

The Understanding to the Combustible Gas Leak in Hongshiyuan Tunnel

Aiguo Shen

Southwest Jiaotong University, Chengdu
Email: 32916750@qq.com

Received: Dec. 8th, 2012; revised: Dec. 30th, 2012; accepted: Jan. 11th, 2013

Abstract: Hongshiyuan Tunnel of Hewu high-speed rail is located in the depths of the Dabie Mountains, its excavation length is 7857 m and passing through regional gneiss, but during excavation, a burning phenomenon of combustible gas appeared. This situation is extremely rare, by combining with rich information, a comprehensive study is made in this paper and a series of personal opinion is resulted.

Keywords: Tunnel; Gneiss; Combustible Gas

对红石岩隧道可燃气体的认识

申爱国

西南交通大学, 成都
Email: 32916750@qq.com

收稿日期: 2012 年 12 月 8 日; 修回日期: 2012 年 12 月 30 日; 录用日期: 2013 年 1 月 11 日

摘要: 合武高速铁路红石岩隧道位于大别山深处, 开挖长度 7857 m, 隧道通过区域主要为片麻岩, 但在开挖期间出现可燃气体燃烧现象, 这种状况极为罕见, 本文综合各类资料对此进行了全面研究, 得出了个人的见解。

关键词: 隧道; 片麻岩; 可燃气体

1. 概述

红石岩隧道全长 7857 m, 最大埋深 560 m, 位于新建合(肥)武(汉)高速客运专线所通过的大别山区中段北坡。大别山区是江淮流域的分水岭, 在不同地质时期, 由于岩浆活动频繁, 使得该地区历经了多次构造运动, 同时也经受了强烈的变形变质作用, 因此, 这一地区以区域变质岩(片麻岩、石英片岩、花岗岩、闪长岩)为主, 其地貌特征表现为群山连绵, 构造发育, 沟谷深切, 基岩基本裸露。由于隧道所经地段为片(麻)岩地层, 且据各种地质资料分析, 线路经过地段不含煤系地层, 也不属于含油、含气的地层构造, 故隧道

工程招标文件及设计文件中均未提及隧道内含有有害气体。

然而, 当红石岩隧道出口完成仰坡、截水和洞口加固等准备工作, 按照上下台阶法开始进洞开挖后不久, 2005 年 10 月 19 日, 在距隧道洞口 10 米处掌子面爆破之后, 碴堆上出现燃烧现象, 火焰呈淡蓝色, 燃烧持续时间达 20 分钟之久, 自此之后, 在随后长达一年多的开挖施工过程中又多次发生局部燃烧现象。面对红石岩隧道在开挖过程中发生的局部燃烧现象, 施工单位及时采取了紧急措施。首先加强了可燃气体的检测和隧道通风, 随后按照瓦斯隧道施工规范, 组织编制了施工方案和应急预案, 在很短的时间

内，落实了一系列瓦斯隧道施工安全防范措施，并联合中国石油大学、中国矿业大学、辽宁工程技术研究所等单位，通过现场气体和岩石取样对可燃气体的性质进行了实验室研究，同时，从大别山区域地质构造角度对红石岩隧道出现可燃气体的现象进行了再认识。

在红石岩隧道发生局部燃烧现象之后，陆续在红石岩隧道附近多个隧道内(如五福堂隧道、九斗冲隧道、汀筒沟隧道等)陆续发生了爆破后的燃烧现象，有时燃烧发生在渣堆上，有时发生在掌子面上，共同的特点都是局部燃烧。

2. 大别山的形成与断裂特征^[1-3]

根据众多学者对于大别山地区地质构造演变的研究，形成了一些比较一致的共识，认为大别山的产生与和华北板块和扬子板块之间的碰撞与挤压密不可分。

由于华北板块与扬子板块发生碰撞，使得岩浆在碰撞处上涌并逐渐凝结为岩浆原岩。深部原岩在板块挤压和高温环境等因素作用下发生不同程度的变质，从而生成各类变质岩，而表层岩浆原岩则由于生成环境的差异，形成了不同的花岗岩。这些存在于两个板块之间狭长区域内的层状分布变质岩和花岗岩构成了大别山形成之前最初的坚硬地质块体。

当华北板块和扬子板块在区域应力场作用下继续挤压大别山地质块体时，由于块体的坚硬性质，致使两个板块不得不下形成俯冲的态势，造成大别山地质块体在被挤压的同时逐步抬升，表层花岗岩逐渐露出地表，形成初期花岗岩台地。挤压作用下生成的花岗岩台地在其内部不可避免地产生了很多褶皱与断裂，这些褶皱与断裂受到构造作用、差异风化剥蚀、地表雨水长期腐蚀等因素的综合作用，逐步在这片台地上演出成以白马尖(海拔 1774 米)、天堂寨(海拔 1729 米)、铜锣寨、马鬃岭等为脊梁的大别山山脉。

