

四川盆地红层地区地下洞室主要工程地质问题

王玉秦

(四川水发勘测设计研究有限公司,四川 成都 610072)

摘要:针对地下洞室开挖过程中出现的洞顶脱层掉块、局部涌水、底板软化、边墙破坏和有毒有害气体等普遍性问题进行分析,特别是在边墙垮塌的分析中引入了时间效应,表明需对粉砂质泥岩破坏的时间效应引起足够的重视。同时,对来自于深部生烃层油气经断层或裂隙向上运移,在浅部岩体中形成气源型和气囊型次生气藏,为隧道施工带来风险等问题进行了分析,对四川盆地红层地区后续修建的地下洞室有一定的借鉴和指导意义。

关键词:四川盆地;红层地区;膨胀崩解;边墙垮塌;有毒有害气体

中图分类号:U453.2

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)06-0120-05

Main Engineering Geological Problems of Underground Caverns in the Red Bed Area of the Sichuan Basin

WANG Yuqin

(Sichuan Water Development investigation, Design & Research Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072)

Abstract: The study analyzes the common issues encountered during underground cavern excavation, including roof delamination, local water gushing, floor softening, side wall damage, and the presence of toxic and harmful gases. The analysis of the collapse of the side wall incorporates the consideration of the time effect, emphasizing the importance of understanding the time effect of silty mudstone failure. Additionally, the study examines recent issues such as the upward migration of hydrocarbons from deep hydrocarbon generation layers through faults or fractures, as well as the formation of gas-source and gas-bag secondary gas reservoirs in shallow rock masses. These factors pose risks to tunnel construction. The findings of this study have significant reference and guiding implications for the construction of underground caverns in the red bed area of the Sichuan Basin.

Key words: Sichuan Basin; Red bed area; Swelling and disintegration; Side wall collapsed; Toxic and harmful gases

0 引言

随着近年“172 项重大水利项目”的实施和国家水网建设的加速,一大批水利工程,如岷河供水一期工程、升钟水库灌区工程、武都水库引水工程、小井沟水库和向家坝灌区一期工程等,在四川盆地红层地区修建,由于红层地区独特的岩体物理力学性质,造就了其特殊的工程地质问题。因此总结盆地红层地区岩体主要特征及主要工程地质问题,对后续项目的建设具有一定的指导意义。

1 红层地区基本地质条件

四川盆地红层形成于中、新生代,以侏罗系与白垩系为主,还有少量的第三系地层,盆地内除华蓥山等地区外,均为红层出露区,其中侏罗系上统主要是红色砂泥岩,中统是红色、紫红色、灰色

等杂色砂泥岩夹泥灰岩,下统是紫红色砂泥岩。白垩系地层多为砖红、紫灰、紫红或夹紫色的砂泥岩及砾岩。

四川盆地红层由于成岩时间短,胶结程度低,具有遇水软化、抗风化能力差以及差异性风化等特点,造就了红层地区地貌形态主要以丘陵、低山、低中山和零星分布的丘(山)间洼地为主,相对高差不大的特点。除龙泉山地区构造作用强烈外,其余地区构造作用轻微,区内基本无断层构造。

2 红层岩体主要特征

2.1 化学成分特征

据王子忠(2011)对四川盆地红层岩体的系统研究,通过统计盆地已建项目化学成分分析试验成果资料,得到红层岩体化学成分,成果见表 1^[1]。

收稿日期:2024-07-25

表 1 红层岩体化学成分

岩性	统计项	百分含量 / %					
		SiO ₂	R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
砂岩	最大值	76.44	20.36	7.06	14.35	22.12	8.6S
	最小值	38.16	9.95	1.41	3.97	2.08	0.51
	平均值	63.22	15.36	4.32	10.67	7.18	2.71
粉砂质泥岩	最大值	61.94	20.12	8.14	16.72	34.32	10.03
	最小值	31.78	9.03	2.44	6.53	2.06	0.25
	平均值	56.25	14.26	4.32	10.60	7.09	2.74

注:对于地下洞室面临的工程地质问题,粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和泥岩没有本质区别,因此归为同一类进行分析。

由上表可知:砂岩和粉砂质泥岩化学成分基本一致,主要成分均是 SiO₂,只是砂岩的含量略高于粉砂质泥岩。

2.2 矿物成分特征

据王子忠(2011)对四川盆地红层岩体的系统研究,通过化学成分分析试验的方法和统计盆地已建项目的试验成果资料,得到红层岩体矿物成分,见表 2。

表 2 红层岩体矿物

岩性	统计项	碎屑物百分含量 / %				胶结物百分含量 / %			
		石英	长石	岩屑	云母	泥质	铁质	硅质	钙质
砂岩	最大值	82.0	17.0	15.0	2.0	10.0	3.0	4.0	17.0
	最小值	46.0	4.0	4.0	0.5	4.0	0.5	0.5	5.0
	平均值	65.0	10.0	8.0	0.8	7.0	1.0	1.0	6.0
粉砂质泥岩	最大值	—	—	28	—	80	5	—	20
	最小值	—	—	10	—	64	2	—	3
	平均值	—	—	16	—	72	3	—	7

