

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201600560

## 两柱掩护式液压支架空间承载特性研究

侯运炳<sup>1</sup>, 何尚森<sup>1\*</sup>, 谢生荣<sup>1</sup>, 周殿奇<sup>1</sup>, 周玉<sup>1</sup>, 王果<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩 364200)

**摘要:**针对两柱掩护式支架基于平面力系的承载区适应性单一, 难以反映顶梁纵向对称面以外区域承载特性的问题, 提出采用“承载体”分析支架的承载特性。运用空间力学解析法, 以顶梁为研究对象推导“承载体”外表曲面解析式并分析承载面重叠时的选取原则; 对“承载体”进行纵向和横向切面, 得到支架纵、横两向承载特性; 分析承载体的体积与支架参数之间的关系, 并与已有的计算结果进行对比。结果表明: 承载面的选取应遵循各液压构件承载力最小值的原则, 并要满足立柱承载力在顶梁承载范围内为正值; “承载体”随支架高度而变化, 并与支架高度存在一一对应关系; 纵向承载区的2个极值点及面积都在支架纵向对称面处取得最大值并向两侧立柱双向衰减, 横向承载区按照分布特征可分为3种类型; 增大立柱上铰点到顶梁末端距离、立柱间距、平衡千斤顶的工作阻力及与水平夹角均能增大承载体的体积; “承载体”纵向对称面处的承载区分布特征以及支架参数对承载能力的影响都与已有计算结果吻合, 因此“承载体”能够反映支架顶梁任意区域的承载特性, “承载体”的体积可以作为支架参数优化的标准。

**关键词:**两柱掩护式液压支架; 空间承载特性; 承载体; 纵、横两向承载区; 量化分析

中图分类号:TD355

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)03-0085-11

### Spatial Bearing Feature of Yield-type Support with Two Pillars

HOU Yunbing<sup>1</sup>, HE Shangsen<sup>1\*</sup>, XIE Shengrong<sup>1</sup>, ZHOU Dianqi<sup>1</sup>, ZHOU Yu<sup>1</sup>, WANG Guo<sup>2</sup>

(1. School of Resource and Safety Eng., China Univ. of Mining and Technol. (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Zijin Mining Group Co. Ltd., Longyan 364200, China)

**Abstract:** The bearing area of yield-type support with two pillars which was obtained based on the plane simplified force system had poor adaptability and could hardly reflected the characteristics of bearing capacity in the top beams except the area where the symmetry plane was located. In order to solve the problems, the "bearing body" was adopted to analysis the characteristics of bearing capacity. Firstly, the outside surface formulas of the "bearing body" were deduced by space force system analytical method with the top beam as the study object and the selecting principles were also analyzed when the bearing faces were overlapped. Then the longitudinal and transverse sections of the "bearing body" reflecting the characteristics of bearing capacity in the corresponding areas were obtained. At last the relationships between the volume of the "bearing body" and the parameters of the support were analyzed. Besides, the above results were contrasted with the existing calculation results. The results showed that, when being selected, the overlapped bearing faces should follow the principle that the support force value of every hydraulic component must be minimum, meanwhile, the support force of pillars must be positive value; the "bearing body" varied with the support height and had a one-to-one correspondence with the support height; both the area and the two extreme points of the longitudinal bearing areas were maximum in the symmetry plane and decreased to the direction of both sides' pillars; the transverse bearing areas could be classified three types based on their distribution characteristics; the volume of "bearing body" could be increased according to increase the distance between the pillars' upper hinge point and the top beam's bottom, the distance between pillars, balance jack's working resistance and its horizontal angle; the characteristics of bearing area in the support's symmetry plane and the influences of support parameters on bearing capacity of support were identical with the existing calculation results. So the "bearing body" could reflect the characteristics of bearing capacity in any area of the top beam and the volume of "bearing body" could be the standard of support parameter optimization.

收稿日期:2016-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51234005); 中央高校基本科研业务费项目资助(2011YZ02)

作者简介:侯运炳(1962—), 男, 教授, 博士。研究方向:资源开发与规划。E-mail: houyunbing2000@163.com

\* 通信联系人 E-mail:398421900@qq.com

网络出版时间:2017-05-22 20:04:41 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20170522.2004.002.html>

**Key words:** yield-type support with two pillars; spatial bearing feature; bearing body; bearing areas along length and width direction; quantitative analysis

两柱式支架自80年代引进以来,在中国各大矿区得到迅速推广<sup>[1]</sup>,目前已在神东、平朔等矿区的千万吨级高产高效放顶煤工作面得到应用和验证<sup>[2-3]</sup>。由于使用了平衡千斤顶这一调节机构,使其能在工作的任何时刻提供水平力作用于直接顶,相对于四柱式支架具有更高的支护效率和更好的架前控顶能力<sup>[4-6]</sup>。因此,在适宜的地质条件下选择两柱式液压支架是综放工作面开采的发展趋势<sup>[7]</sup>。

承载区作为两柱掩护式支架承载特性的重要标志,反映了支架结构本身所具有的支承能力和对顶板适应性的好坏<sup>[8]</sup>。对承载区理论的发展和应用是近30年两柱掩护式支架的热点问题之一,中国学者也取得了一些有益的成果:周永昌<sup>[8]</sup>详细分析了4种形式掩护支架的力学特性,列出了支架承载力和作用位置的计算式,提出支架力平衡区概念;王国彪等<sup>[9]</sup>提出支架承载能力区的理论,探讨了优化掩护式支架平衡千斤顶定位尺寸的计算机模拟分析法;罗艳蕾<sup>[10]</sup>分析了支架支护阻力在全高度范围内的变化规律,以及支架承载特性的影响因素;胡应曦<sup>[11]</sup>对掩护式支架的承载范围和理想承载区进行理论研究得出计算公式;田金泽<sup>[12]</sup>通过四柱和二柱支架承载特性的比较,提出承载比数,并对综放合理架型的技术参数进行优化计算;杨培举等<sup>[13]</sup>研究了二柱式支架平衡千斤顶对顶梁承载能力的调节作用,认为放顶煤二柱掩护式支架的平衡千斤顶的额定工作阻力要比普通综采支架高;夏均民<sup>[14]</sup>运用所提出的“力平衡区”的概念给出判断大采高综采支架稳定性的条件。

然而,对支架承载区的研究目前还存在以下不足:1)在承载区求解中将具有纵向对称结构的立体支架所受的空间载荷简化到其纵向对称平面内,这种简化得到的承载区有一定的应用局限,仅适用于顶板条件良好及外载作用在纵向对称面或对称面附近的情况;实际上外载受老顶来压方式及直接顶状况的影响可能作用在顶梁的任何位置<sup>[15]</sup>,因此,当支架承受偏载时,支架的支撑反力作用点已偏离对称面,对称面上承载区的分布规律已不再具有代表性。2)研究成果均是基于平面力系解析理论对支架的受力进行简化,实际上支架很少处于此种工况<sup>[16]</sup>,当液压支架受偏载作用时,各结构件一般受空间力系作用<sup>[17]</sup>,这种简化忽略了立柱在偏载作用下的不均匀受力,与支架处于恶劣工作环境及受力复杂的现实不符。因此当前的研究成果不能全面反应支架的力学特性,尤其是支架在空间力系下承载区的分布规

律,有待进一步完善。

作者针对支架平衡区研究存在的不足,提出反映支架空间承载特性的“承载体”概念。以支架实际受力情况为依据,建立两柱掩护式支架顶梁分离体的空间力学模型;以支架空间力系解为基础推导两柱掩护式支架“承载体”的边界曲面解析式,并以ZFY10200/25/42支架为例探讨支架承载力在顶梁全范围内的分布规律及承载体的体积与其影响因素之间的关系,为提高支架承载性能提供了一定的理论依据。

