

苍岭特长公路隧道岩爆预测和工程对策

吴德兴^{1,2}, 杨健²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 从苍岭隧道的工程地质状况入手, 结合现场实测的地应力值, 通过反演得出隧道区内的初始应力场, 在此基础上通过有限元分析获取了隧道开挖后的洞周应力值, 以此为依据, 结合室内岩石试验和不同岩爆判据, 得出了勘察设计阶段本区将产生低-中等岩爆的结论, 并在设计中提出了相应的对策。在施工阶段为更加准确预测岩爆, 结合施工中实际状况对隧道区内的总体岩爆状况进行重新预测, 结果显示低-中等岩爆区间都相应减少; 同时利用现场实测应力值对前方 300~500 m 段进行了分阶段预测, 并得出卢森判据适用于该隧道的结论。

关键词: 隧道工程; 苍岭隧道; 岩爆; 应力; 有限元; 判据

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)21-3965-07

PREDICTION AND COUNTERMEASURE FOR ROCKBURST IN CANGLING MOUNTAIN HIGHWAY TUNNEL

WU De-xing^{1,2}, YANG Jian²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Zhejiang Provincial Plan Design and Research Institute of Communications, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Based on the engineering geology and the measured geostress, the initial stress field is obtained by inversion. Then the circumferential stress after excavation is calculated by FEM. According to the results and combined with laboratory rock test and different judgement criteria of rockburst, the conclusion is got that the low middle class of rockburst will occur in the survey and design plases; and some countermeasures are proposed. In the construction phase, for prediction of rockburst with more precision, the general rockburst condition is predicted again combined with the real situation; and the result shows that the low-middle class of rockburst diminishes correspondingly. Meanwhile, the rockburst 300 - 500 m in front of the cutting face is predicted by stages according to the measured geostress; and the Lusens criterion is found to be applicable.

Key words: tunnelling engineering; Cangling mountain tunnel; rockburst; stress; FEM; criteria

1 引言

深埋长隧道以其延伸长、埋藏深、工期长、工程地质问题较多, 而成为众多线性工程建设中的控制性工程, 长大隧道多穿越巨大山岭, 因其山高林密、交通条件较差、岩石露头较少, 而成为地下洞室中最为隐蔽、最难以评价和预测预报的工程地质

问题。而岩爆作为深埋长大隧道的重大工程地质问题之一, 也越来越受到人们关注。目前对于岩爆的研究理论较多, 但基于岩爆理论及岩爆破坏机制而提出的各种理论预测方法, 在工程应用中尚存在困难, 而在生产实践中, 对岩爆又常要求一些具体的、切实可行的预测预报方法、指标和岩爆的防治对策^[1], 因此, 针对具体隧道着眼于上述问题的研究将具有重要的意义。

收稿日期: 2005-06-26; **修回日期:** 2005-07-28

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(ZS032-B25-021)

作者简介: 吴德兴(1962-), 男, 1983年毕业于北方交通大学铁道工程专业, 现为博士研究生、教授级高级工程师, 主要从事公路工程、岩土及地下工程方面的设计与研究工作。E-mail: wudx@zjic.com。

苍岭隧道位于浙江省仙居县横溪镇—缙云县壶镇交界的括苍山脉中低山区，穿越处最高海拔1 018 m，地形自然坡度45°~60°，隧道设计为双向平行分离式山岭公路隧道，双线中心间距40 m，隧道行车区标准断面净宽11.1 m，净高8.6 m；设计行车速度80 km/h；隧道长度左线(上行)为7 536 m，右线(下行)为7 605 m。主隧道地下洞室总长约15 141 m，附属洞室总长约2 666 m。隧道预计工期为4 a。

隧道洞身主要穿过熔结凝灰岩(J3C-1)、角砾凝灰岩(J3C-1)和钾长花岗斑岩($\gamma\pi$)，局部穿过断裂带及岩相接触带。岩石强度高、性脆，新鲜基岩围岩分类V类及以上^[2]。隧道地质构造平面纵剖面见图1。

因苍岭隧道埋深较大，最大埋深达756 m，同时受区域构造应力影响严重，深埋段隧道开挖应力经二次调整后可能产生岩爆，从而威胁到施工人员及设备的安全。为评价围岩稳定和预测岩爆，保证苍岭隧道能安全和顺利施工，前期做了诸如现场地应力测试及室内岩石试验等工作。以期对隧道围岩稳定性和岩爆预测做出准确的评价，并采取合理的工程对策，对后续的施工起到指导作用。目前工程开挖掘进顺利，进入到了埋深300~756 m的预测岩爆区。

