

黄土地区水窑窖设计参数与施工技术研究

娄宗科¹, 党进谦¹, 许永功¹, 马孝义¹, 冯东玲²

(1. 西北农林科技大学 农业水土工程研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 杨陵区水电局, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 应用岩土稳定理论, 分析了黄土地区水窑窖的合理断面形状, 提出水窑主要几何参数矢跨比的计算公式。探讨了我国分布的黄土力学性质分区规律和水窑施工技术, 并对典型地区水窑矢跨比的合理取值进行了计算, 旨在为黄土水窑规范化建设提供参考。

关键词: 黄土水窑; 矢跨比; 计算公式; 抗剪强度; 施工技术

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)03-0014-03

中图分类号: S277

Research on Design Parameters and Construction Techniques of Water Cellar in Loess Areas

LOU Zong-ke¹, DANG Jin-qian¹, XU Yong-gong¹, MA Xiao-yi¹, FWNG Dong-ling²

(1. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, PRC;

2. Water Resources Bureau of Yangling County Yangling 712100, Shaanxi Province, PRC)

Abstract: Based on rock and soil stability theories, the reasonable section shape of water cellar in loess areas was analysed and the theoretical calculation formulas of principal geometry parameters was put forward. It inquires into the mechanic characters of loess and the construction techniques, the reasonable pitch of arch of water cellar in typical soil was calculated. These results could work as reference for water cellar standardize construction.

Keywords: loess water cellar; pitch of arch; calculation formulas; shearing strength; construction techniques.

干旱缺水是制约黄土高原地区农业生产和地区经济发展的首要因素, 随着全球水资源危机态势的日益加剧, 雨水集蓄利用技术从 80 年代末, 90 年代初在黄土地区得到了迅速发展, 取得了良好的经济和社会效益。旱地土水窑因其施工方便, 造价低廉, 容量大等特点在雨水集蓄利用工程中得到了广泛应用, 愈来愈受到人们的重视。黄土水窑在我国具有悠久的历史, 劳动人民在长期认识、利用和改造黄土的生产实践中, 积累了丰富的经验, 但各地土质不同, 地形各异, 致使水窑的设计和施工仍缺乏理论指导。因此, 分析水窑窖的合理形式, 根据各地土质条件计算影响水窑安全稳定的矢跨比 $\frac{f}{a_1}$ (矢高 f 与跨度 a_1 的比值) 等几何参数, 探讨水窑窖的施工技术, 对黄土水窑的规范化建造和方便生产很有裨益。

1 旱地水窑设计参数的确定

1.1 水窑合理结构型式

土水窑属非衬砌浅埋式地下结构, 不管是蓄水状态还是空窑状态, 保持相对稳定只能自身维持。土在

应力作用下的破坏, 主要是由于土粒之间发生相对的剪切位移而引起的, 表现为土的孔隙比增加和黏聚力及摩擦角的降低。土体的地质因素(包括土体的初始应力状态、节理裂缝发育程度、物理力学性质等)确定之后, 在开挖面积相同的情况下, 水窑的开挖方法、断面形状和几何尺寸就成为决定水窑稳定的关键因素。实践证明^[1], 上部为拱形, 下部为梯形的土水窑(图 1)不仅施工方便, 容量大, 而且四壁的受力状况好, 稳定性高, 适宜推广应用。

1.2 水窑的合理矢跨比

黄土窑窖开挖前, 任意点的应力都处于平衡状态, 开挖后, 黄土中形成一个自由空间, 原来处于压密或超压密状态的土体, 由于应力重分布, 沿径向膨胀变形, 顶部土体失去稳定而向下崩落, 在洞室上方形成一个稳定的曲线状压力拱, 承受拱顶以上土体的重量。拱矢 f 与拱跨 a_1 之间满足公式(1)^[2]

$$\frac{f}{a_1} = \frac{1}{2f_k} \quad (1)$$

$$f_k = \text{tg} \varphi + \frac{c}{\gamma H} \quad (2)$$

式中: f ——拱矢高(m); a_1 ——水窑上口宽即拱的跨度(m); f_k ——土体坚固性系数; φ ——土的内摩擦角($^\circ$); c ——土的黏聚力(kPa); H ——水窑顶部覆土厚度(m); γ ——土的容重(kN/m^3)。

假如开挖水窑时,上部拱形各点的尺寸正好符合上述自然压力拱轴线,则土体就不会因开挖卸荷,应力调整,而导致水窑上部的塌落,公式(1)实际上表示了土水窑合理矢跨比的确定方法。从式(1),(2)可见,确定合理的矢跨比,首先必须确定当地黄土的物理力学指标(如 c , φ , γ 等),最好由实验确定。在量大面广而单体工程规模小的雨水集蓄工程中,难以达到这种要求。为此,对黄土的力学指标进行统计分析,对黄土地区进行适当分区,对每一区内的合理矢跨比进行计算,以便具体设计时参考应用,就很有必要,具体见本文第2部分。

