

混合再生骨料混凝土配制技术试验研究

陈树建, 翟爱良, 季昌良, 王纯合, 赵爱华

(山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:以废弃砖骨料和废弃混凝土骨料混合使用替代天然骨料制备混凝土,即为混合再生骨料混凝土。试验研究再生砖骨料和再生混凝土骨料不同替代率条件下水灰比、砂率、用水量等因素对混合再生骨料混凝土立方体抗压强度的影响,总结得出混合再生骨料混凝土的最佳配合比和最佳成分比。

关键词:混合再生骨料混凝土;立方体抗压强度;最佳配合比;成分比

中图分类号:TV41

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)03-0096-06

Experiment on configuration technique of mixed recycled aggregate concrete

CHEN Shujian, ZHAI Ailiang, JI Changliang, WANG Chunhe, ZHAO Aihua

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Preparing concrete by using mixed of waste brick aggregate and waste concrete aggregate instead of natural aggregate, which is called mixed recycled aggregate concrete. The paper experimented the influence of water cement ratio, sand ratio, water content under different substitution rates of recycled brick aggregate and recycled concrete aggregate on the cube compressive strength, and summarized the optimal mix proportion and replacement ratio of the mixed recycled aggregate concrete.

Key words: mixed recycled aggregate concrete; cube compressive strength; optimal mix proportion; ratio of constituents

1 概述

随着我国城市化进程的不断加快、新农村建设工作的不断深入及旧村改造、新村建设工作的相继铺开,城乡大量的房屋被拆迁,而由于房屋拆迁产生的固体废弃物也空前增加。据统计,我国每年因拆除建筑产生的固体废弃物在2亿t以上^[1-2],主要是废弃砖瓦和废弃混凝土,这其中的绝大部分未经任何处理,便被运往郊外露天堆放或填埋,而堆放或填埋则需耗用大量的征地等建设投资,同时清运和堆放过程中的散落和扬尘等问题,又加重了对环境影响和污染。因此,废弃砖和废弃混凝土的资源化利用已成为亟待解决的问题。

我国城乡建筑物主要采用混合结构及框架结构,楼板、梁柱等构件一般为钢筋混凝土,而墙体大部分为砖砌体,因而建筑物拆除会产生大量的废弃砖和废弃混凝土,如将废弃砖和废弃混凝土再生利用,以再生砖骨料和再生混凝土骨料混合使用,替代天然骨料制备混凝土,这种混凝土质量轻,应用范围

广,一方面可以解决大量砖废弃物、混凝土废弃物处理困难和由此引发的对环境的负面影响等问题,同时又节省了大量的垃圾清运费用和处理费用,另一方面可以减少对天然砂石的开采,保护生态环境,促进社会的协调、可持续发展。因此称为“混合再生骨料混凝土”。

本文针对单位体积粗骨料内再生砖骨料和再生混凝土骨料不同成分比(25%、50%、75%)对混合再生骨料混凝土立方体抗压强度的影响,研究确定混合再生骨料混凝土的最佳配合比和最佳替代率。

2 混合再生骨料混凝土主要材料组成及性能

试件制作所选用的材料均为山东省常用工程建设材料,水泥选用泰安鲁润水泥制造有限公司生产的PC32.5强度等级的复合硅酸盐水泥;混凝土拌和用水为自来水公司自来水;砂子为中粗砂;粗骨料完全由再生砖骨料和再生混凝土骨料替代。

借鉴再生混凝土骨料的强化处理方法,采用与

收稿日期:2012-12-21; 修回日期:2013-01-08

基金项目:山东省自然科学基金项目(2009ZR01879)

作者简介:陈树建(1988-),男,山东新泰人,硕士研究生,研究方向:主要从事工程鉴定与加固研究。

通讯作者:翟爱良(1963-),男,山东成武人,教授,主要从事工程结构鉴定与加固改造研究。

拌合混凝土相同水灰比的水泥浆对破碎后的各级配再生砖骨料进行包裹强化处理(如图 1)^[3],以使骨料本身的强度得到提高,同时在混凝土拌合时与水泥、砂、水等有更好的粘合效果,从而增加接触面的粘结力。

