

尤春安 著

巷道金属支架的计算理论



煤炭工业出版社

巷道金属支架的计算理论

尤春安 著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书在介绍巷道金属支架的类型和一般计算方法的基础上,根据巷道金属支架的结构特点,提出了可缩性金属支架的计算理论和分析方法,考虑支架围岩共同作用原理和支架的弹塑性特征,给出了相应的数值计算和分析方法,并对支架的稳定性进行了理论分析。

本书主要供从事地下工程的科研、设计和生产工程技术人员以及高等院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

巷道金属支架的计算理论/尤春安著. - 北京:煤炭工业出版社, 2000

ISBN 7-5020-1570-1

I. 巷… II. 尤… III. 巷道支护-金属支架-算法理论
IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 52109 号

巷道金属支架的计算理论

尤春安 著

责任编辑:孙金铎 田克勤

煤炭工业出版社 出版发行

(北京朝阳区霞光里 8 号 100029)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 5 插页 1

字数 150 千字 印数 1-1,000

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 4339 定价 15.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

目 录

第一章 巷道金属支架概述	1
第一节 巷道金属支架的应用	1
第二节 金属支架钢材	2
第三节 巷道金属支架的结构形式	9
第二章 巷道金属支架计算方法	19
第一节 巷道金属支架计算原理	19
第二节 弹性地基梁理论	30
第三节 梯形金属支架的计算	45
第四节 拱形金属支架的计算	47
第三章 U型钢可缩性支架的计算原理	55
第一节 概述	55
第二节 U型钢可缩性支架计算简图	56
第三节 搭接部分的等效截面参数	57
第四节 卡缆预紧力所产生的支架内力计算	61
第五节 U型钢可缩性支架缩动时产生的支架内力	64
第六节 算例	69
第四章 U型钢可缩性支架的缩动分析	78
第一节 概述	78
第二节 U型钢可缩性支架搭接部分的传力特点	82
第三节 U型钢可缩性支架的缩动条件	89
第四节 U型钢可缩性支架的缩动分析	94
第五章 巷道金属支架计算的矩阵分析方法	102
第一节 结构矩阵分析方法	102
第二节 考虑弹性抗力的圆弧梁单元	116
第三节 巷道金属支架的弹塑性分析	121
第六章 巷道金属支架稳定性分析	138
第一节 概述	138

第二节 刚性金属支架的稳定性	139
第三节 可缩性支架的稳定性	147
参考文献	155

第一章 巷道金属支架概述

第一节 巷道金属支架的应用

随着煤炭工业的发展，煤炭开采深度不断加大，加上机械化生产水平的不断提高和矿井高产高效的要求，巷道支护条件越来越复杂，对巷道的支护效果提出了更高的要求：

巷道地压不断加大，维护条件越来越复杂；

为适应机械化生产要求，巷道断面不断加大；

巷道施工速度不断提高，施工机械化水平越来越高；

对巷道的变形要求更加严格；

对巷道支护可靠性要求更高，如果对巷道进行修复，将对生产产生更大的影响。

因此，金属支架作为一种有效的支护方式，受到越来越广泛地应用。

在国外，金属支架应用很广泛，发展很快，尤其是联邦德国海因茨曼公司生产的 TH 型钢支架自 30 年代问世后，对世界各国的井下支护的发展起到了积极的推动作用。继联邦德国之后，前苏联、波兰、英国、美国、比利时也发展了各自的型钢支架，以适应各种不同维护条件的巷道支护要求。

我国对巷道金属支架的研究、应用起步较晚，与发达国家相比仍有一定的差距，在金属支架的设计、研制和应用等方面，主要是参照国外的经验，自 60 年代 U 型钢支架首先应用以来，金属支架在我国的应用和发展也取得不少可喜成绩：专门作为支架的型钢由原来的 18 号 U 型钢和 9 号矿用工字钢，发展到现在有 18 号、25 号、29 号及 36 号 U 型钢和 9 号、11 号、12 号矿用工

字钢系列产品，1986 年我国设计编制了第一个统配煤矿《巷道金属支架系列》，标志着矿山金属支架支护走向正规化、标准化，是巷道金属支架应用发展的一个重要标志。目前国内也已生产了调质 U 型钢，使支架强度大大提高。

