

西南山区高速铁路新技术丛书

西南山区煤与瓦斯 突出隧道施工技术

XI'NAN SHANQU MEI YU WASI
TUCHU SUIDAO SHIGONG JISHU

王明慧 张忠爱 编著

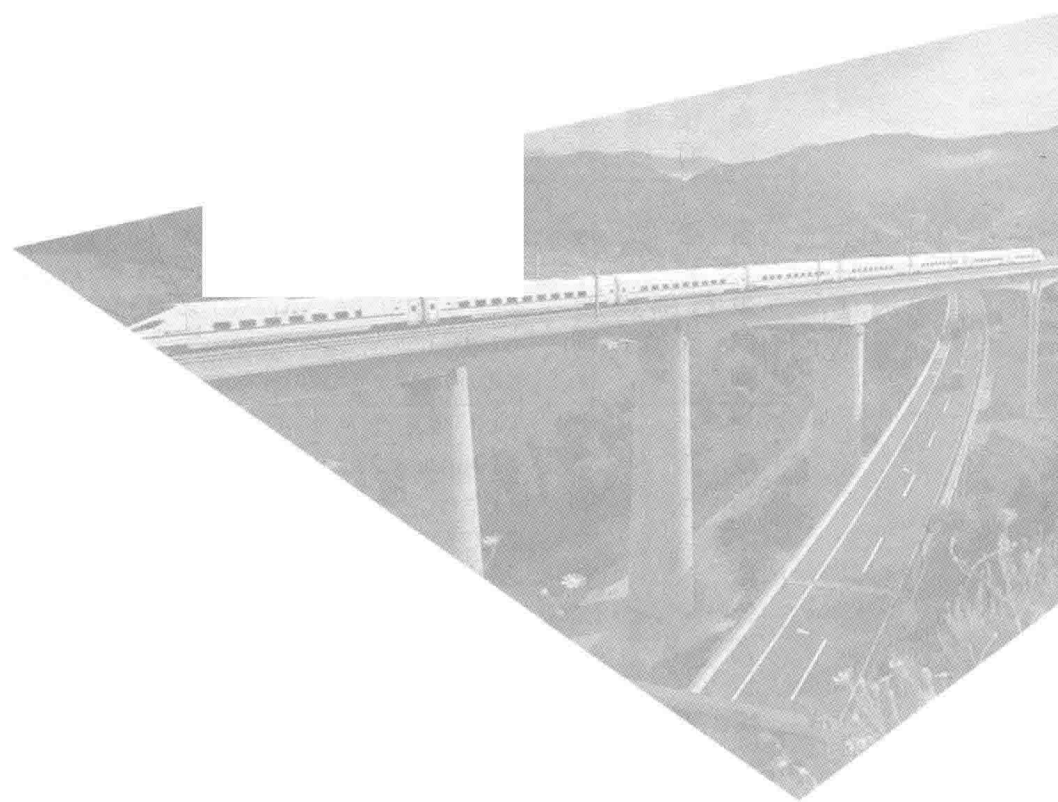


西南交通大学出版社

西南山区高速铁路新技术丛书

西南山区煤与瓦斯 突出隧道施工技术

王明慧 张忠爱○编著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目（C I P）数据

西南山区煤与瓦斯突出隧道施工技术 / 王明慧, 张忠爱编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5643-5916-4

I. ①西… II. ①王… ②张… III. ①铁路隧道—瓦斯隧道—隧道施工 IV. ①U459.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 289590 号

西南山区煤与瓦斯突出隧道施工技术

王明慧 张忠爱 编著

策 划 编 辑 王 旻
责 任 编 辑 姜锡伟
封 面 设 计 何东琳设计工作室

出 版 发 行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
发 行 部 电 话 028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川煤田地质制图印刷厂
成 品 尺 寸 210 mm × 285 mm
印 张 11.5
字 数 292 千
版 次 2017 年 12 月第 1 版
印 次 2017 年 12 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5643-5916-4
定 价 68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

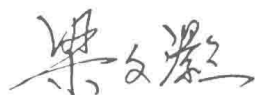
瓦斯隧道尤其是瓦斯突出隧道的工程建设难度大，风险高。近二十年来，随着交通建设的快速发展，瓦斯隧道越来越多。由于前期认识不足，缺乏足够的防治经验，在工程建设过程中，瓦斯隧道事故时有发生，一些事故甚至带来惨痛的教训和巨大的损失。

近年来，相关单位虽然加强了对瓦斯隧道爆破技术、通风设计、瓦斯监控和预防、施工用电管理、火源控制、施工机械防爆改装、气密性混凝土使用等方面的研究，但是针对高瓦斯隧道施工技术方面的规定还是不够具体、不够完善。

渝黔铁路天坪隧道地处重庆与贵州交界地段，为典型的西南山区隧道，其瓦斯压力为 3.58~3.67 MPa（突出判别值为 0.74 MPa），属于瓦斯突出隧道。为确保天坪隧道安全、快速、高质量地施工，施工单位通过组织开展瓦斯突出隧道修建关键技术研究，研究解决了天坪隧道修建中遇到的揭煤、瓦斯抽排、通风、无轨运输、超前探测、机制砂气密性混凝土、安全管理等主要技术难题。

《西南山区煤与瓦斯突出隧道施工技术》一书结合天坪瓦斯突出隧道具体施工实例，系统总结了各项研究成果，理论联系实际，图文并茂，学术性、实用性、针对性强，可为我国西南山区煤与瓦斯隧道的规划、设计、施工、监理、运营提供借鉴。

中国工程院院士：



2017 年 8 月

前 言

渝黔铁路天坪隧道地处重庆与贵州交界，为典型的西南山区隧道，其瓦斯压力为 3.58 ~ 3.67 MPa (突出判别值为 0.74 MPa)，为典型的瓦斯突出隧道，施工过程中存在大断面隧道揭煤、隧道内瓦斯抽排、瓦斯突出隧道施工通风、高瓦斯隧道无轨运输、瓦斯超前探测和瓦斯突出隧道施工组织管理等技术问题。为确保天坪隧道安全、快速、高质量地施工，从 2013 年开始，我们开始组织瓦斯突出隧道修建关键技术研究，主要研究解决天坪隧道修建中遇到的技术难题，为天坪隧道的修建保驾护航，力争将我国高瓦斯隧道的修建技术推上一个新的台阶。

