

岩 爆 特 征 及 机 理

万姜林* 周世祥 南 琛 丁 锐

(铁道部隧道工程局)

提 要 本文根据工程实例及岩石显微分析、岩石力学试验、声发射试验和力学计算结果,归纳了岩爆力学条件,并简要分析了岩爆的破坏形式、破坏过程;探讨了岩爆形成的岩性条件、静力学条件和动力学条件,得出了若干重要结论,对今后岩爆研究与防治有一定参考价值。

主题词 岩爆 物理与几何特征 形成机理

1 概述

在世界范围内的深埋或高应力脆性岩体地下工程中普遍会遇到岩爆。岩爆是一种地质灾害,因其具有弹射、抛散、震动等特点,不仅对施工人员和设备安全威胁极大,而且还严重减缓施工速度,增大工程费用,因而也引起了国内外的普遍关注,并促进了岩爆研究的进展。

岩爆机理一直是岩爆研究的核心,虽然自 60年代以来,已提出了强度、刚度、能量和冲击倾向等几种机理学说,但是,并不完善,并不能满意地解决日益增多的实际工程中所遇到的岩爆问题。

笔者在太平驿电站引水隧洞施工现场进行了调查研究,记录分析了 433次岩爆,取样进行了岩石单轴、三轴压缩试验,声发射试验和电镜扫描分析,并进行了有关力学计算分析等。通过研究发现:岩爆作为不同于其它形式的岩体(石)材料的一种破坏现象,其破坏形式、破坏过程及所表现出来的物理和几何形态等方面独具特点,且在某些方面有明显规律性,它们密切反映了岩体(石)材料的某些性质及其所处的力学状态,因而岩爆具有独特的形成机理。

2 岩爆的特征规律

太平驿电站于四川省汶川县境内,系岷江上游总体规划的第二座引水式电站,总装机容量 26万 kW。其引水隧洞全长 10.5 km,内径 9 m。工程区山高坡陡,沟谷深切,山坡坡度一般为 40°左右。隧洞垂直埋深 80~ 650 m,水平埋深 100~ 800 m,隧洞围岩以花岗岩、闪长岩和花岗闪长岩为主。隧洞采用钻爆法施工。施工中有近 3 km长的花岗岩洞段发生了岩爆。这些岩爆

* 本文收稿日期:1998-02-20 万姜林 铁道部隧道工程局 洛阳 邮编: 471009

具有如下几点特征规律。

2.1 所有的岩爆均有明显的声响特征,一般大规模岩爆声响似炮弹或闷雷;中等规模岩爆声响则似子弹射击或劈柴声;而零星小规模岩爆声响多象鞭炮声。可见,声响程度的不同表现了岩爆时岩体内部破坏程度的差异。

2.2 一般规模较大的岩爆弹射较弱、震感较强,并且在破坏时还伴随有小规模弹射性岩爆;而规模较小的岩爆则正好相反。从现场观察到,多数岩爆属弱弹射,弹距 $\leq 2.0\text{ m}$,仅有少数几例岩爆弹距达到 4.5 m ,且弹射岩片有一定的散射角,爆落堆积物有明显的分选性。这表明岩爆的震动强度与破坏规模有密切关系,而弹射强度与破坏规模则无对应关系。

2.3 从横断面上看,在岩脉少地段、规模较大的岩爆,其爆坑形状主要为“ \cap ”形,坑深最大达 4.8 m ,一般为 $0.6\sim 2.0\text{ m}$;在石英脉富集地段的岩爆及少岩脉地段的中小规模岩爆,爆坑表状则为窝状,坑深从几厘米至 2.5 m 不等,其底面与洞壁面平行,周边断裂面与洞壁斜交;在岩体宏观裂隙交叉切割处,爆坑底面较平整,与原洞壁面平行,周边破裂面则将就裂隙面。见图1

从爆落的岩石看,主要有块、板、片和碎屑状几种,通常前三种都有一组平行的裂面,而另一组断口则与平行裂面斜交。交角从 $5^\circ\sim 90^\circ$ 不等。一般块板体积较大,最大可达 $2.3\times 1.2\times 0.8\text{ m}$,多见于大规模岩爆;而岩片体积一般 $0.4\times 0.45\times (0.05\sim 0.3)\text{ m}$ 以内,中小规模岩爆多见。

