



## 严金秀简介：

中铁科学研究院有限公司副总经理、研究员，国际隧道和地下空间协会（ITA）副主席，中国土木工程学会隧道及地下工程分会副理事长。

长期从事隧道工程技术研究，对国际隧道工程技术发展、长大和复杂隧道修建技术、海底隧道修建技术、隧道风险管理、单层衬砌、防排水技术等方面有较深的研究。获中国铁道学会、中国公路学会、四川省、青岛市等科学技术奖多项，为享受国务院政府特殊津贴专家。

发表论文20余篇；在欧洲、北美、南美、东南亚、中东等地区国际会议上发表20多个主题报告；为ITA培训专家并承担了大量培训授课；曾主编500多万字的隧道专业论文集及期刊。

第八届桥梁和隧道工程技术论坛

# 大埋深特长山岭隧道技术挑战与对策

严金秀

国际隧道和地下空间协会（ITA）副主席  
中铁科学研究院有限公司研究员、副总经理

2018.7.8 北京

# 目录

## 1. 国内外概况

## 2. 面临技术挑战

- 长隧道特殊问题
- 大埋深特殊问题
- 山岭隧道特殊问题
- 未来隧道的要求

## 3. 应对挑战的对策

- 勘察对策
- 设计对策
- 施工对策
- 维护对策

## 4. 结论

# 1.国内外概况

## 运营中的25km以上大埋深特长山岭铁路隧道

隧道名称	国家	长度km	竣工时间	线路
圣哥达山底	瑞士	57.1	2016	Gotthardbahn
				Luzern/Zürich-Milan
勒奇山山底	瑞士	34.5	2007	Lötschbergbahn
				Brig - Thun (- Bern - Basel)
新关角	中国	32.6	2014	青藏铁路
瓜达拉玛	西班牙	28.4	2007	LAV Madrid - Valladolid
西秦岭	中国	28.2	2016	兰渝铁路
太行山	中国	27.8	2007	石太铁路
八甲田	日本	26.5	2010	Tōhoku Shinkansen
岩手一户	日本	25.8	2002	Tōhoku Shinkansen

## 施工中的25km以上大埋深特长山岭铁路隧道

隧道名称	位置	长度 (km)	预计完工时间	线路
昂班山山底	法国/意大利	57.5	2028	Lyon-Turin rail link project.
布伦纳山底	奥地利/意大利	55	2026	Brenner Railway
高黎贡山	中国	34.5	2021	大瑞铁路
科拉姆	奥地利	32.9	2022	Koralalm Railway
大岛	日本	32.6	2031	Hokkaidō Shinkansen
平安	中国	28.3	2017	成兰铁路
塞默灵山底	奥地利	27.3	2026	Southern Railway
札樽	日本	26.2	2031	Hokkaidō Shinkansen
岷山	中国	25	2017	成兰铁路

- 瑞士、奥地利、意大利、法国、西班牙、中国、日本等国家已经修建了一批大埋深特长山岭铁路隧道。
- 瑞士、奥地利、意大利、法国，从十九世纪就开始修建穿越阿尔卑斯山的铁路长隧道，其中很多隧道仍在使用。

# 最长大埋深特长山岭铁路隧道

## □ 运营：

国外：57.1km 瑞士圣哥达山底隧道

国内：32.6km 新关角

## □ 在建

国外：55km 奥地利-意大利布伦纳山底隧道(Brenner Base Tunnel)

