

文章编号: 1672-3031(2006)02-0123-05

高速水流冲刷仪的研制和混凝土冲磨机理的研究

田军涛, 姜福田

(中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100044)

摘要: 新冲刷仪能够模拟高速水流对混凝土的冲磨情况。本文介绍了新研制的高速水流冲刷仪的设计、组成和修改调试, 并使用其进行了高速含砂水流对混凝土的冲磨试验, 研究了不同配比混凝土在高速水流条件下的抗冲磨性能和规律。通过试验得出, 水流速度越高, 水流对混凝土的冲磨效果越明显; 骨料的硬度和耐磨性对混凝土的抗冲磨性能起明显的作用, 其中铁矿石骨料好于花岗岩骨料, 花岗岩骨料好于石灰岩骨料。试验还证明, 新冲刷仪能够有效地对不同强度等级以及不同骨料的高强抗冲磨混凝土的抗冲磨性能作出比较。

关键词: 高速水流; 冲刷仪; 抗冲磨; 混凝土

中图分类号: TV32

文献标识码: A

许多高坝在溢流面、泄洪道、消力池、护坦等部位均采用抗冲磨混凝土, 其安全耐久性直接影响到工程枢纽的安全运行, 抗冲磨部位混凝土的抗冲磨性能作为评价反映其安全耐久性的一个重要指标, 越来越受到高度重视。作者通过调研发现, 有些水利工程的受冲刷部位混凝土建成后不久就由于受高速水流的冲刷而磨损严重, 必须重新投入大量资金进行维修, 而对于大部分水利工程的受冲刷混凝土部位来说, 运行一定年限后也往往需要定期进行修补, 来保障工程的安全运行。因此, 研究提高抗冲磨混凝土抗磨性能, 延长其使用寿命, 具有非常重要的意义。目前, 我国建设的高坝越来越多, 水流流量大, 流速高, 流速能达到甚至超过 40m/s, 对泄水部位混凝土的抗冲磨性能的研究提出了更高的要求, 对于混凝土抗冲磨性能研究的逐步发展和提高, 需要研制冲刷速度和冲刷效果更好的冲刷仪器设备。文献[1]中的圆环法混凝土抗含砂水流冲刷试验方法制定并写入规范是在 1962 年, 目前看来水流速度明显偏低, 对一些强度较高的耐冲磨混凝土冲刷效果比较差, 冲磨量比较小, 效果对比不明显。本文研制的新高速水流冲刷仪, 通过提高水流流速来增大混凝土磨损量, 改善冲刷效果, 水流流速拟由原来的 14.3m/s 提高到 40.0m/s, 以更可能接近工程实际的水流流速。

1 混凝土冲刷仪设计

自 2001 年 9 月开始混凝土冲刷仪的调研和设计工作, 首先对葛州坝集团公司科学研究所、长江科学研究院和南京水利科学研究所进行调研。设计前查阅了大量的国外资料, 参考了美国垦务局方法、前苏联全苏水工科学研究所和化工研究院方法。混凝土冲刷仪经过设计方案比较, 仍采用圆环式冲刷仪方案。新的高速水流冲刷仪要达到的技术指标为: (1) 水流流速 20、30、40m/s (计算值), 可调; (2) 水流冲刷时间可调, 0~30min; (3) 设备运行稳定, 制冷冷却系统运转正常并可监控。

设计完成的新混凝土高速水流冲刷仪(以下简称本机)主要包括冲刷仪主机、电气控制系统、制冷冷却系统、排砂水箱、试件吊装装置、试件成型模具和称量仪器七部分。

1.1 主机 机座、主轴箱和冲刷试验箱三部分是主机的主要部件。调频变速电动机置于机座中央, 通过连接轴与主轴相接。混凝土试样为圆环形, 放置在试验箱内。主轴顶端与冲刷轮相连, 该冲刷轮在混凝土圆环试样环内。由一定比例的砂与水作为冲磨剂放入试样内环内。试验箱的上盖与试验箱是分开的, 试验时将上盖盖上, 用 8 个紧固卡栓紧固, 上盖内设置密封元件。试验时, 开启电动机, 冲刷轮转动,