由此可以看出,不同规模的岩爆其破坏的几何形态特征有所不同,它们与岩体结构面(宏观、微观)状况和应力状况密切相关,爆坑破坏形式与岩块(片)的破坏形式都体现了岩爆破坏具有剪切、张拉或冲断(单一或两种及以上组合)破坏的形态特征。

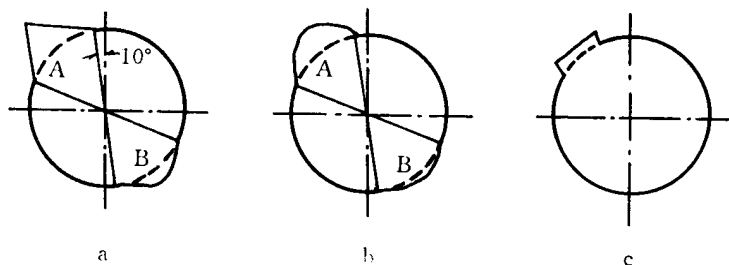


图 1 三种典型岩爆坑断面形状图

2.4 岩爆均发生在横断面河侧拱顶 $10^\circ\sim 70^\circ$ 及山侧下部对称部位(图1的A、B两处),该两处切线与山坡线大体平行。这说明岩爆发生的横断面部位与洞室周边最大切向应力的位置与方向有关。

岩爆坑沿洞轴向展布大体有三种:连续型(爆坑展布长度 $20\sim 100\text{ m}$)、断续型(爆坑以 2 m 以内的间隔断续展布,长度达 $10\sim 100\text{ m}$ 不等)、零星型(为小规模单个出现)。这可能表明爆坑展布与内部裂纹尺寸及应力状态有关。从现场观察到此三种展布类型恰好对应于直观意义上的大、中、小三种破坏规模的岩爆。

2.5 绝大多数的岩爆分布于埋深 $260\sim 650\text{ m}$ 的洞段,仅少数几例小规模岩爆分布于埋深 $100\sim 150\text{ m}$ 的洞段。图2表明岩爆与洞体埋深无正相关关系。

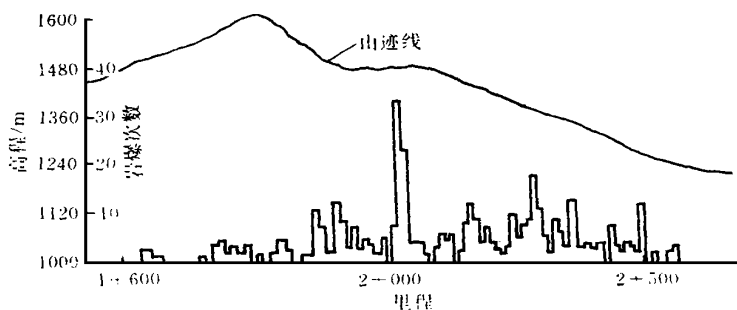


图 2 岩爆沿程分布图

2.6 从出现声响到岩石弹离母岩的时间间隔看,有速爆型或滞后型两种。前者间隔时间极短,规模较小,弹射较强。后者则正好相反,长者可达 1 个月以上,由此可判断岩爆与岩体内部应力的反复调整密切相关。

从同一部位发生岩爆次数看,有一次型和重复型两种。前者为一次岩爆后不加支护也不会在该处再次发生岩爆;而后者在初次岩爆后若不加支护,则可在同一部位发生两次以上(多者达十几次)岩爆,该类岩爆约占总数的 33%。说明前次爆坑导致岩体中应力集中对引发岩爆有重要作用。

2.7 有 90% 的岩爆发生在围岩暴露后 16 天内,暴露 8 天内的岩爆占 65%,而暴露 1 天内的岩爆仅占 20%。亦有少数几例岩爆是在暴露 1 至 6 个月后发生的。见图 3。这表明岩爆与围岩应力、变形的时间效应密切相关。

约有 85% 的一次型岩爆出现在距掌子面 0~1.5 倍洞跨的洞段,见图 4。这表明掌子面的空间效应对引发岩爆作用很大。

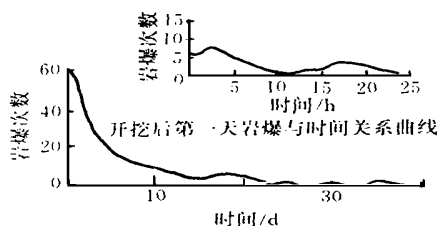


图 3 频率与时间关系

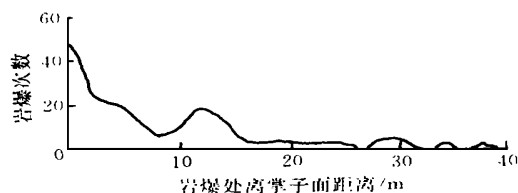


图 4 岩爆频率与距离关系

2.8 一次岩爆破坏厚度可从几 cm 至 2.5 m 不等,但多数 50 cm 以内。图 5 是部分统计结果。这一状况反映了岩爆主破坏面受到了岩体内部裂隙分布状况的控制。