国内：34.5km 高黎贡山

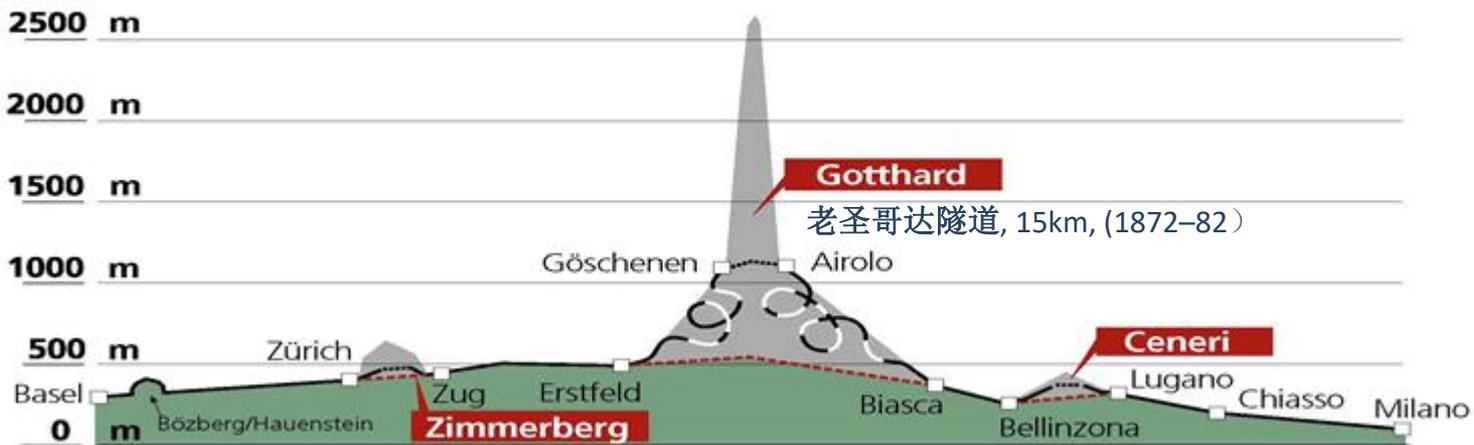
## □ 即将全面开工建设

国外：57.5km 法国-意大利昂班山山底隧道（Mount D'Ambin Tunnel）

世界最长大埋深特长山岭铁路隧道（运营）

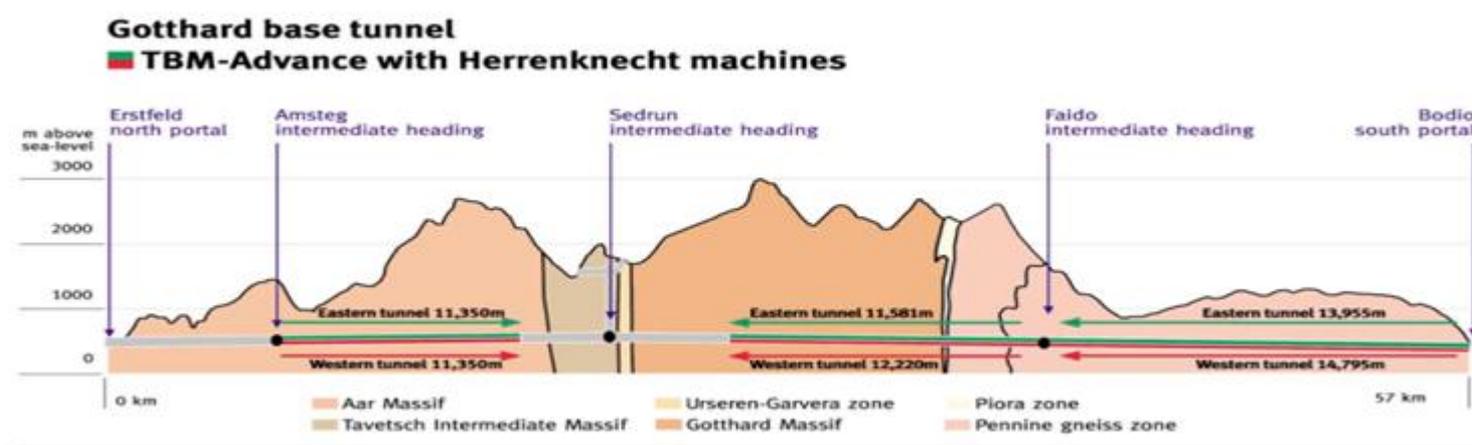
——57.1km长瑞士圣哥达山底铁路隧道

## 57.1km瑞士圣哥达山底铁路隧道（运营）



Source: AlpTransit Gotthard AG

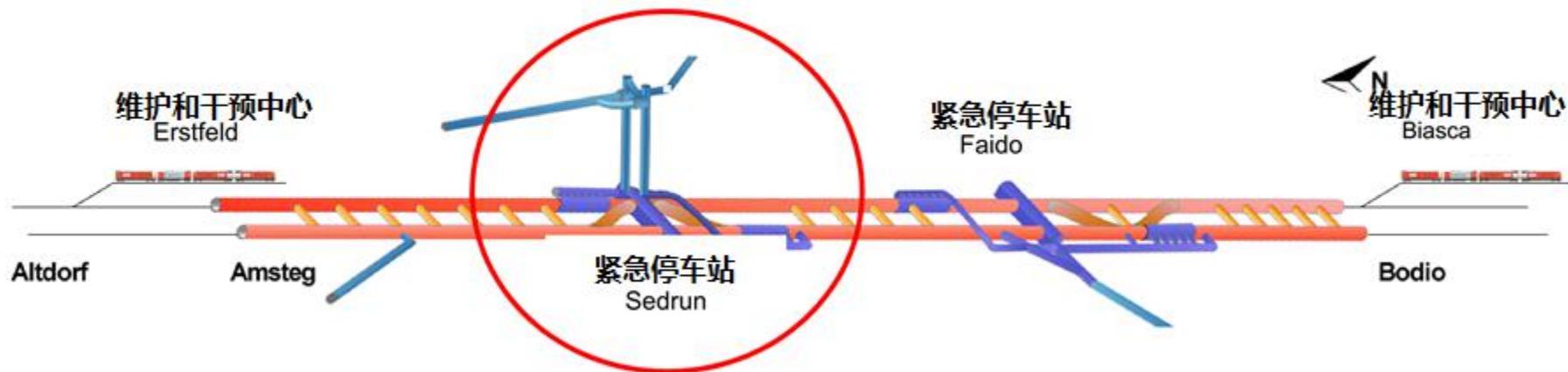
# 57.1km瑞士圣哥达山底铁路隧道（运营）



20% 钻爆法，80% TBM:

- 平均钻爆法掘进速度：好地层 4-4.5m/天，差地层1.0m/天，最高掘进速度：11.5m/天
- 平均TBM掘进速度：10.5-14.27m/天，最高掘进速度：56m/天

