

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.020

基于收敛-约束法的岩溶隧道支护时机研究

张聚文¹, 李永鑫²

(1. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 511458; 2. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 溶洞对于隧道的稳定性有较大的影响, 而进行及时的支护施做能够保障岩溶隧道的施工安全。文章以笔花山隧道为例, 采用数值模拟方法建立岩溶隧道分析模型, 将溶洞的相对位置和大小作为主要影响因素, 包括溶洞与隧道之间的净距和环向位置、溶洞直径, 并分析其对洞室围岩位移的影响。通过洞室位移和单元状态指标 Z_{SI} , 结合收敛-约束方法, 综合判断岩溶隧道支护的施做时机。结果表明, 相较于净距和溶洞直径, 溶洞环向位置对隧道稳定性影响更大。由于溶洞的影响, 洞室不同位置处的位移发展规律并不相同, 因此难以以某一种位移特征来判断隧道是否进入弹塑性状态。而 Z_{SI} 可以更直观地展现出岩溶隧道的状态, 从而为合理地确定岩溶隧道支护施做时机提供帮助。

关键词: 岩溶隧道; 收敛-约束法; 单元状态指标; 支护时机; FLAC3D 软件

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)07-0986-09

Research on support timing of karst tunnel based on convergence-constraint method

ZHANG Juwen¹, LI Yongxin²

(1. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511458, China; 2. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Caves have a significant impact on the stability of tunnels, and timely support can ensure the construction safety of karst tunnels. Taking the Bihuashan Tunnel as an example, a numerical simulation method is used to establish an analysis model of the karst tunnel. The relative position and size of the cave are the main influencing factors, including the net distance and circumferential position between the cave and the tunnel, as well as the diameter of the cave, and their effects on the displacement of the surrounding rock of the tunnel are analyzed. Through the displacement of the surrounding rock and the zone state index Z_{SI} , combined with the convergence-constraint method, the timing of the support of the karst tunnel is comprehensively judged. The results show that the circumferential position of the cave has a greater influence on the stability of the tunnel compared to the net distance and diameter of the cave. Due to the influence of the cave, the displacement development law at different positions of the surrounding rock is not the same, so it is difficult to judge whether the tunnel has entered an elastic-plastic state based on a certain displacement characteristic. However, the Z_{SI} can more intuitively display the status of the karst tunnel, providing assistance in determining the timing of the support of the karst tunnel.

Key words: karst tunnel; convergence-constraint method; zone state index; support timing; FLAC3D software

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108312); 安徽省自然科学基金资助项目(2108085QE250)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HGTA0160)

作者简介: 张聚文(1983—), 男, 湖南衡阳人, 中铁隧道勘察设计研究院有限公司高级工程师。

0 引 言

溶洞是隧道常见的一种不良地质条件,在我国广西、贵州、云南、四川、青海等地分布较为广泛。对于岩溶隧道修筑的安全问题,一直是工程界所关心的重点和难点。一方面是溶洞区域地质条件较差,需要使用额外的工程手段进行加固处理;另一方面,溶洞改变了地层的受力特点,难以用经典力学方法给出解答,通常需要借助数值仿真等手段进行分析。

目前,公路、铁路隧道施工中,广泛采用新奥法。新奥法的核心是以控制隧道变形为基础,通过发挥围岩支护的共同承载作用,来保证隧道开挖的稳定性。以新奥法为指导思想,学者们对岩溶隧道的力学响应特点、施工方法等开展了研究工作。文献[1]借助 FLAC3D 数值仿真软件,分析溶洞尺寸、溶洞净距、溶洞位置等对隧道应力、位移的影响规律;文献[2]以 ANSYS 有限元软件为基础,分析不同岩溶环向位置条件下隧道结构的震动影响特征;文献[3]提出综合多种勘测技术进行地质超前探测,完成溶洞腔体发育、空间位置等要素的探查,并给出加固支护技术的处理建议;文献[4]采用极限分析方法对隐伏溶洞位于隧道上方的隧道塌落形式进行研究。

上述研究多是从加固、施工力学性质等角度对岩溶隧道进行分析^[5-7],而对于结合新奥法确定支护时机的研究较少。支护时机的选择关乎隧道施工的安全性和经济性两大问题,确定支护时机通常采用收敛约束法。该方法基于围岩支护相互作用的特征曲线,确定支护施做方案,是广泛用于隧道支护设计的方法^[8-10]。收敛约束法的本质是对施工过程中隧道围岩的稳定性进行预估,从而确定合理的支护时机。对于隧道围岩破损情况,通常借助围岩变形或变形速率来进行判断。而对于岩溶隧道而言,围岩变形受到溶洞的影响,围岩位移与围岩破损情况之间的关系并不明确,这对收敛约束法应用于岩溶隧道存在一定的困难。因此,需要找到更为直观的、定量的隧道围岩状态判别标准。

本文以笔花山隧道作为研究对象,结合数值模拟方法和收敛-约束法确定岩溶隧道的支护时机。首先采用有限差分软件建立二维和三维仿真模型,分别考虑溶洞与隧道之间的环向位置、净距和溶洞直径,分析这些因素对围岩变形特征曲线的影响;然后通过单元状态指标 Z_{SI} 确定隧道围岩

的状态,从而确定相应支护施做的应力释放率;最后结合隧道围岩特征曲线 (ground response curve, GRC) 和纵向变形曲线 (longitudinal deformation profile, LDP) 确定支护施做与开挖面之间的距离,用以指导实际的施工、设计。

