

文章编号: 1674—8247(2022)02—0053—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.02.010

某花岗岩质隧道放射性评价及工程措施

甘光元¹ 蒲东²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 成都华丰工程勘察设计有限公司, 成都 610041)

摘要:花岗岩是地球表层放射性元素主要载体之一,其放射性与其酸碱度、形成时代、成因类型等相关,但并非所有花岗岩都具有放射性,仅某个亚属存在放射性超标现象。西部地区某在建花岗岩质隧道围岩与放射性花岗岩亚属具有较大的相似度,且隧址位于可能产生氡气外溢的深大断裂缝,放射性超标的可能性较大。本文结合放射性核素检测、孔内 γ 测量及氡气监测对隧址区进行了放射性评价,并提出了工程措施建议。

关键词:花岗岩;放射性;隧道;检测;氡气

中图分类号:U452.1;X837 **文献标志码:**A

Radioactivity Evaluation and Engineering Measures of A Granite Tunnel

GAN Guangyuan¹ PU Dong²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Chengdu Huafeng Engineering Survey and Design Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Granite is one of the main carriers of radioactive elements on the Earth's surface. Its radioactivity is related to pH, formation age, and genetic type of rock, but not all granites are radioactive, and only one subgenus has radioactivity exceeding the standard. The rocks of a granite tunnel under construction in the western China have a great similarity to the subgenus of radioactive granite, and the tunnel is located in a deep fracture that may generate radon gas spillover, so the possibility of exceeding the radioactivity standard is relatively strong. In this paper, radionuclide detection, gamma measurement in the borehole, and radon gas monitoring were combined to evaluate the radioactivity of the tunnel site, and suggestions for engineering measures were put forward.

Key words: granite; radioactive; tunnel; detection; radon gas

近年来,随着隧道工程的大量修建,放射性超标问题被不断揭示。隧道围岩常含有不同程度的天然放射性物质,作为环境辐射的主要来源,过高的 γ 辐射剂量和氡气浓度对人体具有致癌作用,严重影响隧道施工和运营安全。花岗岩是地球表层放射性元素的主要载体之一,放射性 γ 主要来自²³⁸U、²³²Th和⁴⁰K^[1]。其中,镭、钍放射性衰变可产生氡气,通过土壤和岩石空隙运移至地下工程的密闭空间中富集。对于大面积放

射性异常区,工程选线一般以绕避为主,若合理防护且工程代价不大时,可选择适当位置通过。

国内对隧道放射性的研究集中在放射性调查及评价上,主要手段为地表、洞室 γ 辐射剂量测量,土壤、水及空气中氡气测量,地表、洞室内放射性核素测量。作为放射性围岩主要岩性,花岗岩的放射性与其酸碱度、形成时代、成因类型等相关。本文从花岗岩种属上做初判,结合隧址放射性核素检测、孔内 γ 测量及

收稿日期:2022-03-14

作者简介:甘光元(1982-),男,高级工程师。

引文格式:甘光元,蒲东. 某花岗岩质隧道放射性评价及工程措施[J]. 高速铁路技术,2022,13(2):53-56.

GAN Guangyuan, PU Dong. Radioactivity Evaluation and Engineering Measures of A Granite Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2):53-56.

氦气监测对隧址区进行放射性评价。

1 工程概况

某在建隧道全长 30 km,最大埋深 1 500 m,是目前国内在建最长隧道之一。主要岩性有雄松群大理岩组大理岩夹片麻岩、石英岩,雄松群片麻岩组片岩夹片麻岩、糜棱岩、大理岩,二长花岗岩(燕山期),闪长岩、花岗闪长岩(燕山期),闪长岩脉(燕山期),二长花岗岩(印支期),花岗闪长岩、二长花岗岩(印支期),花岗闪长岩(华力西期),石英闪长岩(华力西期),蛇纹岩。隧道进口至金沙江西支断裂(波罗-木协断层)位于金沙江缝合带,隧址区构造极为发育,变质作用强烈。