## 1 承载体的概念

支架的承载特性最初是通过支架力平衡区描述的,它是指在支架某一支撑高度时,以支架承载力 $Q$ 为纵坐标,以 $Q$ 在顶梁的位置 $S$ 为横坐标的 $Q-S$ 曲线下的面积<sup>[8]</sup>, $Q-S$ 曲线表示支架的承载力随作用位置而变化的特性如图1中平面2内的曲线所示。之后又从量纲的角度出发,认为支架的平衡区是力与长度之积,即 $[F \cdot L]$ ,与功的量纲相同,将支架平衡区称为支架承载能力区<sup>[9]</sup>。不论是平衡区还是承载区其 $Q-S$ 曲线只反映了支架合力作用在顶梁纵向对称面时的承载特性。如果考虑顶梁全范围内支架的合力分布,那么在平行于支架对称面的其他位置也必然会得到一系列与纵向对称面处特征不同的 $Q-S$ 曲线,这些 $Q-S$ 曲线集合在一起构成若干空间曲面,这些曲面在一定的坐标范围内形成的封闭空间体称为支架承载体,如图1所示。

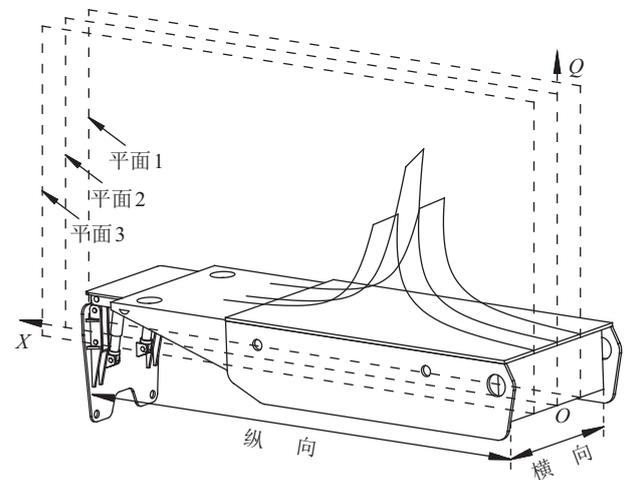


图1 两柱掩护式支架承载能力区的空间分布

**Fig.1** Spatial distribution of two-pillars support's bearing areas

与支架的承载区类似,承载体内任意一点都对对应支架处于当前支撑高度时的一种平衡状态,那么

整个承载体就包含了支架在当前支撑高度时所有可能的平衡状态。若支架受到的外载处于承载体内,支架就能保持稳定;若外载超出支架的承载体,支架就会失稳。因此,承载体的体积反映了支架处于某一支撑高度时承载能力的大小,承载体的体积越大,其能够容纳的平衡状态越多,支架的承载能力就越强。

显然,若用承载体的体积衡量支架的承载能力,就需要对承载体的边界曲面进行研究,因为其在空间的分布规律决定了承载体的外形特征,进而影响承载体封闭空间的形成,因此支架承载体求解和分析的关键是承载体边界曲面的准确求解。

## 2 承载面的解析

将承载体的边界曲面称为承载面,求解承载面的本质是利用支架的空间力系平衡方程推导支架承载力与其在顶梁的两向坐标之间的关系;支架承载力可以通过顶梁的平衡方程求解,因此首先要明确支架顶梁的空间受力特征。

### 2.1 顶梁空间力学模型的建立及解析

事实上,无论支架实际受载如何,按照空间力系的平移与转化原理,总可以将作用在支架顶梁上的外载荷,转化为作用在支架顶梁平面内任意一点的力与力矩<sup>[18]</sup>。因此构建支架空间力学模型时不仅要最大限度地反映支架实际受载情况,而且要尽可能与支架的实际构形保持一致,体现支架结构件安装尺寸产生的力学效应。因此,取支架顶梁为受力研究对象,并做以下假设:1)视前梁千斤顶支撑力为内力,将顶梁与前梁看做同一整体,忽略前梁整体的铰接作用;2)将顶梁视为薄板型受力刚体,忽略顶梁箱形结构腹板、隔板的影响;3)忽略前梁、立柱、掩护梁与顶梁连接耳座的结构尺寸及销轴的扭矩作用;4)视顶梁两侧板外载合力为0;5)将顶梁的任意竖直外载简化为点载荷,点载荷作用位置随机分布;6)支架处于外力偏载作用状态,两立柱支撑力在顶梁整体平衡状态下随机分布;7)视掩护梁与顶梁铰接合力与水平方向的夹角近似等于掩护梁瞬心与水平方向的夹角。建立两柱式支架顶梁的空间力学模型如图2所示。

对图2所示的顶梁力学模型进行力与力矩平衡分析,不考虑支架的侧向挤压力,即z轴方向无外力,因此可以得到5个平衡方程,如式(1)所示:

$$\begin{cases} (P_1 + P_2) \sin \alpha + T \cos \beta + (F_1 + F_2) \cos \theta - Q'f = 0, \\ (P_1 + P_2) \cos \alpha + T \sin \beta + (F_1 + F_2) \sin \theta - Q' = 0, \\ (P_2 - P_1) \cos \alpha b_1 + (F_2 - F_1) \sin \theta b_2 - 2Q'z_0 = 0, \\ (P_2 - P_1) \sin \alpha b_1 + (F_2 - F_1) \cos \theta b_2 - 2Q'fz_0 = 0, \\ Q'm - (P_1 + P_2)h_1 - Th_2 - (F_1 + F_2)h_3 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

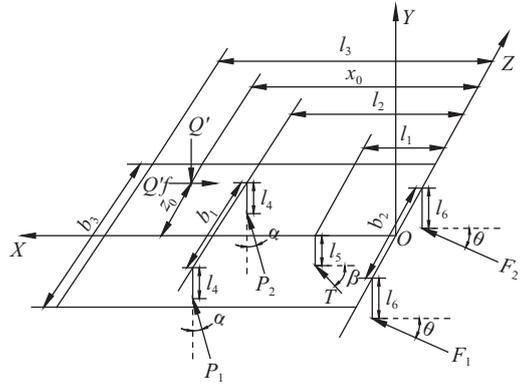


图2 两柱掩护式支架顶梁空间力学模型

Fig.2 Spatially mechanical model of roof beam of two-pillars support

由式(1)求解得顶梁外载及其作用位置的计算式如式(2)~(4):

$$Q' = \frac{(P_1 + P_2) \cos(\alpha + \theta) + T \sin(\beta - \theta)}{\cos \theta - f \sin \theta} \quad (2)$$

$$x_0 = \frac{T [h_2 (\cos \theta - f \sin \theta) + h_3 (f \sin \beta - \cos \beta)]}{(P_1 + P_2) \cos(\alpha + \theta) + T \sin(\beta - \theta)} + \frac{(P_1 + P_2) [h_1 (\cos \theta - f \sin \theta) + h_3 (f \cos \alpha - \sin \alpha)]}{(P_1 + P_2) \cos(\alpha + \theta) + T \sin(\beta - \theta)} \quad (3)$$

$$z_0 = \frac{b_1 (P_2 - P_1) \cos(\alpha + \theta)}{2(P_1 + P_2) \cos(\alpha + \theta) + 2T \sin(\beta - \theta)} \quad (4)$$

