

锚杆系统中不同垫板形式及各参数影响研究

陈家征^{1,2},李忠^{1,2*}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,河北 石家庄 050043)

摘要: 以力学理论为基础,根据垫板在荷载作用下的承载性能,建立平板和碗形垫板的承载力理论公式,通过建立“垫板-围岩”三维数值模型,分析荷载作用下垫板形式及结构参数对垫板承载性能的影响,优选出适配锚杆的垫板形式及结构参数。结果表明:在300 kN荷载作用下,锚杆系统若选用碗形垫板,参数应为:尺寸300 mm×300 mm×180 mm,拱高35 mm,孔口半径34 mm,碗底半径60 mm;若选用平板垫板,参数应为:尺寸280 mm×280 mm×255 mm,开孔直径26 mm,锚具半径64 mm。在荷载作用下碗形垫板控制围岩变形效果更好。

关键词: 锚杆系统;承载性能;垫板形式;影响参数;数值模拟

中图分类号:TU4

文献标识码:A

Research on the Influence of Different Backing Plate Forms and Various Parameters in the Bolting System

CHEN Jiazheng^{1,2}, LI Zhong^{1,2*}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Based on the theory of mechanics, theoretical bearing capacity formulas for flat and bowl shaped pads are established according to the bearing performance of the pad under load. By establishing a three-dimensional numerical model of “pad rock”, the influence of pad form and structural parameters on the bearing performance of the pad under load is analyzed, and the pad form and structural parameters suitable for anchor bolts are selected. The results show that under a load of 300 kN, if a bowl shaped cushion plate is selected for the anchor system, the parameters should be 300 mm×300 mm×180 mm, arch height of 35 mm, aperture radius of 34 mm, and bowl bottom radius of 60 mm; If a flat pad is selected, the parameters should be 280 mm×280 mm×255 mm, with a hole diameter of 26 mm and an anchor radius of 64 mm. The bowl shaped cushion plate has a better effect on controlling the deformation of surrounding rock under load.

Key words: rockbolting systems; bearing performance; plate form; influencing parameters; numerical simulation

随着我国经济的快速发展,隧道和煤矿巷道的修建数量日趋增多。但复杂的围岩地质、水文等条件使得巷道等结构稳定性下降,因此使用支护措施来保证围岩结构稳定至关重要。在巷道工程施工时,锚杆系统因具有施工简单、锚固强度高

及可施加预应力等特点,在现场应用中可有效调动、提升岩体的自承载性能,是一种高效的围岩变形控制措施^[1-2],而锚杆系统想要发挥最大化的支护性能,对其各构件间相互匹配的力学性能进行研究愈显重要^[3-4]。垫板作为锚杆系统最基本的

收稿日期:2023-11-22

基金项目:国家自然科学基金-青年科学基金资助项目(41804145)

第一作者:陈家征(1998—),男,安徽芜湖人,硕士,从事地质灾害超前预报及隧道地下工程方向的研究。

* 通信作者:李忠(1968—),男,河北石家庄人,博士,教授,从事地质灾害超前预报及隧道地下工程方向的研究。

组成构件,其力学作用对控制应力范围扩散、围岩表面变形破坏等方面至关重要。因此,研究其承载力与锚杆杆体承载能力的合理匹配是正确选择合适垫板规格的重要依据。

目前为止,众多专家学者采取多种手段对锚杆垫板的力学承载性能进行了大量研究。王祥厚等^[5]研究了圆平面垫板和围岩相互作用的解析解;孟繁金等^[6-7]采用弹性理论对蝶形锚杆托盘进行内力分布状态分析,提出托盘的失稳判据,并研究了各参数对托盘强度的影响。在数值模拟方面,王开松等^[8]通过 ANSYS 有限元模拟,研究不同材料和厚度下托盘的强度;Kang 等^[9]研究了有、无球形垫圈作用下碗形垫板承载能力的差异。吴建星等^[10]利用测力托板对其受力变形状态、应力分布及巷道支护效果进行了全面研究;袁溢等^[11-12]对全长锚固锚杆实际承载中的托板效应开展了详细研究;明治清等^[13]通过现场试验探讨了 2 种形式锚杆垫板在爆炸条件下对洞室的加固效果;王书文等^[14]采用伺服压力试验机 and 落锤冲击试验机研究了不同参数垫板的静、动载力学特性;林健等^[15]基于大型锚杆支护应力场测试试验,分析垫板端在预应力加载过程中的应力扩散效应。Cui 等^[16]研究指出全长黏结锚杆中垫板对锚杆的支护效应具有重要作用。Seegmiller 等^[17-18]在其申请的专利中详细介绍了锚杆支护装置的各组成构件和承载板的安装方法。

从上述研究可以看出,目前大多数研究都是基于托板自身拱壳结构的承载性能,而忽略了锚杆与不同类型垫板相匹配的适用性研究;研究对象普遍以碗形垫板为主,对隧道工程中常用的平板垫板研究较少,对垫板影响参数分析仍不全面。因此,本文以碗形垫板和平板垫板为研究对象,建立以承载性能为基础的极限承载力公式,并提供一种选择垫板适宜参数的设计方法。本研究可为提高锚杆系统的可靠性提供理论支持,并为锚杆

的适配垫板参数选择提供参考。

1 碗形垫板结构力学分析

为防止碗形垫板因隧道围岩表面凹凸不平而导致锚杆在施加预应力时造成的不利偏载损伤,大多数碗形垫板加工厂都配备调心球垫来保障锚杆承受轴向荷载。为合理计算碗形垫板的承载力,基本假设如下:(1)将碗形垫板凸拱结构视为半径为 R 的部分球壳;(2)碗形垫板壳顶通过调心球垫传递锚杆螺母施加的轴向荷载 P ;(3)碗形垫板底部边界为铰支固定;(4)垫板金属材料满足 Tresca 屈服准则。

1.1 承载力计算关系式

图 1 为碗形垫板力学计算模型,基于弹性力学薄壳理论与轴对称无矩计算方法^[19],建立对称轴方向的运动平衡方程,求解壳面任一点 M 上经、纬线上的线荷载 N_1 和 N_2 :

$$N_1 = P/2\pi R \sin^2 \alpha_M \quad (1)$$

$$N_2 = -P/2\pi R \sin^2 \alpha_M \quad (2)$$

式中, N_1 为经线上的线荷载, kN/mm ; N_2 为纬线上的线荷载, kN/mm ; P 为轴向荷载, kN ; R 为球形垫板半径, mm ; α_M 为轴向偏心角度, $(^\circ)$ 。