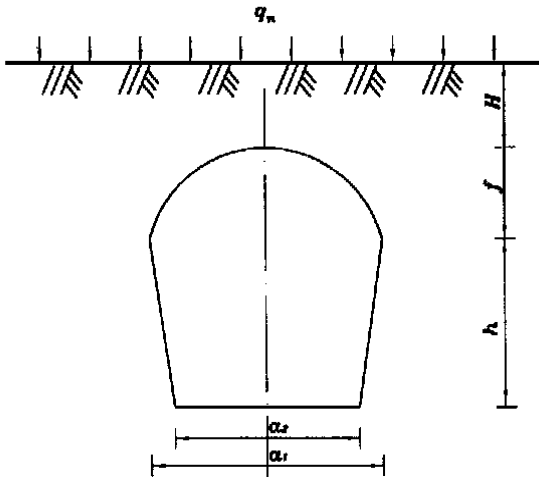


图1 黄土水窑窖断面形状

1.3 水窑其它几何尺寸

水窑的容积可用公式(3)确定:

$$V = 0.5(a_1 + a_2)hL \quad (3)$$

式中: V ——水窑容积; a_1 ——上口宽; a_2 ——下口底宽; h ——蓄水深; L ——窑长。土水窑的跨度依土质状况而定,对渗透性小的红黏土,最大跨度可达4m,黄土、黑壤土、白土的最大跨度不超过3m^[3]。蓄水深度和窑长应根据地形、土质、施工难易程度等确定。尽可能地选用窄长的窑体形式,这样既可以增加水窑容积,又能保证窑体安全稳固。下部梯形的边坡以1:0.1~1:0.13较好^[1]。

2 黄土物理力学性质的分区性

黄土是在第四纪时期形成的一种黄色粉状土,颜色以黄色、褐黄色为主,有时呈灰黄色;颗粒组成以粉

粒为主,含量一般在60%以上,粒径大于0.25mm的较少;它富含碳酸盐类,往往有肉眼可见的大孔隙,垂直节理发育。我国黄土按形成年代的早晚,可分为老黄土和新黄土^[4]。老黄土有午城黄土(Q_1)和离石黄土(Q_2),由于形成年代久远,老黄土的质地密实,颗粒均匀,无大孔隙或略有较大孔结构,强度较高,一般不具湿陷性,常出露于山西高原、豫西山前高地、渭北高原、陕甘和陇西高原。新黄土有马兰黄土(Q_3)和全新世(Q_4)中各种成因的次生黄土,新黄土结构疏松、大孔隙发育,一般具有湿陷性,强度较低,主要分布在黄土地区的河岸阶地。我国黄土分布很广,面积约 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$,是国土面积的6.6%。西北地区,黄土发育最好,地层全,厚度大,分布连续,是我国黄土主要分布地区。各地黄土尽管有许多共同点与相似之处,但由于各地的气候特点和自然地理环境的差别,黄土的分布地带、沉积厚度、湿陷特性和物理力学性质也因地而异。甘肃和陕北地区,常年干旱,降水量小,蒸发量大,黄土在天然状态下的含水量较小,多在10%左右,砂粒和粗粉粒含量较多,黏粒含量少,土质砂性大,黏结性差,结构松散。陕北黄土密度均匀,大孔隙不显著,开挖窑窖时应注意其崩塌;甘肃地区黄土密度不均匀,大孔隙显著,湿陷性敏感,在施工和运行过程中应注意其湿陷性。陕西关中和山西地区黄土在天然状态下的含水量较大,砂粒含量少,黏粒含量较多,土的黏结性较好,但大孔隙发育。高阶地和黄土原多属自重湿陷性黄土,湿陷性黄土层厚度多为5~10m。因此,在开挖窑窖时应尽量避开湿陷性黄土层,或在湿陷性黄土层上施工时应注意黄土崩塌和湿陷。

通过对前人试验结果的统计与整理,可给出典型地区黄土的物理力学性质指标见表1。依据表1计算的各典型地区新老黄土层中水窑的矢跨比值见表2。由表1及表2可见,在我国黄土地带内部,由西北而东南,黄土的颗粒组成及物理力学性质变化呈现出一定的规律性。西北部黄土的颗粒较粗,厚度大,内摩擦角大,而黏聚力较小;东南部黄土的颗粒较细,厚度小,内摩擦角较小,而黏聚力较大。在同一地区,老黄土密度大,强度高,矢跨比小(约1/3),开挖工程量较小;新黄土质地疏松,强度低,矢跨比大(约1/2),窑窖开挖工程量较大。