式中:  $Q'$ 为顶板合力;  $P_1$ 、 $P_2$ 为左、右立柱支撑力;  $T$ 为平衡千斤支撑力(压力为正,拉力为负);  $F_1$ 、 $F_2$ 为掩护梁对顶梁的作用力;  $x_0$ 、 $z_0$ 为 $Q'$ 在xz平面的坐标;  $h_1$ 为 $P_1$ 、 $P_2$ 到z轴的力臂,  $h_1 = l_2 \cos \alpha + l_4 \sin \alpha$ ;  $h_2$ 为 $T$ 到z轴的力臂,  $h_2 = l_1 \sin \beta + l_5 \cos \beta$ ;  $h_3$ 为 $F_1$ 、 $F_2$ 到z轴的力臂,  $h_3 = l_6 \cos \theta$ ;  $\alpha$ 为前立柱与铅垂方向夹角;  $\beta$ 为平衡千斤顶与水平方向夹角;  $\theta$ 为掩护梁作用力与水平方向夹角;  $f$ 为支架顶梁与顶板摩擦系数;  $b_1$ 为前立柱间距;  $b_2$ 为掩护梁与顶梁铰接点间距;  $b_3$ 为顶梁宽度;  $l_1$ 为支架后柱距顶梁末端距离;  $l_2$ 为支架前柱距顶梁末端距离;  $l_3$ 为顶梁长度;

由于支架合力 $Q$ 与外载合力 $Q'$ 相等,因此式(2)~(4)也为支架合力与其作用位置的计算式。

### 2.2 承载面的反解及选取原则

根据式(2)~(4)中各参数的限制关系可以反推出以任意3个参数作为未知量的方程组的解,因此要得到支架合力 $Q$ 与其作用点位置 $x_0$ 、 $z_0$ 之间的关系,可以分别将 $(Q, P_1, P_2)$ ,  $(Q, P_1, T)$ ,  $(Q, P_2, T)$ 作为未知量,得到承载面的4个解析式:

$$Q_1 = \frac{[-BC h_1 + AC h_2 + (AD - BE) h_3] T_1}{AC x_0 - C(Ch_1 + Eh_3)} \quad (5)$$

$$Q_2 = \frac{[-BC h_1 + AC h_2 + (AD - BE) h_3] T_2}{-AC x_0 + C(Ch_1 + Eh_3)} \quad (6)$$

$$Q_3 = \frac{2Ab_1FP_1}{-ABCb_1x_0 + 2CGz_0 + ACb_1(Ch_2 + Dh_3)} \quad (7)$$

$$Q_4 = \frac{2Ab_1FP_2}{-ABCb_1x_0 - 2CGz_0 + ACb_1(Ch_2 + Dh_3)} \quad (8)$$

式中,  $T_1$  为平衡千斤顶拉力,  $T_2$  为平衡千斤顶推力,  $A = \cos(\alpha + \theta)$ ,  $B = \sin(\beta - \theta)$ ,  $C = \cos \theta - f \sin \theta$ ,  $D = f \sin \beta - \cos \beta$ ,  $E = f \cos \alpha - \sin \alpha$ ,  $F = -BCh_1 + Ach_2 + (AD - BE)h_3$ ,  $G = BCh_1 - Ach_2 + (BE - AD)h_3$ 。

由式(5)~(8)可知, 支架处于某一高度进行支撑时, 各尺寸参数都是定值, 只有  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $T$  随着外载及其作用位置的变化而变化, 而由于支架的特殊构造并不能保证外载作用在顶梁任意位置时  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $T$  同时达到极值。实际上, 液压支架的极限承载力分为两种情况: 1) 液压支架支撑力恰为支架工作阻力, 即所谓的支架最大承载能力; 此时, 液压支架所承受外载荷的大小和作用位置正好使其所有主要承载机构内的乳化液压力同时达到各自安全阀的额定压力。2) 如果支架的支撑力为该作用位置的支架承载能力, 此时, 作用在液压支架上的外载荷的大小和作用位置只能使一部分承载液压缸达到工作阻力<sup>[12]</sup>。因此通过式(5)~(8)分别得到  $Q$  与立柱及平衡千斤顶支撑力之间的对应关系, 并以二者额定工作阻力为限定条件, 可以得到支架在某一支撑高度时的承载面, 承载面也代表了立柱及平衡千斤顶自身性能对支架整体承载能力的限制, 如图3所示。

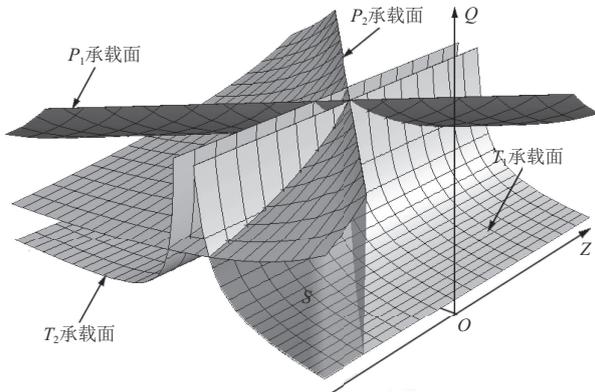


图3 两柱掩护式支架承载面

Fig.3 Bearing faces of two-pillars support

由图3可知, 部分区域承载面出现重叠, 如图3中S区域, 要使支架处于该作用位置承载力时满足支架达到平衡状态时各液压构件的相互限制, 就需要对图3中空间范围内相重叠的承载面进行判定和取舍。由于图3中的4个承载面分别为两根立柱及平衡千斤顶处于拉、压状态时的承载面, 因此在选取边界面时要遵循各液压构件承载力最小值原则, 即利用式(5)~(8)将重叠区域的合力位置坐标代入相重叠的几个承载面的解析式进行计算, 并选取数值最小的承

载面作为边界面, 例如图3中的S区域应当选择  $T_1$  承载面作为边界面。

另外, 虽然图3中的4个极限面覆盖顶梁的整个区域, 但并不是任意作用位置都有实际意义。当外载作用在支架横向方向的两立柱以外区域时, 根据平衡关系计算出来的立柱压力为负值, 此时立柱受拉; 对于只能承受压力的立柱液压缸来说, 一旦出现受拉, 极易受到损坏而失效, 支架的整体稳定性也将受到严重威胁, 显然此种情况下难以发挥支架的承载性能, 这部分作用区域也就不能算作有效承载区。因此在确定各承载面的覆盖区域时, 还应该对立柱支撑力进行检验, 使其符合支架平衡时的实际限定条件。

根据以上2个判定原则, 得到两柱掩护式支架某一高度时的承载体如图4所示, 其中承载体的长度为  $l_3$ , 宽度为  $b_1$ 。

由图4可知, 两柱掩护式支架的承载体大致呈“几”形分布。图4中的空间体与以往研究中提出的空间曲面有所区别, 以往研究虽然也将支架的承载区延伸到空间, 但却认为支架承载时的空间曲面是由不同高度的承载曲线集合而成, 而实际上支架处于任一高度时都对应某一特定承载体, 在全高度范围内支架的承载体是随着高度的变化而变化的。显然, 试图用一个空间体表示支架全高度范围内所有的承载体是不合适的。

由图4中的承载体还可以看出, 支架在某一支撑高度时的承载力沿支架的横向和纵向都有显著的变化规律, 这也被以往的研究所忽略。因此针对以上问题, 本文将基于承载体对支架的两向承载区继续展开研究。

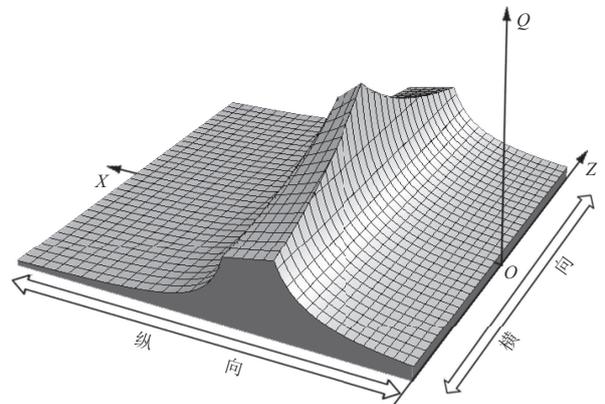


图4 两柱掩护式支架承载体

Fig.4 Bearing body of two-pillar

### 3 纵、横两向承载区

根据以往研究中承载区的特点可知其实质上为

图4中的承载体与支架纵向对称面(图4中 $z=0$ 平面)相交而成的截面,此截面仅反应出支架在 $z=0$ 时承载力沿顶梁纵向的变化规律。由图4可以看出,当 $z \neq 0$ 时截面曲线有明显变化,为进一步说明支架承载力的分布规律,用垂直于顶梁的平面对承载体作切面,并将平行于纵向面的截面称为纵向承载能力区,将垂直于纵向对称面的截面称为横向承载能力区。

