

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0050

高学平,毛长贵,孙博闻,等. 输水隧洞坡角对侧式进/出水口水力特性影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 189-195. GAO X P, MAO C G, SUN B W, et al. Influences of the tunnel slope on the hydraulic characteristics of the side inlet/outlet [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 189-195. (in Chinese)

输水隧洞坡角对侧式进/出水口水力特性影响研究

高学平,毛长贵,孙博闻,张翰

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:抽水蓄能电站侧式进/出水口具有双向过流的特点,进/出水口自身体型参数对其水力特性具有很大的影响,但连接的输水隧洞布置型式也同样会影响进/出水口水力特性,若输水隧洞布置不恰当,将可能导致进/出水口出现不利的水力特性。利用 RSM 紊流模型,以某侧式进/出水口为研究对象,在进/出水口体型不变的前提下,研究出流工况不同隧洞坡角对进/出水口内部流态、拦污栅断面流速不均匀系数、水头损失系数及流量分配等水力特性的影响。结果表明,当隧洞坡角等于扩散段垂向扩散角时,进/出水口内部流态较好,反向流速区的沿程范围、拦污栅断面流速不均匀系数及水头损失系数均最小。因此,当进/出水口扩散段垂向扩散角不大且各隧洞坡角均满足地形、地质条件的情况下,隧洞坡角等于扩散段垂向扩散角时,可获得较优的水力特性。

关键词:侧式进/出水口;出流;隧洞坡角;扩散段垂向扩散角;水力特性

中图分类号:TV131 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influences of the tunnel slope on the hydraulic characteristics of the side inlet/outlet

GAO Xueping, MAO Changgui, SUN Bowen, ZHANG Han

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The side inlet/outlet of pumped storage power station has bidirectional flow characteristics. The shape parameters of the side inlet/outlet have a great influence on its hydraulic characteristics, though the layout of the connected water conveyance tunnel will also affect the hydraulic characteristics of the side inlet/outlet. If the layout of the water conveyance tunnel is not reasonable, it may lead to hydraulic characteristics adverse to the inlet/outlet. The paper investigated the influences of different tunnel slope on the hydraulic characteristics of the inlet/outlet on the condition of outflow using the turbulence model of RSM for a side inlet/outlet, given that the shape of the inlet and outlet remained the same. then The condition of outflow included the flow pattern, non-uniformity of flow velocity, the head loss coefficient and the flow distribution. The results showed that when the tunnel slope equaled the vertical diffusion angle of the diffusion section, the flow pattern in the inlet/outlet could be improved. The range and volume ratio of the reverse flow velocity area was the smallest, non-uniformity coefficient of flow velocity and the head loss coefficient were the smallest. Therefore, when the vertical diffusion angle of the inlet/outlet diffusing section was not large and each tunnel slope satisfied the topography and geological conditions, the tunnel slope was equal to the vertical diffusion angle of the diffusing section to obtain better hydraulic characteristics.

Key words: side inlet/outlet; outflow; tunnel slope; vertical diffusion angle of the diffusion section; hydraulic characteristics

收稿日期:2018-12-22 修回日期:2019-01-14 网络出版时间:2019-03-06
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190304.1558.020.html>
基金项目:国家自然科学基金创新群体基金项目(51621092)
作者简介:高学平(1962—),男,天津人,教授,博士,主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn
通信作者:孙博闻(1987—),男,河北唐山人,讲师,博士,主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: bwsun@tju.edu.cn

抽水蓄能电站侧式进/出水口是连接输水隧洞和库区的重要水工建筑物,具有双向过流的特点。出流时隧洞内的水流经进/出水口扩散流至水库;进流时水库内的水流经进/出水口收缩流进隧洞。若进/出水口体型设计不当,将会增大进/出水口的水头损失;对于出流,在拦污栅断面可能出现局部流速过大,甚至反向流速,导致拦污栅因流激振动而产生破坏^[1-3]。

为了获得更优的水力特性,国内学者在侧式进/出水口体型参数对水力特性影响方面已经做了大量的研究。蔡付林等^[4]通过模型试验研究了三分流墩四流道的进/出水口,指出分流墩体型布置对进/出水口流量分配和流速分布等有明显影响,应布置成中间分流墩短、两侧分流墩长且起始于扩散段起始断面。沙海飞等^[5]通过数值模拟研究了二分流墩三流道的进/出水口,指出分流墩间距比应取 34:32:34。高学平等^[6]通过数值模拟,指出对于四通道进/出水口,调整扩散段分流墩中边孔宽度比、中墩墩头较边墩墩头缩进距离、扩散段长度等能有效改善流量不均匀程度。章军军等^[7]通过模型试验研究了短式进/出水口,提出分流墩内伸到扩散段始端,四流道改为三流道等措施可改善流速分布、流量分配及水头损失等水力特性。高学平等^[8]通过数值模拟,指出扩散段水平扩散角和调整段长度对进/出水口的水头损失和孔口流态有决定的影响。王晨茜等^[9]通过数值模拟,研究了扩散段垂向扩散角和水平扩散角对流动分离的重要程度,指出垂向扩散角对减弱流动分离、消除拦污栅断面反向流速起主导作用。高学平等^[10-12]通过 CFD 模拟与优化算法的结合建立了进/出水口体型自动优化平台,以指定的水力指标为目标,通过体型参数的变化自动找出最优体型。

