

四大家鱼幼鱼响应模拟水轮机流道压力变化研究

王煜¹, 翟振男², 杨路通³, 石小涛¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002;

3. 贵州水投水务集团有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要:研究鱼类对反击式水轮机流道内压力突变的响应,为水电站水轮机的结构优化和生态运行提供技术支撑。实验鱼为四大家鱼 1 龄幼鱼,体长(100±10) mm、体宽(6±2) mm,鱼体健康、鱼鳞完整;实验装置由变频真空泵、高压舱、压力表、连接气管、高速摄像机组成。对四大家鱼幼鱼分别进行负压承受实验(预设压力值分别为 80、60、40、20 kPa)、循环负压承受实验(预设压力值分别为 80、60、40、20 kPa)和压力梯度承受实验(预设压力值分别为 40、20 kPa),测试鱼的行为状态和损伤状况;实验结束后,实验鱼被分别移入暂养水槽暂养,并观察记录其实验后 1、4 和 12 h 的自愈状态;最后解剖实验鱼,观察和记录其脏器损伤状态。结果表明:(1)四大家鱼幼鱼对水体中的压力陡降具有较强的敏感性,出现损伤主要发生在第 1 次压力陡降过程,损伤程度与最小压力值及压力变化梯度成正比,负压循环次数的增加不会增加家鱼幼鱼受压力损伤的程度和死亡率;(2)压力最低值和压力梯度是家鱼幼鱼通过水轮机流道下行受到压力损伤的主要原因,随着压力最低值的降低和压力梯度的增大,家鱼幼鱼损伤的程度和死亡率上升;(3)生活在河流中底层的青鱼和草鱼对负压和压力梯度较生活在河流中上层鲢和鳙具有更好的耐受性,在进入水轮机流道前鱼类适应压力状态与鱼体通过水轮机受到压力损伤具有一定的相关性;(4)四大家鱼幼鱼受到压力损伤的阈值为 20 kPa,当压力值小于或等于损伤阈值,家鱼幼鱼受到压力损伤。

关键词:四大家鱼;水轮机流道;压力变化;行为状态;损伤状态

中图分类号:TV136+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)02-0086-08

建设大坝或水闸影响了天然河流的连通性,对河流中有洄游需求的鱼类造成了不利影响。为满足鱼类完成生命史中的洄游需求,国内外众多学者进行了鱼类过坝设施和通道的研究,但对于鱼类下行过坝措施的研究较少,仅局限于溢流道、表面旁道等设施,这些设施不但增加了运行费用且过鱼效率较低。有大量的鱼通过或被误吸入水电站水轮机流道下行(Cada & Francfort, 1995),由于水轮机复杂的流道结构及水动力特性,鱼类通过其下行可能受到严重损伤甚至死亡(Sale et al, 1991)。为协调水利发展和鱼类资源保护关系,有必要优化水轮机流道结构及水动力特性,帮助鱼类安全下行。

减小鱼类损伤概率的鱼类友好型水轮机设计和

运行,首先需要明确传统水轮机流道对过机鱼体的损伤机理。反击式水轮机由于流道结构的复杂性和水流能量的转换,流道内复杂的压力空间分布特性是造成通过其下行的鱼受到水动力损伤的主要原因之一(Odeh, 1999)。鱼类可通过调节鳔内的气体量来适应遭遇的压力变化,然而当压力变化过快时,即使是管鳔型鱼也很难在短时间内排出鳔内的气体,造成鳔破裂损伤,甚至死亡。反击式水轮机转轮入口至出口存在较大的能量差和压力差,使随水流进入该区域的鱼遭受压力损伤。为明确鱼类对水轮机流道内压力变化特性的响应关系,国内外学者做了大量的实验研究。Foye & Scott(1965)将 6 种鱼(美洲黑狗鱼,黄鲈,小眼须雅罗鱼,鳊,湖鳊和大西洋鲑)放入高压舱测定不同种鱼对压力变化的响应。Feathers & Knable(1983)对大嘴黑鲈进行了压力变化的响应实验,结果表明相对较小的压力突降对闭鳔类鱼都会造成损伤。Turnpenny 等(1992)研究认为,低水头潮汐式水轮机流道持续压力降低,闭鳔鱼类鳔会破裂;管鳔类鱼承受迅速较大的压力降低时也会引起鳔破裂。Cada 等(1997)通过对不同种类的鱼进行一系列压力值测试,得出以下结论:(1)