收稿日期: 2005-12-25

作者简介: 田军涛(1971-), 男, 河北晋州人, 工程师, 主要从事水工材料方面的研究。E-mail: tianjt@iwhr.com

由离心力作用使含砂水流冲磨混凝土试样内环表面,从而磨损表面的混凝土。

试验结束,将试验箱上盖打开。混凝土试样顶面预埋 2 个起吊螺母,将吊环旋入,取出混凝土试样。试验箱底盘内设有排砂孔,将孔盖打开,砂水冲磨剂由此孔排入排砂水箱。

1 2 电气 制冷柜 电气 制冷柜包含了本机的电气控制系统和制冷控制系统。

含砂水流名义流速按下式计算

$$V = D_0 f \quad (1)$$

式中: V 为含砂水流名义流速, m s ; D_0 为冲刷轮直径, 0.29m ; f 为变频调速电动机转速, 转/秒。

本机设计流速为 $20\sim 40\text{m s}$, 任意给定, 转速调整由变频电动机和变频器实现。主机开关启动的同时计时器计时, 计时器量程 $0\sim 30\text{min}$, 由变频器调整主机变频电动机转速达到试验流速, 达到试验限定时间主机停机。冷冻机和冷却液水泵开关是单动的, 但主机开关启动, 这两个开关必须启动工作。主机开关设有锁紧装置, 以防误操作。变频电动机要求 10s 内达到设定转速。

含砂高速水流冲磨混凝土试样内环面将产生大量热量。为此, 在试验箱底盘和上盖内设置冷液腔, 冷液腔体积为 $300\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。冷液由制冷装置产生, 用水泵经水管送入底盘和上盖冷却腔内, 再送回冷液箱, 形成冷液循环系统。大部分热量通过循环冷液带走, 而冲刷腔温度设计控制在 40°C 以下。做冲刷试验时如不采取制冷措施, 预计冲刷箱内介质温度达到 80°C 以上。

1 3 排砂水箱 本箱分隔成砂箱和水箱两部分, 上部是联通的, 其作用是使砂粒泥浆沉淀过滤。

1 4 混凝土试件成型模具 混凝土试样制作由专门设计的试模浇制。试样内径 300mm , 试样外侧为锥形, 顶径 500mm , 底径 490mm , 试样高 100mm 。混凝土试模内模采用螺杆起重原理, 使脱模简便和省力。

1 5 试件吊装装置 由于试件重量和冲刷腔顶盖重量较重, 在冲刷仪主机上方特别安装了小型天车, 用于试验过程中的吊装。

1 6 称量仪器 冲刷前后试件的称量采用高精度电子秤(最大可称重 50kg , 最小测量分度值 0.5g)。

2 混凝土冲刷仪的调试及改进

2003 年 4 月混凝土冲刷仪运到试验室, 进行调试、改进和试验参数确定。

2 1 试模的改进 由于原设计试件脱模时混凝土与内模接触处有局部损伤, 故提出两个改进方案, 其一是将内模改为锥面(锥度 1%), 并加 1mm 厚橡胶隔膜; 其二是内模仍为直面, 但加 1mm 厚橡胶隔膜。经试验两个方案都是可行的, 脱模时对混凝土试件均无损伤。最后采用内模面为直面、加 1mm 厚橡胶隔膜方案。

2 2 冲刷轮的改进 调试中发现, 冲刷轮的齿型及在试验箱内与试件的相对位置对混凝土试件冲磨面的均匀性有很大影响。对冲刷轮齿型进行了直齿齿轮、斜齿齿轮、斜齿齿轮开槽等几种形式的试验, 最后选定斜齿齿轮开槽形式的冲刷轮。改进后, 磨损面情况明显改善。

2 3 试验介质 冲磨剂为冲磨质和水的混合物, 冲磨质选用金刚砂、刚玉、新标准石英砂和旧标准石英砂四种材料进行了比较试验, 最终确定选用金刚砂, 其粒度级配为 12 、 24 和 40 目各占 $1/3$ 。

2 4 试验误差分析 共进行二批试验。第一批共计进行 10 组试验, 除一组试件由于机械故障误差偏大外, 其他组不同抗压强度混凝土试件每组单个试件累计冲磨量与平均值的误差均不超过 15% 。第二批试验的最大正负试验误差分别为 7.3% 和 -8.7% , 表明本冲刷仪测试结果是稳定的。