综上所述,侧式进/出水口体型参数变化对其水力特性有很大的影响,但进/出水口后连接的隧洞布置型式同样影响进/出水口水力特性。孙双科等^[13]通过模型试验指出隧洞段采用弯道布置,且弯道与扩散段之间的过渡段长度不足使拦污栅断面垂向流速分布呈“上大下小”的趋势,并在靠近底板处产生反向流速。沙海飞等^[5]通过数值模拟指出平面弯道或立面弯道形成的二次环流会影响进/出水口的流量分配。张从联等^[14]通过模型试验指出为消除一个立面弯道带来的偏流问题,可在距离进/出水口 13D 的位置设置两个对称的立面弯道,进/出水口顶部将不会出现流速过大情况。因此若输水隧洞布置不恰当,也可能导致进/出水口在出流时产生不利的水力特性,关于输水隧洞的布置型式对进/出水口水力特性的影响值得关注及研究。

抽水蓄能电站在进行洞线布置时力求保持直线,但由于地质、地形条件限制,隧洞路线往往布置成折线^[15]。统计已建成的抽水蓄能电站,如十三陵、西龙池、天荒坪、广州一期及张河湾等多个工程隧洞布置均有纵向坡度^[15-16]。因此,本文利用 RSM 紊流模型,以某侧式进/出水口为研究对象,在保证进/出水口体型不变的前提下,针对出流工况,研究隧洞坡角不同对进/出水口水力特性的影响,研究成果将对侧式进/出水口的设计具有指导意义。

1 数学模型建立与验证

1.1 控制方程及求解方法

侧式进/出水口内流动按不可压缩流动处理,连续方程和动量方程见文献^[17],并采用 RSM 紊流模型来封闭控制方程。

本文采用商用软件 Fluent 进行计算,方程求解采用有限体积法,空间离散采用二阶迎风格式,压力—速度耦合采用 SIMPLE 算法。

1.2 模型建立

某侧式进/出水口输水隧洞直径为 7.2 m。3 个分流墩将流道分为 4 孔(1-1 至 1-4),底板高程 280.5 m,每孔过流孔口高度 8.7 m、宽度 6.3 m。扩散段长度为 36 m,立面为单向扩散,垂向扩散角为 2.4°,平面为双向扩散,水平扩散角为 34.3°,分流墩末端中边孔宽度比为 0.229:0.271,隧洞坡角为 0°。图 1 为该侧式进/出水口体型,XY 平面原点选在中间分流墩起始端(防涡梁侧),Z 平面原点选在进/出水口底板防涡梁侧。

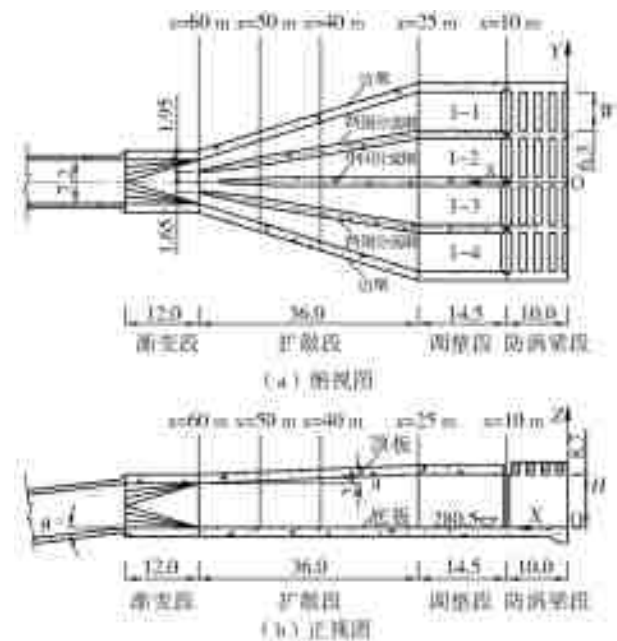


图 1 侧式进/出水口体型(单位:m)
Fig. 1 The shape of side inlet/outlet(unit:m)