2 勘察设计阶段的岩爆预测

2.1 苍岭隧道岩爆预测的方法

岩爆的预测预报问题极为复杂，目前国内外还没有一整套成熟的理论与方法，目前有多种岩爆预测方法，但归结起来分为两类：一类为理论法，另一类为实测法^[3~5]。理论法利用已建立的岩爆各种判据和指标，对岩芯取样力学指标或根据工程区地形地质条件、工点实测的地应力值通过反演拟合分析取得工程场区的地应力值，进行岩爆预测的方法，如能量判据法、应力判据法等；实测法借助一些必要的仪器，对地下工程的现场或岩体直接进行监测或测试，来判别是否有发生岩爆的可能，如流变法、微震法(或声发射法)等^[1]。

在设计阶段，根据苍岭隧道的实际条件，岩爆预测研究采用理论法。岩爆预测选择了具有代表性的卢森判据^[6](表1)，并分别对隧道各个洞段依次分析，然后在以上判据判断的基础上，综合评价了各个洞段岩爆发生的可能性和发生的强度。

表1中(1)为能量判据，(2)~(4)属于应力判据，需根据工程区地形地质条件、CS1~CS3三个深孔实测的地应力值通过反演拟合数值分析取得工程场区的隧道轴线断面开挖后的二次应力场最大主应力

