



黄河水利职业技术学院

YELLOW RIVER CONSERVANCY TECHNICAL INSTITUTE



8-2 水工隧洞构造



李梅华

2020年12月26日

教学目标

素质目标

1. 激发学习兴趣，培养创新意识；
2. 树立追求卓越、精益求精的岗位责任，培养工匠精神；
3. 传承大禹精神、红旗渠精神、抗洪精神、愚公移山精神，增强职业荣誉感，民族自豪感。

知识目标

1. 了解水工隧洞进口建筑物分类、特点、适用条件；
2. 掌握水工隧洞的进口段组成、作用、结构；
3. 掌握水工隧洞洞身衬砌作用、特点、构造、使用条件；
4. 掌握水工隧洞的洞内消能及宽尾墩的方法、特点。

技能目标

1. 能识读水工隧洞设计图；
2. 能指出设计图中进口建筑物的型式。
3. 能讲述固结灌浆、回填灌浆的布置；
4. 能说出设计图中采用的消能方式；
5. 能指出设计图中进口段各个部位名称、型式。

主要内容



01 进口建筑物

02 进口段

03 洞身段

04 出口段

国之重器——白鹤滩水电站，创造了多项世界第一。

- (1) **单机容量100万kW居世界第一**。电站首次全部采用国产单机容量百万千瓦级水轮发电机组，使我国水电制造技术从“追赶”走向“引领”。
- (2) **地下洞室群规模世界第一**。电站各类洞室总长度达217km，洞室开挖量达2500万m³，是国内外水电工程中规模最大的地下洞室群。
- (3) **300m级高坝抗震参数世界第一**。电站最大坝高289m，属于300m级特高拱坝，抗震参数在300m级特高拱坝中居世界第一。
- (4) 首次在300m级特高拱坝全坝使用低热水泥混凝土。这在国际上尚属首例，其应用可保证大坝基本上不产生宏观裂缝，**打破了“无坝不裂”这个魔咒**。
- (5) **无压泄洪洞群规模世界第一**。电站3条泄洪洞均呈直线布置在左岸，最大泄量为12300 m³/s，单侧泄量世界第一。

白鹤滩水电站泄洪洞

案例

白鹤滩水电站布置的3条无压泄洪洞，工程规模世界第一，洞身具有高水头、大流量、高流速特点，是目前世界最大的无压泄洪洞群。2020年12月19日，泄洪洞工程顺利完工。3条泄洪洞最大泄量1.2万 m^3/s ，流速47 m/s ，18min能灌满西湖。

每条泄洪洞洞身均由进口渐变段、上平段、龙落尾段、挑流鼻坎4个部分组成，总长为6.7公里，洞身断面呈城门洞型。进水塔采用岸塔式结构，3个岸塔式进水口相对独立“一”字布置，塔顶高程834.0m，塔体尺寸40m \times 28m \times 69m(长 \times 宽 \times 高)。进口为短有压进水口，进水口底槛高程770.00m，塔顶高程834.0m（与大坝坝顶齐平）。



1 进水口。泄洪洞进水口位于左岸发电进水口与大坝之间，包括进水渠、进水塔和联系平台。3 个岸塔式进水口之间相对独立、“一”字齐平布置，从里到外依次编号为1#、2# 和3# 进水塔。每个进水塔之间通过混凝土联系平台连接交通和门机轨道，塔后回填混凝土与左岸坝顶平台衔接。

每个进水塔内都设置有一道事故检修闸门、一道工作闸门，其中检修闸门通过布置在进水塔顶部的门机进行启闭。检修闸门下游设2 个通气孔，对泄洪洞进水口段进行通气。弧形工作闸门由液压启闭机启闭，检修闸门至工作闸门之间的流道周边设钢板衬护。

2 泄洪洞洞身。鹤滩泄洪洞洞身部分为无压洞段，无压洞断面为圆拱直墙型，由上平段和龙落尾段两部分组成。龙落尾段位于上平段下游，由渥奇曲线段、斜坡段和反弧段三部分组成，洞身段采用预应力混凝土衬砌。基于**薄壁结构衬砌**混凝土的**智能温控技术**、**施工缝无**施工工艺，解决了衬砌混凝土

“无衬不裂”的世界难题，过流面不平整度小于3毫米，实现了**精准、平整光滑、无缺陷**，养护状态下呈现镜面映射效果，在行业内被誉为“**镜面混凝土**”。

3.出口段。采用挑流消能，反弧段直接与挑流鼻坎连接。

树立追求卓越、精益求精的岗位责任、工匠精神；

白鹤滩水电站

问题

- 1.白鹤滩水电站布置了几条泄洪洞？是有压洞还是无压洞？
- 2.泄洪洞进口的进水塔采用岸塔式结构？为什么？除了这种结构，还有哪些进口建筑物？
- 3.如图，白鹤滩水电站泄洪洞的进水口结构，请看图指出工作闸门、检修闸门、喇叭口、通气孔的位置。
- 4.白鹤滩水电站泄洪洞洞身断面为城门洞形，泄洪洞的洞身断面还有哪些？
- 5.该泄洪洞洞身采用混凝土衬砌，作用是什么？

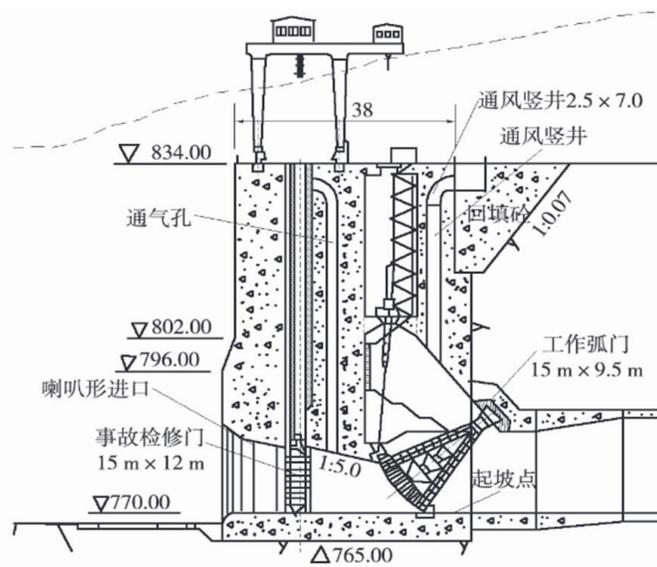


图 1 进水口结构



泄洪洞“镜面”混凝土质量检查

一、进口建筑物

问题1：泄洪洞进口的进水塔采用岸塔式结构？为什么？除了这种结构，还有哪些进口建筑物？

(1) 竖井式

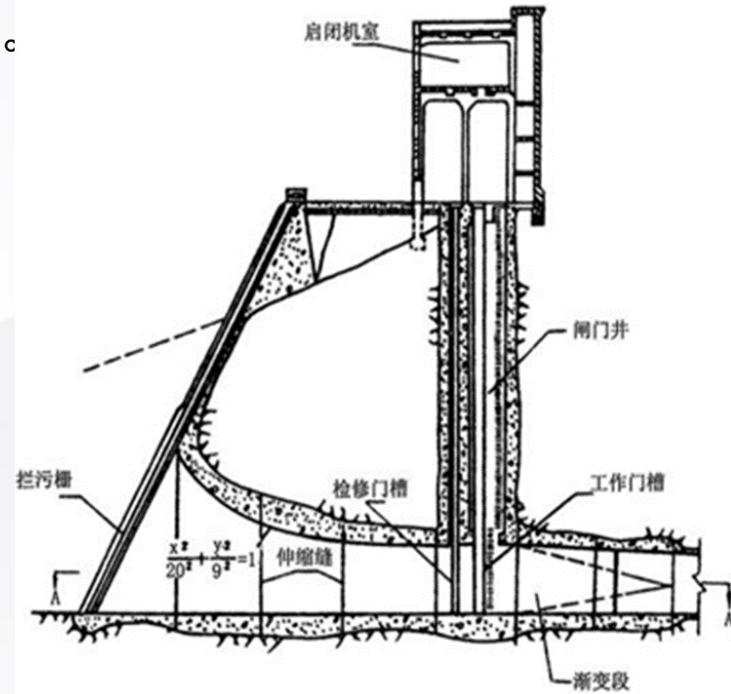
闸门竖井式进水口是岸式进水口的一种，在隧洞进口附近的岩体中开凿竖井，井顶布置启闭设备及启闭机室，进水口闸门井布置于山体竖井中，喇叭段入口设于岸坡上，喇叭段入口与闸门竖井之间流道为隧洞段，一般为有压水流。

优点：结构简单，节省工作桥，不受风浪和冰的影响，抗震及稳定性好。

缺点：竖井开挖困难，检修门前一段隧洞检修不便。

适用：河岸岩石坚固，开凿竖井无塌方危险。

{ 湿井：压力洞平面闸门的竖井，关门后有水。
{ 干井：无压洞弧形闸门的竖井，关门后无水。



一、进口建筑物

(1) 竖井式

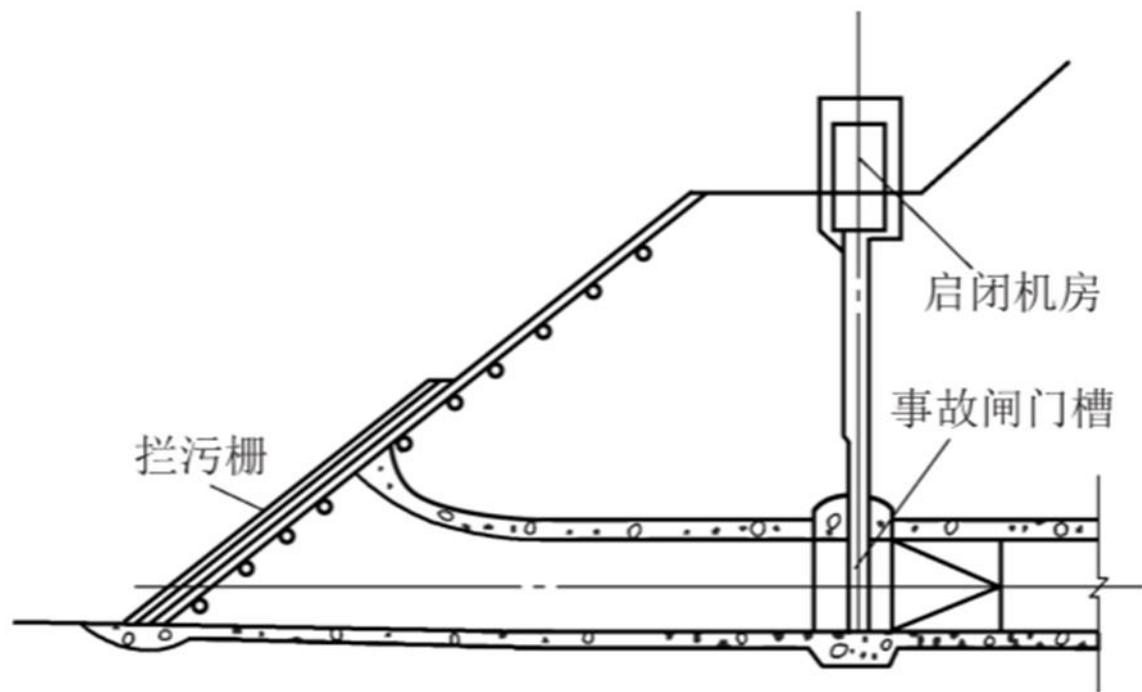


图 6 竖井式进水口

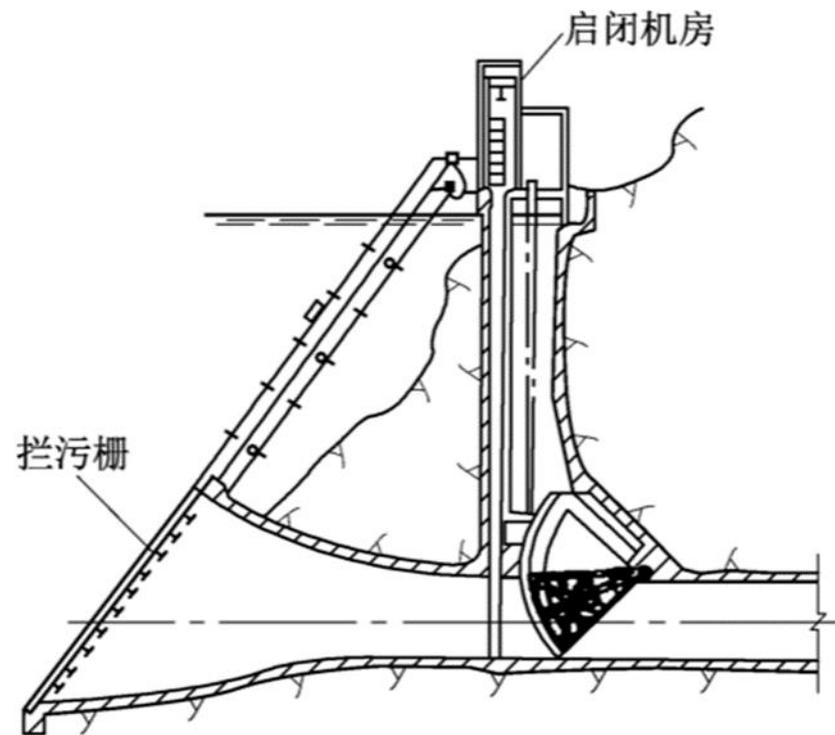


图 7 竖井式（泄水）进水口

一、进口建筑物

(2) 塔式进口

塔式进口建筑物是独立于布置进水口。塔底设闸门，塔顶设检修平台和启闭机，用工作桥与岸坡相连。

优点：布置比较紧凑，闸门开启比较方便可靠。

缺点：受风浪、冰、地震的影响大，稳定性相对较差，需要较长的工作桥。

适用：河岸(库岸)地形过缓或因地质条件不宜在岸边设置进水口的引水工程。塔的结构形式有封闭式和框架式两种。

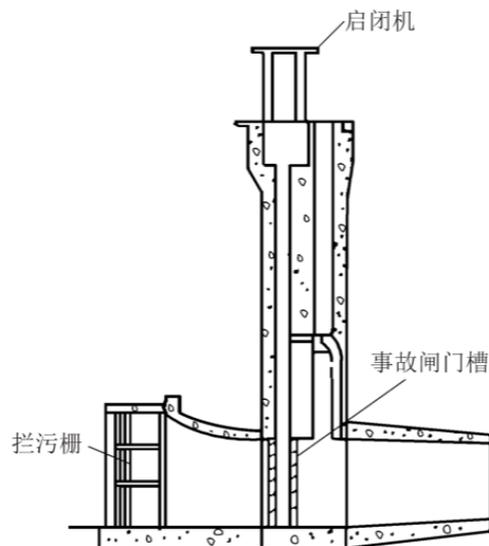


图 8 塔式进水口 (矩形)