收稿日期:2019-11-13

基金项目:国家自然科学基金(51409151);国家自然科学基金青年基金(51809150)。

作者简介:王煜,1976 年生,女,教授,博士,主要从事水轮机过鱼及水利工程对水生物资源影响研究。E-mail: wangyuhoney@163.com

通信作者:石小涛,男,教授,博士。E-mail: sxtshanghai@163.com

水轮机流道内压力的增加不可能引起鱼类的损伤或死亡,较高的压力值可能增加鱼类的敏感性(敏感性可通过实验后的暂养修复);(2)压力降低更可能伤害鱼类的鳃,损伤程度与压力梯度相关;(3)建议水轮机流道的最低压力不小于鱼类适应压力的60%。邵奇等(2002)发现降压可对草鱼造成损伤,但增压却不会。从这些研究结论可见水轮机流道内压力上升不会对流道内鱼类造成损伤,然而流道内负压和压力降低可能对鱼类造成损伤,甚至致命。

国外学者实验都是针对生活在欧美河流上的鱼种进行的,研究结果不一定适合生活在我国水域内的鱼,需要针对我国特有鱼类进行水轮机流道压力适应性研究,以帮助鱼类通过水轮机流道安全下行。四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢、鳙)是我国重要的淡水经济鱼,其数量占长江淡水鱼总量的70%以上(刘绍平等,2004)。鲢主要生活在江河水体的表层,鳙栖息在中、表层,草鱼栖息在中底层,青鱼栖息于底层。四大家鱼属于江湖半洄游性鱼类,在湖中育肥,在长江中上游产卵。近些年,由于水利工程的建设与运行导致四大家鱼的资源量锐减。为有效保护四大家鱼资源,减小其在江湖洄游过程中被误吸入水轮机流道遭受严重损伤的概率,需明确家鱼幼鱼对水轮机流道水动力特性的响应关系。本文采用高压舱模拟水轮机流道压力变化过程,测试四大家鱼对其的响应关系,得出四大家鱼幼鱼通过水轮机流道可能受到压力损伤的阈值,为水电站进行降低鱼类损伤概率的水轮机结构优化和生态运行提供支撑。

1 材料与方 法

1.1 实验鱼

实验鱼为四大家鱼1龄幼鱼,体长(100±10)mm、体宽(6±2)mm,鱼体健康、鱼鳞完整,全部来自于湖北省宜昌市宜都某渔场。实验前,实验鱼被放入体积为236L的水槽中暂养至少3d,暂养过程中水槽频繁增氧,水温维持在室温(20℃左右),水质达标,确保实验鱼实验前能保持正常进食和健康的运动状态。为提高实验结果的可靠性,每尾鱼仅进行1次实验。

1.2 实验装置

Deng等(2007)通过将传感器置于轴流转浆式水轮机流道,测得了沿水电站进水口至出口的沿程压力变化过程(图1),且计算出鱼通过径流式水电站轴流转浆式水轮机流道的时间大约为40s;流道中压力沿程变化过程大致为:自水电站进水口至水

轮机转轮进水,压力逐渐上升,到水轮机转轮进口处达到最大值(约370kPa),然后呈陡崖式下降至转轮出口处达到最小值(约60kPa),压力最大值变化至压力最小值的时间小于10s,形成极大的压力梯度,随后在尾水管区域压力逐渐回升,然后又逐渐减小为尾水管出口压力。