3 抗冲磨机理的研究

使用本文研制的冲刷仪模拟高速含砂水流对混凝土表面的冲刷情况, 内容包括: 不同流速对混凝土的冲磨效果比较, 流速分别为 20 、 30 和 40m s ; 40m s 流速下, 不同强度等级的混凝土抗冲磨性能比较; 40m s 流速下, 不同骨料的混凝土抗冲磨性能比较。

3 1 试验中使用的原材料 水泥采用黎塘 42.5 普通硅酸盐水泥。粉煤灰为凯里二级灰粉煤灰。细骨

料为龙滩人工砂、小湾人工砂、三峡人工砂。粗骨料为龙滩人工中石、小石；小湾人工中石、小石；三峡人工中石、小石；芜湖铁矿中石、小石。外加剂为抗冲磨添加剂。

3 2 不同流速对混凝土的冲磨效果比较 不同流速冲刷对比试验的水流流速分别为 20、30 和 40m/s。试验试件采用的是龙滩石灰岩骨料，其配合比见表 1。冲磨时的试验条件是加水量 2 200mL、加砂量 244g。不同流速对混凝土的冲磨效果对比见表 2。

表 1 混凝土配合比及力学参数

编号	水胶比	胶材总量	砂率 (%)	粉煤灰掺量 (%)	HF 掺量 (%)	混凝土原材料用量 (kg m ⁻³)						坍落度 cm	
						水泥	水	粉煤灰	HF	砂	小石		中石
LT360	0.30	360	34	15	2.2	360	108	54	7.92	661.1	536.9	805.4	6.8

表 2 不同流速对混凝土的冲磨效果对比

编号	28d 抗压强度 MPa	流速 (m/s)	1h 平均累计冲磨量 g	磨损率 (g h ⁻¹ cm ⁻²)
LT360	63.7	20	29.8	0.032
LT360	63.7	30	97.5	0.104
LT360	63.7	40	227.8	0.243

从表 2 可以很明显看出，流速越高，冲磨量越大，磨损率越大，冲磨效果越好。冲磨量和磨损率的增大，在理论上讲可以比较明显地对比出不同配比混凝土的抗冲磨性能，因此，选用高流速更适用于抗冲磨性能比较高的混凝土抗冲磨性能对比试验。

3 3 不同强度等级的混凝土抗冲磨性能比较 为研究不同强度等级的混凝土抗冲磨性能，成型了一系列不同胶材用量的混凝土抗冲磨圆环试件，胶材采用黎塘 42.5 普通硅酸盐水泥和凯里粉煤灰，骨料采用龙滩石灰岩骨料，混凝土配合比见表 3。冲磨时的试验条件是加水量 2500mL、加砂量 278g。不同强度等级混凝土抗冲磨试验结果见表 4。

表 3 不同强度等级抗冲磨混凝土配合比

编号	水胶比	胶材总量	砂率 (%)	粉煤灰掺量 (%)	HF 掺量 (%)	混凝土原材料用量 (kg m ⁻³)						坍落度 cm	
						水泥	水	粉煤灰	HF	砂	小石		中石
LT400	0.273	400	33	15	2.2	340	109	60	8.80	661.1	536.9	805.4	6.1
LT360	0.300	360	34	15	2.2	306	108	54	7.92	714.3	530.6	796.0	6.8
LT320	0.328	320	36	15	2.2	272	105	48	7.04	750.3	533.5	800.3	7.0
LT280	0.375	280	36	20	2.2	224	105	56	6.16	761.6	541.6	812.3	4.4
LT240	0.438	240	37	20	2.2	192	105	48	5.28	795.9	542.1	813.1	5.2

混凝土的抗冲磨性能应该是水泥浆体硬化后的水泥石和骨料的抗冲磨性能相结合的综合表现。从表 4 可以看出，在配合比范围内随着水泥用量的增加，混凝土抗压强度逐步提高，但是混凝土的抗冲磨性能变化并不很规律。水泥用量从 400kg 降低到 280kg 时，抗冲磨性能随抗压强度的下降出现一个比较规律的下降趋势；水泥用量从 320kg 降低到 240kg，抗压强度从 61.8MPa 降到 39.2MPa，抗冲磨强度变化很小，说明骨料的抗冲磨作用起主要作用。事实上，由于骨料占据了冲磨界面的绝大多数面积，因此其抗冲磨作用理应是关键因素，试验结果也很好证明了这一点。