本书是历经两年，结合天坪瓦斯突出隧道施工，经过反复修改完善、提炼完成的，主要阐释了瓦斯突出隧道的工程技术与工程方法，包括瓦斯抽放防突、揭煤、节能通风、监测、无轨运输、机制砂气密性混凝土、安全管理等技术。期待其能为国内隧道规划、设计、施工、监理、运营管理技术人员提供借鉴，并希望成为引导隧道修建技术的发展、促进隧道技术人员不断深化研究与实践的参考。本书可供瓦斯隧道建设者、大专院校大学生、研究生及有关研究人员参考。

本书参与编写的单位及人员有：

中国铁路总公司：赵国堂、何志军、肖广智、姚久清、张民庆、唐国荣

渝黔铁路有限责任公司：王明慧、孙根柱、姚云晓、鲁军良、王旗兵、刘伟邦、李永生、黄旭、张兴林、曹义华、向道银、肖家强、王建华、张桥

中铁隧道局集团有限公司：洪开荣、罗琼、王小平、尤显明、卓越、王华平、于明华、杨立新、刘石磊、任伟杰、陈文义、谢成涛、王富军

中铁隧道勘测设计院有限公司：赵晋友、徐福东、杨军生、张美琴、杨仁春、李乐、将红军、杨卓梅

中铁隧道集团一处有限公司：张忠爱、易国良、陈海峰、王兴彬、李集光、张志和、祁西元、张永雄、翟富强、杨琨、刘盛、左杜平、张涛、辛国平

本书共分七章，由王明慧、张忠爱、张志和、杨琨共同组织完成。本书统稿由王明慧、张忠爱负责。本书在编写的过程中参阅了大量的国内外专著、学术论文等文献资料，同时也收集了大量的生产一线工作成果，在此谨向他们表示深深的谢意！本著作篇幅较大，由于参与人员较多，不可避免会有疏漏，有些提法也可能需要大家一起讨论，敬请提出批评并指正。

本书同时感谢梁文灏等院士对本书提供的技术指导。另外，也感谢中国矿业大学(北京)、辽宁工程技术大学、重庆煤炭科学研究院和河南理工大学等单位对本项目的技术指导工作。

编著者

2017 年 11 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 煤与瓦斯突出的基本知识	2
1.2 瓦斯突出治理的基本方法	7
1.3 隧道瓦斯爆炸及预防	7
第 2 章 瓦斯突出机理与防突技术	12
2.1 煤与瓦斯突出段超前地质预报	13
2.2 区域防突措施	25
2.3 局部防突措施	47
2.4 石门揭煤	53
2.5 二衬防护及运营期间瓦斯排放	63
2.6 主要结论及施工建议	67
第 3 章 瓦斯突出隧道施工通风、瓦斯检测	69
3.1 瓦斯隧道通风技术	69
3.2 瓦斯隧道监控技术	93
第 4 章 瓦斯突出隧道设备选型	112
4.1 瓦斯隧道运输方式现状	112
4.2 有轨运输方式的缺陷	113
4.3 无轨运输在天坪隧道的应用	114
第 5 章 瓦斯突出隧道施工组织技术	122
5.1 组织保障	122
5.2 揭煤前准备工作	123
5.3 技术保障	125
5.4 现场施工安排	125
5.5 揭煤效果评判及下一步工作安排	126

第 6 章	施工安全防护措施及应急管理	127
6.1	供电保护措施	127
6.2	天坪隧道施工用电配置	132
6.3	综合安全防护措施	135
6.4	各项管理制度	150
6.5	安全应急救援管理	161
第 7 章	问题讨论	168
7.1	铁路隧道与煤矿施工规范适用性	168
7.2	煤矿巷道揭煤与隧道施工	169
7.3	现有规范与现场施工的匹配	170
7.4	瓦斯隧道施工定额	172
7.5	存在的问题	173
参考文献		175

第1章 绪 论

渝黔铁路天坪隧道为瓦斯突出隧道，其瓦斯压力为 3.58 ~ 3.67 MPa（突出判别值为 0.74 MPa），施工过程中存在揭煤、瓦斯抽排、通风、无轨运输、超前探测、机制砂气密性混凝土、安全管理等技术难题。为确保天坪隧道安全、快速、高质量地施工，建设者主要研究天坪隧道修建中遇到的上述技术难题和关键技术，为天坪隧道的修建起到了保驾护航的指导作用，同时，也将我国高瓦斯隧道的修建技术推上了一个新的台阶。

天坪隧道位于贵州省北部，重庆与贵州省交界地段，行政区划属贵州省遵义市桐梓县。天坪隧道全长 13.978 km，地质条件复杂，集岩溶、瓦斯突出、有害气体、高地应力、高地温、突泥涌水等不良地质于一体，为渝黔铁路第一长 I 级高风险单洞双线铁路隧道，为实现长短打，共设置 1 平导、2 斜井、横洞（主井）、横洞（副井），天坪隧道总体平面布置见图 1-1。

