水池分离得到的清水再次重新冲洗混凝土搅拌设备，从而达到废水循环利用的目的。之后的研究在此基础上，黄文景[9]、俞黎明[10]、李峰[11]等设计废水分离和回收再利用的工艺流程，

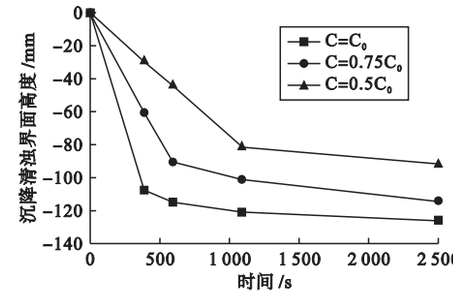

图 1　不同浓度下的沉降特性曲线[9]

如图 2 所示[9]，搅拌的作用是防止沉淀渣凝固在池底，整体性更强，工艺更加合理。余和友[1]、袁叉平[12]等介绍了设计的参数要求。

此外，Borges 等[13]研究了将混凝土废水处理装置砂池中的残余砂用于制备非结构混凝土的可能性。Paula[14]通过凝结法结合硫酸铝和辣木粉研究混凝土废水处理工艺，处理过后的废水可用于清洗搅拌设备或厕所等。研究发现对废水进行多次沉淀分离[10]、砂石分离设备和废水处理系统相结合[11]、硫酸铝和辣木粉[14]、分离机[3]等措施都可以促进废水的利用，而高速离心搅拌[15]可有效提高掺废水的砂浆流动性和保水性，并对硬化体各种力学性能无不良影响。

上述废水处理工艺砂石分离系统的设计很好地减少了沉淀池中废渣量，使砂石得以重新利用。废水经多级沉淀后，固含量明显降低，可作为拌合水使用，但是各级沉淀池之间目前主要采用溢流的方式连接，使各级之间影响较大，导致处理线过长且各池的落差较大，此方面需要改进。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

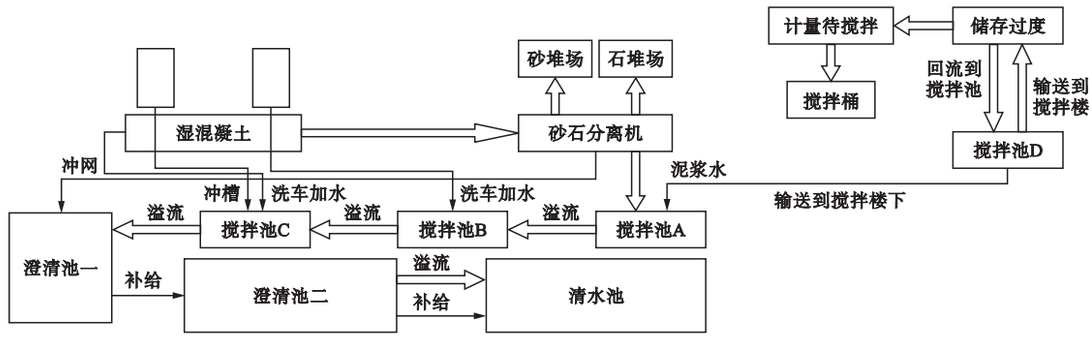

图2　工艺流程图[11]

3　废水对混凝土性能的影响

3.1　水泥的标准稠度用水量和凝结时间

废水增加了水泥的标准稠度需水量，且随着废水掺量增加，标准稠度需水量增大[1,16-17]，如掺量每增加20%，标准稠度用水量增加0.5%左右，完全用废水时标准稠度用水量增加2.3%。同时，废水浓度增加，标准稠度用水量增大[16-17]，如图3[17]所示。废水对标准稠度用水量的影响与废水中含有一些固体物质有关[17]，颗粒将增加集料的总表面积，其本身具有的吸水性使有效水量减少，用水量增加。且废水掺量和浓度越大固含量越大，如果称量水时，扣除这部分固含量，这种影响可能会减小。

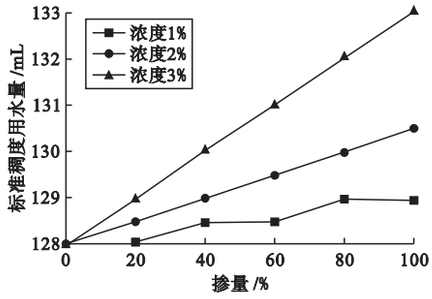

图3　废水对标准稠度需水量的影响[17]