2 放射性初判

花岗岩放射性与岩石酸度(SiO_2 含量)、碱度($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量)、形成时代、成因类型等具有相关性^[2-5]。(1)根据泰勒 1964 年分析结果,岩浆岩中放射性物质随 SiO_2 含量增加而增多。因此,酸性岩浆岩(花岗岩质)放射性物质含量一般较多;(2)造岩矿物中,碱性长石(钾长石,含 ^{40}K 同位素)含量越多,放射性一般越高。根据鲍温反应系列,从超基性岩到酸性岩,矿物结晶顺序为斜长石由基性变酸性,钾长石含量逐渐增多,因此含钾长石酸性岩放射性较高;(3)花岗岩侵入时代越新,岩浆分异程度越高,放射性越强。一般而言,燕山期>印支期>华力西期>加里东期;(4)徐克勤教授将花岗岩成因分为改造型、同熔型和幔源型,根据陆壳物质参与多少,改造型花岗岩放射性大于同熔型,再大于幔源型。

该隧道花岗岩质围岩长度占全隧长度的 67%,主要岩性为二长花岗岩、花岗闪长岩,石英含量一般在 30%~75%,肉红色钾长石发育;花岗岩侵入时代较新,主要为燕山期和印支期;据区域地质报告^[6],隧址区花岗岩属同熔-改造成因花岗岩。此外,隧址区处于金沙江缝合带,属深大断裂,深大断裂是良好的导气通道,常因地壳深部氦气外溢导致周边放射性超标。对比隧址区花岗岩与放射性花岗岩种属,发现两者存在高度相似性,且隧址区位于深大断裂带,氦气外溢的可能性也较大,初判该隧道可能存在放射性异常。在此基础上,对隧道开展放射性核素检测、孔内 γ 辐射率测试及氦气监测^[7-8]。

3 放射性对隧道工程施工影响

放射性对隧道现场施工人员及环境的影响主要有:(1)爆破生产的放射性粉尘对洞内空气的污染;

(2)开挖裸露基岩面及裂隙水溢出的氦气及其衰变产物对施工人员的内照射;(3)裸露基岩面 γ 射线对施工人员的照射;(4)施工产生的废水、废气、废渣等对洞外造成的污染。

4 隧址区放射性检测及评价

对隧址区花岗岩质深孔进行自然伽马测试和孔内岩石样品放射性核素测试,对隧址靠近金沙江缝合带深孔进行氦气检测。

4.1 孔内 γ 测试及评价

隧址区共完成孔内自然伽马测试 10 692 m (16 孔),孔内自然伽马测试值范围为 $0.04\gamma \sim 116.1\gamma$,洞身范围内实测自然 γ 值范围为 $0.73\gamma \sim 78.82\gamma$,如表 1 所示。

表 1 孔内自然放射性强度测试值表

孔号	自然伽马(γ)		
	最大值(γ)	最小值(γ)	平均值(γ)
DZ-01	33.28	3.69	18.1
DZ-01-1	27.83	5.06	15.39
DZ-2 横-01	14	1	5
DZ-03	46.96	0.1	11.84
DZ-03-1	58.68	9.87	24.47
DZ-2 横-02	13.26	0.82	4.12
DZ-04	13.32	0.04	3.11
DZ-04-1	9.42	4	5.27
DZ-04-2	29.68	0.34	17.28
DZ-04-3	63.75	14.28	31.78
DZ-05	58.2	9.74	26.1
DZ-06-1	83.02	2.17	27.77
DZ-07	62.67	2.50	23.75
DZ-07-1	116.1	25.33	66.84
DZ-08	87.57	12.11	52.83
DZ-09	78.55	8.33	42.57

TB 10027-2012《铁路工程不良地质勘察规程》第 13.5.3 条规定:放射性工作场所分区根据年有效剂量当量 H_e 划分为非限制区($H_e < 5 \text{ mSv}$)、监督区($5 \text{ mSv} \leq H_e \leq 15 \text{ mSv}$)、控制区($H_e > 15 \text{ mSv}$)。结合孔内实测 γ 值,对钻孔测试段落按放射性工作场所分区计算不同限制区的比例。

$$H_e = D_r \times K \times t \quad (1)$$

式中: H_e ——有效剂量当量(mSv);