根据国外学者的研究成果,鱼类在水轮机流道内遭受压力损伤的机理主要是压力的降低和压力梯度,故本实验主要模拟水轮机转轮区域及尾水管区域的压力降低及压力变化过程对四大家鱼幼鱼的影响。实验装置由变频真空泵、高压舱、压力表、连接气管、高速摄像机组成。真空泵采用1500W-50L型可变速型真空泵,吸气速率最大可达300L/min,通过气管抽取密封高压舱气体来降低舱内压力,模拟水轮机流道沿程压力变化过程;高压舱(图2)由亚克力材料制成,具有很好的承压及透明性,可在实验过程中详细观察舱内实验鱼对压力变化的行为响应和体表损伤;高速摄像机同步记录实验鱼行为状态和损伤状态。

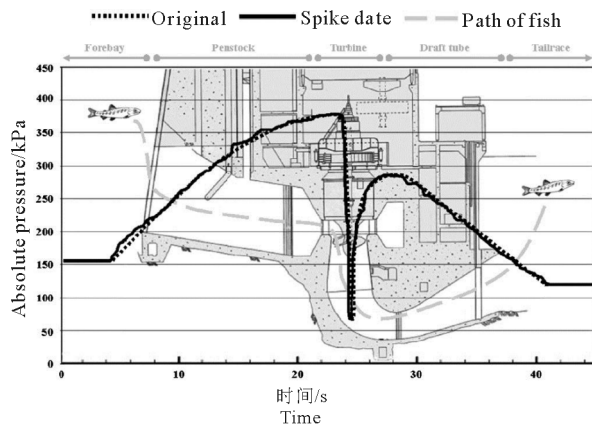


图1 轴流转浆式水轮机流道压力沿程变化

Fig.1 Pressure variation along the Kaplan turbine passage



图2 亚克力高压舱

Fig.2 Acrylic pressure chamber

1.3 实验方案

为模拟水轮机转轮区域压力的陡降及尾水管区

域压力的增减变化过程对四大家鱼幼鱼的影响,本实验分别对四大家鱼幼鱼进行负压承受实验、循环负压承受实验和压力梯度承受实验。高压舱内水深为200 mm,实验前舱内压力为大气压;每次实验采用1尾实验鱼,同一个实验方案对一种家鱼幼鱼的10尾幼鱼重复进行。实验结束后,实验鱼被分别移入暂养水槽进行暂养,并观察记录其实验后1、4和12 h的自愈状态;最后解剖实验鱼,观察和记录其脏器损伤状态。

1.3.1 负压承受实验 主要测试四大家鱼幼鱼在承受水轮机流道最低负压环境时的行为状态和损伤状况,确定四大家鱼幼鱼能够承受的负压阈值。实验鱼放入高压舱,适应10 min后关闭舱盖;开启连接在舱体上气管阀门,启动真空泵,抽取高压舱气体降压,抽气速率为3 L/min;同时观察高压舱盖顶部的压力表,待舱内压力降低至预设压力值时真空泵停止运行,稳定舱内压力;若30 min内鱼体出现失衡状态,记录最低压力持续时间,然后缓慢回升舱内压力,或者最低压力持续30 min后缓慢回升舱内压力,至大气压,实验结束。高清摄像头同步记录整个实验过程舱内实验鱼的行为状态和损伤状态,并存储数据。根据水轮机流道可能出现的最低压力值,实验预设压力值分别为80、60、40、20 kPa,每组压力值分别对4种家鱼幼鱼的10尾实验鱼进行。

1.3.2 循环负压承受实验 模拟尾水管压力增减变化过程对四大家鱼幼鱼的影响,负压循环最大次数为50次。实验鱼放入高压舱,适应10 min后关闭舱盖;开启连接在舱体上气管阀门,启动真空泵,抽取高压舱气体降压,抽气速率为3 L/min;同时观察高压舱盖顶部的压力表,待舱内压力降低至预设低压值,随后缓慢恢复至大气压,然后再次降压至预设低压值,再恢复至大气压,再降压,恢复至大气压,使舱内压力在大气压和预设低压值之间交替变化,直至舱内实验鱼出现平衡丧失状态,实验结束。预设低压值分别设定为80、60、40、20 kPa,每组预设低压值分别对4种家鱼幼鱼的10尾实验鱼进行。