1 基于新奥法理论的设计方法

1.1 约束-收敛法

新奥法重视控制围岩变形、发挥围岩自稳能力。随着变形的发展,围岩的状态是动态变化的。在实际施工中,围岩的状态可以根据监控量测的数据进行判断,进而修正相应的支护措施或施工方案。在理论研究中,将围岩状态的发展过程通过 GRC 曲线、支护特征曲线 (support reaction curve, SRC) 和 LDP 曲线进行表征。其中:GRC 曲线表示隧道围岩压力与围岩变形之间的关系;SRC 曲线表示初期支护所提供支护力与变形之间的关系;LDP 曲线表示沿隧道掘进方向隧道围岩的变形情况。收敛-约束法原理如图 1 所示。图 1 中: u_r 为围岩的位移; p_i 为围压压力;点 I、F 分别对应距掌子面距离为 L 和 0 处的曲线点。对于 I 点(距掌子面 L 处),围岩变形为 u_r^I (LDP 曲线),对应的围岩压力为 p_i^I (GRC 曲线)。此时施做支护,最终,支护反力为 p_i^D (SRC 曲线)。

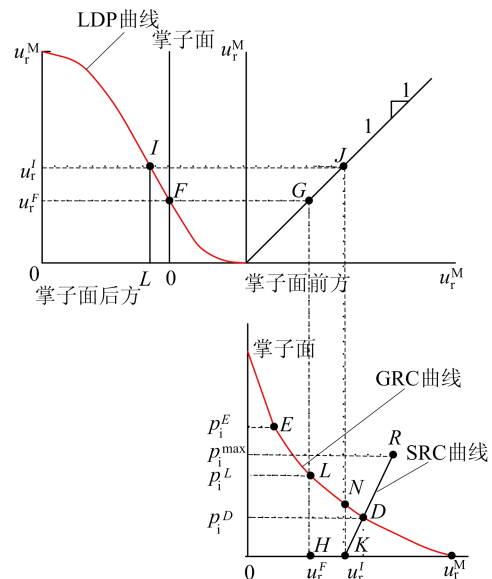


图 1 收敛-约束法原理

结合图 1,根据围岩特征曲线,可将围岩状态分为弹性变形阶段、弹塑性变形阶段。在弹性变形阶段,围岩处于弹性状态,变形基本为线性的。此时,围岩应变能未得到有效释放,若施做支护,

则支护结构所受到的承载力较大。在弹塑性变形阶段,围岩的变形逐步增长,并表现出一定的非线性。若围岩的变形过大,围岩发生了松动破坏,则支护所受的承载力也比较大,甚至发生支护破坏、围岩坍塌的情况。因此,最理想的支护时机是在弹塑性阶段,且能够有效地控制围岩变形,不至于发生松动破坏。

由于隧道开挖在空间上是三维的,通常确定最佳支护时机可采用以下方法。首先利用应力释放或应变控制的方法,逐步解除围岩上的约束,获得围岩特征曲线;然后以控制隧道变形或隧道稳定性为目标,确定支护时机的应力释放率或变形控制点以及对应的围岩特征曲线点;接着在三维模型中,获得开挖进尺的纵向变形曲线;最后将围岩曲线与纵向变形曲线进行结合,给出支护施做与开挖面之间的距离关系。

1.2 单元状态指标

为了指示单元的应力状态,文献[11]提出了单元状态指标 Z_{SI} ,该指标能够定量地表达单元的弹性、屈服和破坏的状态。

应力空间的状态如图 2 所示。应力方向的规定与弹塑性力学和 FLAC3D 软件中的规定一致,即拉为正、压为负。主应力依次为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。单元服从 Mohr-Coulomb 准则,在应力空间中为不规则的六棱锥面。

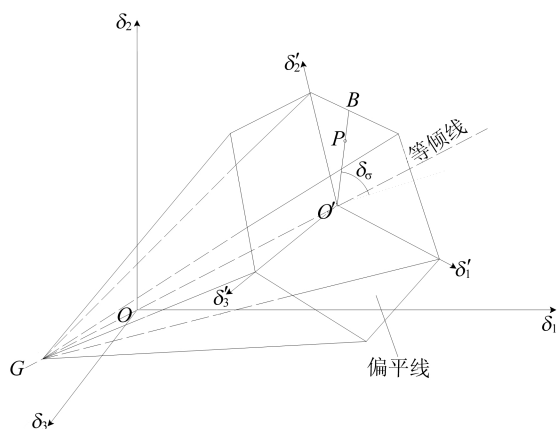


图 2 应力空间状态

在弹性状态下,图 2 中:某应力点 P 的坐标为 (σ_π, z_π) ; O' 为等倾面法线与过 P 点 π 平面的交点,作为评价应力状态的基准点; B 点为 $O'P$ 与屈服面的交点; δ_0 为罗德角。单元状态指标 Z_{SI} 可表述为 $O'B$ 与 $O'P$ 之间的比值。从图 2 可以看出,越接近 O' 点, $O'B$ 与 $O'P$ 之间的比值越大,稳定性越高。进一步可得 Z_{SI} 的计算公式为:

$$Z_{SI} = \frac{O'B}{O'P} = \frac{\frac{I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi}{3}}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_0 \sin \varphi - \cos \theta_0\right) \sqrt{J_2}} \quad (1)$$

其中: I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为偏应力张量第二不变量; c 、 φ 分别为 Mohr-Coulomb 准则的黏聚力和内摩擦角。此外,考虑到岩土材料抗拉强度远小于抗剪强度,当主应力 $\sigma_2 > 0$ (拉伸状态), Z_{SI} 采用 σ_t/σ_1 和式(1)的最小值进行表示,其中 σ_t 为抗拉强度。