废水也延长了水泥初凝和终凝时间[4,16-19]，且随废水的掺量和浓度增加有所延长[16-17]，不过还在GB/T 1346—2001所规定的范围之内，如图4所示。废水对凝结时间的影响可能与废水中含有一定量的缓凝型减水剂有关[17]，水泥安定性均满足要求[16,18]。

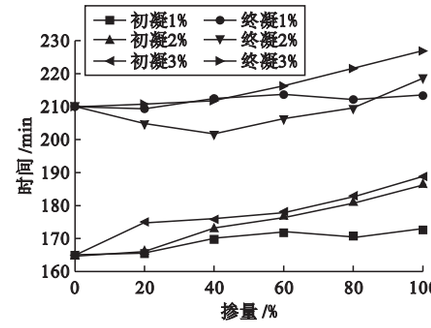

图4　废水对凝结时间的影响[17]

此外，Pistilli等[2]发现过量沉淀渣取代水泥会缩短水泥的初凝、终凝时间，且随废浆料的增加而减小。

3.2　流动性

废水在一定掺量范围内增加砂浆或混凝土的流动性[4,18,20-22]，减少流动度损失[18,22]，但当超过一定量后，降低流动性[4,20,22]。也有研究认为废水降低混凝土流动性[17,23-25]，这与废水浓度有关。废水浓度增加，流动性降低[11,15,24,26-27]。当废水浓度小于5%，流动性变化不大，超过5%时快速下降[11,15]，超过10%时明显减小[11,15,26]，且坍落度经时损失也很大[15,26]，如表3[15]所示。

表3　废水浓度对拌合物工作性的影响[15]

设计等级	废水的浓度 /%	工作性（出机）		工作性（1 h后）		工作性描述
		坍落度 /mm	扩展度 /mm	坍落度 /mm	扩展度 /mm	
C30	0	225	540	180	490	和易性良好
C30	2	215	485	160	430	流速较慢
C30	5	205	395	130	300	流速稍慢，黏聚性良好
C30	10	85	200	13	200	无流动性
C40	0	220	550	190	510	和易性良好
C40	2	200	500	180	420	和易性良好
C40	5	190	410	160	350	流速稍慢，黏聚性良好
C40	10	60	200	20	200	无流动性

混凝土的强度等级不同，影响也不相同。废水拌和C20混凝土较清水组坍落度损失和扩展度损失大，废水拌和的C40混凝土较清水组的坍落度损失小[27]。姚源等[19]研究掺入浓度1%废水的不同等级混凝土强度变化，C10混凝土流动性随废水掺量增加而增大，C20混凝土随废水掺量的增加坍落度先增大后减小，C30、C40混凝土流动性随废水掺量增加而降低，C50混凝土流动性随废水掺量增加没有明显规律，而C60混凝土流动性变化与C20相似，如图5所示。

废水的静置存放时间不同影响也不同。陈军亮等[15]发现存放时间延长，废水的影响减小，如表4所示。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

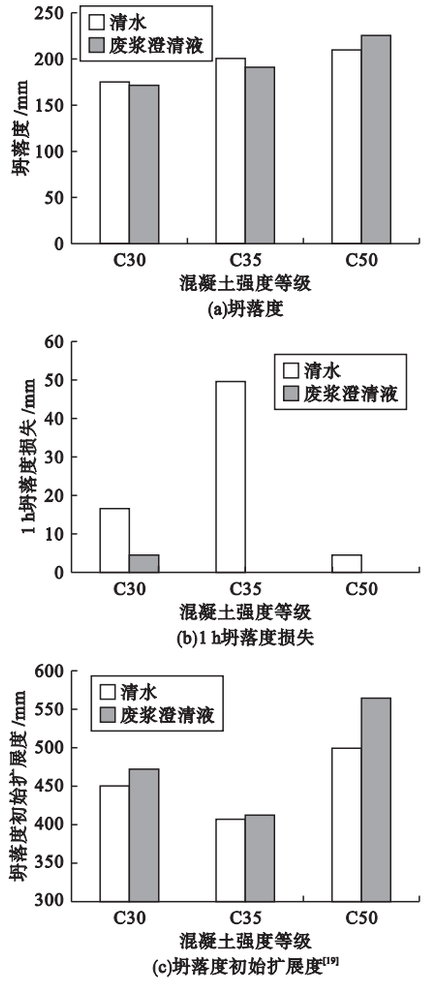

图5　废浆澄清液对不同强度等级混凝土工作性能的影响

表4　澄清时间对工作性能的影响[15]