D_r ——实测环境地表 γ 辐射空气吸收剂量率, $D_r = \text{Gy/h}$;

K ——有效剂量当量率与空气吸收剂量率比值, $K = 0.7 \text{ Sv/Gy}$;

t ——公众在环境中停留时间(h)。

计算共考虑 3 种工况。工况 1:施工人员在环境

中停留时间按每年250工作日(法定节假日休息),每工作日8h,计2000h;工况2:施工人员在环境中停留时间按每年365工作日,每工作日8h,计2920h;

工况3:弃渣周边群众在环境中停留时间按每年365工作日,每工作日24h,计8760h。计算结果如表2所示。

表2 孔内γ测试放射性工作场所分区一览表

钻孔编号	最高照射率值 $D_r/(Gy/h)$	k	工况3		工况1		工况2	
			年有效剂量当量 $H_e/(mSv)$	划分区域	年有效剂量当量 $H_e/(mSv)$	划分区域	年有效剂量当量 $H_e/(mSv)$	划分区域
DZ-01	33.28	0.7	0.39	非限制区	0.57	非限制区	1.71	非限制区
DZ-01-1	27.83	0.7	0.33	非限制区	0.48	非限制区	1.43	非限制区
DZ-2 横-01	14	0.7	0.16	非限制区	0.24	非限制区	0.72	非限制区
DZ-03	46.96	0.7	0.55	非限制区	0.80	非限制区	2.41	非限制区
DZ-03-1	58.68	0.7	0.69	非限制区	1.01	非限制区	3.02	非限制区
DZ-2 横-02	13.26	0.7	0.16	非限制区	0.23	非限制区	0.68	非限制区
DZ-04	13.32	0.7	0.16	非限制区	0.23	非限制区	0.68	非限制区
DZ-04-1	9.42	0.7	0.11	非限制区	0.16	非限制区	0.48	非限制区
DZ-04-2	29.68	0.7	0.35	非限制区	0.51	非限制区	1.53	非限制区
DZ-04-3	63.75	0.7	0.75	非限制区	1.09	非限制区	3.28	非限制区
DZ-05	58.2	0.7	0.68	非限制区	1.00	非限制区	2.99	非限制区
DZ-06-1	83.02	0.7	0.97	非限制区	1.42	非限制区	4.27	非限制区
DZ-07	62.67	0.7	0.74	非限制区	1.07	非限制区	3.22	非限制区
DZ-07-1	116.1	0.7	1.36	非限制区	1.99	非限制区	5.97	监督区
DZ-08	87.57	0.7	1.03	非限制区	1.50	非限制区	4.50	非限制区
DZ-09	78.55	0.7	0.92	非限制区	1.35	非限制区	4.04	非限制区

注: $H_e = D_r \times K \times t$

从表3可以看出,工况1和工况2的测试结果均属于非限制区。工况3仅DZ-07-1处于监督区,该钻孔实测放射性强度最大值为116.1γ,位于洞身以上50m,施工中需加强监测措施,不排除隧道渣场对周边群众的影响。

4.2 孔内放射性核素含量测试及评价

根据HJ 53-2000《拟开放场址土壤中剩余放射性可接受水平规定》第3.1条的规定,确定土壤

中²³⁸U含量扣除本底后应低于65Bq/kg(0.25mSv/a剂量约束值)、²³²Th含量扣除本底后应低于157.5Bq/kg(0.25mSv/a剂量约束值)。隧址区²³⁸U本底值为40.7Bq/kg,²³²Th本底值为64.7Bq/kg,因此²³⁸U的限值为105.7Bq/kg,²³²Th的限值为222.2Bq/kg。