金属支架与其它巷道支护方式相比，有其独特的优越性：

(1) 支护强度大、金属支架如果形状选择合适，其整体具有较高的承载能力，当围岩压力较大时，可与其它支护方式联合应用。

(2) 适应性广，能根据不同的要求和地压条件，设计各种不同的断面形式，在各种不同的围岩条件下都能满足支护要求。

(3) 适应围岩变形，U 型钢可缩性支架具有缩动特征，当围岩的压力达到一定值时，支架就产生缩动，使围岩作用于支架上的压力下降，避免支架遭到破坏而失败。

(4) 安装方便、快捷，有利于机械化施工。

(5) 使用次数多，金属支架的复用次数多，一般大于 3 次，因此虽然一次性投资高，但综合成本低。

(6) 安全可靠，金属支架的破坏形式一般为曲屈变形而失效，不会突然断裂破坏而使巷道围岩突然失稳而冒落，出现突发性的事故。

由于巷道金属支架具有本身独特的优越性，因此在矿山巷道支护中，一直占有非常重要的位置，尤其是 U 型钢可缩性支架，在一些支护困难的巷道中，发挥了重要的作用。

第二节 金属支架钢材

一、矿用工字钢

矿用工字钢简称矿工钢，是专门为矿山巷道支护设计的专用型钢，以适应巷道支架复杂的受力条件的要求，与普通工字钢一样，矿用工字钢以其截面高度的厘米数作为型号名称，目前我国

生产的矿用工字钢有 9 号、11 号和 12 号三种规格，其相应的理论重量为 17.7kg/m、26.1kg/m 和 31.2kg/m。图 1-1 是矿用工字钢和普通工字钢断面几何形状，为了便于比较，表 1-1 给出了矿用工字钢与部分普通工字钢的截面几何参数。

从表 1-1 可以看出，矿用工字钢和普通工字钢的主要区别是高宽比不同。矿用工字钢的高、宽比在 1.18~1.26，而相同截面的普通工字钢高、宽比在 1.75~2.00 之间。矿用工字钢具有翼缘宽、高度小、腹板厚、横纵向的受力性质差异小，抗弯能力高，稳定性好等特点，因此，它更适合于矿山巷道支护要求。

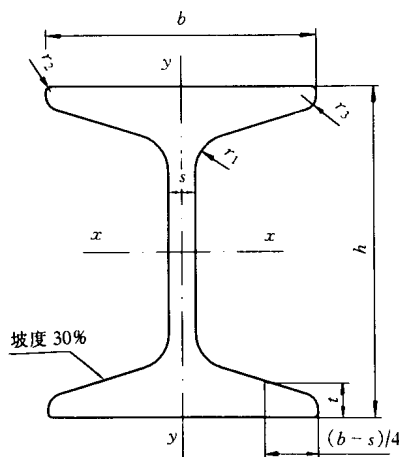


图 1-1 矿用工字钢与普通工字钢断面几何形状

二、U 型钢

U 型钢作为矿山巷道金属支架材料具有以下优越性：

(1) 便于连接，为了便于运输，一般一个巷道金属支架应由多节（三节以上）型钢组成，因此要求型钢与型钢之间搭接方便、简单、快捷，而且有利于提高支架整体结构的承载能力和稳定性。U 型钢满足了这些要求，利用简单的连接件即可完成搭接。

(2) 较好的缩动性能，由于 U 型钢的搭接是靠摩擦力实现的，当搭接部分的受力达到某一条件时，两节 U 型钢便产生滑动，即所谓的缩动，支架搭接部分产生缩动的结果使支架受围岩

表 1-1 矿用工字钢和普通工字钢截面几何参数

型号	几 何 参 数 (mm)						截面 面积 (cm ²)	理论 重量 (kg/m)	截 面 参 数			
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>d_a</i>	<i>i</i>	<i>r₁</i>	<i>r₂</i>	<i>r₃</i>		<i>I_x</i> (cm ⁴)	<i>W_x</i> (cm ³)	<i>I_y</i> (cm ⁴)	<i>W_y</i> (cm ³)
矿用工字钢	90	76	8	10.9	12	4	1.5	17.7	281	62.5	62.5	16.5
	110	90	9	14.1	12	5	1.5	26.1	623.7	113.4	137.7	28.4
	120	95	11	15.3	15	5	1.5	31.2	867.1	144.5	178.2	37.5
普通工字钢	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3		11.2	245	499	33	9.72
	126	74	5	8.4	7	3.5		14.2	488	77.5	46.906	12.677
	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8		16.9	712	102	64.4	16.1
	160	88	6	9.9	8	4		20.5	1130	141	93.1	21.2
	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3		24.1	1660	185	122	26