3 岩爆的破坏形式及破坏过程分析

3.1 岩爆破坏形式

从刚性压力机下的单轴压缩和低围压下三轴试验的试件破坏形态看主要有劈裂、劈裂冲

断、劈裂剪切和多个破裂面的复合破坏四种类型。这与现场观察结果是吻合的。

在对现场爆落岩片(块)和试件断口所作的电镜扫描分析发现,平行的一组裂面属张拉裂面;面另一组交断口则有张拉、剪切两种形态。这与谭以安博士的研究结果完全一致。

可见,岩爆的基本破坏形式主要为张拉、剪脆性破坏。但应当指出,在实际工程中,对爆坑形态而言,通常表现为剪切、张拉、张剪和复合破坏四种类型。单纯张拉破坏通常多见于岩体宏观裂隙交叉切割处的小规模岩爆和完整地段较大规模岩爆时伴生出现的小规模岩爆,复合破坏则主要出现于岩脉富集地段,典型的、完整的、少岩脉地段的中大以上规模的岩爆则多属于剪切和剪张破坏。

3.2 岩爆破坏过程

从试件受压过程的声发射曲线(图6)可看出,当应力达到一定水平时,试件内反映出明显的声发射现象,表明试件内部已开始破裂;当应力继续增加到一定值量时,AE事件平稳增强,表明内部破坏平稳扩展,而当压力达到某一值以后,AE事件急剧增加,并呈明显的能率脉冲现象,说明内部破坏急剧不稳定扩展;而当应力达到 σ_c 后试件破坏。此时即使停止加载,而AE现象依然很明显,表明试件内部积蓄的弹性应变能释放导致试件破坏继续发展,称之为“破坏惯性”。可见岩爆的破坏经历了内部裂纹启裂稳定扩展→不稳定→扩展直至客观存在观破坏和产生弹射、震动的过程,这个过程笔者称之为岩爆破坏的“时序渐进过程”。该过程中生一阶段间隔时间很短,则其破坏就表现为速爆型岩爆;反之则表现为滞后型岩爆。现场观察和试验证实,每一次独立的岩爆破坏都遵循这一“时序渐进过程”,但该过程时间长短则主要取决于应力水平和岩体的某些性质。

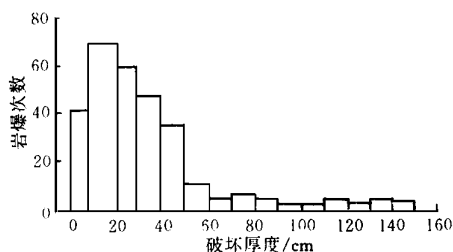
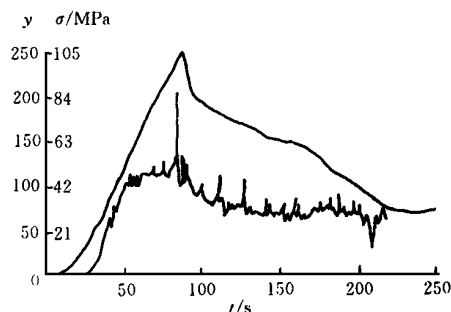


图5 破坏厚度



① 纵坐标左侧原图标目是Y,不知对不对?

② 图中似应指明哪条曲线是 σ ,哪条曲线是Y?