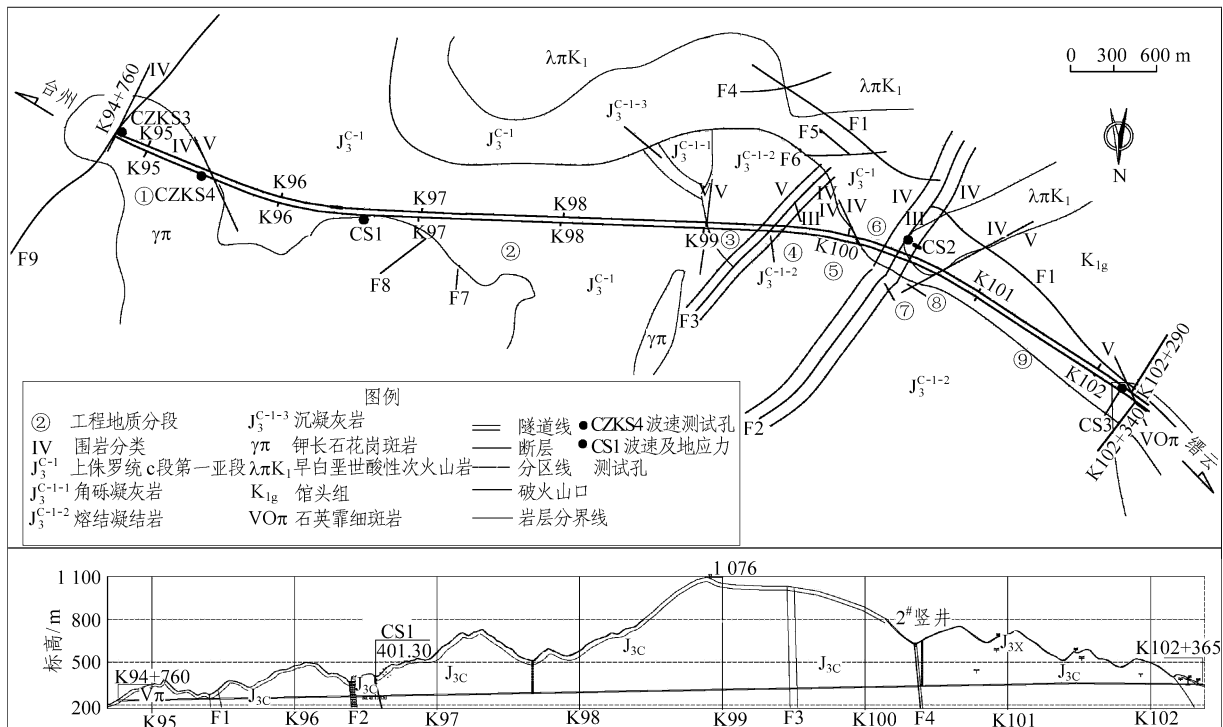


图1 苍岭隧道地质平纵剖面图

Fig.1 Plan and longitudinal section of the geology in Cangling tunnel

表 1 岩爆判据表

Table 1 Criteria for rockburst

(1) 能量判据		(2) R_b/σ_1 判据		(3) 陶振宇判据		(4) 卢森判据	
W_{ET}	岩爆发生情况	R_b/σ_1	岩爆发生情况	R_c/σ_1	岩爆发生情况	σ_θ/R_c	岩爆发生情况
<2.0	无岩爆	3~6	会发生岩爆	>14.5	无岩爆发生	<0.2	无岩爆
2.0~5.0	中低岩爆	<3	严重岩爆	14.5~5.5	低岩爆活动	0.2~0.3	弱岩爆
≥ 5.0	强烈岩爆			5.5~2.5	中等岩爆活动	0.3~0.55	中等岩爆
				<2.5	高岩爆活动	≥ 0.55	强烈岩爆

注： W_{ET} 为弹性变形能指数； R_b 为岩石饱和单轴抗压强度； R_c 为岩石天然单轴抗压强度； σ_1 为隧道开挖后洞壁最大主应力； σ_θ 为隧道开挖后洞壁最大切向应力，上述应力均以压应力为正。

值 σ_1 、洞壁切向应力值 σ_θ 值后来判据岩爆。

2.2 能量判据预测分析

在应用能量理论对岩爆等级进行预测预报时，主要是根据岩石的储能条件判定发生岩爆的可能性，即：将岩石试件加载到(0.7~0.8) R_c ，然后再卸载到 0.05 R_c 时，卸载所释放的弹性应变能 ψ_{sp} 和耗损的弹性应变能 ψ_{st} 之比值 W_{ET} 作为岩爆判别标准^[3]，根据岩石试验获得的岩石应力 - 应变曲线分析。

图 2~5 为 4 个典型岩石试件的全过程应力 - 应变曲线^[7]。试验在 MTS815 Teststar 程控伺服岩石力学试验系统上进行，试验初期采用轴向位移控制，速率为 0.1 mm/min，当加载到约为峰值强度的 70% 时，进行卸载得到卸载曲线，再加载直至试件破坏。

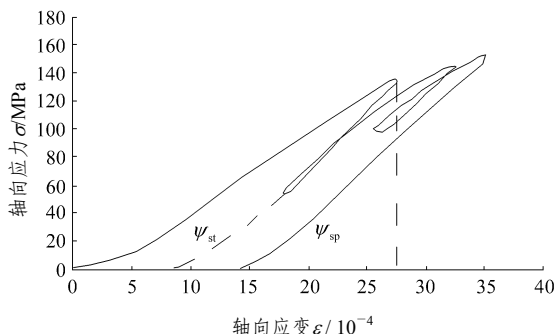


图 2 试件 1 全过程应力 - 应变曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves of sample No.1