关于碗形垫板的主要破坏模式,大量的专家学者通过实验室加载试验和垫板的现场应用均表明^[20],碗形垫板破坏模式主要为结构的不断屈服,具体表现为当碗形垫板匹配的调心球垫承受不断增大的轴向压载时,首先在托板顶孔 α' 处开始屈服,随后逐步向拱下部传递,最后在碗拱底部 α'' 处达到屈服破坏。因此,式(1)(2)中 α_M 越小,经、纬线上线荷载越大,垫板底部承受的荷载增大,发生屈服现象。所以碗形垫板中球壳结构的存在使得托板的整体屈服失稳临界点发生在与平板接触的拱底部。则凸底部最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 计算公式为

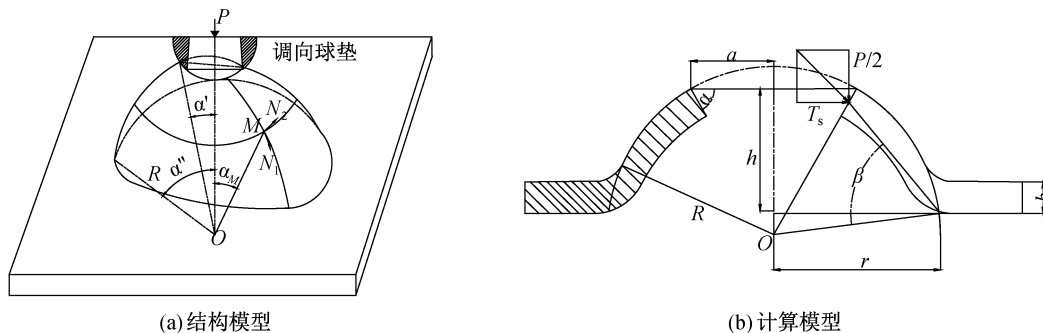


图 1 碗形垫板受力简图

Fig. 1 Stress diagram of bowl-shaped cushion plate

$$\sigma_1 = P/2\pi b \sin^2 \alpha'' \quad (3)$$

$$\sigma_3 = -P/2\pi b \sin^2 \alpha'' \quad (4)$$

根据假设(4)可知,碗形垫板凸拱底部发生屈服需满足的条件是达到最大容许剪应力 τ_s ,碗形垫板承载力理论公式为

$$\tau_s = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \sigma_s/2 \quad (5)$$

$$P_s = \pi b \sigma_s r^2 / R \quad (6)$$

$$R = \sqrt{r^2 + \left(\frac{r^2 - a^2 - h^2}{2h}\right)^2} \quad (7)$$

$$\sqrt{R^2 - a^2} > h \quad (8)$$

式中: σ_s 为钢板实际屈服强度,MPa; b 为垫板厚度,mm; a 为孔口半径,mm; h 为拱高,mm; r 为碗底半径,mm。

1.2 各参数影响分析

根据式(6)可知,影响碗形垫板承载力的 5 个参数分别为:钢板屈服强度、垫板厚度、拱高、碗底半径和孔口半径。其中钢板屈服强度是钢板固有属性,而拱高、碗底半径和孔口半径共同确定球壳半径 R 。利用 MATLAB 绘制各参数对碗形垫板承载力的影响曲线,如图 2 所示。结合现场锚杆(索)支护施工应用情况^[21-22]对各参数进行详细分析:

1.2.1 钢板屈服强度

由式(6)可知,碗形垫板承载力与所用钢板屈服强度 σ_s 呈正比例关系。目前大多数垫板加工厂使用的主要为 Q235 钢,其屈服强度下限为 235 MPa。

1.2.2 垫板厚度

在其他参数不变时,随着垫板厚度的增加,碗形垫板承载力呈线性增长。但考虑到材料经济成本等因素,我国大多数使用的锚杆垫板厚度在 6~12 mm 之间,锚索垫板厚度为 12~16 mm。

1.2.3 拱高

在其他参数不变时,随着拱高的增加,碗形垫板承载力成先逐渐增大后趋于稳定的正相关关系。原因在于:拱高增加可使得拱底角 β 增大,从而使孔口法向压力分解到球垫上的竖直分量增大,直接提高垫板整体承载力。实际加工时,在不增大钢板成本投入的前提下,增加拱高是提高垫板承载力最直接经济有效的途径,但考虑到加工难度的随之提高,拱高一般设定为 20~40 mm。

1.2.4 碗底半径

在其他参数不变时,随着碗底半径的增加,碗形垫板承载力呈先快速增加后逐渐变缓的变化趋势。同时碗底半径 r 增大必然导致球壳半径 R

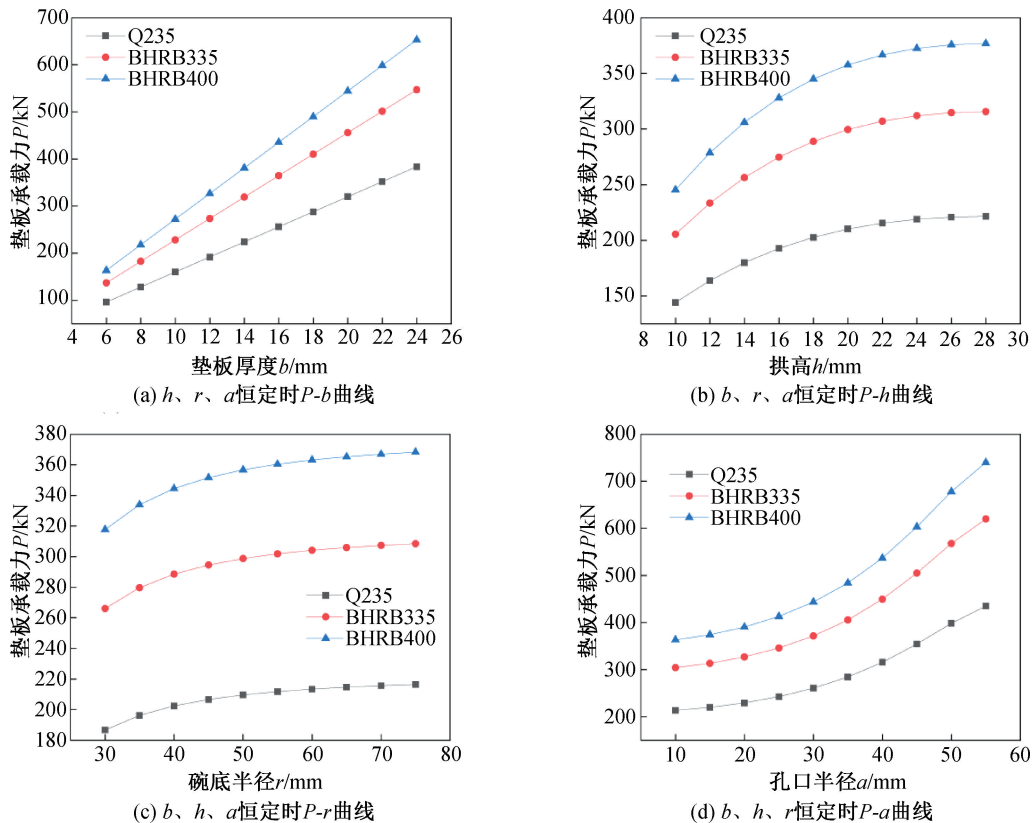


图 2 各参数对碗形垫板承载力的影响关系

Fig. 2 Influence relationship of various parameters on the bearing capacity of bowl-shaped cushion plates