### 3.1 承载体分区

为便于研究首先对承载体进行分区,由于平衡千斤顶在发挥压力和推力时是两种相对独立的状态,并且其推力和压力的不同设计值对支架的支护参数有较大影响<sup>[1]</sup>,因此将平衡千斤顶处于推、拉两种状态可看作两种液压构件。因此将图4中的承载体按照液压构件的主要受力状态可分为4个承载区域,分别为平衡千斤顶受拉区(Ⅰ)、平衡千斤顶受压区(Ⅱ)、左立柱承载区(Ⅲ)、右立柱承载区(Ⅳ)。与以往研究相比,承载区不再以点作为分界标志,而是具有明显的分界线,将承载体投影到顶梁面上,得到承载体4个分区在顶梁上的投影如图5所示。

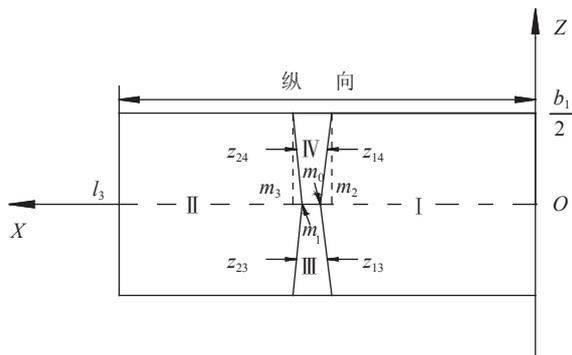


图5 承载体分区投影

Fig.5 Projection of bearing body partition

其中4个分区的4条边界线如式(9)~(12):

$$z_{13} = \frac{Ab_1 [(2AP_1 + BT_1)x - 2CP_1h_1 - CT_1h_2 - (2EP_1 + DT_1)h_3]}{2[BCh_1 - Ach_2 + (BF - AD)h_3]T_1} \quad (9)$$

$$z_{23} = \frac{Ab_1 [(2AP_1 + BT_2)x - 2CP_1h_1 - CT_2h_2 - (2EP_1 + DT_2)h_3]}{-2[BCh_1 - Ach_2 + (BE - AD)h_3]T_2} \quad (10)$$

$$z_{14} = -z_{13} \quad (11)$$

$$z_{24} = -z_{23} \quad (12)$$

上述的4个分区显示了不同液压构件对支架承载性能的影响范围,不同分区对应着不同的限制构件。当液压支架处于上述任一分区时,液压支架的最大承载力因受到所对应的液压构件的限制而减小,支架的承载性能降低,因此支架的4个分区也是支架

的4个承载能力限制区。若支架在这4个限制区平衡顶板压力,其他的非限制液压构件也会产生平衡时相应的承载力,只是在此区域内不会达到自身的极限承载力。

### 3.2 纵向承载区

由于支架的承载体具有纵向对称性,当两侧截面位置与 $X$ 轴距离相同时,所得到的承载能力区将完全相同,取其一半进行研究,得到 $z=0$ ,  $z=b_1/2$ ,  $z=n_1$ ,  $z=n_2$ , ( $0 < n_1 < n_2 < b_1/2$ )处的截面,如图6所示。由图6可知,纵向承载区有以下特征:1)各承载区边界主要由3段曲线构成,其中第1段位于平衡千斤顶受压区(图6中曲线 $a_0K_0$ 、 $a_1K_{01}$ 、 $a_2K_{02}$ 、 $a_3K_{03}$ ),第2段曲线位于平衡千斤顶受拉区(图6中曲线 $K_1b_0$ 、 $K_{11}b_1$ 、 $K_{12}b_2$ 、 $K_{13}b_3$ ),第3段曲线位于立柱压承载区(图6中曲线 $K_0K_1$ 、 $K_{01}K_{11}$ 、 $K_{02}K_{12}$ 、 $K_{03}K_{13}$ )。经对比,发现不同位置纵向承载区的外形特征与以往研究中的承载区类似,表明支架的最大承载力沿纵向的变化规律与以往研究中的结论相符,即立柱承载区仍然是支架的主要工作区,超出立柱承载区支架承载能力急剧下降<sup>[8]</sup>。2)各承载区位于平衡千斤顶拉、压区的两段曲线的表达式相同,不随截面位置而变化;位于立柱承载区的曲线随 $z$ 值增大逐渐趋于平缓,其宽度在 $z=0$ 时最小,并随 $z$ 值增大而增大( $|m_{13}-m_{03}| > |m_{12}-m_{02}| > |m_{11}-m_{01}| > |m_1-m_0|$ ),表明支架在某一高度时的立柱承载区范围并非固定不变,而是随着与纵向对称中心的距离增大而增大。3)各承载区均有两个极值点,分别为第1极值点(图6中点 $K_0$ 、 $K_{01}$ 、 $K_{02}$ 、 $K_{03}$ )和第2极值点(图6中点 $K_1$ 、 $K_{11}$ 、 $K_{12}$ 、 $K_{13}$ )。第1极值点略高于第2极值点,是各纵向承载能力区中的最大承载力。第1极值点随 $z$ 值增大而减小(图6中 $\Delta q_1 < \Delta q_2 < \Delta q_3$ ),说明支架最大承载力与纵向对称中心距成反比。第1极值点在 $z=0$ 时最大,即 $K_0$ 也是支架在此高度时的最大承载力,其横坐标 $m_0$ 可根据式(8)求解。各纵向承载区的面积随极值点的减小而减小,其变化趋势与极值点保持一致。以上表明支架的承载性能在纵向对称中心处最优并向立柱两侧逐渐减弱。

### 3.3 横向承载能力区

由图6可知在支架不同位置的横向截面分为3种类型:第1种类型,当 $x \in [0, m_2] \cup [m_3, l_3]$ 时,截面只与平衡千斤顶的拉、压分受力区相交;第2种类型,当 $x \in (m_0, m_1)$ 时,截面只与立柱承载区相交;第3种类型,当 $x \in (m_2, m_0] \cup [m_1, m_3)$ 时,截面与2个区域同时相交。分别在上述3个区域选取截面( $0 < m_4 < m_5 < m_2 < m_6 < m_0 < m_1 < m_7 < m_3 < m_8 < m_9 < l_3$ )得到支架的横向截面如图7所示。