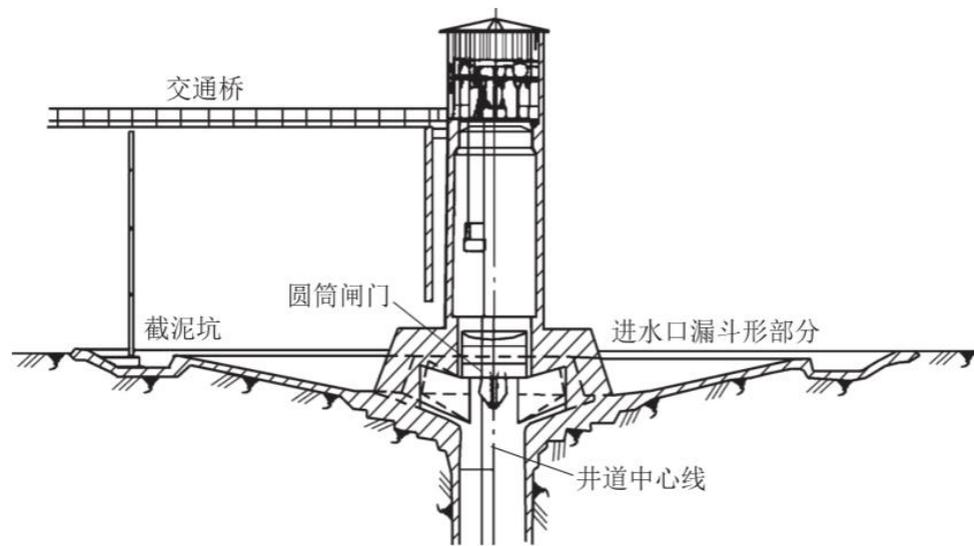


图 9 塔式进水口 (圆形)

一、进口建筑物

(3) 岸塔式

靠在山体开挖后洞口岩坡上的进水塔，根据岩坡的稳定情况，塔身可以是直立的或倾斜的。其稳定性比塔式的好，还可对岩坡有一定的支撑作用，施工方便，不需要工作桥。适用于岸坡较陡、岩体比较坚固稳定的情况。

优点：稳定性比塔式好，造价比塔式省，施工方便，地形、地质条件许可时优先选用。

缺点：若倾斜，闸门也斜，启门力增加，不易靠自重关闭闸门。

适用：进口处岩石坚固，可开挖成近于直立的陡壁时。

一、进口建筑物

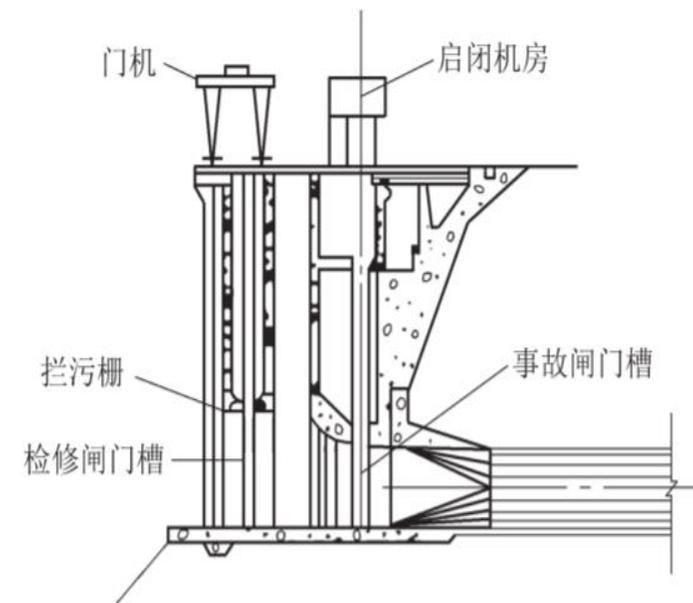
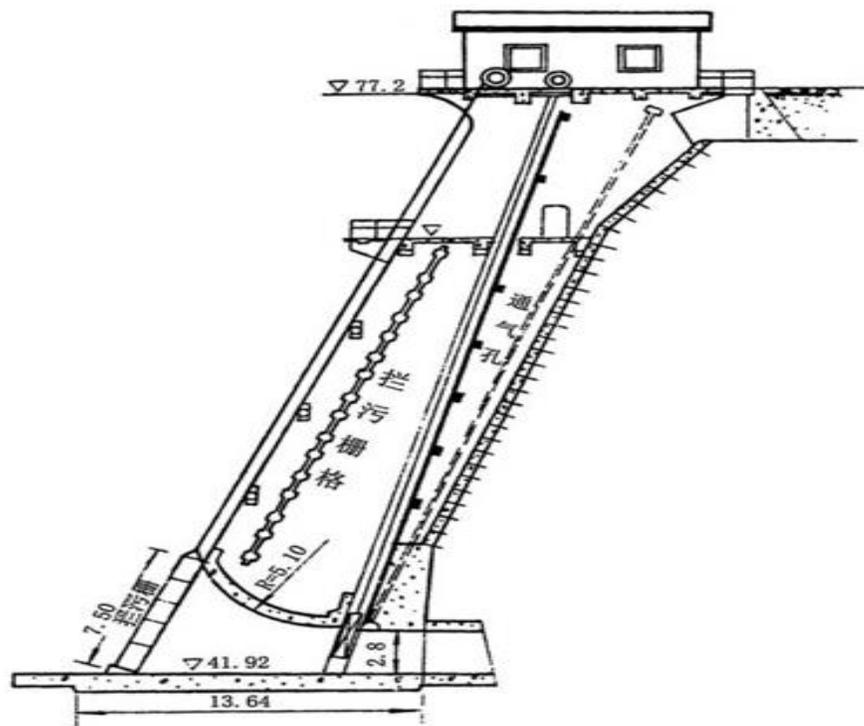


图4 岸塔式进水口

岸塔式进口建筑物

一、进口建筑物

(4) 斜坡式

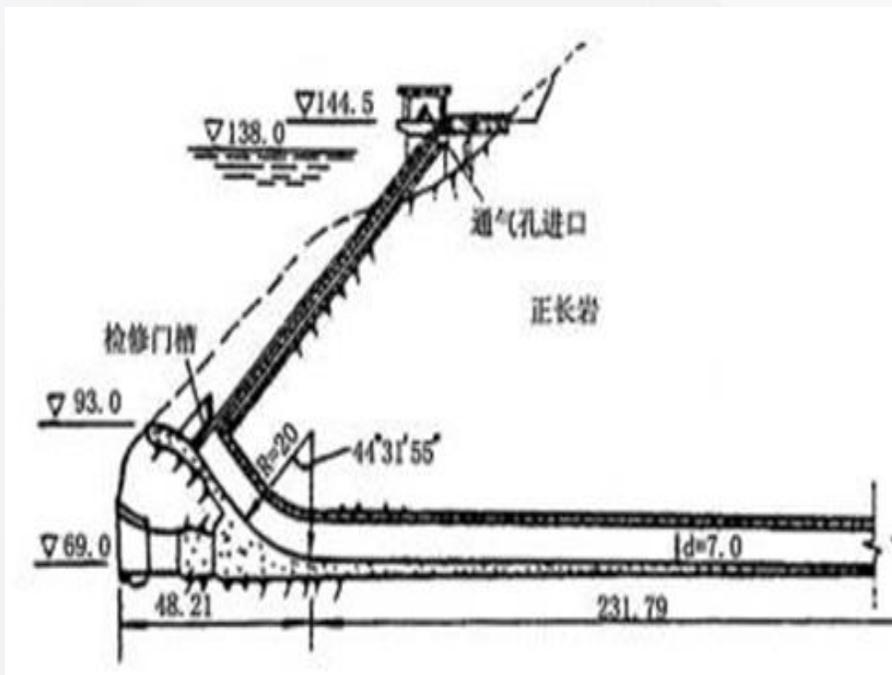
斜坡式进水口是在较完整的岩坡上进行平整、开挖、护砌而修建的一种进水口。闸门和拦污栅的轨道直接安装在斜坡的护砌上。