1.3.3 压力梯度承受实验 模拟水轮机转轮区域出现的压力陡降对四大家鱼幼鱼的影响。实验鱼放入高压舱,在舱内适应10 min后关闭舱盖;开启连接在舱体上的气管阀门,启动真空泵,分别以预设的运转速率抽取高压舱气体,使舱内压力以不同的速率降低,直至舱内压力为预设低压值,随后增压至大气压,实验结束。预设真空泵运转速率分别为300、150、3 L/min,预设低压值分别为40、20 kPa,每组

实验分别对4种家鱼幼鱼的10尾实验鱼进行。

1.4 实验鱼行为及损伤状态描述

为详细描述实验过程中实验鱼的行为响应状态和损伤状态,本文以实验过程中实验鱼的行为响应状态、体表损伤状态和实验后暂养的自愈状态、脏器损伤状态来分别描述实验鱼对高压舱内压力变化过程的响应状态,并以字母符号表示。行为响应状态是与非实验同龄健康鱼的正常行为状态相比较得出的相对值。具体描述如下:

(1)行为响应状态:较非实验鱼行为状态无差异(A),游泳速度加快(B),嘴吐气泡(C),鱼鳃张合频率加快(D),身体倾斜(E),身体翻转(F),鱼体下沉(G);

(2)损伤状态:体表无明显损伤(H),眼睛鼓胀(I),鱼鳃扩张(J),鳃盖不能完全闭合(K),鱼鳃充血(L),体表出血(M),死亡(N);

(3)自愈状态:眼睛鼓胀痊愈(O),鱼鳃扩张痊愈(P),身体失衡痊愈(R),行为反应十分敏感(S),正常行为健康状态(T);

(4)脏器损伤状态:无脏器损伤(U),鱼鳃扩张(V),鱼鳃破裂(W)。

2 结果与分析

2.1 负压承受实验

在分别承受不同最低负压值的负压承受实验中,4种家鱼幼鱼出现相同的行为反应为:(1)高压舱开始减压时,舱内的实验鱼都表现出了受惊吓、嘴吐气泡的状态;(2)随着舱内压力的逐渐降低,实验鱼游泳速度加快,摆尾频率增加;(3)当舱内压力降低至预设低压值并维持时,实验鱼逐渐恢复平静;(4)随着高压舱内维持预设负压值时间的延长,舱内实验鱼游泳速度又逐渐加快;(5)当高压舱内的压力从负压恢复至大气压时,大多数实验鱼都出现了身体平衡丧失的行为状态和鱼鳃充血的损伤状态,不同个体间也表现出略微的差异。实验鱼被移出高压舱到水槽暂养时,部分实验鱼出现了下沉的状态。每种实验鱼中最强烈的行为状态和最明显的损伤状态记录见表1,实验过程中及实验后的暂养观察期发现损伤及死亡数统计见表2。

实验表明,栖息于河流中底层的青鱼和草鱼对负压的承受能力较生活于表层的鳊和鲢强,在相同的最低预设负压值下受到的损伤更小,死亡率更低。当负压最低值 <80 kPa时,鳊和鲢受到损伤,且随着预设负压最低值的降低损伤程度加深、死亡率增

表1 四大家鱼幼鱼承受负压实验结果

Tab.1 Tolerance of the four major Chinese carps to low pressure conditions

种类	最低压力值/ kPa	最低压力持续 时间/min	实验中行为及 损伤状态	实验后暂养 1 h 状态	实验后暂养 4 h 状态	实验后暂养 12 h 状态	解剖 观察
青鱼	80	30	A, H	S	T	T	U
	60	30	I	O, S	S	T	U
	40	30	B, C, I	O, S	S	T	U
	20	30	B, C, I, J, E	O, P, R, S	S	S	U
草鱼	80	30	A, H	S	T	T	U
	60	30	I	O, S	S	T	U
	40	30	B, C, I	O, S	S	T	U
	20	30	B, C, I, J, E	O, P, R, S	S	S	U
鳊	80	30	A, H	S	S	T	U
	60	30	I, J	O, P, S	S	S	U
	40	30	I, J	I, P, S	J, S	S	U
	20	24	B, D, E, F, G, I, J, K, N	D, E, I, J, R, S, N	D, E, I, P, R, S, N	O, P, R, S, N	W
鲢	80	30	A, H	S	S	T	U
	60	30	I, J	O, S	S	T	U
	40	30	B, D, I, J, E, F, G, N	D, I, J, K, R, G, S	O, S	P, S	V
	20	20	B, D, I, J, E, F, G, N	D, I, J, K, R, G, S, N	O, S	P, S	W