## 57.1km瑞士圣哥达山底铁路隧道（运营）

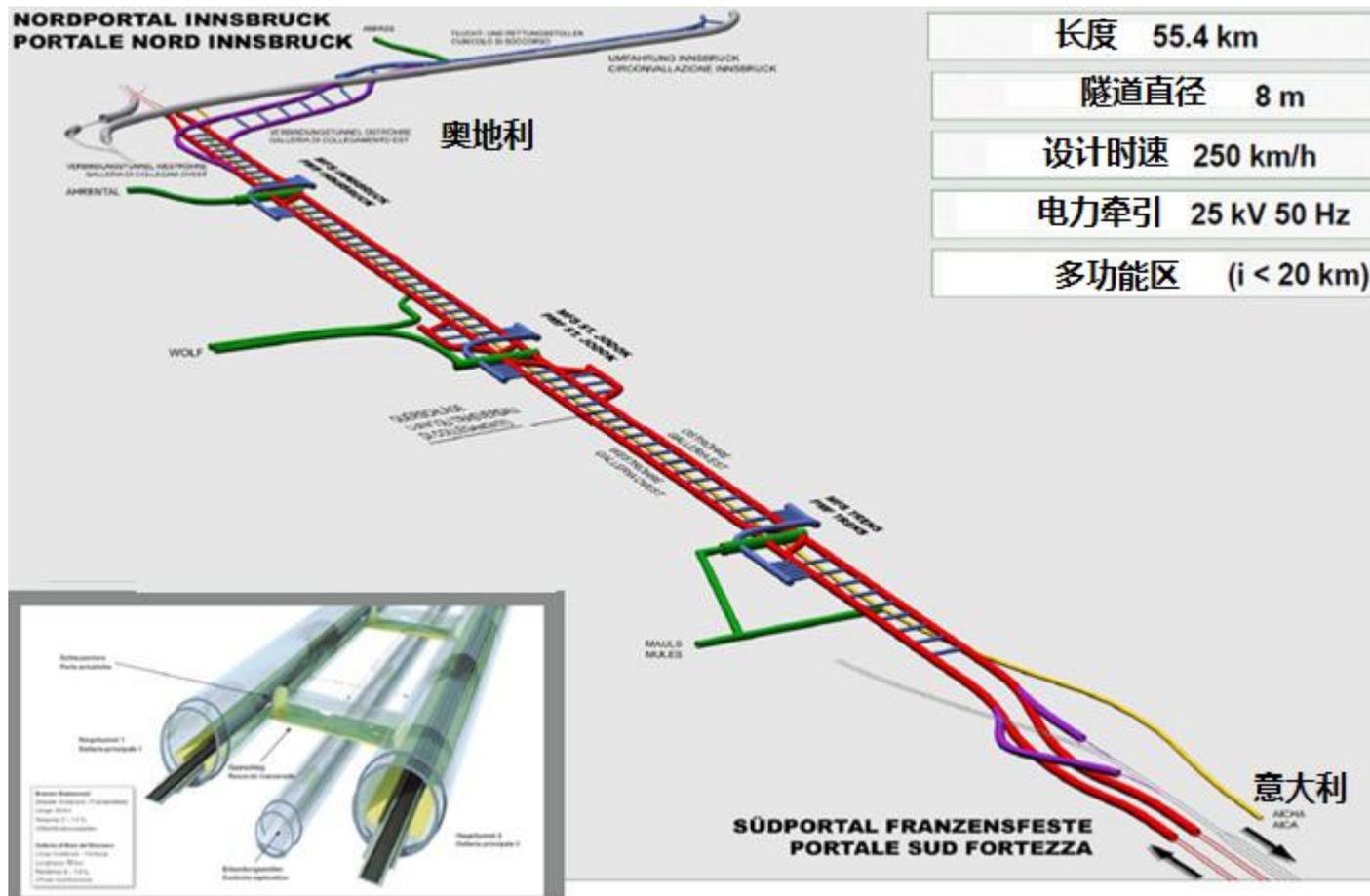


Source: AlpTransit Gotthard AG

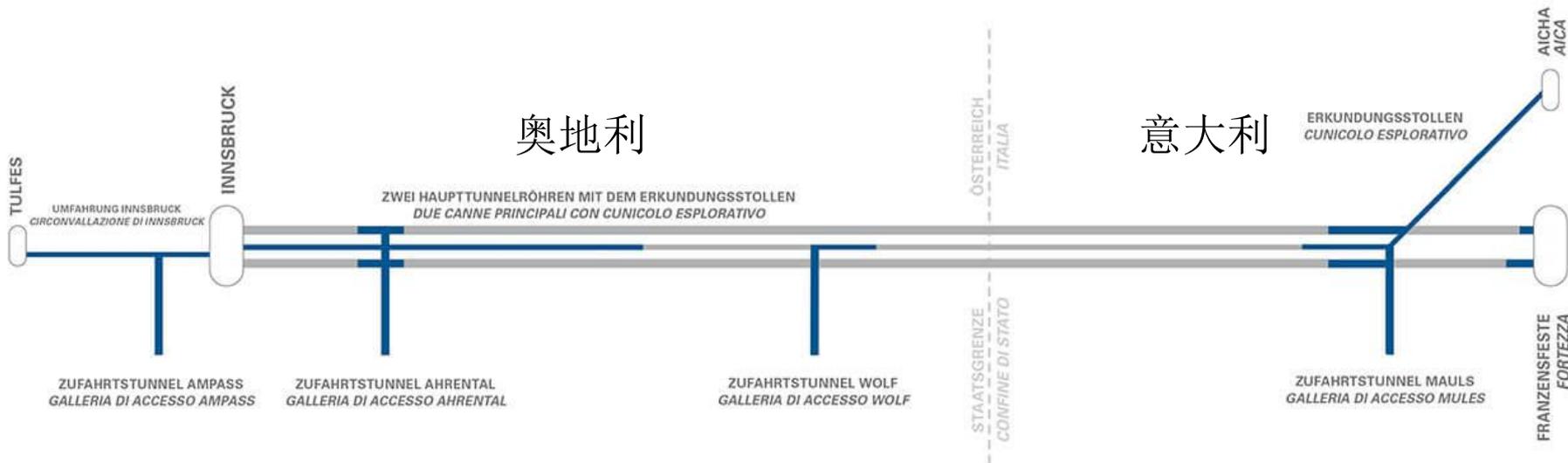
世界最长大埋深特长山岭铁路隧道（在建）

——55km奥地利-意大利布伦纳（Brenner）山底隧道

# 55km奥地利-意大利布伦纳（Brenner）山底铁路隧道（在建）



# 