

应用研究·非煤矿山·

# 基于 COMSOL Multiphysics 的高陡岩质边坡复绿植生孔最优角度研究

Study on the Optimal Angle of Planting Holes for Regreening on High Steep Rocky Slopes  
Based on COMSOL Multiphysics

宋豪<sup>1,3</sup>, 吴圣林<sup>2</sup>, 米尔阿地力·阿布都艾尼<sup>1,2</sup>, 史继彪<sup>1,3</sup>, 刘抗<sup>1,3</sup>,  
赵天然<sup>1,3</sup>, 李明亮<sup>1,3</sup>, 瞿虎<sup>1,2</sup>

(1. 徐州中矿岩土技术股份有限公司, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;  
3. 江苏省采空区治理与生态修复工程技术研究中心, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**为研究植生孔最优角度的确定方法,提出了空间利用率、结构面揭露程度、接受水分补给能力、抗蒸发能力四项评价指标,综合运用三维建模、COMSOL 多孔介质非饱和入渗模拟和热湿耦合水汽运移模拟等方法,探讨了植生孔角度变化对这四项指标的影响。为验证模拟结果,于徐州市园博园岩秀园宕口建立试验基地,长期监控、量测试验植生孔的各项参数指标,并进行了处理分析。结果表明,在控制孔深 50 cm、孔径 20 cm 条件下,植生孔角度在 40°~60°能保证较高的空间利用率;通过实测边坡及结构面产状建立对应三维模型并计算,可获取结构面揭露面积峰值对应的植生孔角度;在 30°~80°,植生孔角度越大,越利于其接受自然降雨或喷淋养护等方式的水分补给,但同时使之在干旱条件下抗蒸发能力减弱。该研究结果和最优角度确定方法,对生产实践有良好的指导意义。

**关键词:**矿山生态修复;植生孔;非饱和渗流;热湿耦合;数值模拟

**中图分类号:** TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)05-0001-10

**Abstract:** In order to develop a method of determining the optimal angle of planting holes on high steep slopes, four indicators of space utilization, degree of structural surface exposure, water recharge capacity, and anti-evaporation capacity were proposed to determine the optimal angle of planting holes for slope regreening, COMSOL Multiphysics was used to simulate the unsaturated infiltration of porous media and water vapor transport by heat and moisture coupling, and the influence of the change of the angle of planting holes on these four indicators was discussed. In order to verify the simulation results, an experimental site was established at the slope in Yanxiu Garden of Xuzhou Garden Expo Park, and the data of the test holes were monitored, measured and processed for analysis on site. The results show that under the condition of controlling depth of 50 cm and diameter of 20 cm, the planting hole angle of 40°~60° can ensure high space utilization; in the range of 30°~80°, the larger the angle of planting hole is, the better it is for receiving water recharge by natural rainfall or spraying maintenance, but at the same time, the resistance to evaporation under high temperature and dry conditions is weakened; the angle of the planting hole corresponding to best exposure of the structural surface can be obtained by establishing and calculating the 3D model of the slope and the structural surface. The research results and the optimal angle determination method have good guidance for regreening project.

**Key words:** ecological rehabilitation of mines; planting hole; unsaturated seepage; heat and moisture coupling; numerical simulation

[作者简介] 宋豪(1993—),工程师,从事矿山地质与生态修复等领域技术研发工作。

[基金项目] 高陡边坡植生孔复绿与信息化养护技术研发(徐州市科技计划项目)(ZYSC20220240)。

[引用格式] 宋豪,吴圣林,米尔阿地力·阿布都艾尼,等.基于 COMSOL Multiphysics 的高陡岩质边坡复绿植生孔最优角度研究[J].中国矿山工程,2023,52(5):1-10.

## 1 前言

伴随我国基础设施建设大力实施和露天矿资源高强度开发,公路、铁路、水利、电力、桥涵、隧道、矿山等大型工程在带来便利和满足我们资源需求的同时,大量岩土体的开挖造成了一系列裸露边坡,其中部分高陡岩质边坡的复绿问题至今仍是疑难杂症。

近年来裸露边坡生态修复、复绿的高新技术新方

法层出不穷,植生孔复绿技术作为其中一种,面对部分无法“砍肩修脚”的高陡(坡度大于 $65^\circ$ )岩质边坡,有着不受坡度、坡高的限制,施工工艺相对简单、复绿效果快速持久等优势。植生孔复绿修复技术就是利用适宜的钻具在边坡上打出许多具有一定孔径、深度、角度的种植孔,在孔内种(栽)植耐瘠薄、抗干旱、耐严寒的植物,使坡面迅速恢复植被的一种边坡生态治理技术<sup>[1]</sup>。

植生孔复绿技术虽说在面对高陡岩质边坡复绿上有一定的治理优势,但目前学术界和工程界对植生孔复绿技术的研究和应用水平都仍然处于较为初级的阶段,植生孔在坡面上的角度(植生孔轴线与水平面夹角)等设计参数的确定上仍然模糊,植生孔角度变化如何改变边坡上的地境条件进而影响边坡复绿治理成效没有相应的学术定论。植生孔角度等参数的模糊设计则会导致复绿植物复绿效果无法保持在较高水准。

目前针对植生孔角度的研究相对较少,王玲<sup>[2]</sup>等人提出植生孔施工角度需要根据岩体裂隙的发育产状确定,以切穿更多的裂隙为原则,具体确定方法可以通过绘制裂隙倾向玫瑰花图完成,但需要注意的是无论如何种植孔的角度不得朝下。黄景春<sup>[3]</sup>等人提出植生孔角度的确定还需有利于植物最大限度地截留降雨和流水携带物且需方便施工。矿山生态修复技术规范中提出植生孔轴线与坡面夹角应保持 $10^\circ \sim 45^\circ$ ,但并未提出更详细的设计方法。从目前的研究现状来看,前人对植生孔角度的确定方法大都提出原则性约束条件或给出模糊设计范围,未提出详细设计方法或对给出的设计范围进行解释。