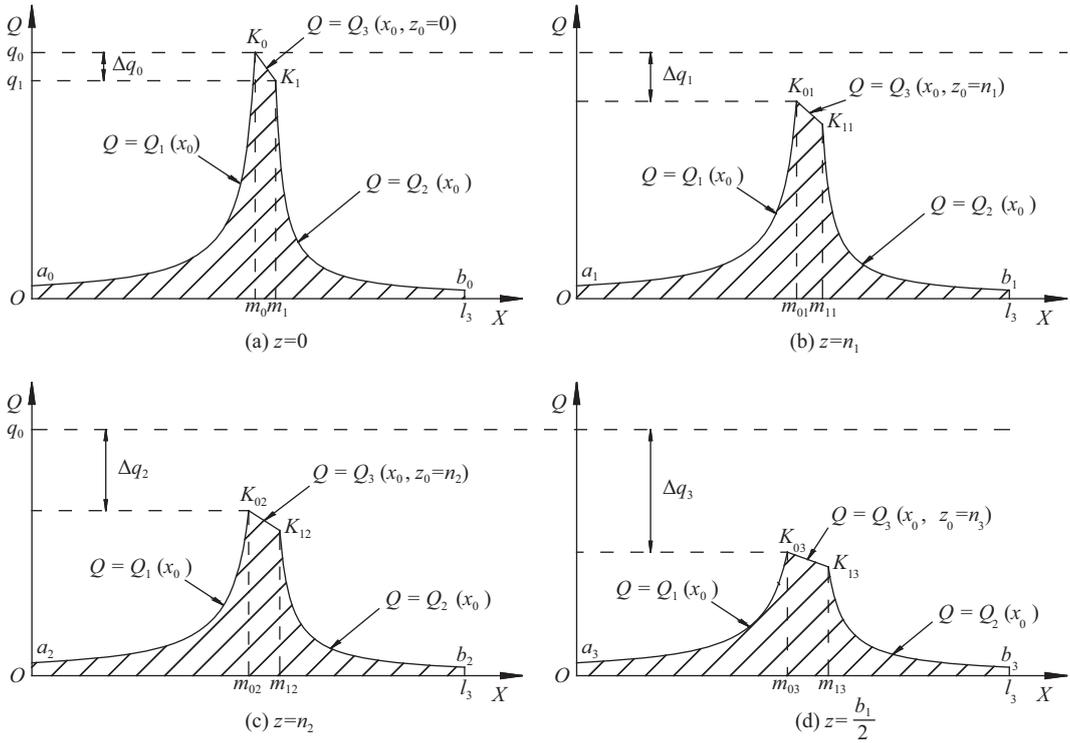


图 6 纵向承载区

Fig.6 Bearing areas along length direction

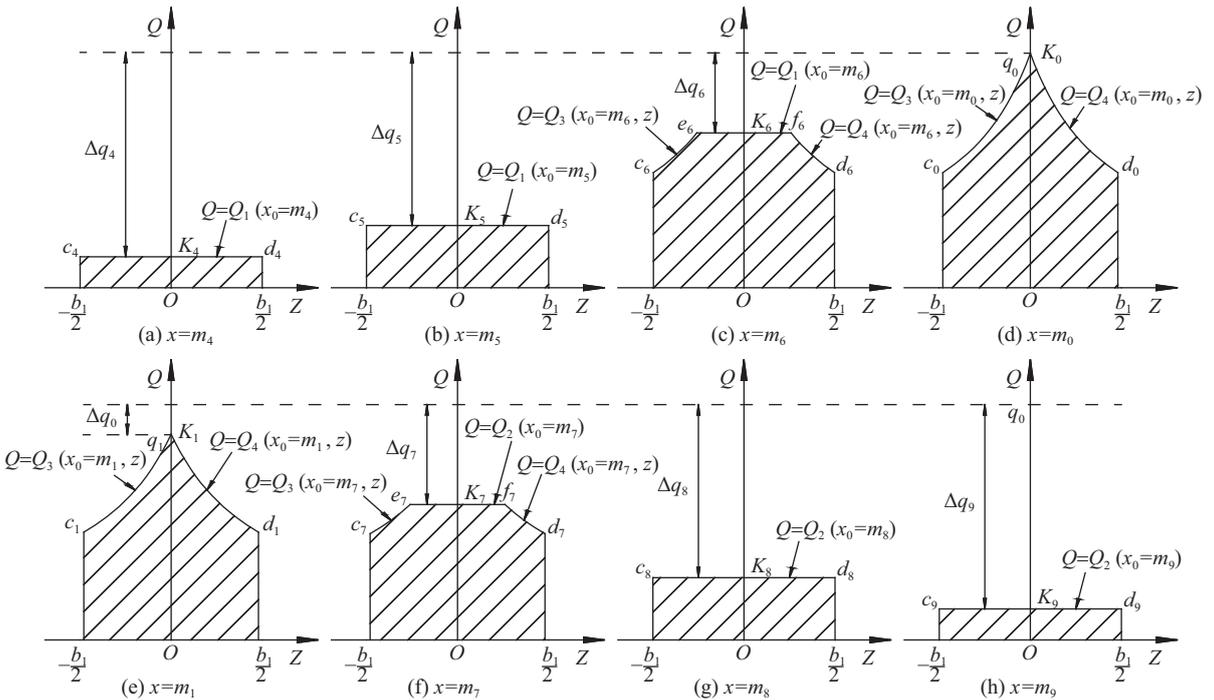


图 7 横向承载能力区

Fig.7 Bearing areas along width direction

由图7可知支架的横向承载能力区具有以下特征: 1)第1种类型承载能力区的截面为矩形,其主要边界线为一段平行于X轴的直线(图7中线段 $c_4d_4$ 、 $c_5d_5$ 、 $c_8d_8$ 、 $c_9d_9$ ),表明此区域内支架最大承载力沿横

向恒定不变; 2)第2种类型横向承载能力区的主要边界线为两段反比例函数曲线(图7中曲线 $c_0K_0$ 、 $d_0K_0$ 、 $c_1K_1$ 、 $d_1K_1$ ),此类型承载能力区反映了两立柱之间支架最大承载力的变化规律,由两段曲线的特征可知

最大承载力由两立柱之间的中心向两侧减小;3)第3种承载区兼具以上两种类型承载能力区的特点,此区域也是支架立柱承载区向平衡千斤顶工作区之间的过渡区域;4)无论哪种类型横向承载能力区,其最大值和面积与 $m_0$ 的距离成反比,表明支架的承载力沿横向在 $m_0$ 时最优,并向顶梁的两端逐渐减弱。

#### 4 承载体的量化分析

由图5可知两柱掩护式支架的主要承载区(Ⅲ区和Ⅳ区)在顶梁呈“倒梯形”分布,其分布范围在顶梁纵向对称面处最小,并由对称面向支架两侧立柱逐渐增大。平衡千斤顶承载区(Ⅰ区和Ⅱ区)在顶梁分布范围要远大于立柱承载区的分布范围,但其内部的支架承载能力却小于立柱承载区的承载力。因此衡量不同分区内支架的承载性能时,应该对比各分区内承载体的体积,各分区承载体的体积之和即为支架整个承载体的体积。因此,承载体的体积综合反映了支架的承载力和承载范围,承载体的体积计算公式如式(13)~(16)所示:

$$V_1 = \frac{b_1 C_1 T_1}{2AC} (\ln \frac{C_2 C_4}{C_1} - 0.38) \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{b_1 C_1 T_2}{2AC} \left[ \ln \frac{(A l_3 - C_4) C_3}{C_1 T_2} - 0.38 \right] \quad (14)$$

$$V_3 = V_4 = \frac{-b_1 C_1 P_2}{BC} \ln \frac{C_3}{C_2} \quad (15)$$

$$V_0 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (16)$$

式中, $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ分区承载体体积, $V_0$ 为支架在某一高度承载体的总体积, $S_0$ 为支架顶梁支撑区总面积, $C_1 = BCh_1 + BEh_3 - ACh_2 - ADh_3$ , $C_2 = 2AP_2 + BT_1$ , $C_3 = 2AP_2 - BT_2$ , $C_4 = Ch_1 - Eh_3$ , $C_5 = 2ACh_2 + 2ADh_3 - C_1$ 。

根据式(13)~(16)可以求得支架在某一高度时各分区承载体体积百分比 $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_0} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (17)$$

显然, $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 越大,支架的调节能力越强,对顶板外载变化的适应能力也就越强; $\omega_3$ 和 $\omega_4$ 越大,支架的承载能力越强,对动载系数大的顶板适应性也相应提高。因此,在两柱式支架选型时可将参数 $\omega_i$ 作为一项理论依据。