计算区域包括隧洞、进/出水口、库区三部分。出流时,水体由隧洞进入进/出水口,在进/出水口做垂向及横向扩散后流向库区。库区边界依据水库水位按静水压强给出,隧洞边界依据流量按平均流速给出。固壁边界采用无滑移条件;水库液面为自由表面。进/出水口体型采用结构化六面体网格,网格边长 0.3 m,总网格数 1 628.3 万。图 2 为计算网格。

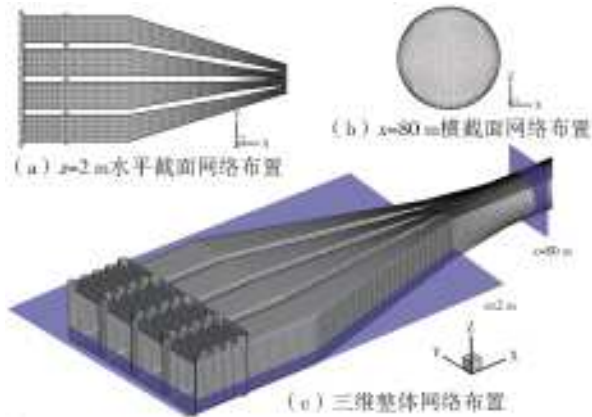


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational grids

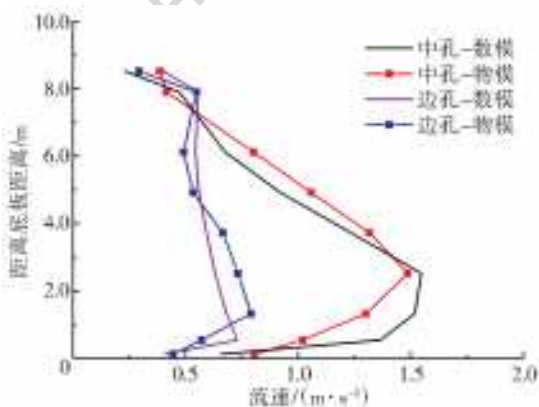
1.3 模型验证

为进行模型验证,本文对上述体型进行了数值模拟,计算条件为死水位 298.0 m、出流流量 $2 \times 80.8 \text{ m}^3/\text{s}$,隧洞雷诺数 $Re = 2.8 \times 10^7$,得到了进/出水口流量分配和拦污栅断面流速分布,并将结果与模型试验进行了比较。表 1 为进/出水口流量分配,图 3 为边、中孔拦污栅断面中垂线流向流速分布。

表 1 进/出水口流量分配

Tab. 1 Inlet/outlet flow distribution

孔口编号	试验/%	数模/%
1-1	19.13	20.08
1-2	30.05	29.92
1-3	30.51	29.92
1-4	20.32	20.08

图 3 拦污栅断面中垂线流速分布($\theta=0^\circ$)Fig. 3 Flow velocity distribution of the middle vertical line in the section of the trash rack($\theta=0^\circ$)

数值模拟结果值与试验值吻合较好,RSM 紊流模型能够用于侧式进/出水口水力特性的研究。

2 模拟结果及分析

为研究隧洞坡角对侧式进/出水口水力特性的影响,采用上述进/出水口体型参数,通过改变不同隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ, \theta=2.0^\circ, \theta=2.4^\circ, \theta=3.0^\circ, \theta=4.0^\circ, \theta=6.0^\circ, \theta=8.0^\circ$,来研究出流工况下内部流速场、拦污栅断面流速不均匀系数、流量分配和水头损失系数等水力特性的变化规律。计算条件:死水位 298.0 m、出流流量 $2 \times 80.8 \text{ m}^3/\text{s}$,隧洞雷诺数 $Re = 2.8 \times 10^7$ 。由于体型对称,边孔 1-1 和 1-4、中孔 1-2 和 1-3 的结果相同,因此后文以边孔 1-1、中孔 1-2 为例给出计算结果。

2.1 内部流速场

图 4 为边孔典型断面流速云图。黑粗线表示流速为零的等值线。结果表明,(1)在断面 $x=60 \text{ m}$ 至断面 $x=40 \text{ m}$,隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 范围,流速分布基本一致,即在断面 $x=60 \text{ m}$ (扩散段进口),主流位于于孔口中间;在断面 $x=50 \text{ m}$ 至 $x=45 \text{ m}$,主流贴附在两侧分流墩边壁;在断面 $x=25 \text{ m}$,隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ \sim 4.0^\circ$ 范围,主流继续贴附在两侧分流墩边壁,而隧洞坡角 $\theta=6.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 范围,主流转移至两侧分流墩与顶板的夹角;在断面 $x=10 \text{ m}$ (拦污栅断面),隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ \sim 4.0^\circ$ 范围,断面流速整体分布较为均匀,而隧洞坡角 $\theta=6.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 范围,断面流速呈上部流速大,下部流速小的趋势。(2)隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ \sim 4.0^\circ$ 范围,边孔内部流态良好,无反向流速区;而隧洞坡角 $\theta=6.0^\circ \sim 8.0^\circ$,在底部产生反向流速区,但在拦污栅断面($x=10 \text{ m}$)反向流速区消失。

