

两种沟头防护工程的效益

张 汉 雄

(中国科学院西北水土保持研究所)

一、沟头侵蚀及其防治

沟头侵蚀是黄土高原水土流失区土壤侵蚀的重要部分,其侵蚀形态包括沟头进展、沟谷扩展和沟床下切。串珠状陷穴和陷穴间孔道的塌陷,是沟头前进的主要方式,沟谷扩展的主要型式,是沟边崩塌、滑坡和泻溜。由于黄土入渗力强、多孔疏松、湿陷性大,经暴雨径流冲刷,岸坡稳定性差,沟蚀剧烈,沟头溯源侵蚀速度很快,一般沟头每年前进2—3米,沟谷扩宽2米多。如宁夏回族自治区固原县,从1957年起,平均每年沟头延伸6.78米,最大一年延伸竟达15.7米。沟头侵蚀发生在沟头有集中径流的地方,蚀坎高差多在10米以上。下泄径流冲刷力强,沟床下切快,往往一次洪水沟底可切深1—2米,导致沟谷愈深,沟坎相对高差愈大,随之沟头前进和扩张愈剧烈,造成严重的沟头侵蚀。

沟头侵蚀对工农业生产危害很大,主要是:

1、造成大量土壤流失。沟头集水面积小而侵蚀量大,崩塌、滑坡的疏松土体和沟床下切是沟蚀的主要侵蚀泥沙源,大大增加沟道输沙量;

2、毁坏农田。沟头延伸和扩张,毁坏了大量农耕地,使可耕地面积逐年减少,沟谷逐年扩大。如固原县由于沟头侵蚀每年毁坏耕地达5,000—6,000亩;

3、切断交通。沟头侵蚀如不防治,延伸将无休止,直到溯源侵蚀至分水岭后,沟谷还要下切和扩张。这样,原来的交通要道或生产道路就会被数十米的深壑大沟隔断,严重影响山区交通和农业生产。

沟头侵蚀的防治,应按流量大小和地形条件采取不同的沟头防护工程。沟头防护分两类:

一类是拦蓄式。当沟头上部来水较少时,可沿沟边修筑一道或数道水平半环形沟埂,形成拦水埂或沟边埂,拦蓄上游坡面径流,防止径流排入沟道。沟埂的长度、高度和蓄水容量按设计来水量而定。

另一类是泄水式。当沟头集水面积大且来水量多时,沟埂已不能有效地拦蓄径流,必须把径流导至集中地点通过泄水建筑物排泄入沟,沟底还要有消能设施以免冲刷沟底。一般泄水设施有沟坎陡的修支撑式悬臂跌水,沟沿缓坡处修圪工式陡坡跌水或阶式跌水。这两种泄水建筑物工程量大,造价高,施工困难,难于普遍应用。

本文介绍中国科学院西北水土保持研究所在安塞县茶坊水土保持综合试验区修建的两种新型泄水式沟头防护工程的设计、施工及运用效果。

二、试验地点概况

这两座泄水建筑物,分别设置在实验区山地实验场内毗邻的两条支沟上。由于各沟头的集水面

积和地形、地质条件的差异，我们因地制宜地采取了不同的泄水设施型式。刹草沟沟头集水面积0.071平方公里，有少量果园，其余为陡坡农地。历年最大径流量为0.58立方米/秒。沟边为高差9.5米的土陡崖，沟底是破碎基岩，总高差13.0米（图1）。近8年来，沟头延伸了27米，平均每年前进3.4米。由于该沟径流量较大，沟坎高差小，且有基岩利于消能，故采用陡槽式挑流跌水泄水。桃树湾沟沟头集水区为0.015平方公里，全是陡坡实验农地，最大径流量为0.18立方米/秒。沟边陡崖高达20.5米，沟谷宽29米，内有大量崩塌虚土，无基岩裸露。近十年来，沟头前进了24米，平均每年延伸2.4米，沟头滑塌体的侵蚀量达1,500立方米（0.2万吨）。该沟径流量虽小，但侵蚀量大，且沟头两边是实验区永久性径流实验场，必须安全地防止沟头继续扩张。按照陡崖高差大、径流量小的特点，选用悬臂式喷嘴射流跌水泄水型式。