2.1 再生混凝土骨料制备

再生混凝土骨料选用拆除框架结构的板柱构件,经机械破碎而成(如图 2),为保证试验研究具有一定可比性,对已有的再生混凝土骨料进行筛分为与再生砖骨料相同的粒径。

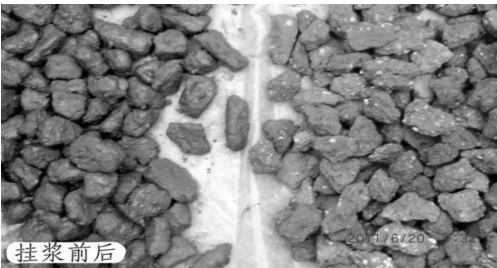


图 1 水泥浆包裹强化处理与未处理对比

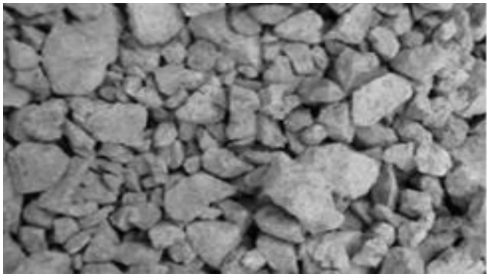


图 2 机械破碎的再生混凝土骨料

2.2 再生砖骨料与再生混凝土骨料性能

通过试验测定再生砖骨料和再生混凝土骨料基本性能^[4],并与天然骨料对比,见表 1。可以看出,再生砖骨料和再生混凝土骨料与天然骨料相比特点类似,堆积密度、表观密度均小于天然骨料,吸水率、压碎指标都大于天然骨料。

表 1 不同类型骨料的基本性能对比					kg/m ³ , %
骨料类型	堆积密度	表观密度	吸水率	压碎指标	
天然骨料	1540	2724	1.11	12.21	
再生混凝土骨料	1251	2613	6.01	17.25	
再生砖骨料	903	2409	14.13	38.00	

2.3 再生砖与再生混凝土混合骨料性能

将再生砖骨料和再生混凝土骨料混合使用,在本试验中,单位体积粗骨料中再生砖骨料占再生混凝土骨料的 75%、50%、25%。首先,测定不同组成成份混合骨料的基本性能见表 2,可见,再生砖骨料

和再生混凝土骨料的混合使用使压碎指标较再生砖骨料降低了 27.3%,吸水率降低了 28.4%,这都有利于再生砖骨料和再生混凝土骨料的实际应用。

表 2 不同成份混合骨料的基本性能					kg/m ³ , %
骨料类型	堆积	表观	吸水	压碎	
	密度	密度	率	指标	
再生砖 75%+再生混凝土 25%	990	2460	12.10	32.81	
再生砖 50%+再生混凝土 50%	1077	2511	10.07	27.63	
再生砖 25%+再生混凝土 75%	1164	2562	8.04	22.44	

3 试验设计

3.1 正交试验设计

参考已有成果资料^[5-6],选择 L9(3³) 正交试验,分 3 组,每组试验次数为 9 次。

第一组试验为单位体积粗骨料中 75% 的再生砖骨料、25% 的再生混凝土骨料,正交设计因素 - 水平见表 3。

表 3 第一组正交设计因素 - 水平表			
水平	水灰比	砂率	单位用水量
1	0.63 (A1)	0.35 (B1)	335 (C1)
2	0.66 (A2)	0.37 (B2)	345 (C2)
3	0.69 (A3)	0.39 (B3)	355 (C3)

第二组试验为单位体积粗骨料中 50% 的再生砖骨料、50% 的再生混凝土骨料,正交设计因素 - 水平见表 4。

表 4 第二组正交设计因素 - 水平表			
水平	水灰比	砂率	单位用水量
1	0.63 (A1)	0.35 (B1)	310 (C1)
2	0.66 (A2)	0.37 (B2)	320 (C2)
3	0.69 (A3)	0.39 (B3)	330 (C3)

第三组试验为单位体积粗骨料中 25% 的再生砖骨料、75% 的再生混凝土骨料,正交设计因素 - 水平见表 5。

表 5 第三组正交设计因素 - 水平表			
水平	水灰比	砂率	单位用水量
1	0.63 (A1)	0.35 (B1)	310 (C1)
2	0.66 (A2)	0.37 (B2)	320 (C2)
3	0.69 (A3)	0.39 (B3)	330 (C3)