表 1-2 U 型钢力学参数表

型号	截面积 <i>I²</i> (cm ²)	理论重量 <i>G</i> (kg/m)	<i>X-X</i>			<i>Y-Y</i>			型钢截面参数			
			<i>I_x</i> (cm ⁴)	<i>W_x</i> (cm ²)	<i>I_y</i> (cm ⁴)	<i>I_x</i> (cm ⁴)	<i>W_x</i> (cm ²)	<i>W_y</i> (cm ²)	$\frac{W_x}{W_y}$	$\frac{W_z}{G}$	$\frac{W_y}{G}$	$\frac{W_z}{G}$
18U	24.15	18.96	288.8	57.6	333.2	333.2	54.8	1.05	3.64	2.69		
25U	31.52	24.74	455.1	82.1	506.0	506.0	75.7	1.08	3.32	3.08		
29U	36.92	28.98	612.1	92.3	770.7	770.7	102.3	0.90	3.18	3.53		
36U	49.56	35.76	955.5	132.1	1237.0	1237.0	145.0	0.91	3.60	4.05		

的压力下降，避免支架受力太大，超过支架本身的承载能力而失稳破坏，丧失支架整体承载能力。

(3) 具有较高的截面利用系数，型钢抗弯截面利用系数一般用 $\frac{W_x}{G}$ 和 $\frac{W_y}{G}$ 表示，以此来描述单位截面的抗弯能力，U 型钢在这一点上具有优越的截面利用系数，而且横向、纵向截面参数比较接近，整体抗弯、抗阻能力强，稳定性能好。

(4) 便于加工整形，由于巷道金属支架应多次复用，复用之前，对型钢变形较大的应进行修整，因此整形方便的型钢可以大大地降低支架成本。

U 型钢型号表示每米钢材的理论重量，目前国内生产有 U18、U25、U29 和 U36 四种，图 1-2、图 1-3、图 1-4 和图 1-5 是这四种 U 型钢的断面图，其截面基本力学参数见表 1-2。

三、巷道金属支架钢材的化学成分和力学指标

巷道金属支架能使用的钢材，除要求材料来源广泛、成本低廉外，还应满足下列基本要求：

(1) 强度高，钢材强度高可以减小支架的重量，节约钢材，减缓矿井的运输压力，降低成本。标志着钢材强度的指标是钢材屈服强度 σ_s 和极限强度 σ_b ，单位均为 MPa。

(2) 塑性好，这是因为巷道金属支架必需经过压弯加工、修复整形，而且一般支架在服务期间，都要经历较大的变形，要求支架在加工、修复和使用过程中有较好的塑性，而不致于开裂破坏。重要的是支架具有良好的塑性性能，能在局部进入塑性状态后，自动调整围岩的压力大小与分布，从而提高支架的整体承载能力。标志钢材的塑性指标是延伸率（%），一般要求巷道金属支架的钢材延伸率不低于 16%。

(3) 韧性好，钢材的韧性好，就能使构件有效地抵抗动力荷载和冲击荷载作用。巷道压力一般具有跳跃性，尤其是受采动影响的巷道，围岩的来压往往具有一定的冲击力，因此要求支架的

表 1-3 我国巷道支架钢材化学成分及力学性能表

钢 号	化 学 成 份 (%)					机 械 性 能 (不 低 于)	
	C	Mn	Si	P	S	屈服极限 σ_s (N/mm ²)	强度极限 σ_p (N/mm ²)
				不 大 于			
16Mn	0.12 ~ 0.20	0.20 ~ 1.60	0.20 ~ 0.60	0.05	0.05	350	520
20MnK	0.15 ~ 0.28	1.20 ~ 1.60	0.20 ~ 0.60	0.05	0.05	360	320
A5	0.28 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.35	0.055	0.05	280	500 ~ 530
A6	0.38 ~ 0.49	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.35	0.055	0.05	310	600 ~ 630