优点：结构简单，施工、安装方便，稳定性好，工程量小。

缺点：由于闸门倾斜，闸门不易依靠自重下降，闸门面积加大。

适用：斜坡式进口一般只用于中、小型工程，或只用于安装检修闸门的进口。

一、进口建筑物



斜坡式进口建筑物

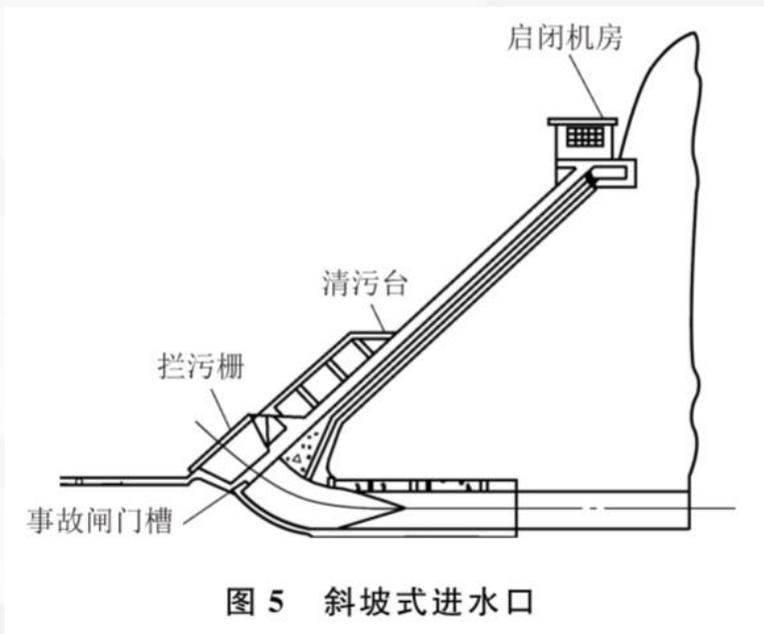


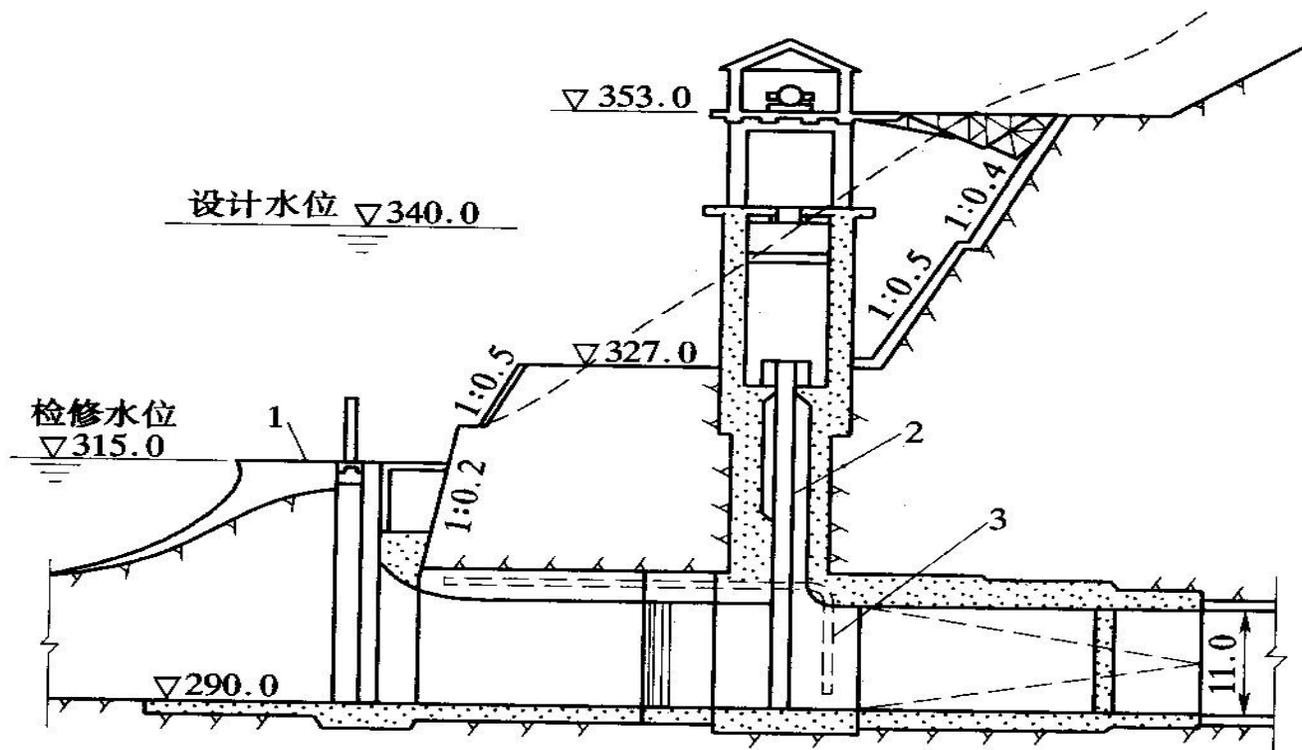
图5 斜坡式进水口



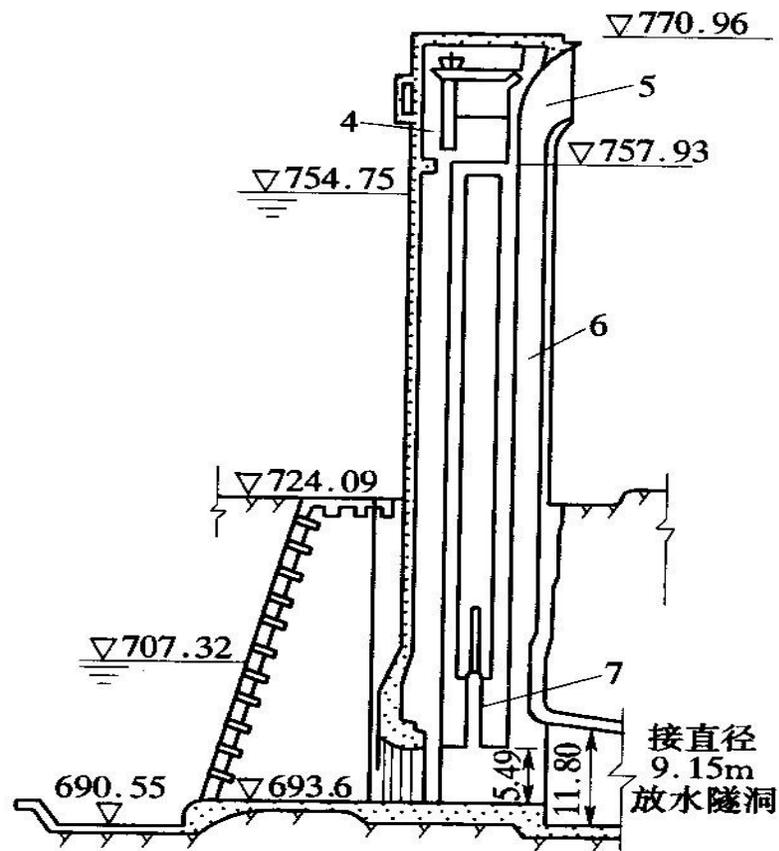
某水库斜坡式进口建筑物

一、进口建筑物

组合式进水口



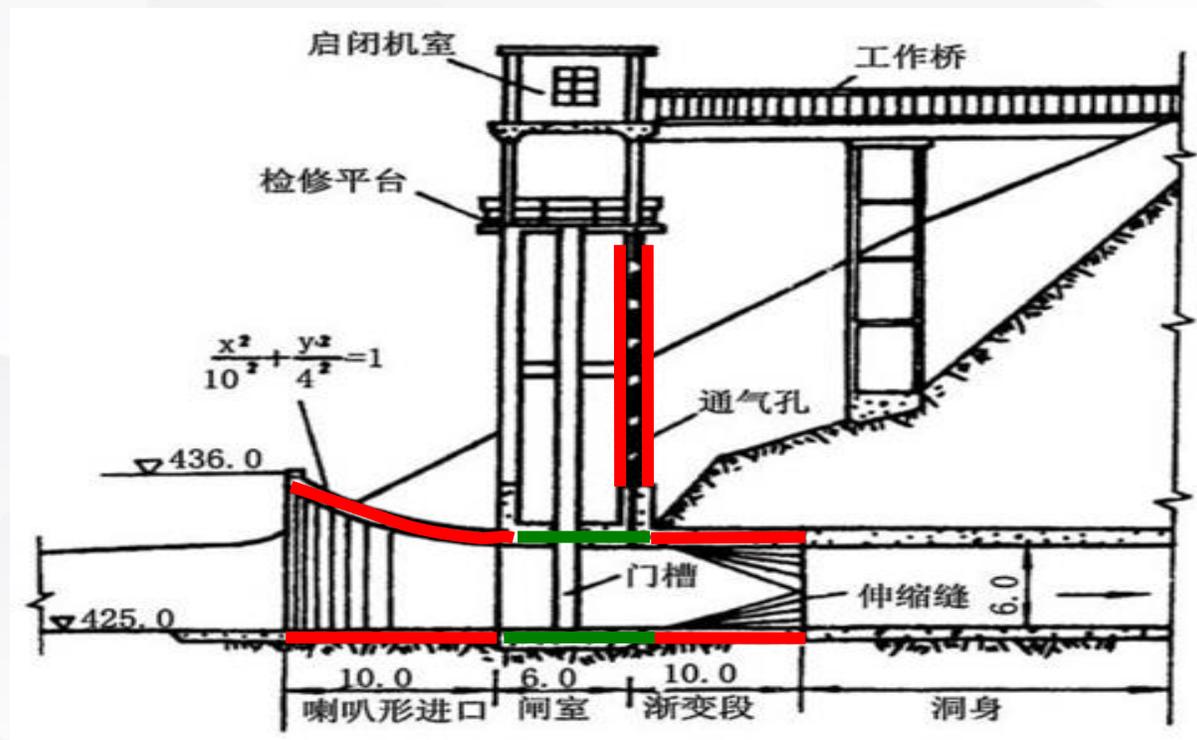
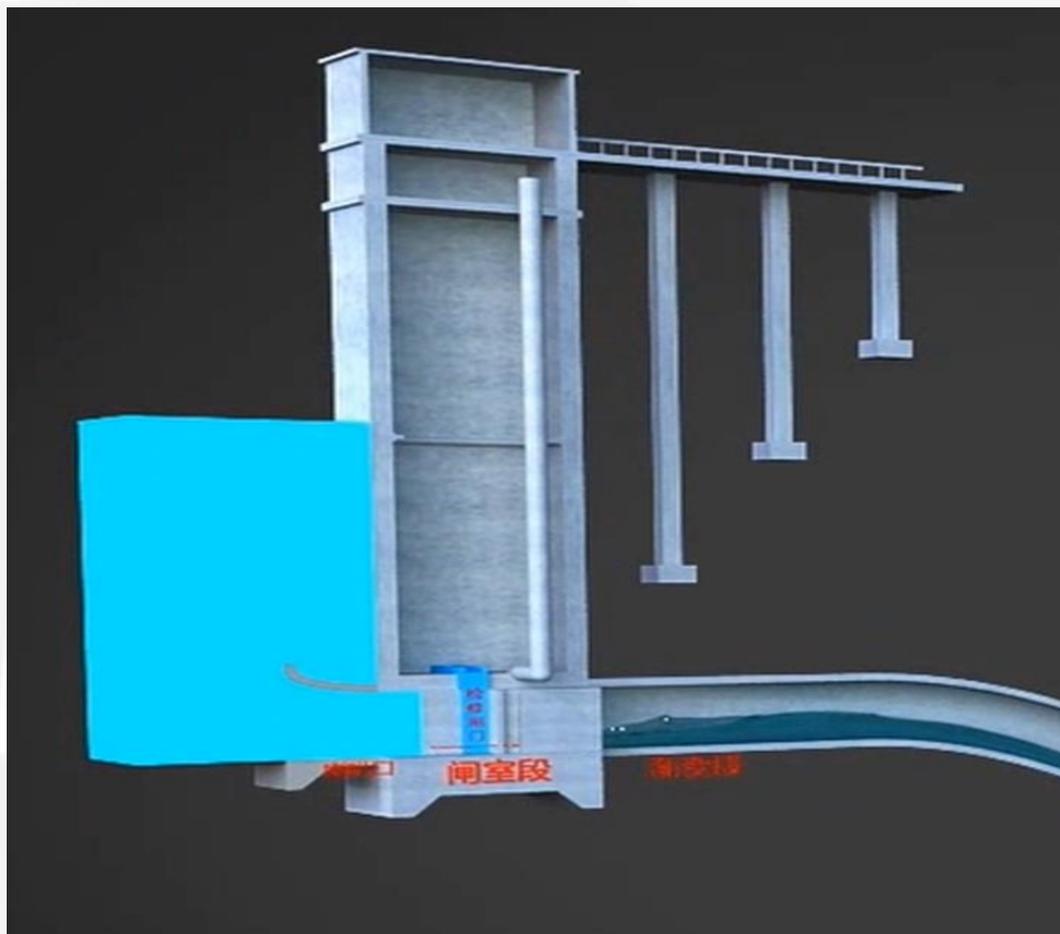
(a) 三门峡泄洪洞进水口;



(b) 麦加放水隧洞进口

二、进口段

进口段的组成包括：进水喇叭口、闸门室、通气孔、平压管和平压管渐变段。



二、进口段

水工隧洞的进口喇叭口



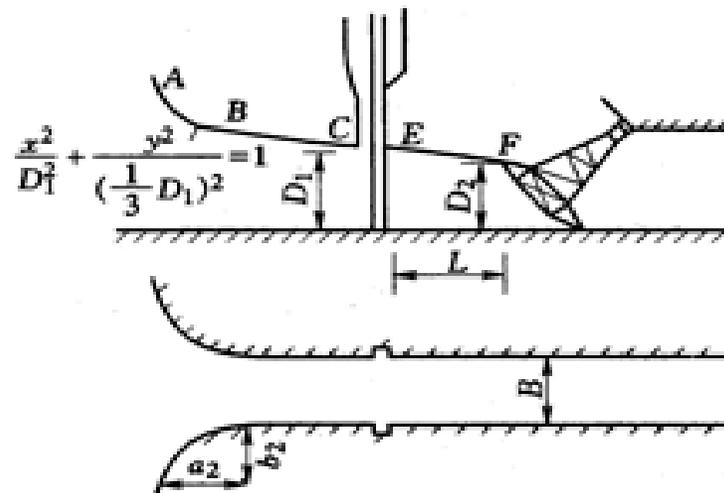
二、进口段

(1) 进水喇叭口

进水口体形应与孔口水流的流态相适应，减小局部水头损失，以提高泄流能力。

隧洞进口常采用：顶板和两侧边墙顺水流方向**三向逐渐收缩的平底矩形断面**，形成喇叭口状。

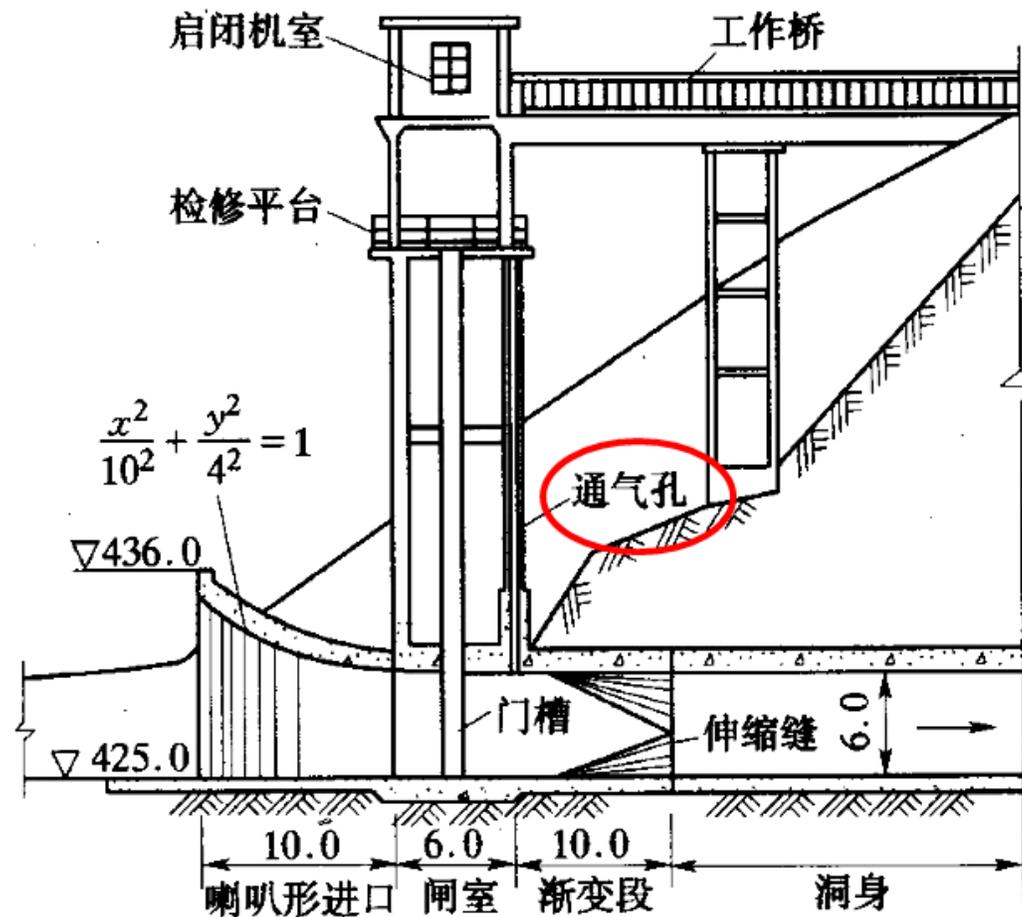
深式无压隧洞的进水口是一短管型压力段，为了增加压力段的压力，改善其压力分布，常在进口段顶部设置倾斜压坡。



二、进口段

(2) 通气孔

通气孔承担着补气、排气双重任务。在工作闸门快速关闭时承担补气作用，以防产生负压，稳定流态，避免闸门振动。检修时，检修门下放洞内补气，检修完毕，平压管充水，通气孔排气。

