

# 铁路穿越大型储气库的线路方案比选与工程风险控制研究

## ——以宜涪高铁穿越黄草峡储气库为例

刘源

中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023

**[摘要]**随着我国高速铁路与地下储气库建设的快速推进,线路穿越储气库的工程场景日益增多,此类工程涉及铁路运营安全与储气库密闭性双重核心需求,方案比选与风险控制成为工程建设的关键环节。文中以宜涪高铁穿越黄草峡储气库为例,结合黄草峡储气库地质特征、储层分布及既有铁路(渝利铁路)运营经验,设计多套线路穿越方案,从地质适应性、工程经济性、安全风险三个维度进行比选,确定最优穿越方案;同时针对最优方案面临的储气库注采扰动、高铁施工及运营振动、气井泄漏燃爆等核心风险,建立风险评估体系,提出针对性的风险控制措施,为同类铁路穿越大型储气库工程提供技术参考与实践借鉴。

**[关键词]**铁路穿越大型储气库;线路方案比选;风险控制

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19642

中图分类号: U212.32

文献标识码: A

## Comparison and Study on Line Scheme Selection and Engineering Risk Control for Railway Crossing Large Gas Storage Tanks

### — Taking the Yifu High-speed Railway Crossing Huangcaoxia Gas Storage as an Example

LIU Yuan

China Railway Eryuan Chongqing Survey and Design Institute Co., Ltd., Chongqing, 400023, China

**Abstract:** With the rapid advancement of high-speed railway and underground gas storage construction in China, there are increasingly more engineering scenarios where railway lines pass through gas storage facilities. Such projects involve dual core requirements of railway operation safety and gas storage airtightness, and scheme comparison and risk control have become key links in engineering construction. Taking the Yifu high-speed railway crossing Huangcaoxia gas storage as an example in the article, combined with the geological characteristics, reservoir distribution, and existing railway (Yuli Railway) operation experience of Huangcaoxia gas storage, multiple sets of line crossing schemes are designed, and the optimal crossing scheme is determined from three dimensions: geological adaptability, engineering economy and safety risk; At the same time, a risk assessment system is established to address the core risks faced by the optimal solution, such as gas storage injection and production disturbances, high-speed railway construction and operation vibrations, and gas well leaks and explosions. Targeted risk control measures are proposed to provide technical reference and practical guidance for similar railway projects crossing large gas storage facilities.

**Keywords:** railway crossing large gas storage facilities; comparison and selection of route schemes; risk control

### 1 宜涪高铁概述

宜涪高铁是国家中长期路网规划“八纵八横”高铁网中沿江通道的重要组成部分,是川渝地区与华中、华东地区的铁路客运主通道。是强化成渝城市群与长江中游城市群、长三角城市群的交流融合,落实长江经济带国家战略的重点工程。线路自在建沪渝蓉高速铁路武汉至宜昌段宜昌北站西端的金巴岭线路所引出,经湖北省宜昌市、恩施

州,重庆市石柱县、丰都县、涪陵区,西接长寿北站,近期通过渝万城际铁路引入重庆枢纽重庆北站,与拟建成渝中线高铁贯通。全线新建正线长度 486.8km,设计时速 350km/h。

### 2 黄草峡储气库概况

#### 2.1 地下储气库简介

储气库是储存天然气的设施,通常指通过将天然气注

入地下空间形成的人工气藏，主要承担季节调峰、应急供气及战略储备等功能。运作周期遵循“冬春采气，夏秋注气”模式，被誉为保障能源安全的“稳定压舱石”。

世界上典型的天然气地下储气库类型有 4 种：枯竭油气藏储气库、含水层储气库、盐穴储气库、废弃矿坑储气库。其中枯竭油气藏储气库利用枯竭的天然气田或油田而建设，完全利用自然条件，仅需勘探过后增设注采气井，建设集注站，便可使用，是最常用、最经济的一种地下储气形式。宜涪高铁穿越黄草峡储气库就是利用黄草峡气田建设而成。

