

文章编号: 1009 - 7767(2007)01 - 0029 - 05

# 一体化反应器处理生活污水的中试研究

张玉魁<sup>1</sup>, 施汉昌<sup>2,3</sup>, 姜家顺<sup>2,3</sup>

(1.北京市政投资有限公司,北京 100083;2.清华大学 环境科学与工程系,北京 100084;  
3.环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

摘 要: 鉴于污水处理中对氮、磷去除率的要求和内循环三相生物流化床反应器存在的不足,开发了一种一体化高效分离生物流化复合反应器(HSBCR)。HSBCR 反应器好氧循环流化区采用了独特的分格结构,并且在同一个反应器中实现了好氧、缺氧分区运行。HSBCR 中试设备处理生活污水的结果表明,当反应器好氧区 HRT 为 1 h 时,出水 COD 质量浓度可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)的二级标准;当 HRT 为 2 h,出水 COD 质量浓度可以达到一级(B)排放标准。随着 HRT 从 1 h 延长到 2.5 h,反应器对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果上升;对 TN 的去除效果表明,反应器具有较好的反硝化效果;反应器生物除磷效果对 TP 有约 50% 的去除率。利用 HSBCR 进行同步化学除磷可以使反应器出水 TP 低于 1.0 mg/L;气浮分离使反应器出水 SS 有效控制在 20 mg/L 以内。

关键词: 污水处理;脱氮;除磷;好氧-缺氧一体化;高效分离;生物流化;气浮

中图分类号: X703.3 文献标识码: A

## Pilot Study on Domestic Sewage Treatment with Integrated Reactor

ZHANG Yu-kui<sup>1</sup>, SHI Han-chang<sup>2,3</sup>, JIANG Jia-shun<sup>2,3</sup>

(1. Beijing Municipal Investment Company of Limited, Beijing 100083 China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Qinghua University, Beijing 100084, China; 3. ESPC State Key Joint Laboratory, Beijing 100084 China)

Abstract: As the requirements of rates of phosphorous removal and denitrification in domestic sewage treatment, and there are some shortcomings of inner circulated in three phase biological fluidized bed, a kind of integrated high efficient separation and biological fluidized composite reactor (HSBCR) was developed. The unique cellular structure was used in aerobic fluidized zone of HSBCR, and the aerobic zone and anoxic zone in the same reactor was performing separately. The results of domestic sewage treatment by HSBCR pilot equipment was shown, when HRT (hydraulic remain time) of aerobic zone is 1.0hr, effluent COD can reach to the second level standard of "discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant"(GB18918-2002). When HRT is 2.0hr, effluent COD can reach to the first level (B) standards. When HRT is increased from 1.0hr to 2.5hr, NH<sub>3</sub>-N removal ratio will be increased. The results of reactor removal TN (total nitrogen) indicate that HSBCR has better denitrifying effect. Biological phosphorus removal result is 50% in HSBCR, and when chemical phosphorus removal method is added in HSBCR at the same time, effluent TP concentration is less than 1.0mg/L. Effluent SS concentration is less than 20mg/L by air floatation separation in HSBCR.

Keywords: sewage treatment; denitrification; phosphorus removal; aerobic - anoxic integration; high efficient separation; biological fluidization; air floatation

随着地表水水质的恶化以及对污水处理要求的提高,污水脱氮除磷技术的研究已经成为污水处理领

域的一个热点问题。三相好氧生物流化床<sup>[1,2]</sup>污水处理设备具有处理效率高、占地省、抗冲击负荷能力强等一系列优点,是一种公认的高效污水处理设备。但是传统的好氧生物流化床只能氧化有机物和氨氮,并不能去除污水中的氮、磷等营养元素。据此,笔者在实验室研究的基础上,开发了一种既保留好氧生物流化床

基金项目:“863”计划资助项目,(2002AA601200)

收稿日期:2006-07-13

作者简介:张玉魁(1976-),男,河北辛集人,工程师,经济师,一级注册建造师,博士学位,北京市政投资有限公司副总工程师。

优点，又实现好氧-缺氧一体化的高效分离生物流化复合反应器 (HSBCR, High efficient Separation and Biological Fluidized Composite Reactor) 中试设备，并且利用该设备进行了处理生活污水的研究。