以ZFY10200/25/42两柱掩护式支架为例,将其处于最大支撑高度时的各参数<sup>[19]</sup>带入式(16)、(17)得到支架承载容量 $V_0 = 3\,554.88 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ,各分区承载容量比例分别为 $\omega_1 = 42.18\%$ , $\omega_2 = 36.86\%$ , $\omega_3 = \omega_4 = 10.48\%$ 。可见平衡千斤顶拉、压区承载体的体积占承载体总体积的比例高达79.04%,立柱承载区虽具有较高的支

撑力,但其占比仅为20.96%,这是由其在顶梁分布区域较小引起的。因此,在支架结构合理的前提下尽可能提高立柱承载区的承载体体积有利于支架承载性能发挥。

#### 5 承载体体积影响因素分析

承载体的体积由支架的合力大小及合力在顶梁的分布范围决定,理论上支架的顶梁及四连杆等主要结构参数的改变都会引起合力变化。实际上四连杆各参数都是通过改变四连杆与顶梁间的连接参数间接影响支架合力,因此与顶梁直接相连的立柱和平衡千斤顶的参数是承载体体积的主要影响因素。以ZFY10200/25/42支架为例,并假设其各主要支撑参数 $P$ 、 $l_2$ 、 $b_2$ 、 $\alpha$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $l_1$ 、 $\beta$ 变化时并不影响支架的对称性,得到承载体体积与以上各参数之间的关系,如图8所示。

由图8(a)可得以下规律:1) $V_0$ 与 $P$ 正相关,呈对数关系,其增长幅度随 $P$ 增大而减小,最终趋于稳定。2) $V_0$ 在 $P$ 处于1 952~10 000 kN区间变化时增长平缓,相对于 $P$ 处于额定工作阻力时, $V_0$ 的最大变化幅度为19.49%,远小于立柱阻力的变化幅度。3) $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 与 $P$ 正相关, $\omega_3$ 与 $P$ 负相关;当 $P$ 大于立柱额定工作阻力时三者都有小幅度变化,变化幅度都低于5%,并逐渐趋于稳定。4)当 $P$ 小于平衡千斤顶拉力额定工作阻力时, $V_0$ 显著降低,各分区承载体的体积比例急剧变化, $\omega_1$ 曲线甚至出现极值点。以上规律表明:1)在支架结构一定的前提下,单纯提高立柱工作阻力并不能显著提高支架承载体的体积,而且还会降低立柱区承载体的体积比例;2)立柱阻力过小会显著降低支架承载体的体积,出现这一现象的原因可能是过低的立柱阻力影响支架机构的合理性和稳定性。

由图8(b)可得以下规律:1) $V_0$ 与 $l_2$ 正相关,呈对数关系。2) $l_2$ 对 $V_0$ 影响较大,其轻微变化会引起 $V_0$ 大幅变化;当 $l_2$ 在0.95~1.45 m变化时, $V_0$ 较 $l_2$ 处于设计值时的增幅达到100%。3) $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 与 $l_2$ 负相关, $\omega_3$ 与 $l_2$ 正相关。以上规律表明立柱上铰点位置对支架承载体的体积有显著影响,适当增大立柱上铰点到顶梁末端的距离不仅能增大承载体的体积,还能增大立柱区承载体的体积比例,提高支架承载性能。

由图8(c)可得以下规律:1) $V_0$ 与 $b_1$ 正相关,呈线性关系;2) $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 为定值,不随 $b_1$ 而变化。以上规律表明,增大立柱间距能够增大承载体的底部横向跨距,提高承载体的体积,但不会改变各分区承载体的比例,因此在满足支架尺寸配套及顶梁强度要求的前提下,适当增大立柱间距有利于提高支架承载性能。

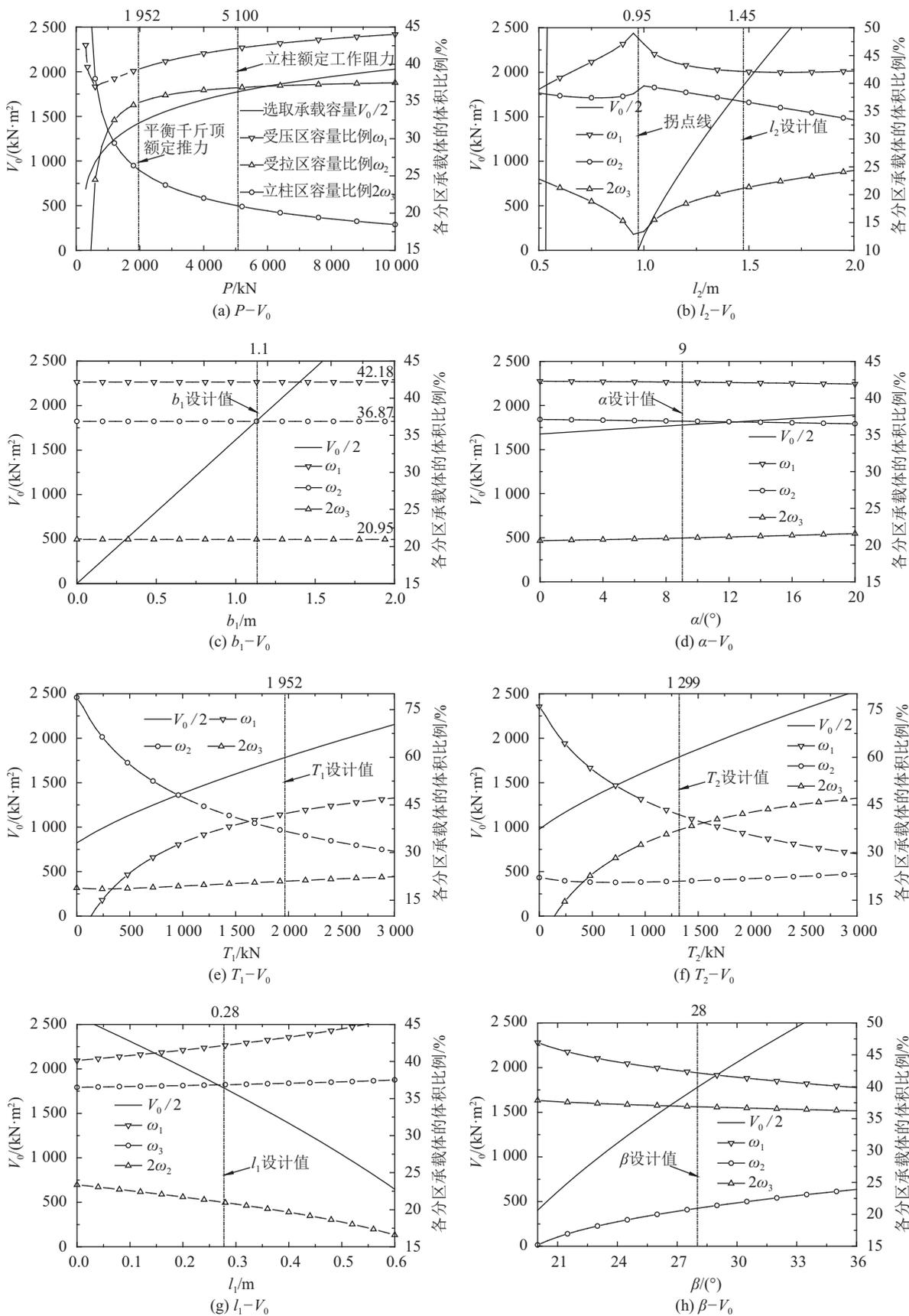


图 8 承载体体积与各影响因素关系

Fig.8 Relationship between the bearing body's volume and its influence factors

由图8(d)可得以下规律:1)  $V_0$ 与 $\alpha$ 正相关,近似呈线性关系;2)  $\alpha$ 对 $V_0$ 影响较小,当 $\alpha$ 在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 区间变化时, $V_0$ 较 $\alpha$ 处于设计值时的最大变化幅度仅为6.65%;3)  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 与 $\alpha$ 负相关, $\omega_3$ 与 $\alpha$ 正相关,但三者受 $\alpha$ 影响均并不明显。以上规律表明立柱倾角对支架承载体的体积影响较小,减小 $\alpha$ 虽然能增大立柱在竖直方向的分力,提高支架最大合力,但减小了立柱区在顶梁的分布范围,不利于支架性能的发挥。

