

基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数研究及应用

陈俊桦^{1,2}, 张家生^{1,2}, 李新平³

(1.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2.中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075;
3.武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 工程中预裂爆破参数确定方法通常为经验类比法。该方法以经验公式为基础, 存在理论依据较为缺乏等缺点。为此, 引入岩石爆破损伤、应力波和爆生气体共同作用等理论, 在考虑岩石初始损伤等影响因素的基础上, 提出预裂爆破参数计算式。基于提出的理论方法, 在现场开展了预裂爆破试验。针对爆破试验, 比较了采用经验类公式和提出的理论计算式得到的线装药密度, 并对爆破效果进行了分析。试验结果表明, 预裂爆破效果良好。考虑爆破损伤效应的爆破参数确定方法比经验类比法合理。最后, 在提出的理论计算方法基础上, 给出了实际工程中确定预裂爆破参数的建议。

关 键 词: 爆破; 损伤力学; 应力波; 爆轰产物; 岩石初始损伤

中图分类号: TD 235; TV 542

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 05-1441-10

Study of presplitting blasting parameters and its application based on rock blasting-induced damage theory

CHEN Jun-hua^{1,2}, ZHANG Jia-sheng^{1,2}, LI Xin-ping³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
3. Hubei Key Laboratory of Road-Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: Generally, presplitting blasting parameters are obtained by the engineering analogy method, which is according to the empirical formulations. However, this method lacks theoretical basis. Therefore, it is necessary to propose new formulations on the presplitting blasting parameters in consideration of some important blasting influence factors such as rock initial damage. Two theories of rock blasting-induced damage and the interaction between stress wave and detonation gas are introduced. For practical project, the presplitting blasting tests are conducted to obtain blasting parameters in field by the present method. The results of the linear charge density calculated both by some representative empirical formulations and the proposed theoretical formulations are compared, and then the effects of presplitting blasting tests are analyzed. Experimental results show that the effects of presplitting blasting tests perform well, and the presplitting blasting parameters by the developed method is more rational than that obtained with the engineering analogy one. Finally, some useful suggestions are given to determine presplitting blasting parameters in practical project based on the theoretical method.

Keywords: blasting; damage mechanics; stress wave; detonation product; initial damage of rock

1 引 言

因具有超挖量少、减轻主爆区对围岩扰动等优点, 预裂爆破技术被广泛应用于露天和地下爆破开挖工程。由于影响爆破的因素十分复杂, 虽然国内外不少学者对预裂爆破形成预裂缝(面)的机制进行了研究, 但尚未达成共识。因此, 预裂爆破参数

确定往往通过工程经验类比获得。这种方法一般称作经验类比法。通过经验总结获得的公式或规律一般受归纳条件的限制, 故经验类比法的适用范围有限。此外, 由于较为缺乏理论依据, 采用该方法确定爆破参数一般需进行大量的试验, 不利于施工开展。

目前, 岩石爆破理论基础主要有弹塑性理论、断裂力学理论和损伤力学理论等^[1-7]。这些理论是爆

破参数设计的理论基础。其中,损伤力学是目前固体力学领域研究的热点。不少学者采用损伤力学研究岩石的力学行为,在此基础上确定损伤条件下的爆破参数^[3-5]。这些学者认为,岩石为内部含有裂纹、空隙等缺陷的损伤材料。基于损伤效应确定的爆破参数比采用经验类比法确定的合理。目前,基于爆破损伤的爆破参数研究一般集中在光面爆破。如戴俊等^[4]提出考虑损伤效应的光面爆破参数计算式。针对深部岩体巷道光面爆破开挖,付玉华等^[5]通过引入爆破损伤模型提出了确定爆破参数的方法。相对来说,利用损伤理论确定预裂爆破参数的相关研究较少。此外,爆破参数研究一般只考虑爆破动力损伤影响,未考虑岩石初始损伤对爆破效果的影响。而岩石一般为初始损伤材料,且对于一些开挖工程来说,待开挖部位虽然为同一种岩石,但其完整程度或初始损伤度较为离散,这种离散性使得岩石初始损伤是爆破参数设计所需考虑的主要因素。为此,笔者尝试将既有爆破损伤理论引入到预裂爆破参数研究中,在考虑岩石初始损伤等因素的基础上得到相关爆破参数,使得确定爆破参数的方法具备一定的理论基础,且采用该方法后能达到良好的预裂爆破效果。

2 理论分析

2.1 经验类比法及其不足之处

对于预裂爆破设计,主要的爆破参数为单孔炸药量、孔距、孔深和孔径等。其中,后面的两个参数一般由开挖要求和既有钻孔设备规格来确定。由工程经验可知,岩石的可爆性与其强度相关。一般采用岩石单轴抗压强度考虑爆破岩石的难易程度^[8]。故目前经验公式一般以岩石抗压强度、孔距、孔深和孔径等为主要考虑的因素。单孔炸药量计算的经验公式为

$$Q = f(\hat{\sigma}_c, a, d, l) \quad (1)$$

式中: Q 为单孔炸药装药量 (kg); $\hat{\sigma}_c$ 为由室内试验确定的岩石单轴静抗压强度 (MPa)。试验所取岩样的完整程度高,根据损伤力学,该岩样近似为无损岩石,故 $\hat{\sigma}_c$ 也称为无损岩石的静抗压强度; a 为炮孔孔距 (m); d 为炮孔直径 (m); l 为炮孔深度 (m); f 为药量计算函数。

典型的单孔爆破炸药量计算经验公式为^[8]

$$Q = ql = 0.034(\hat{\sigma}_c / 10^6)^{0.63} a^{0.67} l \quad (2)$$

$$Q = ql = 0.367(\hat{\sigma}_c / 10^6)^{0.5} d^{0.86} l \quad (3)$$

$$Q = ql = 0.127(\hat{\sigma}_c / 10^6)^{0.5} a^{0.84} (d/2)^{0.24} l \quad (4)$$

式中: q 为炮孔内单位长度上的炸药量,即线装药密度 (kg/m)。

式 (2) ~ (4) 分别为长科院、葛洲坝工程局和武汉大学水利水电学院提出的计算预裂爆破单孔炸药量的经验公式。

孔距计算公式为^[8]

$$a = md \quad (5)$$

式中: m 为距径比,是孔距与钻孔直径的比值。按经验取值为 $m = 7 \sim 12$ 。岩石较坚硬、较完整时, m 取大值,反之取小值。

在岩石强度一定的条件下,一般通过调整孔距或者孔径以适应不同完整程度或者不同初始损伤部位的爆破开挖。由式 (2) ~ (4) 可知,孔距或者孔径变化时,单孔装药量和线装药密度也将变化。