## 2.2 地理位置与区域构造

黄草峡储气库位于重庆市长寿区、涪陵区境内，长寿城区东南方向约 10.6km，属于四川盆地川东南中隆高陡

构造区中部，海拔 330~650m，相对高差 100~300m，属亚热带湿润季风气候，年平均气温 17.7℃，年降雨量约 1130.9mm，水源丰富。区域交通便利，井场以泥质碎石路面为主，通行条件良好。

黄草峡构造为北东-南西走向的长轴背斜，东西两端分别与苟家场、丰盛场构造相望，北与双龙-新市构造相邻。构造核部出露最老地层为须家河组，两翼为侏罗系紫红色砂泥岩，整体受多组逆断层控制，断层走向以北东向为主，部分呈北北东向展布，主干断层控制着构造形态与隆起幅度。根据《中国地震动参数区划图》，研究区地震动峰值加速度为 0.05g，地震基本烈度为 VI 度，无活动断层，区域构造稳定性良好。

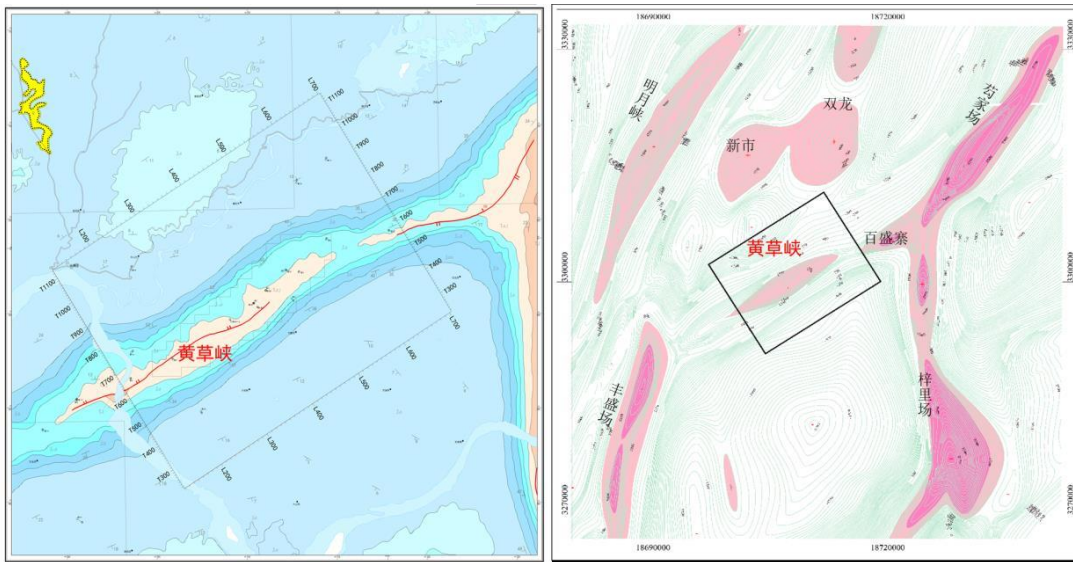


图 1 黄草峡三维地面地质出露图（左）和地面构造图（右）

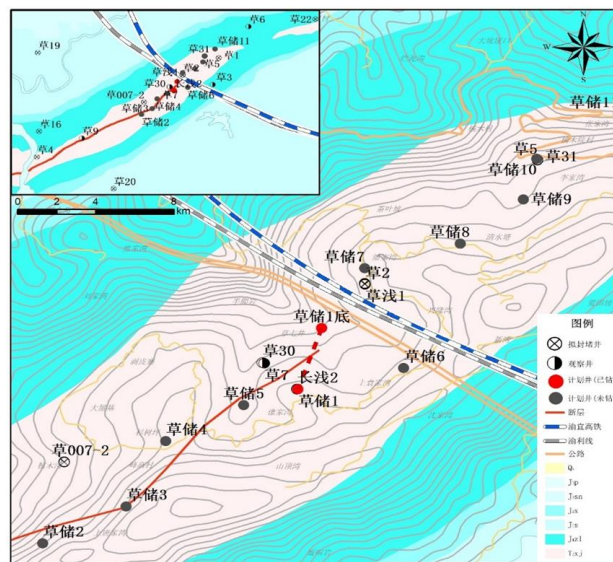


图 2 宝丰寺隧道与黄草峡储气库的平面位置关系

### 2.3 储气库注采特征

黄草峡储气库设计最大开采流量为  $1.5 \times 107 \text{m}^3/\text{d}$ ，注采井主要包括草储1井、草2井等，其中草储1井距渝利铁路宝丰寺隧道 877m、黄草山隧道 826m，草2井距宝丰寺隧道 120m、黄草山隧道 181m。