减小,间接增大拱底角 β ,从而使法向压力分解到球垫上的竖直分量增大,有效提高垫板整体承载力。但考虑到需要一定的护表面积与施加预应力,碗底到垫板边缘的距离应大于3 cm,宜大于5 cm。

1.2.5 孔口半径

在其他参数不变时,随着孔口半径的增加,碗形垫板承载力呈不断增加的趋势。原因在于:孔口半径适度变大可增大孔口接触面积,在一定程度上能提高承载力;但是一味地增大孔口半径 a 必然使得拱高 h 降低,增大配套调向球垫的尺寸规格,此外,大多数垫板厂采用冷冲压制成技术,孔口较大易造成孔口撕裂损伤,严重影响垫板承载力。故针对不同厚度的钢板,托板加工冲孔或钻孔直径应取28~40 mm。

2 平板垫板结构力学分析

2.1 承载力计算关系式

如图3所示,根据平板垫板受力简图,基本假设如下:(1)平板垫板为圆形薄板,半径为 R_2 ,开孔半径为 R_0 ,压紧在垫板上的锚具半径为 R_1 ;(2)作用在锚具内垫板上的荷载为均布荷载 q ,锚具外垫板上的荷载为三角荷载,最大值为 q ;(3)因锚具对垫板的压紧作用,将A点设为固支条件。

环形薄板在三角荷载作用下的极限荷载计算公式^[22]:

$$\frac{R_2^2 q}{12M_p} = \frac{1}{(1+\beta)(1-\beta)^2} \quad (9)$$

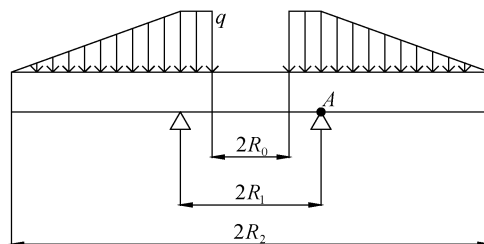
$$M_p = \frac{[\sigma]b^2}{12} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

$$q = \frac{[\sigma]t^2}{R_2^2(1+\beta)(1-\beta)^2} \quad (12)$$



(a) 结构模型



(b) 计算模型

图3 平板垫板受力简图

Fig. 3 Stress diagram of flat plate

$$P = \frac{\pi[\sigma]b^2[(R_2^2 - R_1^2)/2 + (R_1^2 - R_0^2)]}{R_2^2(1+\beta)(1-\beta)^2} \quad (13)$$

式中: M_p 为弯矩,kN/m; $[\sigma]$ 为钢材的极限抗拉(压)强度,MPa; R_0 为开孔半径,mm; R_1 为锚具半径,mm; R_2 为垫板半径,mm。

2.2 影响参数分析

根据式(13)可知,影响平板垫板承载力的参数分别为:钢材的极限抗拉(压)强度、垫板厚度、开孔半径、锚具半径和垫板半径。其中钢材的极限抗拉(压)强度是钢板固有属性。利用MATLAB绘制各影响参数对平板垫板承载力的影响曲线,如图4所示。

结合现场锚杆(索)支护施工工程应用情况分析如下:平板垫板承载力与所用钢板极限抗拉(压)强度 $[\sigma]$ 呈正比例关系。平板垫板承载力与垫板厚度成平方指数正相关。由图4可知,垫板厚度的增加使得平板垫板承载力快速增加;但考虑到材料经济成本等因素,我国大多数使用的锚杆垫板厚度在6~12 mm之间,锚索垫板厚度为12~16 mm。随着开孔半径的增大,平板垫板承载力逐渐下降。随着锚具半径的增大,平板垫板承载力逐渐增加。随着垫板半径的增大,平板垫板承载力呈缓慢减小趋势。

3 锚索垫板承载性能需求参数分析

3.1 垫板承载力确定

根据MT/T 942—2005《矿用锚索》^[23]规定,锚索设计应符合以下要求:(1)针对托板承载力 P ,其应不小于锚索设计承载力 F 的1.5倍,即 $P \geq 1.5F$ 。(2)针对托板形式,宜选用碗形垫板,其规格尺寸应不小于150 mm×150 mm(方形)或 $\phi 150$ mm