高陡岩质边坡处于裸露状态的主要原因是由于其坡面陡峭光滑存不住水土,岩石质地坚硬、抗风化能力强无法沟通内部结构面等特性,无法给植物提供必要的地境条件。因此植生孔的构造原则应为“存住土”“接住水”“穿裂隙”“抗蒸发”等为植物提供最佳地境条件为宜。对于不同工程地质条件的高陡岩质边坡,植生孔钻孔角度的不同会导致植生孔的复绿效果(植物成活率、生长速度)存在一定程度的差异,不同的成孔角度会导致孔内结构面揭露程度、水分补给排泄、空间利用率、高温热湿交换等发生较大变化。鉴于此,本文展开了植生孔角度的变化对复绿植物地境条件影响规律及最优角度确定方法的研究。

## 2 研究区概况

本文以徐州及周边淮海地区的裸露高陡岩质边坡为研究对象。该地区属暖温带半湿润季风气候,春秋季节多晴少雨,蒸发强度大,常现旱情;夏季降雨集中,易形成洪涝;冬季寒冷少雨且多霜冻。年平均气温 $14.2^\circ\text{C}$ ,历史最高、最低气温 $40.6^\circ\text{C}$ 、 $-22.6^\circ\text{C}$ ;多年平均降水量 $837.8\text{ mm}$ ,降水集中在7~9月,占全年降水量的67%以上,多年平均蒸发量 $1813.6\text{ mm}$ 。

该地区裸露高陡岩质边坡多为各类建材采石宕口残留边坡。坡面平整度不均一,部分坡体岩层面直接揭露,坡面平整光滑;部分布满陡坎,平整度较差。坡体岩石质地坚硬,抗风化能力强,坡度一般为 $65^\circ \sim 80^\circ$ ,坡高最高可达 $100\text{ m}$ 。地层属“华北地层鲁西分区徐宿小区”;岩性多以各类灰岩、白云岩、白云质灰岩为主,且部分坡体有侵入岩分布。

## 3 研究方法与过程

基于对研究区裸露边坡的地质调研及边坡生态修复项目的复绿效果追踪研究,结合对现有文献研究成果的归纳总结,提出了用于确定植生孔最优角度的四项定量指标。文中使用Creo Parametric建立内含植生孔、结构面的坡体模型,并提出相应计算式,计算孔内空间利用率、结构面揭露程度指标;使用COMSOL Multiphysics多物理场数值模拟<sup>[4]</sup>方法计算接受水分补给能力、抗蒸发能力指标。为验证模拟结果,于江苏省徐州市园博园岩秀园宕口建立高陡边坡生态修复试验基地,设置一定数量的试验孔,现场监测和测量坡面试验孔各项数据并进行了分析和验证。

### 3.1 三维模型建立与计算

#### 1) 孔内空间利用率计算方法

为探究植生孔角度与孔内空间利用率的定量规律,找寻空间利用率较高的植生孔角度,本文采用Creo Parametric三维建模软件,按表1所示工况1条件下的坡面几何参数,以常用植生孔基质土类型粉质黏土干燥状态下的自然安息角 $37.5^\circ$ 和湿润状态下自然安息角 $20^\circ$ 为例,建立 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 三种坡面,每种坡面 $30^\circ \sim 80^\circ$ 六种植生孔角度,共18个三维几何模型。计算各植生孔孔内可填置土体的体积 $V_r$ 与实际钻孔体积 $V$ 之比,来衡量各角度植生孔其孔内空间利用率 $U_r$ ,揭示其规律,具体示意图如图1

所示。空间利用率  $U_s$  表示为式(1)。

$$U_s = \frac{V_r}{V} \times 100\% \quad (1)$$

### 2) 孔内结构面揭露面积计算方法

通过 Creo Parametric 建立多种工况坡面几何模型,如表 1 所示工况 2 和试验区工况,在坡体内部构建不同产状、相同间距、平行无限延伸的多组结构面,根据孔内揭露的结构面长度、厚度及孔隙率参数计算各工况植生孔在坡体内角度变化时其孔内结构面揭露面积,从而以结构面揭露面积峰值对应的角度确定最优揭露角度,具体如图 2 所示。结构面揭露面积表达式见式(2)

$$U_f = \sum_1^i l_i b_i \varphi_i \quad (2)$$

式中,  $U_f$  为结构面揭露面积( $\text{mm}^2$ );  $l_i$  为孔内第  $i$  条结构面揭露长度( $\text{mm}$ );  $b_i$  为第  $i$  条结构面厚度(或张开度)( $\text{mm}$ );  $\varphi_i$  为第  $i$  条结构面孔隙率,无充填介质取值为 1。

表 1 各工况边坡三维模型几何参数

工况名	坡面产状	结构面 1 产状	结构面 2 产状	各结构面间距
工况 1	倾向不限 倾角 60°、70°、80° 三级	无 与坡面倾向相反、 倾角 30°	无 与坡面倾向相同、 倾角 30°	无 20 cm
试验区工况	230°∠75°	300°∠30°	120°∠75°	15 cm

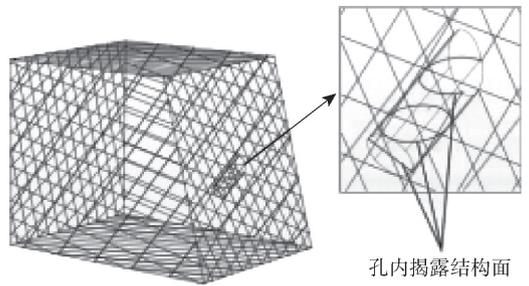


图 2 植生孔结构面揭露程度计算示意图

渗理论 Richards 方程数学模型,研究高陡边坡植生孔几何模型在降雨条件下通过结构面和植生孔开口的变饱和入渗特性,在数值模拟层面上实现降雨条件下结构面与坡面植生孔开口对几何模型内基质土入渗以及排泄作用。建立特定高陡岩质边坡几何模型(特定坡向、坡角、岩层产状),在坡体上设置不同角度、不同裂隙发育产状组合下多种工况的植生孔。研究孔内基质土含水量的变化规律,分析不同角度植生孔降雨条件下孔内基质土接受补给能力,判定最佳角度。