表2 四大家鱼幼鱼承受负压实验损伤统计 尾

Tab.2 Injuries to the four major Chinese carps resulting from exposure to different low pressure conditions

最小负压 值/kPa	青鱼		草鱼		鳊		鲢	
	损伤	死亡	损伤	死亡	损伤	死亡	损伤	死亡
80	0	0	0	0	1	0	1	0
60	0	0	0	0	2	0	2	0
40	0	0	0	0	3	0	3	1
20	4	0	4	0	7	4	9	7

加。当预设最低压力值 >40 kPa 时,受到损伤的家鱼幼鱼可在实验后的暂养过程中自我修复痊愈。预设最低压力值 <40 kPa 时,4 种家鱼幼鱼都受到较为严重的损伤,且在实验后的暂养过程中不能完全自我修复痊愈,损伤类型主要包括鱼鳃扩张等。

2.2 循环负压承受实验

4 种家鱼幼鱼分别承受循环负压实验过程中,不同鱼种表现出的行为响应状态和受到的损伤略有不同。在最低负压与大气压交替变化过程中,高压舱内 4 种实验鱼都出现了游泳速度加快、实验结束时身体失去平衡的现象。承受循环负压实验过程中,实验鱼身体失去平衡大多数发生在第 1 次预设最低负压值恢复至大气压的过程中。预设负压值 <40 kPa 时,第 1 次恢复至大气压的过程中,鲢幼鱼出现了严重的身体失衡现象,甚至死亡,部分未死亡的实验鱼在实验后暂养 1 h 内身体失衡现象可自我修复痊愈。随着预设最低负压值与大气压的交替出现,没有发现青鱼和草鱼有鱼体翻转和下沉现象。

每种家鱼幼鱼承受循环负压实验的行为响应状态及损伤情况详见表 3 和表 4。

根据 4 种家鱼幼鱼分别承受循环负压实验结果,青鱼和草鱼较鳊和鲢对循环负压具有较好的耐受性。青鱼和草鱼幼鱼在承受预设最低压力值为 20 kPa 的循环负压实验后表现出极强的行为敏感性,这可能会降低其躲避敌害的能力和增加被捕食者捕食的概率。4 种家鱼幼鱼在高压舱内压第 1 次从预设最低压力值恢复至大气压的过程中遭受损伤,且损伤程度不随负压循环次数的增加而加重,故最低负压值循环交替出现次数与四大家鱼幼鱼损伤程度没有明显的相关性。

2.3 压力梯度承受实验

4 种家鱼幼鱼承受压力梯度实验时表现出一定的共性和差异性,具体表现为:

抽气速率为 3 L/min、高压舱降压至 20 kPa 时,鲢和鳊幼鱼出现轻微眼睛鼓胀、鱼鳃扩张及身体失衡;损伤在暂养过程中迅速自我修复痊愈。草鱼和青鱼没有出现明显的行为异常和损伤。

抽气速率为 150 L/min、高压舱降压至 20 kPa 时,鲢和鳊幼鱼出现严重的眼睛鼓胀、鱼鳃扩张和身体失衡,鲢幼鱼有死亡;损伤在暂养过程中缓慢修复自愈。草鱼和青鱼也分别出现了轻微的身体失衡和眼睛鼓胀状态,但在实验后的暂养过程中迅速修复自愈。

