

巷道围岩变形破坏过程中锚固力的变化规律^{*}

Variation of anchoring force during the course of deformation and failure of surrounding rock

汤雷 陆士良

赵海云

中国矿业大学采矿工程系, 江苏徐州, 221008) 中国矿业大学岩层控制中心, 江苏徐州, 221008)

文 摘 运用真三轴试验台, 实现了锚杆支护大比例 (1:4) 模型试验。试验中反映出锚杆支护的围岩从开挖至失稳的全过程, 即锚固围岩碎胀变形、锚固范围以外围岩碎胀变形及围岩失稳三个阶段。掌握了相应于各阶段锚固力上升、稳定、下降的变化规律, 为设计锚杆支护提供了重要依据。提出可用锚杆载荷迅速下降作为围岩失稳的预警指标。

关键词 巷道围岩, 变形过程, 锚固力, 变化规律。

中图法分类号 TD 353

作者简介 汤雷, 男, 1972年生, 1998年在中国矿业大学获博士学位, 现任职于南京水利科学研究院。从事锚杆支护和注浆加固的工程和理论研究。

Tang Lei Lu Shiliang Zhao Haiyun

China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221008)

Abstract True triaxial experimental bench is creatively used to carry out bolting experiments on a large scale of 1:4, the whole course from excavation to failure of surrounding rock is found out, that is, dilatancy deformation stage of rock within bolting range, dilatancy deformation stage of rock beyond bolting range, and rock failure stage. Variation law of anchoring force is grasped respectively during each stage, which is the scientific basis of bolting design. The rapid decrease of load on bolts may be used as an index to forecast the destabilization of surrounding rock.

Key words surrounding rock, deformation course, anchoring force, variation law.

1 前 言

巷道开挖后, 顶板从裸露到垮落一般要经历挠曲、沉降、离层、破裂、垮落等阶段。锚杆的锚固力相应围岩变形的不同阶段, 表现为增长、调整、稳定、下降、丧失等过程。物理模型参数可以调控, 便于分析锚杆与围岩相互作用的全过程。

2 物理模型设计

2.1 真三轴模型试验台

巷道开挖以前, 围岩处于三向受力状态, 随着开挖面的临近, 围岩逐渐由三向应力状态转变为平面应力状态。除巷道围岩表面单元体以外, 围岩总是处在第三向应力较弱的三向应力状态, 而不会处于绝对的平面应力状态。第三向应力虽然较低, 但对围岩控制具有重要意义。支护的目的就是在于提高第三向应力水平, 使围岩保持较高的残余强度, 实现自稳。因此, 真三轴试验台为支架与围岩相互作用关系的研究提供了先进的试验手段。

真三轴试验台结构如图1所示, 它由液压系统、外围刚性座(6个)、柔性加载液压枕(6个)等组成。其主要特点: ①立体加载, 三个方向施加不同载荷, 最大加

载能力达 10MPa; ②柔性加载, 防止载荷冲击; ③满足试验的刚度要求。

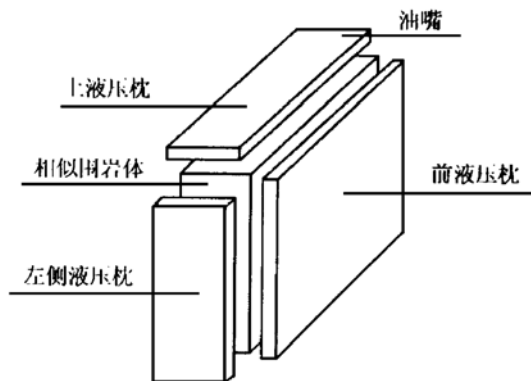


图1 真三轴试验台结构简图

Fig.1 Sketch of true triaxial experimental bench

2.2 大比例模型设计

锚杆与围岩的相互作用同围岩破坏后的围岩块度具有密切的关系。相似材料围岩破坏后形成的块度与实际围岩块度处于同一数量级, 而小比例模型试验所采用的试验锚杆与实际锚杆并不处于同一数量级。小比例模型的实质是将小锚杆作用于大块度的围岩, 在