预裂爆破一般采用不耦合装药结构。不耦合装药包括径向和轴向不耦合装药。径向、轴向不耦合装药系数分别计算如下:

$$\eta_r = d / d_c \quad (6)$$

$$\eta_l = (l - l_s) / l_c = l_c / l_c \quad (7)$$

式中: η_r 和 η_l 分别为径向、轴向装药不耦合系数; d_c 为装药直径 (m); l_c 为装药累计长度 (m); l_s 为堵塞长度 (m); l_c 为与装药段对应的炮孔长度 (m)。

由式 (2) ~ (4) 可确定单孔炸药量;由式 (5) 可确定炮孔孔距;由式 (6) ~ (7) 可确定孔内装药结构。这样,根据式 (2) ~ (7),并结合工程实际,可得到预裂爆破参数。一般的钻爆布置示意图见图 1。

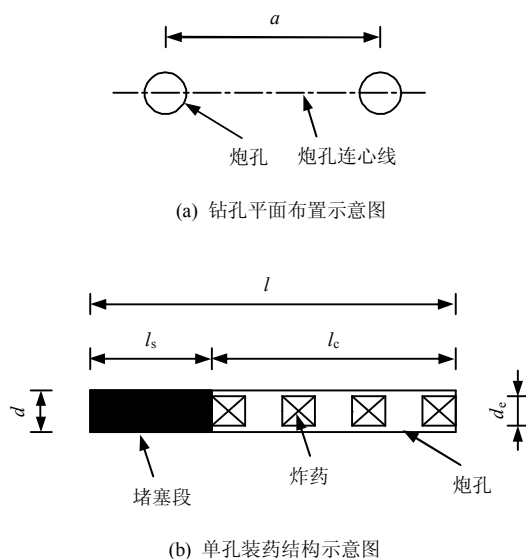


图 1 钻孔布置与装药结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of drilling and charge structure

从式(1)~(7)看出,爆破参数经验公式较为简洁和方便使用。但存在以下不足:首先,缺乏理论基础。爆破参数计算式是在数学归纳或者经验总结的基础上获得,不是在预裂爆破机制分析的基础上获得,一些参数的物理意义不明确。如预裂缝形成的主要原因在于炮孔中心连线上拉应力强度超过岩石抗拉强度。岩石受拉破坏和受压破坏的机制是不同的。经验公式只采用了抗压强度这一指标,较为片面。此外,虽然调整孔距和孔径等参数可考虑开挖部位的初始损伤或者完整程度对岩石爆破效果的影响,但这种调整方式对经验依赖性较强。其次,所需爆破试验量大。由于经验公式是在试验结果归纳总结的基础上获得,因此,考虑的影响因素越多,所需爆破试验次数也相应越多。例如,因软岩和硬岩的抗压强度不同,为获得方便工程应用的经验公式,爆破试验需分别在软岩和硬岩中开展。

2.2 基于爆破损伤理论的爆破参数研究

2.2.1 炮孔壁上爆破荷载

现有研究表明^[9],预裂缝由爆炸应力波和爆生气体共同作用产生。对于单个炮孔,孔内爆炸应力波压力和爆生气体准静态压力计算为^[8,10,11]

$$p_d = np_s \quad (8)$$

$$p_s = \begin{cases} p_0(\eta_1\eta_r^2)^{-\kappa_1}, & p_s \geq p_k \\ p_k(\eta_1\eta_r^2)^{-\kappa_2}(p_0/p_k)^{\kappa_2/\kappa_1}, & p_s < p_k \end{cases} \quad (9)$$

$$p_0 = \rho_e c_e^2 / (2\kappa_1 + 2) \quad (10)$$

式中: p_d 为炮孔壁单位面积上由爆炸应力波作用产生的峰值压力(MPa); p_s 为炮孔壁单位面积上由爆生气体准静态膨胀作用产生的峰值压力(MPa); p_0 为瞬时平均爆轰压力(MPa); κ_1 和 κ_2 分别为高、低压膨胀指数, $\kappa_1 = 2 \sim 3$, $\kappa_2 = 1.2 \sim 1.4$; ρ_e 为炸药密度(kg/m³); c_e 为炸药爆速(m/s); n 为动力增大系数, $n = 8 \sim 11$,装药不耦合系数越大, n 值越大; p_k 为临界膨胀压力, $p_k = 2 \times 10^8$ Pa^[9]; $p_s \geq p_k$ 和 $p_s < p_k$ 分别对应爆生气体高、低压膨胀到孔壁这两种情况。

2.2.2 考虑初始损伤的岩石爆破损伤理论

将岩石看作无损材料,并考虑原岩应力的影响时,无损均质岩石中单孔爆炸应力波径向应力幅值随距离衰减规律满足下式^[5,8]:

$$(\sigma_r)_{\max} = p_d(0.5d/r)^{\hat{\alpha}} + \sigma_{r0}(r) \quad (11)$$

式中: $(\sigma_r)_{\max}$ 为径向最大名义动应力(MPa); $\hat{\alpha}$ 为

无损岩石中应力波传播衰减系数, $\hat{\alpha} = 2 \pm [\hat{\mu}_d / (1 - \hat{\mu}_d)]$,“ $\pm$ ”中的“+”、“-”分别对应冲击波、非冲击波作用区。一般在冲击波区内形成塑性压碎区,在非冲击波作用区内形成裂隙区。冲击波作用区内,可取 $\hat{\alpha} \approx 3$; r 为某点与炮孔中心轴线的距离(m); $\hat{\mu}_d$ 为无损岩石的动态泊松比; $\sigma_{r0}(r)$ 为与炮孔中心距离为 r 处的径向原岩应力(MPa)。

无损均质岩石中应力波环向应力幅值随距离衰减规律满足下式^[5,8]:

$$(\sigma_{\theta})_{\max} = -p_d \hat{b}(0.5d/r)^{\hat{\alpha}} + \sigma_{\theta0}(r) \quad (12)$$