图 5 为中孔典型断面流速云图。黑粗线表示流速为零的等值线。结果表明,(1)隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 范围,各断面主流在横向上基本位于于中孔中部,在垂向上随着隧洞坡角的增大,主流位置不断上移。(2)在隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ$,反向流速区在顶部产生发展直至消失,而隧洞坡角 $\theta=2.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 范围,反向流速区在底部产生发展直至减弱或消失,这是由于随着隧洞坡角的增大,主流逐渐上移,使得顶部流动分离逐渐被抑制,而底部流动分离逐渐发展。

2.2 反向流速区量化分析

为量化断面反向流速和反向流速沿程范围,定义断面反向流速区面积比 η_A 为断面反向流速区面积 A_R 与断面总面积 A_S 的比值;定义反向流速区体积比 η_V 为反向流速区体积 V_R 与进/出水口总体积

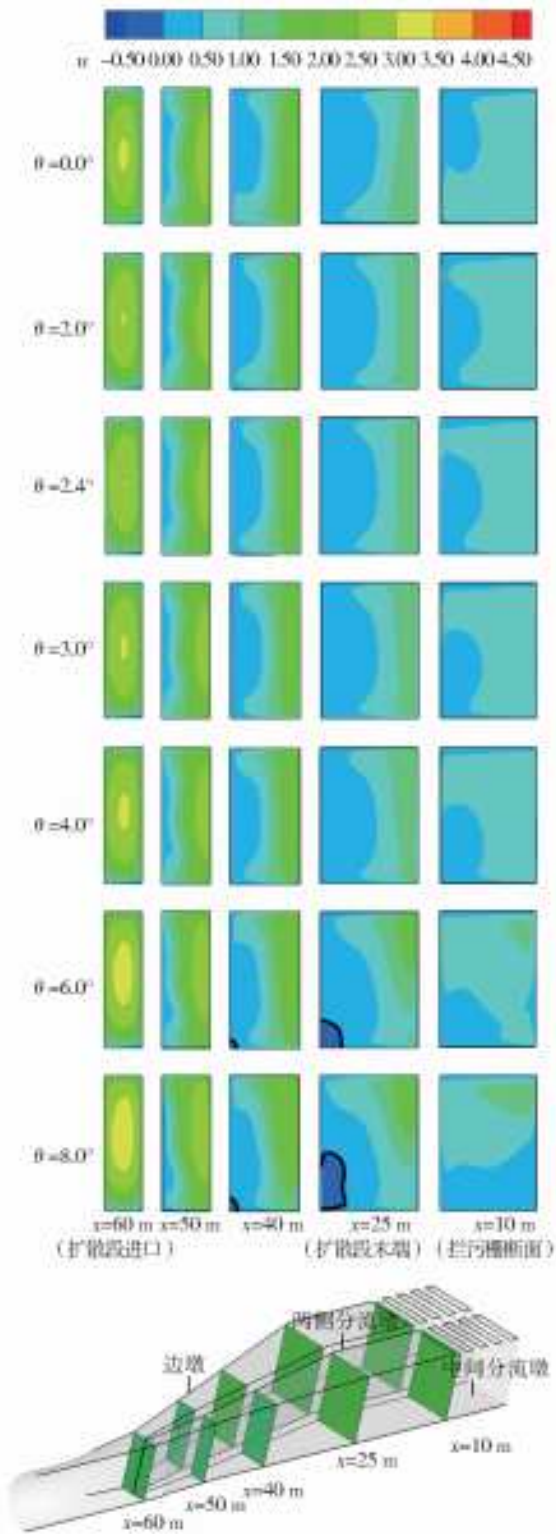


图 4 边孔典型断面流速分布云图

Fig. 4 Flow velocity distribution in the side hole

V_s 的比值,可通过反向流速区面积比 η_A 沿程积分求得。

$$\eta_A = \frac{A_R}{A_S} \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta_V = \frac{V_R}{V_S} = \int_x \frac{A_R}{A_S} \times 100\% \quad (7)$$