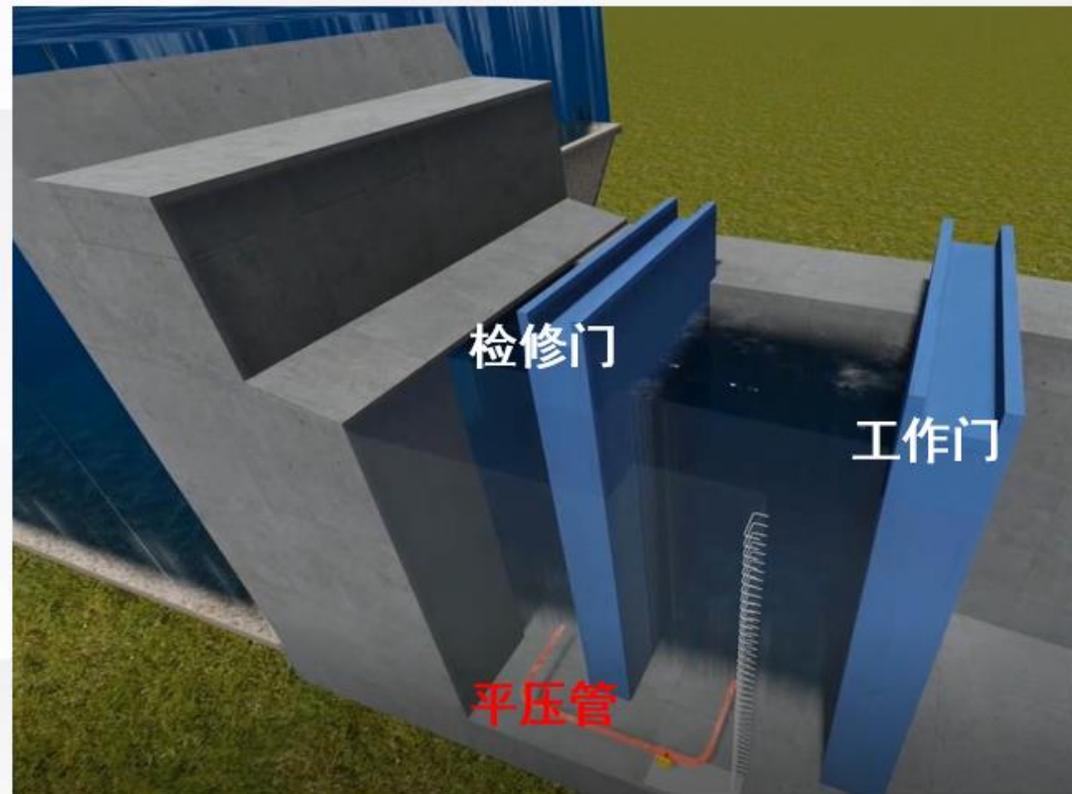
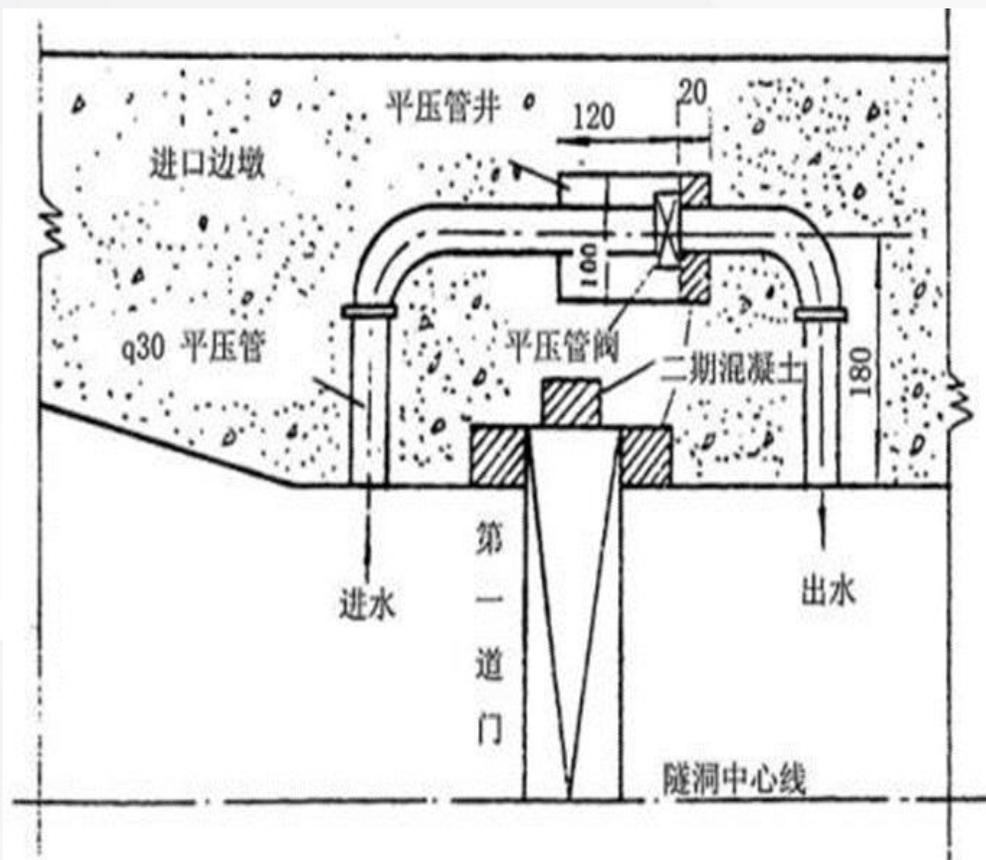


(a)

二、进口段

(3)平压管

为了减小检修门的启门力，在检修门与工作门间设平压管，与水库相通，使检修门能在静水中开启。面积由充水时间决定。



二、进口段

(4) 拦污栅

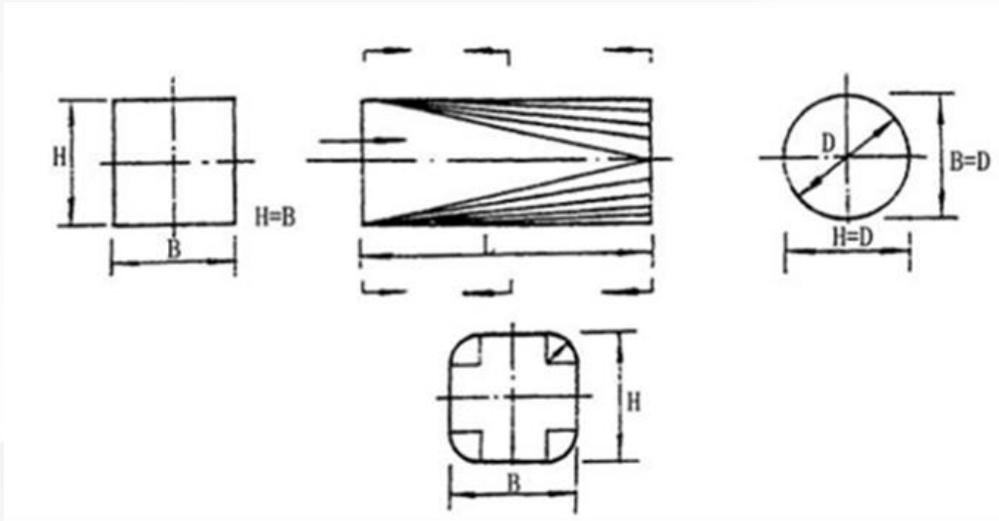
进口处的拦污栅是为了防止水库中的漂浮物进入隧洞而设置的。泄水隧洞一般不设拦污栅；引水发电的有压隧洞进口应设置较密的细格栅。

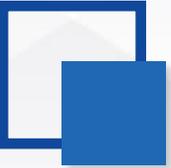


二、进口段

(5) 渐变段

闸门断面为矩形断面需渐变为洞身段的圆型或城门洞形。需设渐变段。渐变段的长约为2 - 3倍洞径，收缩率小于1: 5 - 1: 8。





二、进口段

(6) 闸室

a. 设弧形门情况：

不需门槽，水流平顺，启门力小，应力集中严重；止水设在前部，后部无水无压力；称为“**干井**”

b. 设平板闸门情况：

需门槽，槽中有回流，易空化、振动等；启门力大；止水设在后部，门井内有水称为“**湿井**”。

三、洞身段

1. 洞身断面形式及尺寸

(1) 无压洞断面形式

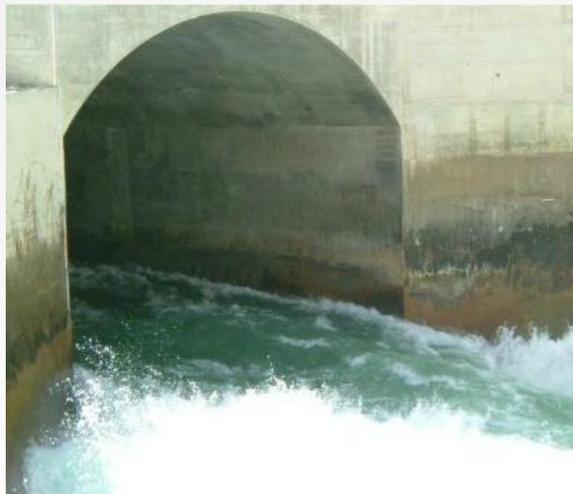
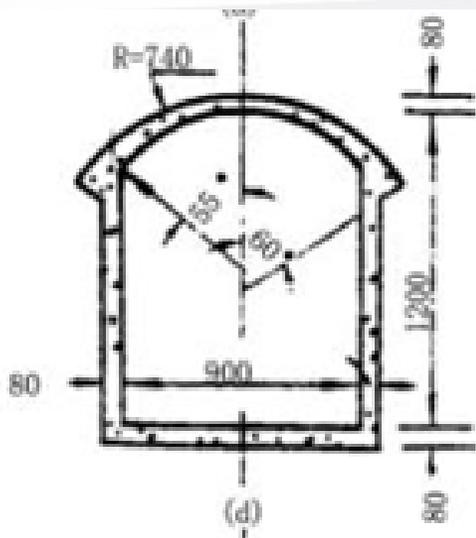
无压洞常为城门洞形，顶拱中心角 90° - 180° 之间，断面高宽比为1-1.5。断面尺寸主要由泄流能力及洞内水面线确定；当侧向围岩压力较大时，也采用马蹄形断面。

(2) 有压洞断面形式

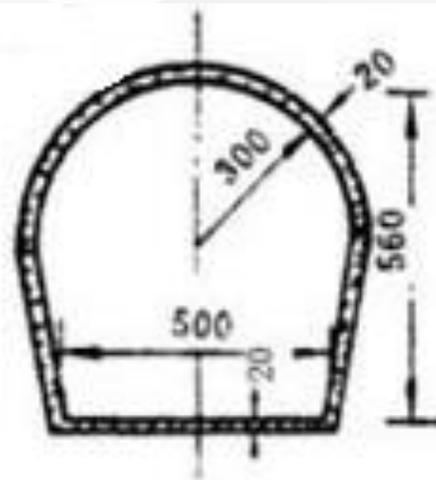
常采用圆形断面，圆形断面流态好，受力条件好，过水能力强。为保证洞内处于有压流态，由能量方程求出压坡线，洞顶一般保持2m以上的余幅。为减免空蚀，可通过缩小出口面积80%-85%增加压力。

三、洞身段

无压洞



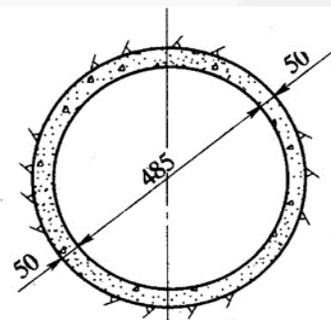
城门洞形断面



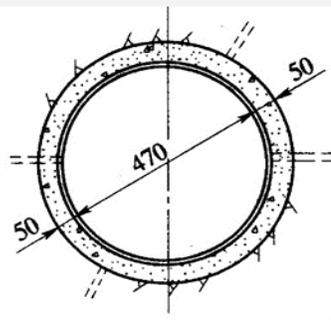
马蹄形断面

三、洞身段

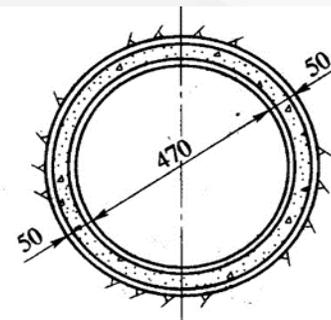
洞身断面形式



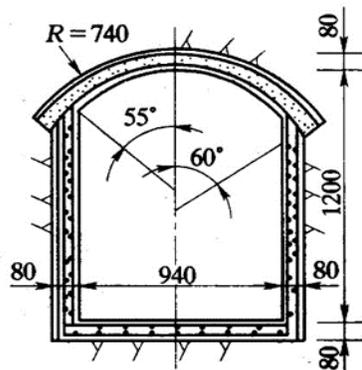
(a)



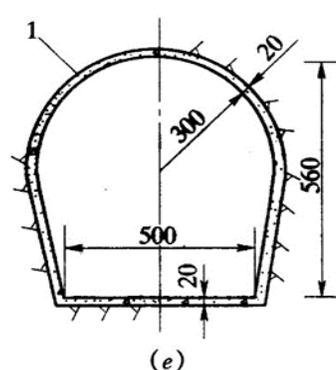
(b)



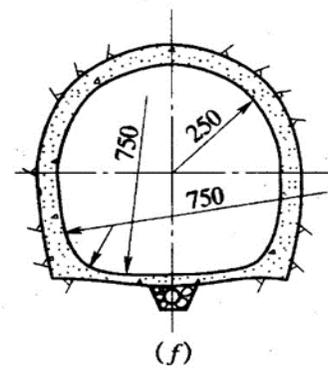
(c)



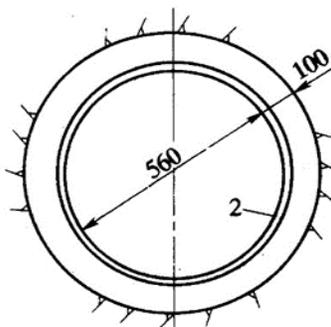
(d)