式中: $(\sigma_{\theta})_{\max}$ 为环向最大名义动应力(MPa); p_d 前符号 $\hat{b}$ 为无损岩石中的应力波侧压系数。“-”表示本文规定拉为负,压为正; $\sigma_{\theta0}(r)$ 为与炮孔中心距离为 r 处的环向原岩应力(MPa);炮孔中心连线上,当 $r > 1.5d$ 时, $\sigma_{\theta0}(r) = \bar{\sigma}_{\theta0}$, $\bar{\sigma}_{\theta0}$ 为垂直炮孔中心连线方向上的原岩平均应力(MPa)。

$\hat{b}$ 计算为^[8,10]

$$\hat{b} = \begin{cases} -1 & (\text{冲击波作用区}) \\ \hat{\mu}_d / (1 - \hat{\mu}_d) & (\text{非冲击波作用区}) \end{cases} \quad (13)$$

实际上,天然岩石一般是内部含孔隙和裂纹等缺陷的材料,即为初始损伤材料。不能直接使用式(11)~(13)描述损伤岩石中的爆炸应力波传播规律。为此,需对式(11)~(13)进行修正。

爆炸近区,应力波波长一般为数米的数量级。当岩体结构面优势特征尺寸远小于应力波波长时,一般将岩石看作各向同性损伤材料。假设损伤发展导致岩石弹性模量降低,损伤变量计算为

$$D = 1 - (E_d / \hat{E}_d) \quad (14)$$

式中: D 为损伤变量, $0 \leq D \leq 1$; E_d 为损伤动弹性模量(MPa); $\hat{E}_d$ 为无损岩石的动弹性模量(MPa)。

根据式(14),岩石初始损伤计算为

$$D_0 = 1 - (E_{d0} / \hat{E}_d) \quad (15)$$

式中: D_0 为岩石初始损伤变量,表示岩石的初始动弹性模量相对无损状态的劣化程度, $0 \leq D_0 \leq 1$; E_{d0} 为岩石的初始动弹性模量(MPa)。

弹性模量与纵波波速的关系近似计算如下^[12]:

$$E_d / E_{d0} = \rho c^2 / (\rho_0 c_0^2) \quad (16)$$

$$\hat{E}_d / E_{d0} = \hat{\rho} \hat{c}^2 / (\rho_0 c_0^2) \quad (17)$$

式中: ρ_0 和 c_0 分别为初始状态下的岩石密度(kg/m³)

和纵波波速 (m/s); ρ 和 c 分别为动力损伤条件下的岩石密度 (kg/m^3) 和纵波波速 (m/s); $\hat{\rho}$ 和 $\hat{c}$ 分别为无损条件下的岩石密度 (kg/m^3) 和纵波波速 (m/s)。非冲击波作用区内, 损伤对岩石密度影响不大, 可近似取 $\rho_0 = \rho = \hat{\rho}$ 。

随着应力波强度提高, 岩石破坏方式由脆性损伤向塑性流动转变。特别是冲击波作用区内, 岩石基本处于塑性流动状态, 可近似认为损伤作用对应力波衰减系数的影响不大, 即有如下关系:

$$\alpha_1 = \hat{\alpha} \approx 3 \quad (18)$$

式中: α_1 为考虑初始损伤的冲击波衰减系数。

对于非冲击波作用区, 由中科院武汉岩土所提出的爆炸应力波衰减系数计算公式为^[13]

$$\alpha'_2 = \lambda_1 \rho_0 c_0 + \lambda_2 \quad (19)$$

式中: α'_2 为非冲击波作用区内基于初始纵波波速考虑的应力波传播衰减系数; $\lambda_1 = -4.11 \times 10^{-8}$, $\lambda_2 = 2.92$, 均为拟合参数。

非冲击波作用区, 衰减系数取值一般为 1~2。对于大多数岩石, 由式 (19) 计算得到的衰减系数为 $\alpha'_2 \geq 2.5$ ^[13], 数值偏大, 故需对式 (19) 进行修正。

修正后的非冲击波作用区内衰减系数计算为

$$\alpha_2 = \alpha'_2 \lambda_3 \quad (20)$$

式中: λ_3 为修正系数, $\lambda_3 = 0.5 \sim 0.8$ 。一般情况下, 密度和波速越大时, λ_3 取值越小。

结合式 (15) ~ (19) 以及式 (20), 得到 α_2 和初始损伤变量 D_0 的关系如下:

$$\alpha_2 = (1 - D_0)^{0.5} \rho_0 \hat{c} \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 \quad (21)$$

由式 (18) 和式 (21), 应力波衰减系数计算为

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 & (\text{冲击波作用区}) \\ \alpha_2 & (\text{非冲击波作用区}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: α 为考虑初始损伤影响的应力波衰减系数。

损伤对岩石的动态泊松比影响不大^[14], 近似有下式成立^[8]:

$$\hat{\mu}_d = \mu_d = 0.8 \mu_s \quad (23)$$

式中: μ_d 和 μ_s 分别为损伤岩石的动、静态泊松比。

由式 (11) ~ (23), 得到初始损伤条件下的应力波传播规律为

$$(\sigma_r)_{\max} = p_d (0.5d/r)^\alpha + \sigma_{r0}(r) \quad (24)$$

$$(\sigma_\theta)_{\max} = -p_d b (0.5d/r)^\alpha + \sigma_{\theta 0}(r) \quad (25)$$

$$b = \hat{b} = \begin{cases} -1 & (\text{冲击波作用区}) \\ 0.8 \mu_s / (1 - 0.8 \mu_s) & (\text{非冲击波作用区}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: b 为损伤条件下的应力波侧压系数。

假设损伤岩石中无损材料承受荷载为有效应力且该应力随着动力损伤的增大而增大, 有效应力与名义应力的关系计算为^[15]

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} / (1 - D) \quad (27)$$

式中: σ'_{ij} 为有效应力张量分量; σ_{ij} 为名义应力张量分量。

由式 (27) 得到径向、环向最大有效应力:

$$(\sigma'_r)_{\max} = (\sigma_r)_{\max} / (1 - D) \quad (28)$$

$$(\sigma'_\theta)_{\max} = (\sigma_\theta)_{\max} / (1 - D) \quad (29)$$

式中: $(\sigma'_r)_{\max}$ 和 $(\sigma'_\theta)_{\max}$ 分别为应力波径向 (MPa)、环向最大有效应力 (MPa)。