表3 循环负压承受实验结果

Tab.3 Results of repeated exposure to low pressure

种类	最低压力值/kPa	循环次数	实验中行为及损伤状态	实验后暂养1 h 状态	实验后暂养4 h 状态	实验后暂养12 h 状态	解剖观察
青鱼	80	50	A, H	S	T	T	U
	60	50	I	O, S	S	T	U
	40	50	B, C, I	O, S	S	T	U
	20	50	B, C, E, I, J	O, P, S	S	S	U
草鱼	80	50	A, H	S	T	T	U
	60	50	I	O, S	S	T	U
	40	50	B, C, I	O, S	S	T	U
	20	50	B, C, E, I, J	O, P, S	S	S	U
鳊	80	50	A, H	S	S	T	U
	60	50	I, J	O, P, S	S	S	U
	40	50	I, J	I, J, S	O, J, S	P, S	U
	20	50	B, D, E, F, G, I, J, K, N	D, E, I, J, S, N	D, E, I, P, S, N	O, R, S, N	W
鲢	80	50	A, H	S	S	T	U
	60	50	I, J	O, J, S	S	T	U
	40	50	B, D, E, F, G, I, J, N	D, I, J, K, G, S	O, J, K, R, S	P, S	V
	20	50	B, D, E, F, G, I, J, N	D, G, I, J, K, S, N	O, J, R, S	P, S	W

表4 循环负压承受实验损伤情况统计

Tab.4 Injuries to the four major Chinese carps resulting from repeated exposure to low pressure conditions

最低压力值/kPa	青鱼		草鱼		鳊		鲢	
	损伤	死亡	损伤	死亡	损伤	死亡	损伤	死亡
80	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	2	0	2	0
40	0	0	0	0	3	0	3	1
20	4	0	5	0	8	4	3	7

抽气速率为 300 L/min、高压舱抽气降压至 20 kPa 时, 鲢和鳊受到了严重的损伤, 包括眼睛肿胀、鱼鳃扩张、身体失衡、体表出血, 均有死亡; 除身体失衡外其他损伤在暂养过程中难以自我修复痊愈, 数小时内死亡, 经解剖观察, 发现了鳃破裂现象。

草鱼和青鱼仅出现了轻微损伤, 主要包括身体失衡和眼睛肿胀, 且损伤在暂养过程中 10 min 内可自我修复痊愈。

抽气速率不同、高压舱内降压至 40 kPa 时, 除鳊和鲢幼鱼表现出游泳速度加快以外, 其他家鱼幼鱼没有表现出明显的行为异常和损伤, 实验结果见表 5、表 6。当预设最低压力值为 40 kPa 时, 4 种家鱼幼鱼对不同抽气速率的压力变化具有较好的耐受性。然而, 当压力以不同速率降低至 20 kPa 时, 4 种家鱼幼鱼都出现了不同程度的损伤, 且随着降压速率(压力梯度)的增加, 幼鱼损伤的程度加深、死亡率增加。实验表明, 最低压力值和压力梯度是造成家鱼幼鱼通过水轮机流道受到压力损伤的主要因

表5 压力梯度承受实验结果

Tab.5 Results of pressure gradient tolerance test

种类	抽气速率/ L · min ⁻¹	最小压力/ kPa	实验中行为及损伤状态	实验后暂养1 h 状态	实验后暂养4 h 状态	实验后暂养12 h 状态	解剖观察
青鱼	300	40	A	S	T	T	U
	150	40	A	T	T	T	U
	3	40	A	T	T	T	U
	300	20	B, C, D, E, I	O, R, S	S	T	U
	150	20	B, C, D, E, I	O, R, S	S	T	U
	3	20	C	S	S	T	U
草鱼	300	40	A	S	T	T	U
	150	40	A	T	T	T	U
	3	40	A	T	T	T	U
	300	20	B, C, D, E, I	O, R, S	S	T	U
	150	20	B, C, D, E, I	O, R, S	S	T	U
	3	20	C	S	T	T	U

