

# 现代岩石破碎技术

陶在朴 编译



煤炭工业出版社

# 现代岩石破碎技术

陶在朴 编译

煤炭工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了现代较先进的破岩技术,如等离子体、电子束、激光、微波、热熔、射弹冲击和热力综合等。每种技术,既有实验室或现场的实验情况说明,又有巷道掘进、隧道开凿等方面的应用效果评价。在介绍各种破岩技术的同时,提出了存在的问题,并展望了未来发展的趋向。本书可供煤炭、冶金等系统有关技术人员阅读参考。

责任编辑:伊 烈

## 现代岩石破碎技术

陶在朴 编译

\*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平门北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张4<sup>1</sup>/<sub>2</sub>

字数85千字 印数1—2,660

1985年7月第1版 1985年7月第1次印刷

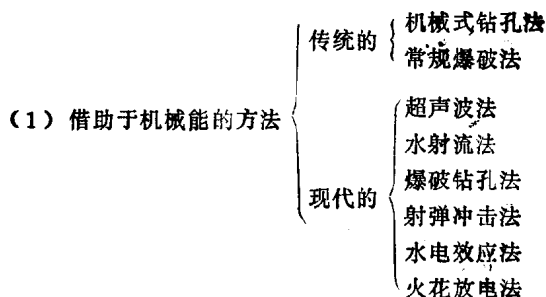
书号15035·2735 定价0.75元

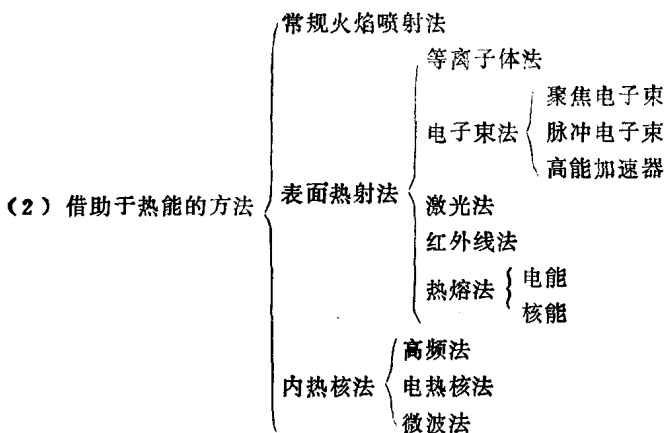
# 前 言

由于现代科学技术（尤其是两极技术与高能技术）的迅速发展，地下工程的开凿工艺出现了根本改革的趋势。新工艺构成的研究工作，在发达国家已引起了足够的重视。在这种情况下，许多人在追踪岩石破碎技术发展的各种新信息，预测各种发展的可能，以便为新技术的决策提供依据。

岩石破碎是指岩石从岩体上分离的一个过程。不论这个过程的起因如何，从力的观点来看，是由于岩石内部的应力达到了它的强度极限；从能量的观点来看，是因为岩石接受的能量超过了形成新裂隙表面所必须的能量。

一般地说，岩石破碎方法可以分为：





(3) 混合方法。以上两种方法的混合使用。

决策一种技术的发展与否，是一个非常复杂的问题，因为它涉及到一系列互相约束因子的系统行为。尽管如此，根据大量的预测研究，传统方法在未来的破岩技术构成中的比重将趋于减小，而新兴的各种高能手段（如等离子体、激光、电子束等）可能完成中间试验，而逐步投入现场实验。

根据开采强化指标的分析，地下工程的推进速度  $R$  可表示为：

$$R = 3600 \frac{\rho}{S}$$

式中  $R$ ——推进速度，米/时；

$\rho$ ——工作面所接受的破碎功率密度，百万瓦/米<sup>2</sup>；

$S$ ——破碎岩石的比能，百万焦耳/米<sup>3</sup>；

3600——每小时的秒数。

由此可见，开掘强度的提高，依赖于工作面破碎功率密度的增加和破岩比能的减少。据统计分析，工作面实际功率

密度：普通的钻爆法为 $1\sim 3$ 千瓦/米<sup>2</sup>；电子束法为 $10^{10}$ 千瓦/米<sup>2</sup>；等离子为 $10^{11}$ 千瓦/米<sup>2</sup>；而激光法为 $10^{12}$ 千瓦/米<sup>2</sup>。由此可见，三种高能手段的功率密度分别是钻爆法的10个、11个和12个数量级，相差悬殊。