由表 2 可知:砂岩和粉砂质泥岩矿物成分差异较大,砂岩以碎屑物为主,石英和长石含量占比>70%,而粉砂质泥岩则以胶结物为主,占比>60%,正是两者矿物成分的差异导致其不同的岩体特征。

2.3 强度力学特征

岩体是水利工程中最普遍的施工对象,也是分析和评价岩体工程核心因素之一。目前现场普遍采取钻孔岩心样品或者利用良好的露头取方块样,通过抗压试验等方式获取岩体的强度指标,采用分级方法估算岩体强度并提出建议参数,进而对工程支护设计和稳定性分析提供重要的支撑依据。

长期复杂的地质构造作用,岩体呈现出复杂的结构特征,岩体的力学性质在很大程度上受控于矿物成分、成岩环境、岩体结构,节理的产状、密度和空间分布等因素,岩体的结构特性使其强度表现出明显的各向异性。通过统计四川红层地区已建项目的试验成果资料,得到红层地区岩体强

度力学试验成果,见表 3。

由表 3 可知:砂岩岩体强度跨度较大,较软岩—较硬岩均有分布,粉砂质泥岩则以较软岩为主,少量为极软岩,且两种岩性的软化系数范围值 0.42~0.65,均属于易软化岩体,此为红层岩体的最主要特征之一。

2.4 易风化特性

四川红层地区砂岩、粉砂质泥岩多呈互层状分布,由粉砂质泥岩构成的软岩层黏土矿物含量大,泥质胶结为主,吸水性较强,开型空隙率较大,风化速度较快;而软岩夹层的上、下岩层为较坚硬的砂岩类岩体,以钙质和铁质胶结为主,吸水性较弱,开型孔隙较小,风化速度较慢。同时岩体内部黏土矿物的胀缩、离子交换吸附作用和长石的黏土化等作用,导致岩体的风化进一步加剧^[2]。

特别是位于粉砂质泥岩中的地下洞室,无论是洞室的进、出口开挖边坡还是开挖后的洞室边顶拱,在温度变化、雨水淋滤、地下水渗出和黏土矿物吸水特性共同作用下,最快数小时之内就可

表 3 红层地区岩体强度力学试验成果

岩性	统计项	干	天然	饱和	软化系数
		R_d	R_o	R_s	η
砂岩	最大值	44.6	32.1	26.8	0.65
	最小值	19.2	12.6	8.9	0.50
	平均值	26.3	15.2	13.9	0.53
粉砂质泥岩	最大值	15.2	10.7	8.5	0.60
	最小值	9.4	6.2	3.2	0.42
	平均值	10.1	6.7	5.5	0.50

看到风化作用。

2.5 膨胀崩解特性

四川红层地区粉砂质泥岩,多具有不同程度的遇水膨胀崩解特性,使修建其中的隧洞可能引起围岩变形、冒顶、坍塌、边墙破坏等工程地质问题。

组成红层岩体的黏土矿物以伊利石为主,其次为高岭石、蒙脱石,该类矿物微观结构上晶架结构活动性大,亲水能力强,当岩体遇水后体积膨

胀。另外,岩石的膨胀性还与岩体的含水率、孔隙比、风化程度和微裂隙发育有关,风化岩体的膨胀力较新鲜岩体强,微裂隙发育岩体崩解明显快于不发育岩体^[3]。

对于岩体膨胀性的研究,目前主要从崩解特性、膨胀率、膨胀力、饱和吸水率和自由膨胀率五个方面进行分析评价,红层地区岩体膨胀性试验成果,见表 4。

表 4 红层地区岩体膨胀性试验成果

岩性	统计项	膨胀率 /%	膨胀力 /kPa	自由膨胀率 /%	饱和吸水率 /%	备注
		F	Pp	Fs	Wm	
粉砂质泥岩	最大值	16	590	49	46	浸水时产生气泡、掉屑,大部分崩解物呈屑状、粉状和小块状
	最小值	1	26	12	5	
	平均值	5	123	28	15	

由表 4 可知:四川红层地区岩体膨胀性离散性极大,非膨胀岩、弱膨胀岩和中膨胀岩均有分布,但未有强膨胀岩体分布。另外,试验过程中发现,浸水干湿循环崩解速度大于淋水干湿循环速度,对于含水率相对较高、孔隙比小的岩石,膨胀性不是很明显。