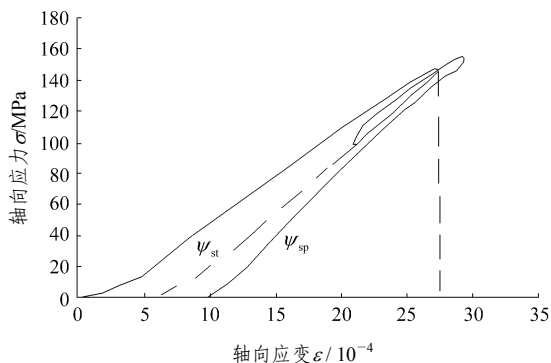


图 3 试件 2 全过程应力 - 应变曲线

Fig.3 Complete stress-strain curves of sample No.2

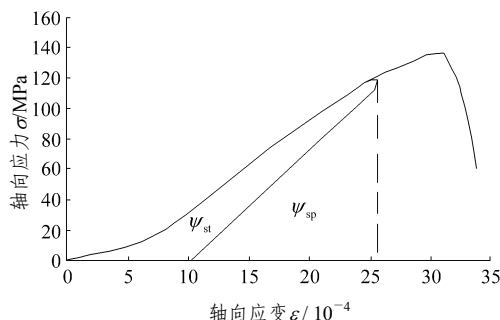


图 4 试件 3 全过程应力 - 应变曲线

Fig.4 Complete stress-strain curves of sample No.3

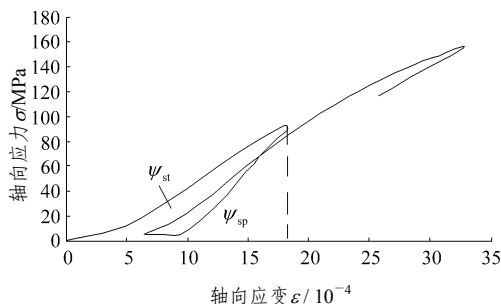


图 5 试件 4 全过程应力 - 应变曲线

Fig.5 Complete stress-strain curves of sample No.4

依据能量判别公式和典型试样的全过程应力 - 应变曲线，对岩爆发生的可能性进行预测，预测结果见表 2。由表 2 可知，对本研究区的熔结凝灰岩和花岗斑岩，其 W_{ET} 值大约为 2.2，介于能量判别公式中判别区间 2~5 之间，工程区的岩性条件具备了发生中低岩爆的可能。

表 2 依据能量判别公式的岩爆等级预测表

Table 2 Prediction of rockburst by energy criterion

试件编号	取样深度 /m	岩性	弹性变形能指数 W_{ET}	岩爆等级
1	20.5	熔结凝灰岩	2.26	中低岩爆
2	22.5		2.25	中低岩爆
1	20.4	花岗斑岩	2.22	中低岩爆
2	30.5		2.17	中低岩爆

2.3 地应力现场测试

在隧道轴线部位对 CS1~CS3 三个钻孔进行了水压致裂原位地应力测试工作^[2]。测试结果表明,工程区水平应力均大于垂直应力,水平应力占主导地位,各测孔的最大主压应力的方向均为 NWW 向^[2]。

(1) CS1 孔位里程右 K96+567 m 右 35.0 m。孔口高程为 401.30 m,孔深为 158.98 m。测量结果:最大水平主应力方向分别为 N62°W, N68°W 和 N76°W,平均方向为 N68°W。最大水平主应力(S_H)值 9.02~18.57 MPa,最小水平主应力(S_h)值 5.95~11.92 MPa,估算出的垂直应力(S_v)值 2.41~4.20 MPa。

(2) CS2 孔位里程为左 K100+380 左 100 m。孔口高程 612.13 m,孔深为 300.40 m。测量结果:最大水平主应力方向分别为 N58°W, N63°W 和 N70°W,平均方向 N63°W。最大水平主应力(S_H)值 8.32~18.78 MPa,最小水平主应力(S_h)值 5.32~12.78 MPa,垂直主应力(S_v)值 3.69~7.79 MPa。

(3) CS3 孔位于里程为左 K102+200 右 14.0 m。孔口高程 393.60 m,孔深为 101.25 m。测量结果:最大水平主应力方向分别为 N38°W, N30°W 和 N72°W,平均方向为 N46°W。最大水平主应力(S_H)值 3.86~15.05 MPa,最小水平主应力(S_h)值 2.25~9.32 MPa,垂直应力(S_v)值 0.70~2.63 MPa。

上述 3 个钻孔所揭露的岩芯大部分呈长柱状,少量呈短柱状及碎块状,未见高地应力条件下钻孔岩芯裂饼等特殊的地质现象,但揭露的岩石质地坚硬,结构致密,具备发生岩爆的条件^[3]。

2.4 应力判据预测岩爆分析

根据有限元计算隧道轴线各段断面开挖后的二次应力场最大主应力值 σ_1 、洞壁切向应力值 σ_θ ,并结合岩石试验结果:熔结凝灰岩天然岩样的单轴抗压强度 R_c 为 180.8 MPa,饱和岩样的单轴抗压强度 R_b 为 169.0 MPa;考虑到试验结果的分散性,实际分析中取天然单轴抗压强度 R_c 为 160 MPa,取饱和单轴抗压强度 R_b 为 150 MPa,对各段的岩爆发生状况采用不同的判据分别进行了预测^[7]。

各洞段的最大主应力 σ_1 和洞壁切向应力 σ_θ 值通过如下步骤取得:第 1 步:通过三维有限元反演分析计算在自重和构造应力的共同作用下,公路隧道轴线开挖前的初始地应力场;第 2 步:在第 1 步