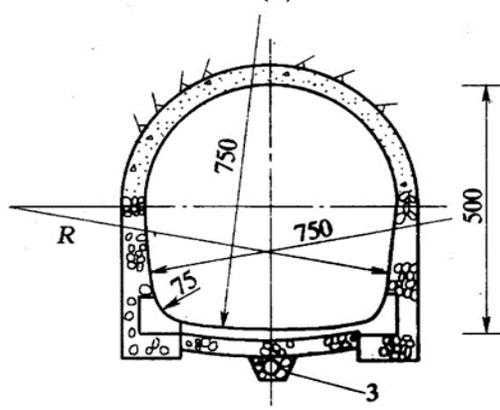
(e)



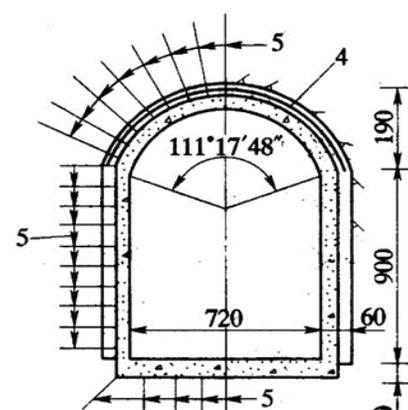
(f)



(g)



(h)



(i)

三、洞身段

2. 洞身衬砌的类型及构造

衬砌是指沿开挖洞壁而做的人工护壁，主要作用是：

- ①阻止围岩变形的发展，保证围岩的稳定；
- ②承受围岩压力、内水压力和其它荷载；
- ③防止渗漏；
- ④保护围岩；
- ⑤平整围岩，减小表面糙率，增大过流能力；
- ⑥满足环境保护的要求。



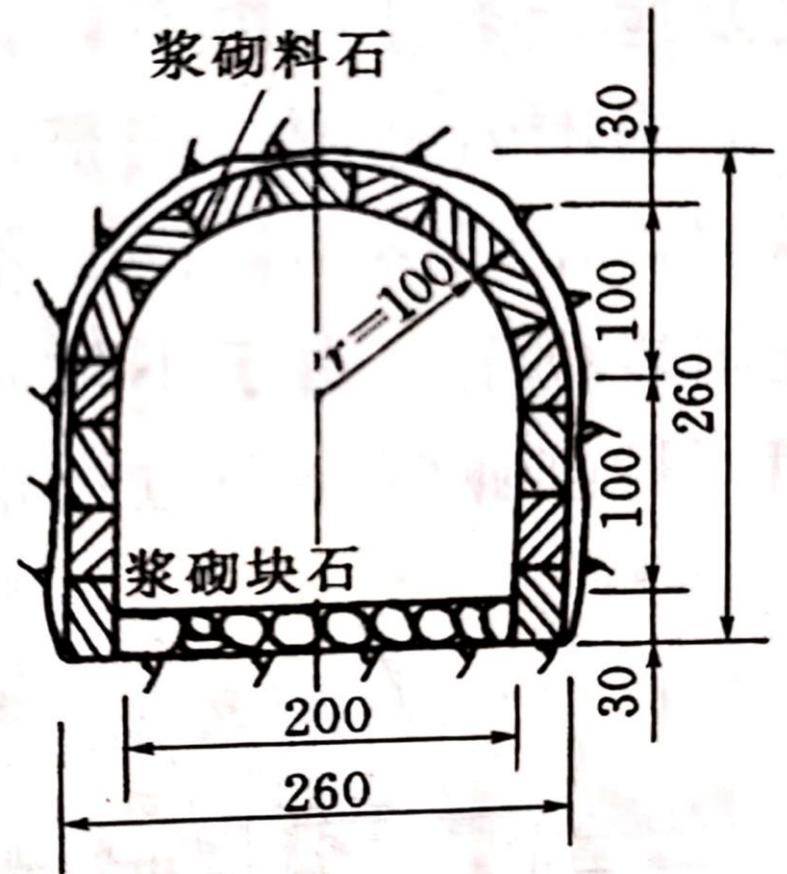
三、洞身段

(1) 平整衬砌

作用：减糙但不承载，防止渗漏，保护围岩。

材料：混凝土，喷混凝土（5~15cm）

适用于：水头低、岩层较好的情况



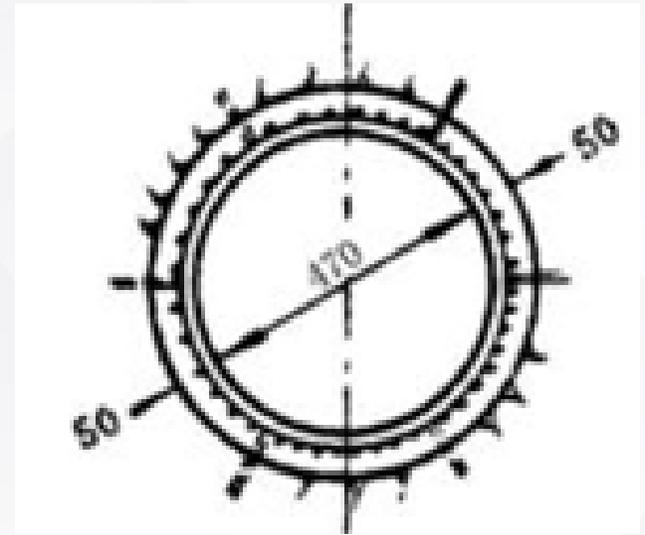
三、洞身段

(2) 单层衬砌（受力衬砌）

作用：承载、减糙、防冲防渗等；

材料：混凝土、钢筋混凝土（ $\geq 25\text{cm}$ ）；

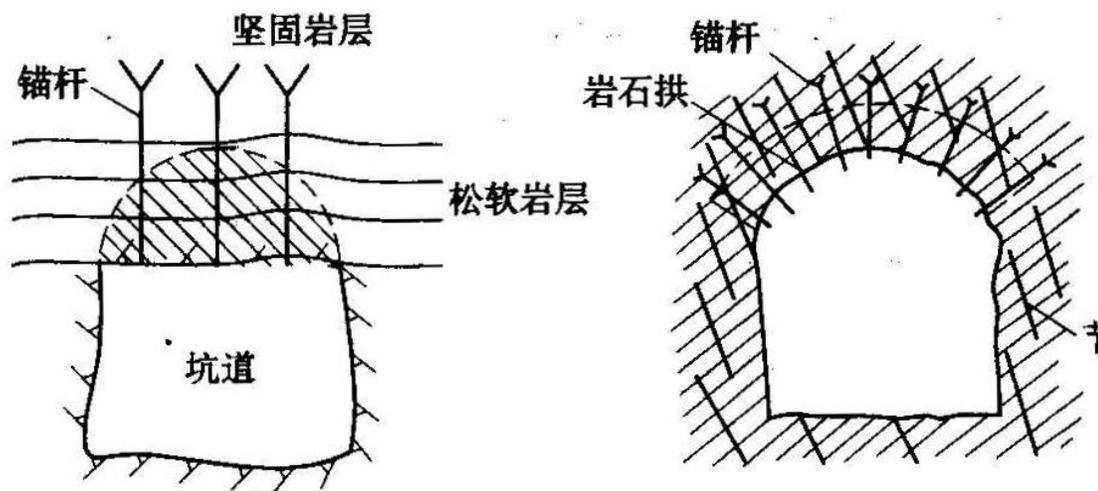
适用于：中等地质条件、断面较大、水头较高的情况



三、洞身段

(3) 锚喷衬砌

锚喷衬砌是利用锚杆和喷混凝土加固围岩的总称。



8月28日，白鹤滩左岸三号泄洪洞龙落尾段开挖支护形象 摄影：周吉

三、洞身段

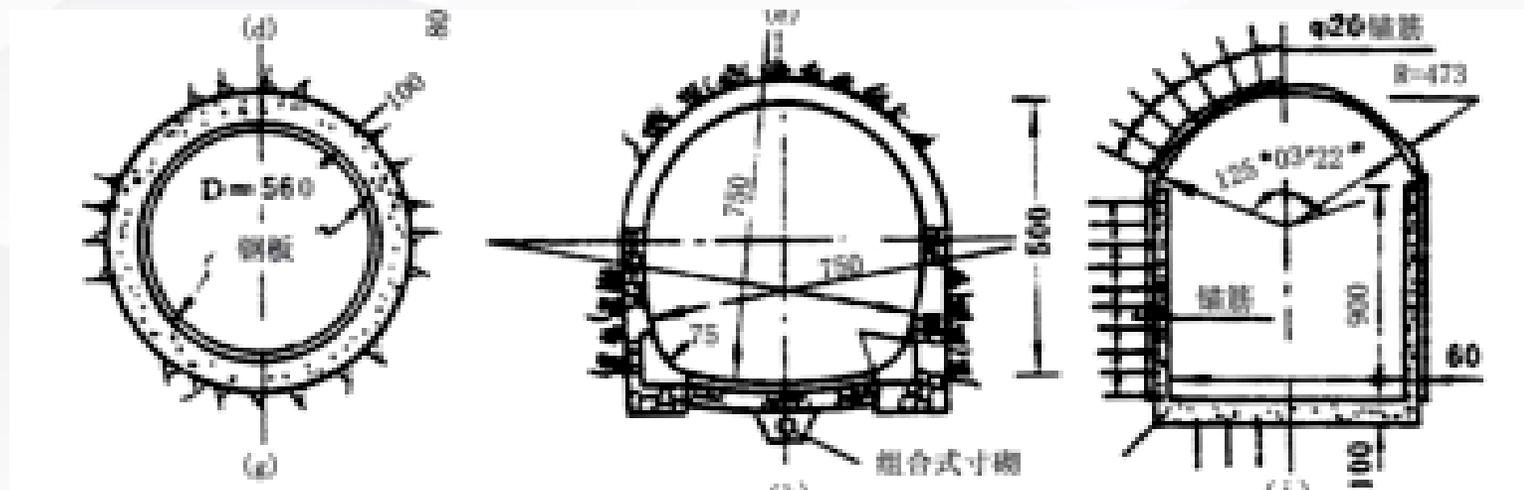
(4) 组合式衬砌

据开挖断面周边不同部位衬砌受力特点和运用要求，可采用衬砌材料组合而成。

组合 1：内层用钢板或钢丝网喷浆；外层用砼或钢筋砼

组合 2：顶部拱用砼；边墙用浆砌石

组合 3：顶部拱用喷锚支护；边墙、底板用混凝土



三、洞身段

(5) 预应力衬砌

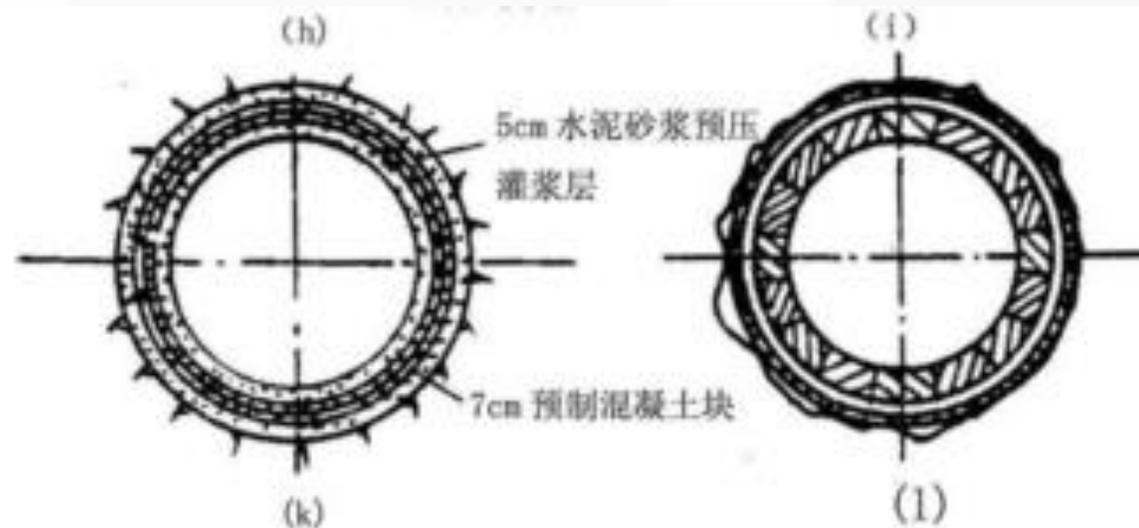
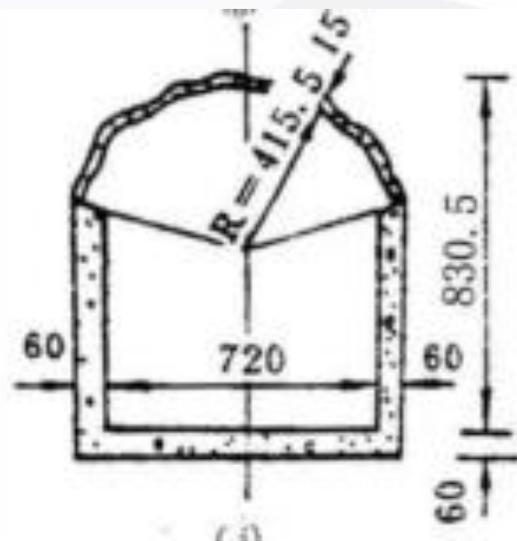
优点：抵消拉应力，减小衬砌厚度，增强抗裂等。