由图8(e)可得以下规律:1)  $V_0$ 与 $T_1$ 正相关,呈复合型对数函数关系。2)  $T_1$ 对 $V_0$ 影响显著,当 $T_1$ 在 $0 \sim 3\ 000$  kN区间变化时, $V_0$ 较 $T_1$ 处于设计值时的最大变化幅度为53.63%。3)  $\omega_1$ 、 $\omega_3$ 与 $T_1$ 正相关, $\omega_2$ 与 $T_1$ 负相关, $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 对 $T_1$ 变化较为敏感;当 $T_1$ 在 $0 \sim 3\ 000$  kN区间变化时,二者变化幅度都大于45%, $\omega_3$ 的变化幅度小于5%;随着 $T_1$ 增大三者变化幅度均逐渐减小,并趋于稳定。

对比图8(e)和(f)可知, $T_2$ 变化时各参数曲线的特征与 $T_1$ 变化时相似度极高,表明 $T_1$ 和 $T_2$ 对承载体的体积影响并无本质区别。以上规律表明增大平衡千斤顶额定工作阻力不仅能显著增大支架承载体的体积,而且能够提高立柱区承载体的体积比例,有利于提高支架承载性能。

由图8(g)可得以下规律:1)  $V_0$ 与 $l_1$ 负相关,大致呈线性关系。2)  $l_1$ 对 $V_0$ 影响较大,当 $l_1$ 在 $0.1 \sim 0.6$  m区间变化时, $V_0$ 较 $l_1$ 处于设计值时的最大变化幅度为63.61%。3)  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 与 $l_1$ 正相关,且 $\omega_1$ 增长速率也与 $l_1$ 正相关, $\omega_1$ 随着 $l_1$ 增大迅速向上偏转。4)  $\omega_2$ 随 $l_1$ 增大而缓慢增长,其增长速率较小;当 $l_1$ 在 $0.1 \sim 0.6$  m区间变化时变化幅度小于5%。5)  $\omega_3$ 与 $l_1$ 负相关,其减小速率与 $l_1$ 正相关,随着 $l_1$ 增大迅速向下偏转,与 $\omega_1$ 呈相反之势。以上规律表明增大平衡千斤顶上耳座尺寸不仅会减小承载体底部的纵向跨度,还会进一步压缩立柱承载区的分布范围,降低支架的承载性能。

由图8(h)可得以下规律:1)  $V_0$ 与 $\beta$ 正相关,呈复合型对数关系。2)  $\beta$ 对 $V_0$ 影响显著,当 $\beta$ 在 $20^\circ \sim 36^\circ$ 区间变化时, $V_0$ 较 $\beta$ 处于设计值时的最大变化幅度达到77.34%。3)  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 与 $\beta$ 负相关,但二者受 $\beta$ 的影响较小;当 $\beta$ 在 $20^\circ \sim 36^\circ$ 区间变化时, $\omega_1$ 的变化幅度为7.08%, $\omega_2$ 的变化幅度仅为1.63%。4)  $\omega_3$ 与 $\beta$ 正相关,受 $\beta$ 的影响相对显著,当 $\beta$ 在 $20^\circ \sim 36^\circ$ 区间变化时,其变化幅度达到8.70%。以上规律表明增大平衡千斤顶的水平夹角不仅能有效提高支架承载体的体积,还能增大立柱区承载体的体积比例,提高支架承载性能。

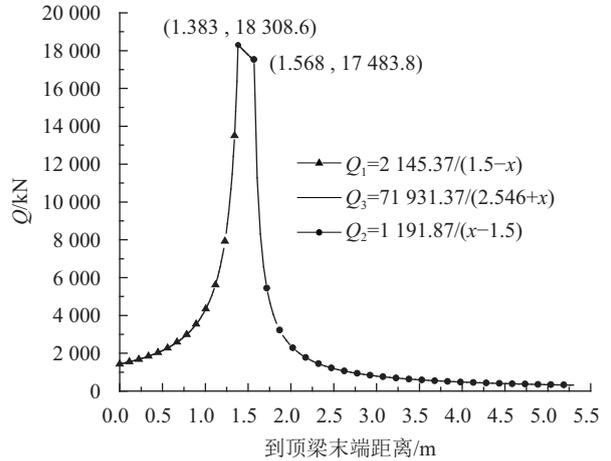
## 6 对比与分析

分别从承载区分布规律和支架参数对承载能力

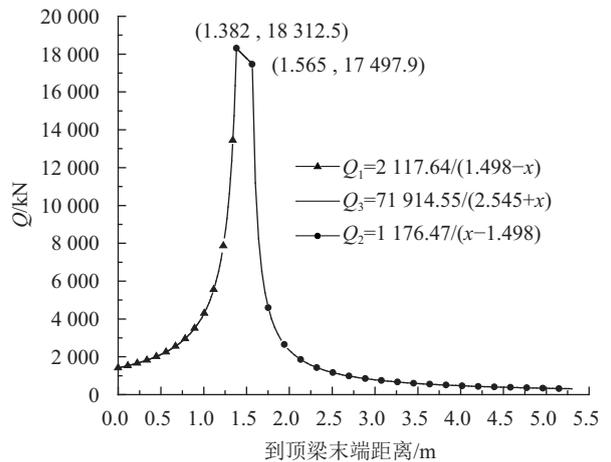
影响两方面对本文得到的主要计算方法进行验证,对比本文方法和已有方法计算结果的差异,并初步分析造成差异的原因。

### 6.1 承载区分布规律的对比和分析

文献[8]中有关两柱支撑掩护式支架承载区的计算方法是以往研究的典型代表,将其与本文的计算方法对比。由于以往研究并没有对支架顶梁纵向对称线以外区域的承载区分布规律进行研究,因此只对 $z=0$ 时式(4)~(6)的计算结果进行分析,以文献[20]中的支架为例,得到图9(a)和(b)。



(a) 文献[8]承载区分布规律



(b) 本文承载区分布规律

图9 承载区分布规律对比

Fig.9 Contrast of bearing area distribution characteristics

由图9(a)和(b)对比可知,采用文献[8]的计算方法得到的3条双曲线表达式与本文方法得到的双曲线表达式大体相同;本文方法得到的立柱承载区相对于文献[8]的方法略微前移,但立柱承载区宽度差别极小。总体来看本文方法得到的承载区分布规律与文献[8]方法得到承载区分布规律十分相似,造成差异的原因是本文采用Mathematica编程计算,数据精度相对较高。

## 6.2 支架参数对承载能力影响对比和分析

文献[9]中提出以承载区的面积大小代表支架的承载能力,本文则认为支架的承载能力应当以承载体的体积进行衡量。为便于对比,以前文中的 ZFY18000/25/39D 两柱掩护式支架为例,分别采用文献[9]和本文方法分析支架参数变化时对承载能力的影响,如表1所示。