虽然高能手段的功率密度与钻爆法差十几个数量级，然而，高能手段的开挖速度并不比钻爆法高十几个数量级，因为前者的破岩比能往往是后者的几千倍到几十万倍。

限制传统方法发展还有其他的因素，比如作业的循环性、工业卫生和爆破震动的危害等。

为了广泛了解现代岩石破碎技术的发展，本书将分别介绍几项具有代表意义的破岩新技术，供我国煤炭工业以及其他系统的工程技术人员学习参考。

# 目 录

## 前言

<b>1. 等离子体破岩</b> .....	1
1.1 等离子体的实质 .....	1
1.2 岩石热力破碎的基本理论 .....	4
1.3 等离子体破岩设备及实验情况 .....	8
1.4 工作气体及电极 .....	13
1.4.1 工作气体 .....	13
1.4.2 电极 .....	14
1.5 电弧等离子体的形式 .....	15
1.6 等离子体在岩石破碎中应用的几种可能性 .....	16
1.6.1 二次破碎 .....	16
1.6.2 钻孔 .....	17
1.6.3 切割 .....	19
1.6.4 全断面切割掘进 .....	25
<b>2. 电子束破岩</b> .....	29
2.1 电子束破岩的能量耦合 .....	29
2.2 电子束的产生及聚焦装置 .....	32
2.2.1 电子束的产生 .....	32
2.2.2 电子束的聚焦 .....	35
2.2.3 电子束穿过物质时二者的相互作用 .....	36
2.3 电子束破岩设备 .....	46
2.4 脉冲电子束破岩 .....	51
2.5 理想电子加速器掘进机设计方案 .....	53
<b>3. 激光破岩</b> .....	56
3.1 一般情况 .....	56

3.2	激光和激光器的基本原理 .....	58
3.3	CO <sub>2</sub> 激光器 .....	60
3.4	激光破岩的一般进展 .....	61
3.5	激光切割 .....	67
3.6	激光切割技术在巷道掘进中应用的可能性 .....	73
<b>4.</b>	<b>微波破岩 .....</b>	<b>75</b>
4.1	一般情况 .....	75
4.2	微波加热的原理 .....	77
4.3	微波破岩的试验成果 .....	79
4.3.1	微波破岩设备 .....	80
4.3.2	破岩原理 .....	81
4.3.3	微波照射距离与表面温度的关系 .....	82
4.3.4	微波功率与岩石内部升温的关系 .....	82
4.3.5	微波的渗透深度 .....	83
4.3.6	喇叭口规格和形状 .....	83
4.3.7	微波功率及岩石含水率对破岩效率的影响 .....	86
4.3.8	存在问题 .....	86
<b>5.</b>	<b>岩石热熔技术 .....</b>	<b>88</b>
5.1	一般情况 .....	88
5.2	岩石熔化机理 .....	89
5.3	熔岩钻孔器的基本类型 .....	93
5.3.1	熔凝式 .....	93
5.3.2	排除式 .....	94
5.3.3	带芯熔凝式 .....	94
5.3.4	带芯排除式 .....	94
5.4	结论 .....	96
<b>6.</b>	<b>热力综合破岩 .....</b>	<b>97</b>
6.1	一般情况 .....	97
6.2	热力-水力破岩原理 .....	98



6.3	岩石线状加热 .....	100
6.4	热力-水力破岩实验系统 .....	101
6.5	现场实验成果 .....	107
6.6	结 论 .....	111
<b>7.</b>	<b>射弹冲击破碎法——REAM</b> .....	<b>112</b>
7.1	一般情况 .....	112
7.2	冲击能与破岩量 .....	113
7.3	射弹与岩碴特征 .....	114
7.4	巷道掘进试验 .....	116
7.5	结 论 .....	120

# 1. 等离子体破岩

## 1.1 等离子体的实质

物质随着温度的变化，有固、液、气三种状态。如果在高温条件下，将会出现第四种状态，即等离子态。物质的第四种状态具有许多与其他三态不同的特点，引起了人们的注意。

众所周知，各种元素的原子都有一个很小的带阳电的核，核外有许多层电子绕其运动，最外层的电子是价电子。在一般情况下，价电子和其他电子一样，都运动在一定的轨道上，但在某些条件下，如当原子在电场中被高速运动的粒子（如电子）碰撞或者对原子进行加热，使其温度足够高，此时原子所获得的能量，往往足以使价电子脱离运动轨道，成为自由电子。这个过程一般称为原子的电离。于是，原来为中性的原子被电离成带正电的正离子和带负电的负离子。这两种对立的离子共存于一个统一体中。如果气体正负离子数目相等，总体为中性，则称为等离子体。