图 6 为边孔和中孔反向流速区面积比沿程分

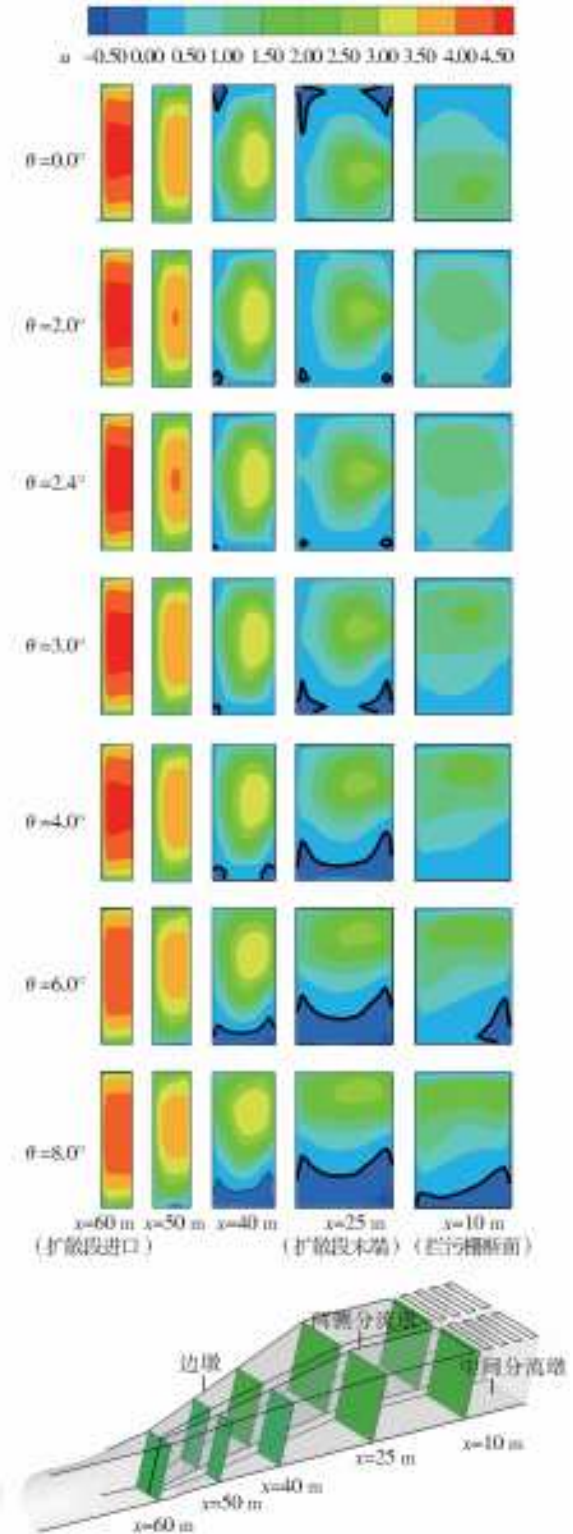


图 5 中孔典型断面流速分布云图

Fig. 5 Flow velocity distribution in the middle hole

布。表 2 为边孔和中孔反向流速区沿程范围和体积比计算结果。结果表明:(1)边、中孔反向流速区面积比沿程分布规律基本一致,即在反向流速区产生位置到消失位置,呈先增大后减小的趋势,其中在断面 $x=25\text{ m}$ (扩散段末端),反向流速区面积比达到最大。(2)对于边孔,隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ\sim 4.0^\circ$ 范围,边孔内部无反向流速区产生;隧洞坡角 $\theta=$

6.0°~8.0°范围,边孔反向流速区的沿程范围及体积比随隧洞坡角增大而增大,沿程范围由 21 m 增大到 23 m,但并未延伸到拦污栅断面,体积比由 3.85%增大到 16.94%。(3)对于中孔,隧洞坡角 $\theta=0.0^\circ\sim 8.0^\circ$ 范围,随着隧洞坡角的增大,中孔反

向流速区的沿程范围及体积比呈先减小后增大的趋势,并在隧洞坡角 θ 等于垂向扩散角 $\alpha=2.4^\circ$ 时,反向流速区沿程范围及体积比最小。可以认为,当隧洞坡角 $\theta\geq 6.0^\circ$ 时,边孔和中孔拦污栅断面均产生反向流速区。