3.2 配合比设计

各组制备混凝土配合比设计分别见表 6、表 7、表 8。

表 6 第一组制备混凝土配合比表

试 验 号	正交 组合	配合比					坍 落 度
		水	水泥	砂	再生材料		
					再生砖	再生混	
					骨料	凝土骨料	
1	A1B1C1	2010	3190	3663	5000	1802	10
2	A1B2C2	2070	3286	3995	5000	1802	12
3	A1B3C3	2130	3381	4349	5000	1802	15
4	A2B1C2	2070	3136	3663	5000	1802	20
5	A2B2C3	2130	3227	3995	5000	1802	6
6	A2B3C1	2010	3045	4349	5000	1802	11
7	A3B1C3	2130	3086	3663	5000	1802	16
8	A3B2C1	2010	2913	3995	5000	1802	8
9	A3B3C2	2070	3000	4349	5000	1802	12

表 7 第二组制备混凝土配合比表

试 验 号	正交 组合	配合比					坍 落 度
		水	水泥	砂	再生材料		
					再生砖	再生混	
					骨料	凝土骨料	
1	A1B1C1	1860	2952	3736	3335	3604	20
2	A1B2C2	1920	3048	4075	3335	3604	25
3	A1B3C3	1980	3142	4436	3335	3604	31
4	A2B1C2	1920	2909	3736	3335	3604	14
5	A2B2C3	1980	3000	4075	3335	3604	18
6	A2B3C1	1860	2818	4436	3335	3604	12
7	A3B1C3	1980	2870	3736	3335	3604	15
8	A3B2C1	1860	2696	4075	3335	3604	8
9	A3B3C2	1920	2783	4436	3335	3604	26

表 8 第三组制备混凝土配合比表

试 验 号	正交 组合	配合比					坍 落 度
		水	水泥	砂	再生材料		
					再生砖	再生混	
					骨料	凝土骨料	
1	A1B1C1	1860	2952	4072	1783	5779	26
2	A1B2C2	1920	3048	4441	1783	5779	35
3	A1B3C3	1980	3142	4835	1783	5779	53
4	A2B1C2	1920	2909	4072	1783	5779	34
5	A2B2C3	1980	3000	4441	1783	5779	43
6	A2B3C1	1860	2818	4835	1783	5779	29
7	A3B1C3	1980	2870	4072	1783	5779	33
8	A3B2C1	1860	2696	4441	1783	5779	11
9	A3B3C2	1920	2783	4835	1783	5779	18

按照 GB/T 70080 - 2002《普通混凝土拌合物性能试验方法》进行各组混合再生骨料混凝土拌合物成型、养护等^[7]。试块尺寸规格均为 100 mm×100 mm×100 mm,每组试验共 9 次. 每次有 6 块,24 h 后拆模,在标准条件下(温度在 20±3℃,相对湿度不小于

90%)养护,分别测定 14 d 强度和 28 d 强度。

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

各组混合再生骨料混凝土立方体抗压强度值分别见表 9、10、11。

表 9 第一组试验立方体抗压强度值表

试验组合	14 天强度	平均值	28 天强度	平均值
1(A1B1C1)	17.87	17.69	19.82	19.80
	17.13		19.42	
	18.07		20.15	
2(A1B2C2)	16.31	16.63	19.19	18.95
	17.08		18.20	
	16.49		19.47	
3(A1B3C3)	19.06	18.79	21.80	21.25
	19.09		20.33	
	18.23		21.61	
4(A2B1C2)	20.11	20.03	23.23	23.63
	20.25		23.33	
	19.73		24.32	
5(A2B2C3)	20.41	19.34	23.12	23.31
	18.12		23.76	
	19.50		23.04	
6(A2B3C1)	19.06	19.82	22.89	22.56
	20.91		21.75	
	19.50		23.03	
7(A3B1C3)	18.96	19.33	22.63	22.05
	20.06		21.43	
	18.97		22.10	
8(A3B2C1)	18.33	18.97	22.13	22.01
	19.52		22.46	
	19.07		21.43	
9(A3B3C2)	19.29	18.70	21.44	21.44
	19.19		20.89	
	17.62		21.98	
平均值		18.81		21.66

表 10 第二组试验立方体抗压强度值表

试验组合	14 天强度	平均值	28 天强度	平均值
1(A1B1C1)	20.13	20.22	21.33	21.22
	20.54		21.98	
	19.98		20.36	
2(A1B2C2)	21.51	22.34	25.13	24.49
	23.24		24.63	
	22.26		24.41	
3(A1B3C3)	22.33	21.98	25.48	25.04
	22.05		24.83	
	21.57		24.82	