在岩土体处于屈服阶段时,通过剪切应变与临界塑性剪切应变的比值评价塑性变形发展的阶段。为了与弹性状态下的指标相统一,采用塑性的等效塑性剪切应变 ϵ^{ps} 作为评价依据。临界状态(塑性刚开始阶段)的等效塑性剪切应变 $\bar{\epsilon}^{ps}$ 可以取相对小的值进行计算。 $\epsilon^{ps}/\bar{\epsilon}^{ps}$ 表示剪切破坏的程度,相应地, $1 - \epsilon^{ps}/\bar{\epsilon}^{ps}$ 可用于表征塑性变形后的单元稳定性。考虑拉伸情况, Z_{SI} 取两者的最小值,即

$$Z_{SI} = \min\left(1 - \frac{\epsilon^{ps}}{\bar{\epsilon}^{ps}}, 1 - \frac{\epsilon^{pt}}{\bar{\epsilon}^{pt}}\right) \quad (2)$$

其中: ϵ^{pt} 为等效塑性拉伸应变; $\bar{\epsilon}^{pt}$ 为临界等效塑性拉伸应变。

根据式(2)可得 Z_{SI} 值与围岩状态之间的定量关系。当 $Z_{SI} > 1.0$ 时,岩体处于弹性状态;当 $Z_{SI} = 1.0$ 时,岩体进入屈服状态,且随着 Z_{SI} 的降低,岩体越接近破坏状态;当 $Z_{SI} < 1.0$ 时, Z_{SI} 值越小,表明岩体的破坏程度越严重。因此,可以建立定量地描述单元应力状态与单元稳定性状态之间的关系。

2 数值计算模型建立

2.1 工程概况

笔花山隧道区位于云南镇雄以勒镇堰塘乡笔花山村境内,属构造溶蚀峰丛洼地地貌,通过自然地带地面标高 1 410~1 680 m 之间,相对高差约 270 m,地表岩溶溶沟、溶槽、岩溶洼地、落水洞较为发育,地形起伏较大,地形坡度一般为 $20^\circ \sim 50^\circ$ 、局部为陡壁,洼地分布较少,其内地形平缓。隧道区区域上位于川滇经向构造带与川黔经向构造带之间,南与南岭纬向构造体系西段最北边的鹤庆—东川—黔中复背斜带接壤,北同中国新华夏系构造体系第 3 个一级沉降带的四川盆地毗连。拟建线路在大地构造位置上处于扬子准地台(I)、滇东台褶带(I3)、滇东北台褶束(I32)内。

隧址区处于碳酸盐岩地区,主要不良地质为岩溶。根据勘察成果资料显示,隧道岩溶发育,局部岩溶裂隙发育,钻探揭示溶蚀裂隙、溶蚀孔洞现象发育;物探揭示局部岩溶裂隙发育,溶洞发育等。在隧道施工过程中考虑溶洞的影响,进而采取合理的支护方案是进行安全施工的关键。为此建立数值模拟模型,并基于围岩支护特性理论,对考虑隐伏溶洞情况下选择合理的隧道支护时机进行研究。

2.2 计算模型

隧道开挖是三维问题,特别是考虑溶洞的影响。三维计算模型增加计算时间、降低计算效率,而二维模型可以近似地反映各因素的影响。为此首先建立二维模型,分析溶洞的影响特点;然后在三维模型条件下,研究岩溶隧道的支护时机。

本文考虑隐伏溶洞与隧道相对位置和隐伏溶

洞大小等因素的影响。为了便于分析,将溶洞形状简化为圆形(二维)或球形(三维)。主要参数如下: l_d 为溶洞与隧道之间的最短距离(净距); β 为溶洞和隧道中心连线与垂直线的夹角; d 为溶洞直径。考虑Ⅲ级和Ⅳ级围岩,计算参数见表 1 所列。二维条件下的分析模型(溶洞位于拱顶上方)如图 3 所示,三维条件下的分析模型(溶洞位于拱顶上方)如图 4 所示,隧道轮廓和监测点如图 5 所示,其中隧道为坦三圆形式,主要几何尺寸如下: $r_1 = 6.22 \text{ m}$ 、 $\theta_1 = 107.82^\circ$; $r_2 = 7.79 \text{ m}$ 、 $\theta_2 = 53.38^\circ$; $r_3 = 12.91 \text{ m}$ 、 $\theta_3 = 18.80^\circ$ 。为了更加切合岩体的实际强度,本构模型采用应变软化模型(strain-softening Mohr-Coulomb model),其中软化参数的取值方法参考文献[11],残余强度对应折减系数为 0.6。

表 1 围岩参数取值

围岩	重度/(kN/m ³)	杨氏模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
Ⅲ	25	6.0	0.25	0.70	39
Ⅳ	22	1.3	0.35	0.20	27