### 1) 控制方程与几何模型

高陡岩质边坡植生孔接受补给的过程是水分在基质土和结构面填充介质内非饱和入渗的过程。COMSOL 内对这一过程的数值模拟采用 Richards<sup>[5]</sup> 方程进行描述,其本质与 Darcy 定律应用模式相似,区别在于材料的水力参数是非线性的,随不饱和状态发生变化<sup>[6]</sup>,具体见式(3)

$$\rho \left( \frac{C_m}{\rho g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \rho \left[ -\frac{K_s}{\rho g} k_r (\nabla p + \rho g \nabla D) \right] = Q_m \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为水的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_m$  为容水度( $1/\text{m}$ );  $g$  为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $S_e$  为有效饱和度;  $S$  为贮水系数( $1/\text{Pa}$ );  $p$  为压力( $\text{Pa}$ );  $K_s$  为饱和渗透系数( $\text{m}/\text{s}$ );  $k_r$  为相对渗透率;  $D$  为高程( $\text{m}$ );  $Q_m$  为流域内的源或汇 [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ]。其中  $C_m$ 、 $S_e$ 、 $k_r$  均为压力  $p$  的函数。

为了便于研究非饱和入渗过程中结构面填充介质渗流特性,构建了植生孔为中心孔周 1.25 m 范围的局部坡体模型如图 3 所示,小尺寸模型方便研究细小裂隙与植生孔渗流补给排泄特性,且可防止因尺寸变化过大而导致的网格划分错误和计算不收敛的问题。模型具体尺寸为高、宽 2.5 m,坡长由坡角而不同;位于坡面中心的植生孔长 50 cm、孔径 20 cm;内含多组结构面,呈平行无限延伸分布。

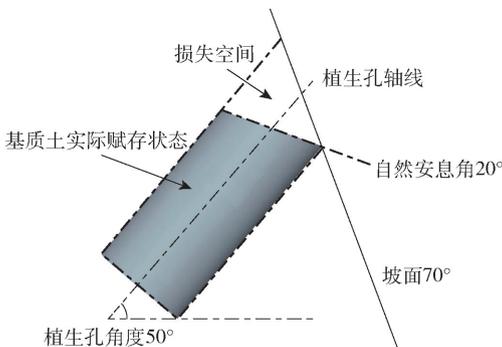


图 1 植生孔空间利用率计算示意图

## 3.2 植生孔多孔介质非饱和入渗模拟

大气降雨时或对坡面进行喷淋养护时坡面上的植生孔角度的设计是否更易于接受和收集更多的水分,对复绿植物的生长和生存较为重要。为探究高陡岩质边坡自然降雨或喷淋养护等类似补给方式对不同角度植生孔内基质土含水量的影响,通过 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件,利用非饱和入

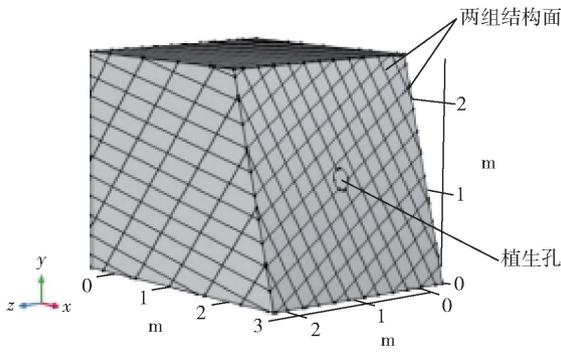


图3 植生孔非饱和入渗几何模型

采用 COMSOL 自带网格划分功能,使用自由四面体单元自动划分较粗化网格,网格靠近结构面、植生孔尺寸较小结构处较细小,远离则较粗大,模型共计约 37 万个网格单元。网格划分大小对模拟计算结果影响极小可忽略不计。模型除了各结构面在坡面上的开口、植生孔开口,其余所有外边界均为不透水边界。此模型中基质土、结构面、岩体三者均用 Richards 接口定义,但完整岩块孔隙率和渗透系数极小,只起到给结构面和植生孔提供空间支撑作用。储水模型为自带线性储水方程,模型底部不联系地下水,模型初始压力条件控制多孔介质初始饱和度,初始饱和度定为 0.3。

## 2) 解析方程

为求解上述方程(3),需建立有效饱和度  $S_e$ 、容水度  $C_m$ 、相对渗透率  $k_r$  与压力  $p$  之间的相互关系解析式,COMSOL 内给出两种最常用的解析式,分别是 Van Genuchten<sup>[7]</sup> (VG) 模型和 Brooks and Corey<sup>[8]</sup> (BC) 模型。两者区别在于,流体压力等于大气压时使用 VG 模型,流体压力发生变化或在无充填介质裂隙内的毛细力作用下(裂隙-孔隙双重介质非饱和入渗时的裂隙流)使用 BC 模型可以较为准确的描述其过程。本文采用 VG 解析模型求解大气降雨从坡体结构面充填介质和植生孔开口处补给孔内基质土的渗流过程,植生孔内基质土和结构面充填介质水力参数见表 2,其中部分适用参数参考文献<sup>[9]</sup>,VG 模型具体解析方程见式(4)~式(6)。

$$S_e = \begin{cases} (1 + |\alpha H_p|)^{-m} & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$C_m = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m} (\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m & H_p < 0 \\ 0 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$k_r = \begin{cases} S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,有效饱和度  $S_e$  与体积含水率  $\theta$  关系为  $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,  $\theta_r$  为残余含水率(%),  $\theta_s$  为饱和含水率(%);  $\alpha$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $n$  均为本构关系常数,且  $m = 1 - 1/n$ ,它们的取值定义特定介质类型; $H_p$  为压力水头(m),  $H_p = p / (\rho g)$ 。

表2 基质土和结构面水力参数取值

基质土特性参数					
饱和渗透系数 $K_s / m \cdot s^{-1}$	饱和含水率 $\theta_s / \%$	残余含水率 $\theta_r / \%$	VG 参数 $\alpha / m^{-1}$	VG 参数 $n$	VG 参数 $l$
$7 \times 10^{-5}$	50	0	1	2	0.5
结构面 1 特性			结构面 2 特性		
饱和渗透系数 $K_s / m \cdot s^{-1}$	饱和含水率 $\theta_s / \%$	厚度 $b / mm$	饱和渗透系数 $K_s / m \cdot s^{-1}$	饱和含水率 $\theta_s / \%$	厚度 $b / mm$
$7 \times 10^{-6}$	20	1	$7 \times 10^{-3}$	50	2