传统的活性污泥法等生物处理工艺在处理水量小、变化幅度大的污水时难以正常稳定地运行，而 HSBCR 反应器耐冲击负荷的特性可以解决这一问题<sup>[3]</sup>。传统的污水处理工艺普遍将各处理单元分设，往往还需要进行污泥回流和污水循环，这势必增加基础设施建设及管道设备的投资。因此，开发这种经济、高效、灵活、占地省的一体化污水处理新设备具有重要的现实意义。

### 1 试验装置

传统的内循环三相生物流化床<sup>[1,2]</sup>以沉淀原理进行固液分离，虽然可以不用污泥回流设施，但存在载体流失和过饱和空气释放而产生污泥上浮的问题。反应器与沉淀池分建则又要多建一个沉淀池并增设污泥回流设施。另外，为了维持好氧生物流化床的高效率，需要保证一定的高径比<sup>[4]</sup>，有人建议合理的高径比为 3~5<sup>[5]</sup>。在生物流化床反应器的实际应用中，为了维持合理的高径比，当反应器直径增加时，必然要增加反应器的高度，造成能耗的增加。

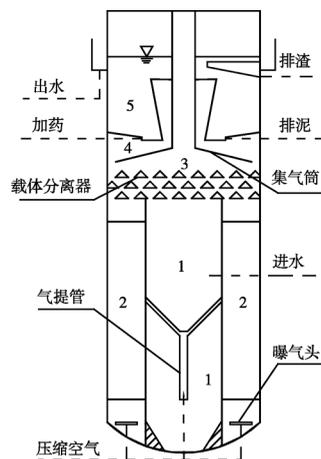
为了维持循环流化床反应器合理的高径比，同时不增加反应器的总高度，一个合理的方法是增加反应器的内筒数，即由一般的一个内筒改变成多个内筒而形成形式上类似于列管式反应器的结构。据此，笔者在内循环三相生物流化床的基础上对反应器进行了改进，将内循环生物流化床的内筒变小，同时对内筒和外筒之间的环隙进行分格，分格区域分别作为循环流化的上升区和下降区<sup>[6]</sup>。改进的 HSBCR 除可以保持循环流化床的流态及处理污水的高效率外，另一个明显的好处就是可以实现反应器的大型化。因为这种改进反应器的结构具有良好的整体性能，并且在整体直径增加时，反应器整体高度不会相应增加，因此，易于实现反应器的大型化，这对于污水处理设备是很重要的。

鉴于内循环三相生物流化床固液分离效果不佳的情况，笔者设计的 HSBCR 以水力停留时间(HRT)短、分离效率高的溶气气浮作为泥水分离设备，并且与反应器主体合理耦合，形成了一体化的反应器。

为了在 HSBCR 中实现脱氮和部分除磷的目的，将反应器中心筒设置成了缺氧区，并且利用气体提升的方式实现污水从好氧区到缺氧区的回流。污水通过好氧、缺氧反应实现生物脱氮和部分生物除磷。如果

处理出水对磷要求较高，还可以在气浮前加入化学药剂，在同一个反应器中实现生物除磷与同步强化化学除磷相结合。

整个一体化好氧-缺氧 HSBCR 的结构可以分成 3 部分，最下面是具有好氧区和缺氧区的主体反应区，中间是实现固、液分离的载体分离器，上部是实现泥水分离的气浮反应器。图 1 为一体化 HSBCR 的剖面图；图 2 为好氧、缺氧反应区横断面图，其中箭头方向表示水在反应区顶部的流动方向；图 3 为一体化反应器工艺流程的示意图。



1—缺氧反应区；2—好氧流化反应区；3—气体收集区；4—泥水上升区；5—气浮澄清区  
图 1 一体化好氧-缺氧 HSBCR 剖面图

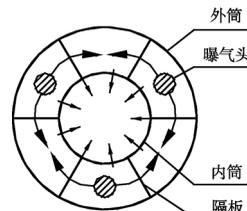


图 2 反应区平面示意图

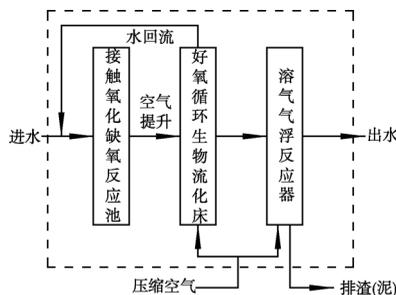


图 3 HSBCR 工艺流程示意图

HSBCR 中试反应器直径 1 000 mm，中心缺氧区直径 500 mm，反应区高度 2 000 mm，整体高度 2 800 mm。好氧区在平面上平均分成 6 格，升降流区面积比  $A_p/A_r=1$ ；每格水力直径为 350 mm，好氧区高度与水力直径之比  $H/D=5.71$ ；气浮池高度为 600 mm。

