

秦岭深处的“超级隧道”——记兰渝铁路西秦岭特长隧道

论隧道长度，它全长 28.236 公里，在国内雄居第二；论 TBM 直径和连续掘进距离，它一度独占鳌头；而同时拥有着超大 TBM 断面、超长连续掘进、超长通风距离的特长隧道，国内更是仅此一座——这就是兰渝铁路西秦岭隧道。



不但如此，它所在的兰渝铁路穿越全国集中连片特困地区，串起了 13 个国家级和 4 个省级扶贫重点县，寄托着贫困山区数百万人民的希冀与未来，是一条不折不扣的扶贫之路。

而作为兰渝铁路头号控制工程和全线最长的隧道，无论从工程本身，还是从它所承载的意义上讲，西秦岭隧道无疑都是一条体量巨大、意义深远的“超级隧道”。

六穿秦岭

历史不是简单的重复

秦岭，中国南北分水岭。“蜀道难，难于上青天！”一语道尽其高大险峻和行走其间的艰辛。

上世纪 50 年代，宝成铁路以盘山展线的方式，实现了人类第一次从大山内部穿越秦岭；40 年后，西康铁路秦岭隧道一举创下数十项纪录，在秦岭腹地树起中国隧道建设的里程碑；随即西南铁路东秦岭隧道、包茂高速公路终南山隧道和西汉高速公路秦岭隧道群等一批隧道在短短十余年间如雨后春笋般相继建成。其中西康铁路秦岭隧道和终南山公路隧道双双荣获国家科技进步一等奖，而以它们为主体的秦岭隧道群当选 FIDIC 百年工程。是什么让它们成为中国隧道和中国公路的一面旗帜，成为人类共同的建筑和文化遗产？追本溯源，一切其实始于最早的线路方案选择之时。

为找到最佳的越岭方案，我院曾在秦岭腹地的 460 平方公里内寻找了十年，用遍了当时最先进的技术手段和设备，无论是宝成铁路、西康铁路、西南铁路隧道，还是终南山公路隧道，在秦岭奉献出一座又一座堪称经典的隧道，并毫无例外经受住了时间的检验。

进入新世纪，这一次的穿越又有不同。兰渝铁路所经区域堪称中国山区的“地质博物馆”，不但穿越青藏高原、秦岭山地、四川盆地，还要经过在汶川大地震中造成巨大破坏的龙门山断裂带，可以说国内山地铁路建设中遇到的所有难题，在兰渝铁路都有集中体现。这也是我院勘察设计的地质地形条件最为复杂的山地铁路。但当兰渝铁路需要第六次穿越秦岭时，带着更先进的设计理念和仪器设备，工程技术人员再次义无反顾地走进了巍巍群山。

优中选优

找出最佳越岭方案

兰渝铁路通过的秦岭高中山区，地势总体趋势由东向西抬升，山体陡峻，顶峰高程海拔 2600 米，主山体宽达 30 公里。在这样巨大的区域里，我院进行了大面积的方案研究和地质调查工作，初步选定了几条可能的线路方案。在此基础上，布设了大量钻孔尤其是深入地下数百米的深孔地质钻探，并广泛采用了卫星遥感技术、可控源音频大地电磁法（CSAMT）和全隧道范围高密度电法、工程地震法等几乎所有能用到的最先进的综合物理勘探手段。多管齐下，各展其能，不同勘察手段得出的结果再相互补充，互相印证，基本探明了线路范围内的地层岩性、构造、水文地质、地应力等地质特征，为选择最优越岭方案提供了依据。

经详细勘察，隧道通过区域的主要地层分布有灰岩、千枚岩、变砂岩夹砂质千枚岩、变砂岩、砂质千枚岩，断层角砾岩和断层泥砾；工点范围内断层较为发育，包括 F6 区域断层和 f54、f55、f59、f60 等次级断层；隧道内正常涌水量为 4.26 万立方米/天，可能出现的最大涌水量为 12.9 万立方米/天。

一切尽在掌握，勘察结果没有超出之前的预计。最初选线时曾进行过多个越岭垭口隧道方案的对比，综合勘察结果和其他因素，最终的比选落在了老盘底出洞和下坝里出洞两个方案上。

老盘底出洞方案以桥梁跨越高速公路，虽出口离弃砬场地距离较远，但线路顺直，线路长度最短，长隧道长度较短，静态投资较省；而下坝里出洞方案线路长度和长隧道长度相对较长，工程投资较大，但 TBM 施工场地条件较好，出口离弃砬场地距离最近，对高速公路的影响也少。两个方案各有利弊，经综合比选，最后推荐采用了线路顺直，隧道长度较短、投资较省的老盘底出洞方案。