计算出的初始应力场基础上,计算隧道沿线各典型开挖断面处围岩的二次应力场。

公路隧道轴线开挖前的初始地应力场分析时,建立包括隧道轴线全长及主要断层在内的空间计算区域,模拟地层边界;采用直接调整边界条件法进行初始地应力场反演分析;通过 CS1~CS3 三个钻孔地应力实测值,不断调整计算模型的边界条件,最后得出计算值与实测值达到最佳拟合时的边界条件^[8,9]。在此条件下,求得隧道工程轴线各点开挖区域围岩地初始应力场(σ_x, σ_y)。随后依据此初始应力场作力边界条件,按平面有限元分析开挖引起的洞室二次应力场($\sigma_1, \sigma_3, \sigma_\theta$)^[8]。并以此作为下一步隧道围岩岩爆预测的依据。按 3 种应力判据法预测出隧道各洞室区段岩爆(表 3)^[7]。

根据表 3 的岩爆判别结果,综合判断苍岭隧道开挖后发生岩爆的可能性预测结果见表 4。通过常用的岩爆判据,对苍岭隧道开挖岩爆可能性进行的预测分析表明,由于苍岭隧道埋深大、岩性坚硬,发生岩爆的可能性较大。

综合岩爆预测判据,预测苍岭隧道 K98+060~K100+055 段可能有中等岩爆发生;K95+430~K98+060 段以及 K100+055~K101+163 段可能有低岩爆活动;其余洞段基本不会发生岩爆。

3 岩爆区段防治对策研究

3.1 岩爆设计区段的确定原则

采用能量判据法和应力判据法预测岩爆存在较大的差异。3 种应力判据法较接近,但卢森判据预测岩爆区段最短,陶振宇判据岩爆预测区段最长。上述判据均存在局限性,且未考虑以下因素:

(1) 地下水存在对岩爆影响问题:当地下水多时,岩爆出现的可能性小^[5]。

(2) 呈破碎、镶嵌和块状结构完整性差的围岩如 III~IV 类围岩,即使地应力高且符合上述判据也不太可能发生岩爆^[6]。

因此在确定按岩爆区设计的原则时要结合苍岭隧道工程水文地质情况、围岩类别进行修正:进洞口附近围岩性状较差,发生岩爆可能性较小;出口段区域地质构造较发育,钻孔显示地下水较丰富,发生岩爆概率亦小。故上述区段视为不可能发生岩爆。施工图阶段确定的岩爆设计区段见表 5。

表 3 苍岭隧道各段岩爆预测结果
Table 3 Prediction of rockburst in Cangling tunnel

公路里程	R_b /MPa	R_c /MPa	σ_1 /MPa	σ_0 /MPa	R_b/σ_1 判据		陶振宇判据		卢森判据	
					R_b/σ_1	岩爆发生情况	R_c/σ_1	岩爆发生情况	σ_0/R_c	岩爆发生情况
K95+430~K96+250	150	160	28.0	16.9	5.35	会发生岩爆	5.71	低岩爆活动	0.11	无岩爆活动
K96+250~K96+430	150	160	28.5	19.6	5.26	会发生岩爆	5.61	低岩爆活动	0.12	无岩爆活动
K96+430~K96+650	150	160	35.3	19.9	4.25	会发生岩爆	4.53	中等岩爆活动	0.12	无岩爆活动
K96+650~K97+030	150	160	32.8	22.7	4.57	会发生岩爆	4.88	中等岩爆活动	0.14	无岩爆活动
K97+030~K97+500	150	160	35.7	27.6	4.20	会发生岩爆	4.48	中等岩爆活动	0.17	无岩爆活动
K97+500~K98+060	150	160	44.4	35.4	3.37	会发生岩爆	3.60	中等岩爆活动	0.22	弱岩爆活动
K98+060~K98+460	150	160	53.2	43.4	2.82	严重岩爆	3.01	中等岩爆活动	0.27	弱岩爆活动
K98+460~K99+680	150	160	59.5	48.9	2.52	严重岩爆	2.69	中等岩爆活动	0.31	中等岩爆活动
K99+680~K100+055	150	160	51.6	42.0	2.91	严重岩爆	3.10	中等岩爆活动	0.26	弱岩爆活动
K100+055~K100+440	150	160	44.9	36.4	3.34	会发生岩爆	3.56	中等岩爆活动	0.23	弱岩爆活动
K100+440~K100+585	150	160	41.3	33.5	3.63	会发生岩爆	3.87	中等岩爆活动	0.21	弱岩爆活动
K100+585~K100+793	150	160	36.7	29.7	4.08	会发生岩爆	4.36	中等岩爆活动	0.19	无岩爆活动
K100+793~K101+163	150	160	31.5	25.3	4.76	会发生岩爆	5.08	中等岩爆活动	0.16	无岩爆活动
K101+163~K101+806	150	160	22.7	17.5	6.61	不发生岩爆	7.05	低岩爆活动	0.11	无岩爆活动
K101+806~K102+150	150	160	19.7	12.1	7.61	不发生岩爆	8.12	低岩爆活动	0.08	无岩爆活动