表 4 不同强度等级混凝土抗冲磨试验结果

编号	28d 抗压强度 MPa	平均累计磨损量 g	磨损率 (g h ⁻¹ cm ⁻²)	抗冲磨强度 (h cm ² g ⁻¹)
LT400	68.7	378.3	0.402	2.49
LT360	66.5	415.9	0.442	2.26
LT320	61.8	429.3	0.456	2.19
LT280	49.6	459.3	0.488	2.05
LT240	39.2	451.0	0.479	2.09

3 4 不同骨料的混凝土抗冲磨性能比较 由于各地所能采集到的骨料不同，因而不同的工程使用骨料各不相同，不同骨料的耐磨性能也存在差异。本文使用龙滩工程、三峡工程、小湾工程的原材料骨料和

铁矿石骨料成型 8 个配比, 对比不同骨料混凝土的抗冲耐磨性能。混凝土配合比见表 5, 各配比都采用黎塘 42.5 普通硅酸盐水泥和凯里粉煤灰。LT360、LT240 使用龙滩工程骨料, SAN360、SAN240 使用三峡工程骨料, XIAO360、XIAO240 使用小湾工程骨料, FE360、FE240 使用小湾砂、铁矿石粗骨料。不同骨料的混凝土抗冲磨试验结果见表 6。

表 5 不同骨料的混凝土配合比

编号	水胶比	胶材总量	砂率 (%)	粉煤灰掺量 (%)	HF 掺量 (%)	混凝土原材料用量 (kg m ³)						坍落度 cm	
						水泥	水	粉煤灰	HF	砂	小石		中石
LT360	0.300	360	34	15	2.2	306	108	54	7.92	714.3	530.6	796.0	6.8
LT240	0.438	240	37	20	2.2	192	105	48	5.28	795.9	542.1	813.1	5.2
SAN360	0.311	360	34	15	2.2	306	112	54	7.92	691.7	537.1	805.7	3.0
SAN240	0.454	240	37	20	2.2	192	109	48	5.28	792.9	540.0	810.0	1.0
XIAO360	0.311	360	32	15	2.2	306	112	54	7.92	649.2	551.8	827.2	0.7
XIAO240	0.463	240	35	20	2.2	192	111	48	5.28	746.5	554.5	831.8	0.0
FE360	0.311	360	34	15	2.2	306	112	54	7.92	691.7	763.4	1174.5	0.2
FE240	0.458	240	37	20	2.2	192	110	48	5.28	792.9	767.5	1180.9	0.0

表 6 不同骨料的混凝土抗冲磨试验结果

	28d 抗压强度 MPa	平均累计磨损量 g	磨损率 (g h ⁻¹ cm ⁻²)	抗冲磨强度 (h cm ² g ⁻¹)
LT360	66.5	415.9	0.442	2.26
LT240	39.2	451.0	0.479	2.09
SAN360	65.6	98.0	0.104	9.61
SAN240	43.1	112.3	0.119	8.39
XIAO360	72.1	95.2	0.101	9.89
XIAO240	49.2	116.2	0.123	8.11
FE360	75.6	89.0	0.094	10.60
FE240	44.5	100.2	0.106	9.40

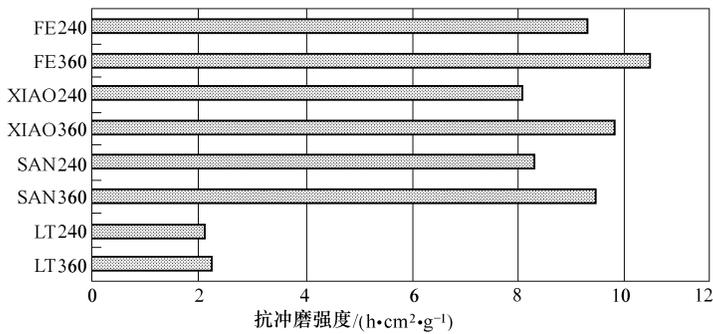


图 1 不同骨料的混凝土抗冲磨强度对比

从表 6 可以看出, 不同的骨料抗冲磨性能不同。石灰岩的龙滩工程骨料抗冲磨强度最低; 花岗岩的三峡工程骨料和小湾工程骨料抗冲磨性能相近, 明显好于龙滩工程骨料; 铁矿石骨料的抗冲磨性能最好。由此可以得出, 骨料的品质对混凝土的抗冲磨性能起到比较明显的作用。