储气库注采过程中，地层会发生周期性的隆起（注气）与沉降（采气），可能对周边铁路线路产生扰动。

## 3 铁路穿越储气库方案研究

### 3.1 相互位置关系

宜涪高铁重庆境内线路经重庆石柱县、丰都县后进入涪陵区，在涪陵北站与在建渝万高铁合场设置高铁场后，向西沿既有渝利线穿越黄草峡进入长寿区，接入既有渝万线，利用渝万线引入重庆枢纽重庆北站渝万场，与在建成渝中线高铁贯通运营。受控于前后引入既有车站，其宝丰寺隧道与既有渝利线黄草山隧道并行上跨黄草峡储气库，

穿越黄草山背斜。

储气库储层有：嘉二2亚段，嘉一至嘉二1亚段。储气库直接盖层有：嘉二3亚段，嘉二1至嘉二2亚段。宝丰寺隧道距嘉二3盖层垂直距离约为 563m，距嘉二2储层垂直距离约为 632m。

### 3.2 线路方案研究

结合黄草峡储气库地质条件、储层分布及铁路、油气行业相关设计规范，线路方案设计遵循以下原则：一是避让储气库核心储层与主干断层，最大限度减少对储气库盖层完整性的影响；二是兼顾工程经济性与施工可行性，降低隧道施工难度与工程投资；三是保障铁路运营安全，避免储气库注采扰动对线路轨道平顺性的影响。同时结合黄草山采空区专题研究成果、区域环境敏感点及渝利线黄草山隧道设计、施工、运营等资料，分别研究了沿渝利方案、北侧绕避方案、南侧绕避方案。