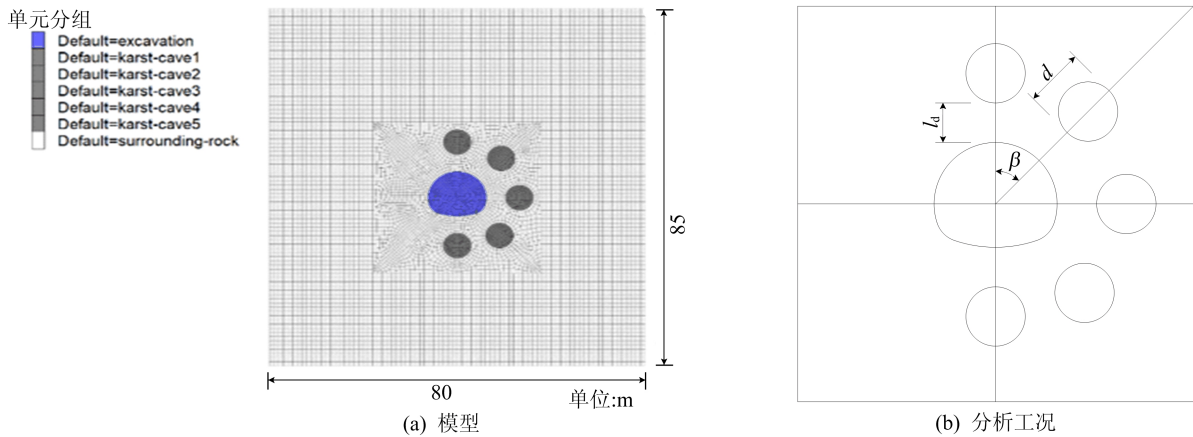


图 3 二维分析模型

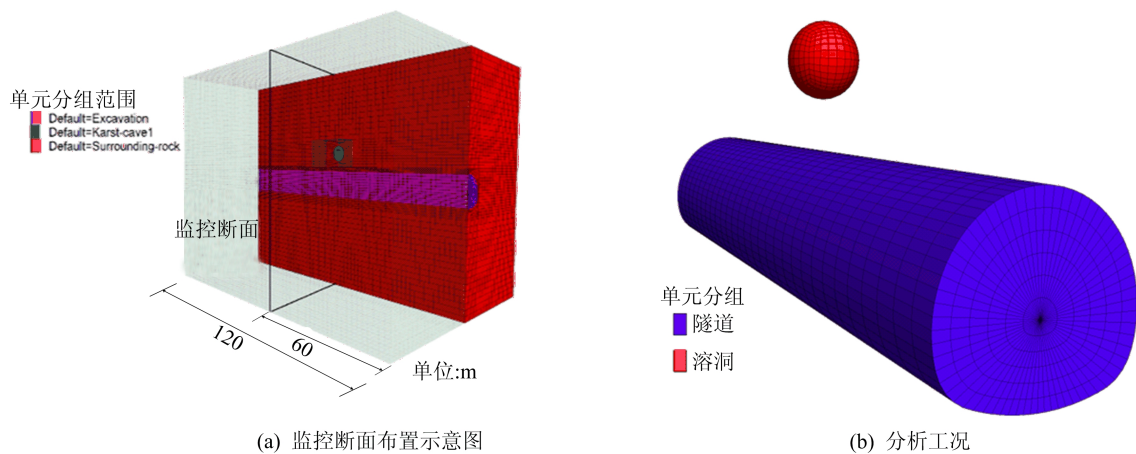


图 4 三维分析模型

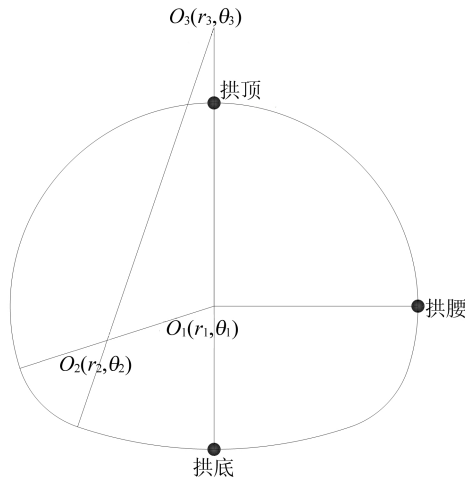


图 5 隧道轮廓和监测点

3 计算结果分析

参考隧道和溶洞的实际情况,选取 l_d 分别为

2、4、6 m,选取 β 分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° ,分别对应溶洞在隧道环向处所在的位置。 d 分别取 2、4、6 m。

3.1 围岩特征曲线分析

对于围岩特征曲线,可以通过控制应力得到变形,也可以通过控制变得到应力。由于在数值模拟中,对位移的控制难度远大于对应力的控制。因此,通常采用荷载释放系数法来获得围岩特征曲线。在 FLAC3D 中对模型进行开挖,通过读取临空面节点的不平衡力,将其乘以应力释放系数,再反加给各自节点,经过计算得到该应力释放率下的模型位移,应力释放率 λ 设置为 $0 \sim 100\%$ 。采用二维模型分析计算,并以拱顶位移为例,讨论溶洞各因素对围岩特征曲线的影响,如图 6 所示。