55km奥地利-意大利布伦纳（Brenner）山底隧道（在建） ——施工进度，2018.6月

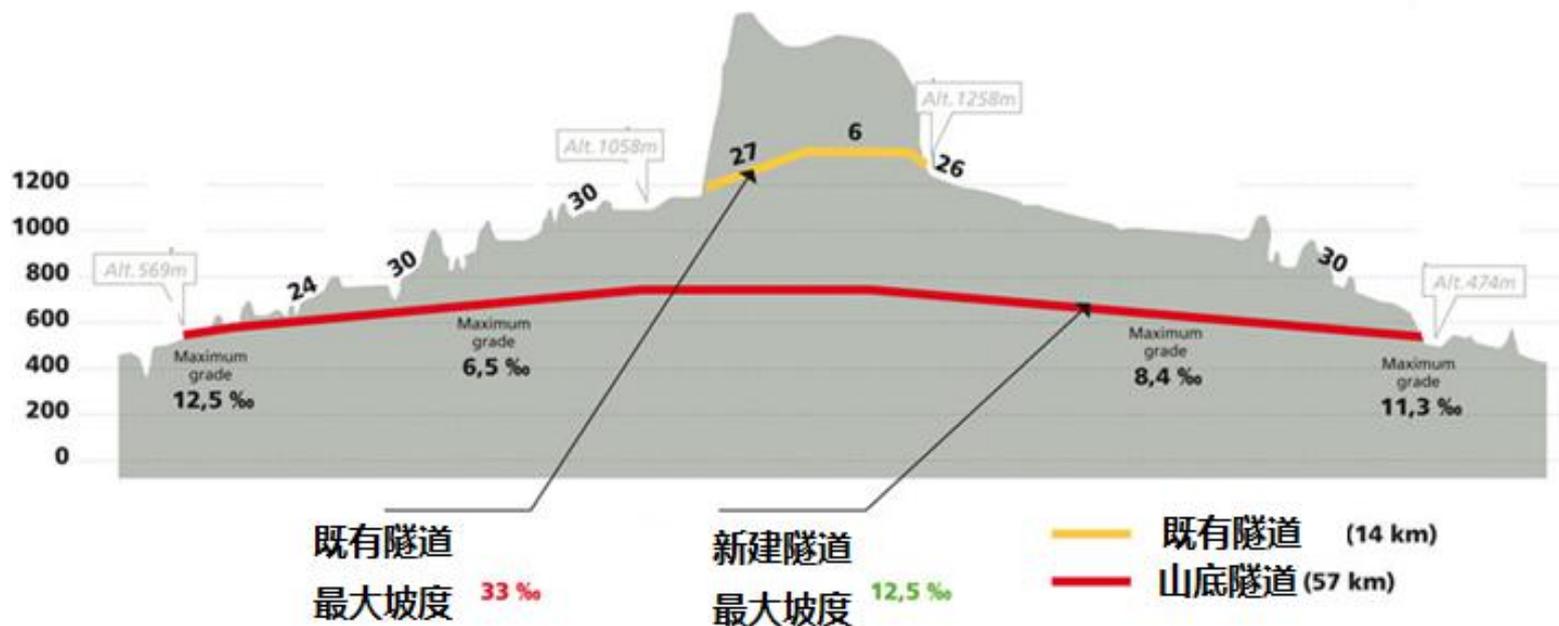


bereits gebaut (Stand Juni 2018)

opere già eseguite (aggiornato a giugno 2018)

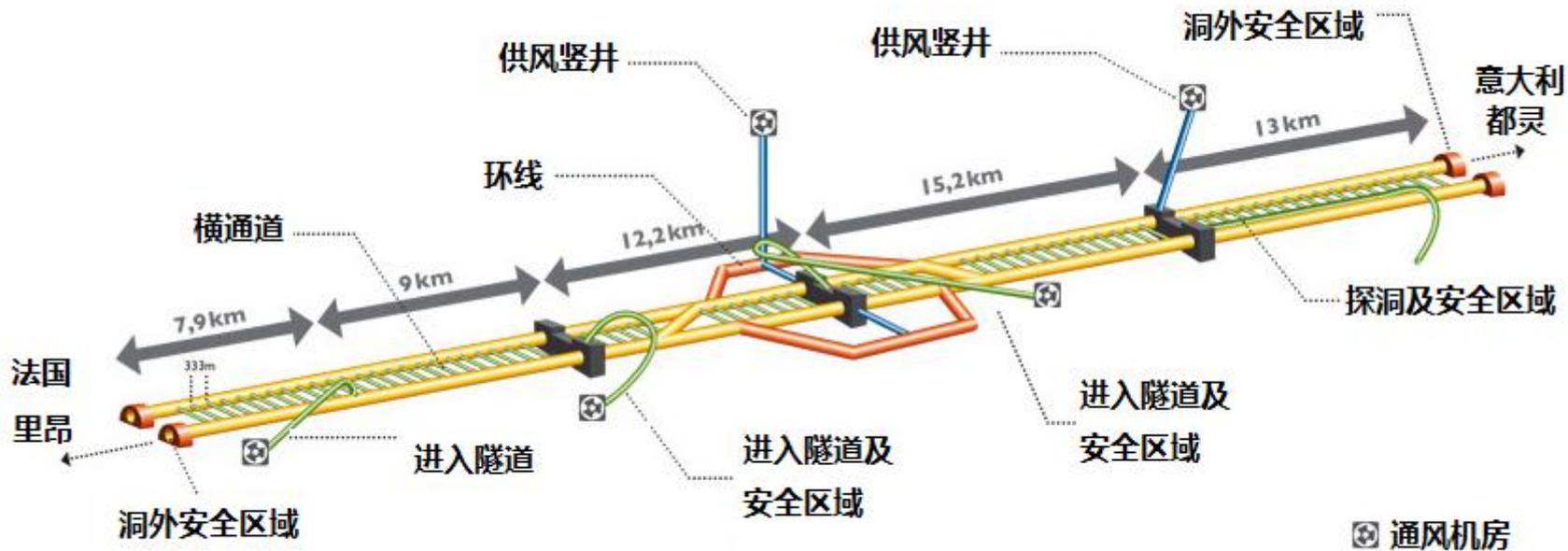
世界最长大埋深特长山岭铁路隧道（即将全面开工）  
——57.5km法国-意大利昂班山（D'Ambin）山底隧道