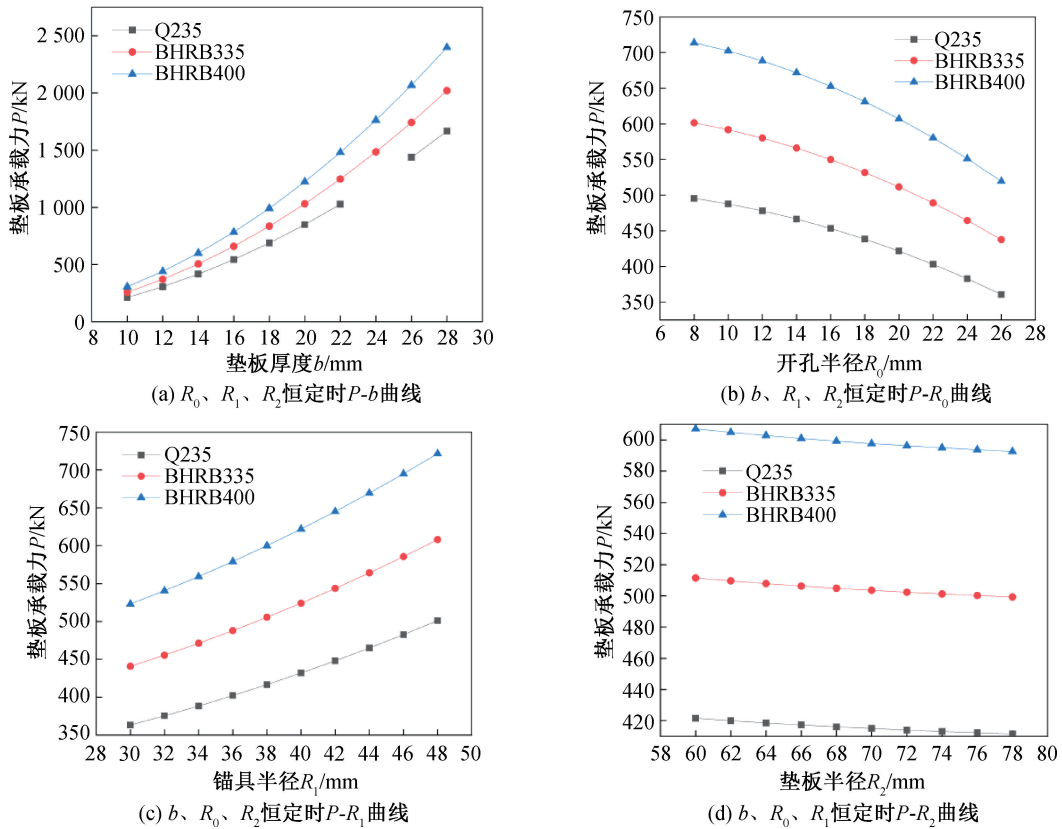


图 4 各参数对平板垫板承载力的影响关系

Fig. 4 Influence of each parameter on the bearing capacity of the flat plate pad

(圆形);若选用平板垫板,其厚度不小于 15 mm。托板中心孔径比钢绞线公称直径大 2~4 mm。

矿用锚索设计承载力计算式:

$$F = m \times n \times S_n \times R_m \quad (14)$$

式中: m 为矿用锚索张拉应力控制系数,其值不大于 0.6; n 为钢绞线根数; S_n 为单根钢绞线参考截面面积, mm^2 ; R_m 为钢绞线抗拉强度,MPa。

以木寨岭公路隧道为工程背景,因项目前期垫板承载性能未能有效和加载荷载相匹配,使得垫板破坏现象频繁出现,故其采用高强预应力锚索系统,索体选用由 19 股线制成的无黏结钢绞线,直径为 21.8 mm,抗拉强度 R_m 为 1 860 MPa,计算该锚索的设计承载力 $F = 0.6 \times 1\ 860 \times 313 / 1\ 000 = 349.3\ \text{kN}$,即托板承载力 $P \geq 1.5F = 524\ \text{kN}$ 。针对托板承载力,分别计算采用碗形垫板和平板垫板下的垫板参数。

3.2 碗形垫板承载力下参数确定

结合碗形垫板的设计参数,采取以下设定:(1)采用 Q235 钢,屈服强度 $\sigma_s = 235\ \text{MPa}$;(2)垫板厚度 b 分别采用 10、12、14、16、18 mm;(3)考虑加工难度,拱高 h 分别采用 20、25、30、35 mm;

(4)因锚具(KM22-1860)半径为 32 mm,因此孔口半径为 34 mm;(5)结合碗形托板形式基本要求,碗底半径采用 50、55、60、65 mm;(6)因式(6)基于理想薄壳理论构建,但在碗形垫板实际加工过程中,采用冷冲压制成形,碗底与孔口等均会存在损伤,同时制作完成的碗形结构也并非理想球壳结构,因此,采用式(6)进行碗形垫板理论承载力计算普遍高估 20%左右,故可将其理论承载力进行一定折减,折减系数为 0.75,以此来确定实际承载力,如图 5 所示。

考虑垫板承载力 $P \geq 524\ \text{kN}$,由图 5 可知,得到如下结论:(1)碗底半径为 50 mm 时,无法满足承载力要求;(2)碗底半径为 55、60、65 mm 时,拱高 h 为 30、35 mm,厚度 $b \geq 18\ \text{mm}$ 满足承载力要求;综合垫板加工难度、经济等因素,选择碗形垫板结构参数为 $r = 60\ \text{mm}$ 、 $h = 35\ \text{mm}$ 、 $b = 18\ \text{mm}$ 。

3.3 平板垫板承载力下参数确定

结合平板垫板的设计参数,采取以下设定:(1)采用 Q235 钢,极限抗压强度 $[\sigma] = 375\ \text{MPa}$;(2)垫板厚度 b 分别采用 15、20、25、30、35 mm;(3)锚索直径为 21.8 mm,锚具直径为 64 mm,采用