三、设计要点

（一）设计排水量计算

沟头来水量必须根据水文、地形条件精确计算，以选定泄水结构型式和工程设计。泄水式沟头防护工程属永久性建筑物，应有较高设计标准，可按20—30年一遇暴雨供水设计。沟头集水面积一般小于0.1平方公里，形状近似于圆形或半圆形，属全面汇流造峰。造峰历时短。沟头来水量可按下述简化公式计算：

$$Q_m = 0.278\alpha h F \tag{1}$$

式中：Q_m—设计暴雨的最大径流量，立方米/秒；

F—集水区面积，平方公里；

α—洪峰径流系数（不同于径流系数），汇流历时愈短，α值愈大，沟头集水区 α = 0.75—1.0；

h—设计暴雨量，毫米/小时。由于沟头集水面积小，汇流造峰快，短历时暴雨强度大，可按最大30分钟暴雨强度设计。对于该区，

$$h = it = \frac{18.1N^{0.301}t}{(t+0.03)^{0.689}} \tag{2}$$

式中：N—设计暴雨重现期，年；

i—设计历时的暴雨平均强度，毫米/小时；

t—设计暴雨历时，小时。

当采用30分钟暴雨强度和设计频率，按式（1）和式（2）计算的沟头来水量比较见表1。

表 1 计算与实测的沟头来水量比较

沟 名	集水面积 (平方公里)	设计标准 (年)	设计雨量 (毫 米)	α	设计径流量 (立方米/秒)	实测最小径流量 (立方米/秒)
刹草沟	0.071	30	40.7	0.75	0.60	0.58
桃树湾	0.015	50	47.5	1.00	0.20	0.18

(二) 结构特点

1、陡槽式挑流跌水。陡槽式挑流跌水由进口集水池、陡槽、反弧段、挑流鼻坎和支墩、支架等几部分组成(1图)。进口为浆砌石,最大水深1米,径流经两边的导流渠汇入集水池,再流入陡槽。陡槽断面随陡坡水力特性而变化,长12米,坡度比1:0.8;槽上部底宽0.4米、下部宽0.25米,槽壁高度亦随水深变化。反弧段为 0.2×0.3 米的矩形断面,反弧半径1米。挑流鼻坎按照设计流量和坎上水头,选择最佳挑射角 $\theta = 25^\circ$ 。反弧段与鼻坎都固定在砌石支墩上,支墩基础为破碎基岩。陡槽和反弧段、鼻坎全用2毫米钢板焊成,上口有拉条以增加薄壁槽身的强度。为便于安装,槽身分两段制造,现场用螺栓把陡槽上下段及反弧段连接在一起。陡槽中间用支架支撑,以减轻在自重和水压下产生的较大弯曲变形。支架是用 4×4 厘米角钢焊接的框架,用螺栓与槽身下面的水平铁块联结。整个陡槽为两端固定、中间支撑的整体刚性结构,安全稳定。