## 57.5km长法国-意大利昂班山（D'Ambin）山底铁路隧道（即将全面开工）



Fréjus Tunnel, 13.7km( 1857-71, 目前仍在使用)

## 57.5km法国-意大利昂班山（D'Ambin）山底铁路隧道（即将全面开工）



- 减少道路运输，降低噪音以及CO<sub>2</sub> 排放

## 2. 面临的技术挑战

# 面临的技术挑战 -1

## 2.1 长隧道特殊问题

大投资

快速施工

运营防灾

.....

## 2.2 大埋深特殊问题

无人区，地面勘察进入困难

勘察 成本高

深度勘察准确性

特殊地质问题

- 高地应力
- 高地温
- 高压水 .....

## 面临的技术挑战 -2

### 2.3 山岭隧道问题

地下水保护

弃碴综合利用

环境问题

.....

### 2.4 未来隧道新要求

高投资效益(隧道造价高)

节能减排（可持续发展）

安全舒适（更高要求）

环保（更高要求）

....

# 3.应对技术挑战的对策

## 3.1 勘察对策

### ——提高准确性和有效性

# 提高勘察有效性及准确性

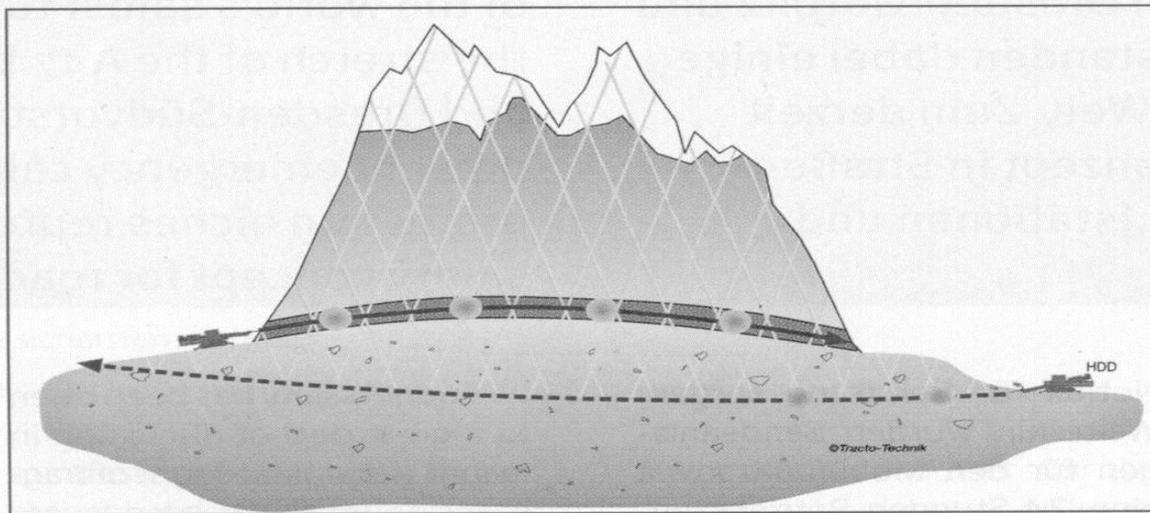
- ✓ 大埋深地面物探的准确性
- ✓ 水平定向钻+孔中物探=高效的一孔之见
- ✓ 航空物探（解决无人区勘察问题）
- ✓ 地勘信息综合应用的重要性

1) 提高大埋深地面物探的准确性

- 地面物探应用较多，但需要进一步提高大埋深勘探的准确性。
- 今后发展：多参数、多功能、多学科综合发展，以提高勘探精度。
  - ✓ 电阻率、磁化率、激化率、密度、纵波速度、横波速度等参数。
  - ✓ 同时各种波在物体传播过程中，振幅的衰减程度，频谱的变化也都能反映物体的一种物理性质的变化....