## 3) 降雨边界

模拟软件中对于边坡降雨入渗的边界条件设置方式有所不同且有各自优劣。对降雨边界模拟的关键在于是否能将降雨量的实际入渗补给多孔介质的部分和表面径流流失的部分区别开。对于降雨边界,李宁<sup>[10]</sup>等人采用编程语言对降雨边界二次开发,克服了软件中只能模拟降雨量全部入渗的问题。侯晓萍<sup>[11]</sup>等人采用前人<sup>[12]</sup>提出“空气单元”的方法以及 COMSOL 软件中的“透水层”和“探针”功能对裂隙土的上边界进行模拟,可在降雨量大于土体入渗量时使多余积水沿表面径流。

本文则使用软件 Richards 方程接口中的“入口”边界,通过分段函数控制“入口”的法向流入速度的方法实现降雨边界的模拟。相对渗透率  $k_r$  与饱和渗透系数  $K_s$  乘积大于等于降雨量  $q$  时全部入渗,反之则按实际渗透系数进行部分入渗。此方法也可防止降雨量较大时全部入渗的问题,可排除地表径流流失部分的水量,且此方法具有良好的计算收敛性。

## 3.3 植生孔热湿耦合水汽运移模拟

高温干旱条件下植生孔内基质土水分会从孔口蒸发,并不断减少基质土的含水量。为研究植生孔成孔角度的改变对孔内基质土水汽运移量的影响,本文运用含湿多孔介质热湿耦合流动理论,在

COMSOL 软件内利用其“湿空气传热”“空气中的水分输送”“层流”接口模拟高温干旱条件下植生孔内基质土水分不断蒸发运移的过程。模拟计算不同角度模型孔内基质土的相对湿度、温度随时间变化,并探究其原因,进而选择抗蒸发能力最佳植生孔设计角度。

多孔介质热湿耦合流动的模拟需要考虑以下三种物理效应:流体的流动、热传递以及液态水和气态水的传输。模型将涉及“热-水-力”三种物理场的耦合,可以使用 COMSOL 预定义的上述几个接口模拟非饱和和多孔介质中的这些物理效应。

### 3.3.1 控制方程与几何模型

含湿多孔介质高温热湿耦合水汽运移的模拟过程囊括了湿空气传热、空气中的水分输送、多孔介质两相流、多孔介质中的水分输送、多孔介质传热等多种理论,有关控制方程和多物理场耦合原理详见 COMSOL 用户手册或参考文献<sup>[13-15]</sup>。

坡体模型采用坡高 2.5 m 的小尺寸二维模型,坡体外设置 4 m × 5 m “空气单元”包裹整个坡体,供相对干燥的热空气流动及环境温度的传递。植生孔设置位置于坡面中心与尺寸与上文一致。模型由 COMSOL 自动划分较粗化自由三角形网格,单个模型约 62.5 万个网格单元,最小单元尺寸 1 mm,最大 880 mm。模型热湿参数取值见表 3,基质土的蒸汽渗透率和液态水渗透率在软件内自定义函数确定。

表 3 模型各介质热湿参数

参数	基质土	岩体	结构面填充介质
导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	1.1	2.4	0.9
比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	750	910	750
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1 700	2 500	1 100
湿扩散率/ $m^2 \cdot s^{-1}$	$1 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-8}$

### 3.3.2 模型边界与初始条件

模型“空气单元”左右边界分别为热空气的出口和入口,上下边界为隔绝热、水和空气流动的“壁”边界。坡面上的植生孔开口和结构面开口处为水分蒸发界面。坡体内部的岩体、植生孔、结构面等所有域都可以接受和传递环境温度。图 4 所示为水汽运移模型,干燥热空气以一定流速从入口边界流入“空气单元”域,给坡体传递热量并干燥植生孔内基质土带走一定量水分,由出口流出。

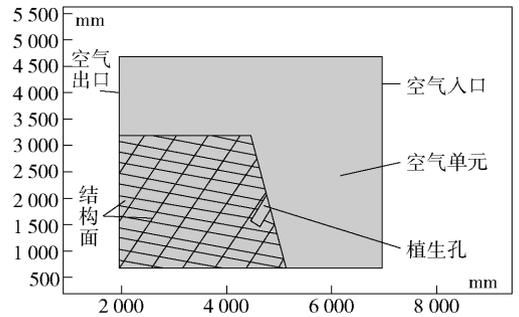


图 4 植生孔热湿耦合水汽运移模型

## 3.4 试验区复绿边坡植生孔监测

为验证模拟结果,于江苏省徐州市园博园岩秀园宕口建立高陡边坡生态修复试验基地,设置一定数量的试验孔,现场监测和测量坡面试验孔各项数据并进行了分析和验证。试验区具体位置位于铜山区吕梁悬水湖风景区内悬水湖南侧, X309 路北侧,原为废弃采石宕口,现已治理成为宕口花园。试验区边坡地层主要为震旦系倪园组厚层状灰岩、白云质灰岩、薄层状白云质灰岩,局部分布侵入岩辉绿岩。地层产状  $300^{\circ} \sim 320^{\circ} \angle 17^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ,节理裂隙较发育。

试验区宕口花园坡面治理时由上至下分为三个区域,底部较缓坡面采取乔木栽植、挡墙填土、生态袋、喷播的治理措施,中部采取灌木栽植、生态袋、喷播治理措施,顶部最陡区为植生孔覆绿区,为试验基地核心监测和测量区域,也是三维模型建立与多物理场数值仿真的对象。植生孔覆绿区,坡面产状  $230^{\circ} \sim 235^{\circ} \angle 70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ,植生孔数量约 1 000 个,单孔尺寸为长 50 cm、直径 20 cm 的圆柱体。