根据损伤力学理论, 当岩石中有效应力超过无损岩石的破坏强度时, 将发生宏观破坏现象, 产生压碎区和裂隙区。单个炮孔周边形成压碎区和径向裂隙区时, 岩石中有效应力分别满足如下条件:

$$(\sigma'_r)_{\max} \geq (\sigma_r)_{\max} / (1 - D_{\lim}) = \hat{\sigma}_{\text{cd}} \quad (\text{压碎区}) \quad (30)$$

$$-(\sigma'_\theta)_{\max} \geq -(\sigma_\theta)_{\max} / (1 - D_{\lim}) = \hat{\sigma}_{\text{td}} \quad (\text{裂隙区}) \quad (31)$$

式中: $\hat{\sigma}_{\text{cd}}$ 和 $\hat{\sigma}_{\text{td}}$ 分别为无损岩石的单轴动抗压、动抗拉强度 (MPa); $D_{\lim}$ 为临界损伤变量, $D_0 < D_{\lim} \leq D$; $D \geq D_{\lim}$ 表示损伤累积导致岩石产生宏观破坏。

无损岩石单轴动、静加载破坏强度近似满足以下关系式^[10]:

$$\hat{\sigma}_{\text{cd}} = \hat{\sigma}_c (\dot{\epsilon}_c)^{m_c} \quad (32)$$

$$\hat{\sigma}_{\text{ct}} = \hat{\sigma}_t (\dot{\epsilon}_t)^{m_t} \quad (33)$$

式中: $\hat{\sigma}_t$ 为无损岩石的单轴静抗拉强度 (MPa); $\dot{\epsilon}_c$ 和 $\dot{\epsilon}_t$ 分别为单轴抗压和抗拉条件下的加载应变率 (s^{-1}); m_c 和 m_t 分别为单轴抗压和抗拉条件下的应变率参数。对于压碎区, 单轴压缩应变率和应变率参数取值为^[10]: $\dot{\epsilon}_c = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, $m_c = 0.33$ 。对于

裂隙区，岩石的动态抗拉强度随应变率 $\dot{\epsilon}_t$ 的变化较小^[10]，可近似认为 $m_t = 0$ ， $\hat{\sigma}_{ct} = \hat{\sigma}_t$ 。

式(30)和式(31)中的临界损伤变量 D_{lim} 一般由室内中高应变率动态加载试验结果测定。岩石较坚硬或脆性较显著时取小值，反之取大值。为方便工程应用，本文提出另一种估算 D_{lim} 的简单方法。

由式(14)~(16)，可得到下式：

$$D = 1 - \rho c^2 / (\rho_0 c_0^2) + D_0 \rho c^2 / (\rho_0 c_0^2) \quad (34)$$

根据《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T5389-2007)^[16]，当纵波波速下降率大于15%时，可判定基岩产生宏观爆生裂隙。由式(34)，取 $c = 0.85c_0$ 和 $D = D_{lim}$ ，可得到下式：

$$D_{lim} = 0.72D_0 + 0.28 \quad (35)$$

由式(35)可知，表征宏观破坏的临界损伤变量 D_{lim} 随初始损伤变量 D_0 的增大而增大，即 D_{lim} 不是常数，这与文献[14]中的结论相同。

实际工程常利用钻孔声波法测定岩体纵波波速。根据式(16)，先利用钻孔声波法测定待开挖部位的初始纵波波速 c_0 ，然后由式(15)可得到开挖部位的初始损伤 D_0 。由于现场岩体一般是非均匀的， c_0 和 D_0 均取统计平均值，即起爆前需在现场待开挖部位布置一定数量的声波孔（也可利用预裂爆破孔作声波测试孔），对声波测试结果进行统计分析后，得到开挖部位的平均初始损伤值等统计量。

2.2.3 爆破参数确定

预裂爆破要求在炮孔壁面上不形成压碎区，同时炮孔中心连线上形成贯通裂缝^[17]。爆炸应力波和爆生气体作用下形成贯通裂纹的简化理论模型示意图见图2。

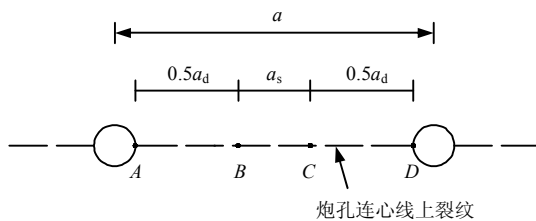


图2 炮孔中心连线上裂纹形成示意图

Fig.2 Schematic diagram of crack formation along connecting line between centers of two blastholes

图2中， a_d 和 a_s 分别为炮孔间爆炸应力波作用产生的初始裂纹的长度和爆生气体准静态作用产生的裂纹的长度。爆炸应力波作用下，炮孔中心连线上先形成 AB 和 CD 两段初始裂纹。然后在爆生气

体继续作用下， AB 和 CD 两段裂纹进一步扩展，形成裂纹 BC 。最终，炮孔连心线上形成贯通裂纹 AD 。

由式(24)和式(30)，当炮孔周边不形成压碎区时，应当满足下式：

$$p_d / (1 - D) \leq \hat{\sigma}_c (\dot{\epsilon}_c)^{m_c} \quad (36)$$

式中： $D_0 \leq D \leq D_{lim}$ 。

根据式(8)、(9)和式(36)，爆生气体高、低压膨胀条件下，装药不耦合系数应满足的关系式为

$$\eta_l \eta_r^2 \geq \begin{cases} \left[\frac{np_0}{\sigma_c (\dot{\epsilon}_c)^{m_c} (1 - D)} \right]^{1/\kappa_1}, & p_s \geq p_k \\ \left[\frac{np_k}{\sigma_c (\dot{\epsilon}_c)^{m_c} (1 - D)} \right]^{1/\kappa_2} \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{1/\kappa_1}, & p_s < p_k \end{cases} \quad (37)$$

当装药不耦合系数满足不形成压碎区的条件时，单孔炸药量和线装药密度计算为

$$Q = ql \quad (38)$$

$$q = \rho_c \pi d^2 (l - l_c) / (4l \eta_r^2 \eta_l) \quad (39)$$

由式(5)和图2，裂纹在炮孔连心线上贯通时，孔距满足以下关系式：

$$a = d + a_d + a_s \quad (40)$$

式中： a_d 和 a_s 的单位均为 m。

由式(12)、(25)和式(31)， a_d 满足下式：

$$a_d \leq d \left[\frac{p_d b}{\hat{\sigma}_t (1 - D) + \bar{\sigma}_{\theta 0}} \right]^{\frac{1}{a_2}} - d \quad (41)$$