图6 声发射曲线

从岩爆的重复性分析可知,同一部位首次岩爆到最后一次岩爆的过程,是由表及里循序渐进的破坏过程,这一过程笔者称之为岩爆破坏的“空间渐进过程”。首次岩爆主要是由于受开挖引起的应力变异作用而产生;而第二次及以后的每一次岩爆则主要是受前一次岩爆坑所引起的周边岩体中的应力集中作用所引发。这表明岩爆破坏的“空间渐进过程”主要是由于轮廓凹陷引起的应力集中大于岩体的强度所引起,而该过程中的每一次岩爆都服从“时序渐进过程”,但每一次岩爆破坏深度则取决于应力水平与岩体某种强度的比值。

从室内试验和现场观察可知,岩爆破坏的空间渐进过程仅对具重复性岩爆适用。通常对单独的一次岩爆特别是中等规模以上的岩爆,还具有“主导破坏”和“伴生破坏”的特点,所谓主导破坏是爆落岩体与母岩的分离面的破坏,“伴生破坏”就是在分离岩体中伴随爆破坏。前者通常是在相对于应力水平而言岩体最薄弱处(如微裂隙尺寸最大处)首先产生破坏,对每一次岩爆都是如此;而后者则是因分离岩体中的应力调整或积蓄能量释放所引起。

4 岩爆破坏的岩性条件和应力条件分析

4.1 岩爆破坏的岩性条件

从现场观察岩爆发生在以花岗岩为主体的围岩洞段,围岩通常较新鲜、完整,呈整体块状结构,现场实测岩体纵波速度为 $V_P \approx 3500 \sim 6500 \text{ m/s}$,石英脉富集段 $V_P \approx 3500 \sim 5000 \text{ m/s}$,而少石英脉地段 $V_P \approx 4500 \sim 6500 \text{ m/s}$ 。岩石单轴压强度约 $140 \sim 240 \text{ MPa}$ (少岩脉段在 180 MPa 以上,石英脉富集段多在 200 MPa 以下), $E = 28.5 \text{ GPa}$,极限应变 $\varepsilon_x = 4.8 \times 10^{-3}$, $K = 7.14$,弹性能量指数 $E/D \geq 3.7$,在单轴及低围压下,其 $\sigma - \varepsilon$ 曲线呈典型的第 II 类曲线,见图 7 表明该岩石是典型的高强度、高弹模、小变形的脆性岩体,具较好的储能条件。因而具有储存的弹性能突然释放引岩爆破坏(危险性)的基本条件。

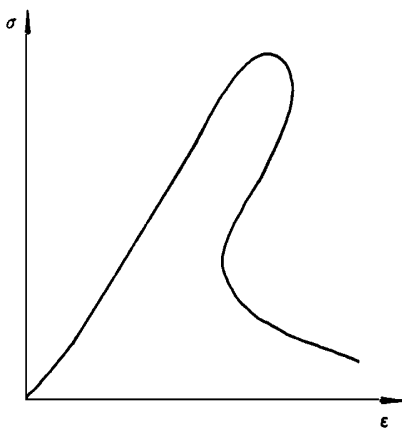


图 7 应力—应变曲线

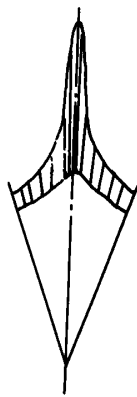


图 8 凹陷应力分布图

在偏光显微镜和扫描电镜下观察到,原岩中普遍存在原生裂隙或空隙,且裂隙呈明显的定向排列。裂隙面与洞轴水平夹角约 $7^\circ \sim 20^\circ$ 左右,和洞壁出现的鳞片纹面与洞壁面水平夹角基本一致。从断裂力学原理可知,由于岩体中这些原生微裂隙的存在,使得围岩体在开挖形成的二次应力场的作用下,在原生裂隙的端部产生较大的应力集中(拉应力),当此集中应力大于岩石的抗拉强度时,就使岩石先从裂隙端部开始破坏,进而发展成宏观的断裂破坏。这就是平行的一组裂面均为张拉破坏且与原洞壁面近似平行的原因,也是导致在小抗压强度的围岩应力作用下产生岩爆的内在原因。

4.2 岩爆破坏的静力学条件

根据试件受压时的声发射试验,岩体内部原生裂隙的启裂扩展应力约为 $0.11\sigma_c$ ($20 \sim 30$

MPa),非稳定扩展应力值为 $0.6\sigma_c$ ($80\sim 145\text{MPa}$), σ_c 为岩石单轴抗压强度,试验值为 $140\sim 240\text{MPa}$ 。这表明:当围岩内的应力达到 $0.11\sigma_c$ 时,就可使岩体产生张拉破坏;当应力达到 $0.6\sigma_c$ 以上时,可使岩体产生加速破坏;而当应力达到 σ_c 时,则产生极限破坏(剪切破坏)。