在试验区复绿坡面底部 0 ~ 5 m 范围、中部 5 ~ 10 m 范围的植生孔均匀分布分别安装 64 个、32 个双插针温湿度传感器,实时监测不同角度植生孔孔内基质土在自然降雨条件下或开启喷淋养护时的接受水分补给后体积含水率的变化,以及干旱条件下的湿度衰减速率。试验孔分布如图 5 所示。

## 4 研究结果与分析

### 4.1 孔内空间利用率

对于任意坡面,植生孔成孔角度不垂直于坡面,都会使植生孔柱体在空间上形成斜开口柱体而非标准圆柱体。植生孔内置基质土并非能完全充满整个斜开口柱体,而会因自然降雨、风化营力等因素流失、被剥蚀一部分基质土,最后在孔内以其自然安息

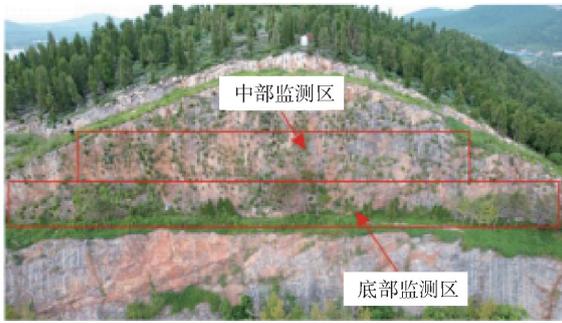


图5 试验孔分布位置

角度存在。这会导致植生孔损失部分可利用体积,而损失量也会因植生孔角度、坡角的改变而改变。

图6所示为空间利用率曲线图,以粉质黏土为例的植生孔的孔内空间利用率随边坡坡角和植生孔角度的增大而减小,且后期经降雨浸润流失过后的湿土体积比初期干燥状态下的整体少10%。结果表明植生孔设计角度保持在40°~60°时能保证一定的植生孔空间利用率,植生孔设计角度大于60°时空间利用率则大幅减小,此时应增加孔深保证植物所需的用土量或地境深度。

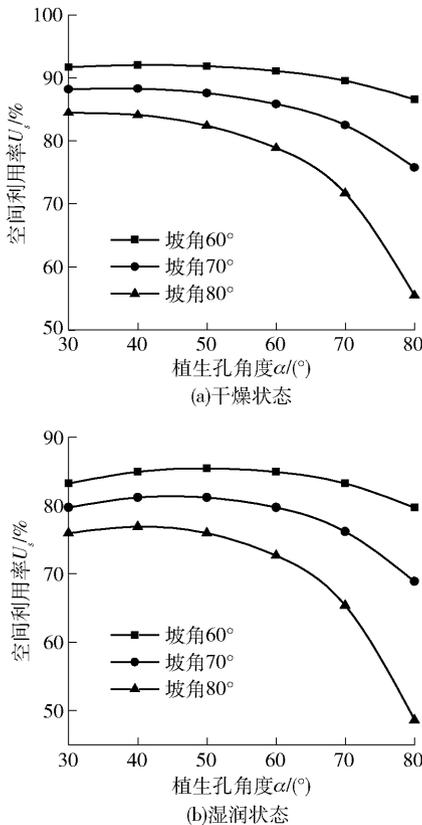


图6 空间利用率计算结果

这里的“湿土”的自然安息角取值并不唯一,计算中的取值20°为试验区植生孔内基质土含水率在

20%~40%状态下的实测均值,基质土的自然安息角随含水率和基质土类型发生变化。

### 4.2 结构面揭露程度

对特定的高陡岩质边坡,内部存在一组或多组结构面(岩层面、裂隙面、节理面等),植生孔在坡体内角度的变化会带来植生孔柱体穿切该坡面内部结构面数量变化。有研究显示<sup>[16-17]</sup>,植生孔内部结构面的揭露程度(或岩体体裂隙率)可极大程度上影响植物生长甚至生存,植生孔内部的结构面可以让植物尽可能多地获取更多水分、肥分以及根系伸展空间。因此,穿切并在孔内揭露尽可能多的结构面应成为植生孔角度的重要设计原则之一。

在工况2和试验区工况条件下建立四种坡体模型,不同角度植生孔柱体穿切坡体内部的结构面在并孔内壁揭露出现椭圆形或不规则的裂隙,统计其揭露长度并带入公式(2)计算结构面揭露面积  $U_j$ ,并得到植生孔角度所对应的关系曲线如图7所示,可获取揭露面积峰值所对应的最优植生孔角度。

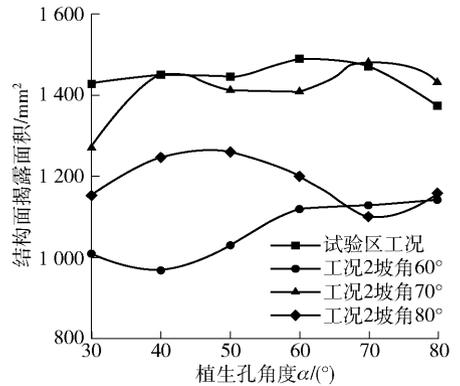


图7 结构面揭露面积计算结果

几何上,植生孔轴线与孔隙率和张开度较大的结构面的夹角越接近垂直时,可最大程度揭露结构面,增加孔内结构面的揭露面积。坡体本身结构面密集且间距小也可使植生孔穿切并揭露更多结构面。由于不同边坡坡角的形成和内部结构面发育的随机性,其产状、厚度、间距、充填情况各有不同,无法通过文中几种工况获取植生孔揭露结构面的总体规律,但针对具体工况可通过实测坡体、结构面产状等各项数据,并利用此方法得到最优角度。