爆生气体准静态压力作用下，之前应力波作用产生的初始裂纹进一步发展^[5, 17]。此时，爆生气体作用下的裂纹扩展长度近似满足下式：

$$dp_s \geq a_s \hat{\sigma}_t (1 - \bar{D}) + a_s \bar{\sigma}_{\theta 0} \quad (42)$$

式中： $\bar{D}$ 为应力波作用对初始裂纹尖端之间岩石造成的平均损伤， $0 \leq \bar{D} \leq D_{lim}$ 。

式(42)考虑了应力波和原岩应力对初始裂纹尖端间（见图2中 BC 段）岩石开裂的影响。当不考虑应力波作用引起的损伤效应和原岩应力影响时，即 $\bar{D} = 0$ 和 $\bar{\sigma}_{\theta 0} = 0$ 时，式(42)退化为文献[5]、[17]中提出的爆生气体作用下的裂纹长度计算式。

由式(14)、(16)得到 $\bar{D}$ 的计算式：

$$\bar{D} = \frac{E_{d0} - \bar{E}_d}{E_{d0}} = \frac{\rho_0 c_0^2 - \bar{\rho}_d \bar{c}_d^2}{\rho_0 c_0^2} \quad (43)$$

式中: $\bar{E}_d$ 为初始裂纹尖端间岩石的平均动弹性模量 (MPa); $\bar{\rho}_d$ 为初始裂纹尖端间岩石的平均密度 (kg/m^3); $\bar{c}_d$ 为初始裂纹尖端间岩石的平均纵波波速 (m/s)。

由式 (42), 得到炮孔连心线上爆生气体准静态叠加作用下的裂纹长度之和:

$$a_s \leq \frac{dp_s}{\hat{\sigma}_t(1-\bar{D}) + \bar{\sigma}_{\theta 0}} \quad (44)$$

理想状态下, 炮孔壁上刚好没有形成压碎区, 且炮孔连心线上刚好形成贯通裂纹, 此时, 式 (36)、(41)、(44) 取等号, 且 $D = D_{\text{lim}}$ 。孔距计算为

$$a = d \left\{ \frac{\hat{\sigma}_c(\dot{\epsilon}_c)^{m_c}(1-D_{\text{lim}})b}{[\hat{\sigma}_t(1-D_{\text{lim}}) + \bar{\sigma}_{\theta 0}]} \right\}^{\frac{1}{\alpha_2}} + \frac{d\hat{\sigma}_c(\dot{\epsilon}_c)^{m_c}(1-D_{\text{lim}})}{n[\hat{\sigma}_t(1-\bar{D}) + \bar{\sigma}_{\theta 0}]} \quad (45)$$

基于以上理论分析, 可由式 (37) ~ (39) 确定单孔装药量和装药结构, 由式 (45) 确定孔距。

为考虑初始损伤对孔距的影响, 在单孔装药结构、钻孔直径和岩石强度等参数一定时, 利用式 (45) 对初始损伤 D_0 求导, 得到下式:

$$\frac{da}{dD_0} < 0 \quad (46)$$

从式 (46) 看出, 孔距 a 随初始损伤 D_0 的增大而减小, 即在初始损伤较大的岩石中实施预裂爆破时, 应减小钻孔间距。此外, 从式 (44) 和式 (45) 看出, 当炮孔装药量和钻孔规格一定时, 即爆生气体准静态峰值压力 p_s 一定时, 初始裂纹尖端间岩石的平均损伤 $\bar{D}$ 较大时, 由爆生气体准静态压力作用产生的裂纹的长度 a_s 也较大。垂直炮孔中心连线的原岩平均应力 $\bar{\sigma}_{\theta 0}$ 较大时, 应减小孔距。这些性质均与一般爆破工程经验符合。

3 工程应用

3.1 工程概况

溪洛渡水电站大型地下厂房分别布置在金沙江左右两岸山体内。地下厂房主要包括主厂房、尾水调压室和主变室 3 个特大断面洞室开挖工程。由于开挖断面大, 这些洞室均需要分层爆破开挖。为降低洞室两侧边墙之间的分层区开挖爆破对边墙围岩的影响, 需采用预裂爆破技术。在地下厂房两侧边墙围岩和分层开挖区之间形成贯通预裂缝后, 再进行分层台阶开挖。为了获得良好的预裂成缝效果, 需要通过预裂爆破试验获得合理的爆破参数。左岸地下厂区内, 水平向和垂直向原岩应力水平约

在 $5 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6 \text{ Pa}$ 范围内。开挖基岩为玄武岩, 属极硬岩。岩石密度为 $2\ 600 \sim 3\ 000 \text{ kg/m}^3$ 。由钻孔声波测试可知, 岩石纵波波速范围为 $3\ 000 \sim 6\ 000 \text{ m/s}$ 。近似取最大波速 $6\ 000 \text{ m/s}$ 为无损岩石纵波波速。无损岩石的单轴抗压和抗拉强度近似取值分别为 2×10^8 、 $1.2 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)^[18], 地下厂区岩体完整程度主要分 4 种描述, 分别为完整、较完整、完整性差和较破碎。对于地下厂房内岩体, 完整~较完整的占大部分, 完整性差的占少部分, 其余极少部分处于较破碎状态。由规范 (GB50487-2008)^[18] 中岩体完整程度描述与纵波波速对应的关系, 再结合式 (15)、(16), 得到地下厂房内岩体的完整程度描述与初始损伤值之间的对应关系见表 1。

表 1 地下厂房岩体完整程度及其对应的初始损伤值
Table 1 Relations between the integrity of rock mass in the underground powerhouse and the initial damage values

完整程度描述	初始损伤值 D_0
完整	[0, 0.25)
较完整	[0.25, 0.45)
完整性差	[0.45, 0.65)
较破碎	[0.65, 0.73)