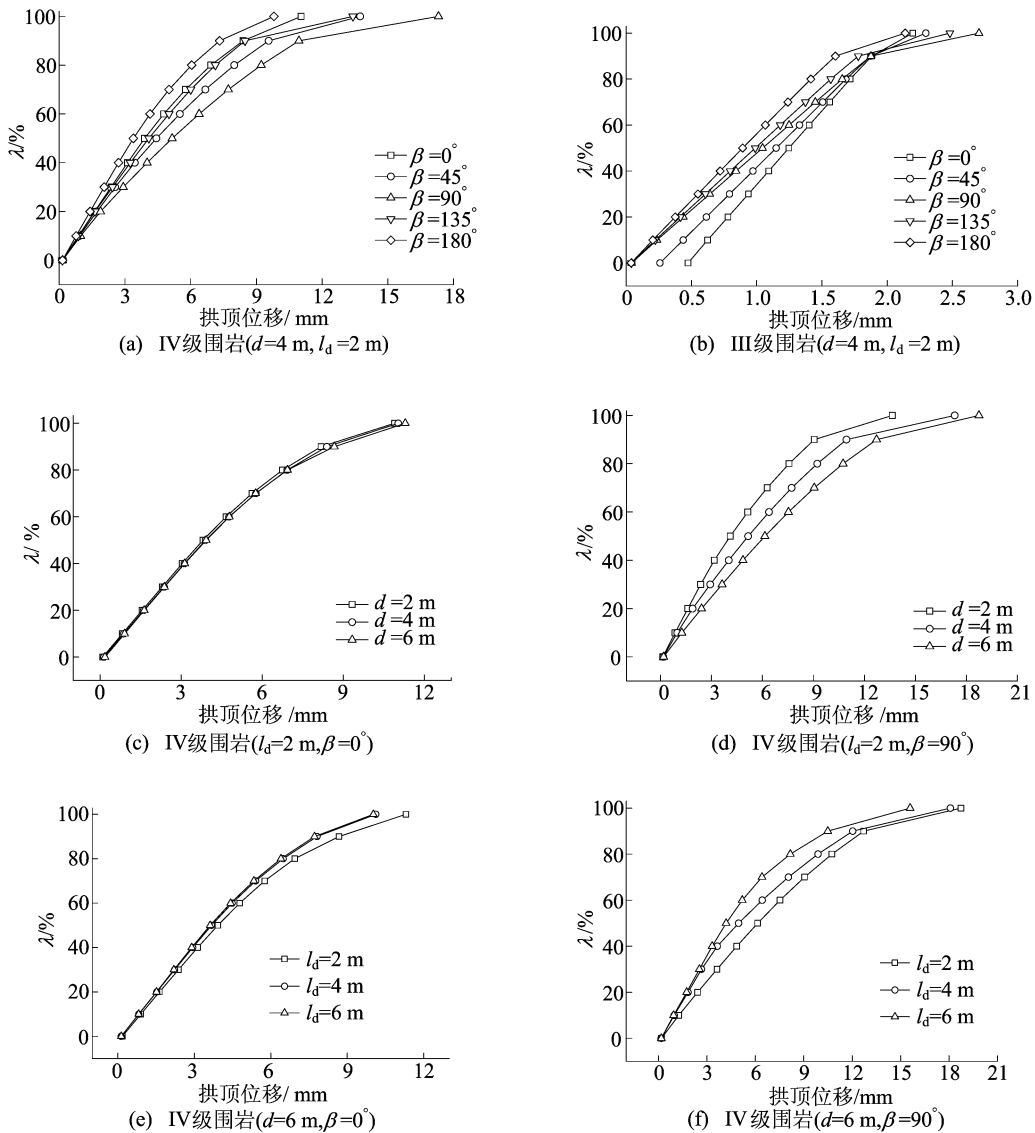


图 6 不同工况下围岩特征曲线

从图 6a、图 6b 可以看出,在应力释放率达到 90%之前,位移的变化较为平缓,且围岩性质越好,其位移变化曲线越接近线性。溶洞的环向位置对曲线的形式以及位移的最大值均具有较大的影响。Ⅳ级围岩条件下,位移最大值按从大到小对应的 β 分别为 90° 、 45° 、 135° 、 0° 、 180° ;Ⅲ级围岩条件下,位移最大值按从大到小对应的 β 分别为 90° 、 135° 、 45° 、 0° 、 180° 。最大位移均发生在溶洞位于 $\beta=90^\circ$,表明溶洞在拱腰位置对稳定性的影响更为显著。从图 6c、图 6e 可以看出,溶洞处于拱顶位置,溶洞直径 d 对位移曲线的影响不大,溶洞净距 l_d 在达到 4 m 之后,影响不明显。从图 6d、图 6f 可以看出,溶洞处于拱腰位置,溶洞直径 d 和溶洞净距 l_d 均对位移曲线表现出较明显的影响。此外,Ⅳ级围岩条件下,拱顶的位移曲线均表现出较明显的非线性。

综合来看,随着围岩性质变差,围岩特征曲线呈现更强的非线性,围岩更容易发生塑性变形。各因素中溶洞环向位置对稳定性的影响更为显著。

在Ⅳ级围岩, $l_d=4$ m、 $d=6$ m,工况 1($\beta=0^\circ$)、工况 2($\beta=90^\circ$)拱顶、拱腰、拱底 3 个监测点处的位移增量如图 7 所示。从图 7 可以看出,各监测点的位移增量趋势有较大的不同。图 7a 中,拱腰曲线表明应力释放率在 50%~60%之间位移发展速率增大,拱顶和拱底的曲线表明应力释放率在 60%~70%之间位移增加开始变快。图 7b 中,拱顶和拱腰曲线表明应力释放率在 20%~30%之间位移发展速率增大,拱底曲线表明应力释放率在 30%~40%之间位移增加开始变快。由此可以得出,较难单纯地以某一关键点的位移增速作为判断支护施做时机,因此,本文结合 Z_{SI} 指标来决定采用何监测点的围岩特征曲线作为支护施做时机的选择依据。

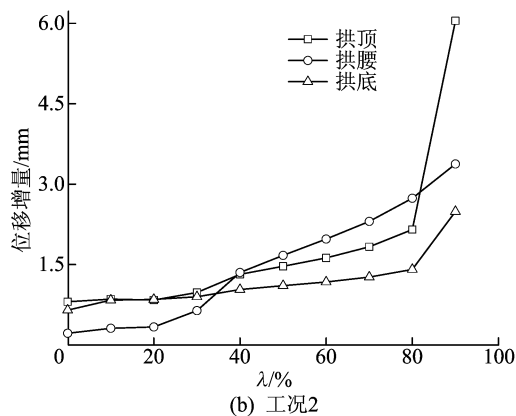
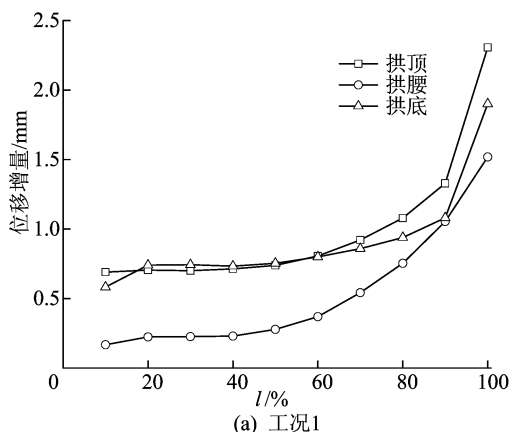