最终选定的隧道方案，设计为两座平行的单线隧道，其中左线长 28236 米，右线长 28236.58 米，洞身为直线地段，线间距 40 米，高程在 1000 米至 2400 米之间，最大埋深约 1400 米。为全线最长的隧道，采用钻爆法和 TBM 相结合施工，也是国内采用钻爆法和 TBM 相结合施工最长的隧道。

考虑到兰渝铁路是“一带一路”渝新欧大通道的重要组成部分，对西部大开发和区域经济发展具有深远的影响，而作为兰渝铁路的咽喉要道和标志性工程，西秦岭隧道无疑对运营和安全的要求极高，所以我院在设计中采用了 10.23 米的大断面隧道，以更好地布设辅助设施，满足双层集装箱列车通过的要求。

10.23 米！超大断面

国内铁路隧道采用敞开式全断面掘进机（TBM）始于西康铁路秦岭隧道，当时引进的是德国的技术和设备，TBM 直径为 8.8 米；从西康铁路全盘引进的 8.8 米到西秦岭隧道自主研发的 10.23 米，看上去只是增加了 16% 背后隐含的挑战和难度却是成倍地增加。

考虑到隧道横断面必须满足双层集装箱的运输，设计中首先确立的就是隧道内轮廓按圆形设计的基本原则。综合隧道内整体道床的形式、中心水沟及各种管沟、设备的布置，以及接触网采用简链悬挂等要求，经科学严谨的计算和论证，最终确定隧道直线段基本内轮廓开挖直径为 10.2 米的圆形断面。接触网则采用简单的链性悬挂方式，满足了 200 公里/小时运行条件下标准轨面以上的净空要求。

在此基础上，确定了与隧道地质条件相适应的硬岩敞开式掘进机（TBM）整体方案，包括掘进机设备设计参数、可掘进性分级标准、结构设计及施工成套技术等整个体系，为特长隧道采用大直径、长距离、安全、快速掘进奠定了基础。

首先是提出了与地质条件相适应的 TBM 设备设计参数。依据岩石单轴抗压强度、岩石完整性系数等地质参数，提出了 TBM 主轴承、驱动系统、刀盘、刀具等主要设备的设计参数，为大直径 TBM 设备的设计与制造提供了科学依据。

其次是提出了与地质条件相适应的设计结构体系和施工组织方案。依据地质条件，设计采用“喷锚网钢架联合支护+模筑混凝土+钢筋混凝土仰拱预制块”的结构体系；相应的施工组织方案则确定为出口由两台 TBM 掘进，进口则采用钻爆法施工。

三是首次提出了 TBM 可掘进性分级标准。根据岩石性能指标相关性分析，提出了将 TBM 可掘进性分为三级标准，并建立了可掘进参数性能预测体系，有力地指导了随后的 TBM 施工。

2008 年 8 月 15 日 10 时，随着高度超过 10 米的巨型掘进机缓缓地向前推进，西秦岭隧道正式开工，揭开了兰渝铁路建设的序幕，也吹响了连续、长距离掘进的号角。

15.6 公里！超长掘进

一般来说，TBM 连续掘进超过 5 公里后，设备利用率会急速降低，刀具磨损、损伤加剧，设备故障增多。在掘进机设备损坏后，洞内修复要求高、难度大，从而导致成本大幅提高、工期严重滞后。西秦岭隧道长度超过 28 公里，按照整体工期要求，隧道的计划贯通工期（含二次衬砌）只有 68 个月，如果按照以往的 TBM 施工方法，即“掘进贯通 - TBM 拆机退出 - 衬砌”的单工序作业工法，不但根本无法满足工期要求，而且围岩暴露时间长，难以体现 TBM 快速和安全施工的特点。综合考虑，经过严格的计算和论证，西秦岭隧道确定了连续掘进 15.6 公里的施工方案，一举成为国内 TBM 独头掘进距离最长的铁路隧道。

一下子达到常规掘进距离的三倍，无疑又是一个巨大的挑战！

当务之急，是要解决连续出碴工况下的 TBM 掘进与衬砌同步施工技术。

为此，我院与施工单位密切合作，共同攻关，研发了一系列极具针对性和实用性的设备和技术。其中穿行式同步 衬砌台车，可满足连续皮带机、大直径通风软管、电力通信电缆与四轨双线运输列车的穿行要求；分散式抗浮机构，能使台车结构受力更加均衡；混凝土布料系统，可满足两台输送泵不倒管同时浇筑作业；连续皮带机支架快速拆装与临时支撑装置，实现了衬砌台车的快速移动；拉门式伸缩台架支撑技术，则保证了连续皮带机穿行时的平稳运行。