### 4.3 接受水分补给能力

图8所示为试验区工况植生孔非饱和入渗,孔内基质土饱和度变化模拟过程云图。

工况1为无结构面工况,水分仅从孔口补给,孔

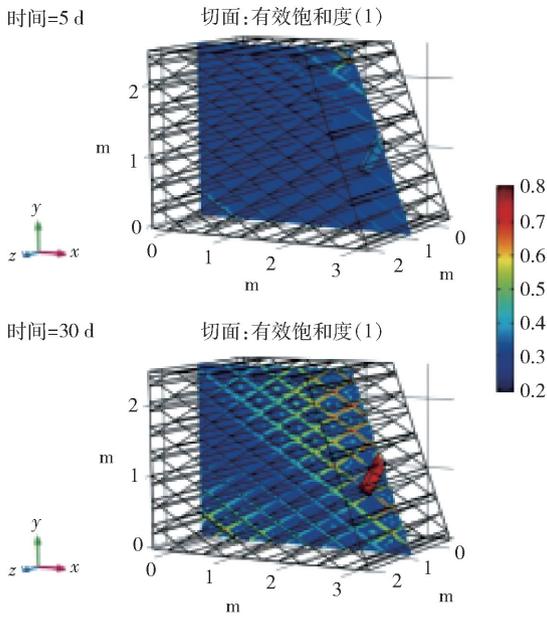


图8 植生孔非饱和和入渗过程

内无补给或排泄通道,在  $q = 0.02 \text{ m/h}$  条件下进行补给直至饱和。图9所示为工况1三种坡角模型孔内基质土饱和速率与植生孔角度之间的关系曲线。曲线表明,边坡坡度和植生孔角度越大使孔内基质土饱和速率越快。通过饱和度变化云图,分析其原因:一是与植生孔的开口大小有关;二是与基质土水力坡度有关,大角度植生孔内赋基质土水力坡度更大,使水分补给更迅速;三是渗流通道分布不均匀,角度越小的植生孔其渗流通道集中于靠下部的孔壁,反之渗流通道则相对更均匀地分布于孔内。

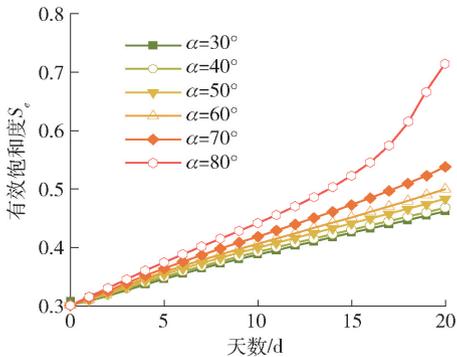


图9 工况1 基质土饱和度

工况2和试验区工况坡体内部含结构面,这两种工况下,水分在孔内基质土是边补给边排泄的过程。图10所示为试验区工况20天孔内基质土饱和度变化趋势曲线,由于排泄通道的存在,此工况下基质土饱和速率远不及无结构面工况,且短期降水不同角度植生孔补给量无明显差异,长期降雨或基质

土饱和度达到一定界限时才有显著差异。

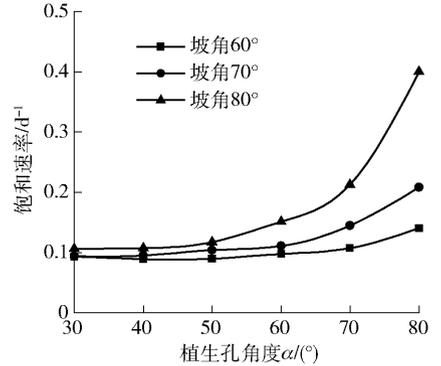


图10 试验区工况基质土饱和速率变化

图11所示为工况2和试验区工况在上述同样  $q$  值条件下入渗第20天孔内基质土有效饱和度与植生孔角度之间的关系曲线。结果表明,各曲线各自总体上呈上升趋势,也即植生孔角度越大越易接受水分补给;结合图7来看不同曲线之间存在的饱和度差异是由于孔内揭露的结构面存在的差异,也即植生孔孔内揭露的结构面的排泄作用大于其补给作用。

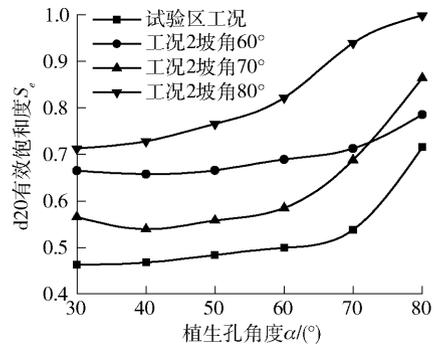


图11 工况2 基质土饱和度

#### 4.4 抗蒸发能力

图12所示为植生孔热湿耦合模拟,孔内基质土相对湿度变化、孔外温度变化过程云图。

图13所示为环境温  $40^\circ\text{C}$  下蒸发30d各模型不同角度植生孔孔内平均相对湿度变化趋势曲线。曲线总体而言,各孔平均相对湿度变化速率在  $0 \sim 5 \text{ d}$  内相对较快,  $5 \sim 30 \text{ d}$  内则相对较慢并各自逐渐趋于稳定的速率。从不同的植生孔角度来看,植生孔角度越大孔内平均相对湿度衰减速率则越快,第30天最终相对湿度越低。

图14所示为植生孔角度  $\alpha = 30^\circ$  模型在环境温  $40^\circ\text{C}$  下蒸发30d,孔轴线不同深度 ( $h/\text{cm}$ ) 处相对湿度变化曲线。由该图可知,基质土浅表层蒸发速率

相对较快,且最大影响深度为约 25 cm 左右,浅表层基质土初期有短暂的相对湿度提升的过程。浅表层基质土相对湿度的短暂提升是因为孔内部分液态水远离热源向孔内移动所致。