(1)实测地表下 200m 深处 $\sigma_1 = 30.7\text{MPa}$, $\sigma_3 = 10.2\text{MPa}$,属高应力地区。根据区域地质构造推断,弹性力学分析及有限元计算,埋深 450m 处构造应力 $\sigma_1 \approx 39\sim 49\text{MPa}$, $\sigma_3 \approx 9\sim 13\text{MPa}$, $\sigma_1/\sigma_c \approx 0.16\sim 0.33$,与文献[4]基本一致。 σ_1 方向与洞轴水平夹角为 15° ,与岩爆坑底面和鳞片纹的方向基本平行,并且 σ_1 已远远大于试件内部启裂应力。这说明岩爆主破裂面沿洞轴方向的扩展主要是受水平构造应力的作用所决定。

(2)采用有限元方法推得洞室周边最大切应力 $\sigma_{\max} \approx 59\sim 158\text{MPa}$, $\sigma_{\max}/\sigma_c \approx 0.35\sim 1.05$,在 Russens 结果范围内,并有的超过非稳定扩展应力值 σ_{\max} 与断面垂直轴夹角为 39° ,其方向与山坡线大体一致,恰好与图 1 中 A B 两部位的中心的轮廓线相切。这表明岩爆出现的部位决定于 σ_{\max} 在洞室轮廓的位置。而有些洞段 σ_{\max} 达到或超过了岩体强度,因此,有的岩爆呈剪切破坏形式也就是必然的。

(3)首次岩爆后,由于爆坑使开挖轮廓呈明显的凹凸不平,可在爆坑处产生很大的切向应力集中。在爆坑顶点处的切应力值可达到原洞壁应力值的几倍甚至几十倍,加大了 $\sigma_1 - \sigma_3$ 差值,见图 8。因此必须会产生重复性岩爆。

(4)根据文献[4]的三维计算和光弹分析,在距掌子面 $0\sim 1.5$ 倍洞径的洞段内,由于受掌子面的支撑作用,该洞段围岩应力急剧变化升高,其引起的切向应力集中系数达到了 $1.8\sim 3.0$,轴向应力集中系数则达到 $2.4\sim 3.6$,已远远大于内部原生裂纹的启裂扩展应力或非稳定扩展应力,加之该洞段内,受爆破动荷载作用影响较大。因此,大多数一次性岩爆发生于此洞段内。

4.3 岩爆的动力学条件

岩爆的弹射性表现为破坏岩片以一定的初速度飞射出来。显然,岩片在脱离母岩的同时受到了一个弹射引发力的作用。

由室内试验及现场观察分析可知,在洞轴向应力和切向应力作用下,首先在岩体内部沿原生裂隙产生劈裂破坏,当裂纹扩展至转向处时,岩片受洞轴向和切向压应力作用,产生“空鼓”现象,岩片内部的应力急剧变化调整,在裂纹尖端附近应力急剧升高到非稳定扩展应力水平,从而加速破裂面的破坏。当破裂面与临空面贯通即岩片的约束解除后的瞬时,岩片在破裂面上也获得了一个瞬时的作用力—弹射引发力(其方向与裂面法线方向平行);与此同时,岩片内积蓄的弹性应变能也因具有释放的条件而突然释放出来,从而使岩片产生弹射,而在母岩体内则产生震动。

可见,弹射引发力主要是来自岩片约束力(主要为粘聚力和内摩阻力)的突然丧失及岩体内弹性应变能的突然释放。从现场观察到明显的弹射多见于速爆型岩爆,在弹射前分离岩片有少量岩屑先行喷射出来的现象,就可证实这一分析结论。由此可知:弹射引发力与岩体破裂速度和储能性质呈正比,而与岩体抗拉强度、岩片的体积呈反比。而破裂速度又主要取决于岩体的断裂韧性和作用力的大小及其随时间的变化状况。

5 结束语

综上所述,岩爆是在具有一定的弹性应变能存储条件的硬脆性岩体中开挖隧洞时,由于地应力分异,围岩应力跃升,使得岩体内原生裂隙发生张拉破坏发展为宏观裂纹,并且其作用应力随之急剧调整升高,积蓄能量进一步集中,使内部破坏加速扩展,成为宏观破坏(剪、张脆性破坏),而使岩片分离母岩,并同时获得弹射引发力,使岩片向临空方向弹射,在母岩体内则产生震动。它经历了内部原生裂隙启裂并稳定扩展→(应力升高)非稳定扩展(新旧裂纹急剧扩展)→宏观破坏和弹射、震动的“时序渐进破坏过程”,也即是经历了稳定破坏→加速破坏→动力弹射、震动过程。这个破坏过程中所表现出来的物理和几何特征虽然很复杂,但在时空分布等方面仍具有明显的规律性。这些特点和规律又充分体现了岩体储能性质与微观结构条件和水平应力与围岩切向应力对岩爆形成的决定作用。试验研究表明,岩体的储能性质和微观结构条件对岩爆破坏规模和弹射、震动强度及沿洞轴向的分布状况等有重要作用。在岩性条件一定时,切向和水平应力作用方向则决定了岩爆的破坏形式、破坏规模、以及岩爆发生的横断面部位。围岩应力的空间效应则对岩爆出现的洞段范围起重要作用。