图 7 工况 1、工况 2 围岩各观测点位移增量

3.2 单元状态指标 Z_{SI} 分析

单元状态指标 Z_{SI} 的公式分为弹性阶段和屈服阶段,因此,在使用公式前,需要对单元体的状态进行判断。针对每个单元,FLAC3D 中的应变软化模型可判断其是否发生了塑性剪切应变和塑性拉伸应变。若发生塑性应变(包括剪切和拉伸),则采用式(2)计算 Z_{SI} ;反之采用式(1)计算。

工况 1、工况 2 的 Z_{SI} 结果如图 8 所示。图 8 将 Z_{SI} 简化为 4 个区段,即随着 Z_{SI} 的减小,单元块体颜色的加深,单元的状态越差。

图 8a 中,溶洞位于隧道上方。在应力释放率达到 50%时,拱腰两侧少量区域出现 $Z_{SI}<1.0$ 的情况,表明该区域的部分岩体进入屈服状态。随着应力释放率的增大,拱腰两侧屈服的区域逐步扩大;在应力释放率达到 70%时,拱腰两侧部分岩体达到破坏状态($Z_{SI}<0$),此时,洞室岩体可能会发生松动脱落,应尽量避免此类状况;在应力释放率达到 100%时,洞室屈服的区域与溶洞屈服的区域联通,可以预测隧道变形会呈现一定的突变。这与图 7a 中当应力释放率为 90%~100%时,隧道位移发生很快的增大可相互印证。综合上述情形可以判断,该工况下当应力释放率达到 60%时,应当及时进行支护,以控制围岩塑性变形进一步的发展。

图 8b 中,溶洞位于隧道拱腰位置处。在应力释放率达到 30%时,靠近溶洞侧拱腰位置少部分岩体发生屈服;当应力释放率达到 40%时,屈服区域与溶洞区域已经发生联通。因此,在此情况下,隧道不稳定状态发展很快,需要尽快进行处理。其后,随着应力释放率的进一步增大,围岩破坏情况越发严重。因此,综合上述情况可以判断,该工况下当应力释放率达到 30%时,应当及时进行支护,以限制屈服区域的快速发展。