为保证从 TBM 掘进工作面到碴场的连续快速出碴，还同步研发了多级级联、连续转运皮带快速出碴系统等一系列新技术与新设备。其中多级级联、连续皮带系统由正洞、斜井、洞外、碴场延伸段等 7 级皮带级联，连续转运，实现了从 TBM 掘进工作面到碴场长达 14 公里的连续快速出碴；皮带级联冗余技术解决了单级皮带出现故障导致整个系统瘫痪的问题，保障了 TBM 的连续掘进；洞外连续分碴器自动切换装碴技术使皮带运输出碴系统与洞外汽车实现了无缝衔接，大大提高了出碴运输能力；连续皮带快速无损收放及延伸设备实现了长距离皮带在洞内的自动收放与运输双重功能。

正是得益于这种世界首创的“连续皮带机出碴工况下的 TBM 掘进与衬砌同步施工技术”，西秦岭隧道一举节省工期 20 个月！

20 公里！超长通风

众所周知，在特长隧道的建设、运营以及配套的应急救援中，长距离通风都是一个无法回避的重大课题。

隧道内常见的有害物质一般包括烟尘、有害气体以及来自隧道钻孔、爆破、装碴、运输、喷射混凝土及二次衬砌作业过程中产生的粉尘。这些有害物质会危害施工人员的健康，严重时会导致中毒、昏迷甚至窒息；同时会造成洞内能见度下降，导致安全风险大增。而西秦岭隧道埋深大于 800 米的段落长达 16 公里，最大埋深达 1400 米，设置辅助坑道的条件较差，因而施工通风难度极大。在 TBM 掘进时，洞内的最高温度可达 38℃，湿度达到 90% 以上。高温高湿的环境，不仅会加速 TBM 设备的老化，还会加剧有害物质的产生，严重降低劳动生产效率。



怎样解决西秦岭特长隧道的通风问题？采取什么样的模式和标准？成了摆在设计人员面前的一道难题。

结合我院在以往长大隧道尤其是一系列秦岭隧道的设计和建设中的宝贵经验，针对西秦岭隧道的不同地质情况和特点，提出了 TBM 施工的通风控制标准，将主要环境影响因素确定为温度、一氧化碳浓度、粉尘浓度、氧气含量 4 项；并对施工中的通风标准做出明确规定：作业面需风量大于等于 41 立方米/秒、TBM 后配套尾部需风量大于等于 25 立方米/秒，洞内风速 0.5 米/秒。

在此标准下，进一步建立了 TBM 超长距离独头施工的两阶段通风模式。即第一阶段在隧道出口至罗家理斜井段，采用独头压入式通风，通风距离 10 公里；第二阶段在出口正洞与罗家理斜井贯通后，采用正洞巷道式和长管路压入式联合供风、斜井排风的混合式通风方案，通风长度高达 20 公里。

同时，首次在 TBM 超长距离施工中采用大功率节能变频风机、大直径高压软风管、防漏型高强接头等一系列节能降耗综合措施，满足了洞内严格的通风标准。

通过这一系列的“组合拳”，西秦岭隧道建立起 TBM 施工 20 公里超长距离通风技术体系，解决了特长隧道超长距离施工中的世界性通风难题。

一鼓作气，我院在设计中又利用两管隧道互相救援、疏散的功能，创建了特长隧道紧急救援站模式；一旦发生火灾，则自安全隧道向救援站供风；在紧急救援站范围内设排烟竖井、横向排烟道、纵向排烟道，与罗家理斜井连通，自斜井将烟气排出洞外；同时设置了救援指挥中心，制定了火灾工况下疏散、行车的基本准则和设备的运行程序，形成了特长隧道火灾条件下的完善的疏散救援综合指挥体系，确保了特长隧道在各种突发状况下的“万无一失”。

在西秦岭隧道建设的六年时间里，我院在施工现场设置了动态设计组，根据建设的实际情况，采用动态设计指导施工。配合施工人员基本上始终“泡”在工地，为 TBM 的顺利推进和特长隧道的如期建成提供了强有力的技术支持。

2014 年 7 月 19 日，兰渝铁路西秦岭隧道全线贯通，一举填补了国内山地铁路隧道建设领域的多项空白，成为当时国内断面尺寸最大、TBM 掘进长度最长的隧道，创造了亚洲山岭隧道大断面 TBM 硬岩掘进的新纪录。

西秦岭隧道的同步衬砌技术为世界首创，为 TBM 技术的进步与发展做出了重大贡献，先后荣获 FIDIC 年度优秀工程奖和中国土木工程詹天佑奖，成为铁一院奉献给祖国大地的又一座丰碑。