表 1-4 其他支护钢材的化学成分及机械性能

钢号	化 学 成 分 (%)					机 械 性 能				用 途
	C	Mn	Si	P		σ_s (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	σ_s (%)		
				不	大 于					
A ₂	0.14 ~ 0.22	0.40 ~ 0.65	0.12 ~ 0.30	0.055	0.045	24	39	27	支架拉杆用	
20Mn	0.17 ~ 0.24	0.70 ~ 1.00	0.17 ~ 0.37	0.040	0.040	28	46	24	支架用	
27SiMn	0.24 ~ 0.32	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40			85	100	12	卡缆用	
40Cr	0.37 ~ 0.45	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37			80	100	9	螺栓用	
45	0.42 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	0.040	0.040	36	61	16	支架用	

钢材应有一定的抗冲击能力。钢材的韧性指标是冲击韧性值，它表示冲断一个有凹槽试件单位面积所需要的功，单位是 $\text{MPa}\cdot\text{m}$ 。

巷道金属支架钢材一般采用普通碳素钢和普通低合金钢，矿用工字钢多用 A5 和 A6 普通碳素钢，而 U 型钢则多用 16Mn、20MnK 和 25MnK 等，矿用工字钢和 U 型钢的常用钢材的化学成分和机械性能见表 1-3 所示。

另外，金属支架的钢材除了矿用工字钢和 U 型钢外，还有制造卡缆，螺栓拉杆等配件的其他支护钢材，常见的化学成分及机械性能如表 1-4 所示。

进入 90 年代后我国也出现了调质 U 型钢，对 U 型钢进行热处理，大大地提高了钢材的强度，调质后的 U 型钢，其强度可以提高 50% 左右，抗弯能力能提高 40% ~ 50%。而且延伸率仍然保持在 16% 以上，屈服极限和强度极限比小于 0.75，能满足技术要求，支架承载能力提高 30% 以上，相当于 U25 可以代 U29，U29 代 U36 使用。随着热处理技术的发展，热处理的成本也不断降低，目前热处理成本仅为钢材成本的 5% 左右。

第三节 巷道金属支架的结构形式

巷道金属支架的结构形式有多种多样，按所用的型钢分，有矿用工字钢支架和 U 型钢支架两大类；按支架构件的连接形式分可分为刚性连接式支架和摩擦连接式支架；按支架的连续性分有封闭性支架和非封闭性支架；按巷道的断面形状分有矩形支架、梯形支架、直腿拱形支架、曲腿拱形支架、马蹄形支架、圆形支架等。

刚性连接式支架的连接方式是型钢与型钢之间采用顶接，靠连接夹板及螺栓固定连接。因此在连接部分的构件与构件之间不能产生错动。而摩擦连接式支架的构件与构件间是采用搭接的办法，构件与构件之间是靠摩擦力来传递构件间的轴力的，当轴力达一定程度时，构件间就要产生相对滑动，即缩动，利用缩动这

一特性，当围岩作用于支架上的压力达到一定值时，搭接部分产生缩动，使围岩压力迅速下降，避免支架破坏，从这一意义出发，巷道金属支架习惯地分为刚性金属支架和可缩性金属支架两大类。U型钢由于能实现搭接，因此广泛地应用于可缩性金属支架之中，称为U型钢可缩性支架，而矿用工字钢则难于实现搭接，一般采用顶接形式，因此它是刚性金属支架的主要材料。

一、刚性金属支架

所谓的刚性金属支架是相对于可缩性金属支架而言的，意思是不能产生缩动的支架，而不是不能产生变形的支架，有时候为了使支架有一定的收缩性能，采取了一些其他措施，如在连接处垫木块，在架腿处设压缩装置或减少腿鞋面积，使架腿插入底板等方法，但从支架的特征和力学计算方法看，这些支架仍然归入刚性支架。

在我国矿山，刚性金属支架应用是非常广泛的，在早期它仿造木支架的形式，取代木支架，在巷道支护中起了重要的作用。刚性金属支架的主要特点是结构简单，支架加工、制造都非常容易，而且具有一定的承载能力，适应性广，安装方便、快捷，因此得到广泛的应用。刚性金属支架主要有梯形金属支架、拱形金属支架和梯拱形金属支架等。