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No.59574001)。

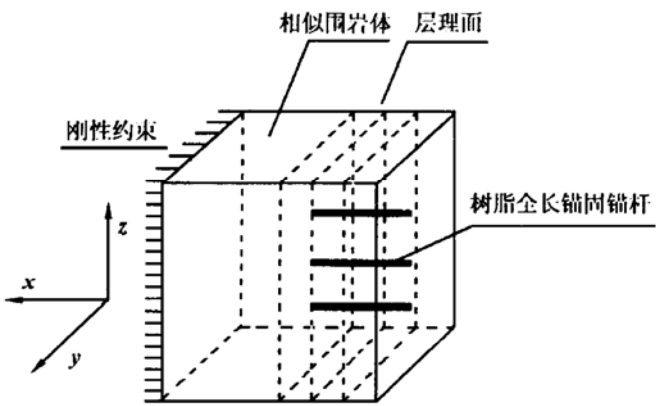
到稿日期: 1998-03-16。

表 1 相似模型围岩性质参数表

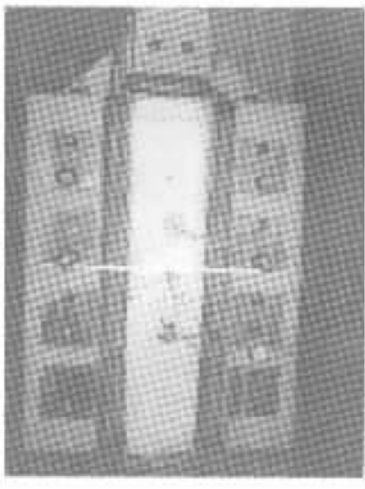
Table 1 Surrounding rock properties of simulating model

参数	锚杆				围岩性质					
	直径 (mm)	长度 (m)	强度 (MPa)	弹模 (GPa)	单轴抗压 强度 (MPa)	弹模 (MPa)	内聚力 (MPa)	内摩 擦角 (°)	泊松比	原岩应力 (MPa)
原型	20	2	400	200	10.7	3.97	4.68	34	0.14	5.0, 7.5, 15.0
相似比	$c_l = 4$	$c_l = 4$	$c_\sigma = 6$	$c_\sigma = 6$	$c_\sigma = 6$	$c_\sigma = 6$	$c_\sigma = 6$	$c_f = 1$	$c_u = 1$	$c_\sigma = 6$
模型计算参数	5	0.5	67	34	1.78	0.66	0.78	34	0.14	0.83, 1.25, 2.25
模型实际采用参数	8	0.5	80	70	1.58	0.6	0.68	32	0.24	0.8, 1.2, 2.2

注：模型采用铝质锚杆，相似材料主要为砂、石膏 4:1 和少许水泥。



a) 模型结构



b) 模型

图 2 模型结构

Fig.2 Structure of model

这一点上小比例模型与锚杆支护实际失去了相似性，从而给研究锚杆与围岩相互作用关系带来了困难。

为了使锚杆与围岩相互作用关系的研究更符合实际，采用几何相似比为 1:4 比例较大的模型，它的具体参数如表 1 所示。模型可铺设云母粉作为层理面（图 2），以模拟复合顶板。铺设后要经过 7d 的预压（三轴等压）和干燥。待相似材料干燥，且应力在岩体中均匀分布后，将模型右侧刚性座和液压枕拆下，模型继续加载时，保持 y, z 两方向等压，右侧液压枕和刚性座为刚性约束（图 2）。按照设计布置 $\phi 20\text{mm}$ 的锚杆眼，在模型表面涂一层乳胶模拟喷层和钢丝网，如图 2 所示，

共设置 3 根全长锚固树脂锚杆，锚杆用铝制作（图 3），截面为 $8 \times 8\text{mm}$ ，锚杆间距为 150mm 。模型锚杆均为测力锚杆，每根锚杆上粘贴 4 个应变片，由静态电阻应变仪监测；表面位移由千分表监测；深部位移采用 6 点机械式多点位移计监测。为便于理解和讨论，将试验模型测试结果数据换算成原型情况时的数据进行分析，例如：模型的表面位移为 1mm ，它对应的原型变形应为 4mm 。



图 3 试验采用的铝锚杆

Fig.3 Aluminium bolts used in experiments

3 锚固围岩碎胀变形阶段

对模型施加 5MPa 载荷，并采用真三轴试验台的蓄能囊稳压。岩体位移如图 4 所示。围岩表面最先位移，接着向岩体深部扩展，岩体碎胀由围岩表面向岩体深处逐渐扩展的过程，与井下测试结果完全一致。围岩位移趋向稳定时，表面位移量为 26.8mm ， 2m 深处（锚杆端部）位移量为 3.5mm ，为表面位移量的 13% 。在锚固范围以内，深部岩体碎胀时，浅部围岩在继续碎胀。围岩状态如图 5 所示，围岩完好，锚杆略微向岩体内陷入。

锚杆载荷如图 6 所示。随着围岩位移，径向锚固力增长。开始时，尾部杆体载荷增长快，随着围岩位移，头部杆体载荷也迅速增长，杆体最大轴力点由尾部杆体转移到杆体中央，当围岩表面位移达 26.8mm 时，围岩变形趋向稳定，锚杆载荷也趋向于稳定。