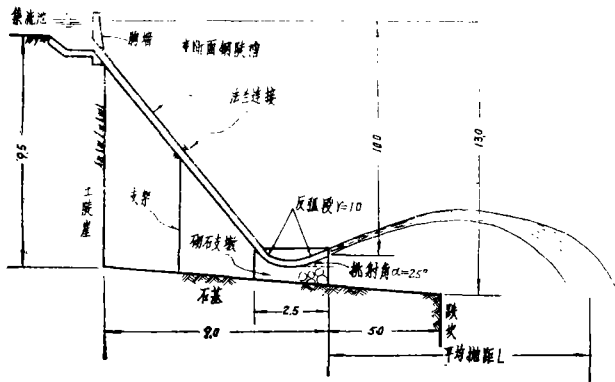
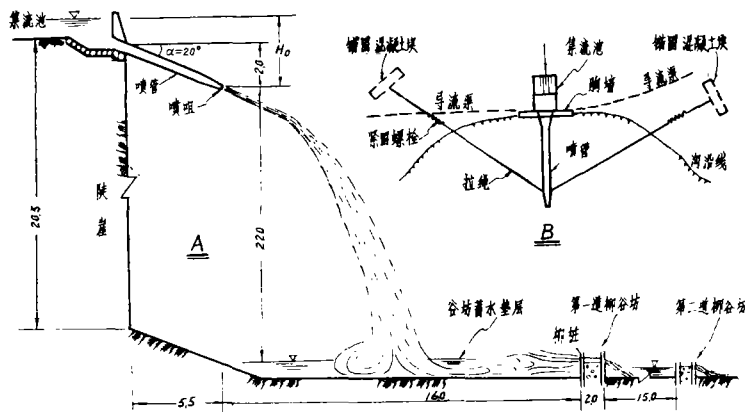


图1 陡槽式挑流跌水结构简图

2、悬臂式喷嘴跌水。悬臂式喷嘴跌水由进口集水池、喷管、拉链和柳谷坊4个部分组成(图2)。进口与陡槽式跌水相似,两边也有导流渠与集水池相通。喷管分喇叭形进口、管身和喷嘴三段,系用2毫米钢板卷曲焊接的整体。进口段长1米,管身长5米,直径0.3米。喷嘴为圆锥收敛型,收敛角 6° ,长1米,出口管径0.2米。喷管一端固定安装在集水池的胸墙砌石体内,另一端悬空,垂直高差2米,俯射角 20° 。为使管身能承受自重和水重的较大荷载,并在风力和水动力作用下不摇摆,



A—侧视图

B—平面图

图2 悬臂喷嘴式跌水结构略图

在喷嘴与管身交界处焊接加劲箍,并用两根拉链系住,拴在崖坎上的锚墩上。拉链与喷管成 60° 的对称夹角,用 $\phi 6$ 钢筋代替。锚墩是预制混凝土块,埋于距沟边5米、深2米的地下。锚墩与拉链用活动螺栓连接,外露于地面。安装喷管时,先把活动螺栓放松在最大位置,把拉链拉紧到管身接近设计要求的位置,然后再砌胸墙,这时喷管悬臂端可能有0.1米

下垂。待砌体初凝后,再把活动螺栓上紧,则喷管可保持在要求位置,拉链处于稳定受力状态。

一般悬臂跌水属有支撑的悬臂梁式刚性结构,在动荷载作用下易振动摇摆而使结构破坏。该装置利用活动螺栓拉链使喷管应力分布均匀,活动连接使悬臂喷管自由端有弹性结构特点,容许上下左右摆动0.1米,在动荷载(水流脉动压力、风力)作用下能安全可靠的运用。

(三) 水力特性

1、陡槽式挑流跌水。该结构过水部分为光滑的钢结构，抗冲刷力强，变断面陡槽按水流特性设计，毋须进行陡槽水力计算。我们只计算不同流量的水流抛射距离和冲刷坑深度，以确定射流是否危及结构安全和需采取的消能措施。沟道防冲要求大流量时水流抛射距离远，小流量时抛射距离大于支墩的安全距离。由于距支墩5米处有一石坎，大多数情况下射流能抛射至石坎下游，故不作冲坑深度校核。

射流抛射距离按下式计算，结果见表2。

$$L = 2\phi^2 \cos\theta \left[\sin\theta + \sqrt{\sin^2\theta + \frac{h \cdot \cos\theta + z - s_1}{2\phi^2 s_1}} \right] s_1 \quad (3)$$