表 4 苍岭隧道各段岩爆预测汇总结果

Table 4 Final prediction results of rockburst

判据类型	公路里程	长度/m	岩爆发生情况
R_b/σ_1 判据	K95+430~K96+060	2 630	会发生岩爆
	K98+060~K100+055	1 995	严重岩爆
	K100+055~K101+163	1 108	会发生岩爆
陶振宇判据	K95+430~K96+430	1 000	低岩爆
	K96+430~K101+163	4 733	中等岩爆
	K101+163~K102+150	987	低岩爆
卢森判据	K97+500~K98+460	960	低岩爆
	K98+460~K99+680	1 995	中等岩爆
	K99+680~K100+585	905	低岩爆

表 5 岩爆设计区段长度

Table 5 Design lengths of the rockburst

洞室	公路里程	长度/m	围岩类别	支护设计类型
左洞	K96+740~K98+060	1 320	V 类	低岩爆设计
	K98+060~K99+400	1 340	V 类	中等岩爆设计
	K99+670~K100+055	385	V 类	中等岩爆设计
	K100+055~K100+160	105	V 类	低岩爆设计
右洞	K96+610~K98+060	1 450	V 类	低岩爆设计
	K98+060~K99+398	1 338	V 类	中等岩爆设计
	K99+668~K100+055	387	V 类	中等岩爆设计
	K100+055~K100+158	103	V 类	低岩爆设计

3.2 岩爆区设计施工对策

3.2.1 防治原则

苍岭隧道岩爆区工程对策要围绕技术经济合理, 措施安全可靠, 采取的设计施工对策是具体包括“改善洞室应力分布, 注重开挖应力释放, 提高围岩自承能力, 预报指导工程实施”^[10]。

(1) 改善洞室应力分布, 就是要根据初始应力场和洞室开挖后的洞壁最大主应力和最大切向应力等分布情况, 经济合理等因素来确定相对圆滑的开挖断面、减少和避免直墙断面, 减少应力集中;

(2) 注重开挖应力释放, 就是要尽量在开挖后早期尽量释放洞周应力, 减少围岩脆性破坏;

(3) 提高围岩自承能力, 就是开挖后要及时施作锚喷支护, 尽早形成围岩的承载环, 提高环向和切向的承载力;

(4) 预报指导工程实施, 就是要加强施工期的岩爆预测预报, 通过配合施工期的岩爆研究指导设计施工。

3.2.2 低岩爆段措施

(1) 掘进: 可实施全断面光面爆破开挖, 断面进尺不超过 4 m。爆破、通风、找顶后洞壁、掌子面用撒水 3 遍, 每遍相隔 5~10 min, 使开挖岩面充分湿润, 撒水喷头水柱不小于 10 m;

(2) 打设洞壁环向应力释放孔: 孔径 ϕ 50 mm,

深 3 m, 1.5 m@1.5 m^[10];

(3) 设置挂网喷射混凝土初期支护: 设钢筋网: 钢筋直径为 $\phi 6$, 间距为 150 mm×150 mm, 厚 6 cm 喷射混凝土(扩大断面用 15 cm), 局部断面变化处及打设 $\phi 25$ mm×5 涨壳式预应力中空注浆锚杆长度 2 m, 预应力 50 kN, 锚杆强度 180 kN^[10].

3.2.3 中等岩爆段措施

(1) 掘进: 可实施全断面光面爆破开挖, 断面进尺不超过 4 m。必要时作超前 30~50 m 导洞; 导洞直径不大于 5 m, 可作为岩爆超前预报和释放地应力;

(2) 爆破、通风、找顶后洞壁、掌子面用洒水 3 遍, 每遍相隔 5~10 min, 使开挖岩面充分湿润, 洒水喷头水柱不小于 10 m;

(3) 打设洞壁环向应力释放孔: 孔径 $\phi 50$ mm, 深 3 m, 间距为 1.5 m×1.5 m^[10];

(4) 设置径向系统锚杆: 在洞壁打设 $\phi 25$ mm 涨壳式预应力中空注浆锚杆长度 2 m, 预应力 50 kN, 锚杆间距为 1 m×1 m, 锚杆强度 180 kN。安装时, 锚杆垫板要将钢筋网压住^[10];