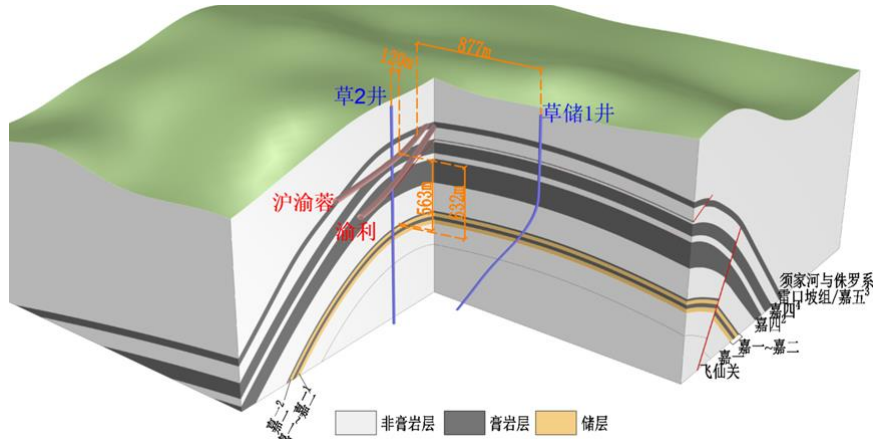


图3 黄草峡储气库与隧道的位置关系三维图

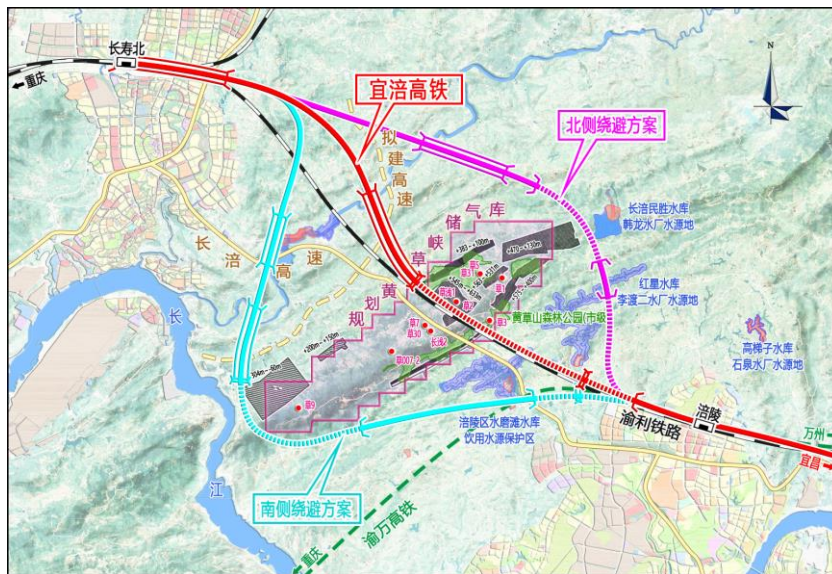


图4 宜涪高铁穿越黄草山储气库线路平面方案示意图

### 3.2.1 方案一：沿渝利方案

该方案线路沿渝利铁路北侧并行，穿越黄草峡储气库北部区域，隧道全长约 3.8km，隧道轴线与渝利铁路宝丰寺隧道轴线平行，间距约 50m。隧道穿越地层主要为须家河组、雷口坡组，避开嘉二 2、嘉二 1 至嘉一段核心储层，距主干断层①号断层距离不小于 100m。

### 3.2.2 方案二：南侧绕避方案

该方案线路绕避黄草峡储气库核心区域，从储气库西南边缘穿越，隧道全长约 4.5km，隧道轴线与储气库构造轴线呈 30° 夹角，穿越地层主要为侏罗系砂泥岩、须家河组，不穿越核心储层与主干断层，距最近储层边界约 200m，铁路隧道对储气库的扰动小。该方案较沿渝利方案线路展长 10.5km，工程投资增加约 19.8 亿元，且需限速 160km/h。

### 3.2.3 方案三：北侧绕避方案

该方案线路绕避黄草峡储气库核心区域，从储气库东北边缘穿越，隧道全长约 4.1km，隧道轴线与储气库构造轴线呈 60° 夹角，穿越地层主要为侏罗系砂泥岩、须家河组，不穿越核心储层与主干断层，距最近储层边界约 1km，隧道对储气库的扰动最小。该方案较沿渝利方案线路展长 2.1km，工程投资增加约 4.1 亿元，且需限速 160km/h。

综上，绕避方案均存在线路增加较长、工程投资增加较大、存在限速段落，与全线技术标准不匹配等问题。沿渝利方案虽然穿越储气库，但距离气井位置较近。但其将不满足规范要求的 200m 范围内气井均关闭，线路与既有渝利线基本并行，相距约 50m，应充分论证铁路与储气库的相互影响，确保双方工程安全可靠。

## 4 相互影响安全论证

### 4.1 工程风险识别

结合线路走向、施工工艺及黄草峡储气库特征，识别出三大工程风险，分别为：（1）储气库注采扰动风险：储气库注采过程中，地层发生周期性隆起与沉降，可能导致铁路隧道及线路产生变形，影响线路平顺性，甚至损坏隧道结构。（2）高铁施工扰动风险：隧道采用矿山法施工，爆破作业产生的振动可能扰动储气库盖层与断层，导致盖层破损、断层活化，引发天然气泄漏；同时，施工过程中可能破坏气井井筒，影响储气库正常运营。（3）气井泄漏燃爆风险：储气库注采井（尤其是草 2 井）与隧道距离较近，若气井设备故障导致天然气泄漏，可能引发燃爆事故，威胁高铁施工与运营安全。