式中：

θ —鼻坎挑射角；

z —上下游水位差，米；

h —鼻坎上水深，米；

s_1 —上游水位至鼻坎处高差，米；

ϕ —流速系数，按以下经验公式计算

$$\phi = \sqrt{1 - 0.1 \frac{s_1^{0.5}}{q^{1/3}}}$$

q —鼻坎处之单宽流量，立方米/秒/米。

2、悬臂式喷嘴跌水。从水力学观点，圆锥收敛型喷嘴出口流速最大，流线型管嘴流量和射流动能最大，这意味着消能设施更复杂。为便于喷嘴射流远离崖坎和便于消能，我们选用圆锥收敛型喷嘴。

当喷管水深大于1/2出口管径时为半压力流，满管时为压力流。喷嘴流量按以下管嘴流量公式计算：

$$Q = \mu w \sqrt{2gH_0} = 3.13d^2 \sqrt{H_0} \quad (4)$$

式中： d —喷嘴出口直径，米；

H_0 —计入行近流速的喷嘴出口水头，米。计算的喷嘴最大流量为0.20立方米/秒，满足设计最大来水量；当流量小于0.1立方米/秒时，管内出现有压与无压的交替现象，且有水锤作用。

喷嘴射流属非淹没自由射流，抛射距离取决于喷嘴出口流速及射流的俯射角。假定忽略空气阻力和水股扩散影响，把喷射水流运动看作自由抛射体的运动，则射流平均抛射距离可按自由抛射体的运动轨迹计算。取喷嘴出口断面中心为坐标原点，则抛射坐标（图2—A）为

$$\begin{cases} x = v \cos\beta t \\ y = \frac{1}{2} g t^2 + v \sin\beta t \end{cases} \quad (5)$$

消去两式中的时间变量 t ，则求得射流抛射的水平距离 x 为

$$x = \frac{v^2 \cos\beta \sin\beta}{g} \left[\sqrt{1 + \frac{2gy}{v^2 \sin^2\beta}} - 1 \right] \quad (6)$$

式中： v —喷嘴出口流速，米/秒，当 $Q \geq 0.1$ 立方米/秒时， $v = 1.21 \frac{Q}{d^2}$ ，当 $H_0 < 0.6$ 米，且 $Q <$

0.1立方米/秒时， $v = 4.21 \sqrt{H_0}$ ；

β —水流俯冲角, 即射流与水平线夹角,

y —喷嘴出口与沟底水面高差, 米,

g —重力加速度, 为9.81米/平方秒。

喷嘴跌水下游沟谷堆积着两岸坍塌的大量虚土, 为防止沟床下切和射流冲刷虚土, 在沟床设置柳谷坊两座, 起消力池作用。第一道柳谷坊高2米、顶宽2米, 位于射流最远射距之外, 距崖坎21.6米, 当射流落入沟底就在谷坊前形成一个深1—2米、长约16米的蓄水垫层, 水流消能后从谷坊顶部溢流至二级消力池; 第二道谷坊高0.8米、顶宽1.5米, 它降低第一道谷坊的落差, 进行二级消力。

四、试验初步结果

这两项泄水式沟头防护工程于1984年6月建成, 汛期经历了3次暴雨洪水考验, 其中8月3日和27日洪水较大。沟头集水区的径流全部流经设施排泄, 有效地保护了沟头扩张和冲刷。最大暴雨强度为30分钟20毫米、3小时65毫米, 洪水历时约半小时, 最大流量产生于主雨高峰后约10分钟。按式(1)计算的洪峰流量, 符合小集水区全面汇流造峰的特点。

陡槽式挑流跌水实测表明, 变断面钢槽的最大流速达10米/秒, 能容许短历时高速水流的冲刷。实测抛射距离与计算值误差小于16%(表2), 计算值偏大; 流量大于0.05立方米/秒时的抛射距离大于5米, 能满足支墩安全要求。为防止沟底岸坡冲刷, 春季在岸坡插的柳枝和杞柳大部分已成活, 当年新生枝长50—80厘米, 固坡效果较好。