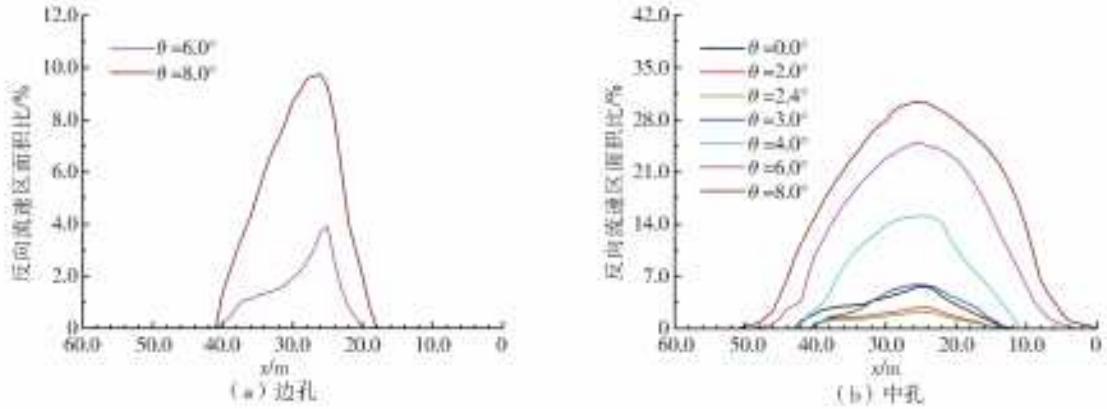


图 6 反向流速区面积比沿程分布

Fig. 6 The distributions of the area ratio of reverse velocity zone

表 2 边孔和中孔反向流速区沿程范围和体积比计算结果

Tab. 2 Calculation results of reverse velocity zone's range and volume ratio for the side hole and middle hole

	坡角/ °	起始位置/ m	终止位置/ m	沿程范围/ m	反向流速区 体积比 $\eta_v/\%$
边孔	$\theta=6.0$	41	20	21	3.83
	$\theta=8.0$	41	18	23	16.94
中孔	$\theta=0$	43	12	31	1.38
	$\theta=2.0$	41	13	28	0.45
	$\theta=2.4$	41	13	28	0.35
	$\theta=3.0$	41	12	29	1.06
	$\theta=4.0$	43	11	32	11.09
	$\theta=6.0$	49	3	46	23.46
	$\theta=8.0$	51	0	51	32.83

2.3 流速不均匀系数

图 7 为进/出水口边孔和中孔拦污栅断面流速不均匀系数,具体数据列于表 3。结果表明,随着隧洞坡角的增大,边孔和中孔拦污栅断面流速不均匀系数先减小后增大,边孔拦污栅断面流速不均匀系数由 1.50 逐渐减小,当隧洞坡角 θ 等于垂向扩散角 $\alpha=2.4^\circ$ 时,边孔拦污栅断面流速不均匀系数达到最小值(1.42),随后逐渐增大到 2.44;中孔拦污栅断面流速不均匀系数由 1.81 逐渐减小,当在隧洞坡角 θ 等于垂向扩散角 $\alpha=2.4^\circ$ 时,中孔拦污栅断面流速不均匀系数达到最小值(1.71),随后逐渐增大到 3.01。

表 3 进/出水口边孔和中孔拦污栅断面流速不均匀系数计算结果

Tab. 3 Calculation results of flow velocity non-uniformity coefficient in cross section of inlet/outlet side hole and middle hole trash rack

隧洞坡角	$\theta=0.0^\circ$	$\theta=2.0^\circ$	$\theta=2.4^\circ$	$\theta=3.0^\circ$	$\theta=4.0^\circ$	$\theta=6.0^\circ$	$\theta=8.0^\circ$
边孔流速不均匀系数	1.50	1.47	1.42	1.53	1.7	1.98	2.44
中孔流速不均匀系数	1.81	1.75	1.71	1.82	1.93	2.43	3.01

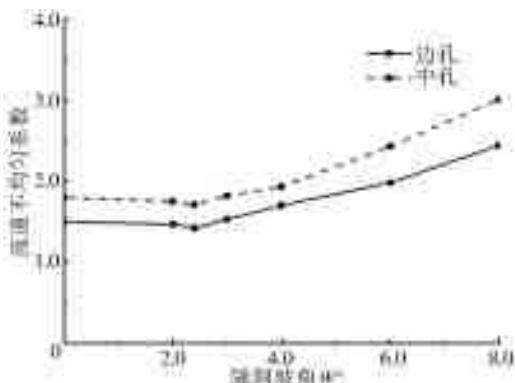


图 7 进/出水口边孔和中孔拦污栅断面流速不均匀系数

Fig. 7 Flow velocity non-uniformity coefficient in cross section of inlet/outlet side hole and middle hole trash rack

2.4 流量分配与水头损失系数

表 4 列出了进/出水口流量分配和水头损失计算结果。图 8 为边、中孔流量分配。结果表明,随着隧洞坡角的增大,边孔流量分配先减小后增大,而中孔流量分配先增大后减小。边孔流量分配由 20.08%逐渐减小,当隧洞坡角 θ 等于垂向扩散角 $\alpha=2.4^\circ$ 时,边孔流量分配达到最小值(19.55%),随后逐渐增大到 21.88%;中孔流量分配由 29.92%逐渐增大,当在隧洞坡角 θ 等于垂向扩散角 $\alpha=2.4^\circ$ 时,边孔流量分配达到最大值(30.45%),随后逐渐减小到 28.14%。

表 4 进/出水口流量分配与水头损失系数计算结果

Tab. 4 Calculation results of inlet/outlet flow distribution and head loss coefficient