(5) 设置挂网喷射混凝土初期支护: 设钢筋网直径为 $\phi 6$, 间距为 150 mm×150 mm, 厚 100 mm 喷射混凝土(扩大断面用 20 cm)^[10]。

4 施工期间的岩爆预测

4.1 岩爆预测的方法

由于岩爆分析中的判据存在一定的局限性, 设计阶段的岩爆预测准确性有待隧道开挖验证, 因此加强施工期岩爆监测工作, 对调整设计、指导施工并提高掘进作业的安全性、技术经济的合理性及工程进度等方面具非常关键的作用。

施工期间采用的岩爆预测方法主要包括以下几个方面^[11]:

(1) 工程类比法: 结合现场 NATM 施工量测监控工作, 对隧道已开挖段内发生或未发生岩爆地段的洞内围岩岩性、完整性、地下水等调查分析, 与现今开挖后隧道内的现状进行类比, 初步判定岩爆发生条件, 为预测提供参考;

(2) 理论分析方法: 在利用设计阶段岩爆研究资料的基础上, 结合现场具体的状况(如开挖方式、断面形状等), 通过有限元分析, 进行更加准确的预测预报;

(3) 现场实测方法: 采用应力解除法, 对隧道

开挖后的洞壁应力直接进行测试, 同时采集隧道内岩样进行室内试验。

利用上述 3 个方面的分析, 并结合隧道开挖后洞内的实际地质状况给出合理的、更加准确的岩爆预测预报。

4.2 现今施工状况及岩爆预测阶段性成果

4.2.1 现今施工状况

苍岭隧道从 2003 年 12 月 28 日开工至 2005 年 5 月 18 日, 进口段左洞开挖至 K97+415, 右洞开挖至 K97+360; 出口段左洞开挖至 K100+292, 右洞开挖至 K100+394。隧道在岩爆区均按全断面开挖。进口段在施工进入岩爆区段除爆破后及时掌子面喷水、及挂网+喷混凝土外, 未设系统锚杆(局部除外); 出口段地下水较多, 设计未按预测岩爆区段考虑, 施工进入岩爆区段后未出现岩爆。

4.2.2 施工期岩爆阶段性预测

根据前期设计阶段的资料、结合现场实际施工状况, 对苍岭隧道进行有限元数值模拟分析后, 对隧道内岩爆总体预测进行了调整(表 6)。

表 6 设计与施工期间岩爆预测区间比较

Table 6 Comparison of the prediction section in design and construction phases

岩爆等级	设计期预测		施工期预测	
	公路里程	长度/m	公路里程	长度/m
轻微岩爆	K95+430~ K98+060	2 630	K97+740~ K98+240	550
中等岩爆	K98+060~ K100+055	1 995	K98+240~ K99+590	1 350
轻微岩爆	K100+055~ K101+163	1 108	K99+590~ K100+220	630

由表 6 可知: 低岩爆区大为减少, 中等岩爆区减少了 645 m; 同时将隧道开挖后岩爆的具体状况和前期多种判据的结果比较分析后可以看出, 运用卢森判据得出的结论与本隧道的实际状况比较相符, 这为后续利用现场实测值进行岩爆预测提供了重要的参考作用。

在总体预测的基础上, 为更加准确的指导设计施工, 进行现场的实测研究是很有必要的, 并以其为重要依据, 分阶段对掌子面前方 200~500 m 范围进行岩爆实时预报^[11]。

基于上述理论, 在掌子面后方利用应力解除法获取了洞壁实测应力值, 同时现场采样进行了室内试验获得岩石强度指标。并据此为依据进行了岩爆判别(表 7)。

表 7 利用实测值判别的岩爆状况对比表

Table 7 Comparison of the rockburst by measured stress value in-situ

公路里程	单轴抗压强度 /MPa	实测 σ_0/σ_1	卢森判据	陶振宇判据	岩爆发生情况
K97+210	157.3	18.4/18.6	无岩爆	低岩爆	未发生岩爆
K97+230	157.3	27.0/27.4	无岩爆	低岩爆	未发生岩爆
K100+400	157.3	16.7/21.8	无岩爆	低岩爆	未发生岩爆
K100+570	157.3	22.0/23.9	无岩爆	低岩爆	未发生岩爆