表2 计算与实测的挑流跌水水力特性

Q (立方米/秒)	q 立方米/秒/米	θ	z (米)	S (米)	ϕ	挑射距离(米)		误差 (%)
						计算值	实测值	
0.60	2.40	25°	13	10	0.87	14.5		
0.40	1.60	25°	13	10	0.85	13.9	13.0	+6.5
0.20	0.80	25°	13	10	0.81	12.8	11.5	+10.1
0.10	0.50	25°	13	10	0.78	11.8	10.7	+9.3
0.05	0.25	25°	13	10	0.71	10.1	9.4	+6.9

喷嘴式跌水也泄流两次, 在风力和水流脉动作用下, 悬臂喷管的柔性连接端稳定性良好, 未出现较大摆动。实测喷射距离与计算值基本一致, 误差小于5%(表3); 最小射距距崖坎7.6米, 足以防止崖坎底部土体免遭冲刷。春季修成的柳谷坊, 柳桩全部成活, 当年新枝长0.8—1.0米, 柳桩间编织的柳梢成活约一半。柳谷坊有效地起到消力池作用。谷坊至崖坎间未出现较大冲刷坑, 柳谷坊顶部溢流对谷坊影响不大, 水流过后谷坊前淤积约1米。两岸滑塌体上栽种的柳枝约60%已成活, 岸坡亦未遭冲蚀。

由于本年洪水较少, 也未经受最大流量的考验。因此, 今后几年仍需继续观测, 以确定在长期多次洪水作用下结构的稳定性, 钢管和钢槽的抗冲性及最大流量时的水流特性。另外, 在意外情况下结构的安全也是设计时应予慎重考虑的。由于沟头地形条件限制, 陡槽式挑流跌水安装位置

表3

计算与实测的喷嘴跌水射流特性比较

Q (立方米/秒)	w (平方米)	V (米/秒)	β	y (米)	计算x (米)	实测x (米)	误差 (%)	备 注
0.22	0.0314	7.0	20°	22	12.6			w为喷嘴 出口过水断面。
0.15	0.0314	4.8	20°	22	8.9	9.3	+4.5	
0.10	0.0314	3.2	20°	22	6.1	6.3	+3.2	
0.05	0.0280	1.8	20°	22	3.7	3.5	+5.4	
0.01	0.0100	1.0	20°	22	2.0	2.1	+5.0	

的两岸都是陡崖和悬崖，距左岸悬崖仅4米；加之去年秋季雨水多，长期下雨造成崖坎崩塌，塌落土体将陡槽下部和反弧段槽壁压弯变形。后经及时修复，使建筑物恢复原状，并将两岸陡崖削坡，以防再次发生事故。

五、讨 论

在沟头侵蚀严重、沟坎高度大的集水沟头，修建陡槽式挑流跌水或悬臂式喷嘴跌水能有效地防止沟头侵蚀。按照沟头地形、地质条件，来水量大小，因地制宜地选择合理的泄水建筑物型式，能较大地减少工程量和投资，便于施工安装，同时也符合大落差（势能大）水流的动力特性。

1、结构合理性。根据结构特点和实际运用情况来看，两种结构有不同的适用特性：

第一，陡槽式挑流跌水适于修建在来水量较大、沟底有基岩、崖坎为阶式或坡式且高差较小的沟头，它的水流抛射距离较远（最佳挑射角为25°—30°）。但由于流量大，水流冲刷较严重，如果沟坎非基岩或无有利地形时，需要设置有效的消能设施。从水力特性看，鼻坎处最大流速达10米/秒，流速的大小取决于坎顶以上的水头和出口的单宽流量。为确保抛射距离大于支墩的安全距离，小流量时鼻坎处的单宽流量应大于0.20立方米/秒/米；相应地，为防止高速水流的气蚀破坏，把最大流速限定在10米/秒，则坎顶以上水头亦应不超过10米。