大别山的演变历史决定了这里的岩性分布和断裂特征。目前我们所看到的大别山，其基底主要是各类变质岩。由于大别山基底岩浆岩的变质程度高、变形强烈，因此变质级别很高的片麻岩成为该地区变质岩的主体，同时还分布一定数量的低级和中级变质岩，而海拔最高的一些山峰主要是由花岗岩所构成。

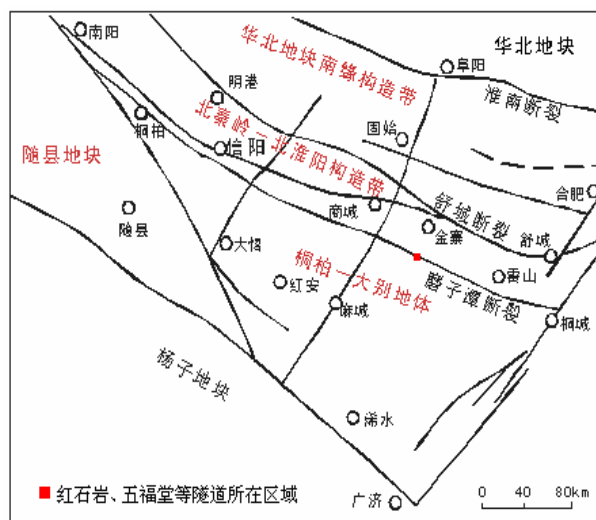


Figure 1. The geologic block and fracture in Dabie Mountains
图 1. 大别山地质块体和断裂之间的关系

从图 1 可以看出，在两大板块俯冲挤压大别山块体时，由于粘滞摩擦的牵动效应，造成大别山块体两侧与两大板块作用强烈的地带产生丰富的剪切型断裂，这些断裂一直延伸至深处，从而形成被深大断裂合围的大别山地质块体。显然，这些深大断裂在特定条件下有可能成为地球深处物质向地表迁移的有利通道，大别山当中多处温泉的形成就是最好的证据。

3. 可燃气体成分分析^[1-3]

根据气体和岩石样品的实验室研究，得到结果见表 1 和表 2。

无论气样分析还是岩样分析都表明，隧道内可燃气体的主要成分包括甲烷、乙烯、乙烷、丙烷和一氧化碳气体，但并不包含二氧化碳，这就基本排除了无机成因说；而根据一氧化碳所占的比例，又可基本排除了煤型气成因之说。再进一步将上述分析结果与合肥盆地的天然气成分进行比较，发现二者之间具有极高的相似性，因此可以确认，红石岩隧道内的可燃气体属有机天然气中的油型气。

Table 1. Gas sample analysis result in the tunnel
表 1. 红石岩隧道气样分析结果

气体样品	成分及浓度	
钻孔 1	甲烷 3.08 ppm	一氧化碳 0.64 ppm
钻孔 2	甲烷 2.88 ppm	一氧化碳 2.92 ppm
钻孔 2 洞口外	甲烷 2.91 ppm	一氧化碳 2.36 ppm

Table 2. Rock sample analysis result in the tunnel
表 2. 红石岩隧道岩样分析结果

温度	钻孔 1 处	钻孔 2 处
15°C(直接取样)	甲烷 5.71 ppm 乙烯 1.27 ppm 乙烷 0.47 ppm 一氧化碳 0.64 ppm	甲烷 3.63 ppm 乙烯 0.37 ppm 一氧化碳 1.31 ppm
90°C	甲烷 4.65 ppm 乙烯 0.1 ppm 一氧化碳 1.67 ppm	甲烷 5.78 ppm 乙烯 1.23 ppm 乙烷 0.37 ppm 丙烷 0.96 ppm 一氧化碳 3.64 ppm
150°C	甲烷 7.66 ppm 乙烯 2.10 ppm 乙烷 0.71 ppm 丙烷 0.89 ppm 一氧化碳 179.49 ppm	甲烷 8.41 ppm 乙烯 5.67 ppm 乙烷 1.23 ppm 丙烷 3.36 ppm 一氧化碳 264.28 ppm