强度等级	用水种类	初始坍落度 /mm	1 h 坍落度 /mm	初始扩展度 /mm	1 h 扩展度 /mm
C30	清水	170	150	450	340
	1 d 澄清	170	160	490	350
	60 d 澄清	165	165	450	355

此外，沉淀渣的掺入降低混凝土和砂浆的流动性[26–27]，且随掺量的增加而逐渐降低[20,27]，坍落度经时损失增大[24,26]。对于中高强度的混凝土，含固取代量大于2%时坍落度和扩展度显著降低，含固取代量达8%时混凝土基本失去流动性[27]。

初始坍落度的变化与废水浓度和掺量有关，废水中缓凝组分对固体物质的吸附作用影响废水制备的砂浆或混凝土的凝结时间，从而导致其流动性和坍落度受到影响[28]。

3.3　力学性能

关于废水对混凝土早期和后期强度影响的研究结果差异很大：有认为废水对早期强度影响不大[4,28]；有认为提高早期强度[4,23]；有认为废水可以提高28 d强度[28]；有认为略降低后期强度；有认为对早期、后期强度影响均不大[23]；有认为对早期、后期强度均有提高[4,19]；也有认为废水对混凝土强度的影响与混凝土等级有关[19]。上述结果的差异与废水的掺量和浓度有关。在废水掺量低时混凝土强度增加，掺量高时强度降低[4,17,20,29–30]；在废水浓度低时强度增加，浓度高时强度降低[11,31]，废水掺量与浓度的变化与混凝土的等级有关[28,31]。如果在废水中加入稳定剂，可以提高强度90%以上[25]。

废水的浓度和掺量最终涉及到废水中的固含量。废水固含量低时，废水带入的固体物质通过填充孔隙，提高密实度，从而提高强度，但过多会降低单位体积胶凝材料的含量和界面过渡区的黏结力，从而降低了强度。

3.4　耐久性

关于废水对混凝土耐久性的影响研究不多。废水可提高混凝土的抗氯离子渗透性和抗碳化能力[27]，随废水掺量的增加早期碳化深度变化不大，后期碳化深度有一定增加，均在1 mm范围内，但对抗冻融破坏能力和抗盐腐蚀能力影响不大[25]。同时，废水的掺入混凝土有裂缝产生，可能增大混凝土干燥收缩，且随废水掺量的增加而干缩增大[32]，塑性和干燥收缩裂缝出现时间也提前[20]，这是由于废水使水泥水化较快、凝结时间缩短所致。

总体而言，废水对混凝土工作性和强度影响较大的是其固含量，但这些固体物质对于提高混凝土的密实度相对比较有利，因而对耐久性的不利影响可能不会太大。由于固体物质成分的复杂性，需要进一步研究。

4　废水中的外加剂组分与混凝土性能的关系

外加剂是混凝土的主要组分之一，但工程类型、施工方式及季节、运输距离等变化会影响到对混凝土工作性要求，使外加剂的种类和掺量也不同，其中影响较大的是减水剂中的缓凝组分，它对废水中固含量变化有较大影响，进而影响废水浓度，从而会影响废水处理工艺和新拌混凝土的性能，但目前在此方面研究较少。

废水中缓凝组分较少时，废水中被减水剂包裹的悬浮颗粒较少，废水浓度也较低，沉淀澄清处理容易，所需时间也短，如果不考虑其中离子浓度影响，则掺入后的效果与自来水相似。如果气温较高、输送或泵送距离较远，减水剂的量必然增加，缓凝组分也相应增多，使废水浓度增加，如果沉淀澄清工艺处理不当，如处理时间太短，会造成混凝土凝结时间延长、流动性和强度降低。