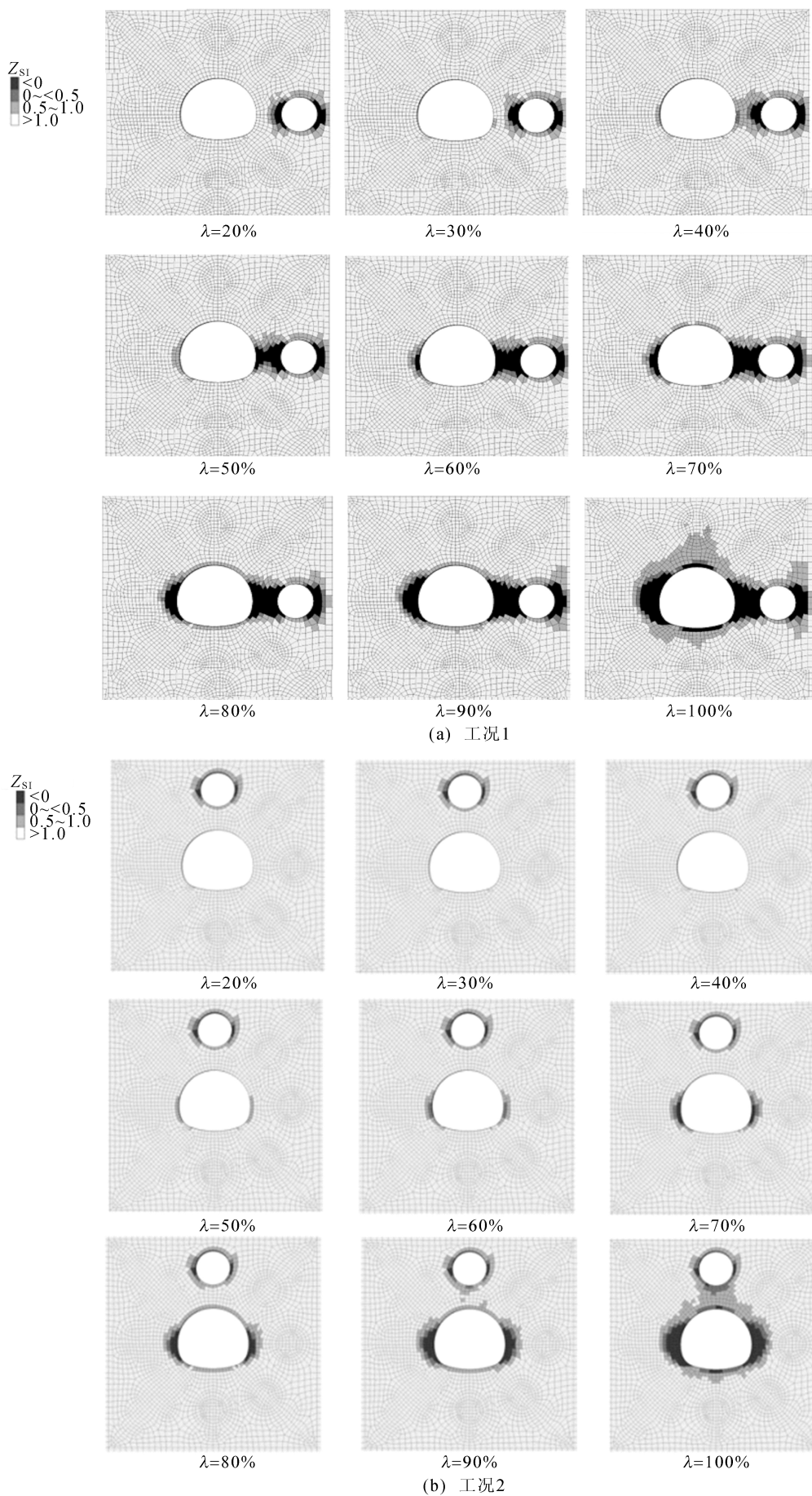


图 8 工况 1、工况 2 不同释放率条件下单元状态指标

结合图7和本节的描述,对于工况1,当溶洞位于隧道上方时,拱顶或拱底的围岩特征曲线较能表现出隧道围岩稳定性的发展特征,因此选择该曲线与LDP曲线进行耦合;对于工况2,当溶洞位于隧道拱腰位置时,拱腰的围岩特征曲线较能表现出隧道围岩稳定性的发展特征,因此选择该曲线与LDP曲线进行耦合。

3.3 隧道支护时机的选择

LDP曲线是开挖步与围岩特征点曲线之间的关系,GRC曲线是应力释放率与围岩特征点曲线之间的关系。前文确定了施加支护所对应的应力释放率,本文借助LDP曲线和GRC曲线,确定施加支护所对应的开挖步。在FLAC3D三维模型中,通过循环进尺开挖,获得目标断面特征点随开挖行进的位移,从而绘制LDP曲线。

2种工况下的LDP与GRC耦合曲线如图9所示。

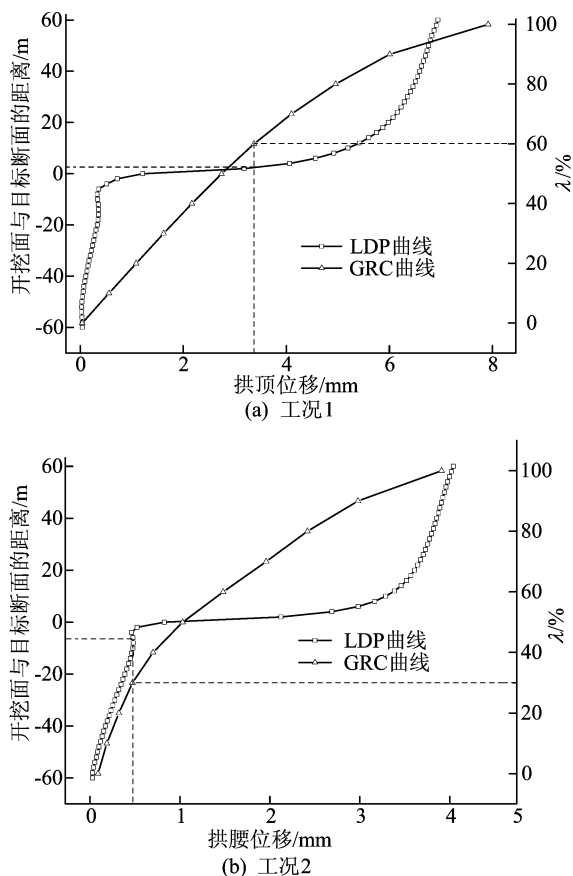


图9 2种不同工况下LDP与GRC耦合曲线

从图9可以看出,由于隧道纵向的约束作用,目标断面在临近开挖面之前,位移基本不变;在临近开挖面时,位移开始增大;当进行开挖以后,位移发生突变,并随着开挖前进,位移逐渐发展,最

终趋于稳定。综合LDP、GRC曲线,对于工况1,将拱顶位移作为耦合曲线的同一因变量;对于工况2,将拱腰位移作为耦合曲线的同一因变量。通过上述分析可知,对于工况1,应力释放率60%时应及时施做支护。此时,对应的拱顶位移为3.58 mm,对应的开挖面距目标断面的距离约为2.50 m。这表明目标断面开挖后,隧道再向前掘进2.50 m时,应及时施做目标断面处的支护。对于工况2,应力释放率30%时应及时施做支护,此时,对应的拱腰位移为0.46 mm,对应的开挖面距目标断面的距离为6 m。这表明隧道应超前掌子面6 m进行支护,计算所得结果符合实际工程规律。

4 结 论

本文以隐伏岩溶隧道为研究对象,基于收敛约束原理和单元状态指标 Z_{SI} 给出确定初期支护施做时机的方法,主要结论如下。

- 1) 相对于溶洞直径和溶洞与隧道净距,溶洞环向位置对隧道稳定性的影响更加明显。
- 2) 由于溶洞引起的受力不均匀,隧道不同位置处的位移发展速率有所不同,因此,较难单纯地以某一关键点的位移增速作为判断支护施做时机。
- 3) 单元状态指标 Z_{SI} 能够直观地展现隧道稳定性的发展趋势,因此可结合 Z_{SI} 来决定隧道支护的施做时机,以及判断采用何监测点的GRC作为支护施做时机的选择依据。
- 4) 以GRC和LDP耦合分析可以将应力释放率转换为支护控制间距,所得的支护与掌子面的控制距离便于指导施工。