表 1 支架参数对承载能力影响对比

Tab.1 Contrast of support parameters' influence on bearing capacity

支架参数	文献[9]			本文			
	$\omega_1/\%$	$\omega_2/\%$	$\omega_3/\%$	$\omega_1/\%$	$\omega_2/\%$	$2\omega_3/\%$	
$P/\text{kN}$	18 000	40.28	35.36	24.36	38.68	34.86	26.46
	20 000	40.79	35.40	23.81	39.27	34.95	25.78
$T_1/\text{kN}$	2 700	40.28	35.36	24.36	38.68	34.86	26.46
	2 900	40.81	34.35	24.84	39.23	33.90	26.87
$T_2/\text{kN}$	1 500	40.28	35.36	24.36	38.68	34.86	26.46
	1 700	38.49	37.12	24.39	37.00	36.41	26.59
$\alpha/(\text{°})$	9	40.28	35.36	24.36	38.68	34.86	26.46
	11	40.21	35.29	24.51	38.66	34.92	26.42
$l_2/\text{m}$	1.5	40.28	35.36	24.36	38.68	34.86	26.46
	1.6	40.82	34.81	24.37	38.97	34.28	26.75

注:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 分别表示受压、受拉、立柱工作区比例。

由表1可知,支架5个参数变化时采用文献[9]的方法得到的承载区3个分区比例变化趋势与采用本文方法得到的变化趋势相同,说明采用本文方法能够正确反映支架参数与承载能力之间的关系。需要指出的是采用本文方法得到平衡千斤顶拉、压区域比例均略小于采用文献[9]得到的比例;立柱区域比例偏大,这是因为本文方法考虑了纵向对称线以外的区域,纵向对称面以外区域的立柱承载区域比例随远离纵向对称面而增大。因此本文方法较文献[9]的方法能够更加准确地反映支架顶梁的承载特性,本文得到的“承载体”体积也可以作为支架优化的参考指标。

## 7 结 论

1)“承载体”能够很好地反映两柱掩护式液压支架承载力在顶梁纵向对称面以外区域的分布特征,承载体的体积代表了支架的承载容量,是反映支架承载性能优劣的重要指标。

2)承载体边界曲面在顶部遵循最小值原则,而在底面遵循非负原则,承载体的外形呈“几”字形分布。

3)两柱掩护式液压支架具有纵、横两向承载区,纵向承载区的两个极值点及面积都在支架纵向对称

面处取得最大值,并向两侧立柱双向递减;横向承载区的极值和面积都在 $x=m_0$ 处取得最大值,并随着与 $m_0$ 的距离增大而向支架两端递减。

4)承载体的体积主要受平衡千斤顶的工作阻力、平衡千斤顶的水平夹角、立柱上铰点到顶梁末端距离、立柱间距影响,增大上述参数的数值均能显著增大承载体的体积。

## 参考文献:

- [1] Zhao Hengshan. Design and application of shield support balance ram[J]. Coal Science and Technology, 1988, 16(12): 17-22. [赵衡山. 掩护式支架平衡千斤顶的设计与使用[J]. 煤炭科学技术, 1988, 16(12): 17-22.]
- [2] Ren Yongqiang, Yu Haiyong, Fan Zhizhong. Analysis on support efficiency of two leg mode hydraulic powered caving support[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 94-96. [任永强, 于海湧, 范志忠. 两柱式放顶煤支架支撑效率分析[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 94-96.]
- [3] Gao Jin, He Haitao. Application of fully mechanized full seam one passing mining technology to thick seam in Shendong mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1888-1892. [高进, 贺海涛. 厚煤层综采一次采全高技术神东矿区的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1888-1892.]
- [4] Zhang Zhongwen. Study on suitability of hydraulic powered two leg shield caving support in Pingshuo mining area[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 31-35. [张忠温. 平朔矿区两柱掩护式放顶煤支架适应性研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(11): 31-35.]
- [5] Zhu Deren, Jiang Yongming, Syd. A study of the horizontal force of 2-leg shield support[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1990, 19(3): 4-10. [朱德仁, 蒋永明, Syd. 二柱掩护式支架水平力的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1990, 19(3): 4-10.]
- [6] Yu Haiyong, Yu Haibo, Wu Zhaohua. Suitable conditions for four-leg and two-leg sublevel caving shield supports[J]. Mining Science, 2011, 37(9): 59-63. [于海湧, 于海波, 吴兆华. 四柱式与两柱式放顶煤支架适用条件分析[J]. 煤炭科技, 2011, 37(9): 59-63.]
- [7] Ma Duanzhi, Wang Enpeng. Development of two-legs shield powerful caving coal hydraulic support for large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 84-86. [马端志, 王恩鹏. 两柱掩护式大采高强度放顶煤液压支架的研制[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 84-86.]

- [8] Zhou Yongchang. Preliminary analysis of mechanical characteristics of shield support[J]. Journal of China Coal Society, 1981, 6(1): 1-17. [周永昌. 掩护式液压支架力学特性的初步分析[J]. 煤炭学报, 1981, 6(1): 1-17.]
- [9] Wang Guobiao, Gao Rong. Simulation and optimum design of locating dimensions of shield support balance ram[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(2): 195-201. [王国彪, 高荣. 掩护式支架平衡千斤顶定位尺寸的模拟分析与优化设计[J]. 煤炭学报, 1994, 19(2): 195-201.]
- [10] Luo Yanlei. Study of the character of loadbearing in full height ranges of the shield support[J]. Journal of Guizhou Institute of Technology, 1995, 24(3): 38-45. [罗艳蕾. 掩护型支架全高度范围内承载特性的研究[J]. 贵州工学院学报, 1995, 24(3): 38-45.]
- [11] Hu Yingxi. Analysis of mechanics characters and basic parameters of the balance jack of the shield support [J]. Journal of Guizhou Institute of Technology, 1989, 18(3): 27-36. [胡应曦. 掩护支架平衡千斤顶力学特性和基本参数的分析[J]. 贵州工学院学报, 1989, 18(3): 27-36.]
- [12] Tian Jinze. Study on the law of oversize full-mechanized caving workface pressure and rational type selection of support in Pingshuo coal mine[D]. Beijing: China University of Mine & Technology (Beijing), 2012. [田金泽. 平朔特大型综放面矿压规律及架型合理化研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.]
- [13] Yang Peiju, Liu Changyou, Han Jizhi, et al. Role of equilibrium jack in adaptability of 2-leg shield support of top coal caving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 277-282. [杨培举, 刘长友, 韩纪志, 等. 平衡千斤顶对放顶煤两柱掩护支架适应性的作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 277-282.]
- [14] Xia Junmin. Study on control of surrounding rock and adaptability of support on high cut in fully mechanized coal face[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2004. [夏均民. 大采高综采围岩控制与支架适应性研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.]
- [15] Qian Minggao, Liu Shuangyue. A study of the interaction between 2-leg shield support and roof strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985, 14(3): 6-16. [钱鸣高, 刘双跃. 两柱支掩护式支架适应性研究[J]. 中国矿业学院学报, 1985, 14(3): 6-16.]
- [16] Wang Guofa, Fu Jingyu. 3D model of powered support and method for calculation of stresses on the support[J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17(4): 66-74. [王国法, 傅京昱. 液压支架空间力学模型及受力计算方法的研究[J]. 煤炭学报, 1992, 17(4): 66-74.]
- [17] 王国彪, 饶明杰. 液压支架优化设计与计算机模拟分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 54.
- [18] Wang Guobiao. Mechanics simulation analysis of shield support of spatial force system[J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Nature Science), 1994, 13(2): 72-77. [王国彪. 掩护式支架空间受力的模拟分析[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1994, 13(2): 72-77.]
- [19] 王国法. 高端液压支架及先进制造技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010: 304-306.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Hou Yunbing, He Shangsen, Xie Shengrong, et al. Spatial bearing feature of yield-type support with two pillars[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 85-95. [侯运炳, 何尚森, 谢生荣, 等. 两柱掩护式液压支架空间承载特性研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 85-95.]