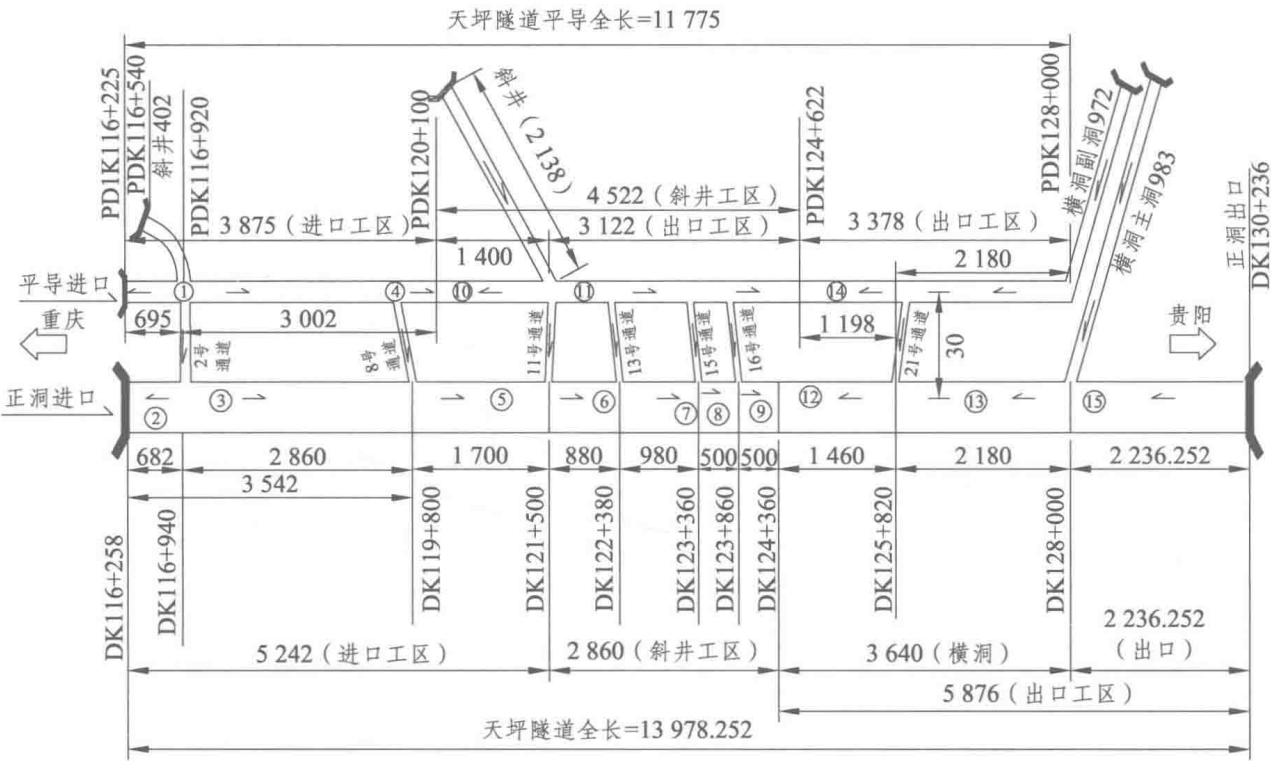


图 1-1 天坪隧道总体平面布置图

天坪隧道在 DK127+710 ~ DK127+850 段穿越龙潭组煤系地层，隧址龙潭组共有 3 ~ 22 层煤，主要有 9 层煤，其中稳定可采的有 2 层，较稳定的可采煤有 3 层，其余 4 层煤稳定性差，局部可采。煤层最薄为 10 cm，最厚可达 3 m，其中对隧道影响较大的为 C3、C5、C6 煤层。煤系地层段施工容易发生煤与瓦斯突然大量涌出或瓦斯聚积发生瓦斯燃烧、爆炸事故，是制约总体工期的关键线路，是天坪隧道的重点也是难点。

隧道穿煤段东侧约 81m 为新渝兴煤矿规划区，周边马湖塘煤矿为突出矿井，松坎煤矿均为高瓦斯矿井。由于 C3、C5、C6 煤层在 DZ-7 钻孔中未能全面测定瓦斯压力、瓦斯含量等各



项煤层瓦斯参数，施工单位在收集参考渝兴煤矿数据的基础上，在隧道施工作业中根据平导开挖面 TSP、超前地质钻孔及煤层取芯检测情况，对瓦斯压力、瓦斯含量等各项煤层瓦斯参数进行了修正，具体见图 1-2、表 1-1。

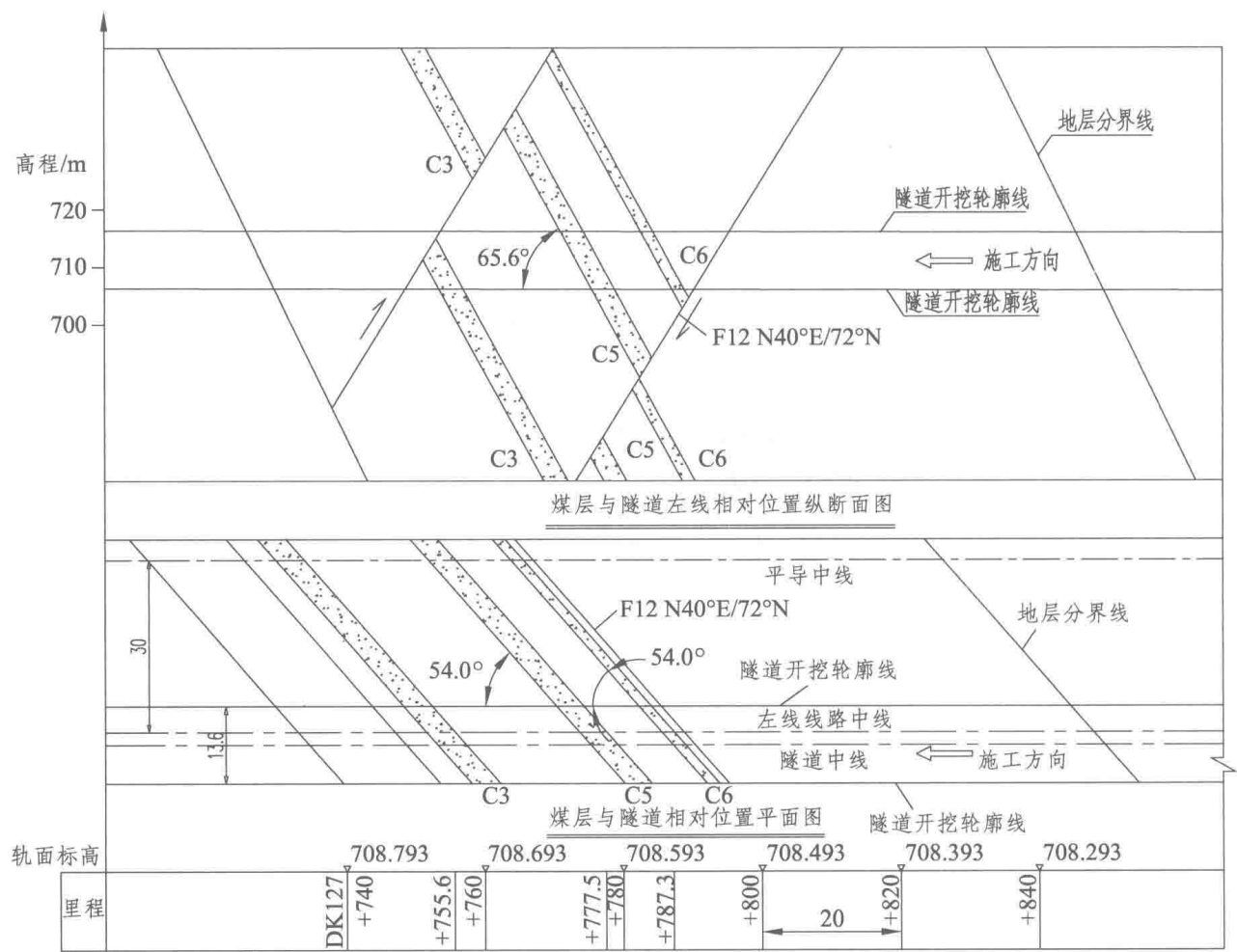


图 1-2 C3、C5、C6 煤层纵断面及平面图

表 1-1 DZ-7 地表钻孔煤与瓦斯参数测试成果

参数	瓦斯突出临界值	实测指标	备注
瓦斯压力 P (MPa)	≥ 0.74	3.75	
瓦斯放散初速度 ΔP	≥ 10	14.4	
煤的坚固系数 f	≤ 0.5	0.2	
煤的破坏类型	Ⅲ及以上	Ⅳ (粉碎煤)	