### 4.2 数值模拟分析

#### 4.2.1 储气库注采扰动模拟

模拟条件：选取草储 1 井、草 2 井为研究对象，模拟

180 天注气、120 天采气过程，以及 100 次循环注采对地层变形的影响，重点分析隧道位置的变形量与轨道偏差。

模拟结果：注采井在注气过程中地层表现为隆起，采气过程中表现为沉降，变形影响区呈漏斗状，随着注采时间增加，漏斗半径逐渐增大。其中，草储 1 井注采引起渝利线黄草山隧道整体最大变形量为 1.48mm~1.70mm，宜涪线宝丰寺隧道整体最大变形量为 1.29mm~1.45mm；草 2 井注采引起渝利线黄草山隧道整体最大变形量为 1.32mm~1.48mm，宜涪线宝丰寺隧道整体最大变形量为 1.36mm~1.48mm。

轨道偏差分析：草储 1 井、草 2 井注采引起的渝利线黄草山隧道 10m 弦长高低轨道偏差均为 0.04mm，宜涪线宝丰寺隧道均为 0.02mm，均满足《高速铁路线路维修规则》（铁工电〔2023〕106 号）规定的 2mm 限值，说明储气库注采扰动风险可控。

循环注采影响：100 次循环注采模拟结果显示，雷口坡组、嘉四 4、嘉四 2 三套膏岩盖层及两条主干断层均无塑性区显示，嘉二 1、嘉二 3 两套直接盖层有少量零星塑性区，且扩展缓慢，盖层整体完整，说明储气库设计生命周期内，注采不会破坏盖层完整性与断层稳定性。

#### 4.2.2 高铁隧道施工爆破模拟

模拟条件：采用方案一隧道施工参数，设计 5 种爆破工况（1m、2m、3m 进尺爆破），模拟单次爆破与连续爆破（间隔 8h）对储气库盖层、断层的影响，重点分析振动速度与塑性变形区分布。模拟结果：隧道爆破产生的振动速度与爆破进尺正相关，雷口坡组、嘉四 4、嘉四 2 三层膏岩层的峰值振动速度分别为 1.4~3.6cm/s、0.25~0.65cm/s、0.16~0.3cm/s，均小于《爆破安全规程》（GB6722-2014）规定的 18cm/s 限值；连续爆破情况下，三层膏岩层的残余位移较小（雷口坡组最大 1.85mm），且塑性变形区仅分布于隧道周围 100m 范围内，嘉四 4、嘉四 2、嘉二 3、嘉二 1 盖层及断层均无塑性破坏，说明隧道爆破施工对储气库扰动较小，风险可控。

#### 4.2.3 高铁运营振动模拟

模拟条件：设计 4 种工况（宜涪高铁客车单独运行、渝利铁路客车单独运行、两条铁路客车同时运行、渝利铁路货运列车单独运行），模拟列车运行振动对储气库盖层的影响。

模拟结果：列车通过时，雷口坡组、嘉四 4、嘉四 2 三层膏岩层产生微量形变，其中雷口坡组变形量 0.086mm~0.317mm，嘉四 4 组 0.058mm~0.240mm，嘉四 2 组 0.045mm~0.194mm，列车通过后，形变在 1.5s

内即可恢复,不会破坏盖层完整性,说明高铁运营振动风险可控。

#### 4.2.4 气井泄漏燃爆风险模拟

采用 TNT 当量法与爆炸火球伤害效应模型,计算草储 1 井(无阻流量  $1500 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ d}$ )泄漏燃爆的安全距离。结果显示,爆炸波安全距离为 242.2m,爆炸火球安全距离为 449.86m,而草储 1 井与隧道水平距离约 877m,远大于安全距离,且隧道位于地下,燃爆事故仅影响地表,不会对高铁隧道造成影响,说明气井泄漏燃爆风险可控。