由表 7 可知, 卢森判据的结论与现场实际状况较为一致, 而陶振宇判据与实际情况存在较大出入, 再次论证了前者对于本隧道的适用性^[11]。

根据上述的实测结果, 结合地质调查及前期预测结果, 综合分析后对掌子面前方 300~500 m 的范围进行岩爆的实时预测预报, 并根据预测情况, 调整了岩爆区范围和工程措施, 在确保安全前提下, 以节约投资。

5 结 语

通过对苍岭隧道勘察、设计及施工阶段的岩爆分析研究, 得出以下结论:

(1) 苍岭隧道是一座深埋大、地应力高, 从而可能发生岩爆的山岭特长公路隧道; 设计期做了大量的岩爆预测研究是很有必要的。施工期展开的岩爆预测预报是指导调整设计施工的重要依据, 效果是明显的。但目前施工未进入中等岩爆区, 许多问题有待研究, 须高度重视。

(2) 影响岩爆发生的因素很多, 国内外还没有一套成熟的岩爆预测方法, 在应力判据中, 按苍岭隧道地质条件和开挖后的实际状况分析比较后认为, 卢森判据较吻合实际情况, 建议在后续的岩爆预测中以其为主要判别手段, 同时辅以其他判据进行综合分析研究。

参考文献(References):

[1] 符文喜, 任光明, 聂德兴, 等. 深埋长隧道岩爆的预测预报及防治初探[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 10(1): 25 - 28.(Fu Wenxi, Ren Guangming, Nie Dexing, et al. Discussion on the prediction and control of rockburst deep-lying long tunnel[J]. Journal of Geological Hazards Environment Preservation, 1999, 10(1): 25 - 28.(in Chinese))

[2] 浙江省交通规划设计研究院. 苍岭隧道施工图设计工程地质勘察

报告[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2004.(Zhejiang Provincial Plan Design and Research Institute of Communications. The report of engineering geology reconnaissance in construction detail design of Cangling tunnel[R]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Plan Design and Research Institute of Communications, 2004.(in Chinese))

[3] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 60 - 63.(Li Shulin, Feng Xiating, Wang Yongjia, et al. Evaluation of rockburst progress in deep hard rock mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2001, 22(1): 60 - 63 (in Chinese))

[4] 樊建平. 山西省寺铺尖隧道岩爆问题初探[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(2): 154 - 156.(Fan Jianping. Discussion on the rockburst in the Sipujian tunnel of Shanxi Province[J]. Journal of Hebei College of Geology, 1996, 19(2): 154 - 156.(in Chinese))

[5] 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.(Tao Zhenyu, Pan Bietong. The Theory and Method of Rock Mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991(in Chinese))

[6] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. The Analysis Principle of Geology Engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))

[7] 尚岳全. 苍岭隧道开挖岩爆预测研究[R]. 杭州: 浙江大学防灾工程研究所, 2003.(Shang Yuequan. Study on the rockburst in Cangling tunnel after excavation[R]. Hangzhou: Prevent Calamity Institute of Zhejiang University, 2003.(in Chinese))

[8] 尚岳全, 黄润秋. 工程地质研究中的数值分析方法[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.(Shang Yuequan, Huang Runqiu. Numerical Analysis Method In Study of Geology Engineering[M]. Chengdu: Publishing Company of Chengdu Science and Technology University, 1991.(in Chinese))

[9] 张俊, 范景伟. 天生桥二级电站厂房区地应力场的三维有限元反演分析[J]. 四川水利发电, 1992, (1): 37 - 41.(Zhang Jun, Fan Jingwei. Back-analysis of in situ-stress field in the area of power-house of Tianshengqiao-II Hydroelectric Power Station by three-dimensional FEM[J]. The Journal of Sichuan Hydropower, 1992, (1): 37 - 41.(in Chinese))

[10] 浙江省交通规划设计研究院. 台缙公路西段苍岭隧道施工图设计[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2004.(Zhejiang Provincial Plan Design and Research Institute of Communications. The construction detail design phase of Cangling tunnel in Taizhou—Junyun highway[R]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Plan Design and Research Institute of Communications, 2004.(in Chinese))

[11] 西南交通大学. 苍岭隧道岩爆预测研究 - 分阶段实时岩爆预测预报[R]. 成都: 西南交通大学, 2005.(Southwest Jaotong University. Study on the rockburst of Cangling tunnel[R]. Chengdu: Southwest Jaotong University, 2005.(in Chinese))