1.1 煤与瓦斯突出的基本知识

瓦斯 gas：从煤（岩）层内逸出的各种有害气体的总称，其主要成分为甲烷（CH₄）。广义上讲，凡从围岩或煤层渗入隧道的有害气体，均称为瓦斯，其主要成分为：甲烷（沼气 CH₄）、二氧化碳（CO₂）、氮气（N₂），还有少量的硫化氢（H₂S）、一氧化碳（CO）、氢气（H₂）、二氧化硫（SO₂）及其他碳氢化物、稀有气体等。狭义上讲瓦斯单指甲烷（CH₄），包括煤层甲烷

和石油甲烷。

瓦斯爆炸界限为 5%~16%。当瓦斯浓度低于 5%时，遇火不爆炸，但能在火焰外围形成燃烧层；当瓦斯浓度为 9.5%时，其爆炸威力最大（氧和瓦斯完全反应）；当瓦斯浓度在 16%以上时，失去爆炸性，但在空气中遇火仍会燃烧。具体见图 1-3。



图 1-3 瓦斯爆炸浓度范围示意图

1.1.1 瓦斯隧道的判别标准

《铁路瓦斯隧道技术规范》(TB 10120—2002)中提出了瓦斯隧道、瓦斯段落和瓦斯工区的概念。瓦斯隧道分为低瓦斯隧道、高瓦斯隧道及瓦斯突出隧道三种，瓦斯隧道的类型按隧道内瓦斯工区的最高级确定。

(1) 瓦斯隧道。

由于不确定因素很多，为了确保施工安全，《铁路瓦斯隧道技术规范》(TB 10120—2002)对瓦斯隧道没有定量指标，规定只要隧道内存在瓦斯，不论瓦斯出现早晚、时间长短、地点位置、数量大小，该隧道即被定义为瓦斯隧道。根据隧道内各施工工区的最高级，瓦斯隧道可分为低瓦斯隧道、高瓦斯隧道和瓦斯突出隧道三种。瓦斯隧道分级主要由设计阶段依据地表深孔钻探的瓦斯涌出量和瓦斯压力，并结合周边环境的调查来确定。

(2) 瓦斯工区。

瓦斯工区的划分主要根据施工组织及瓦斯设防需要，经技术经济比较后确定。按瓦斯涌出量和瓦斯压力，《铁路瓦斯隧道技术规范》(TB 10120—2002)中将瓦斯工区分为四类：当全工区未监测到瓦斯时为非瓦斯工区；当瓦斯涌出量小于 0.5 m³/min 时为低瓦斯工区；当瓦斯涌出量大于或等于 0.5 m³/min 时为高瓦斯工区（绝对瓦斯涌出量）；当瓦斯压力大于或等于 0.74 MPa、通过鉴定具有煤与瓦斯突出危险时，为煤与瓦斯突出工区。

(3) 瓦斯地段。

《铁路瓦斯隧道技术规范》(TB 10120—2002)中根据瓦斯工区的瓦斯含量，将瓦斯工区划分为非瓦斯地段和瓦斯地段（含三级、二级与一级三种）。

瓦斯隧道工区分为非瓦斯工区、低瓦斯工区、高瓦斯工区、瓦斯突出工区共四类；低瓦斯工区和高瓦斯工区可按绝对瓦斯涌出量进行判定。当全工区的瓦斯涌出量小于 0.5 m³/min 时，为低瓦斯工区；大于或等于 0.5 m³/min 时，为高瓦斯工区；瓦斯隧道只要有一处有突出危险，该处所在的工区即为瓦斯突出工区。判定瓦斯突出必须同时满足下列 4 个指标：① 瓦斯压力 $P>0.74\text{ MPa}$ ；② 瓦斯放散初速度 $\Delta P>10$ ；③ 煤的坚固性系数 $f<0.5$ ；④ 煤的破坏类型为Ⅲ类及以上。

《铁路瓦斯隧道技术规范》(TB 10120—2002)条文说明 3.3.2 中指出：“施工阶段应根据开挖后揭示的实际情况进行修正，尤其是对于煤层突出危险的判断，必须在开挖工作面进行现场检验和核实。”但由于现场施工中对瓦斯难以进行压力和涌出量的测定，而主要是通过监测瓦斯浓度，以瓦斯浓度进行安全管理，因此施工阶段必须建立以瓦斯浓度为标准体系的瓦斯分级。国内外矿井或隧道瓦斯分级见表 1-2。



表 1-2 世界各国瓦斯矿井或隧道分级

国家	行业	低瓦斯	高瓦斯	备 注
苏联	矿井	$<10\text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 10\text{ m}^3/\text{t}$	采用吨煤相对瓦斯涌出量评价
波兰	矿井	$<15\text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 15\text{ m}^3/\text{t}$	采用吨煤相对瓦斯涌出量评价
德国	矿井	$<20\text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 20\text{ m}^3/\text{t}$	采用吨煤相对瓦斯涌出量评价
印度	矿井	$<10\text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 10\text{ m}^3/\text{t}$	采用吨煤相对瓦斯涌出量评价
日本	矿井	$<0.5\%$	$\geq 0.5\%$	通风条件下瓦斯浓度
	矿井	$<3\%$	$\geq 3\%$	停风 1 h 瓦斯浓度
英国	矿井	$<1.25\%$	$\geq 1.25\%$	通风条件下瓦斯浓度
美国	矿井	$<0.25\%$	$\geq 0.25\%$	通风条件下瓦斯浓度
中国	大陆矿井	$<10\text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 10\text{ m}^3/\text{t}$	采用吨煤相对瓦斯涌出量评价
	大陆铁路隧道	$<0.5\text{ m}^3/\text{min}$	$\geq 0.5\text{ m}^3/\text{min}$	采用全工区绝对瓦斯涌出量评价
		$<0.15\text{ MPa}$	$\geq 0.15\text{ MPa}$	采用瓦斯压力评价
	台湾铁路隧道	$<0.25\%$	$\geq 0.25\%$	通风条件下瓦斯浓度