根据反应器尺寸,当处理水量为 20 m<sup>3</sup>/d 时,各个反应区的水力停留时间分别为:好氧区 1.5 h,缺氧区 0.5 h,气浮分离器 22 min。反应器采用轻质橡胶颗粒作为悬浮流化的生物载体<sup>[3]</sup>,载体直径 2~3 mm,密度 1.1 kg/L,载体投加量为好氧反应区体积的 10%。

## 2 试验结果与分析

中试 HSBCR 建于北京清河污水处理厂,反应器的进水为经过格栅和初沉池的生活污水。不包括启动,整个反应器稳定运行 160 d,运行期间分为 4 个运行工况,每种工况连续运行 40 d。4 个工况好氧区的 HRT 分别为 1、1.5、2、2.5 h,相应缺氧区的 HRT 分别为 0.33、0.5、0.67、0.83 h。

反应器运行的时间跨度为从第一年的 10 月到第二年的 6 月,虽然时间跨度较长,还经历冬季运行,但是由于反应器位于室内,所以反应器内水温始终保持在 13~17 之间。

### 2.1 COD 去除效果分析

表 1 为反应器处理效果的汇总表,其中进水容积负荷  $N=QS_0/V$ ,去除容积负荷  $N_r=Q(S_0-S_e)/V$ ,式中, $Q$  为进水流量, $V$  为反应器反应区体积, $S_0$  和  $S_e$  分别为进、出水 COD 质量浓度。

表 1 反应器处理效果汇总表

工况				
好氧区 HRT/h	1.0	1.5	2.0	2.5
缺氧区 HRT/h	0.33	0.5	0.67	0.83
进水 COD/(mg/L)	446.37	424.49	405.98	354.64
出水 COD/(mg/L)	90.83	79.51	60.52	52.87
COD 去除率/%	78.32	79.26	85.09	84.70
进水 COD 容积负荷/(kg/m <sup>3</sup> ·d)	10.71	6.79	5.59	3.40
去除 COD 容积负荷/(kg/m <sup>3</sup> ·d)	8.53	5.52	4.79	2.90
进水 NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	52.90	53.02	53.53	49.41
出水 NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	37.69	33.81	29.56	22.08
NH <sub>3</sub> -N 去除率/%	28.47	35.83	45.08	55.72
进水 TN/(mg/L)	-	-	54.12	53.39
出水 TN/(mg/L)	-	-	30.03	26.50
TN 去除率/%	-	-	42.65	50.34
进水 TP/(mg/L)	-	-	6.51	5.92
出水 TP/(mg/L)	-	-	2.93	2.65
TP 去除率/%	-	-	54.60	53.82
气浮区 HRT/h	-	22	30	-
进水 SS/(mg/L)	-	581.06	740.96	-
出水 SS/(mg/L)	-	17.46	14.66	-
SS 去除率/%	-	97.00	98.01	-

从表 1 可以看出,在 HRT 较短时(HRT=1 h),反应器对 COD 的去除率就可以达到较高的要求,这反映了 HSBCR 反应器的高效性,即在较短的水力停留时间它的去除效率明显高于其它处理工艺。但是,由

于该反应器为完全混合型反应器<sup>[3]</sup>,因此,当 HRT 进一步延长,即当反应器中有机物质量浓度较低时,去除率增高的幅度不是很大。例如,欲使反应器出水 COD 质量浓度低于 60 mg/L,则需要把 HRT 延长到 2 h。这也从一个方面反应了该反应器作为完全混合型反应器的优势和不足:优势为可以在较短时间内去除大部分有机物,充分体现了它的高效率;不足之处是当作为最终处理设备,而且对出水要求较高时,反应器所表现出的高效率会大打折扣。

对于 COD 的去除效果而言,当反应器好氧区 HRT 为 1 h 时,出水 COD 质量浓度可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)的二级标准;当 HRT 为 2 h,出水 COD 质量浓度可以达到一级(B)排放标准。