因此，搅拌站在废水使用时，应考虑工程要求、季节变化等导致外加剂组分变化对废水浓度的影响，在废水处理工艺方面做相应的改变，以减少对混凝土性能的不利影响。

5　废水的固含量和离子浓度与混凝土性能的关系

废水浓度和掺量的变化在混凝土中最终体现的是废水所带入的固体物质的量，即固含量，这是废水与一般拌和水的区别之一。废水中固含量低，对凝结时间、流动性、强度影响较小，在一定范围内还具有一定的积极作用[4,16–18]，同时废水中的固体物质可以填充混凝土孔隙，起到微集料的作用，从而提高混凝土密实度[27]。但固含量大时，可能会起到副作用，废水浓度超过5%时水泥标准稠度用水量和凝结时

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间增加[16]，混凝土强度明显降低，一般不易超过 5%。废水中固含量也影响着以废水制备的混凝土和砂浆水化速率和水化过程，废水未水化颗粒的水化促进混凝土和砂浆的水化，进一步影响了裂缝和收缩出现的时间和几率[20,32]，从而影响混凝土和砂浆的耐久性，可通过控制废水的掺入量来控制废水固含量的变化，进而控制裂缝的出现和干燥收缩率，以此来得到较好的耐久性。

另一不同之处在于废水中含有一定量的水化离子，如 Ca^{2+}、OH^-、Si_4^{2-}、K^+、Na^+、SO_4^{2-}等[3]。杨欣华等[6]发现舟山废水中的 Ca^{2+}、OH^-浓度远高于纯水，且废水掺入使 3 d 强度降低，28 d 强度明显增加（如表 5、6、图 6），但它们之间的关联性并没有讨论。

表 5　舟山不同废水掺量的离子含量分析[6]

废水废浆名称	阳离子				
	K^+、Na^+总和	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	阳离子总量
洁净水	53.83	36.07	13.38	1.20	104.47
20%	86.68	160.16	10.94	1.12	258.90
40%	119.54	284.25	8.51	1.04	413.34
60%	152.39	408.33	6.08	0.96	567.77

表 6　舟山不同废水掺量的离子含量分析（续）[6]

搅拌站地区	阴离子						阴阳离子总量	pH 值
	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	OH^-	NO_3^-	阴离子总量		
洁净水	8.00	4.80	0	0	2.52	316.68	421.15	7.97
20%	58.42	39.67	11.79	99.13	4.50	454.60	713.50	8.85
40%	108.84	74.54	23.59	198.26	6.48	592.52	1 005.86	9.73
60%	159.25	109.41	35.38	297.40	8.46	730.44	1 298.21	10.60

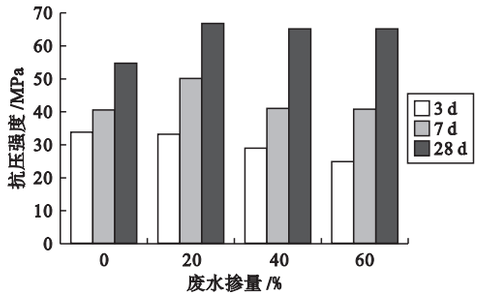

图 6　舟山废水废浆对砂浆抗压强度的影响[6]

由于舟山废水的固含量很低，仅有 0.27%，其影响是可以忽略的，而离子浓度很高，这表明离子浓度产生了一定的影响。同时，Sandrolini[23]发现随废水中 pH 值增大，坍落度逐渐减小。此外，荣辉等发现采用饱和石灰水拌制的砂浆凝结时间延长，但 3、28 d 强度增加。废水中 Ca^{2+}、SiO_3^{2-}、OH^-等离子的存在增加初始新拌混凝土中的离子浓度，影响到 $Ca(OH)_2$ 的结晶和 CSH 的形成，进一步影响胶凝材料的早期水化动力学过程，从而影响到早期性能。由于废水具有高碱性的特征，可抵消空气中二氧化碳溶于水后与水泥水化产生的氢氧化钙的反应，从而增强了混凝土的抗碳化和抗氯离子渗透能力，改善混凝土结构提高耐久性。