由世界各国（或地区）瓦斯分级来看，苏联、波兰、德国、印度和中国大陆采用瓦斯涌出量法进行瓦斯分级，而美国、日本、英国和中国台湾采用瓦斯浓度法进行瓦斯分级，且美国标准最高，也是最安全的。

瓦斯隧道灾害后果极其严重，风险高。因此，必须在地质调查的基础上，采取最直观、最准确的超前钻探法进行预报，从而评价隧道瓦斯的严重程度及对工程的影响，提出技术措施。超前钻探主要起到两个方面的预报作用：

- （1）探瓦斯。通过超前钻孔进行瓦斯含量、瓦斯压力测试。
- （2）探煤层。通过超前钻孔探明煤层分布位置、煤层厚度等。钻机应采用防爆型，钻孔直径应在 75~120 mm。在非煤系地层中超前钻孔数量不少于 1 个，煤层中不少于 3 个（取芯），复杂地质条件需适当增加地质钻孔数量。

1.1.2 瓦斯在煤层内的赋存状态

煤中瓦斯的赋存状态一般有游离状态和吸附状态两种：

（1）游离瓦斯：瓦斯以自由的气体状态存在于煤体和围岩的孔隙、裂隙或空洞中，瓦斯分子在孔隙中可以自由运动。

（2）吸附瓦斯：又分为吸着瓦斯和吸收瓦斯。在被吸附瓦斯中，通常把附着在煤体表面的瓦斯称为吸着瓦斯；而把进入煤体内部的瓦斯称为吸收瓦斯。

在煤体中，吸附瓦斯和游离瓦斯在外界条件不变的条件下处于动态平衡状态，吸附状态的瓦斯分子和游离状态的分子处于不断的交换之中；当外界的瓦斯压力和温度发生变化或给予冲击或振荡，影响了分子的能量时，其动态平衡会被破坏，而产生新的平衡状态。吸附瓦斯变为游离瓦斯的现​​象称为解吸现象。

煤中瓦斯 80%以上以吸附状态存在。

1.1.3 影响瓦斯含量的地质因素

瓦斯含量：自然条件下单位质量或体积煤体中所含的瓦斯量（包括游离瓦斯和吸附瓦斯），

单位为 m^3/t 。

煤体中瓦斯含量与实际瓦斯生成量差别很大；不同煤田、同一煤田内的不同井田、同一井田内的不同采区，其瓦斯含量均有很大差异。造成这种差异的因素很多，主要有以下几方面：

（1）煤的变质程度。

煤是天然吸附体，煤的煤化程度越高，其贮存瓦斯的能力就越强。一般情况下，在瓦斯带内，倘若其他因素相同，煤化变质程度不同的煤，其瓦斯含量不仅有所不同，而且随深度增加其瓦斯含量增加的量也有所不同。随着煤化变质程度的提高，在相同深度下，不仅瓦斯含量高，而且瓦斯含量梯度也大。

这主要是因为，在一定范围内，随着煤化变质程度的增高，煤体内部因干馏作用而产生微孔隙越多，使煤的表面积增大。

（2）煤层和围岩的透气性。

煤系地层岩性组合及其透气性对煤层瓦斯含量有重大影响。煤层及其围岩的透气性越大，瓦斯越易流失，煤层瓦斯含量就越小；反之，瓦斯易于保存，煤层的瓦斯含量就高。

现场实践表明：煤层顶底板透气性低的岩层（如泥岩、充填致密的细碎屑岩、裂隙不发育的灰岩等）越厚，它们在煤系地层中所占的比例越大，则往往煤层的瓦斯含量越高。反之，当围岩是由厚层中粗砂岩、砾岩或是裂隙溶洞发育的灰岩组成时，煤层瓦斯含量往往较小。

（3）地质构造。

地质构造是影响煤层瓦斯赋存及含量的最重要条件之一。目前总的来说，封闭型地质构造有利于封存瓦斯，开放型地质构造有利于瓦斯排放，如断裂构造和褶曲构造。

① 断裂构造：通常张性断层，尤其是通达地表的张性断层，有利于瓦斯的排放；压性断裂不利于瓦斯排放，甚至有一定封闭作用。

② 褶曲构造：当顶板为致密岩层且未暴露地表时，一般在背斜瓦斯含量由两翼向轴部增大，在向斜槽部瓦斯含量减少。当顶板为脆性岩层具裂隙较多时，瓦斯容易扩散，因而背斜顶部含瓦斯减少，在向斜轴部瓦斯增加。

（4）煤层露头。

煤层露头是瓦斯向地面排放的出口，因此，露头存在时间越长，瓦斯排放就越多，例如福建、广东地区的煤层多露头，瓦斯含量往往较低；反之，地表无露头的煤层，瓦斯含量往往较高。

（5）地下水活动。

由于地下水的运移，一方面驱动着裂隙和孔隙中瓦斯的运移，另一方面又带动了溶解于水中的瓦斯一起流动。因此，地下水活动有利于瓦斯的逸散。同时，水吸附在煤岩裂隙和孔隙的表面上，也减弱了煤对瓦斯的吸附能力，因而地下水和瓦斯占有的空间是互补的，这种相逆的关系，表现为水大地带瓦斯小、水小地带瓦斯大。

（6）煤层埋藏深度。

煤层埋藏深度的增加不仅会因地应力增高而使煤层和围岩的透气性降低，而且瓦斯向地表运移的距离也增大，这两者的变化均朝着有利于封存瓦斯而不利于放散瓦斯方向发展。

研究表明：当深度不大时，煤层瓦斯含量随埋深的增大基本上呈线性规律增加；当埋深达一定值后，煤层瓦斯含量将会趋于常量。



1.1.4 瓦斯突出的危害

瓦斯隧道施工时,可能发生 7 种灾害:

(1) 煤与瓦斯突出——在地应力和瓦斯压力的共同作用下,很短的时间中破碎的煤、岩和瓦斯从洞壁突然抛出,伴有猛烈的声响和巨大的动能,同时释放出大量的瓦斯。有时伴随瓦斯爆炸,造成二次破坏。“突出”事故的伤亡和损失一般都是很惨重的。

(2) 煤突然倾出——在重力作用下松软的煤层突然坍下,同时有大量瓦斯释放,坍下的煤以煤块形式堆积。

(3) 煤突然压出——一部分煤在构造应力或放炮震动影响下,整体抛出,但位移不大,压出的煤或呈小块状,或呈有大量裂隙的大块状。

(4) 岩石与瓦斯突出——原因与煤与瓦斯突出相似,有时还加上掘进放炮的振动作用。大多数发生在破碎的砂岩中,放炮时,发生岩石破坏、抛出的现象,在抛出的砂岩岩块中含有大量的砂粒和粉尘,洞壁上形成空洞(不一定与爆破洞穴同一位置),与此同时,洞内瓦斯大量增加。

(5) 瓦斯爆炸——达到爆炸浓度的瓦斯(一般为 5%~16%)与火源接触(一般需要 512℃ 以上),并且坑道内有氧气存在(含量 12%以上),就会发生猛烈爆炸,有时会造成大量伤亡。

(6) 煤尘爆炸——当煤质中挥发物占总可燃物(固定炭加挥发物)10%以上,且形成的小颗粒煤尘悬浮在空气中,当空气中煤尘含量较多(30 g/m^3 以上),遇 700℃ 以上的火源,即会发生煤尘爆炸。煤尘爆炸的后果比瓦斯爆炸更严重,因为煤层爆炸会产生大量一氧化碳(CO)使人中毒,很多人不是炸死而是被毒死。

(7) 坍塌——煤系地层除少数外,大多数强度很低,尤其是煤中的软分层,用手即可捻成粉碎,所以巷道稳定性差,容易产生坍塌事故。

1.1.5 瓦斯隧道发展及瓦斯事故案例

2000 年以来,随着我国交通事业的发展,穿越含瓦斯地层修筑隧道的情况越来越多。据统计,自 1949 年至 1999 年,我国修筑了 18 座瓦斯隧道,只占全国隧道总数的 0.18%。但随着我国交通事业的发展,穿越含瓦斯地层修筑隧道的情况越来越多,高瓦斯隧道数量也在不断增加。据不完全统计,2000 年至 2009 年我国修建的瓦斯隧道已有 60 余座,其中 3 km 以上隧道 32 座,大大超过了 2000 年以前修建的瓦斯隧道总数。

瓦斯隧道施工过程中由于瓦斯监测或管理出现漏洞极易发生重大安全事故。1959 年 1 月 27 日,贵昆线岩脚寨铁路隧道在下导坑掘进距洞口 242 m 处,火雷管点火及电灯接线引起二次瓦斯爆炸,并形成坍方,共死 34 人,伤 65 人;同年 6 月 26 日,电闸拉火又引起瓦斯爆炸,坑道坍方 7 处。从 1 月 27 日到 6 月 26 日半年中,共发生瓦斯爆炸 6 次,由于处置不当,死伤惨重(总计死伤 220 人)。达成铁路炮台山隧道在 1994 年 4 月 3 日平导掘进到距洞口 808 m 处,灯泡爆裂引发瓦斯燃烧,死 1 人,伤 3 人。次日,汽车进洞运风管,由于汽车打火,又引起瓦斯爆炸,死 12 人。都汶高速公路董家山隧道在 2005 年 12 月上旬,隧道右洞进口掌子面发生坍方,由于该处位于背斜核部、裂隙发育、裂隙中含有煤层瓦斯,坍方又促使瓦斯大量涌出;12 月 22 日,衬砌台车上的不防爆插座打火,引起瓦斯爆炸,当场死 44 人,伤 11 人;爆炸气流充满 1 500 巷道并冲出洞口,将洞外几十吨重台车推动几十米。2015 年 2 月 24 日 13 时 20 分左右,成都市龙泉驿五洛路 1 号隧道发生瓦斯爆炸,事故已造成 3 人死亡 20 人受伤。

1.2 瓦斯突出治理的基本方法

在防治瓦斯突出预测方面，德国专家提出通过分析风流中气体监测结果来评价瓦斯突出的危险性，一是利用从风流中测得的沼气浓度在多大程度上反映沼气量变化过程，二是它能否作为确定防突措施的必要依据。为弄清瓦斯危险的局部通风掘进工作面放炮后瓦斯涌出量的变化情况，研究者对瓦斯在风流中的扩散进行了研究。试验结果为，利用在后方风流中任意观测站测得的瓦斯浓度变化，就能定出爆破地点瓦斯浓度及其随时间的关系，并能对瓦斯突出危险性特征值的变化及长期变化研究趋势进行了分析评价，开发了一种测量瓦斯涌出量的装置。苏联在 20 世纪 60 年代，开始研究煤与瓦斯突出的预测预报技术，70 年代已经应用于现场。法国和德国等采用地质雷达、红外线测试和光谱分析试验等无损检测对隧道衬砌进行检查。

中铁隧道集团邵俊涛，在云台山瓦斯隧道中用平导第一次揭煤，按先进行瓦斯预测，然后进行爆破设计，揭煤前后按安全作业进行管理的程序，由于措施得力，在云台山隧道揭煤 22 次，次次安全揭开，没发生一次瓦斯事故，达到了预期目的，为瓦斯隧道揭煤及安全事故管理提供了经验。

中南大学赵志飞对控制公路瓦斯隧道安全施工的技术——超前预报技术、瓦斯实时监测技术及防突出技术、通风技术等进行了综合研究，并通过 Fluent 仿真模拟研究瓦斯隧道的通风及瓦斯分布规律，最终达到该类隧道安全施工的目的。

目前，突出机理研究以瓦斯主导作用假说、地压主导作用假说、化学本质假说、综合假说为主，总体而言尚停留在定性解释和近似定量计算阶段。而研究和实践表明，突出是可以预测的，突出区域预测的主要任务是确定矿井、煤层和煤层区域的突出危险性，其目的和意义在于准确划分出突出危险区和无突出危险区，变被动为主动，提高突出灾害防治的针对性和有效性，为矿井瓦斯治理提供科学依据。