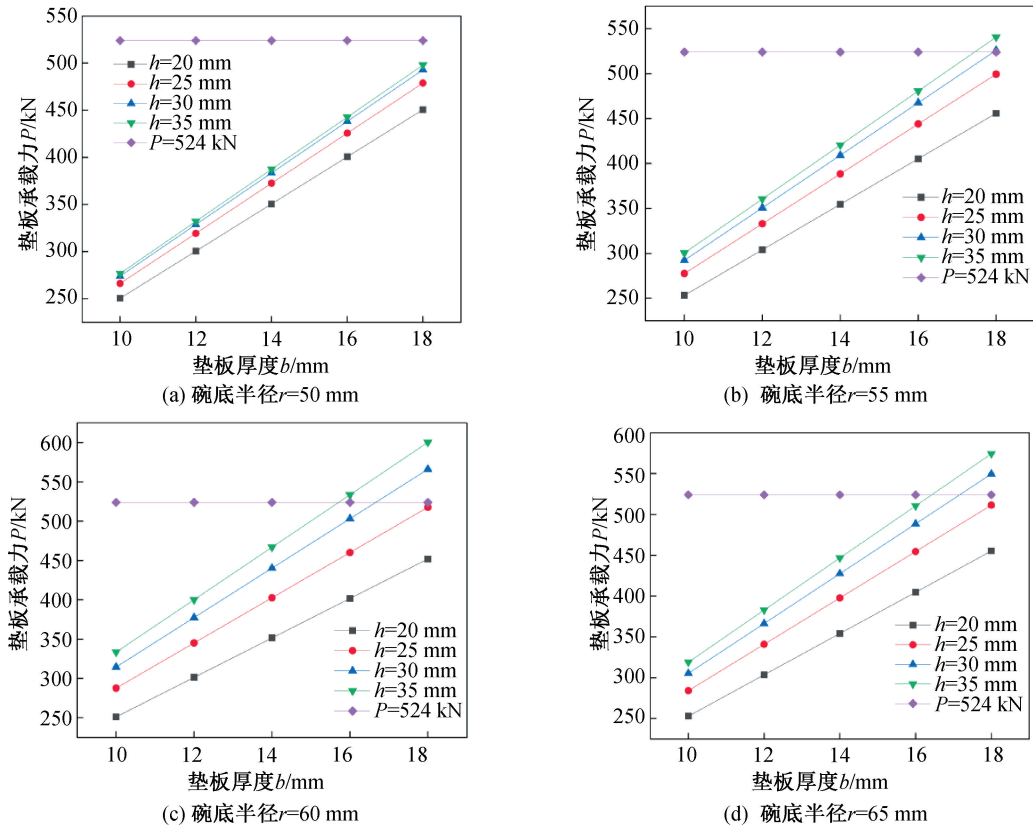


图5 碗形垫板结构参数下实际承载力

Fig. 5 Actual bearing capacity under bowl-shaped cushion structure parameters

开孔直径为 26、30、34、38 mm; (4) 垫板半径采用 80、100、120、140、160 mm。

考虑垫板承载力 $P \geq 524$ kN, 由图 6 可知, 垫板半径为 80、100、120 mm 时, 垫板厚度 $b \geq 25$ mm, 各开孔半径下均满足承载力要求; 垫板半径为 140、160 mm 时, 垫板厚度 $b \geq 30$ mm, 各开孔半径下均满足承载力要求, 但仍需综合垫板加工难度等因素, 选择合适的结构参数。

4 受荷作用下不同垫板形式数值分析

基于对不同垫板形式下承载性能的分析, 得到满足承载力的垫板结构参数, 但需对各参数进行优化比选, 同时对不同垫板形式下的破坏模式进行分析。故建立轴向加载状态下的“垫板-围岩”三维数值模型, 分析应力扩散效果和承载性能, 实现对垫板类型及参数的优选。

4.1 模型建立及参数设置

碗形垫板结构参数如下: 平面尺寸设为五种: 200 mm \times 200 mm、250 mm \times 250 mm、300 mm \times 300 mm、350 mm \times 350 mm、400 mm \times 400 mm, 其余

参数见 3.2 节。平板垫板结构参数见 3.3 节, 具体计算工况见表 1。

围岩尺寸取为 2 m \times 2 m \times 2 m, 建立无初始应力下的三维数值模型。采用六面体单元进行网格划分, 围岩网格尺寸为 0.05 m, 对垫板网格进行局部加密, 尺寸为 0.01 m, 同时考虑荷载影响, 施加竖向荷载为 300 kN。碗形垫板施加垂直作用孔口壁, 平板垫板施加垂直作用锚具区, 如图 7 所示。根据木寨岭隧道地勘资料及公路隧道规范, 围岩等级为 V 级, 采用 M-C 模型, 垫板采用弹性模型, 具体参数见表 2。

4.2 计算结果分析

4.2.1 竖向位移

从图 8 可知, 碗形垫板下 4 种工况的竖向位移最大值均出现在孔口处, 且随着垫板尺寸的增大, 最大竖向位移逐渐减小, 分别为 -7.21、-6.89、-6.49、-6.40 mm, 且碗形结构的竖向位移均为负值, 同时随着与碗壁的距离增大, 竖向位移逐渐减小, 并由负值变为正值, 即在碗形垫板中, 碗壁周围逐渐受压并在侧边出现轻微上翘现象, 其中

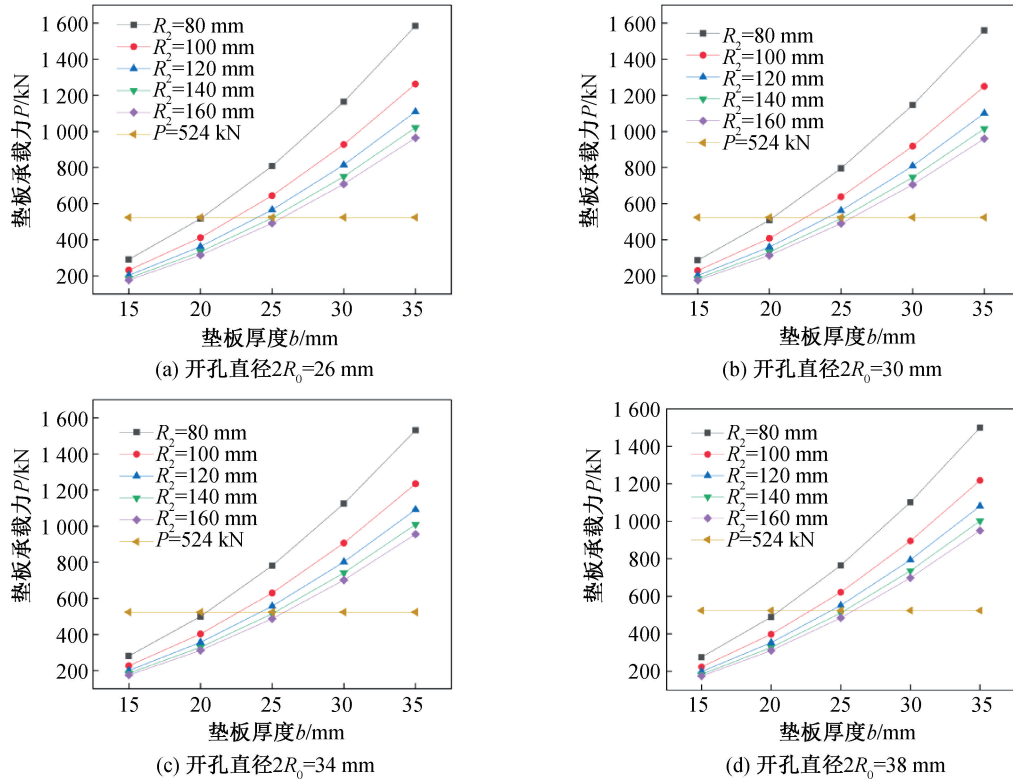


图 6 平板垫板结构参数下实际承载力

Fig. 6 Actual bearing capacity under the structural parameters of flat cushion plate

表 1 不同参数下碗形垫板承载力计算值

Tab. 1 Calculation values of bearing capacity of bowl-shaped cushion under different parameters

垫板类型	工况	平面尺寸 $a_1 \times a_2 / \text{mm} \times \text{mm}$	厚度/mm	其余参数/mm
碗形	1-1	200×200	18.0	拱高 $h = 35$ 碗底半径 $r = 60$ 孔口半径 $a = 34$
	1-2	250×250	18.0	
	1-3	300×300	18.0	
	1-4	350×350	18.0	
	2-1	160×160	20.5	
平板垫板	2-2	200×200	23.0	开孔直径 $R_0 = 26$ 锚具直径 $R_1 = 64$
	2-3	240×240	24.5	
	2-4	280×280	25.5	