缺点：工序多，施工繁琐，技术要求高

方法：压浆式、钢箍式等，以前者用得较多

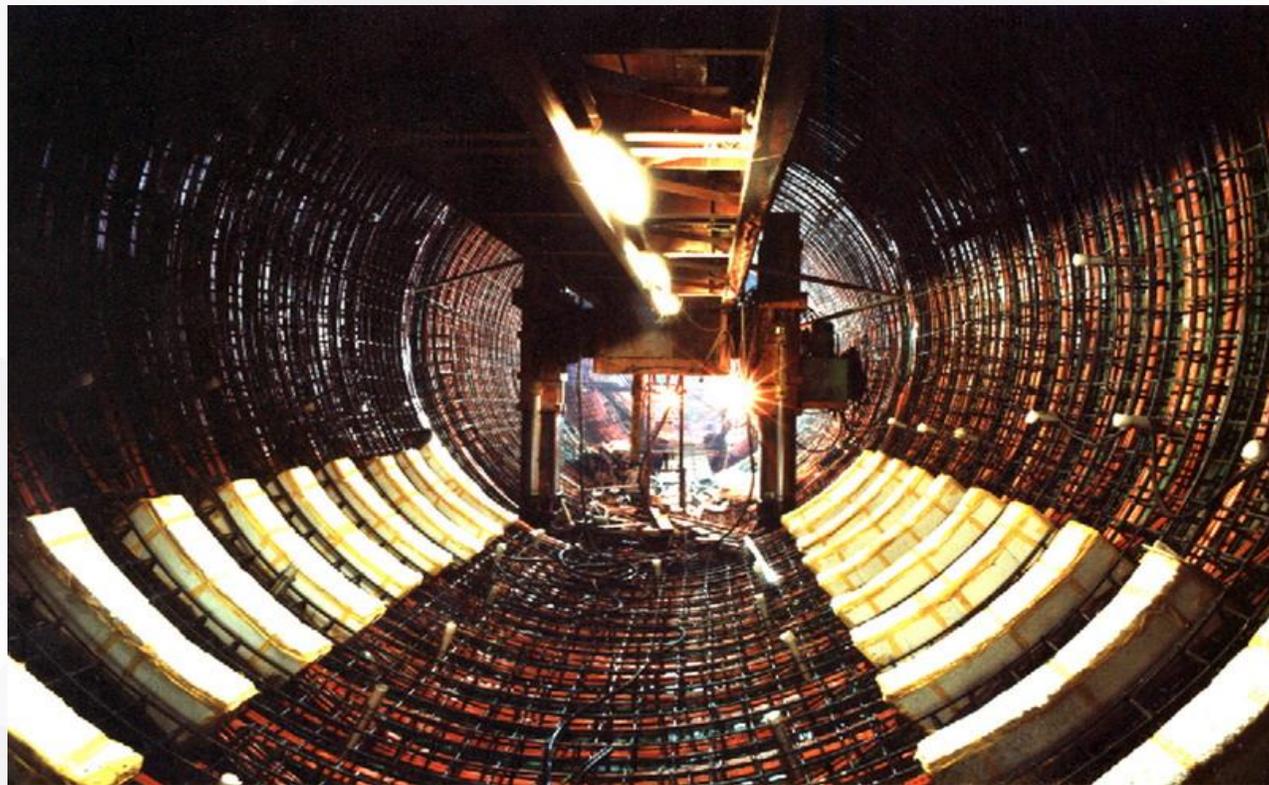
施工工艺：衬砌分两层，层间留有3~5cm空隙，以便灌浆预加应力，灌浆用膨胀水泥，对层间衬砌预加应力。

适用于：高水头圆形有压隧洞。



三、洞身段

衬砌施工



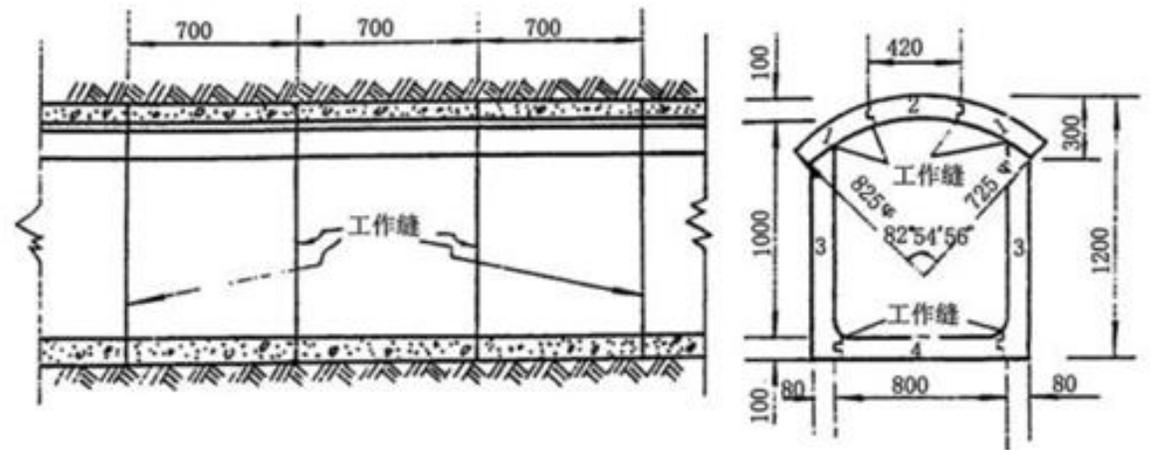
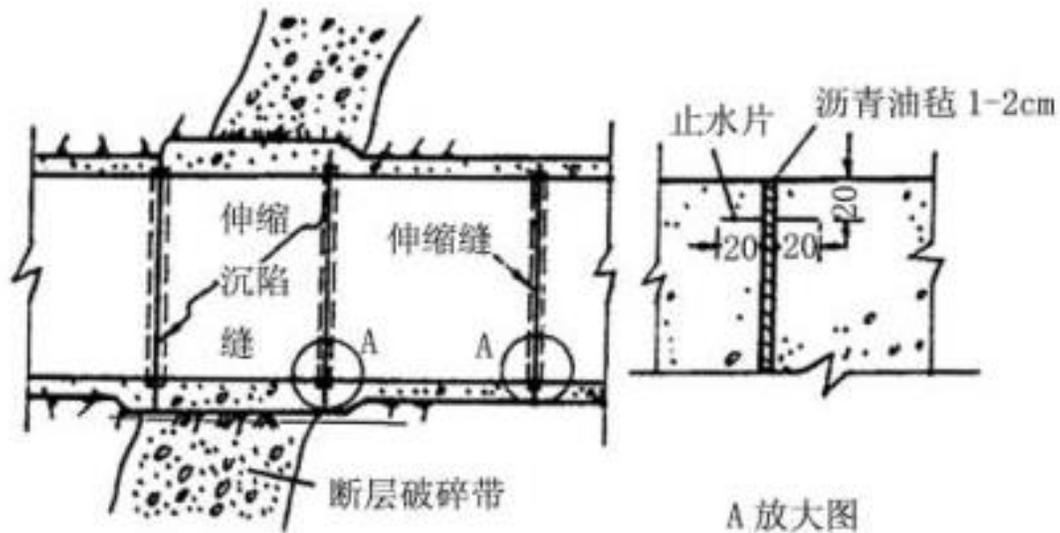
三、洞身段