废水中的离子对混凝土性能有一定的促进作用，合理发挥这部分离子在新拌混凝土中作用有待进一步研究。

6　结论与展望

通过对搅拌站废水的性质、处理工艺和在混凝土中利用效果研究，得到以下结论：

（1）搅拌站废水是一种高固含量和离子浓度的废水，利用前合理的处理工艺设计是必要的。

（2）废水增加水泥标准稠度用水量，延长凝结时间，并在一定掺量或浓度范围内可以提高水泥或混凝土流动性和强度。

（3）废水掺量和浓度变化最终可以归结为废水总的固含量对混凝土性能的影响，固含量低时对流动性、强度和耐久性有利。

虽然针对废水性质、固含量的影响开展了一定的研究，但要达到对废水更有效的利用，下面几个方面的工作需要进行或者强化。

（1）工程要求、季节变化等会导致外加剂组分（尤其是缓凝组分）和掺量的变化，并影响到废水浓度的变化。废水中缓凝组分对废水处理工艺和混凝土性能的影响应进行研究，以减少对混凝土性能的不利影响。

（2）废水的离子浓度对混凝土性能有一定的促进作用，但废水中离子浓度变化规律及其对废水处理工艺和混凝土性能的影响有待研究，这对废水处理工艺的设计和废水作用的更好发挥具有一定参考作用。

（3）废水的固含量对混凝土耐久性的影响有待进一步加强，为废水在混凝土中利用的全面评价提供参考。

参考文献：

[1] 余和友，徐亮.混凝土搅拌站废水废渣的试回收再利用[J].建筑工程，2010（8）：122-136.

[2] PISTILLI M F，PETERSON C F，SHAH S P.Properties and possible recycling of solid waste from ready-mix concrete[J].Cement and Concrete Research，1975，5（3）：249-259.

[3] 吴方贵，汤进，李国宏，等.浅谈商品混凝土废渣废水处理利用[J].商品混凝土，2010（9）：57-60.

[4] 梅晓东，裴锐，赵琬玉.混凝土搅拌站废水、废渣回收利用技术研究[J].辽宁科技学院学报，2015，17（3）：25-27.

[5] 刘志杰，耿加会，李国宏.预拌搅拌站废水、废浆再生利用技术[C]//中国中西部地区土木建筑学术年会，新疆，2015.

[6] 杨欣华，纪宪坤，王明远，等.混凝土搅拌站废水废浆性能分析与利用[J].混凝土，2015（5）：109-112.

[7] 李宛珊，吉旭，王琳娜，等.混凝土搅拌站污水回收系统关键技术研究[J].混凝土，2012（12）：125-128.