隧洞坡角	$\theta=0.0^\circ$	$\theta=2.0^\circ$	$\theta=2.4^\circ$	$\theta=3.0^\circ$	$\theta=4.0^\circ$	$\theta=6.0^\circ$	$\theta=8.0^\circ$
边孔流量分配/%	20.08	19.65	19.55	19.78	20.15	21.03	21.88
中孔流量分配/%	29.92	30.35	30.45	30.22	29.85	28.97	28.14
水头损失系数 ξ	0.350	0.349	0.348	0.353	0.355	0.361	0.369

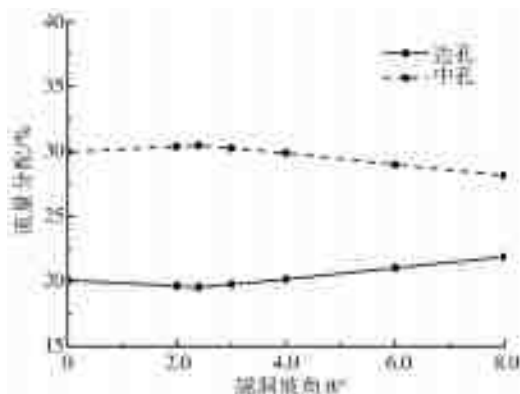


图 8 边、中孔流量分配

Fig. 8 Flow distributions of side hole and middle hole

图 9 为进/出水口水头损失系数。结果表明,随着隧洞坡角的增大,水头损失系数先减小后增大,水头损失系数由 0.350 逐渐减小,当在隧洞坡角 θ 等于垂向扩散角 $\alpha=2.4^\circ$ 时,水头损失系数达到最小值 (0.348),之后逐渐增大到 0.369。

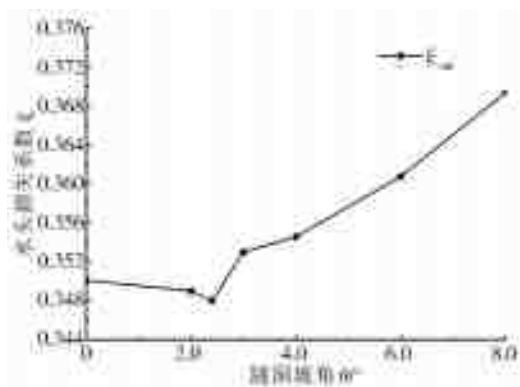


图 9 进/出水口水头损失系数

Fig. 9 Head loss coefficient of inlet/outlets

3 结论

考虑隧洞坡角对侧式进/出水口水力特性的影响,本文以某扩散段垂向扩散角为 2.4° 的侧式进/出水口为研究对象,利用 RSM 紊流模型进行专门研究。当进/出水口扩散段垂向扩散角不大的情况下,且各隧洞坡角均满足地形、地质条件下,研究成果可供类似侧式进/出水口设计提供参考。

(1)当隧洞坡角等于扩散段垂向扩散角时,进/出水口内部流态较好,反向流速区的沿程范围最小,拦污栅断面流速不均匀系数和水头损失系数最小。

(2)当隧洞坡角小于扩散段垂向扩散角时,随着隧洞坡角的增大,反向流速区的沿程范围、拦污栅断面流速不均匀系数和水头损失系数均逐渐减小。

(3)当隧洞坡角大于扩散段垂向扩散角时,随着隧洞坡角的增大,反向流速区的沿程范围、拦污栅断面流速不均匀系数和水头损失系数均逐渐增大。

(4)当隧洞坡角等于扩散段垂向扩散角时,进/出水口可以获得较优的水力特性。

参考文献 (References):

- [1] 才君眉,陈鸷. 天荒坪抽水蓄能电站拦污栅旋涡脱落模型试验研究[J]. 水力发电学报,1996(3):15-23. (CAI J M, CHEN Y. A study on the vortex shading behind trashracks of a pumped-storage station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,1996(3):15-23. (in Chinese))
- [2] 王光纶,张文翠,李未显. 抽水蓄能电站拦污栅结构振动特性模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(2):114-118. (WANG G L, ZHANG W C, LI W X. Experiment study of the free vibration characteristics of the trashrack of the Tianhuangping pumped-storage station[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2001,41(2):114-118. (in Chinese))
- [3] 张绍春,赵钟民,陈兆新. 邦朗电站进水口拦污栅振动试验研究[J]. 水力发电学报,2003(1):76-82. (ZHANG S C, ZHAO Z M, CHEN Z X. Vibration test and study on trash rack of power intake at Paunglaung hydropower project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2003(1):76-82. (in Chinese))
- [4] 蔡付林,胡明,张志明. 双向水流侧式进/出水口分流墩研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):74-77. (CAI F L, HU M, ZHANG Z M. Study on guide piers in flank inlet-outlet with double flow directions[J]. Journal of Hohai University(Natural Science),2000,28(2):77. (in Chinese))
- [5] 沙海飞,周辉,黄东军. 抽水蓄能电站侧式进/出水口数值模拟[J]. 水力发电学报,2009,28(1):84-88. (SHA H F, ZHOU H, HUANG D J. Numerical simulation on the side inlet/outlet of pumped storage power station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1):84-88. (in Chinese))
- [6] 高学平,李岳东,田野,等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口流量分配研究[J]. 水力发电学报,2016,35(6):87-94. (GAO X P, LI Y D, TIAN Y, et al. Flow distribution in side intake/outlet tunnel of pumped storage power stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(6):