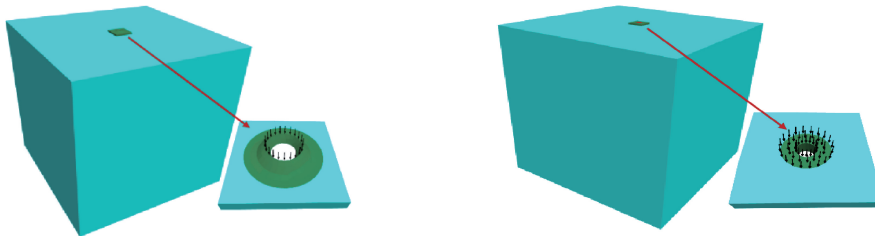


图 7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

表 2 围岩材料参数表

Tab. 2 Parameters of surrounding rock materials

材料	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
围岩	2 100	2	0.35	0.5	28
垫板	7 850	200	0.20	—	—

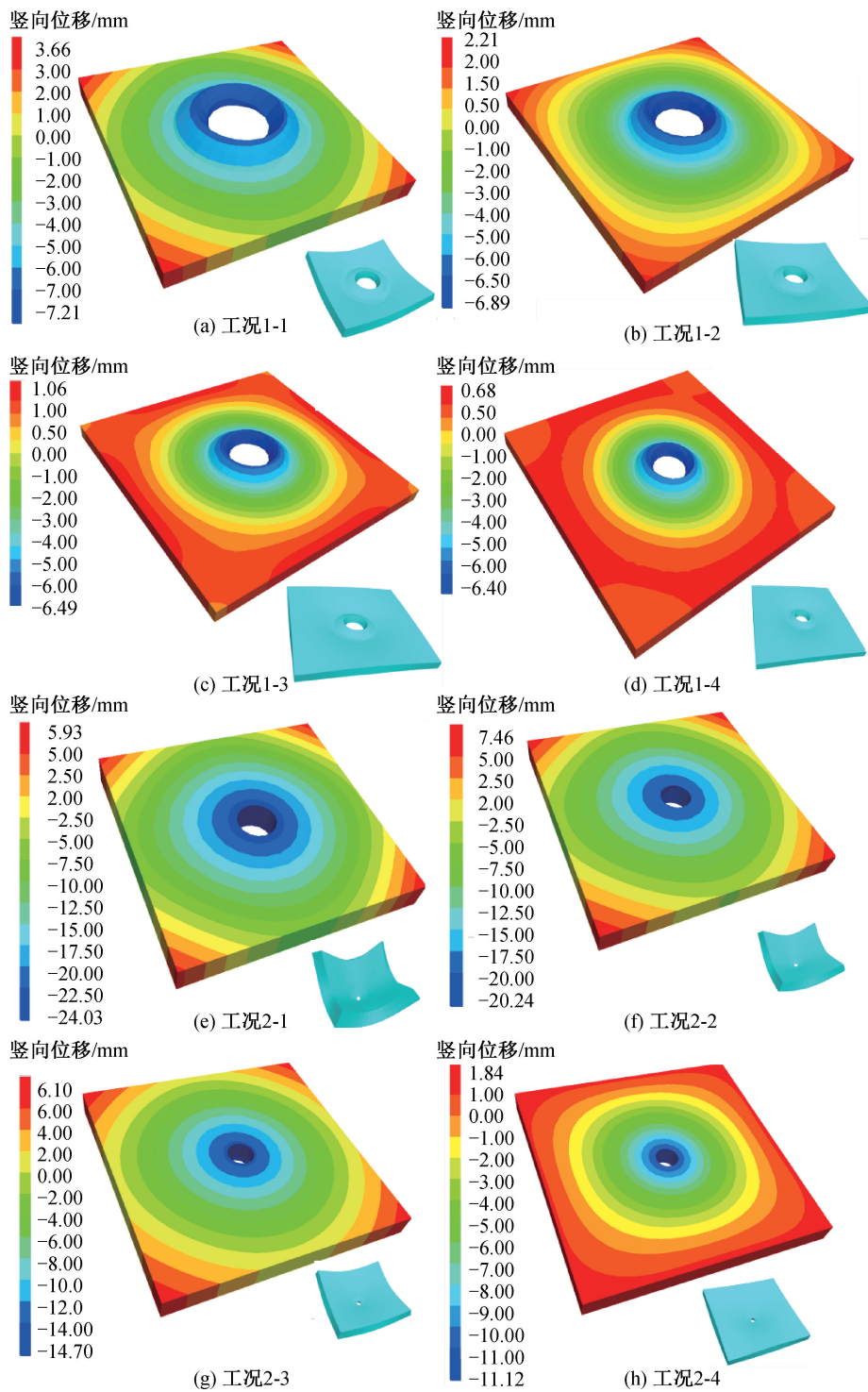


图 8 竖向位移云图

Fig. 8 Vertical displacement cloud map

工况 1-1 拐角上翘现象较为明显。同时发现,随着垫板尺寸的增大,竖向位移降低量逐渐减小,说明垫板尺寸可有效控制竖向位移,若选择碗形垫板,建议采用工况 1-3。平板垫板下 4 种工况的竖向位移最大值出现在锚具区,且随着垫板尺寸、厚度的增大,最大竖向位移逐渐减小,分别为 -24.03 、 -20.24 、 -14.70 、 -11.12 mm,且平板结构其竖向

位移均为负值,同时随着与锚具区的距离增大,其竖向位移逐渐减小,并由负值变为正值,即平板垫板周围受压逐渐在侧边出现轻微上翘现象,其中工况 2-1 拐角上翘现象较为明显。同时发现,随着垫板尺寸和厚度的增大,竖向位移降低量逐渐减小,若选择平板垫板,建议工况 2-4。对比分析可知,在施加预应力 300 kN 的情况下,平板垫板的竖