第二，悬臂式喷嘴跌水适于修建在崖坎陡壁、高度大、河床无基岩且来水量较小的沟头，水流的俯冲喷射距离较小。喷射距离取决于喷嘴出口流速和俯冲角，为使崖坎至射流最近点的安全距离不小于5米，最优俯冲喷射角 $\beta \leq 30^\circ$ 。圆锥收敛型喷嘴虽可增加出口流速，但对于该装置来说，经济的（不是最优的）喷嘴圆锥收敛角为5°—8°。柳谷坊可用作小流量射流的消力池，是一种经济有效的消能设施，拦泥消能兼顾。喷嘴式跌水与柳谷坊相结合，是沟头防护工程中很有实用价值的生物工程设施。

2、优越性。这两种泄水设施采用钢与圬工结构的组合型式，它与一般的圬工沟头泄水结构相比，有以下优点：（1）工程量小、投资少，两个设施的砌石体总计仅10立方米；（2）结构紧凑、重量轻（最大构件仅重150公斤）、受力状态好，对动荷载的适应性强；（3）安装施工方便，也可跨汛期施工，8个人仅用6天就把两座设施（包括砌石体）建成；（4）水力特性好，能耐高速水流冲蚀，可在其它结构易受破坏的水流条件下安全运用。

3、经济性。这两项建筑物总造价为2,200元（挑流式1,450元，喷嘴式750元）。总费用中，钢

富县水土流失危害及其防治

王恒俊 赵先贵 吕惠明 张棠棣

(中国科学院西北水土保持研究所 富县农业区划委员会)

水土流失是黄土高原普遍存在的严重问题。富县位于陕北黄土高原沟壑区向黄土丘陵沟壑区的过渡带,塬面、丘陵、山地、河谷阶地等黄土高原区的主要地貌类型均有,是这类地区水土保持重点县之一。摸清该县水土流失状况,不仅为搞好全县农业区划、防治水土流失提供依据,而且对了解整个黄土高原水土流失的类型、分布规律、危害程度、发展趋势、防治途径也是有益的。为此,我们结合土壤普查,对富县水土流失状况作了全面调查,绘制了1/50,000的土壤侵蚀图。

一、水土流失状况

富县东缘黄龙山,西依子午岭,总面积为627万亩,其中耕地51万亩,占总土地面积的85.4%;疏林、疏草地336万亩,占林草地的63.7%。而1949年水土流失面积是264万亩,占总土地面积的41.9%;现有水土流失面积达387万亩,占总土地面积的62%。今昔相比,流失面积增加了20.1%。据西峰水土保持站调查估算,子午岭林界线每年后退1公里,根据我们选点实测,本县林界线比1949年平均后退了2.5公里。可以初步肯定,富县水土流失不是逐年好转,而是不断加剧。

二、水土流失类型及分布

(一) 类型。富县水土流失可依形式、特性、强度分为6大类型16个强度(详见表1)。从面积来看,鳞片状面蚀是富县水土流失最广的一类,其次是切沟、重力侵蚀。不论从面积或侵蚀

结构的材料费和加工费为1,700元,占总费用的77.2%。由于钢结构所用的材料是商业上进口的薄钢板,比一般国产钢板价格贵;加之施工地点在山上,砂石料的开采与运输都很困难。随着目前劳力费用和材料价格上涨,因而使总造价偏高。若利用工业旧钢材(钢管或钢板),并采取一些必要的改进,估计可使总造价降低30%以上,则平均单项造价约700元。这样,这两种型式的泄水设施还是有普遍推广的实用价值的。

两种新型沟头防护工程已建成。经短期过水考验表明,结构运用情况良好,安全可靠。预计经进一步观测和改进后,将能为大量的、侵蚀严重的集水沟头,提供一种新型的、经济实用的沟头泄水结构。

参 考 资 料

[1] 胡骏文:“加强水土保持工程的排洪能力”,《农业工程》1984年第4期。

[2] 张汉雄:黄土高原的暴雨特性及分布规律,《地理学报》1983年第4期。

[3] 水电部水利调度研究所:《砌石坝》,水利电力出版社,1977年,第137—138页。