续表 10

试验组合	14 天强度	平均值	28 天强度	平均值
4(A2B1C2)	23. 11	22. 74	25. 03	25. 29
	22. 26		24. 96	
	22. 84		25. 87	
5(A2B2C3)	20. 48	20. 27	23. 16	23. 25
	19. 80		22. 60	
	20. 52		23. 99	
6(A2B3C1)	19. 22	20. 15	23. 01	23. 22
	20. 76		23. 52	
	20. 48		23. 14	
7(A3B1C3)	20. 46	20. 75	24. 64	23. 89
	20. 39		22. 80	
	21. 40		24. 24	
8(A3B2C1)	20. 58	20. 73	22. 83	22. 64
	20. 21		22. 34	
	21. 41		22. 75	
9(A3B3C2)	18. 42	18. 91	21. 61	21. 82
	18. 90		21. 52	
	19. 42		22. 34	
平均值		20. 90		23. 46

表 11 第三组试验立方体抗压强度值表 MPa

试验组合	14 天强度	平均值	28 天强度	平均值
1(A1B1C1)	18. 57	18. 18	21. 90	21. 35
	17. 63		20. 16	
	18. 33		22. 00	
2(A1B2C2)	19. 53	19. 58	21. 56	21. 98
	19. 51		22. 01	
	19. 70		22. 36	
3(A1B3C3)	18. 91	19. 24	22. 51	21. 77
	19. 43		21. 72	
	19. 38		21. 07	
4(A2B1C2)	19. 64	19. 68	23. 53	22. 47
	19. 86		20. 87	
	19. 54		23. 00	
5(A2B2C3)	19. 11	18. 22	22. 10	21. 45
	18. 46		21. 07	
	17. 08		21. 17	
6(A2B3C1)	18. 73	18. 09	21. 19	21. 51
	19. 19		20. 93	
	16. 35		22. 40	
7(A3B1C3)	18. 23	17. 83	20. 92	21. 49
	18. 03		22. 21	
	17. 22		21. 33	
8(A3B2C1)	19. 92	19. 54	23. 16	22. 89
	19. 16		22. 95	
	19. 55		22. 54	
9(A3B3C2)	18. 07	17. 71	20. 88	20. 59
	17. 26		20. 31	
	17. 80		20. 57	
平均值		18. 67		21. 72

4.2 试验结果分析

4.2.1 试验结果的极差分析 各组试验所得立方体抗压强度值进行极差分析结果分别见表 12、表 13、表 14。

表 12 第一组实验结果的极差分析表

立方体抗压强度	水灰比(A)	砂率(B)	单位用水量(C)
D1	60. 00	65. 48	65. 25
D2	69. 50	64. 27	64. 37
D3	65. 5	65. 25	66. 61
d1	20. 00	21. 827	21. 457
d2	23. 167	21. 423	21. 34
d3	21. 833	21. 75	22. 203
R	3. 167	0. 4033	0. 8633

表 13 第二组实验结果的极差分析表

立方体抗压强度	水灰比(A)	砂率(B)	单位用水量(C)
D1	70. 75	70. 40	67. 08
D2	71. 76	70. 38	71. 60
D3	68. 35	70. 08	72. 18
d1	23. 66	23. 47	22. 36
d2	23. 92	23. 46	23. 87
d3	22. 78	23. 36	24. 06
R	1. 14	0. 09	1. 70

表 14 第三组实验结果的极差分析表

立方体抗压强度	水灰比(A)	砂率(B)	单位用水量(C)
D1	65. 10	65. 31	65. 75
D2	65. 43	66. 32	65. 04
D3	64. 97	63. 87	64. 71
d1	21. 70	21. 77	21. 917
d2	21. 81	22. 107	21. 68
d3	21. 66	21. 29	21. 57
R	0. 15333	0. 8167	0. 3467

注：* D_i 、 d_i 分别表示第 i 个水平,每个因素的试验结果总和及平均值; R 表示极差。

由上述表 12 ~ 14 可以得出：

(1)定义表 12、13、14 中立方体抗压强度最高为最佳试验组合,则第一组试验的最佳组合为：A2B1C3,即水灰比:0. 66、砂率:35%、单位用水量:355 mL;第二组为 A2B1C3,即水灰比:0. 66、砂率:35%、单位用水量:330 mL;第三组为 A2B2C1:水灰比:0. 66、砂率:37%、单位用水量:310 mL。