3 窑窖施工技术的研究

黄土水窑单体工程量较小,一般以户为单位进行建造。建窑技术在专业人员指导下,通过培训和现场示范即可掌握。

表 1 黄土物理力学性质

类别	地点	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水量/ %	孔隙比	塑限/ %	塑性指数	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	凝聚力/ kPa
新黄土	横山	1.43	14.5	1.00	20.3	7.9	23.7	28
	洛川	1.46	16.7	1.19	22.5	7.7	26.3	22
	渭南	1.45	17.0	1.21	21.5	9.0	20.0	32
	兰州	1.22	13.6	1.32	18.0	7.0	19.5	30
	西峰	1.36	10.5	1.22	18.5	9.5	22.0	36
	霍县	1.47	13.9	1.11	18.0	10.0	25.0	10
老黄土	横山	1.52	12.6	0.82	19.0	9.4	28.5	47
	洛川	1.50	18.3	1.04	21.9	7.1	24.4	28
	渭南	1.61	15.7	0.96	21.3	10.7	23.0	86
	兰州	1.60	7.8	0.82	18.6	7.7	23.0	62
	西峰	1.44	7.8	1.04	18.0	9.0	21.5	76
	霍县	1.67	14.8	0.85	16.4	11.0	23.0	59

表 2 不同地区窑窰矢跨比参考数据

类别	横山	洛川	渭南	兰州	西峰	霍县
新黄土	1/2.2	1/2	1/2.2	1/2.3	1/2.6	1/1.5
老黄土	1/3	1/2.2	1/4.5	1/3	1/4.3	1/3

注: 计算表中矢跨比时窑顶覆土厚度 H 按 3 m 估计。

3.1 识土选址

窑址选择应综合考虑集流、灌溉和建窑土质 3 个方面, 窑址应选择在有较大来水面积和径流集中的地方, 水窑应靠近灌溉农田附近, 引水、取水比较方便的地方, 山区更应充分利用地形高差大的特点多建自流灌溉窑; 窑址要求土质深厚坚硬, 远离沟边, 避开大树、陷穴、砂砾层等土质不良的地方。开挖水窑, 一般应选择风成的原状黄土层。在晚更新世马兰黄土的下部(Q_3)可开挖小跨度的黄土水窑; 在中更新世离石黄土(Q_2)的上部及下部可开挖较大跨度的水窑。离石黄土是我国风成黄土层的主体, 也是我国大多数土窑洞存在的主要土层, 凡一些历时久远的黄土水窑(窑)及民居窑洞多保存在此土壤层内[5], 早更新世(Q_1)上部开挖条件最好, 但土层埋藏深, 外露较少, 全新世的新黄土层因其力学性能差, 湿陷性强, 不宜开挖水窑。

3.2 工艺流程

水窑窑的制窑过程包括开挖土窑、窑池防渗等工序^[6], 具体如图 2 所示:

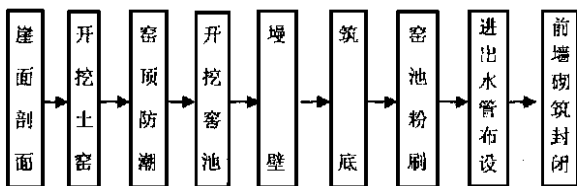


图 2 水窑窑工艺流程图

3.3 施工技术要点

窑体宜建成窄长型, 不宜过宽过高。地形有限时, 可拉长槽, 把窑体修在地面以下, 窑顶应有一定的覆土层, 最好在上口宽 a_1 的 2 倍以上, 以便形成自然拱; 开挖土方应注意第 1 层土挖成里低外高的斜面, 以便人力车运土, 第 2 层土从窑脑往后退, 挖到设计深度, 变成里高外低; 塄壁、筑底和粉刷是窑池不渗水的关键, 缺一不可。塄壁前应清除浮土, 可先抹一层草泥并用工具拍平使泥和窑体黏紧, 以增加固壁砂浆与窑壁的黏结。筑底时应将窑底翻斗 30 cm, 土的干容重不应小于 $1.5 \text{ g}/\text{m}^3$, 以防止底部发生不均匀沉降。水泥中可加入防渗剂(粉), 用量为水泥质量的 3%~5%, 第 2 次及其以后塄壁和粉刷水泥浆时掺入使用, 防渗效果显著。施工期间, 每次收工应将窑口盖好, 以防灌风; 刷浆结束后, 封闭窑口, 待 24 h 后, 开始洒水养护 14 d 左右, 即可蓄水。