续表 5

种类	抽气速率/ L · min ⁻¹	最小压力/ kPa	实验中行为及 损伤状态	实验后暂养 1 h 状态	实验后暂养 4 h 状态	实验后暂养 12 h 状态	解剖 观察
鳊	300	40	B	S	T	T	U
	150	40	A	T	T	T	U
	3	40	A	T	T	T	U
	300	20	B, C, D, E, F, G, I, J, K, L, M, N	I, K, G, S, N	O, K, R, S, N	N	W
	150	20	B, C, D, E, I, J	K, O, R, S	K, R, S	S	U
	3	20	B, C, D, E, I, J	K, O, R, S	K, R, S	S	U
鲢	300	40	B	S	T	T	U
	150	40	A	T	T	T	U
	3	40	A	T	T	T	U
	300	20	B, C, D, E, F, G, I, J, K, L, M, N	G, K, E, I, S, N	O, K, R, S, N	K, S, N	W
	150	20	B, C, D, E, F, G, I, J, K, L, M, N	G, K, E, I, S, N	O, K, R, S, N	K, S, N	V
	3	20	B, C, D, E, I, J	K, O, R, S	K, S	S	U

表 6 压力梯度损伤及死亡统计

Tab.6 Injury and mortality results from the pressure gradient test

种类	最小压力/ kPa	抽气速率/ L · min ⁻¹	损伤/ 尾	死亡/ 尾
青	40	300	3	0
		150	1	0
		3	0	0
鱼	20	300	6	1
		150	4	0
		3	3	0
草	40	300	2	0
		150	0	0
		3	0	0
鱼	20	300	7	2
		150	5	0
		3	3	0
鳊	40	300	4	0
		150	3	0
		3	1	0
鳊	20	300	9	6
		150	8	5
		3	6	4
鲢	40	300	5	1
		150	3	0
		3	2	0
鲢	20	300	10	9
		150	10	7
		3	10	6

素:最低压力值越小、压力梯度越大,家鱼幼鱼受到损伤程度越大、死亡率越高。在承受压力梯度实验中,鳊是 4 种家鱼中受损伤最为严重的鱼,说明其对压力梯度具有较强的敏感性。

3 讨论

本实验得出四大家鱼幼鱼受压力损伤的主要因

素为最低压力值和压力梯度,这与国外学者对大鳞大马哈鱼幼鱼进行压力测试得出的结论(Stephenson et al,2010)一致。可见,鱼类通过水轮机流道下行时,主要受到水轮机转轮区域转轮出口最低压力和进出口压力梯度造成的压力损伤。另外,本实验仅采用体长约为 10 cm 的 1 龄幼鱼进行,鱼龄及鱼体尺寸的不同可能对于负压及压力梯度的承受能力不同。较美国友好型水轮机设计研究小组得出的鱼类通过水轮机流道时对压力及压力梯度的耐受阈值(最低压力值为 68.8 kPa,压力梯度为 550.3 kPa/s)(Odeh,1999),本实验得出的四大家鱼幼鱼遭受压力损伤的阈值较低,说明四大家鱼幼鱼较美洲鱼类对于压力的耐受性较好。另外国外学者研究得出鱼类通过水轮机流道受到压力损伤与进入水轮机的压力变化率(进入水轮机前的适应压力与水轮机流道最低压力的比率)、水体中的溶解气体含量、鱼体长度及重量等有关(Brown et al,2012),本实验没有对实验前鱼体适应压力、高压舱水体溶解气体含量、鱼体长度及重量进行对比实验,下一步将增加这些影响因子的对比实验。同时鱼体随水流进入水轮机流道,是在高速旋转水流中承受水体压力及其他水动力特性,与本实验高压舱的静止水体的水压略有不同,但动水压力与静水压力存在一定的相关性,故本实验结论可为后续研究提供参考。

参考文献

刘绍平,陈大庆,段辛斌,等,2004. 长江中上游四大家鱼资源监测与渔业管理[J]. 长江流域资源与环境,13(2): 183-186.
邵奇,李海锋,吴玉林,等,2002. 水力机械内压力变化梯度对