- 87-94. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdbx.20160611.
- [7] 章军军,毛欣炜,毛根海,等. 侧式短进出水口水力试验及体型优化[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 38-41. (ZHANG J J, MAO X W, MAO G H, et al. Experimental research and shape optimization on lateral short inlet/outlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 38-41. (in Chinese))
- [8] 高学平,叶飞,宋慧芳. 侧式进/出水口水流运动三维数值模拟[J]. 天津大学学报, 2006, 39(5): 518-522. (GAO X P, YE F, SONG H F. 3D numerical simulation on the flow in side inlet/outlet[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(5): 518-522. (in Chinese))
- [9] 王晨茜,张晨,张翰,等. 侧式进/出水口流动分离现象研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 73-81. (WANG C X, ZHANG C, ZHANG H, et al. Flow separation in side inlets/outlets of pumped storage power stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11): 73-81. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdbx.20171108.
- [10] GAO X P, TIAN Y, SUN B W. Shape optimization of bi-directional flow passage components based on a genetic algorithm and computational fluid dynamics[J]. Engineering Optimization, 2017: 1-17. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1400543.
- [11] GAO X P, TIAN Y, SUN B W. Multi-objective optimization design of bidirectional flow passage components using RSM and NSGA II: A case study of inlet/outlet diffusion segment in pumped storage power station[J]. Renewable Energy, 2018(115): 999-1013. DOI:10.1016/j.renene.2017.09.011.
- [12] 高学平,李建国,孙博闻,等. 利用多岛遗传算法的侧式进/出水口体型优化研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 186-194. (GAO X P, LI J G, SUN B W, et al. Optimization of the shape of lateral intake/outlet using multi-island genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 186-194. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20170650.
- [13] 孙双科,柳海涛,李振中,等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口拦污栅断面的流速分布研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1329-1335. (SUN S K, LIU H T, LI Z Z, et al. Study on velocity distribution behind the trashrack in lateral intake/outlet of pumped storage power station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1329-1335. (in Chinese))
- [14] 张从联,朱红华,钟伟强,等. 抽水蓄能电站进出水口水力学试验研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 60-63. (ZHANG C L, ZHU H H, ZHONG W Q, et al. Experimental research on inlet/outlet hydraulics of pump storage power plants[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2): 60-63. (in Chinese))
- [15] 邱彬如,刘连希. 抽水蓄能电站工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2008. (QIU B R, LIU L X. Engineering technology of pumped storage power station[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese))
- [16] 张春生,姜忠见. 抽水蓄能电站设计[M]. 北京:中国电力出版社, 2012. (ZHANG C S, JIANG Z J. The design of pumped storage power station[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012. (in Chinese))
- [17] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (WANG F J. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

(上接第 188 页)

- [18] 乔光建,梁韵,王斌,邢台百泉岩溶水库蓄水构造特征分析及功能评价[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 139-143. (QIAO G J, LIANG Y, WANG B. Characteristics analysis and functional evaluation of water storage structure of Xingtai Baiquan karst reservoir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 139-143. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.038.
- [19] 束龙仓,张颖,鲁程鹏. 管道-裂隙岩溶含水介质非均质性的水文效应[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 115-121. (SHU L C, ZHANG Y, LU C P. Hydrological effect of heterogeneity of pipeline-fractured karst aqueous media[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 115-121. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01115.
- [20] 王晓红,刘久荣,辛宝东,等. 北京岩溶水系统划分及特征分析[J]. 城市地质, 2016, 11(3): 8-15. (WANG X H, LIU J R, XIN B D, et al. Division and characteristics analysis of Beijing karst water system[J]. Urban Geology 2016, 11(3): 8-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2016.03.002.
- [21] 胡海涛,许贵森. 论构造体系与地下水网络[J]. 水文地质工程地质, 1980(3): 1-7. (HU H T, XU G S. Discussion of tectonic systems and groundwater networks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1980(3): 1-7. (in Chinese))
- [22] 奚德荫. 鲁中南地区岩溶水文地质条件及其特征[J]. 中国岩溶, 1988(3): 43-48. (XI D Y. Karst hydrogeological conditions and their characteristics in the central and southern Shandong[J]. Chinese Karst, 1988(3): 43-48. (in Chinese))