根据上述分析结果,在岩爆研究与防治中可采用如下途径:

- 5.1 在工程勘测设计阶段进行地应力测量,计算分析及岩石力学试验,将可对岩爆作出准确的早期预报,并有助于在设计阶段主动预防岩爆。
- 5.2 从宏观到微观进行地质和力学研究,特别是进行岩石微观分析,显微力学试验和声发射试验及低频动力试验,可以较好地揭示岩爆的内在机制,也是今后岩爆研究的趋势之一。
- 5.3 岩爆的特征规律可以用来进行施工中岩爆超前预测预报,在太平驿水电站引水隧洞用此方法预报岩爆准确率可达 90% 以上。
- 5.4 喷、锚(径向和超前)强化围碛支护,优化洞室断面形状,钻孔或切槽弱化围岩,改善周边岩体的应力状态等方法都可有效地挖掘岩爆。太平驿电站引水隧洞采用多种组合形式的喷锚支护和钻孔释放应力方法防治岩爆,就获得了良好效果,岩爆频率、规模都大大减少(分别减少 80% 和 94%)。

参考文献

- 1 万姜林等. 岩爆防治技术研究课题总结报告. 铁道部隧道局科研所, 1994
- 2 汪泽斌. 岩爆及其防治. 铁路科技动态报告文集. 铁道部科技司, 1992
- 3 谭以安. 岩爆形成机理研究. 水文地质工程地质, 1989, 1
- 4 张国云等. 地下工程岩爆技术资料汇编. 铁道部隧道局科研所, 1993
- 5 万姜林. 超欠挖引起的隧道力学效应及控制. 岩石力学在工程中的应用论文集. 1994

CHARACTERISTICS AND MECHANICAL ANALYSIS OF ROCK BURST

Wan Jianling Zhou Shixiang Nan Chen Ding Ri

Tunnel Engineering Bureau of MOR

Abstract According to the engineering practices and the rock micro-analysis, the AE test and the mechanical analysis results, this paper sums up the characteristics of rock burst and its regular pattern, briefly analyses the destruction forms and the destruction process of rock burst, approaches the rock conditions and its static and dynamic mechanism conditions on which the rock burst forms, and thus makes some important conclusions. This paper has some reference value to the study and the protection or treatment of rock burst.

Keywords rock burst; physical and geometrical characteristics; formation mechanism

1998年铁路续建项目

项 目 名 称	项 目 起 止 点	建设规模 (公里)	建 设 年 限
1. 宝成复线	阳平关~成都	396	1992~ 2000
2. 襄石复线	襄樊~石门	351	1993~ 1999
3. 包兰复线	包头~石嘴山	401	1993~ 1999
4. 黎湛复线	黎塘~湛江	321	1997~ 1999
5. 萧甬复线	萧山~宁波	144	1996~ 1999
6. 新菏复线	新乡~菏泽	168	1997~ 2000
7. 芜湖长江大桥	芜湖市		1997~ 2000
8. 钱江二桥及杭州枢纽	杭州市		1988~ 2000
9. 哈大电化	哈尔滨~大连	946	1994~ 2000
10. 成昆电化	成都~昆明	1100	1993~ 2000
11. 武广电化	武昌~广州	911	1996~ 2000
12. 渝达电化	重庆~达县	239	1993~ 1999
13. 横南线	横峰~南平	257	1993~ 1999
14. 西安安康线	西安~安康	268	1995~ 2001
15. 南疆线(库喀段)	库尔勒~喀什	975	1996~ 1999
16. 朔黄线	神池~肃宁	421	1997~ 2000
	肃宁~黄骅港	166	1997~ 2002
17. 邯济线	邯郸~济南	232	1996~ 2000
18. 水柏线	六盘水~柏果	121	1997~ 2001
19. 达万线	达县~万县	160	1997~ 2000