气体的电离可以因碰撞引起，也可以因受热引起。前者称碰撞电离，后者称热电离。除此之外，还有光致电离、微波电离、射线电离等。但在工业上经常使用的只是碰撞电离和热电离两种。

实际上，等离子体在日常生活中并不罕见，例如日光灯、霓虹灯就是由碰撞电离而形成的等离子体。这种等离子

体温度不高，可称为冷等离子体。闪电、压缩电弧等属于热电离，故称热等离子体。除了放电方法获得等离子体外，工业上还可以用化学放热的方法获得等离子体。例如磁流体发电就是利用燃烧反应加上某些添加剂（如钾盐）获得热等离子体。

等离子体可按温度的高低分为两大类：温度为几万度的等离子体称低温等离子体；温度在几百万度以上的等离子体称高温等离子体（如热核反应）。低温等离子体又分为冷等离子体和热等离子体。岩石破碎应用的是热等离子体，下面要研究的电弧等离子体也属于低温等离子体。

自由电弧同雷雨中的闪电，开关启闭的火花等一样，都是气体放电现象。十九世纪初，人们可以人为的制造电弧用来焊接、冶金或整流，近年来人们开始用于岩石破碎。

普通电弧发生的原理是十分简单的。如图 1 所示，在直流电源  $S$  的线路中，当开关  $K$  关闭时，由于两个电极间电压的作用，在正负极的间隙中将产生一个强电场。当间隙小到一定程度时，在电场的强力作用下，就将阴极的电子拉出电极。这种逸出的电子将飞向阳极，并在途中被电场所加速，被加速了的电子又以很高的速度撞击气体中的其他分子，使气体原子发生电离，从而气体分子中又将飞出更多的电子，飞出的电子在电场中又被加速去撞击新的分子，如此发展便形成所谓的“电子雪崩”。在气体击穿，电子碰撞而电离的过程中，伴随着很强的光和热。由于热的作用，气体进一步被电离，于是在电极间隙中产生了电弧，使本来不导电的气体，由于电弧中离子的存在而变成了导体。这就是手工电弧焊所使用的非约束自由电弧的形成原理。自由电弧因为弧柱较粗，温度较低（约  $5000\sim 6000K$ ），气体电离度较低，热

量分散，不仅不适应岩石破碎，而且用来切割金属也常嫌吹力不足。

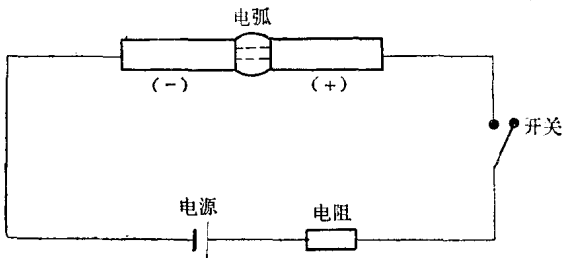


图 1 普通电弧发生原理

$K$ —开关， $R$ —电阻， $S$ —直流电源

有什么办法改善自由电弧的性能呢？人们经过实践发现，如果在自由电弧外面套上水冷喷嘴，喷嘴里通以介质气体（如氩、氮等），电弧情况会有很大变化。此时电弧直径收缩变细，电弧温度剧烈升高（可达 $20000K$ ），气体完全电离形成等离子电弧或压缩电弧（如图 2 所示）。

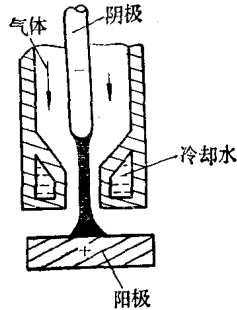


图 2 电弧等离子体产生示意图

压缩电弧具有以下特点：

(1) 温度高。等离子体电弧的温度最高可达 $50000K$ ，这是一般方法所无法实现的。例如，乙炔火焰高温核心的温度仅 $3200K$ ；手工电弧只有 $5000\sim 6000K$ ；氩弧焊也只有 $9000\sim 10000K$ 。由于压缩电弧具有这种高温特性，所以常在工业中作为一种特殊的热源。