当加载压力为 5MPa 时，锚固围岩发生了碎胀变

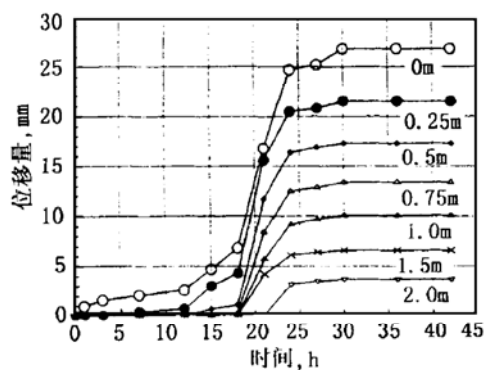


图4 锚固围岩碎胀变形阶段岩体位移

Fig.4 Rock displacement in the dilatancy deformation stage of rock within bolting range



图5 锚固围岩碎胀变形阶段围岩状态

Fig.5 Rock status in the dilatancy deformation stage of rock within bolting range

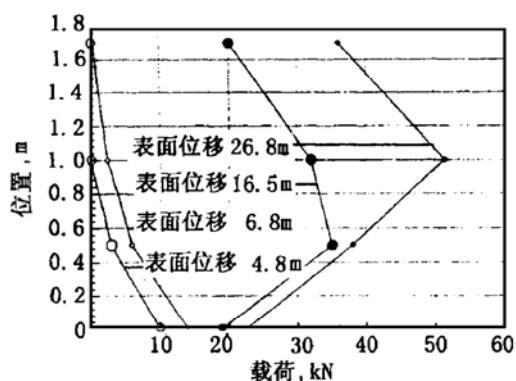


图6 锚固围岩碎胀变形阶段锚杆载荷

Fig.6 Load of bolts in the dilatancy deformation stage of rock within bolting range

形, 锚固范围以外围岩基本未受扰动。锚杆与围岩相互作用关系表现为: 随着围岩变形的增长, 锚杆载荷持续增长, 围岩变形稳定时, 锚杆载荷停止增长。杆体的最大轴力点即杆体的中性点, 由杆体尾部逐渐向杆体中部移动, 最终位于杆体中部。在围岩碎胀变形的作用下, 锚杆产生的径向锚固力, 对锚固岩体施加围压,

抑制碎胀变形的发展。

4 锚固范围以外围岩碎胀变形阶段

当模型载荷提高到 7.5MPa 时, 岩体变形如图 7 所示。随着岩体载荷的提高, 岩体变形会继续发展。比较图 4 与图 7 发现, 锚固范围内岩体的碎胀变形量增长很少, 而锚固范围外的深部岩体的碎胀变形显著增长, 锚固岩体呈现整体位移。围岩状态如图 8 所示, 锚杆已较深地陷入围岩中。

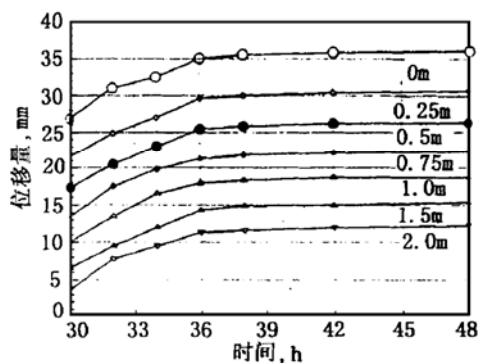


图7 锚固范围以外围岩碎胀变形阶段围岩体位移

Fig.7 Rock displacement in the dilatancy deformation stage of rock beyond bolting range



图8 锚固范围以外围岩碎胀变形阶段围岩状态

Fig.8 Rock status in the dilatancy deformation stage of rock beyond bolting range

锚杆载荷如图 9 所示, 随着围岩变形的发展, 锚杆载荷不再明显增长, 杆体载荷出现波动, 杆体平均载荷基本不变。

随着模型载荷提高, 围岩变形又经历了锚固范围以外围岩碎胀变形阶段, 在这一阶段中, 锚固围岩碎胀变形量很小, 因而杆体载荷不再继续增长。锚固围岩在深部围岩碎胀变形的推动下作整体位移, 在锚杆的