3.2 爆破试验

主厂房内完整和完整性差的岩体所占比例较高, 具有代表性。故选取这两个部位作为试验区, 试验编号分别 T_1 和 T_2 。试验地点在主厂房第 III 层开挖区中。试验部位的岩石物理力学参数见表 2。现场钻孔设备可开凿直径为 0.09 m 的炮孔。边墙预裂爆破的钻孔深度由两侧边墙间主爆区的分层开挖高度确定。为防止主爆区裂纹绕过预裂面, 预裂炮孔深度一般超过分层开挖高度 0.5 m 。地下厂房开挖主要分层开挖高度为 8.0 m 。因此, 预裂爆破试验的钻孔深度设计为 8.5 m 。炸药参数见表 3。表 3 中炸药为 2[#]岩石乳化炸药。由表 2、3 中的数据, 结合本文提出的方法计算得到相关爆破参数, 见表 4。典型的装药结构见图 3。图 3 中, 炮孔内炸药药卷绑在长度略大于孔深的竹片上, 并通过导爆索连接起来。在孔外同样采用导爆索将炮孔间炸药连接, 这样尽可能确保各个炮孔内的炸药同时爆炸, 以便充分利用爆炸应力波的叠加作用。由表 4 和图 3 确定的爆破参数和装药结构进行预裂爆破试验。

表 2 试验部位的岩石物理力学参数			
Table 2 Rock mechanical and physical parameters of at the test site			
试验编号	岩体完整程度	初始损伤值 D_0	静态泊松比 μ_s
T ₁	完整	0.24	0.24
T ₂	完整性差	0.50	0.24

表 3 炸药物理参数			
Table 3 Explosive physical parameters			
炸药密度 ρ_e / (kg/m ³)	炸药爆速 c_e / (m/s)	高压膨胀指数 κ_1	低压膨胀指数 κ_2
1 200	4 000	3	1.2

表 4 预裂爆破试验参数								
Table 4 Parameters for presplitting blasting tests								
试验编号	钻孔参数			装药参数				
	孔距 a / m	孔直径 d / m	孔深 l / m	装药直径 d_e / m	线装药密度 q / (kg/m)	单孔药量 Q / kg	径向不耦合装药系数 η_r	轴向不耦合装药系数 η_l
T ₁	1.0	0.09	8.5	0.04/0.032	0.65	5.5	2.81/2.25/1.25	2.5/1.5/1.0
T ₂	0.8	0.09	8.5	0.04/0.032	0.60	5.1	2.81/2.25/1.25	2.5/1.5/1.0

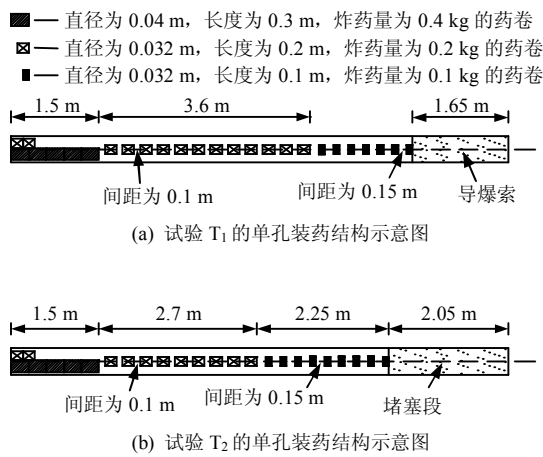


图 3 典型的装药结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of typical charge structures

表 4 中，“0.04/0.032”表示炮孔中装药结构采用了直径为 0.04、0.032 m 的两种药卷进行组合装药，以便调整径向不耦合装药系数。“2.81/2.25/1.25”和“2.5/1.5/1.0”表示沿孔深方向，炮孔中装药结构采用了 2.81、2.25 和 1.25 这 3 种径向不耦合装药系数和 2.5、1.5、1.0 这 3 种轴向不耦合装药系数。因现场药卷规格有限，可对药卷进行切割加工，以便调整径向装药不耦合系数。如图 3 直径为 0.032 m、长度为 0.2 m 药卷被加工成长度为 0.1 m 的药卷。

由式 (12)、(45) 可知，原岩应力水平影响爆炸应力波破裂岩石的作用。受试验区原岩应力水平影响，沿炮孔深度方向岩石爆破开挖受到的夹制作用逐渐增大，不利于破裂岩石。为减小夹制作用，需增大爆破作用，由式 (9) 可知，减小装药不耦合系数可增大爆破荷载。因此，如表 4 和图 3 所示，本文采用了沿孔深方向减小径向、轴向装药不耦合系数方式。在图 3 中，为了克服孔底附近原岩应力对爆破开挖产生的较强的夹制作用，孔底附近 1.5 m

长的区域设为加强装药段，该区域内径向和轴向装药不耦合系数最小。

3.3 与经验类比法确定的爆破参数对比

对于工程应用，线装药密度是最重要的爆破参数。从表 2、4 看出，初始损伤越大，线装药密度越小，这与工程经验相符。针对爆破试验，在岩石强度和钻孔参数一定的条件下，表 5 给出了由式 (2) ~ (4) 这 3 个典型经验公式确定的线装药密度。对比表 4 和表 5 中的线装药密度可知，由经验公式得到的线装药密度和基于本文提出的计算式得到的结果存在差异。如对于试验 T₁，由葛洲坝工程局提出的式 (3) 计算得到的线装药密度为 0.65 kg/m，与本文提出的线装药密度相同。但由于该公式未考虑孔距的影响，对于开挖部位完整程度比试验 T₁ 差的试验 T₂，由该公式计算得到的线装药密度仍为 0.65 kg/m，这并不合理。因此，实际工程中应用式 (3) 时，需根据工程经验对计算得到的线装药密度进行修正。总体来看，由经验公式计算得到的线装药密度比由本文所提公式计算得到的结果大，且由不同经验公式计算得到的线装药密度差别也较大。

表 5 由典型经验公式确定的预裂爆破试验线装药密度
Table 5 Linear charge density for presplitting blasting tests based on the representative empirical formula

试验编号	经验公式	线装药密度 q / (kg/m)
T ₁	式 (2)	0.96
	式 (3)	0.65
	式 (4)	0.85
T ₂	式 (2)	0.82
	式 (3)	0.65
	式 (4)	0.71

3.4 试验结果及分析

由《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T5389-2007)^[16]可知,评价预裂爆破效果的主要指标为预裂缝贯通程度(包括完全贯通和未完全贯通)、残留爆破孔痕迹的保存率以及相邻两个残留炮孔间预裂面的不平整度等。良好的预裂爆破效果应满足以下条件:预裂缝完全贯通;对于完整程度比较破碎状态好的围岩,残孔痕迹保存率应大于 60%;预裂面不平整度小于 15 cm。在预裂缝完全贯通的情况下,残留爆破孔痕迹保存率越高,预裂面不平整度越小,爆破效果越好。