【参 考 文 献】

- [1] 张京亮,夏志杰,刘新荣,等. 隐伏溶洞影响下隧道开挖稳定性数值模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5455-5462.
- [2] 李明达,张昱,周晶. 岩溶位置及组合效应对隧道的地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 472-479.
- [3] 孙江涛,李志堂,袁敬强,等. 隧道穿越大型充填溶洞超前综合探测与处治技术[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 416-425.
- [4] 于丽,吕城,汪主洪,等. 上伏溶洞下深埋隧道塌落破坏的上限分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 209-219.
- [5] 陈磊. 软弱围岩地层CD法施工隧道稳定性研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 424-430.
- [6] SUN K, HONG Y, XU W, et al. Analysis and prediction of the mechanical behavior of corrugated plate as primary support in

- tunnels with elastoplastic constitution[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 124:104451.
- [7] GANGRADE R M, GRASMICK J G, MOONEY M A. Probabilistic assessment of void risk and grouting volume for tunneling applications[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(5):2771-2786.
- [8] 张子龙, 姜谔男, 吴洪涛, 等. 基于收敛约束法和 ZSI 的隧道初期支护时机研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(4):41-47.
- [9] 梁鹏, 高永涛, 周喻, 等. 隧道初支合理支护时机确定方法及其工程应用[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(2):265-276.
- [10] WU K, SHAO Z, SHARIFZADEH M, et al. Analytical computation of support characteristic curve for circumferential yielding lining in tunnel design[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(1):144-152.
- [11] 马春景, 姜谔男, 江宗斌, 等. 基于单元状态指标的盾构隧道水力耦合模拟分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(6):1762-1770.

(责任编辑 张 镗)

(上接第 966 页)

有定价权相比, 转移价格定价权向回收商的转移能够有效阻止回收商制定较高的转移价格, 保障了制造商的收益; 最后分析竞争水平对均衡决策性质的影响, 结果表明, 通过确定回收竞争和新产品与再制造产品竞争的阈值区间, 即可判断均衡决策随新零部件价格(回收核心零部件的处理收益)的变化规律。

考虑到模型只包含一个制造商和一个第三方回收商, 未来可探究引入新零部件供应商对供应链决策的影响等更加复杂的模型。

[参 考 文 献]

- [1] ZHAO S L, ZHU Q H. Remanufacturing supply chain coordination under the stochastic remanufacturability rate and the random demand[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 257:661-695.
- [2] JIN M Y, NIE J J, YANG F, et al. The impact of third-party remanufacturing on the forward supply chain: a blessing or a curse? [J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(22): 6871-6882.
- [3] KARAKAYALI I, EMIR-FARINAS H, AKCALI E. An analysis of decentralized collection and processing of end-of-life products[J]. *Journal of Operations Management*, 2007, 25(6):1161-1183.
- [4] FERRER G, SWAMINATHAN J M. Managing new and differentiated remanufactured products[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203(2):370-379.
- [5] 陈菊红, 史成东, 郭福利. 第三方负责回收再制造闭环供应链契约设计[J]. *工业工程与管理*, 2010, 15(2):21-25.
- [6] 李凌雁, 高阳. 基于回收竞争的闭环供应链再制造授权策略研究[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(8):223-229.
- [7] 王能民, 孙青林, 孙林岩. 考虑外包的单产品再制造批量决策[J]. *运筹与管理*, 2011, 20(5):162-168.
- [8] 郑本荣, 杨超, 杨珺. 回收模式对制造商渠道入侵策略的影响[J]. *管理科学*, 2019, 32(3):92-105.
- [9] 杨爱峰, 陈鹭, 胡小建, 等. 两阶段闭环供应链的新产品和再制造产品最优定价模型[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(12):1-10.
- [10] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2):239-252.
- [11] 曹東, 杨晓丽, 吴思思, 等. 考虑再制造成本的闭环供应链回收渠道决策[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(1):152-160, 179.
- [12] 李响, 李勇建. 多再制造商回收定价竞争博弈[J]. *管理工程学报*, 2012, 26(2):72-76.
- [13] 赵晓敏, 林英晖, 苏承明. 不同渠道权力结构下的 S-M 两级闭环供应链绩效分析[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(2):78-86.
- [14] JUNG K S, HWANG H. Competition and cooperation in a remanufacturing system with take-back requirement[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(3):427-433.
- [15] 黄宗盛, 聂佳佳, 赵映雪. 再制造闭环供应链产品回收合作模式研究[J]. *管理工程学报*, 2019, 33(3):147-152.
- [16] 刘志, 李帮义, 汪磊, 等. 差异化竞争下考虑再制造专利许可的闭环供应链生产决策[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(5):66-74.
- [17] 司文静, 马军海. 再制造闭环供应链系统的合作分析[J]. *工业工程*, 2013, 16(1):86-90, 109.
- [18] 程永伟. 考虑消费者偏好的再制造决策[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(增刊1):214-219.
- [19] WANN N, HONG D J. The impacts of subsidy policies and transfer pricing policies on the closed-loop supply chain with dual collection channels[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224:881-891.
- [20] LI B Y, WANG Y, WANG Z. Managing a closed-loop supply chain with take-back legislation and consumer preference for green design-science direct[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282:124481. 1-124481. 11.
- [21] Qi A Y, AHN H S, SINHA A. Investing in a shared supplier in a competitive market: stochastic capacity case[J]. *Production & Operations Management*, 2015, 24(10):1537-1551.

(责任编辑 张 镗)