4. 隧道内可燃气体来源与传播途径

既然上述研究表明红石岩隧道内可燃气体不是煤型气，也不是无机型气体，而是有机型天然气中的油型气，因此，为了隧道施工安全，有必要研究隧道内这类气体的来源。

依据合肥盆地及华北地块南缘地层的状况推测，本区可能的生气源岩主要为寒武系暗色泥岩、奥陶系石灰岩和石炭二叠系煤系地层三套地层，其厚度已经达到有效生气岩的厚度，除了奥陶系石灰岩的有机质丰度相对较低外，其他两套地层的有机碳含量多大于 0.5%，达到了较好的生气岩级别。

通常，油气型天然气都存在于地壳较深的部位，只有在一定的深度，当温度和压力达到一定值时，才具备油气型天然气生成所需的环境和条件，因此可以认为，红石岩隧道内可燃气体应当来自地壳深处。

寒武系暗色泥岩和奥陶系石灰岩为 I 型干酪根，石炭二叠系煤系地层主要为 III 型干酪根，标志烃源岩成熟度的镜质体反射率 $R_o\%$ 大都在 1.5~3.5 左右，已经达到生气阶段。总之，从烃源岩的丰度、类型、成熟度来看，已经具备了生成大量天然气的物质基础；而扬子板块也是发现过油气构造的区域，因此，位于两大板块之间的大别山地质块体其深部也应该存在生成天然气的条件，这为目前大别山地区隧道开挖过程中所发生的燃烧现象和测试到的气体浓度提供了物质来源。

隧道施工是在地表进行的，因此当隧道内出现了

油气型天然气时，意味着天然气通过某种路径从地壳深部迁移至地表，并存储在一定的空间内，当这里恰好有隧道施工时便被释放出来，有时会形成燃烧。红石岩等发现可燃气体的隧道位于佛堂坳断层与药铺-青山深大断裂之间相对断层比较发育的地带，这一带有四处地表温泉，因此，药铺-青山断裂成为这一带可燃气体迁移的主要路径，同时，分布在

这一地带较宽的破碎地层又为可燃气体的积蓄创造了条件，如图 2 和 3 所示。

5. 红石岩隧道可燃气体的工程特征

红石岩隧道通过地区主要是变质片麻岩，隧道总长 7857 米，其中围岩级别分布如表 3 所示。

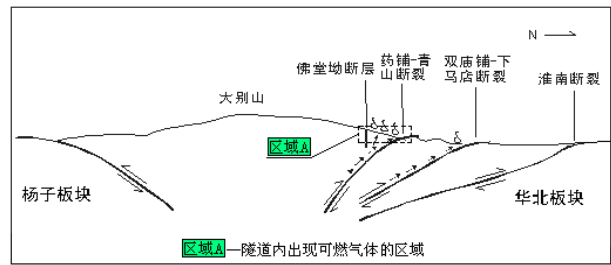


Figure 2. The uplift and fracture distribution characteristics
图 2. 大别山的隆起和断裂分布特征

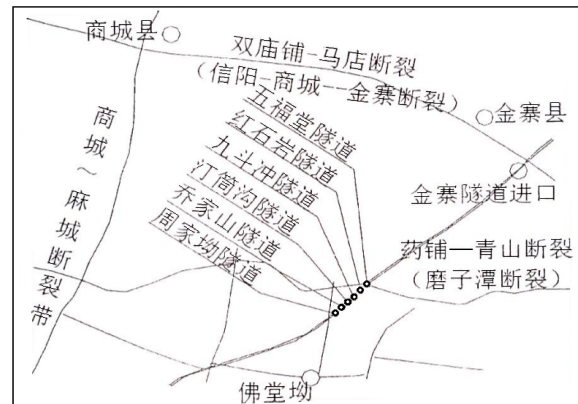


Figure 3. Tunnel distribution with combustible gas
图 3. 可燃气体燃烧隧道分布示意图

Table 3. Surrounding rock distribution and the number of blasting estimates
表 3. 红石岩隧道围岩分布情况和爆破次数估算

围岩级别	V 级	IV 级	III 级	II 级	合计
各类围岩总长度 m	327	155	995	6380	7857
平均每次进尺 cm	70	100	200	320	
平均爆破次数	467	155	498	1994	3144

按照表 3 进行估算, 红石岩隧道全部开挖贯通大约需要进行 3000 多次爆破。根据施工单位的记录, 直至隧道开挖贯通共观察到不足 20 次局部燃烧现象, 只占全部爆破次数的 0.6% 左右。但是, 这并非真实情况, 原因在于: 1) 在 7857 m 隧道通过区间并非全部存在有断层, 因此, 不是每一次爆破之后都会出现可燃气体; 2) 隧道施工安全法规规定, 爆破后 15 分钟之内不允许施工人员进入爆破现场, 因此, 隧道内所观察到的局部燃烧现象至少持续了 15 分钟以上, 不足 15 分钟的局部燃烧根本观察不到; 3) 随着开挖深度的增加, 爆破后到达现场的时间越来越长, 一些燃烧不可能看到并记录下来。因此, 考虑以上三个原因之后, 实际发生的局部燃烧次数还应该更多一些。虽然实际观察的局部燃烧次数不多, 全自动瓦斯检测仪依然记录下来大量数据, 只不过测到的气体浓度都很低, 远未达到临界爆炸浓度^[4]。