(2)第一组影响混合再生骨料混凝土立方体抗压强度的因素的主次顺序是 A→C→B,即水灰比→单位用水量→砂率;第二组为 C→A→B,即单位用水量→水灰比→砂率;第三组为 B→C→A,即砂率

→单位用水量→水灰比。

(3)表 9、10、11 中,28 d 强度较 14 d 强度,提高不是很明显,这一现象可以得出,混合再生骨料混凝土早期的水化反应比普通混凝土要快,可以认为采用的再生砖骨料吸入水,为早期的水化反应提供了充足的水,因此水化反应比普通混凝土要快,早期强度增加幅度会大一些。

4.2.2 试验结果的方差分析 采用上述方法,极差分析方法,其的优点是简便、工作量小,而缺点也是

非常明显的,就是判断因素效应的精确度不高,且实验条件改变所引起的数据波动和试验误差所引起的数据波动没有严格的区分开来,也没有提供一个标准判断所考察因素的作用是否显著^[8]。

因此,为了弥补这些不足,增加采用方差分析的方法,通过普通因素显著性判别各因素对指标的显著性影响大小。

对试验所得立方体抗压强度值进行方差分析,各组试验结果方差分析分别见表 15、表 16、表 17。

表 15 第一组各因素对试验结果的方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F	临界值
水灰比 A	15.16933	2	7.584667	12.85125	$F_{0.1}(2,6)=3.46$
砂率 B	0.27526667	2	0.137633	0.141206	$F_{0.05}(2,6)=5.14$
单位用水量 C	1.31646667	2	0.658233	0.67532	$F_{0.01}(2,6)=10.9$
误差 e	3.541134	6	0.589744		
综合	18.7078	8			

表 16 第二组各因素对试验结果的方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F	临界值
水灰比 A	2.128156	2	1.064078	0.456991	$F_{0.1}(2,6)=3.46$
砂率 B	0.047489	2	0.023444	0.008876	$F_{0.05}(2,6)=5.14$
单位用水量 C	5.410556	2	2.705278	1.518643	$F_{0.01}(2,6)=10.9$
误差 e	13.97067	6	2.32844		
综合	16.0988	8			

表 17 第三组各因素对试验结果的方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F	临界值
水灰比 A	0.037476	2	0.018738	0.031691	$F_{0.1}(2,6)=3.46$
砂率 B	1.010689	2	0.505345	1.177745	$F_{0.05}(2,6)=5.14$
单位用水量 C	0.188289	2	0.094144	0.16629	$F_{0.01}(2,6)=10.9$
误差 e	3.547667	6	0.591278		
综合	3.585156	8			

普通混凝土 14 d 立方体抗压强度可以达到 19.10 MPa,28 d 立方体抗压强度为 24.11 MPa,由表 9、10、11,可得各组 14、28 d 立方体抗压强度值的柱状图如图 3。

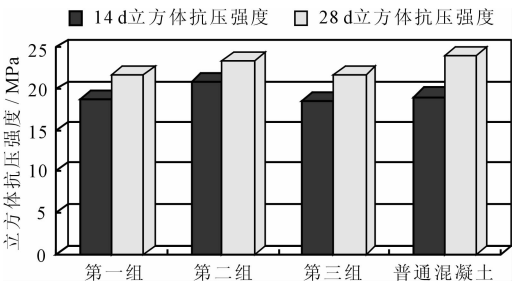


图 3 三组试验 14d 和 28d 立方体抗压强度值

由表 3 与图 3 并与极差分析结果对比可得:

(1)第一组中 $F_A > F_{0.01}(2,6) = 10.9$,可以认为,有 99% 以上的把握判断水灰比的水平改变对实验结果有极为显著的影响,与极差分析一致;第二组各因素影响立方体抗压强度的主次顺序为单位用水量→水灰比→砂率,与极差分析一致,三个因素对立方体抗压强度的影响都较弱;第三组各因素影响立方体抗压强度的主次顺序为砂率→单位用水量→水灰比,与极差分析一致,3 个因素对立方体抗压强度影响都较弱。

(2)从图 3 可以看出混合再生骨料混凝土 14 d 立方体抗压强度比普通混凝土高 1.9%,28 d 强度低 7.6%;而三组试验中第二组即单位体积粗骨料中 50% 再生砖骨料、50% 再生混凝土骨料立方体抗压强度值达