隧址区完成9个岩石样品放射性核素含量测试,各样品测试成果及评价结果如表3所示。

表3 岩石中放射性核素含量测试统计表

编号	检测结果					
	²³⁸ U(Bq/Kg)	²²⁶ Ra(Bq/Kg)	²³² Th(Bq/Kg)	⁴⁰ K(Bq/Kg)	总α(Bq/Kg)	总β(Bq/Kg)
DZ-03-Y-1	13.4	15.5	1.91	30.1	1.29 × 10 ²	2.06 × 10 ³
DZ-03-Y-2	30.6	21.4	63.0	6.53 × 10 ²	5.06 × 10 ²	2.26 × 10 ³
DZ-03-Y-3	33.8	20.8	30.3	6.21 × 10 ²	3.70 × 10 ²	9.14 × 10 ²
DZ-04-2-Y-1	-	-	-	-	3.73 × 10 ²	1.13 × 10 ³
DZ-04-2-Y-2	-	-	-	-	5.16 × 10 ²	1.16 × 10 ³
DZ-04-2-Y-3	-	-	-	-	3.63 × 10 ²	1.40 × 10 ³
DZ-07-FS1	1.08 × 10 ²	1.27 × 10 ²	62.3	9.19 × 10 ²	1.57 × 10 ³	1.54 × 10 ³
DZ-08	3.75 × 10 ²	1.77 × 10 ²	2.83 × 10 ²	1.90 × 10 ³	1.66 × 10 ³	1.95 × 10 ³
DZ-09	2.60 × 10 ²	1.34 × 10 ²	1.71 × 10 ²	1.17 × 10 ³	1.73 × 10 ³	2.05 × 10 ³

从表3可以看出,DZ-07-FS1、DZ-08、DZ-09孔中²³⁸U超过限定值,最大值为375Bq/Kg;DZ-08孔²³²Th测试值超过限定值,达到283Bq/Kg;放射性异常率达到44%。隧道洞身二衬混凝土厚度一般在30cm以上,屏蔽因子(减弱倍数) $f_r(x) > 20$,故洞室内辐射在混凝土的隔离屏蔽作用下衰减较快,对人体影响较小。

4.3 氡浓度测定及评价

氡主要由镭、钍等元素衰变产生,虽然是惰性气体,但是其衰变产物既有放射性又有活泼的化学性质,容易附着在大气微粒上,被吸入并停留在肺里,造成人体内照射伤害。

隧址区邻近金沙江缝合带共完成3孔氡测试,测

试位置分布于钻孔顶端、中部和底端,测试结果呈现出底端浓度 > 中部浓度 > 顶端浓度的规律,符合氡气密度远大于空气密度的特征。孔内浓度测试结果范围为 30 ~ 66 Bq/m³,根据 GB/T 18883 - 2002《室内空气质量标准》和 GBZ 116 - 2002《地下建筑氡及其子体控制标准》,氡气的标准值取为 400 Bq/m³,孔内浓度测试结果均在标准值之内,同时也满足室内氡浓度上限值(人在其中生活而终生不受氡危害的室内空气氡浓度范围)70 400 ~ 150 400 Bq/m³ 的规定。

5 工程措施建议

5.1 加强监测

根据分析结果,隧址区存在较大面积放射性的可能较小。施工过程中应注意局部放射性水平较高的地段,特别是 DZ-07-1、DZ-07-FS1、DZ-08、DZ-09 钻孔洞身附近,应加强监测,若发现放射性异常体应及时处置。

5.2 隧道防尘

施工防尘除了满足防止尘肺病外,还应防止放射性粉尘吸入对人体的内照射危害。主要手段为防尘源和合理通风,包括:(1)采用防尘口罩,减少施工人员的吸入;(2)选用合理的通风设备,最大限度降低粉尘的浓度;(3)尽量采用湿法作业,最大限度地限制扬尘。

5.3 降氡

隧道内空气中的氡主要来源于岩石表面,岩石核素含量越高,暴露面越大,孔隙越多,矿岩风化破坏越严重,隧道内空气压力越小,氡气析出得越快、越多。降低隧道内空气中的氡及其子体浓度的主要途径有:(1)减少氡气的析出量,及时初衬并增加初衬的厚度;(2)采用通风的方法将析出的氡及其子体稀释并排出洞外。凡产生氡气的作业面,必须有通风装置,通风系统要防止污染物回流,进风口的粉尘浓度不应大于 0.1 mg/m³,氡浓度不应大于 150 Bq/m³。进隧道工作前,必须先通风,且通风时间不得少于 30 min,隧道内有人时不得停止通风,风机至少应该做到一备一用。