[8] 张燕秋，詹志云.商品混凝土生产企业废水废渣综合利用系统[J].粉煤灰，1997（5）：19-20.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[9] 黄文景，周建华.介绍一种混凝土分离和回收再利用系统[J].建设机械技术与管理，2006(5)：4-5.
[10]俞黎明.预拌混凝土“三废”回收综合利用技术[J].施工技术，2016，45(3)：53-55.
[11]李峰.商品混凝土搅拌站废水回收利用[J].四川建筑科学研究，2009，35(3)：203-204.
[12]袁叉平.搅拌站水路的优化设计和废水循环系统[J].现代物业新建设，2013，12(9)：93-96.
[13]BORGES N B，CAMPOS R J，PABLOS J M.Characterization of residual sand removed from the grit chambers of a wastewater treatment plant and its use as fine aggregate in the preparation of non-structural concrete[J].Water Practice and Technology，2015，10(1)：164-171.
[14]HEBER M，et al.Andradec.Concrete plant wastewater treatment process by coagulation combining aluminum sulfate and Moringa oleifera powder[J].Journal of Cleaner Production，2014(76)：125-130.
[15]陈军亮，张哲明，葛栋，等.混凝土搅拌站废弃泥浆水的回收利用[J].混凝土，2014(9)：130-141.
[16]刘俊华.废水对水泥性能影响的研究[J].内蒙古公路与运输，2015(6)：25-27.
[17]张凯峰，姚源，赵世冉，等.搅拌站废水作为混凝土拌合用水的试验研究[J].混凝土，2015(2)：101-103.
[18]李小玲，何廷树.混凝土搅拌站废水对水泥胶砂性能的影响[J].混凝土，2011(3)：139-141.
[19]姚源，张凯峰，刘康，等.混凝土搅拌站废水回用对 C10~C60 混凝土性能影响的试验研究[J].新型建筑材料，2015，12(3)：12-47.
[20]张意，陈家全，何小勇.预拌混凝土废水泥浆循环利用研究[J].重庆建筑，2010，9(80)：35-39.
[21]白延平，孙锦，丁华柱.废水泥浆对水泥胶砂性能的影响[J].固废利用，2012：19-24.
[22]王玥，李丹阳，张慧爱，等.废水泥浆水在预拌混凝土生产中的循环利用[J].山西建筑，2015，41(5)：95-96.
[23]SANDROLINI F，FRANZONI E.Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants [J].Cement and Concrete Research，2001，31(3)：485-489.
[24]杨根宏，杨松林，曹达纯，等.混凝土搅拌站废浆回收利用的研究与应用[J].广东建材，2013(9)：64-67.
[25]PAOLINI M，KHURANA R.Admixtures for recycling of waste concrete[J].Desalination and Water Treatment，1998，20(2)：221-229.
[26]王艳梅，李红，李国强，等.废弃灰浆循环再利用系统在混凝土搅拌站中的利用[J].混凝土，2008(4)：123-125.
[27]李小玲.搅拌站废水对不同强度等级的泵送混凝土性能影响研究[D].西安：西安建筑科技大学，2015.
[28]彭孟啟，杨根宏，陈文耀，等.废浆澄清液对混凝土性能的影响[J].江西建材，2015(12)：23-27.
[29]何正斌，孙皖红，王韶辉，等.搅拌站废水对混凝土性能影响研究[J].广东建材，2012(12)：23-26.
[30]欧阳孟学，李永鹏，张凯峰，等.利用搅拌站生产废水制备 C20~C40 混凝土[J].混凝土，2013(11)：124-129.
[31]曾光，张玉平，汤天明，等.搅拌站生产废水在混凝土中的应用研究[J].建筑设计管理，2009，26(3)：61-63.
[32]CHATVEERA B，LERTWATTANARUK P，MAKUL N.Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete[J].Cement and concrete composites，2006，28(5)：441-450.

第一作者：马先伟(1977-)，男，博士，副教授。
联系地址：河南平顶山市新城区 河南城建学院土木与交通学院办公室(467036)
联系电话：15903905071

·上接第 101 页

3 结论

(1) 在水灰比相同的状态下，B04、B05 的泡沫混凝土的流动度随煤矸石掺量的增加而增大，B06、B07 的泡沫混凝土流动度则相反，随煤矸石掺量的增加而减小。

(2) C:CG 在 2.5:1~2.5:1 之间时，煤矸石在泡沫混凝土的作用最明显，煤矸石在泡沫混凝土中不仅有火山灰效应，还有形成骨架和弥补孔隙缺陷的作用。

(3) 泡沫混凝土的折压比和拉压比都比普通混凝土的高出 3 倍以上，而且拉压比随着煤矸石量的增加而增大。

参考文献：

[1] 冯朝朝，韩志婷，张志义，等.煤矿固体废物——煤矸石的资源化利用[J].煤炭技术，2010，29(8)：5-7.
[2] 闫振甲，何艳君.泡沫混凝土实用生产技术[M].北京：化学工业出版社，2006：68-72.
[3] 李月香.轻质高强煤矸石泡沫混凝土的研究[D].重庆：重庆大学，2009：113-115.
[4] 朱宏军，程海丽，姜德民.特种混凝土和新型混凝土[M].北京：化学工业出版社，2004：121-123.
[5] 魏荟荟. 纳米 $CaCO_3$ 对水泥基材料的影响及作用机理研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013：78-81.
[6] 王凯，喻乐华，欧辉，等.磨细煤矸石粉颗粒特征及其最佳细度的选择[J].新型建筑材料，2004，31(1)：17-18.
[7] 杜家桢，施慧生.活化煤矸石对硬化水化浆体性能的影响[J].粉煤灰，2007，19(1)：27-28.
[8] 朱蓓蓉，杨全兵.煤矸石掺合料对水泥浆体结构与性能的影响[J].低温建筑技术，2005，27(2)：1-3.

第一作者：周永(1968-)，男，教授，全国注册一级建造师，全国注册监理工程师，研究方向：主要从事混凝土材料方面的研究。
联系地址：湖北省黄冈市新港二路 146 号 黄冈师范学院建筑学院(438000)
联系电话：13971712772

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net