试验 T₁、T₂ 的爆后预裂面效果分别见图 4、5。预裂爆破试验的效果评价见表 6。从表中看出,预裂面上残孔痕迹保存率高于 90%,预裂面不平整度小于 10 cm。故爆破效果评价指标均满足规范要求,预裂爆破效果良好,即由本文所提方法确定的爆破参数是合理的。一般在预裂缝贯通的情况下,炮孔线装药密度越大,残孔痕迹保存率越低,预裂面不平整程度越高,预裂爆破效果也就越差。相对于由本文所提出公式计算得的线装药密度,采用典型经验公式计算得到的结果偏大,所以,若采用典型经验公式计算得到的线装药密度,预裂质量将降低。因此,相对经验类比法,由本文所提理论确定的爆破参数更合理。在对大量预裂爆破试验结果总结的基础上,文献[19]中也指出,由现有一些经典经验公式计算得到的线装药密度往往偏大。应用这些线装药密度数值后,预裂爆破效果不好。



图 4 爆破试验 T₁ 形成的预裂面

Fig.4 Presplitting surface resulting from blasting test T₁



图 5 爆破试验 T₂ 形成的预裂面

Fig.5 Presplitting surface resulting from blasting test T₂

表 6 预裂爆破效果

Table 6 Effects of presplitting blasting

试验编号	预裂缝贯通程度	预裂面残孔痕迹保存率	预裂面不平整度
		/ %	/ cm
T ₁	完全贯通	95	8
T ₂	完全贯通	91	9

由于试验效果良好,对于地下厂房预裂爆破施工,理论上可按照本文提出的方法,针对初始损伤不同的部位得到不同的爆破参数。为方便工程应用,预裂爆破施工采用的爆破参数可在试验 T₁ 或者试验 T₂ 的基础上进行调整。根据式(8)、(9)、(45),影响孔距设计值的主要参数为装药不耦合系数(包括径向和轴向)、钻孔直径和初始损伤。因此,爆破参数调整原则为:①对于和试验 T₁ 或 T₂ 部位初始损伤相差不大的施工段,如完整或完整性差的部位,可在试验获得的爆破参数的基础上适当调整钻孔间距。②对于试验 T₁ 或 T₂ 部位初始损伤相差较大的施工段,如较完整或较破碎的部位,除了调整孔距外,还需调整装药不耦合系数。③岩体完整程度较差时,则减小孔距和增大装药不耦合系数。反之,则增大孔距和减少装药不耦合系数。根据式(38)、(39),调整装药不耦合系数可改变线装药密度。装药不耦合系数越大,线装药密度越小。

4 结 论

(1) 对比基于经验类比法和爆破损伤理论得到的爆破参数计算式可知,本文提出的计算表达式中各参数的物理意义明确,且应用该计算式便于从理论上分析和确定合理的爆破参数。

(2) 本文提出的爆破参数确定方法考虑了应力波和爆生气体共同作用、岩石初始损伤和原岩应力等对预裂爆破效果的影响,因此,该方法对影响因素的考虑较为全面,且具备一定的理论基础。此外,岩石初始损伤为爆破参数研究需要考虑的主要影响因素之一。本文将岩石初始损伤和岩体完整程度、纵波波速等参数联系起来,方便工程应用。

(3) 预裂爆破试验效果较好。证明本文提出的爆破参数确定方法可应用于实际施工中。对于不同初始损伤的部位,实际施工中的预裂爆破参数可在试验获得的相关参数的基础上进行适当调整。施工段岩体完整性较差,则减小孔距或增大装药不耦合系数;反之,则增大孔距或减少装药不耦合系数。

(4) 因场地条件复杂,且理论计算模型作了一些的假设,故研究成果还存在一定的局限性。为获

得更好的预裂爆破效果及扩大爆破参数确定方法的应用范围, 还需深入研究预裂缝形成机制。

参考文献

- [1] 陈俊桦. 爆破振动对相邻洞室影响的现场试验研究和数值分析[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2009.
- CHEN Jun-hua. Field test and numerical simulation analysis of influence of blasting vibration on adjacent chamber[D]. Wuhan: School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2009.
- [2] 李新平, 陈俊桦, 李友华, 等. 溪洛渡电站地下厂房爆破损伤范围及判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2042—2048.
- LI Xing-ping, CHEN Jun-hua, LI You-hua, et al. study of criterion and damage zone induced by excavation blasting of underground power-house of Xiluodu Hydropower Station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2042—2048.
- [3] 张成良, 李新平, 米健, 等. 损伤光面爆破参数确定及数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(7): 86—89.
- ZHANG Cheng-liang, LI Xin-ping, MI Jian, et al. Numerical analysis and parameters option based on damage in smooth blasting[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2006, 28(7): 86—89.
- [4] 戴俊, 杨永琦. 损伤岩石周边控制爆破分析[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 496—499.
- DAI Jun, YANG Yong-qi. Analyses of controlled perimeter blasting in damaged rock[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2000, 29(5): 496—499.
- [5] 付玉华, 李夕兵, 董隲军. 损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1420—1426.
- FU Yu-hua, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Analysis of smooth blasting parameters for tunnels in deep damaged rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1420—1426.
- [6] 杨小林, 员小有, 吴忠, 等. 爆破损伤岩石力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 436—439.
- YANG Xiao-lin, YUAN Xiao-you, WU Zhong, et al. Experimental study on mechanical properties of blasting damaged rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(4): 436—439.
- [7] 程康, 张开广. 水平预裂线装药量计算公式研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 224—225.
- CHENG Kang, ZHANG Kai-guang. Inquiry into charge formula for horizontal presplit blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 224—225.
- [8] 戴俊. 爆破工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 150—170.
- DAI Jun. **Blasting engineering**[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 150—170.
- [9] 董振华, 周祖仁, 舒大强. 预裂爆破设计参数的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 1988, 8(3): 236—242.
- DONG Zhen-hua, ZHOU Zu-ren, SHU Da-qiang. Theoretical analysis of design parameters for presplitting blast[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1988, 8(3): 236—242.
- [10] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 144—147.
- DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Nature Science)**, 2001, 20(2): 144—147.
- [11] 徐颖, 孟益平, 程玉生. 装药不耦合系数对爆破裂纹控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1843—1847.
- XU Ying, MENG Yi-ping, CHENG Yu-sheng. Study on control of blast crack by decoupling charge index[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1843—1847.
- [12] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 12—16.
- ZHU Chuang-yun, YU Sheng-chun. Study on the criterion of rockmass damage caused by blasting[J]. **Engineering Blasting**, 2001, 7(1): 12—16.
- [13] 张奇, 杨永琦. 岩石爆破作用的分形研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 8—13.
- ZHANG Qi, YANG Yong-qi. Fractal study on blasting effect in rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 8—13.
- [14] LIU Li-Qing, KATSABANIS P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(2): 217—231.
- [15] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 1984, 80(3): 233—245.

- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. DT/T5389-2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DT/T5389-2007 Construction technical specifications on rock-foundation excavating engineering of hydraulic structures[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [17] 张会林. 露天矿预裂爆破参数的理论分析[J]. 金属矿山, 1998, 269(11): 5-7.
- ZHANG Hui-lin. Theoretical analysis of the parameters of open-pit presplitting blasting[J]. *Metal Mine*, 1998, 269(11): 5-7.
- [18] 中华人民共和国水利部. GB50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB50487-2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [19] 刘焕祯. 预裂爆破三峡公式[J]. 工程爆破, 1996, 2(1): 42-46.
- LIU Huan-Zhen. Formula of presplitting blasting of Three Gorges of Yangtze River[J]. *Engineering Blasting*, 1996, 2(1): 42-46.

(接第 1342 页)

《岩土力学》2015 年增刊 1 被 EI 收录论文 (120 篇, 收录率 100 %) (2)

序号	论文题名	作者	页码
46	隧道模型试验中几何比尺相似程度的差异性及影响比较	江 浩, 李荣建, 闫 蕊, 等	270-276
47	软土中浅埋法向承力锚位移破坏标准模型试验	王建华, 李一峰, 程星磊	277-280
48	高吸水材料改善高含水率淤泥流动性的试验研究	纪文栋, 张宇亭, 颜容涛, 等	281-286
49	黄土地层地铁暗挖隧道地表纵向沉降规律及其预测分析方法	余芳涛, 王永鑫, 张 玉	287-292
50	软土地基上影响预应力钢管混凝土管相对转角关键因素研究	孙立强, 张京京, 李 恒, 等	293-298
51	由滞回曲线的形态特征分析冻结黏土的动力特性	罗 飞, 赵淑萍, 马 巍, 等	299-304
52	基于线性拟合的颗粒材料破碎状态表征	李 希, 张 升, 童晨曦, 等	305-309
53	湖泊相软土真空堆载联合预压法的离心机试验研究	刘春原, 朱 楠, 赵献辉, 等	310-314
54	高能强夯下地基土体的变形特性	王 威, 王建华	315-319
55	挤密砂桩加固水下软土大型原位载荷试验研究	王延宁, 蒋斌松, 胥新伟, 等	320-326
56	大型石化地基振冲碎石桩处理现场试验研究	马永峰, 周丁恒, 张志豪, 等	327-333
57	软土地区注浆成型螺旋桩抗拔承载力的计算	赵 赟, 张陈蓉, 凌巧龙, 等	334-340
58	Green-Ampt 模型渗透系数取值方法研究	吕 特, 张 洁, 薛建峰, 等	341-345
59	中高龄期模型固体废弃物三轴试验与强度特性分析	吕玺琳, 翟新乐, 黄茂松, 等	346-350
60	高温下花岗岩的细观结构与声发射特性研究	吴 刚, 翟松韬, 王 宇	351-356
61	CM 桩复合地基桩土应力比及垫层效应现场试验研究	张旭群, 杨光华, 陈 锐, 等	357-361
62	气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究	刘 楷, 李仁民, 杜延军, 等	362-366
63	用于砂岩加固的锚杆的承载性能试验研究	张 琰, 郑卫锋, 朱照清	367-371
64	聚丙烯纤维加筋对高岭土固结压缩特性影响试验研究	陈 乐, 刘志彬, 周书中	372-376
65	干湿路经影响粉土小应变剪切模量的试验研究	徐 洁, 周 超	377-381
66	桩端后注浆超长灌注桩桩侧极限摩阻力计算方法	李永辉, 王卫东, 吴江斌	382-386
67	上海软土动剪切模量衰减规律的试验研究	冷 建, 叶冠林, 王建华, 等	387-391
68	化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究	崔明娟, 郑俊杰, 章荣军, 等	392-396
69	砾石土层中注浆扩散参数的研究	杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等	397-402
70	基于地质统计学方法的孔压静力触探锥尖阻力固有空间变异性研究	邹海峰, 蔡国军, 刘松玉, 等	403-407
71	基于灰色系统理论的改进 SMR 法初探	刘帝旭, 曹 平	408-412
72	侧装式弯曲元测量软黏土剪切波速的试验研究	李 青	413-416
73	粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究	左永振, 张 伟, 潘家军, 等	417-422
74	掺砾黏土样的大型三轴流变特性试验研究	赵 娜, 周 密, 何晓民	423-429
75	复杂岩溶场地下的高层建筑地基处理	姜 燕, 杨光华, 黄忠铭, 等	430-438
76	基于克里金模型的边坡稳定可靠度分析方法	罗正东, 董 辉, 陈 铖, 等	439-444
77	移动荷载下高速铁路基段振动加速度频谱衰减特性	薛富春, 张建民	445-451
78	原位贯入装置标定罐模型试验研究与发展	储 亚, 刘松玉, 蔡国军	452-458
79	海洋沉积土动剪切模量与阻尼比的试验研究	尹 松, 张先伟, 孔令伟, 等	459-464
80	任意柔性挡墙变位诱发地表沉降的解析理论预测	顾剑波, 钱建固	465-470
81	单轴压缩条件下花岗岩中不同矿物的形状变化	安晨昊, 徐金明, 孙 皓, 等	471-475
82	深部软弱岩体置换体对岩质边坡支护效果分析	宛良朋, 汤开宇, 李建林, 等	476-480
83	疏浚耙齿松土机制及土体孔压响应试验	谢立全, 王喜伟, 梁 鑫, 等	481-485
84	地铁循环荷载作用下交叉隧道沉降分析	高广运, 李绍毅, 涂美吉, 等	486-490
85	HDPE 和 PET 土工格栅加筋路堤作用的对比研究	贾敏才, 强 晓, 叶建忠	491-495

(未完, 见第 1466 页)