4

(2) 弧柱细、能量集中。压缩电弧可以大大减少作业的热影响区和增强切割的锋利程度。

(3) 稳定性好。

由于上述优点，电弧等离子技术首先在金属切割中得到了应用，大约在60年代中期，许多国家逐渐将等离子金属切割的技术引入岩石破碎。

## 1.2 岩石热力破碎的基本理论

岩石在高温熔流下发生破碎的机理是一个比较复杂有待深入研究的热动力效应问题。对一种最简单的热力情况可作如下分析，如果岩石在四面受约束的条件下加热，则岩石的热应力为：

$$\sigma = \alpha ET \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——热应力，公斤力/厘米<sup>2</sup>；

$\alpha$ ——热膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

$E$ ——弹性模数，公斤力/厘米<sup>2</sup>；

$T$ ——岩石的温升， $^{\circ}\text{C}$ 。

一般来说，岩石的热膨胀系数远较金属为大，例如一般的坚硬岩石为  $8.5 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，花岗岩为  $6.7 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。坚硬岩石的弹性模数通常在  $(6 \sim 10) \times 10^5$  公斤/厘米<sup>2</sup> 之间。

可见，岩石的温度每上升  $1^{\circ}\text{C}$ ，在四周受约束的条件下，大约能产生  $6 \sim 100$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 的热应力。这与钢材平均温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  所产生的  $22$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 的热应力比较，差距很大。然而事实上，岩石受热过程中有热传导现象，即伴随热应力的发生，岩石在不断地变形，因而约束在不断地放松与解除。所以不可能产生这样高的热应力。最初研究岩石热力破碎时，是以稳定球壁导热理论为基础的。即认为热源

底部的岩石受热后产生了同心的等温球面（所谓温度场），靠近热源的岩石温度较高，随距离的增加，等温面温度降低。根据这种理论，可以求出到热源距离不同处的岩石温度。可是这种理论，忽略了岩石温度升高时吸收热量这个事实，并假定每处岩石的温度和加热时间无关，这与实际有很大出入。后来，人们开始用非稳定导热的理论作为岩石热力破碎的理论基础。根据这种理论，岩石距热源越近，温度越高，随着距离的加大，温度逐渐降低，其降低的速度取决于热源的热流密度，以及岩石的导热系数、比热、容重等。随着加热时间的增加，岩石中的温度场不断变化。任一瞬间岩石中的温度，都可以用同心球状的等温面分布加以描述。一般来说，如果加热时间为  $t$ ，与热源中心的距离为  $r$  的点，其温度可用  $T(t, r)$  表示，据卡士劳和金格尔研究

$$T = \frac{2F(Kt)^{1/2}}{K} \operatorname{ierfc} \frac{r}{(2Kt)^{1/2}} \quad (2)$$

式中  $T$ ——受热器温升， $^{\circ}\text{C}$ ；

$F$ ——热源发生的稳定热流量，瓦/米<sup>2</sup>；

$t$ ——加热时间，秒；

$K$ ——热扩散系数，米<sup>2</sup>/秒；

$$K = k/\rho c$$

$k$ ——岩石的导热系数，瓦/米· $^{\circ}\text{C}$ ；

$\rho$ ——岩石的密度，公斤/米<sup>3</sup>；

$c$ ——岩石的比热，焦耳/公斤· $^{\circ}\text{C}$ ；

$r$ ——岩石距离加热面的法线距离，米；

$\operatorname{ierfc}$ ——误差函数积分（可查数学手册）。

岩石热应力可根据温升进行相应计算。计算热应力有如下假设，岩石是半无限、均质的、各向同性体，并认为热源

下的岩石除与表面垂直的  $r$  方向外，完全受到约束，或者说表面的应力、应变为零，于是根据相应的热弹性理论，可求出水平方向上的热应力为：

$$\sigma_r = \sigma_y = E\alpha T / (1 - \mu) \quad (3)$$

式中  $E$ ——岩石的弹性模数，百万牛顿/米<sup>2</sup>；

$\alpha$ ——岩石的热膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

$T$ ——由 (3) 式给定的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\mu$ ——岩石的波桑比。

如果热应力足以使岩石在熔化前发生剥落，那么剥落以后的岩石表面将按前一过程重复发生相同的热应力。不过需要指出，此时新的表面温度是不均匀的，随着岩石的剥落，每个新表面下的温度分布将取得一系列极限值。如果假定每次剥落量为无限小，则可计算出这种极限温度分布曲线。卡士劳和金格尔已给出了这种稳定状态下的温度分布：

$$T = T_s \exp(-Ur/K), \quad ^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

式中  $T_s$ ——发生连续剥落时岩石的表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$U$ ——岩石剥落的速度，米/秒；