向位移明显大于碗形垫板,导致垫板孔口中部受压缩较为严重,拐角处上翘明显,使得垫板极易发生破坏,平板垫板下的位移影响区域较大。

4.2.2 围岩-垫板接触面竖向应力

从图 9 可知,碗形垫板下围岩竖向应力扩散呈“圆形”,随着垫板尺寸的增大,应力扩散区域逐渐

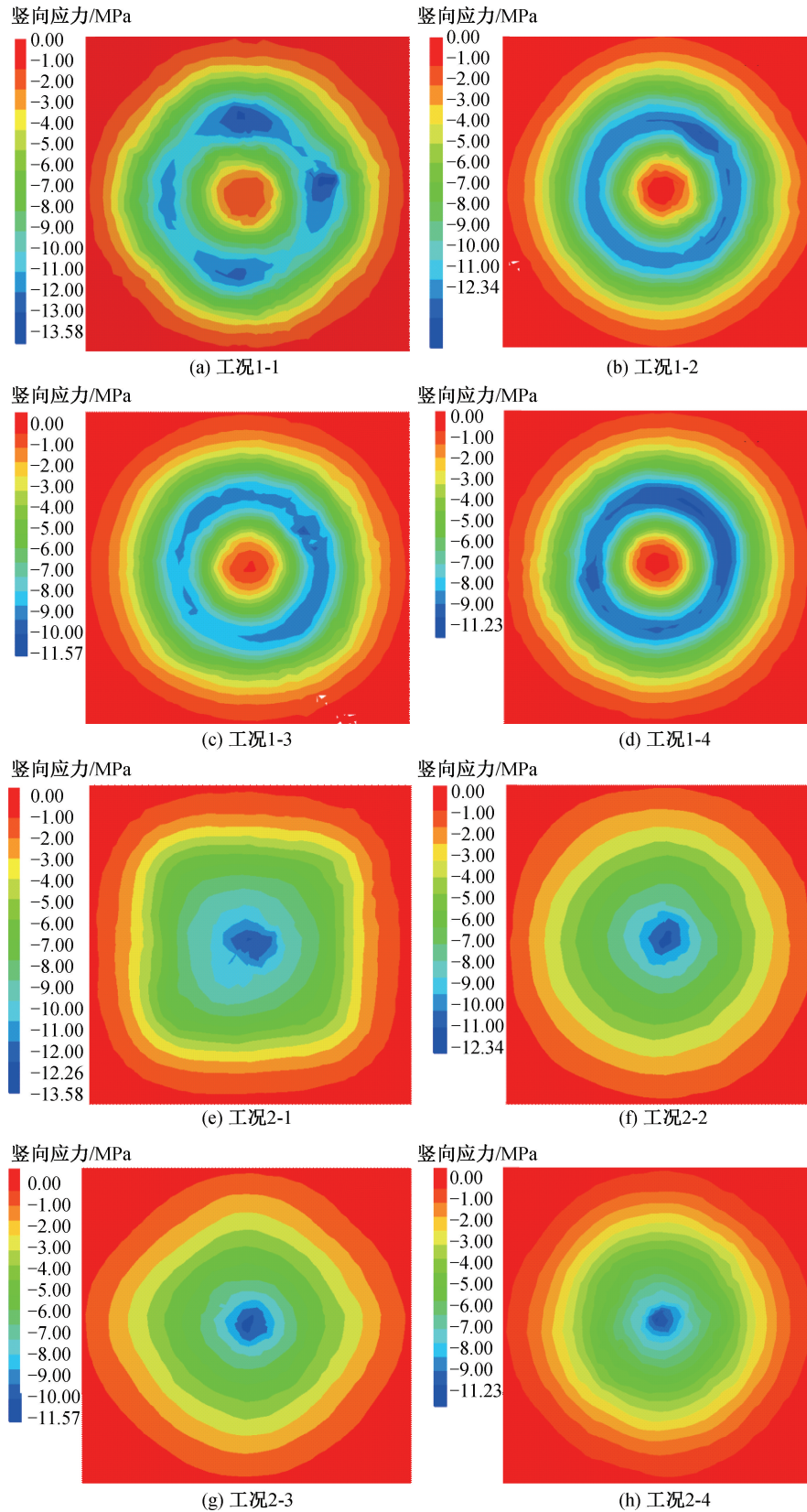


图 9 围岩-垫板接触面竖向应力云图

Fig. 9 Vertical stress cloud map of rock-pad contact surface

增大,但应力变小,同时发现由于网格尺寸划分不均匀,导致部分位置出现较高的应力集中区以及应力扩散不均匀区。

平板垫板下围岩应力扩散由“正方形”变为“圆形”,随着垫板厚度的增大,应力扩散区域明显减小,锚具区内部应力明显得到降低,表现为垫板受压缩程度较小,拐角处上翘现象得到抑制。但同样的网格尺寸划分不均匀现象,导致部分区域扩散不均匀以及应力集中。

对比分析可知,不同垫板形式下其应力扩散规律不同,碗形垫板的碗底区域应力比两侧大,表现为向内、向外两侧扩展的特征,同时其最大应力远离孔口处;而平板垫板的最大应力在孔口处,表现为向周围扩展的特征,但若应力过大,孔口处易发生塌孔现象,见图 6(b)(d)。

4.2.3 围岩内部竖向应力扩散

提取 1/4 围岩内部竖向应力,如图 10 所示,图中白色区域应力 ≥ 1 MPa,对比分析该区域的最大横向长度、最大竖向长度及面积,如图 11 所示。由图 10、图 11 可知,因碗形垫板其中空结构使得与围岩中部表面存在未接触区,因此该部分未受到应力扩散影响,而平板垫板下因垫板与围岩表面均接触,因此均受到应力扩散的影响。从扩散长度分析,碗形垫板的最大竖向、最大横向长度均小于平板垫板,同时发现随着垫板平面尺寸的增大,最大扩散长度的变化量值均较小。从扩散面积分析,碗形垫板同样小于平板垫板,原因可能为碗形垫板厚度较小,预应力作用下极易发生应力扩散,但由于仅碗底与围岩表面接触,因此扩散效果有