(6) 衬砌的分缝及止水

为满足施工能力、防止不均匀沉陷，对衬砌应进行分缝。

纵缝——设在顶拱与边墙、底板的交界处；**横缝 (伸缩缝)**——间距一般为6~12m；

沉陷缝——设在地质条件较差的断层处或破碎带处；一般情况下各类缝内均应设止水。



三、洞身段

(7) 灌浆

1) 回填灌浆

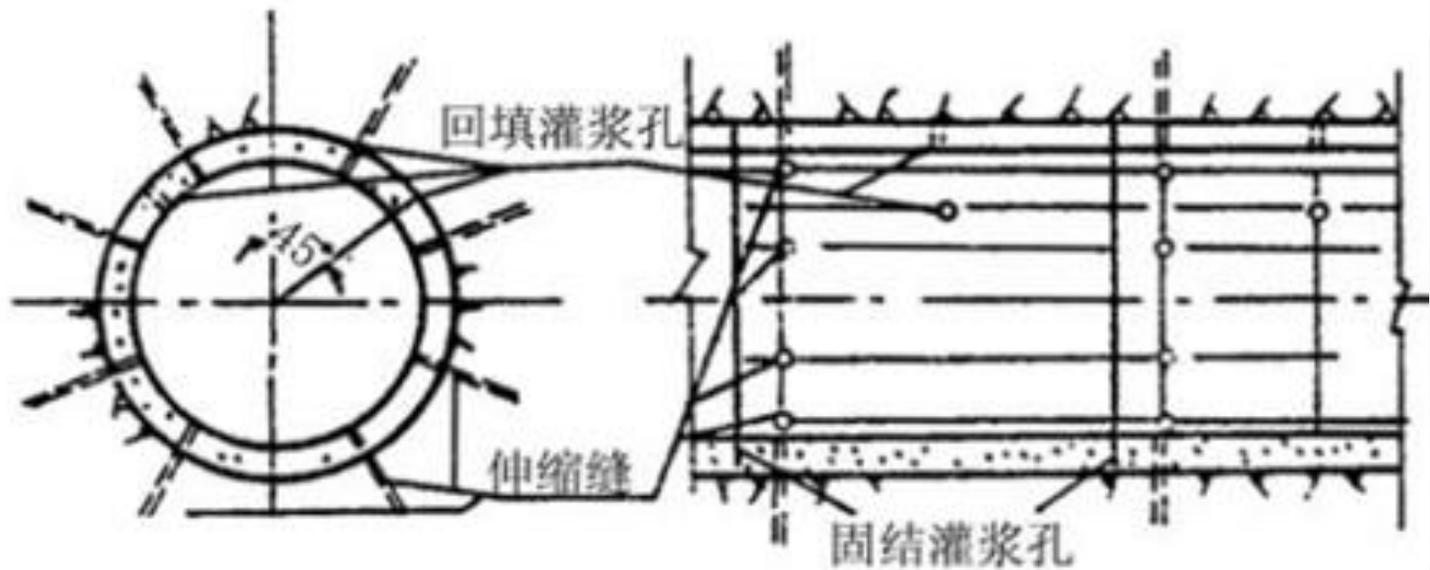
填充衬砌与围岩之间的空隙，使之紧密结合，共同受力，改善传力条件和减少渗漏。

灌浆范围：顶拱中心角 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ；

灌浆压力： $0.2\sim 0.3\text{Mpa}$ ；

孔排距： $2\sim 6\text{m}$ ；

深度：大于 5cm 。



三、洞身段

2) 固结灌浆

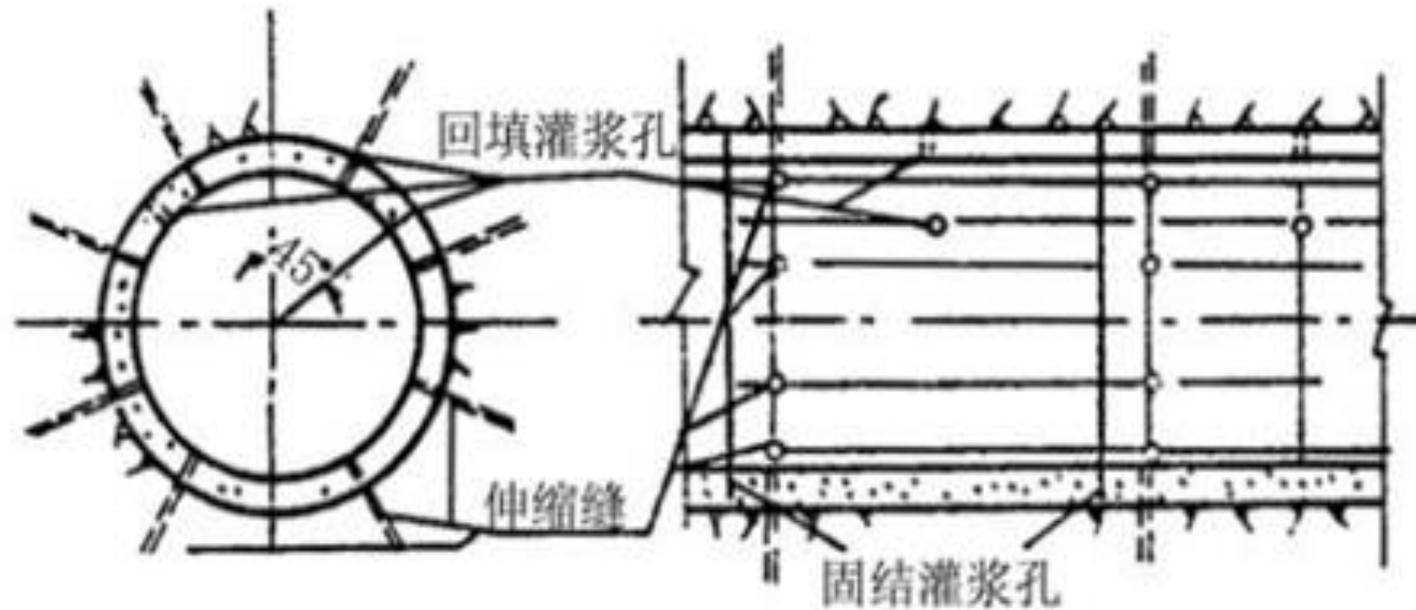
目的在于加固围岩，提高围岩整体性，减小围岩压力，保证围岩弹性抗力，减小渗漏。

灌浆范围：全断面；

灌浆压力：1.5~2.0倍内水压力；

孔排距：2~4m，每排不少于6孔；

深度：大于1倍洞径。



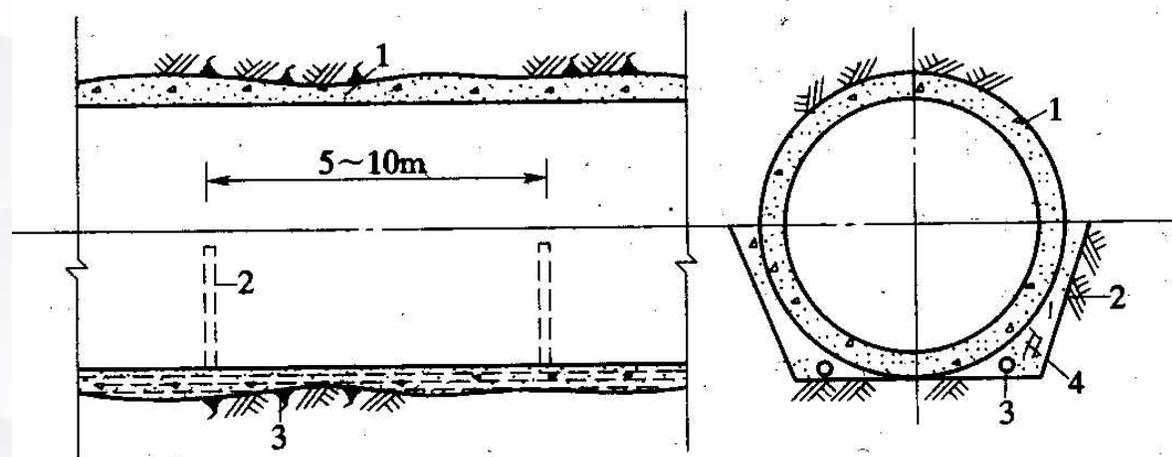
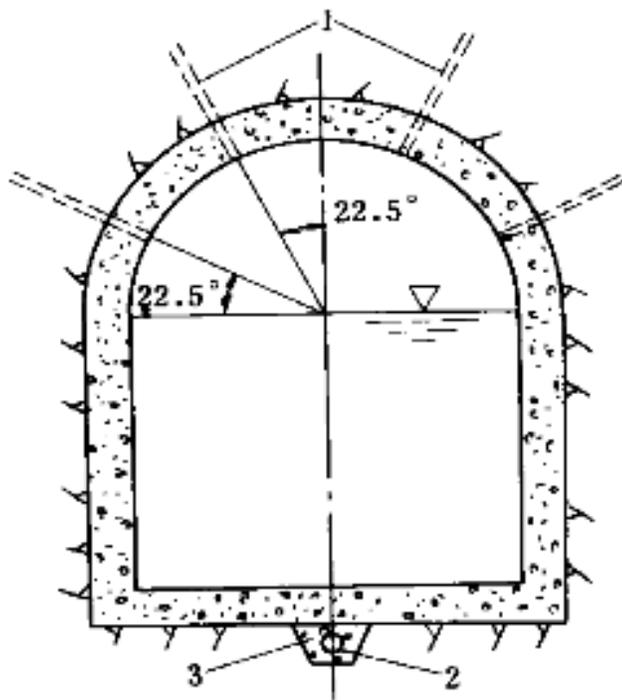
三、洞身段

(8) 排水

目的降低作用在衬砌外壁上的外水压力。

无压洞：采用径向排水管，将外水直接排至洞内。

有压洞：沿纵向设暗排水管，收集渗水排向下游。



四、洞出口段及消能设施

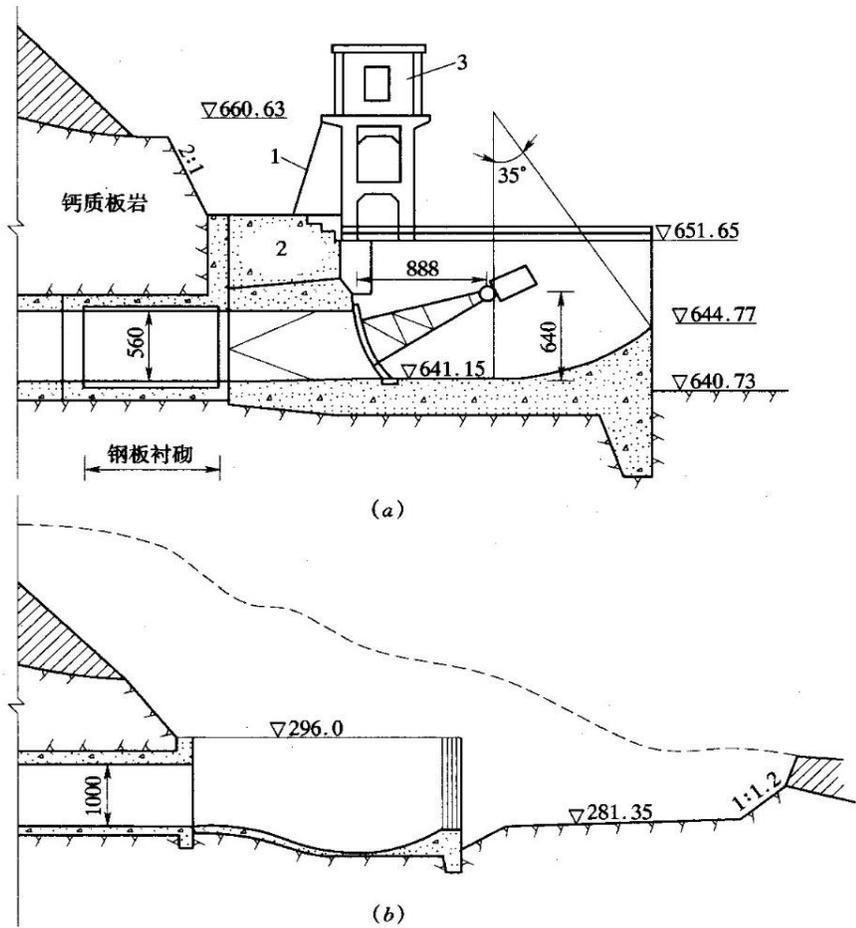
（一）出口段结构体型

- 1.有压：出口处设闸门，因此设闸室，用以布置闸门及相应的启闭设备，门前设渐变段，门后接消能设施。
- 2.无压：出口处无闸门，因此其型式相对简单，仅设门框，以防洞脸及其上部岩体崩塌，洞身直接与消能设施相连。

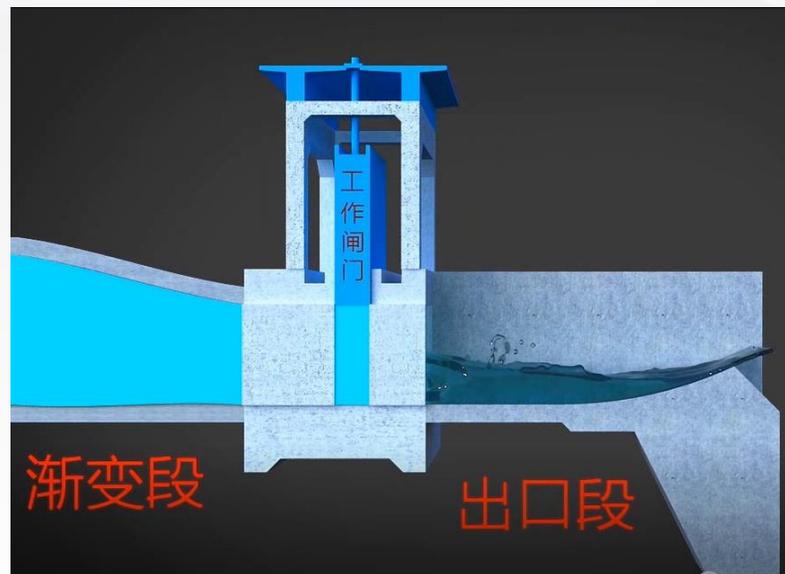
（二）消能方式

- 1.挑流消能
- 2.底流消能
- 3.窄缝式挑坎消能
- 4.洞中突扩消能

四、洞出口段及消能设施



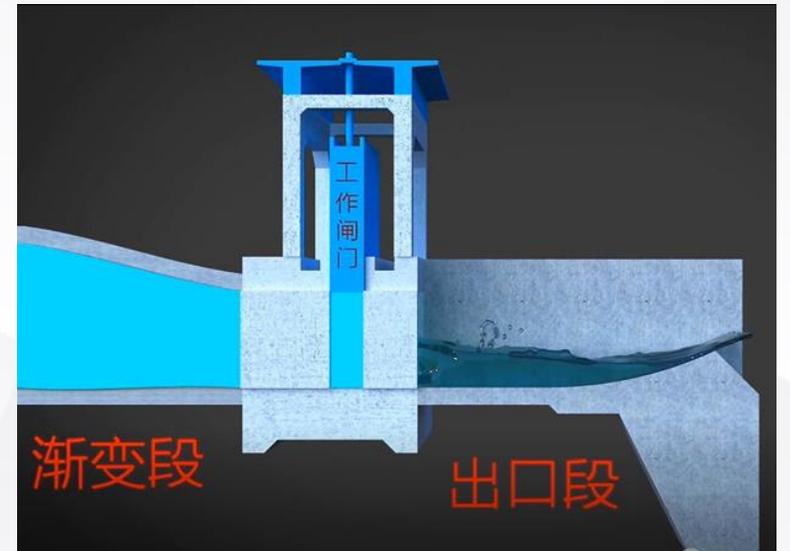
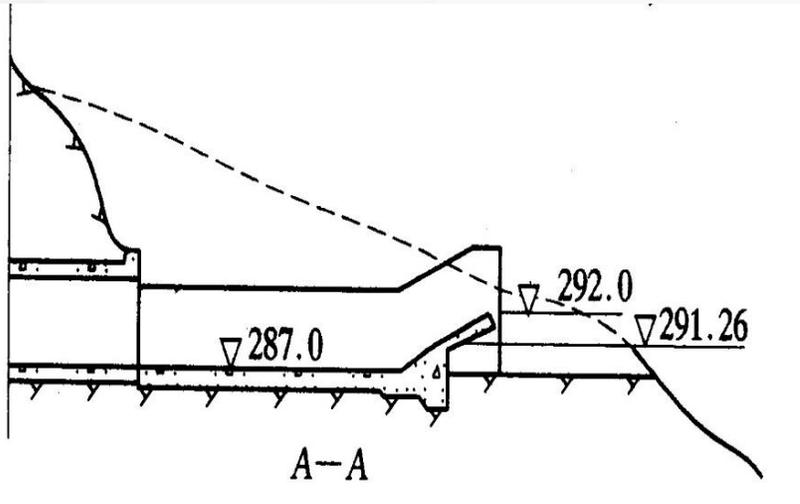
1—刚梯； 2—混凝土压重； 3—启闭机室