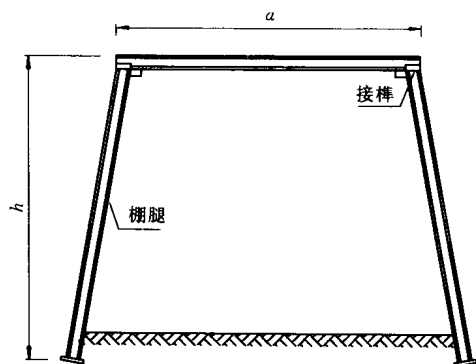
（一）梯形金属支架

1. 梯形金属支架的结构

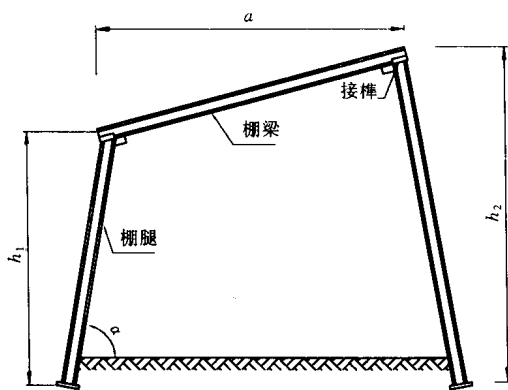
梯形金属支架的标准形式如图1-6(a)所示，主要特征是一梁两柱，为提高支架的稳定性，腿柱向内倾斜 10° ，形成上小下大的梯形断面，在采区顺槽中，巷道沿煤层顶板掘进，常采用斜顶梯形的形式，如图1-6(b)所示。

梯形金属支架的特点是结构简单，加工、架设、运输方便，并具有一定的承载能力，断面利用率高，因此适应于巷道断面不大，围岩压力不大的采准巷道。

2. 梯形金属支架接榫



(a)



(b)

图 1-6 梯形金属支架

(a) 平顶梯形金属支架；(b) 斜顶梯形金属支架

梯形金属支架的棚梁与棚腿的连接俗称接榫。

梯形金属支架的接榫形式很多，大致可分为槽式接榫，斜口接榫卡式接榫，固定接榫和铰接接榫等类型，如图 1-7 所示。

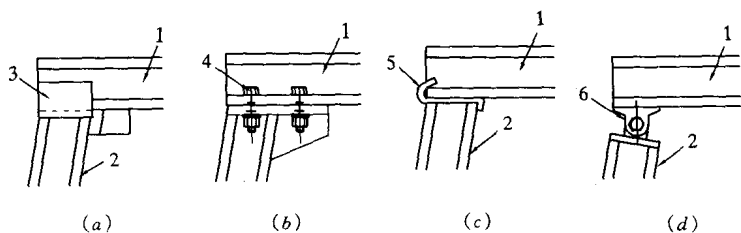


图 1-7 梯形金属支架的接榫形式

(a) 搭槽接榫；(b) 螺栓固定接榫；(c) 卡式接榫；(d) 螺栓铰链接榫

1—棚梁；2—棚腿；3—槽钢；4—螺栓；5—卡座；6—螺栓铰链

(二) 拱形刚性金属支架

拱形刚性金属支架的特征是由若干段矿用工字钢弧形构件组成，矿用工字钢间刚性连接，常见有直腿拱形、曲腿拱形和封闭形等，其结构形式如图 1-8 所示。

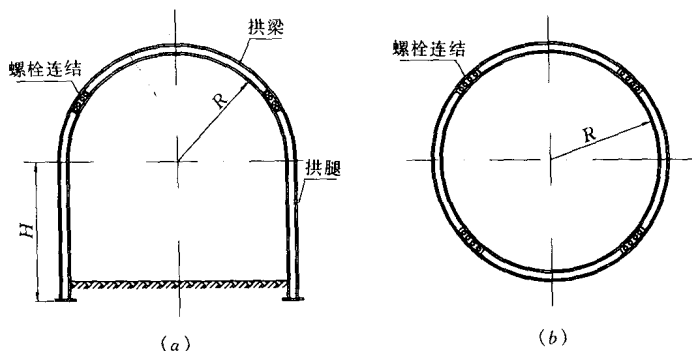


图 1-8 拱形刚性金属支架

(a) 拱形刚性金属支架；(b) 圆形刚性金属支架

拱形金属支架的特点是在均匀围岩压力作用下，支架的内力主要是轴力，而弯矩较小，因此支架具有较高的承载能力，其次由于巷道断面做成拱形的，使得围岩具有较好的稳定性，而且顶