作用下,锚固范围内已经破坏的岩块相互挤压、咬合,在整体移动过程中,保持稳定结构。

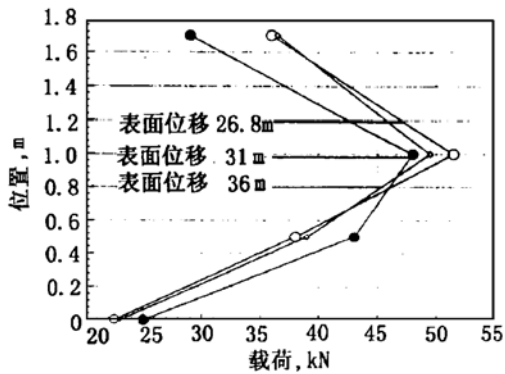


图9 锚固范围以外围岩碎胀变形阶段锚杆载荷

Fig.9 Load of bolts in the dilatancy deformation stage of rock beyond bolting range

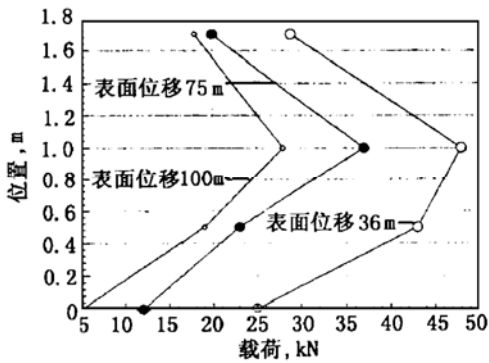


图10 围岩失稳阶段锚杆载荷

Fig.10 Load of bolts in the rock failure stage

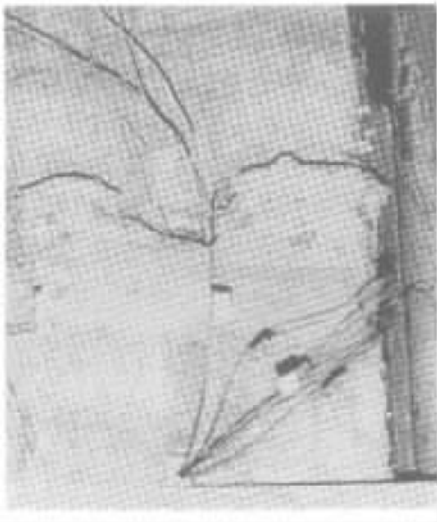


图11 围岩失稳状态

Fig.11 Rock failure

5 围岩失稳阶段

当模型载荷提高到 15MPa 时,岩体变形再次迅速

增长,锚固范围内岩体仍继续整体位移。由于变形量过大,已不能保持稳定结构,围岩表面出现破裂和剥落,继而发生垮落。

如图 10 所示,随围岩变形的迅速增长,锚杆载荷开始时呈现剧烈波动,当围岩位移达到 75mm 时,锚杆载荷迅速下降,位移量达到 100mm、围岩表面开裂 (图 11) 时,锚杆部分失效,同时出现围岩大块垮落,围岩完全失稳。它表明锚杆载荷迅速下降是围岩失稳的前兆。

当锚固岩体发生整体位移时,锚杆的作用是将锚固范围内的破碎岩体锁紧、形成稳定结构。但是,锚杆的锁紧作用,在围岩变形量超过一定范围、围岩出现较严重的破裂时,会迅速丧失,表现为锚固力迅速降低,继而围岩完全失稳。

6 结 论

巷道围岩变形破坏过程中锚固力的变化规律:试验采用的三种压力 5.0MPa, 7.5MPa, 15.0MPa 分别代表了三种条件,即围岩稳定性系数 ($\gamma H/R_c$) 为 0.5, 0.75, 1.5。

围岩较稳定 (系数为 0.5) 时,围岩变形全过程仅包括锚固围岩碎胀变形阶段,这一阶段中,围岩的碎胀变形发生在锚固范围以内,随着围岩变形,锚杆立即产生锚固力,并随着围岩变形的增长而迅速增长,对锚固围岩体提供强大的约束力,显著减少锚固围岩体的碎胀变形;

围岩不稳定 (系数为 0.75) 时,围岩变形全过程包括锚固围岩碎胀变形阶段和锚固范围以外围岩的碎胀变形阶段。在锚固范围以外围岩碎胀变形阶段,锚固围岩碎胀变形量很小,锚杆的载荷不再有明显的增长。这时锚固围岩整体移动,对深部围岩的变形起到了挡固的作用,锚固机理体现为锚杆群的作用;

围岩极不稳定 (系数为 1.5) 时,围岩变形全过程包括锚固围岩碎胀变形阶段、锚固范围以外围岩的碎胀变形阶段和围岩失稳阶段。在围岩失稳阶段,锚固岩体整体位移过程中,不能继续保持稳定结构,围岩将开裂、垮落,完全失稳。

参 考 文 献

- 1 汤雷. 锚固力作用机理及锚固技术研究 [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 1998.
- 2 李鸿昌编著. 矿山压力的相似模拟试验. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.