因此，应采用多参数的综合分析，进一步提高大埋深地面物探的准确性。

2) 水平定向钻+孔中物探  
=高效的一孔之见



- 对于大埋深，水平定向钻更有优势
- 提供沿隧道轴线连续的地质信息“从点到线”
- 隧道位置更全面的地质信息

钻孔取芯  
孔中物探

# 孔中物探

- 孔中物探技术既有较高的分辨率，也有较大的探测范围和探测深度
- 在一定程度上弥补了地面物探受干扰影响大、分辨率低和钻孔探测范围小的局限。

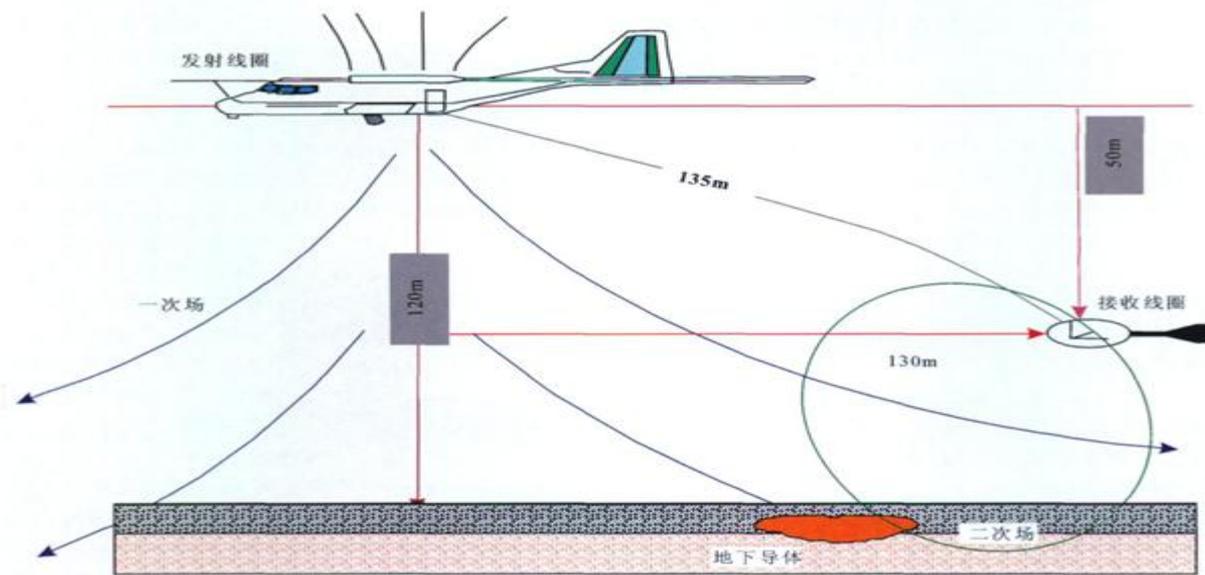
# 在矿产勘查中已经应用的孔中物探方法

- 钻孔电磁法
- 钻孔磁电阻率（MMR）系统
- 孔中激发极化 3 D 系统
- 孔中重力
- 井下地震成像（DSI）
- .....

### 3) 航空物探（解决无人区勘察问题）

# 航空物探（解决无人区勘察问题）

- 航空物探，是指从空中测量地球各种物理场（如磁场、重力场、导电性等）的变化，以进行地质调查的飞行作业。
- 与地面物探比较具有许多优点：能克服不利的地理、地形以及气候条件的限制；速度快，效率高，使用劳力少，能在短期内取得大面积区域的探测资料。



固定翼时间域航空电磁法测量原理图  
Schematic of fixed wing time domain AEM survey

袁桂琴等. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 11(11): 1744-1805

# 高分辨率航空物探方法的应用

在石油和采矿勘探中已经得到较多应用：

- 航空磁测技术
- 航空电磁测量技术
- 航空放射性测量技术
- 航空重力测量技术
- .....

## 高分辨率航空物探方法的关键：

- 提高微弱地球物理信号的采集与处理水平。
- 强调了多学科、采用多种现代手段进行综合调查。
- 无人机的使用：更安全、更经济。

## 4) 地勘信息综合应用的重要性

- 地质野外调查、地球物理数据、岩石物性数据等需要与其它数据真正集成到地质模型中，并且实现三维可视化，这是地勘技术发展方向。

## 3.2 设计对策

### ——设计理念和技术创新

# 1) 设计理念

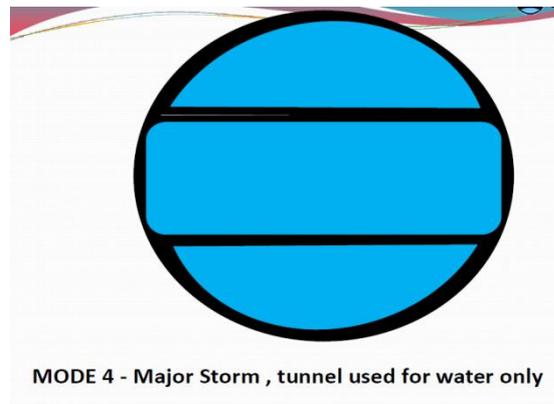
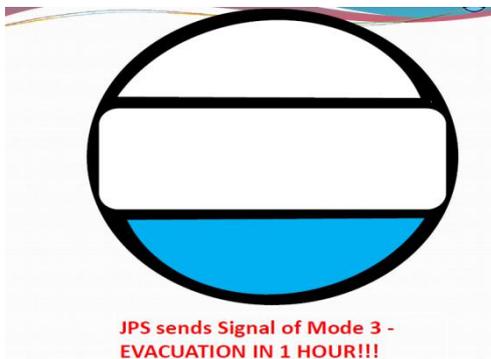
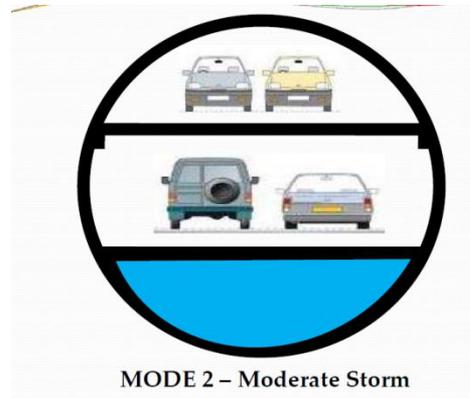
大埋深特长隧道具有投资大、使用时间长等特点，未来应该更高效、更节能、更环保；