4 结 语

(1) 上部为拱形, 下部为梯形的水窑施工方便, 四壁受力性能好, 稳定性高, 应推广应用, 其矢跨比的合理取值应符合自然塌落拱的要求。

(2) 在我国分布的黄土地带内, 自西北而东南, 颗粒由粗渐细, 厚度由大到小, 内摩擦角变小, 黏聚力增大。在同一地区, 老黄土密度大, 强度高, 矢跨比可小一些, 约 1/3, 以减小开挖量, 而新黄土质地疏松, 强度低, 矢跨比应大一些, 约 1/2。通过对黄土力学性质分区性的研究, 深感其复杂和水窑结构安全与黄土自身稳定性的密切关系。黄土力学性质的微小变化, 必将引起水窑结构设计参数较大的变化, 选取与实际相符的强度指标是水窑设计安全合理的基本前提。

(下转第 19 页)

摩擦过程中滑带孔隙水汽化的可能性。上述计算是在未考虑孔隙水汽化情况下滑面所能达到的最高温度,下面我们着重考虑在滑动过程中因高速摩擦所产生的总热量减去“汽化带”土颗粒和孔隙水升温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所消耗的热量后,其剩余的热量可使多少孔隙水汽化。

对于单位面积的滑面:

$$Q = (C_r m_r + C_w m_w) \Delta T + C_q m_w \quad (4)$$

式中:汽化热 $C_q = 2.66 \times 10^6 \text{ J/kg}$; m_w ——可能汽化的孔隙水的质量,其它符号意义同前。

求解式(4)得: $m_v = 0.153 \text{ kg}$ 。

单位面积“汽化带”孔隙水占有的体积:

$$V_w' = \frac{m_w'}{m_w} \cdot h \cdot n \quad (5)$$

假定此时的水蒸汽为理想气体,则有:

$$u_v V_v = n' R T \quad (6)$$

联立以上两式求解得: $u_v = 4.6 \times 10^6 \text{ Pa}$

事实上,大型高速岩质滑坡在滑动过程中滑体并非与滑床完全接触,同时由于滑体玄武岩风化严重、节理裂隙发育,因此滑体不是完全封闭的体系,孔隙水汽化压力一般不太稳定,随着水蒸气的向外逸出而逐渐消散。取孔隙水汽化压力的消散系数 $\eta = 0.1$,则得孔隙水汽化压力为: $u_v = 4.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(上接第16页)

(3) 窑址选择与施工质量是水窑建设成败的关键,窑址应选择在深厚坚硬的土层内,以红胶土最好,硬黄土次之,应避免质地疏松的新黄土和沟边、陷穴、砂砾层等不良土层。

[参 考 文 献]

- [1] 黄河水利委员会水利科学研究所. 黄河流域旱井调查研究[M]. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [2] 武汉水利电力学院. 土力学及岩石力学[M]. 北京: 水利出版社, 1979.

3 结论与建议

大型高速岩质滑坡在启程活动阶段由于高速摩擦导致滑动面附近的高温,通过计算得 $\Delta\theta = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而证实孔隙水汽化的可能性。同时通过计算得出孔隙水汽化压力 $u_v = 4.6 \times 10^5 \text{ Pa}$,可以看出孔隙水汽化压力是非常大的,并且可能产生水汽垫层。这气垫支持着滑体并产生润滑作用,使作用在滑动面上的有效法向压力显著降低,因抗滑力随法向压力的降低而减少,滑体可获得一巨大速度。

[参 考 文 献]

- [1] Voight B, Faust C. Frictional heat and strength loss in some rapid landslides[J]. Geotechnique, 1982, 32: 43—54.
- [2] Habib P. Production of gaseous pore pressure during rock-slides[J]. Rock Mech, 1975, 17: 193—197.
- [3] Yin Kunlong. Frictional heat landslide process. 6th International IAEG Congress[C]. 1990. 1769—1773.
- [4] 胡厚田, 杨明. 头寨大型高速远程滑坡流体动力学机制的分析研究[R]. 第六届全国工程地质大会, 南宁, 2000.
- [5] Iverson R M, Lahusen R G. Dynamic pore—pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials[J], Science 1989, 246: 796—799.
- [3] 杨峡, 刘亚非, 张春贤. 旱地水窑的设计与施工技术[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2): 89—93.
- [4] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [5] 水利部西北水利科学研究所. 西北黄土的性质[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1959.
- [6] 侯继尧, 任致远, 周培南, 等. 窑洞民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [7] 张祖新, 龚时宏, 王晓玲, 等. 雨水集蓄工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.