$r$ ——法线距离，米；

$K$ ——岩石的热扩散系数，米<sup>2</sup>/秒。

据前各式可得到岩石的热应力和温度分布图 (图 3)。图中各曲线的绘制依据是： $k = 6$  瓦/米 $\cdot^{\circ}\text{C}$ ； $\rho = 2650$  公斤/米<sup>3</sup>； $c = 820$  焦耳/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ ； $K = 2.77 \times 10^{-6}$ ，米<sup>2</sup>/秒； $F = 10^7$ ，瓦/米<sup>2</sup>； $r(s) = 0.15$  厘米。

通常可以认为各类岩石的密度和比热大体相同，而岩石的导热系数可以相差三、四倍以上。于是，岩石受热后温度梯度不一致。导热系数大，可使岩石迅速受热，这是有利的一面；但是导热系数过大，温差将减少，因而破碎效果可能下降。

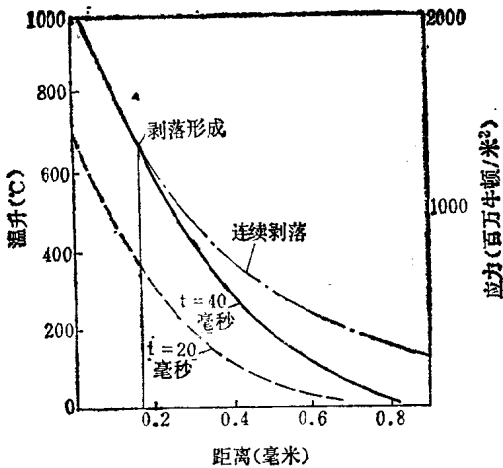


图 3 岩石的热应力和温度分布图

除此之外，岩石的构成是一个对破岩效果有决定性影响的因素。当岩石由不同膨胀系数的矿物构成时，加热后因颗粒伸缩不一致而迅速弱化，这将有利于破碎。尤其是石英颗粒，当温度达到某种界限时，会引起晶型改变。比如温度  $575^{\circ}\text{C}$  时， $\beta$  石英转变为  $\alpha$  石英，体积将增加  $2.4\%$ ，从而引起层间应力，致使岩石迅速弱化。

应该指出，岩石的剥落过程实际上是一种热力冲击过程，精密的求解应该用动力学理论。我们知道，热力冲击所发生的冲击波将以每秒几千米的速度传播，当冲击波在介质阻抗下发生变化时，往往产生相反方向的波反射。为什么用铁锤敲击一个岩柱，其冲击波的压应力并没有超过岩石的抗压强度极限，而岩石会发生端面的屈服剥落呢？这是因为冲击波在端面发生反射，结果产生了与压缩波相反方向的拉伸波。而岩石的抗拉强度是很低的，结果端面便发生了



## 剥落。

事实上，影响岩石热力破碎的因素很多，如岩石的结构及其自然状态也是一个不可忽视的因素。实践已经证明，含石英、钾长石、白云石等矿物的岩石，热弹性好，容易剥落。而含钠长石、钙长石、铁镁矿物、方解石和云母等矿物的岩石，热弹性不好，不易剥落，因此，这类岩石受热后，容易产生热熔现象而使破岩率减低。实践还证明，当岩层出现构造带和裂缝、裂隙时，因为在这些地方容易形成等温面，减少了岩石内部的温度梯度，故破岩效果将明显降低。试验说明，在一般情况下，热力破碎的能量阈值（极限值）为 $10^5 \sim 10^6$ 千卡/米<sup>2</sup>，温度梯度的阈值为 $10^5 \sim 10^7$ °C/米。

### 1.3 等离子体破岩设备及实验情况

等离子体破岩设备包括电源、控制柜、水路系统、气路系统及喷炬等部分(图4)。

(1) 电源。由于等离子弧的直径很小，电流密度高，所以单位长度上的电压降加大，从而要求电源的工作电压、空载电压增高，（工作电压在80伏以上，空载电压一般在150~400伏）。为保证等离子弧的稳定燃烧，至今用作破岩的等离子电源都是直流电源，国内试验一般采用直流弧焊机串联或自行设计。

(2) 电气控制箱。电气控制箱包括：程序控制接触器、高频振荡器、电磁气阀等。

冷却水用来冷却喷炬，操作时必须先通冷却水而后才能进行切割，否则喷嘴将烧毁。

高频振荡器是用来引弧的，高频火花在电极和喷嘴之间发生。在实际工作中，由于破岩工具分布电容的影响，往往