- 综合功能（单一到综合，提高投资效益）
- 节能减排（更低的能耗）
- 环保（施工期间地下水的处理、弃碴的利用；运营期间的环境保护）

综合功能

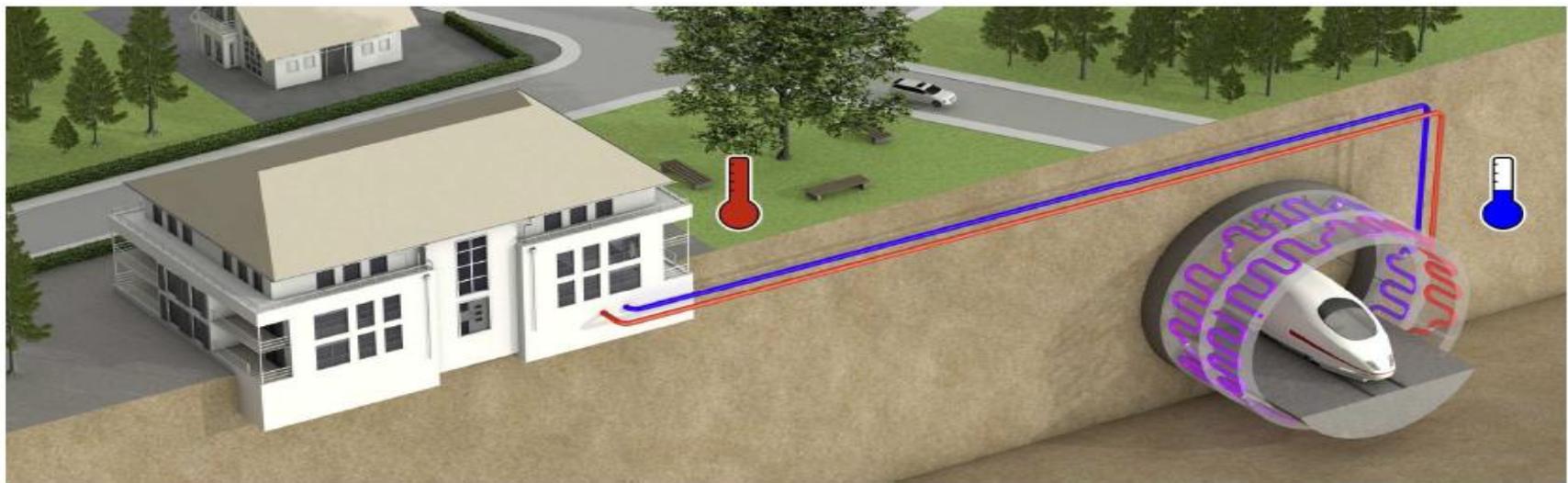
——从单一到综合功能，提高效能

# 从单一功能到综合功能——提高工程投资效益



节能减排

——更低的能耗，地热的应用等

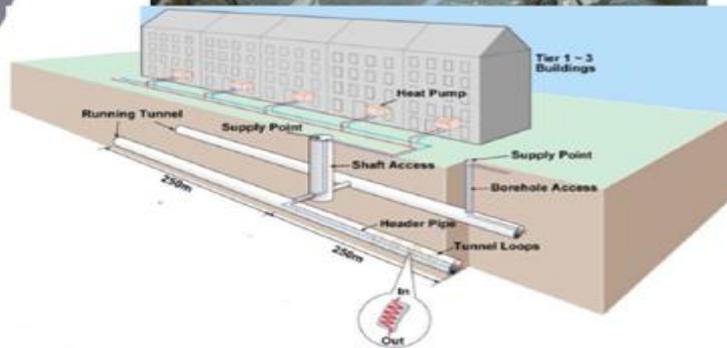
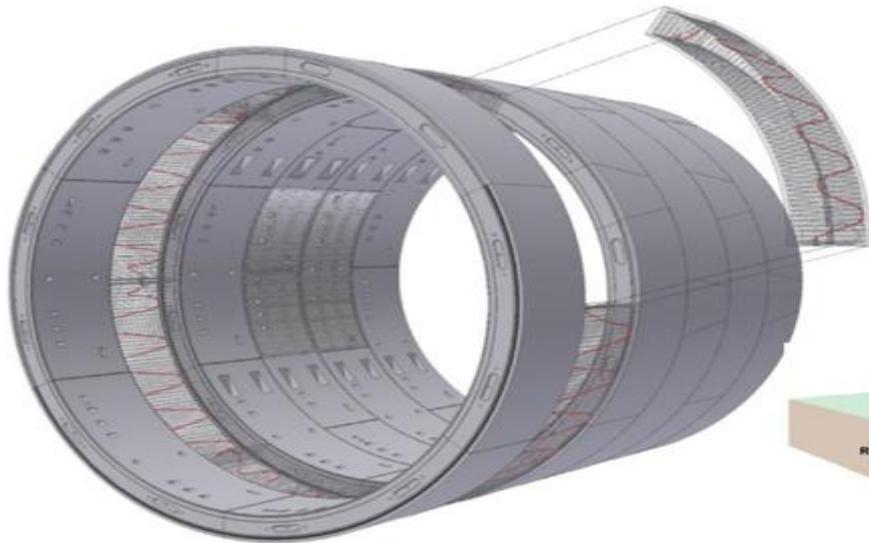