对反应器的容积负荷而言,在 HRT 为 1 h 时,进水 COD 容积负荷的平均值为 10.71 kg/(m<sup>3</sup>·d),最大可以达到 15.71 kg/(m<sup>3</sup>·d);去除 COD 容积负荷的平均值为 8.53 kg/(m<sup>3</sup>·d),最大可以达到 13.30 kg/(m<sup>3</sup>·d)。

### 2.2 对 N 元素的去除效果分析

#### 2.2.1 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果

从表 1 的结果可以看出,HSBCR 去除 NH<sub>3</sub>-N 的效果不是很好,这可能有以下几方面的原因:(1)在整个试验过程中,污水的平均温度在 13~17 之间,水温已经满足了硝化反应的要求,但离最适温度还有一定距离。在同等其它反应条件下,升高温度有可能进一步提高反应器对 NH<sub>3</sub>-N 的处理效能。(2)试验过程中 HRT 从 1.0~2.5 h 之间变化,总体来说,HRT 还是偏短。并且从试验结果也可以看出,随着 HRT 的延长,NH<sub>3</sub>-N 的去除效果是呈上升趋势的。根据郑平等<sup>[7]</sup>人利用内循环三相生物流化床反应器处理高浓度含氮废水的研究<sup>[7]</sup>,当 HRT 为 6 h 时,氨去除率能够达到 85%以上,当 HRT 延长至 24 h,氨去除率可以达到 99.42%。由此可见,HRT 也可能是影响 HSBCR 反应器对 NH<sub>3</sub>-N 去除效果的一个制约因素。

对于 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果而言,当反应器好氧区 HRT 为 2.5 h 时,出水 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度才能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)的二级标准,即 NH<sub>3</sub>-N 出水质量浓度小于 25 mg/L。

#### 2.2.2 总氮去除效果

在 HSBCR 运行过程中,通过调节缺氧区气体提升管中气量的大小,可以调节好氧区水到缺氧区的回流比。在一体化好氧-缺氧 HSBCR 中,直接测定从好氧区到缺氧区的回流比存在一定困难,因此,在运行中通过测定好氧、缺氧区的溶解氧(DO)质量浓度和

对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总氮(TN)的去除效果来调节回流比的大小。为了维持缺氧区的 DO 质量浓度, 好氧区的 DO 质量浓度一般控制在 1.5~3 mg/L 之间, 因为好氧区 DO 过高, 将使缺氧区的 DO 难以控制。同时, 控制缺氧区 DO 质量浓度在 0.5 mg/L 以下。值得注意的是, 好氧区 DO 的控制有赖于轻质橡胶载体的采用, 使得 HSBCR 在较小的气水比(4:1) 范围内能实现完全流化, 并且保证好氧微生物的正常新陈代谢。

TN 的去除来源于两方面生物作用的结果: (1) 通过硝化-反硝化作用, 氮元素最终形成气态氮; (2) 由于微生物细胞生理需要而摄取氮元素, 如同化反硝化(合成), 最终形成有机氮化合物。

在好氧区 HRT 为 2 h 和 2.5 h 工况下,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率平均为 45.08% 和 55.72%, 可见反应器对 TN 的去除率与  $\text{NH}_3\text{-N}$  接近, 这是生物脱氮和同化反应共同作用的结果。由于微生物同化作用对氮的摄取是有限的, 因此, 为了提高 TN 去除率, 还需要进一步设法提高反应器的硝化效果。

### 2.3 对 P 元素的去除效果分析

在 HSBCR 中没有设置专门的厌氧环境进行生物除磷, 但是从反应器运行对 TP 的去除效果可以看到, 在反应器运行过程中对 TP 有大约 50% 的去除率(见表 1)。反应器对 TP 的去除应该是微生物新陈代谢和排泥共同作用的结果。

### 2.4 气浮装置 SS 的去除效果分析

一体式 HSBCR 气浮装置是与下部流化床主反应器偶合在一起的, 因此, 气浮装置的进水即为生物反应区的出水。根据对气浮装置运行参数的研究<sup>[9]</sup>, 选择在回流比 20%, 工作压力 0.3 MPa 条件下运行。气浮装置整个的运行周期分为两个阶段, 第一个运行阶段对应生物反应区 HRT 为 1.5 h, 此时气浮装置的 HRT 为 22 min; 第二个运行阶段对应生物反应区 HRT 为 2.0 h, 此时气浮装置的 HRT 为 30 min。