2.6 油气成藏特性

四川盆地是中国大型富含天然气盆地之一,是一个典型的多期构造叠合盆地,在其长期的构造演化过程中,环绕盆地周缘形成部分前缘凹陷,成为盆地内主要的高压异常分布区,同时也是策动油气发生运移的主要源地。围绕沉积凹陷中心,油气将向盆地内侧和盆地外缘一侧进行运移,同时在地应力的作用下,油气将从高势能区向低势能区运移。

在其漫长的构造沉积旋回过程中,形成了海相及陆相两套地层,其中震旦系至中二叠统为海相沉积地层,总厚约 4 000~7 000 m;上三叠统至

白垩系为内陆断陷陆相沉积地层,总厚约 2 000~6 000 m,使纵向上发育了中生界陆相成藏系统、上古生界海相成藏系统及下古生界海相成藏系统三大成藏系统,基本明确了震旦系、石炭系、二叠系、三叠系等主要含气层系,形成了川东、川西、川南和川中 4 个含气区域,基本覆盖了四川盆地所有的红层地区^[4-5](图 1)。



图 1 四川盆地红层地区气田分布

3 红层地区隧洞工程地质问题

3.1 洞顶脱层掉块问题

隧洞开挖后,洞顶易脱层掉块,是四川红层地区岩体中洞室稳定的主要问题之一。通过对大量隧洞洞顶脱层掉块分析,其主要原因有以下三点:(1)岩体多呈互层状发育,砂岩和粉砂质泥岩层理较发育,岩层层面及岩石界面间结合力较弱,洞室开挖后,洞顶易沿岩层层面或岩石界面产生脱层、掉块甚至垮塌;(2)红层地区地形地貌大多为低丘地区,山体相对高差大部分在百米以内,圆丘状的地形使得侧向和垂直向风化卸荷作用叠加,洞顶岩体易受风化卸荷作用的影响,易发生脱层掉块;(3)岩体中黏土矿物导致岩体具有一定的膨胀特性,洞顶的近水平岩层在自身重力和膨胀力的综合作用下,发生脱层掉块。

3.2 局部涌水问题

四川红层地区岩性以砂岩、粉砂质泥岩为主,地下水分为风化带裂隙水、承压水和基岩裂隙水三类。地下水埋深一般不大,隧洞地下水普遍沿裂隙面或软弱结构面进入洞室,以滴水状和线状为主,少部分呈股状。

进入洞室的水体主要有以下几个源头:(1)隧洞埋深不是很大,洞室地表有水田水塘分布,地表水通过岩体中节理、裂隙下渗进入洞室;(2)砂岩等赋水岩体中的裂隙水将岩体中陡倾角构造裂隙作为地下水的运移通道,将水体导入开挖后的地下洞室中;(3)局部承压水在洞室开挖时被直接击穿,承压水沿开挖面直接进入洞室,大多呈股状或涌水状,但此类情况比较少见,且持续时间一般较短,一般在数小时至数天内就会消失或者流量大幅减少。

3.3 底板软化问题

依据目前常规的施工工序,地下洞室开挖以后,在完成初次衬砌后继续掘进,待单个隧洞贯通后再进行二次衬砌,特别是对长隧洞而言,两次衬砌时间跨度较大,从而导致洞室底板开挖后无法及时完成浇筑。

在此期间,清渣运输车辆等机械设备会反复对底板造成扰动,加之排水沟极易堵塞,进入洞室的地下水会逐渐在底板汇聚。底板若是粉砂质泥岩等软岩分布,在水和机械设备的综合作用下,岩体软化破坏,不可避免造成底板的超挖,甚至较大

幅度的超挖。目前底板超挖已是红层地区洞室开挖后普遍存在的问题之一。

3.4 边墙破坏问题

四川红层地区岩层产状大多平缓,部分地区沿层面软弱结构面比较发育,不会对地下洞室边墙的稳定产生不利作用。但随着近几年红层地区地下洞室的大规模开挖,开挖后边墙发生失稳破坏的情况较多,且大多在洞室开挖数月以后才逐渐显现出来,特别是经过首个雨季以后,集中失稳破坏的情况较多。

经过对边墙失稳破坏洞室的持续追踪和分析,上述现象主要由以下几个原因造成:(1)边墙为砂岩等较硬岩,其边墙破坏主要是由边墙中随机发育的结构面与层面组合后形成不稳定的块体,沿上述结构面脱离边墙母体,一般开挖后即失稳脱落;(2)边墙为砂岩等较硬岩,岩体侧向卸荷发育,卸荷张开宽度达数厘米,甚至数十厘米,裂隙面无充填,洞室开挖时可能直接脱落失稳;(3)边墙为粉砂质泥岩等软岩类,开挖后岩体完整,结构面不发育,初始判断其稳定性好。但随着时间效应叠加,在底板附近积水和部分岩体膨胀的综合作用下,从边墙靠近底板的附近逐渐开始破坏,单次破坏的规模均较小,一般破坏高度在 30 cm 以内,破坏厚度在 2 cm 以内,主要的破坏模式就岩体呈层状,逐渐鼓起开裂,并与边墙母岩脱离堆积于底板附近。特别是洞室开挖后如果没有及时衬砌,经历首个雨季后,在接近雨季结束的中后期,此类破坏模式频发,目前已发现最大破坏厚度达 60 cm。此类破坏发生后,如果不及时采取措施,往往会导致洞室顶拱失稳垮塌,这也是目前开挖后未及时二次衬砌导致洞室垮塌严重的首要原因。