四、洞出口段及消能设施

挑流消能

当隧洞出口高程高于下游水位，且地形地质条件允许时，采用扩散式挑流消能比较经济合理。结构简单，施工方便。

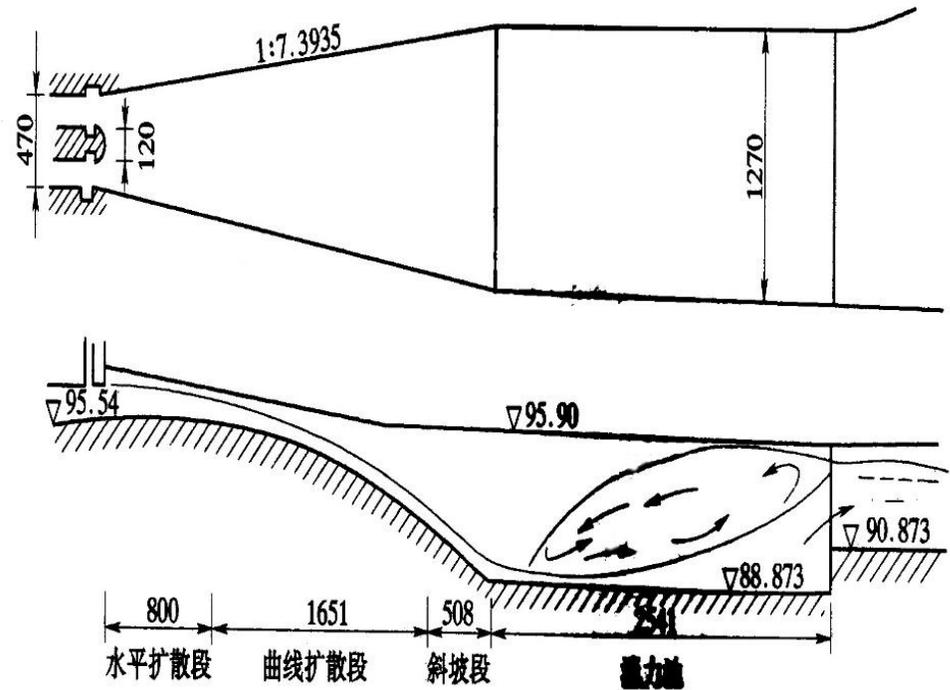


四、洞出口段及消能设施

底流消能

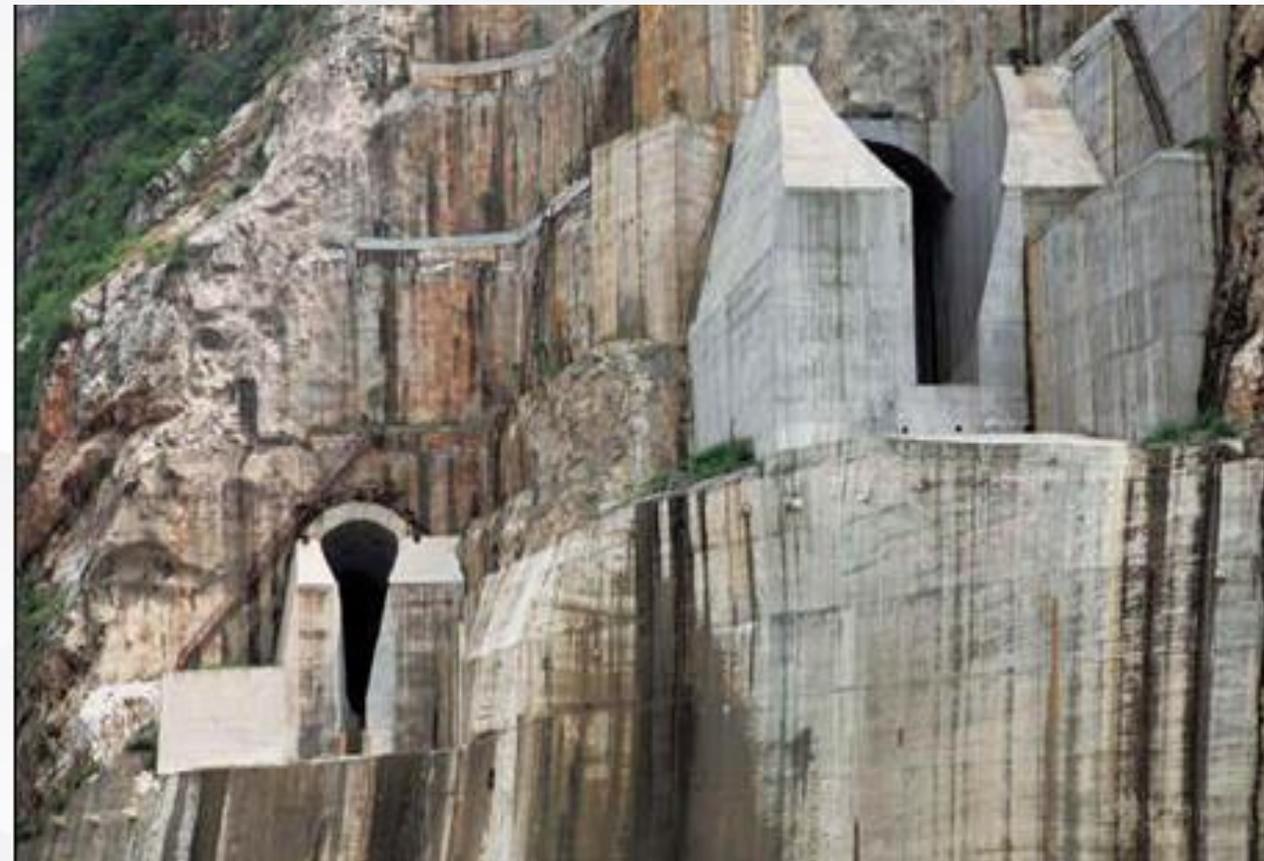
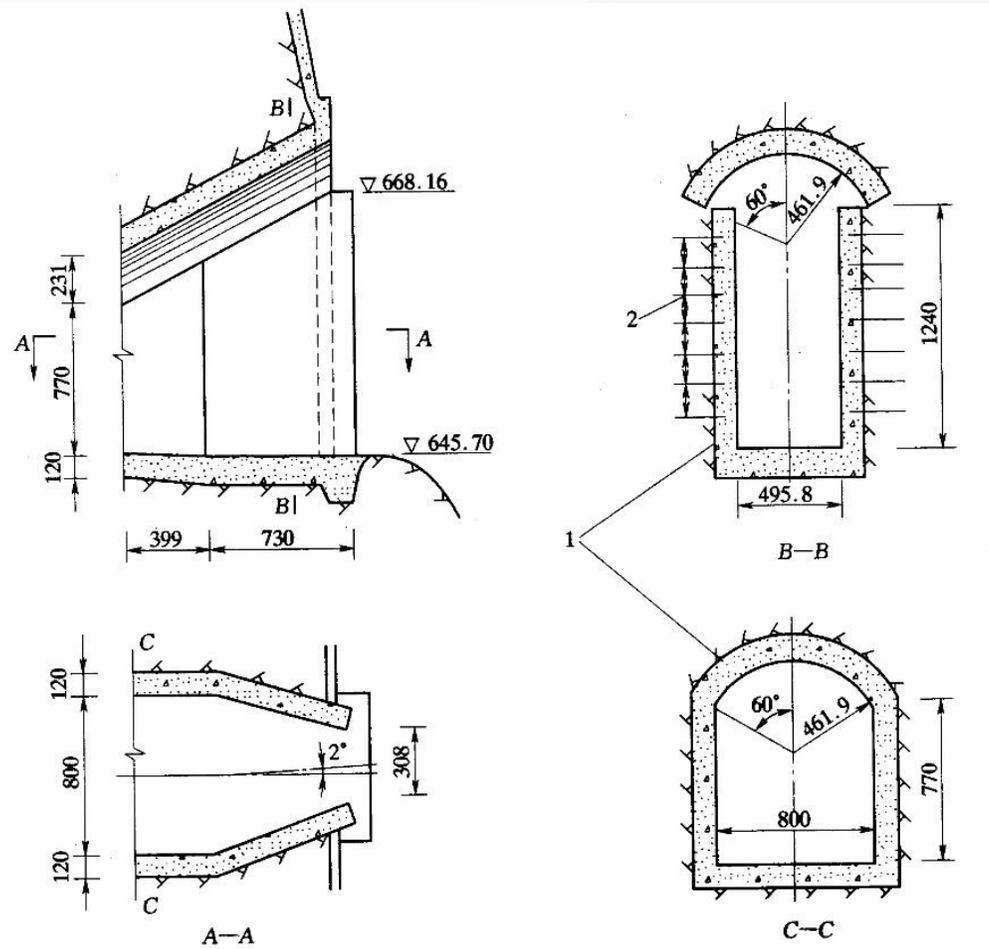
当隧洞出口高程接近下游水位时，也可采用扩散式底流水跃消能。

底流消能具有工作可靠、消能比较充分、对下游水面波动影响范围小的优点，但缺点是开挖量大、施工复杂、材料用量多、造价高



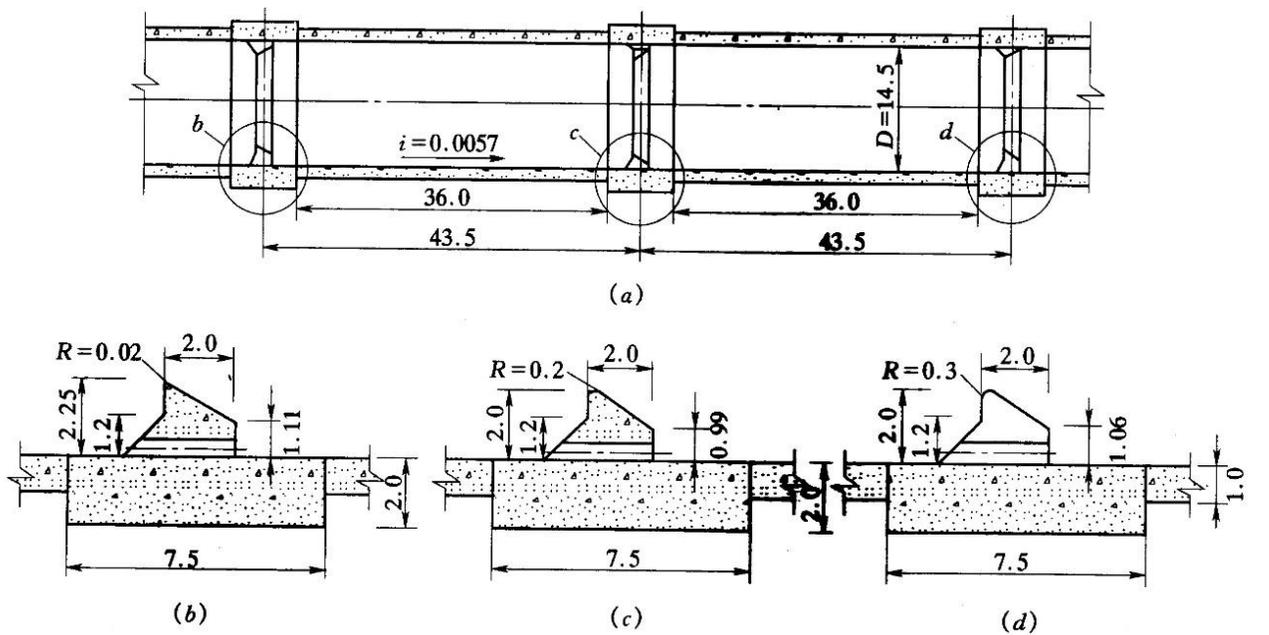
四、洞出口段及消能设施

消能

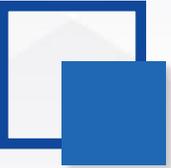


四、洞出口段及消能设施

洞内突扩式消能



黄河小浪底水利枢纽洞中突扩消能



总结

一、水工隧洞进口建筑物

二、进口段

三、洞身段

四、出口段

白鹤滩水电站

根据今天所学内容，回答下面问题

- 1.白鹤滩水电站布置了几条泄洪洞？是有压洞还是无压洞？
- 2.泄洪洞进口的进水塔采用岸塔式结构？为什么？除了这种结构，还有哪些进口建筑物？
- 3.如图，白鹤滩水电站泄洪洞的进水口结构，请看图指出工作闸门、检修闸门、喇叭口、通气孔的位置。
- 4.白鹤滩水电站泄洪洞洞身断面为城门洞形，泄洪洞的洞身断面还有哪些？
- 5.该泄洪洞洞身采用混凝土衬砌，作用是什么？

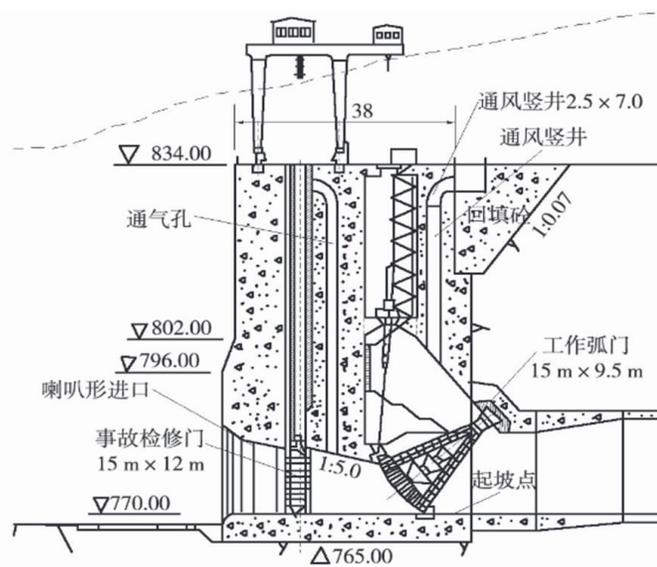


图 1 进水口结构



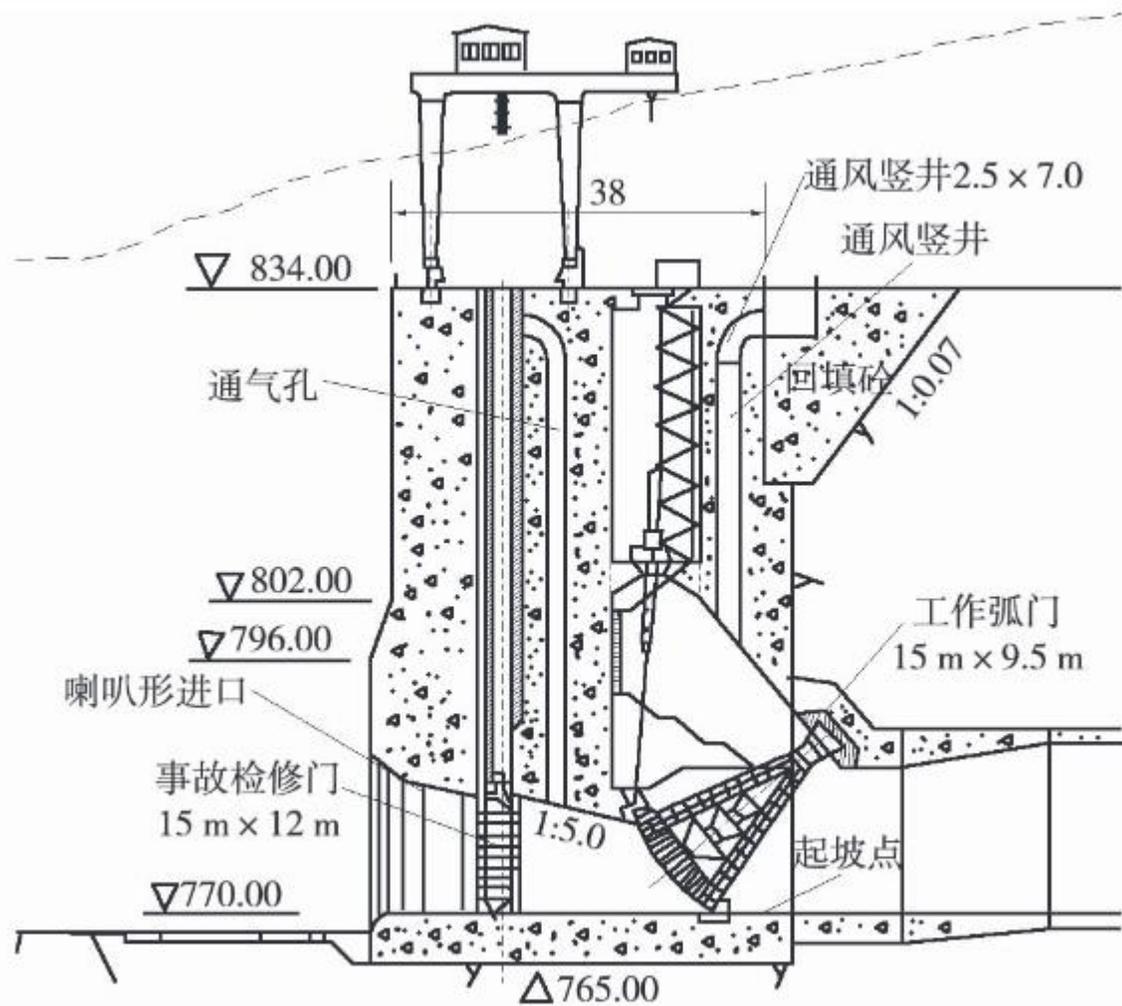


图 1 进水口结构



黄河水利职业技术学院
YELLOW RIVER CONSERVANCY TECHNICAL INSTITUTE

敬 请 指 导

Thank You