由表 6 中的各组试件的平均累计磨损量可以看出, 新的高速水流冲刷仪对不同混凝土的冲磨效果是很明显的, 可以有效地对比出不同强度等级以及不同骨料的混凝土的抗冲磨性能。在表 6 中还可以看出, 相同骨料下 360kg 水泥用量混凝土的抗冲磨性能要好于 240kg 水泥用量混凝土, 其抗冲磨强度高出 10% ~ 20%。

不同骨料的混凝土抗冲磨强度对比可以直观的在图 1 中看到。

4 结论

本文研制的高速水流冲刷仪由冲刷仪主机、电气控制系统、制冷冷却系统、排砂水箱、试件吊装装置、试件成型模具和称量仪器 7 部分组成, 试验最大水流流速达到 40m/s。在高速水流冲刷仪的研制过程中解决了以下几个问题: (1) 高速含砂水流摩擦产生大量的热, 新研制的高速水流冲刷仪采用上、下两套冷却系统, 有效地降低了冲刷腔内的温度, 经多次试验后测定水温在 40℃ 左右。另外, 本套装置安装了温度显示器, 可对制冷冷却系统中的冷却液温度进行监控; (2) 为达到调节流速的目的, 在电气系统中增加了变频器, 使用变频电机, 通过调节供电频率改变转速和流速, 同时安装显示仪表, 显示相应参数; (3) 在控制系统中增加电子计时器实现试验时间的准确可控; (4) 混凝土试件尺寸变大, 可以直接湿筛二级配成型, 有效冲磨面积增大, 在高流速冲刷情况下对比冲磨效果更明显。

使用新研制的高速水流冲刷仪对三峡、小湾、龙滩工程原材料和铁矿石骨料进行了冲刷试验。通过试验得出: (1) 不同的水流速度对混凝土试件的冲磨效果不同, 水流速度越高冲磨效果越好; (2) 不同骨料抗冲磨性能大不相同, 骨料的硬度和耐磨性对混凝土的抗冲磨性能起了比较明显的作用, 铁矿石骨料好于花岗岩骨料, 花岗岩骨料好于石灰岩骨料。

新研制的高速水流冲刷仪经试验证明, 对高强度(大于 40MPa)的抗冲磨混凝土有较好的冲磨效果, 能够有效地对不同强度等级以及不同骨料的高强抗冲磨混凝土的抗冲磨性能作出比较。因此在即将出版的新修订的《水工混凝土试验规程》中, 已准备将其作为混凝土抗冲磨试验(圆环法)的试验设备列入。

通过试验也发现设备零部件磨损情况较想象中严重, 需要在进一步的研究中加以改进。

参 考 文 献:

- [1] DL T5150- 2001, 水工混凝土试验规程[S].

Development of abrasion resistance apparatus against high speed flow and study of abrasion resistance mechanism

TIAN Jun_tao, JIANG Fu_tian

(Department of Structures and Materials, IWHR, Beijing 100038, China)

Abstract: Development of a new abrasion resistance apparatus which can be used to simulate abrasion performance of concrete against high speed flow is introduced in this paper. Design, composition and adjustment of the new apparatus are presented. A series of simulation tests of concrete under high speed flow containing sand or emery were conducted by using the new apparatus. Some rules of abrasion resistance mechanism of different mix proportion concrete against high speed flow were found out. The higher is the flow velocity, the more is the abrasion of concrete. Abrasion resistance performance of different aggregate concrete is quite different. The rigidity and abrasion resistance of aggregate have important effects on the abrasion resistance of concrete. As far as abrasion resistance is concerned, ironstone concrete is better than granite concrete while granite concrete is better than limestone concrete. It is testified that the new abrasion resistance apparatus can be applied to effectively distinguish abrasion resistance performance of concrete with different strength grade and different aggregate.

Key words: high speed flow; abrasion resistance apparatus; abrasion resistance performance; concrete

(责任编辑:王冰伟)