从表 1 的结果可以看出, 一体式 HSBCR 中气浮装置对 SS 有较高的去除效率, 能够使反应器出水 SS 控制在 20 mg/L 以内。

### 2.5 反应器同步化学除磷效果分析

HSBCR 进行同步化学除磷是在反应器正常运转的情况下, 在从生物流化反应区进入气浮分离区的污水中加入化学除磷剂进行同步化学除磷。

化学除磷剂的投加位置为三相分离器中气液共同上升的区域(溶气释放器上部), 在此区域气液混合物同时上升, 由于气泡向上从顶部溢出, 因此, 对混合液具有很好的搅动作用, 可以完成化学除磷剂和污水

的化学反应, 然后脱气的污水下降进入气浮分离区, 利用气浮分离对产生的化学沉淀物进行分离。化学除磷剂与污水的接触时间约 3~5 min, 能很好的完成化学反应。

根据 HSBCR 生物流化反应区出水, 即气浮分离区进水的含磷量确定金属盐的投加量。由于 Fe 盐和 Al 盐能在接近中性污水中获得较好的除磷效果, 因此选择 Fe 盐和 Al 盐作为化学除磷选择的药剂。

对于 Fe 盐和 Al 盐的最佳投药量, 笔者首先在实验室进行了烧杯试验。取准备进行化学除磷的污水, 在烧杯中投加 Fe 盐和 Al 盐, 以混凝试验的方法进行混合反应, 沉淀后测定上清液的含磷量。试验结果表明, 为了使除磷后出水中 TP 含量低于 1.0 mg/L, 去除每摩尔磷需投加 2.0 mol 的 Fe 盐; 或 2.5 mol 的 Al 盐。

表 2 为分别在反应器中投加 Fe 盐和 Al 盐, 然后进行气浮分离后对 TP 的去除效果。其中气浮装置在 HRT 为 22 min, 回流比 20%, 0.3 MPa 的工作压力下运行。

表 2 反应器同步化学除磷结果

化学除磷药剂	$\text{FeCl}_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
药剂投加量/(化学药剂中金属盐摩尔数/磷酸盐摩尔数)	2.1	3.1
气浮区进水 TP/(mg/L)	2.84	2.74
气浮区出水 TP/(mg/L)	0.88	0.84
TP 去除率/%	68.02	69.12

化学药剂费是整个化学除磷处理系统费用的主要组成部分, 与运行费用中包括的电耗、人工、维护以及污泥处理处置所增加的费用相比, 药剂费用所占比例最大。对于该化学除磷工艺, 进水 TP 平均含量 2.84 mg/L, 要求出水 TP 小于 1 mg/L 时, 则污水中  $\text{FeCl}_3$  投加量为 26 g/m<sup>3</sup>,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  投加量为 41 g/m<sup>3</sup>。若  $\text{FeCl}_3$  价格以 1200 元/t,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  以 2000 元/t 计, 则污水所需药剂费  $\text{FeCl}_3$  约为 0.03 元/m<sup>3</sup>,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  约为 0.08 元/m<sup>3</sup>。加上所增加的化学污泥处理处置和其他费用, 经粗略估计, 污水的运行费用约为 0.08~0.10 元/m<sup>3</sup>。

### 3 结论

(1) 一体化 HSBCR 好氧区分格结构的改进, 使得当反应器处理规模增大时, 在不提高反应器总体高度的基础上, 保证了循环流化区的高径比, 增加了大型反应器的整体强度, 有利于实现大型反应器的工业应用。在同一个 HSBCR 反应器中实现了好氧-缺氧反应的分区运行, 并且通过气体提升方式实现了好氧反应区向缺氧反应区液体的回流, 使反应器能够实现

脱氮和部分除磷的目的。

(2) 当反应器好氧区 HRT 为 1.0 h 时, 出水 COD 质量浓度可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 的二级标准; 当 HRT 为 2.0 h, 出水 COD 质量浓度可以达到一级 (B) 排放标准。在 HRT 为 1 h, 处理出水满足二级排放标准时, 反应器去除 COD 容积负荷的平均值为 8.53 kg/(m<sup>3</sup>·d), 最大可以达到 13.30 kg/(m<sup>3</sup>·d)。