到最大,比第一组高 8.3%,比第三组高 8.0%,可以认为混合再生骨料混凝土的最佳替代率为 50%。

5 结 语

(1)再生砖骨料和再生混凝土骨料混合使用较再生砖骨料的压碎指标、吸水率都有所改善;因此,再生砖骨料和再生混凝土骨料混合使用可以应用到实际中。

(2)再生砖骨料吸水的特性使得水化反应更充分,混合再生骨料混凝土的早期强度提高较快。

(3)单位体积粗骨料中 75% 为再生砖骨料、25% 为再生混凝土骨料的最佳配合比为:水灰比:0.66、砂率:35%、单位用水量:355ml;单位体积粗骨料中 50% 为再生砖骨料、50% 为再生混凝土骨料的最佳配合比为:水灰比:0.66、砂率:35%、单位用水量:330 mL;单位体积粗骨料中 25% 为再生砖骨料、75% 为再生混凝土骨料的最佳配合比为:水灰比:0.66、砂率:37%、单位用水量:310 mL。

(4)单位体积粗骨料中 75% 为再生砖骨料、25% 为再生混凝土骨料时,水灰比水平改变对实验结果有极为显著的影响;单位体积粗骨料中 50% 的再生砖骨料、50% 的再生混凝土骨料和单位体积粗

骨料中 25% 的再生砖骨料、75% 的再生混凝土骨料,三个因素变化对立立方体抗压强度的影响都较弱。

(5)在相同的水灰比、砂率情况下,混合再生骨料混凝土的最佳替代率为 50%。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 常纪文. 我国循环经济法制建设存在的问题及其对策[J]. 红旗文稿, 2004(16): 29-31.
- [3] 杜 婷. 建筑垃圾再生骨料混凝土性能及强化试验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2001.
- [4] 陈 莹. 再生骨料基本性质及对混凝土性能影响的研究[J]. 再生资源研究, 2003(6): 34-37
- [5] 谢玲君, 翟爱良, 王 晖. 烧结砖再生骨料级配混凝土力学性能的影响[D]. 泰安:山东农业大学水利土木工程学院, 2010.
- [6] 张亚梅, 秦鸿根, 孙 伟, 等. 再生混凝土配合比设计初探[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(1): 7-9.
- [7] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB/T50080-2002. 普通混凝土拌合物性能试验方法[S].
- [8] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2004.

(上接第 95 页)

定的 0.8 时比取随机数的交叉概率效果要好,说明此问题需要较大的交叉概率来提高种群的多样性。与文献[8]使用改进的人工鱼群算法对应的结果相比,无论是精度还是运算时间上都有了明显的改进。

4 结 语

根据数值实验的初步结果可以知道, CDE 算法具有原理简单、编程容易、需要预先确定和调整的算法控制参数少及运算过程较为平稳等优点;通过将差分全局搜索与混沌细搜索局部搜索的结合,应用在河流水质参数问题上,明显改善了使用差分算法时的搜索效率和计算精度;种群数量一般在 60 左右,能使各智能算法取得更好的搜索结果;一般情况下,满足精度要求的次数 K_{num} 取 10 时,无论对于差分算法还是混沌差分算法都能有助于跳出局部最优,且明显提高算法的寻优率和精度。需要注意的是,随机产生的初始种群如果利用混沌系统来产生,也许能更好地改善寻优搜索的效率,这值得在今后的应用中做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘 毅, 陈吉宇, 杜鹏飞, 等. 环境模型参数优化方法的比较[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 1-6.
- [2] Stroll R, Price K. Differential evolution: A survey of the state of the art [J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2011, 15(1): 4-31.
- [3] 邹 毅, 朱晓萍, 王秀平. 一种混沌粒子群混合算法研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2009, 5(3): 258-260.
- [4] 谭 跃, 谭冠政, 涂 立. 一种新的混沌差分进化算法[J]. 计算机工程学报, 2009, 35(11): 216-218.
- [5] Leandro dos Santos Coelho and Viviana Cocco Mariani. Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1995, 21(2): 989-996.
- [6] 郭建青, 温 季. 示踪试验确定河流纵向弥散系数的直线图解法[J]. 环境科学, 1990, 11(2): 24-27.
- [7] Zhang Xuefeng, Fan Jiulun. Extended logistic chaotic sequence and its performance analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 12(S1): 156-161.
- [8] 陈广洲, 徐晓春, 汪家权, 等. 改进的人工鱼群算法在水质参水识别中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 108-113.