### 5 工程风险控制措施

#### 5.1 施工阶段风险控制措施

##### 5.1.1 隧道施工振动控制

一是采用控制爆破技术,严格控制爆破进尺(建议不超过 2m),减少炸药用量,采用毫秒微差爆破,降低爆破振动强度;二是在隧道与储气库盖层、断层邻近区域,设置减震沟,减少振动波传导;三是加强爆破振动监测,在盖层、断层及气井周边设置监测点,实时监测振动速度,若超过预警值,立即停止施工,调整爆破参数。

##### 5.1.2 气井与盖层保护

一是施工前详细勘察气井位置与盖层分布,绘制详细的地质与气井分布图,避免施工过程中触碰气井井筒;二是在气井周边设置防护区域,禁止重型设备碾压,施工过程中避免对气井周边地层的扰动;三是加强盖层完整性监测,采用钻孔窥视、声波探测等技术,实时监测盖层是否出现破损、裂隙,及时采取注浆加固措施。

#### 5.2 运营阶段风险控制措施

##### 5.2.1 储气库注采监测与调控

一是建立储气库注采监测体系,实时监测注采压力、地层变形、气体泄漏等参数,重点监测草储 1 井、草 2 井周边地层变形,与铁路线路变形监测数据联动分析;二是优化注采方案,控制注采速度与压力变化幅度,减少地层变形量,避免对铁路线路造成过大扰动;三是定期对储气库盖层、断层及气井进行检测,及时发现并处理潜在隐患。

##### 5.2.2 铁路轨道与隧道监测

建立高铁轨道平顺性监测体系,在隧道及邻近线路设置监测点,实时监测线路沉降、轨道偏差等参数,若超过限值,及时进行线路调整;加强隧道结构监测,监测隧道衬砌变形、裂缝等情况,及时采取加固措施;定期对铁路

与储气库邻近区域进行有害气体检测,防范气体泄漏风险。

#### 5.3 应急保障措施

一是制定完善的应急预案,包括天然气泄漏、燃爆、隧道坍塌、线路变形等突发事件的应急处置流程,明确应急组织机构、职责分工、应急响应程序;二是配备充足的应急物资,如气体检测设备、灭火器材、注浆设备、应急救援设备等,定期进行应急演练,提高应急处置能力;三是建立铁路与储气库运营单位的联动机制,加强信息沟通与协同配合,一旦发生突发事件,及时启动应急预案,最大限度降低损失。

### 6 结论

经过充分论证,宜涪高铁与黄草峡储气库相互影响程度均未超过相关规范、标准所规定的安全限值,高压天然气不会进入隧道,不会造成灾变,储气库内无氧气进入,不会引起爆炸灾变。在一定的工程措施条件下,宜涪高铁与黄草峡储气库相互影响小。

近年来储气库的建造速度正逐步加快,同时铁路等民用重要设施也初具规模。多地不乏出现类似相互影响工程,一边是重要交通基础设施,一边是重要能源安全保障设施,均是涉及民生及人民生命财产的重大工程。勘察设计阶段作为工程风险管控的源头,应充分做好方案研究,确保工程安全。宜涪高铁穿越黄草峡储气库的方案比选,工程风险控制研究的风险识别、数值模型的分析方法,施工运营阶段的风险控制措施可为相似工程案例提供借鉴。

#### [参考文献]

- [1]蒋中明,刘琛智,杨雪,等.山地型隧洞式储气库侧向稳定性分析方法[J].岩土工程学报,2026,3(43):31.
- [2]温廷钧,李力民,曾娟,等.碳同位素录井技术在储气库盖层有效性评价中的应用[J].石油化工应用,2026,45(2):76-79.
- [3]杨紫晴,王宏仞,代科敏,等.中国石油地下储气库智能化建设进展及关键技术探讨[J].油气田地地面工程,2026,45(1):24-30.
- [4]王盟浩,李森圣,谢雯洁,等.基于储气库群支撑的天然气交易枢纽形成路径[J].天然气技术与经济,2025,19(6):37-43.

作者简介:刘源,男,汉族,山东菏泽人,本科,研究方向为土木工程。