- 鱼类损伤的模拟试验[J]. 机械工程学报, 38(10): 7 - 11.
- Brown R S, Carlson T J, Gingerich A J, et al, 2012. Quantifying mortal injury of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 141(1): 147 - 157.
- Cada G F, Coutant C C, Whitney R R, 1997. Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines [R]. Washington: EERE Publication and Product Library.
- Cada G F, Francfort J E, 1995. Examining the benefits and costs of fish passage and protection measures [J]. Hydro Review, 14(1).
- Deng Z, Carlson T, Richmond M, 2007. Six-degree-of-freedom sensor fish design and instrumentation [J]. Sensors, 7(12): 3399 - 3415.
- Feathers M G, Knable A E, 1983. Effects of depressurization upon largemouth bass [J]. North American Journal of Fisheries Management, 3(1): 86 - 90.
- Foye R E, Scott M, 1965. Effects of pressure on survival of six species of fish [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 94(1): 88 - 91.
- Odeh M, 1999. A summary of environmentally friendly turbine design concepts [R]. Idaho: US Department of Energy, Idaho Operations Office.
- Sale M J, Cada G F, Chang L H, et al, 1991. Environmental mitigation at hydroelectric projects: Volume 1. Current practices for instream flow needs, dissolved oxygen, and fish passage [R]. Washington: EERE Publication and Product Library.
- Stephenson J R, Gingerich A J, Brown R S, et al, 2010. Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory [J]. Fisheries Research 106(3): 271 - 278.
- Turnpenny A W, Davis M H, Fleming J M, et al, 1992. Experimental Studies Relating to the Passage of Fish and Shrimps Through Tidal Power Turbines [R]. Southampton: National Power, Marine and Freshwater Biology Unit.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Effect of Sudden Pressure Change in Turbine Passages on Juveniles of the Four Major Chinese Carps

WANG Yu¹, ZHAI Zhen-nan², YANG Lu-tong³, SHI Xiao-tao¹

(1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002,P.R.China;

2.China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443002,P.R.China;

3.Guizhou Water Investment Water Affairs Group, Guiyang 550000,P.R.China)

Abstract: In order to provide technical support for structural optimization and ecological operation of hydroelectric turbines, we studied the response of fish to the sudden pressure changes that occurs in turbine passages by simulating the pressure change in a pressure chamber. The test fish were healthy one-year-old juveniles of the four major Chinese carps (bighead, black, grass and silver) with intact scales, body length of (100 ± 10) mm and body width of (6 ± 2) mm. The experimental system consisted of a frequency conversion vacuum pump and pressure chamber with a pressure gauge, vacuum tubing and high speed camera. Experiments, carried out on each of the four carps with 10 replicates, were designed to study fish tolerance to three conditions encountered while passing through a turbine: (1) Exposure to low water pressure at preset values (80 kPa, 60 kPa, 40 kPa, 20 kPa) for 30 min, or until the test fish could not maintain its balance. (2) Exposure to water pressure cycling: from atmospheric pressure to low preset values (80 kPa, 60 kPa, 40 kPa, 20 kPa), repeated until the test fish could not maintain its balance. (3) Exposure to different pressure gradients, with pressure decreasing from atmospheric pressure to preset values (40 kPa, 20 kPa) at pumping rates of 300, 150 and 3 L/min to give the different pressure gradients. Video was recorded during the experiments to document the behavior and damage to test fish. After the experiments, fish were transferred temporarily to a tank for feeding and their healing was observed and recorded at 1 h, 4 h and 12 h. Finally, the test fish were dissected to observe any organ damage. Results show that: (1) The juvenile carps were sensitive to rapid drops in water pressure, damage occurred primarily during the first pressure drop and damage severity increased as the minimum pressure decreased, and as the pressure gradient increased. Additional pressure cycles did not increase the degree of injury or mortality of test fish. (2) A low minimum water pressure and high pressure gradient were the primary causes of injury and this will likely be the case when fish pass through a turbine. As the minimum pressure decreased or the pressure gradient increased, injury severity and mortality of juvenile carps increased. (3) Black and grass carp inhabit the river bottom and better tolerated low pressure and pressure gradients than silver carp or bighead carp that reside closer to the surface. There was a certain correlation between the ability of acclimating pressures before entering the turbine passage and the pressure injury on fish when it pass through the turbine passage. (4) The threshold pressure for injury to juveniles of the four major Chinese carps was 20 kPa.

Key words: four major Chinese carps; turbine passage; pressure change; behavior; damage status