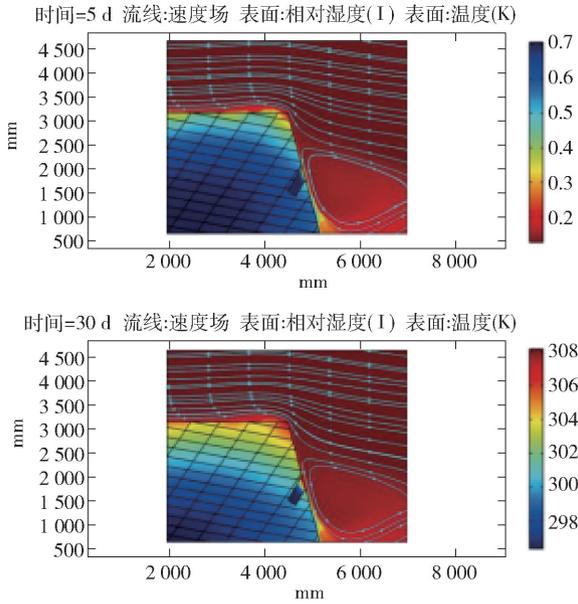


图 12 植生孔热湿耦合水分运移过程

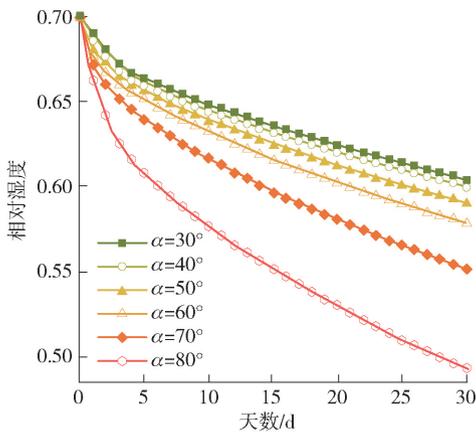


图 13 基质土相对湿度变化

图 15 所示为在三种环境温条件下各角度植生孔模型孔内基质土第 30 d 平均相对湿度曲线。结果表明 5 °C 左右环境温变化对孔内平均湿度结果影响较小,对曲线走势几乎没有影响。

综合来看,模拟结果表明植生孔角度越大其抗蒸发能力越弱。影响植生孔内基质土的水汽转移量的因素有三:一是植生孔的开口大小直接影响蒸发面积,是最主要的因素;二是高温条件会迫使部分水分向结构面排泄,使植生孔内湿度不断下降;三是大角度植生孔与岩体形成的壁较薄,使孔内基质土更易受到环境温影响,增加蒸发量。

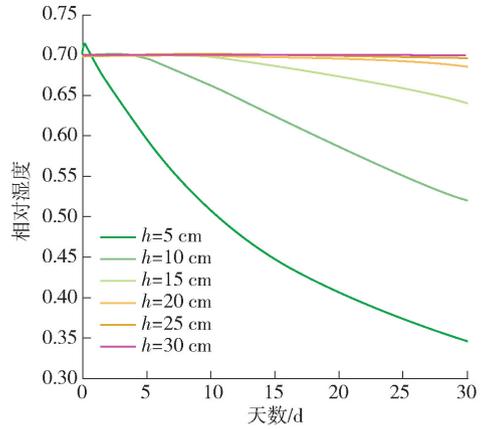


图 14 不同深度处相对湿度变化

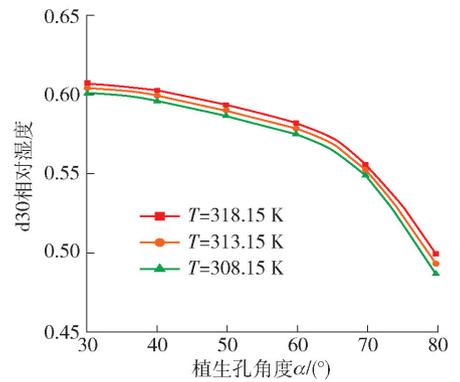


图 15 不同温度下相对湿度变化

#### 4.5 试验区监测验证结果

##### 1) 试验孔水分补给监测结果

图 16 所示为 2022 年 3 月至 2023 年 4 月期间各监测区不同角度植生孔接受天然降雨和喷淋养护补给后各孔体积含水率平均增加量。结果表明:各监测区,无论是自然降雨还是喷淋养护,植生孔孔内基质土接受水分补给量随植生孔角度增大而增大,与模拟结果一致;且试验区角度小于 40° 的监测孔接受的水分补给量大大幅度小于其余监测孔。

综合数值模拟与监测结果,植生孔接受水分补给的能力主要体现在植生孔开口大小,而大角度植生孔能在坡面上形成更大开口,给水分直接滴入或通过坡面径流流入孔内都提供了更大的几率。

##### 2) 试验孔抗蒸发能力监测结果

图 17 所示为 2022 年期间各监测区不同角度植生孔经 4 d 的无水分补给条件下基质土含水率平均衰减值。结果表明:植生孔基质土含水率衰减值随植生孔角度增大而增大,与模拟结果一致。

综合数值模拟和监测验证,大角度植生孔含水率衰减相对较快的原因在于其较大的开口以及更易

受环境温度影响的较薄孔壁。

### 4.6 最优成孔角度的确定

对于待治理边坡最终最优成孔角度的确定需四项指标综合考量。各指标使用一组能表征该指标的数据,通过归一化处理去除量纲的影响,将不同植生孔角度对应的四项指标归一化值曲线绘制于同一坐标系内,通过曲线交点和各指标重要程度权重确定最优角度(精确到5°左右),具体如图18所示。

所在地年最大连续无降水天数随对应的孔内相对湿度数据(或使用饱和度、含湿量)。

对于节理裂隙较发育(体裂隙率大于1.5%)或薄层至中厚层层理发育边坡,结构面揭露程度指标权重占比应该最大;接受水分补给能力指标应根据边坡所在地年降水量数据或后期是否使用喷淋等养护方式来确定权重;抗蒸发能力指标权重通过当地蒸发强度确定;空间利用率指标应根据不同植物对土体流失和地境深度的敏感性决定其权重。

根据试验区边坡实际条件:植生孔设计孔深、孔径分别为50 cm、20 cm,坡体薄层层理以及节理裂隙较发育(体裂隙率大于1.5%),当地多年平均降水量837.8 mm、多年平均蒸发量1 813.6 mm,设置有喷淋养护装置,确定结构面揭露程度指标和抗蒸发能力指标重要程度较大。根据图18,在四曲线各交点分布范围内(55°~75°)取各指标所对应的最优角度,四各角度多因素权值计算所得试验区工况植生孔最优角度为60°。