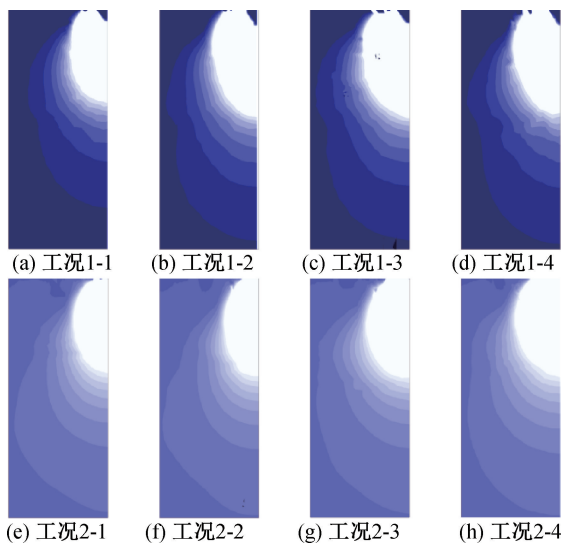


图 10 围岩竖向应力

Fig. 10 Vertical stress of surrounding rock

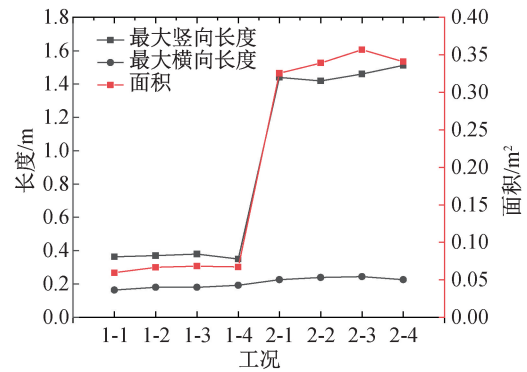


图 11 有效应力指标

Fig. 11 Effective stress index

限。而平板垫板与围岩表面紧密贴合,使得应力较容易从中心向四周扩散,该现象从图 9 可以得到相互印证。综上分析,从垫板竖向位移、围岩承受应力和扩散角度分析,碗形垫板工况 1-3 最优,平板垫板工况 2-4 最优,但两种垫板形式下围岩竖向位移相比较,碗形垫板优于平板垫板,故从选择预应力锚杆系统垫板角度出发,建议碗形垫板工况 1-3 为最优。

5 结论

1) 不同垫板类型下,垫板受力的竖向位移变化趋势相同。当平板垫板尺寸为 $160\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 时,由于垫板尺寸较小,垫板与围岩接触面上的应力扩散效果下降,且垫板四角翘曲现象明显;当平板垫板尺寸逐渐增大至 $280\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ 时,应力在垫板内得到充分扩散且有效应力区的面积逐步减小直到基本恒定。但碗形垫板下受力效果优于平板垫板。

2) 应力扩散效果间具有明显的关联性。碗形垫板与围岩接触面上的应力扩散效果优于平板垫板,预应力作用下,碗形垫板受力区域基本不会发生变化,而平板垫板受力区域较大,中间部分存在集中区,随着垫板尺寸的增大,受力区域逐渐减小,集中区应力得到减小。

3) 从围岩位移和应力扩散效果综合分析,垫板尺寸越大,位移越小,应力向四周扩散越快,控制效果越明显。当结构尺寸参数达到一定时,对围岩和应力的控制效果提升不明显。若选用碗形垫板,建议采用参数:尺寸 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 180\text{ mm}$,拱高 35 mm ,孔口半径 34 mm ,碗底半径 60 mm ;若选用平板垫板,参数应选择:尺寸 $280\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 255\text{ mm}$,开孔直径 26 mm ,锚具半径 64 mm 。参数基本相同下,碗形垫板对围岩位移和应力控制效果比平板垫板更为明显。

(下转第 65 页)

- [17] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525-529.
- [18] WAN Y, GAO Y, ZHANG F. A simplified approach to determine the unique direction of sliding in 3D slopes [J]. Engineering Geology, 2016, 211: 179-183.
- [19] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [20] ZHANG X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(6): 658-671.
- [21] 张常亮. 边坡稳定性三维极限平衡法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [22] 黄茂松, 王浩然, 宁兆轲. Kettleman Hills 填埋场三维稳定性极限上限分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 1994-2001.
- [23] CHANG M. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(8): 587-599.
- [24] SEED R B, MITCHELL J K, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. II: Stability analyses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(4): 669-690.

(责任编辑 王利君)

(上接第 42 页)

参考文献:

- [1] 郭新新, 汪波, 刘锦超, 等. 软岩隧道锚固系统预紧力匹配性设计方法与实践 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 651-660.
- [2] SUN Xiaoming, ZHANG Bo, LI Gan, et al. Application of constant resistance and large deformation anchor cable in soft rock highway tunnel [J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 4347302.
- [3] KANG Hongpu, GAO Fuqiang, XU Gang, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines-A review [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 37-65.
- [4] 吴拥政. 锚杆附件力学性能匹配性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 95-102.
- [5] 王祥厚, 蔡长安. 锚杆垫板与围岩间的解析解 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1996(1): 34-37.
- [6] 孟繁金, 张景隆. 锚杆用碟形托盘的改进研究 [J]. 矿业安全与环保, 1999(2): 23-24+27+49.
- [7] 刘双跃, 张训涛. 锚杆蝶形托盘合理参数研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1998(2): 65-67.
- [8] 王开松, 陈凯. 基于 ANSYS 的锚杆托盘强度分析及其压力实验 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2013, 33(1): 25-27.
- [9] KANG Hongpu, YANG Jinghe, MENG Xiaozhi. Tests and analysis of mechanical behaviours of rock bolt components for China's coal mine roadways [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(1): 14-26.
- [10] 吴建星, 康红普, 蔡嘉芳. 锚杆托盘的实验应力分析 [J]. 煤矿开采, 2009, 14(2): 58-60.
- [11] 袁溢, 漆泰岳. 全锚锚杆托板效应的数值模拟分析 [J]. 矿业工程, 2006(5): 65-67.
- [12] 杨更社, 何唐镛. 全长锚固锚杆的托板效应 [J]. 岩石力学与工程学报, 1991(3): 236-245.
- [13] 明治清, 顾金才, 张向阳, 等. 锚杆垫板形式对洞室抗爆效果的影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2991-2995.
- [14] 王书文, 付玉凯, 金峰, 等. 矿用锚杆托板动静载力学特性试验研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 35-40.
- [15] 林健, 石垚, 孙志勇, 等. 端部锚固锚杆预应力场分布特征的大型模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2237-2247.
- [16] CUI Lan, SHENG Qian, DONG You, et al. A quantitative analysis of the effect of end plate of fully-grouted bolts on the global stability of tunnel [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 114(2): 104010.
- [17] SEEGMILLER B L, REEVES J A. Cable bolt structure and related components; U. S. Patent 5,525,013 [P]. 1996-6-11.
- [18] 刘双跃, 张训涛. 锚杆蝶形托盘合理参数研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1998(2): 65-67.
- [19] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 222-231.
- [20] 郑仰发, 康红普, 鞠文君, 等. 锚杆拱形托板承载力试验与分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 437-443.
- [21] 莫晨聪. 地下工程中锚杆垫板适应性及其与杆体间力学特性关系研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [22] 宋继侠, 刘福林. 环板在局部均布和线性荷载共同作用下的塑性极限分析 [J]. 兵工学报, 1996(2): 188-192.
- [23] 中华人民共和国煤炭行业标准. 矿用锚索: MT/T 942—2005 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.

(责任编辑 王利君)