王刚等在《瓦斯含量在突出过程中的作用分析》中研究了瓦斯压力和含量的关系，他们认为瓦斯含量对突出的影响比压力更大，采用瓦斯含量指标预测突出更加可靠，研究了发生突出时的能量条件，计算出了不同煤体普氏系数 f 和地应力条件下突出时的临界瓦斯含量。他们用可压缩流体力学的观点分析了突出机理，采用多相连续介质力学中的应力分析法建立了瓦斯压力临界值的理论计算式，探索了不同煤体结构组合下突出发生的临界瓦斯压力计算方法，认为临界瓦斯压力与软煤所占比例关系有较好的规律性。《防治煤与瓦斯突出规定》提出根据试验考察确定瓦斯压力或瓦斯含量指标临界值，在未确定前暂将煤层瓦斯压力小于 0.74 MPa 或瓦斯含量小于 $8\text{ m}^3/\text{t}$ 的区域划分为无突出危险区，将其余区域划分突出危险区。

1.3 隧道瓦斯爆炸及预防

1.3.1 瓦斯爆炸的概念及三要素

（1）瓦斯爆炸的概念。

瓦斯是一种能够燃烧和爆炸的气体，瓦斯爆炸是空气中的氧气与瓦斯进行剧烈氧化反应的结果。具体反应式为：



从上式看出：瓦斯在高温火源作用下，与氧气发生化学反应，生成的二氧化碳和水蒸气迅速膨胀，形成高温、高压，并以极高的速度向外冲出，这就是瓦斯爆炸。

(2) 瓦斯爆炸三要素。

瓦斯爆炸必须具备三个基本条件（图 1-4），称为瓦斯爆炸三要素。

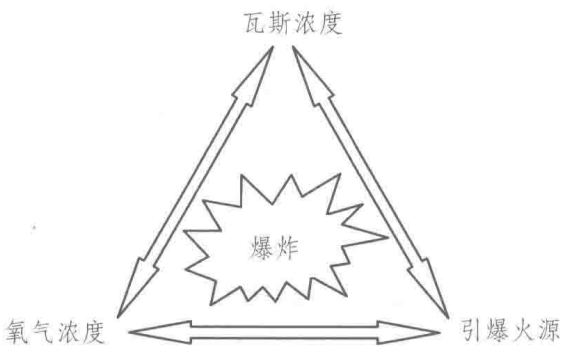


图 1-4 瓦斯爆炸三要素

① 一定的瓦斯浓度。

瓦斯爆炸具有一定的浓度范围，只有在这个浓度范围内，瓦斯才能够爆炸，这个范围称为瓦斯爆炸的界限。最低爆炸浓度叫爆炸下限，最高爆炸浓度叫爆炸上限，在新鲜空气中，瓦斯爆炸的界限为 5% ~ 16%。

当瓦斯浓度低于 5% 时，由于参加化学反应的瓦斯较少，不能形成热量积聚，因此不能爆炸，只能燃烧。当瓦斯浓度达到 5% 时（爆炸下限），瓦斯就能爆炸，随着瓦斯浓度的升高，爆炸威力逐渐增强。当瓦斯浓度为 9.5% 时，因为空气中的全部瓦斯和氧气都能参加反应，爆炸的威力最强，随着瓦斯浓度的升高，爆炸威力逐渐减弱。当瓦斯浓度高于 16% 时（爆炸上限），由于空气中氧气不足，满足不了氧化反应的全部需要，只有部分瓦斯和氧气发生反应，生成的热量被周围介质吸收而降温，不能发生爆炸。

② 一定的引火温度。

点燃瓦斯所需的最低温度称为引火温度，一般认为瓦斯的引火温度是 650 ~ 750℃。明火、电气火花、炽热的金属表面、吸烟、爆破甚至撞击和摩擦产生的火花都足以引燃瓦斯。

③ 充足的氧气含量。

瓦斯爆炸界限随着混合气体中氧气浓度的降低而缩小，氧气浓度降低时，瓦斯爆炸下限缓缓升高，而瓦斯爆炸上限迅速降低，当氧气浓度低于 12% 时，混合气体中的瓦斯就失去了爆炸性，遇火也不会爆炸。

1.3.2 瓦斯爆炸原因分析

从瓦斯爆炸三要素可知，瓦斯隧道内瓦斯爆炸的必要条件是：瓦斯浓度处于爆炸范围内（5% ~ 16%），氧气浓度超过失爆氧浓度（12%），引火源温度高于瓦斯引火温度（650 ~ 750℃）。在隧道施工中，当氧含量低于 12% 时，短时间内就能导致人窒息死亡，因此隧道施工中规定工作地点氧气含量不低于 20%。瓦斯隧道环境是满足氧气浓度要素的，只要同时具备瓦斯浓度和引爆火源两大要素就会发生瓦斯爆炸事故。

(1) 瓦斯积聚。

瓦斯积聚是隧道内体积大于 0.5 m³ 的空间内积聚瓦斯浓度达到或超过 2% 的现象，瓦斯积聚是造成瓦斯爆炸的根源。

瓦斯积聚的原因很多，主要有：

- ① 通风机停止运转。通风机管理混乱，无计划停电、停风，停风时间越长瓦斯积聚量越大。
- ② 通风管断开或漏风严重。施工人员不爱护通风设备，将通风管断开、压扁、刮坏等，而通风人员不能及时发现和进行维护、修补，造成开挖工作面冲淡瓦斯的通风量不足而导致瓦斯积聚。
- ③ 通风机出现循环风。由于通风机安装位置不符合要求，通风机吸入的风量为循环风，致使瓦斯反复回到开挖工作面，造成瓦斯积聚超限。
- ④ 通风系统不合理。整体通风方案存在缺陷，开挖面风量不足，涌出的瓦斯不能稀释到安全浓度，造成瓦斯积聚超限。
- ⑤ 瓦斯涌出异常。断层、褶曲、地质破碎带等地带（图 1-5）是瓦斯的富集区域，超前钻探或放炮后，瓦斯涌出可能会突然增大，局部超挖的地点也会造成局部瓦斯积聚。