5.4 封闭掌子面

开挖后应及时喷射混凝土封闭掌子面,防止放射性气体进一步向空气中扩散,同时也可降低 γ 辐射水平。

5.5 排水及清运洞渣

加强洞内排水,保持排水畅通;及时清运洞渣,减少洞渣在洞内停留时间。

6 弃渣利用评价

隧址以外地区岩性以砂泥岩软质岩为主,该地区缺乏工程建设所需骨料及路基填料,隧址花岗岩质围岩为该地为数不多的硬质岩,故对其是否可合理利用进行评价。

当作为建筑主材骨料时,根据 GB 6566 - 2010《建筑材料放射性核素限量》规定:天然放射性核素²²⁶Ra、²³²Th、⁴⁰K的放射性比活度应同时满足外照射指数 $IRa \leq 1$ 和内照射指数 $I\gamma \leq 1$ 。隧道岩石中放射性核素含量测试成果如表 4 所示。从表 4 可以看出,除 DZ-08 孔的内照射指数 $I\gamma$ 超过限定值外,其余样品的外照射指数 IRa 、内照射指数 $I\gamma$ 均满足要求。

表 4 内外照射指数统计表

样品编号	IRa	$I\gamma$
DZ-03-Y-1	<0.1	<0.1
DZ-03-Y-2	0.1	0.5
DZ-03-Y-3	0.1	0.3
DZ-07-FS1	0.6	0.8
DZ-08	0.9	2.0
DZ-09	0.7	1.3
块石样-03	0.3	0.5
块石样-04	0.6	1.3

当作为路基填料时,根据 EJ/T 977 - 95《铀矿地质辐射环境影响评价要求》: γ 辐射剂量率扣除本底后小于 660 γ ,可作为路基填料。隧址地区 γ 辐射剂量率本底值为 73.2 γ ,当现场实测 γ 辐射剂量小于 733.2 γ 时,即可作为路基填料。对照孔内 γ 测试成果,未见大于 733.2 γ 段落,因此均可作为路基填料。

7 结束语

本文隧址花岗质围岩与放射性花岗岩种属高度相似,且隧址位于可能产生氡气外溢的深大断裂缝,放射性超标的可能较大,应结合隧址放射性核素检测、孔内 γ 测量及氡气监测对隧址区进行放射性评价。结果显示:DZ-07-1 钻孔 γ 辐射剂量在每年 365 工作日,每日 24 h 的极端条件下处于监督区,该钻孔洞身附近所出弃渣应埋置于弃渣场中部、深部,且弃渣场不应设置在村镇等人口聚集区周边,并应远离水体;DZ-07-FS1、DZ-08、DZ-09 孔 ²³⁸U 超过限定值, DZ-08 孔 ²³²Th 测试值超过限定值,但隧道洞身二衬混凝土厚度一般在 30 cm 以上,屏蔽因子(减弱倍数) $fr(x) > 20$,洞内辐射在混凝土的隔离屏蔽作用下衰减较快,对人体影响较小;隧道洞渣可用于骨料及路基填料。

(下转第 66 页)