从隧道安全施工的角度来看, 爆破后是否发生局部燃烧并非很重要的事情, 因为红石岩隧道所发生的局部燃烧并没有对施工安全构成危害。自从 2005 年 10 月 15 日红石岩隧道在开挖过程中首次出现局部可燃气体燃烧之后, 施工单位加强了对于隧道内可燃气体的监测, 制定了“一炮三检”制度, 即装药前、装药后、爆破后进行检测。通过对红石岩隧道可燃气体的长时间观察和监测, 发现隧道内可燃气体具有如下特征:

- 1) 燃烧只发生在爆破之后, 并且是局部短暂燃烧。
- 2) 只有少数爆破后会发生燃烧。
- 3) 燃烧主要发生在岩性较为破碎的地带。
- 4) 燃烧大部分发生在碴堆上, 少数情况下发生在掌子面上。
- 5) 隧道开挖过程中, 大多数时间测出的瓦斯浓度都很低, 甚至为 0, 只是偶尔在爆破之后较短的时间内能够测到一定的浓度, 浓度通常在 0.1% 以下。
- 6) 在掌子面施工进度眼的过程中, 有害气体的浓度基本为零。

6. 红石岩隧道可燃气体的危害性分析^[2,4]

瓦斯爆炸历来是隧道施工的最大敌人之一。2005 年 12 月 22 日四川都汶高速公路董家山隧道发生瓦斯爆炸, 造成 40 多人死亡, 而红石岩隧道局部燃烧事

件在董家山隧道事件之后更引起人们的强烈关注, 中铁隧道集团合武三标项目部按照瓦斯隧道施工规范的基本要求, 进一步强化了安全防范措施, 至 2007 年 7 月 19 日, 安全完成了 7857 m 的隧道开挖施工。

按照常理, 片麻岩地区隧道施工发生可燃气体燃烧是极为罕见的事情。如前所述, 大别山是在岩浆岩地质块抬升之后, 经过构造作用、差异风化剥蚀、地表雨水长期腐蚀等逐渐形成的, 因此, 在岩层中不可能潜埋煤系地层; 再者, 大别山的基底是以片麻岩为代表的变质岩所构成的, 片麻岩的岩性坚硬密实, 不含易溶解的物质, 再加上地表水系不发达, 山体内不可能存在任何大的空隙, 而实际上, 自隧道开挖到贯通未遇到任何大一些的裂隙或具有连通性的分布裂隙, 气体主要存储于破碎带的裂隙之中或锁闭在岩体的气孔内; 再结合上一节所谈到的关于红石岩隧道可燃气体的六个特征, 因此, 可以做出如下推断:

- 1) 因为不具备大的存储空间, 所以隧道开挖区域岩体内的可燃气体存储量很小。
- 2) 以隧道施工和运营时间为测量尺度, 可燃气体不具备流动性。
- 3) 可燃气体是随着开挖进尺而逐步分批次释放出来的, 不会出现一次性较大规模的涌出。
- 4) 可燃气体不是煤型气, 也不是无机型气体, 属于有机类油型气。
- 5) 可燃气体不是岩体内自生的, 是地壳深处的油型气通过断层破碎带经过长距离长时间而运输上来的。

根据上述五条推断, 本文作者得出如下结论: 从施工的角度出发, 红石岩隧道开挖过程中出现的可燃气体不会对施工安全形成威胁, 因此, 只要按照非瓦斯隧道施工规范进行施工, 同时加强通风, 加强监测, 施工安全一定能够得到保证。

参考文献 (References)

- [1] 黄春峰. 合武铁路客运专线红石岩瓦斯隧道地质特质及预防[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(8): 147-149.
- [2] 奚正巧, 罗琼等. 红石岩瓦斯隧道涌出机理试验研究及施工对策[C]. 中国高速铁路隧道国际技术交流会论文集, 北京: 中国铁道工业出版社, 2006.
- [3] 李杰, 黄春峰. 合武铁路客运专线红石岩隧道瓦斯成因探讨[J]. 铁道设计标准, 2007, 1(增刊): 98-99.
- [4] 铁路瓦斯隧道施工技术规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.