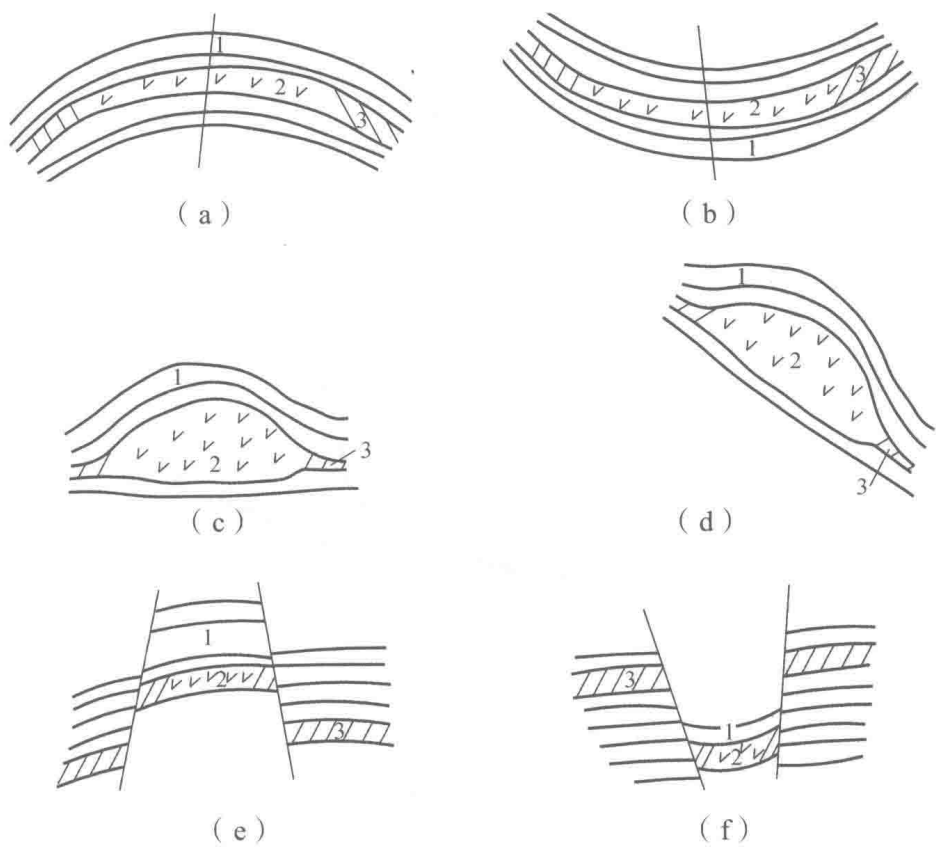


图 1-5 几种常见瓦斯富集构造

1—不透气岩层；2—瓦斯富集部位；3—煤层

(2) 引爆火源。

洞内引爆瓦斯的火源主要有以下几种：

- ① 明火：火柴明火、香烟明火、电气焊明火、喷灯明火、火灾明火等，都可能引燃瓦斯。
- ② 炮火：使用不合格炸药、炮孔封泥不足或不严、用可燃物做封炮眼填料等，爆破产生的火焰与炽热气体和微粒都可引燃瓦斯。



③ 冲击、摩擦火源：如金属器具冲击出火花；坚硬岩石撞击出火花；岩石与岩石、岩石与金属、金属与金属等之间的强力撞击与摩擦都有可能引燃瓦斯。

④ 电火花、电弧：设备的隔爆性能丧失或带电作业、照明电灯泡破碎时、电焊作业、电缆与电路短路、蓄电池机车控制器防爆性能失效以及杂散电流等都能产生足以引燃瓦斯的电火花与电弧。

⑤ 静电火花：高电阻物体或处于电绝缘状态的物体在互相紧密接触后分离或摩擦时，产生的静电也可能引燃瓦斯。

（3）管理因素。

瓦斯爆炸事故的发生，主要是由于认识上不到位和管理上存在缺陷造成的。思想麻痹、管理松懈、违章指挥、违章作业、违犯劳动纪律、作业前后不检查瓦斯浓度或“漏检”等是发生瓦斯事故的重要因素。

1.3.3 瓦斯爆炸的预防

（1）防止瓦斯积聚与超限。

通风异常与瓦斯异常是造成瓦斯积聚的根本原因。防止瓦斯积聚的措施是避免这些异常的发生，或者一旦出现异常，必须及时采取措施，在未造成事故或灾害之前，使其恢复正常；如果经处理仍不能恢复正常，应将其控制在局部地点使异常局部化，并在异常区采取措施杜绝一切可能产生的火源，确保安全。防止瓦斯积聚与超限的措施有：

① 加强通风。隧道通风工作是防止瓦斯积聚最有效也是最基本的措施。按照相关要求建立和完善合理的、最佳的隧道通风系统，加强通风管理，保证隧道有足够的新鲜空气，把掌子面以及局部积聚的瓦斯冲淡到规范规定的浓度以下并及时排出。

② 加强检查。隧道内瓦斯浓度的检查是发现事故隐患的眼睛，也是采取防范和处理措施的依据。准确掌握隧道内瓦斯浓度的变化，是防止瓦斯爆炸的基本手段之一。所以，隧道必须建立瓦斯气体的检查制度，严格按照技术交底规定的次数检查瓦斯，严禁空班漏检。

③ 局部瓦斯积聚的处理。及时处理局部积聚的瓦斯，是预防瓦斯燃烧和爆炸的主要措施之一，也是瓦斯管理工作的重要内容。严格执行相关规定中有关瓦斯浓度的规定和瓦斯超限时必须采取的安全措施，及时处理瓦斯超限和局部瓦斯积聚。

（2）防止瓦斯引爆的措施。

火源是瓦斯燃烧和爆炸的必要条件之一，所以在隧道内杜绝火源，是防止瓦斯引燃和爆炸的关键。防止瓦斯引燃的原则是禁止一切非生产火源，对生产中可能发生的火源严格管理和控制。

① 严格明火管理。严格洞口检查制度，严禁任何人携带烟草及引火物进洞；隧道内禁止吸烟和使用明火。照明要使用安全矿灯，矿灯严禁拆开。隧道内需要进行电焊、气焊时，应制定安全措施。

② 防止电火花。洞内机械和电气设备及供电网路要符合相关要求，对电气设备的防爆性能定期检查，不符合要求的及时更换和修理。所有电缆接头不准有“鸡爪子”“羊尾巴”和明接头。

③ 防止爆破火焰。严格炸药、爆破管理，严禁使用产生火焰的爆破器材和爆破工艺。爆破作业必须选用煤矿许用炸药和煤矿许用电雷管。炮眼要用黄泥装填满，推广使用水炮泥。严格执行“一炮三检”制度等。

④ 防止摩擦火花。装渣作业时要采用洒水措施，防止火花产生。