- 来自隧道周边的地热可用于地面房屋的供暖

引用自：REHAU – Geothermal Tunnel Lining

# “ 能 量 管 片 ”

衬砌中吸热管的布置



Source: REHAU – Geothermal Tunnel Lining

环保：工程无害化处理

——地下水的处理及利用、弃渣的利用

# 地下水的利用

## 瑞士勒奇山隧道涌水利用

- 鱼塘
- 每秒100l/s, 19°C
- 热流量6.8MW

## 瑞士福卡隧道

- 酒店供暖
- 每秒90l/s, 16°C
- 热流量3.7MW



## 57km长瑞士圣哥达山底隧道弃碴利用

弃碴管理	
挖出岩石总量	2820万吨 <b>(100 %)</b>
A级质量材料 ->适合用作混凝土的骨料	930万吨 <b>(33 %)</b>
B级质量材料 ->用于路堤、填筑和复耕	1870万吨 <b>(66.3 %)</b>
C级质量材料 ->有害废物填埋	20万吨 <b>(0.7 %)</b>
运送弃碴传送带的长度	约 <b>70 km</b>



## 2) 支护理论完善与创新

- 现有支护理论完善——更安全、更高效、更经济
  - ✓ 稳定性及支护理论完善（硬岩、软岩）
  - ✓ 优化支护和衬砌设计（更安全、更高效、更经济）
  - ✓ 新材料的应用（纤维等材料的应用）
  
- 颠覆性衬砌理论（烧结）
  - ✓ 与激光破岩配套的烧结衬砌

### 3) 特殊问题

- 高地应力——有效的设计施工方法
  - “先放后控” “控制变形”？技术及经济效益哪个好？
  - 问题的关键不是建成了没有，而是以什么代价和质量建成
- 高压水——能否能实现全堵，如何调动围岩的承载能力？  
造价多大？
  - 高压注浆
- 高地温——变害为利措施
  - 能量的转化及利用
  - 高温的措施

## 3.3 施工对策

### ——智能化施工和颠覆性新方法

近期：智能化机械施工

# 近期：智能化机械施工

## □ 智能地质预报（眼睛）

——准、远、快

## □ 智能快速施工（牙齿）

——根据地质情况，自动调整掘进参数，确保高效施工

## □ 智能管片衬砌（盔甲）

——能显示施工以及运营期间的管片状态

## □ 智能监测系统

——智能化施工及运营监测信息系统

✓ 形成智能化隧道机械施工综合系统

# 远期：颠覆性修建新方法

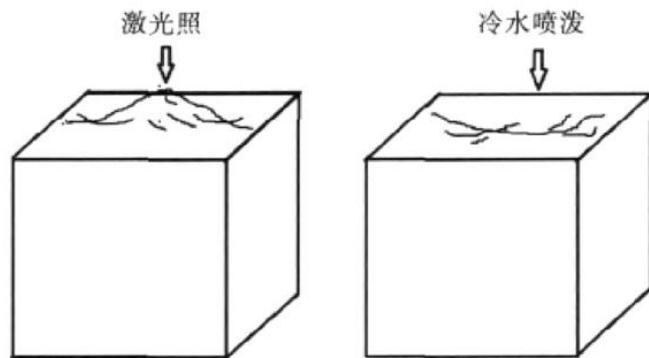
- 激光破岩
  - ✓ 破岩理论
  - ✓ 烧结衬砌
  - ✓ 应用技术
- 高能水破岩（不是高压）
  - ✓ .....

## □ 激光破岩的原理及特点

激光破岩是一种新的技术，利用聚能激光束使其局部岩石骤然升温至高热熔化和气化状态，形成气液两相混合物，然后由高速辅助气流将其混合物携走和排除，以快速形成孔眼。

## □ 激光辐射加热和喷水相结合破岩

- ✓ 单纯使用激光破岩在理论上可行，但是目前实际应用成本太高。
- ✓ 激光岩体加热后喷水降温的破岩方法比单纯使用激光破岩更具有实用价值和可操作性，可加快施工进度，节约成本。
- ✓ 需要研究破岩效果和可操作性。



## □ 高能射水破岩（high power waterjet）

- ✓ 高能比高压射水破岩更有效
- ✓ 已经在砂岩，中砂岩，片岩，安山岩，大理石，花岗岩试验
- ✓ 过去采用高压水（420 MPa，30 kW），效果不理想。目前采用高能射水破岩（150 Mpa，300 kW），取得较好效果

.....

## 3.4 智能运营维护

——零维护、少维护、智能维护

# 智能运营维护

- 零维护、少维护、智能维护及防灾新理念：
  - ✓ 全生命周期基础上的运营维护
- 智能维护（自动监测和维护报警）
  - ✓ 智能监控及运营通风
  - ✓ 结构自诊断
- 防灾新思路
  - ✓ 目前防灾救援方式工程投入大
  - ✓ 新的隧道运营安全新理念

## 4.结论

# 结论

大埋深特长山岭隧道面临各种技术挑战，主要对策和研究方向有：

- ✓ 勘察：通过高精度航空物探、地面物探、水平定向钻加孔中物探等措施，大幅提高地质勘探的准确性和有效性。
- ✓ 设计：从单一功能到综合功能，提高隧道工程的效能；把握隧道稳定及支护的本质，完善隧道支护理论，提高支护的有效性；环境友好，隧道建设无害化及节能减排设计理念；颠覆性隧道修建新技术的研究及应用。
- ✓ 施工：近期主要形成包括地质预报、施工作业、监控量测在内的智能化隧道机械施工综合技术，远期颠覆性隧道施工新技术的研究和应用。
- ✓ 智能隧道是隧道工程建设和运营发展方向。

谢谢！