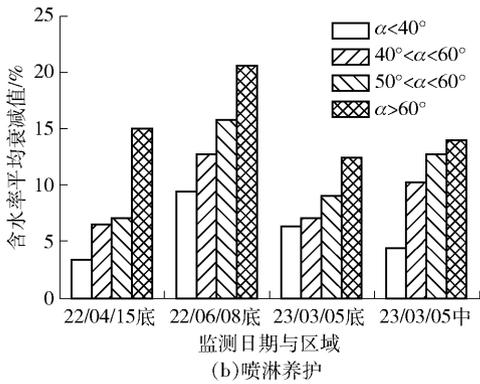
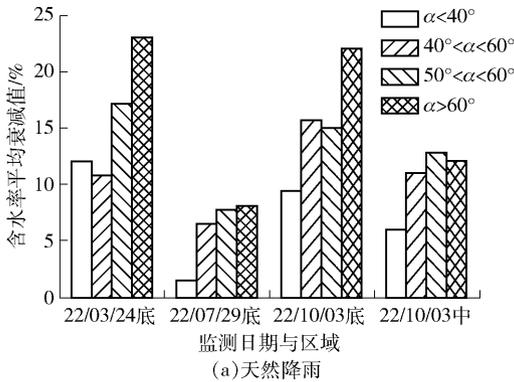


图16 试验孔水分补给监测结果

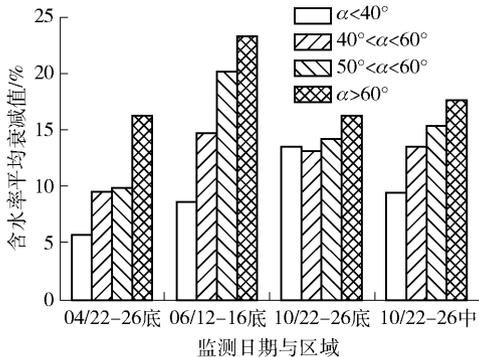


图17 试验孔抗蒸发能力监测结果

空间利用率和结构面揭露程度指标使用文中所提  $U_s$ 、 $U_j$  数据表征;接受水分补给能力指标可使用边坡所在地年最大连续降雨天数对应的孔内饱和度数据(或体积含水率);抗蒸发能力指标可使用边坡

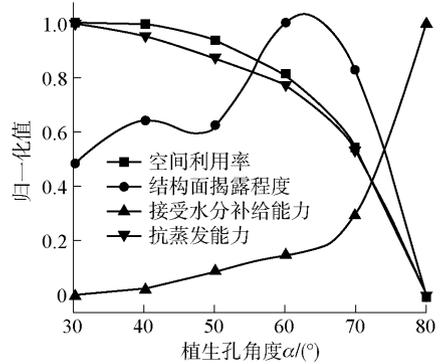


图18 试验区工况最优角度确定

## 5 结论

根据高陡边坡植生孔三维建模计算、COMSOL 多孔介质非饱和入渗、高温热湿耦合水汽运移模拟以及试验区植生孔现场测量与监测验证结果,综合分析,得出以下结论。

(1)在目前常用孔深50 cm、孔径20 cm条件下,植生孔角度保持在40°~60°能保证较高的孔内空间利用率,超过此范围将造成一定程度的孔内土体流失,无法保证植物所需用土量或地境深度。

(2)由于结构面发育产状和坡面形成的随机性,可通过实测坡面和结构面产状等数据建立三维模型方式计算并绘制结构面揭露面积曲线,并得到穿切揭露结构面最多的植生孔角度。

(3)植生孔不同的成孔角度可以影响其接受水分补给的能力(自然降雨或喷淋养护)和抗蒸发能力,在 $30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 范围内,植生孔角度越大其接受水分补给的能力越强,但同时也会使其抗蒸发能力减弱。

(4)复绿边坡治理区段最终最优成孔角度的精确值,可通过四项指标归一化值与不同植生孔角度对应的曲线交点和各指标重要程度权重综合判定。

#### [参考文献]

- [1] 袁芳,殷焘,原华山,等. 种植孔绿化在福山区下官矿区生态修复中的应用[J]. 山东国土资源,2013,29(9):78-80,84.
- [2] 王玲,黄景春,李喆. 裸露岩质边坡覆绿的生态地质学指标分析[J]. 湖南生态科学学报,2017,4(2):43-47.
- [3] 黄景春,王玲,宁立波. 石漠化治理的地境再造模式研究[J]. 湖南生态科学学报,2017,4(4):27-31.
- [4] COMSOL Inc. COMSOL Multiphysics User's Guide, Version 5.3 [M]. Burlington, Massachusetts, USA: COMSOL Inc,2014.
- [5] JACOB B. Dynamics of Fluids in Porous Media [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing,1972.
- [6] 徐轶,徐青. 基于 COMSOL Multiphysics 的渗流有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(2):165-170.
- [7] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44:892-898.
- [8] BROOKS R H, COREY A T. Properties of porous media affecting fluid flow [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division (ASCE),1966,92:61-88.
- [9] CEY E, RUDOLPH D, THERRIEN R. Simulation of groundwater recharge dynamics in partially saturated fractured soils incorporating spatially variable fracture apertures [J]. Water Resources Research,2006,42(9):W09413.
- [10] 李宁,许建聪. 基于 ABAQUS 的三维边坡降雨入渗模块的开发及其应用[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):667-674.
- [11] 侯晓萍,樊恒辉. 基于 COMSOL Multiphysics 的非饱和裂隙土降雨入渗特性研究[J]. 岩土力学,2022,43(2):563-572.
- [12] 胡静,陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学,2003(2):281-283,287.
- [13] PHILIP J R, DE VRIES D. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(2):222-232.
- [14] LUIKOV A V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies [M]. Oxford: Pergamon,1966.
- [15] 鲍洋,陈友明,刘向伟,等. 多孔介质墙体热湿耦合传递模拟计算模型及其验证[J]. 建筑科学,2018,34(10):66-75.
- [16] 张燕,葛江琨,李洪亮,等. 高陡岩质边坡体裂隙率与植物生长速度的关系研究[J]. 安全与环境工程,2022,29(4):93-100.
- [17] 莫春雷,宁立波. 高陡岩质边坡植被修复的立地条件研究——以洛阳市宜阳锦屏山为例[J]. 安全与环境工程,2014,21(1):17-21.