(3) 在 HRT 从 1.0 h 到 2.5 h 范围内, 随着 HRT 延长, 反应器对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果上升。反应器好氧区 HRT 为 2.5 h 时, 出水 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 的二级标准, 即 NH<sub>3</sub>-N 出水质量浓度小于 25 mg/L。反应器对 TN 的去除效果表明, 反应器具有较好的反硝化效果。

(4) 反应器对 TP 有约 50% 的去除率, TP 的去除是微生物新陈代谢和排泥共同作用的结果。利用 HSBCR 进行反应器的同步化学除磷具有较好的运行效果, 在 Fe 盐与 TP 摩尔比为 2:1, Al 盐与 TP 摩尔比为 3:1 投加量的条件下, 可以使反应器出水 TP 低于 1.0 mg/L; 同步化学除磷增加的运行费用为 0.08 ~ 0.10 元/m<sup>3</sup> 污水。

(5) 一体式 HSBCR 中气浮装置对 SS 有较高的去除效率, 反应器出水 SS 可以有效控制在 20 mg/L 以内。

参考文献:

[1] 周平, 钱易. 空气提升内循环生物流化床反应器动力学研究[J]. 环境科学, 1996, 17 (6): 9- 12.  
 [2] 周平, 钱易. 内循环生物流化床处理生活污水的实验研究[J]. 给水排水, 1998, 24 (10): 28- 31.  
 [3] 张玉魁, 张砾, 施汉昌. 一种新型复合式生物流化反应器混合特性的研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 726- 732.  
 [4] Russell A B, Thomas C R, Lilly M D. The influence of vessel height and top- section size on the hydrodynamic characteristics of airlift fermentors [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 43: 69- 76.  
 [5] 卢刚, 郑平. 气升式内环流反应器流体力学特征探讨[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29 (2): 188- 194.  
 [6] 张玉魁, 施汉昌. 新型生物流化复合反应器的设计及气含率测定[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4 (7): 74- 78.  
 [7] 郑平, Pieme constant Anatole, 杜泽俊, 等. 气提式内循环生物反应器处理高浓度含氮废水的研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(1): 23- 27.  
 [8] 张玉魁, 施汉昌, 姜家顺, 曾亮. 生物流化反应器去除生活污水中的 SS[J]. 中国给水排水, 2004, 20 (8): 36- 39.

(上接第11页)

表 1 挂篮技术和经济指标比较

挂篮形式	斜拉桥挂篮		连续刚构悬臂挂篮		
	悬臂三角挂篮	前支点挂篮	三角形挂篮	菱形挂篮	弓形挂篮
应用工程名称	重庆云阳长江大桥	重庆大佛寺长江大桥	重庆石板坡长江大桥复线桥	重庆太平庄大桥	昆明白沙河大桥
完工时间	2005- 12	2002- 12	2006- 08	2004- 12	2006- 05
最大跨度/m	318	450	330	140	110
最大节段长度/m	6	8.1	5.5	4.5	5.015
最大节段重量/t	298	507	368.84	160	154.6
挂篮自重(含模板)/t	97	240	129.5	60	56
挂篮重 节段重	0.33	0.47	0.35	0.37	0.36
主承重结构材料	型钢、钢带	万能杆件	型钢	型钢	型钢+万能杆件
效果	挠度及各项指标均满足施工及规范要求, 无安全和质量问题				

4 结语

文中对重庆桥梁工程总公司使用过的几种挂篮形式进行了介绍, 结合工程实例简述了各自的特点, 供挂篮设计与施工人员进行参考, 以便在以后的桥梁施工中, 设计出更好的挂篮。

参考文献:

[1] 张天许, 杨寿忠, 朱光华, 等. 重庆石板坡长江大桥拓宽工程正桥主梁挂篮设计及施工[A]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会编. 第十七届全国桥梁学术会议论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2006.405- 410.

启事

本刊已被“中国期刊全文数据库”、“万方数据-数字化期刊群”、“中文科技期刊数据库”收录。读者若想了解本刊信息或获得1978年以来的过刊内容, 请登陆: SZJL.chinajournal.net.cn; www.cqvip.com 和 szjs.periodicals.net.cn 进行查询。