- 速铁路技术, 2019, 10(6): 54-57.
- LIU Jingwen. Analysis of Influence of Construction Organization Design on Cost of Overseas Railway Construction [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 54-57.
- [2] 闫振华. 基于变异系数统计法的铁路材料价格调整机制研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 1-5.
- YAN Zhenhua. On the Price Adjustment Mechanism for Railway Materials Based on the Coefficient of Variation (CV) Method [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 1-5.
- [3] 李准, 吴刘忠球. TBM(隧道掘进机)的硬岩掘进速度分析及其对项目经济的影响[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(1): 11-14.
- LI Zhun, WULIU Zhongqiu. Analysis of TBM Tunneling Speed in Hard Rock and Influence of Tunneling Speed on Project Economics [J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(1): 11-14.
- [4] 宋昱. 施工组织设计对高速铁路建设成本的影响探析[J]. 交通科技, 2011(3): 148-150.
- SONG Yu. Analysis of the Influence of Construction Organization Design on the Construction Cost of High Speed Railway [J]. Transportation Science & Technology, 2011(3): 148-150.
- [5] 范永红. 从造价管理的视角谈施工组织设计的编制[J]. 山西建筑, 2009, 35(35): 196-197.
- FAN Yonghong. On Compilation of Construction Organization Design from Aspect of Cost Management [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(35): 196-197.
- [6] 国铁科法[2017]31号, 铁路基本建设工程设计概(预)算费用定额[S].
- GUO Tie Ke Fa[2017]No. 31, Budget Cost Quota of Railway Capital Construction Engineering Design[S].
- [7] 国铁科法[2017]30号, 铁路基本建设工程设计概(预)算编制办法[S].
- GUO Tie Ke Fa[2017]No. 30, Compilation Method of Railway Capital Construction Engineering Design Budget[S].
- [8] 国铁科法[2017]33号, 铁路工程预算定额[S].
- GUO Tie Ke Fa[2017]No. 33, Railway Engineering Budget Quota [S].
- [9] 张雪宁. 论工程造价中材料价格调整的合理方法及要点[J]. 城市建筑, 2018(20): 94-96.
- ZHANG Xuening. Reasonable Methods and Key Points for Adjustment of Material Prices in Project Cost [J]. Urbanism and Architecture, 2018(20): 9-96.

(上接第56页)

考虑到隧道内放射性存在不可预测性, 不排除取样点位以外地段放射性物质局部富集的可能, 建议加强隧道施工监测, 若发生放射性危害需及时采取相应工程措施。

参考文献:

- [1] 唐国才. 花岗岩中放射性元素分布的不均匀性[J]. 中国建材科技, 2002, 11(1): 38-39.
- TANG Guocai. Heterogeneity of Distribution of Radioactive Elements in Granite [J]. China Building Materials Science & Technology, 2002, 11(1): 38-39.
- [2] 梁昌俊. 花岗岩板材放射性成因浅析[J]. 嘉应大学学报, 1997, 15(3): 81-83.
- LIANG Changjun. The Analyses of Radioactive Causes of Granite Plank [J]. Journal of Jiaying University, 1997, 15(3): 81-83.
- [3] 陈静. 浅谈放射性核素与花岗岩的关系[J]. 广东建材, 2011, 27(8): 139-141.
- CHEN Jing. A Brief Discussion on the Relationship Between Radionuclide and Granite [J]. Guangdong Building Materials, 2011, 27(8): 139-141.
- [4] 钱翔东. 再谈花岗岩放射性[J]. 石材, 2000(1): 22-23.
- QIAN Xiangdong. On Radioactivity of Granite [J]. Stone, 2000(1): 22-23.
- [5] 洪大卫, 王涛, 童英. 中国花岗岩概述[J]. 地质论评, 2007, 53(S1): 9-16.
- HONG Dawei, WANG Tao, TONG Ying. An Outline about Granitoids in China [J]. Geological Review, 2007, 53(S1): 9-16.
- [6] 西藏自治区地质矿产局. 白玉县幅/雄松区幅 1:20万区域地质调查报告[R]. 拉萨: 西藏自治区地质矿产局, 1992.
- Geology and Mineral Resources Bureau of Tibet Autonomous Region. Regional Geological Survey Report of Baiyu County and Xionsong District (1:200,000) [R]. Lhasa: Geology and Mineral Resources Bureau of Tibet Autonomous Region, 1992.
- [7] 中铁二院工程集团有限责任公司. 某新建铁路放射性评价专题研究报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2021.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Special Research Report on Radioactivity Assessment of a New Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2021.
- [8] 虞凯, 刘孜学, 韦道准. 川藏铁路基础设施实时监测预警系统架构及功能研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(2): 41-44.
- YU Kai, LIU Zixue, WEI Daozhun. The Architecture and Function Research on the Real-Time Monitoring and Early Warning System of the Infrastructure along the Sichuan-Tibet Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(2): 41-44.