3.5 有毒有害气体问题

四川红层地区下伏油气资源丰富,局部构造较发育,深部油气向上运移造成上覆地层普遍浸染。

隧洞瓦斯(浅层天然气)主要来自于深部生烃层,特别是深部岩体为三叠系须家河组、侏罗系自流井组和凉高山组的烃源岩,烃源岩生成的天然经断层或裂隙向上运移至背斜等有利油气圈闭构造,在浅部孔隙、裂隙相对发育的砂岩体内,形成气源型次生气藏和气囊型次生气藏,为隧道施工

带来不同程度的有毒有害气体风险。

4 结 语

依托国家水网建设加速的契机,对在四川盆地红层地区修建的一大批水利工程地下洞室开挖过程中出现的问题进行了较系统的梳理。

借助已修建和正在修建项目在各阶段积累的岩体试验成果资料,对四川盆地红层地区砂岩和粉砂质泥岩的化学成分、矿物成分、力学特征、风化特性和膨胀崩解特性进行了归纳总结。

四川盆地红层地区地下洞室开挖后在地下水和机械设备的综合作用下,对底板造成反复的破坏,最终导致底板超挖严重,造成工程的巨大浪费,应在开挖后及时做好保护处理。

对边墙垮塌的原因和过程进行了较深入的分析 and 阐述,尤其要对粉砂质泥岩的时间效应引起足够的重视。

随着毗河供水和亭子口灌区工程的陆续修建,来自于深部生烃层油气经断裂或裂隙向上运



(上接第 108 页)

3)针对叶巴滩大型洞室蚀变岩空腔所提出的综合治理措施以柔性支护为总体原则,分别包括了塌腔体孔口治理、塌腔体内部治理、塌腔体远端岩体治理,空间上层次分明,针对性强,监测数据表明,文中所提综合治理措施效果显著。

参考文献:

[1] 牛传星,秦哲,冯佰研,等. 水岩作用下蚀变岩力学性质损伤规律[J]. 长江科学院院报,2016,33(8):75-79.

[2] Chen BR, Feng XT, Zeng XH, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during tbm tunneling in deep-buried tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2011; 30(2): 275-283.

[3] 杨根兰,黄润秋,蔡国军,等. 岩石破坏前后曲线分类及脆—延转换围压研究——蚀变岩常规三轴压缩试验 I [J].

移,在浅部孔隙、裂隙中形成气源型次生气藏和气囊型次生气藏,为隧道施工带来不同程度的有毒有害气体风险。

参考文献:

[1] 王子忠. 四川盆地红层岩体主要水利水电工程地质问题系统研究[D]. 成都理工大学,2011:43-46.

[2] 彭华,邱卓炜,潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. 地理科学,2014,34(4):460-463.

[3] 张翔,李宗龙,马显光. 滇中引水工程隧洞软岩工程地质特性研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2015 年全国工程地质学术年会论文集. 北京:科学出版社,2015: 305-309.

[4] 陈载林,陈玉梁. 浅谈四川盆地石油天然气资源[J]. 江西能源,2009(1):19-22.

[5] 张健,张奇. 四川盆地油气勘探—历史回顾及展望[J]. 天然气工业,2002(增刊 1):3-7.

作者简介:

王玉秦(1980-),男,陕西宝鸡人,正高级工程师,硕士,从事水利水电工程地质勘察工作。(编辑:吴永红)

岩土力学,2008,29(10):2759-2763.

[4] Zhao JS, Feng XT, Wang PF, et al. Analysis of microseismic characteristics and fracture mechanism of underground caverns induced by blasting excavation. Rock and Soil Mechanics. 2018; 39(7): 2563-2573.

[5] 范庆龙,聂亮,吴少儒,等. 复杂蚀变岩体隧洞施工特性及安全措施探讨[J]. 水电站设计,2021,37(4):29-33.

作者简介:

张利(1984-),女,贵州习水人,工程师,管理学硕士,从事水利水电工程招标及合同管理工作;

何周(1981-),男,四川蓬溪人,高级工程师,工程硕士,从事新能源工程招标及合同管理工作;

何建华(1975-),女,四川蓬溪人,正高级工程师,项目总工,主要从事水电工程设计研究工作;

(编辑:廖益斌)