

岩石的应力松弛是岩石重要的流变力学特性之一.对于深部软岩巷道,巷道围岩应力升高,松动破裂范围扩大,巷道变形量大.在一般支护手段加固后,区域内的破裂岩石表现出显著的流变特性,而破裂区围岩的应力松弛特性加剧了巷道矿压显现,给巷道围岩控制带来了极大的困难^[1,2].因此,研究岩石峰后松弛特性的变化规律,对工程巷道围岩的稳定性控制有着十分重要的意义.

现阶段对岩石应力松弛特性研究集中于完整岩石的应力松弛,即岩石峰前应力松弛特性^[3-8],关于岩石峰后松弛特性研究相对较少.原因一方面在于应力松弛试验对试验设备要求较高,设备必须保持长时间应变恒定的性能,另一方面在于峰后试验开展技术难度大,试验成功率低.在岩石峰后松弛试验方面,唐礼忠等^[9]进行了峰值荷载下岩石应力松弛试验,结果表明峰值下的松弛呈间断式、阵发式;于怀昌等^[10]对粉砂质泥岩进行了峰前、峰后三轴压缩应力松弛试验,发现松弛曲线中峰后应变软化段应力松弛量大、应力松弛速率快,应尽量避免岩石处于该阶段;李晓等^[11]利用 MTS815 岩石力学试验系统开展了三轴压缩下砂岩峰后应力松弛试验,得出了破裂砂岩应力松弛特性显著,松弛曲线包括快速松弛段与减速松弛段的结论.由上述分析可以看出,关于岩石峰后松弛特性的研究只是进行了部分探索,还缺乏系统的研究,围压、损伤程度等因素与岩石峰后松弛特性的关系有待进一步揭示.鉴于此,本文采用 MTS815 电液伺服岩石力学试验机,对红砂岩进行三轴压缩峰后松弛试验,获取了不同性态的峰后松弛曲线,研究了损伤程度、围压以及初始应力对应力松弛量、松弛稳定时间的影响规律.

1 试验概况

1.1 试验岩样与设备

试验取样为红砂岩,呈褐红色,质地均匀,无层理、裂隙.根据岩石力学学会(ISRM)推荐标准,制备成高度与直径比为 2 : 1 的圆柱形岩石试样,即直径 50 mm,高 100 mm.设备采用 MTS815 多功能电液伺服刚性试验机(图 1).该试验机具备轴压,围压,孔隙水压和温度 4 套独立的闭环伺服控制功能,能进行单轴压缩、三轴围压、渗透压、孔隙压等试验,最大轴向力 4 600 kN,最大围压 140 MPa,试验系统由加载系统、控制器、测量系统等组成,试验全程由程序控制,自动完成数据的采集,具有试验精度高、处理数据方便等优点,是较为理想的岩石力学实验设备.

1.2 试验方法

首先根据常规三轴压缩试验,对试样施加轴压进入峰后阶段,加载路径为预加载→位移加载→固定变形.在预加载阶段,轴压与围压等时施加,施加一定的轴向预应力,施加围压到指定围压值.在位移加载阶段,采用位移加载控制模式,以等应变速率增加轴向位移至峰后某一应力状态.在固定变形阶段,保持试件的变形不变直至荷载基本稳定.试验过程中试验系统自动采集数据,采集频率为峰前阶段每 5 s 1 次,峰后松弛阶段每 1 s 1 次.



图 1 MTS815 电液伺服刚性试验机



图 2 岩样破坏形态

2 试验结果及分析

2.1 损伤程度对峰后松弛的影响

深部巷道的开挖造成周边围岩的损伤程度不同,不同损伤程度围岩的应力松弛特性也存在较大差异.

在本次试验加载方法中,由于对岩样施加轴压至峰后预设值(如峰值荷载的 70%),即峰后阶段伺服机监测轴向荷载下降至峰值荷载的 70%(该百分比由伺服机程序控制)时,系统程序自动恒定轴向位移运行松弛,则该百分比数值越大即越接近峰值,损伤程度越小,百分比数值越小即越远离峰值,损伤程度越大,取该百分比数值为损伤比.将岩样峰后松弛试验参数整理在表 1 中,取稳定应力与初始应力的比值为剩余应力百分比,岩样峰后松弛的破坏形态如图 2 所示,峰后松弛试验曲线如图 3 所示.

由图 3 可知,岩样峰后松弛曲线大致分为 2 个阶段:瞬时松弛阶段和减速松弛阶段.在瞬时松弛阶段,初始应力较大,松弛曲线短时间内呈直线下降,应力衰减速率较快,应力衰减量大;在减速松弛阶段,松弛曲线下降平缓,应力衰减速率降低,应力衰减量小,随着时间的推移,松弛曲线呈一条近似平行于时间轴的直线,应力趋于恒量.比较不同损伤比下峰后松弛试验结果,岩样损伤比为 70%时,峰后松弛稳定应力为 1.45 MPa;岩样损伤比为 85%时,峰后松弛稳定应力维持一定的强度,且剩余应力百分比均在 65%以上;岩样损伤比为 75%时,剩余应力值百分比均达到 91%以上,可见在损伤程度较大情况下,岩样峰后松弛后没有承载能力,减小岩样的损伤程度,岩样峰后松弛后并不失稳,而是保留一定的强度,且峰后松弛曲线都呈现非完全衰减型类型.比较不同位移加载速率下峰后松弛试验结果,HS1-1 位移加载速率为 10^{-3} mm/s,岩样的轴向荷载 32 min 内降至 1.45 MPa,发生失稳破坏;HS1-3 位移加载速率为 10^{-4} mm/s,岩样的轴向荷载 18 min 内降至 1.13 MPa,发生失稳破坏,说明加大位移加载速率在一定程度上延长了峰后松弛失稳时间.

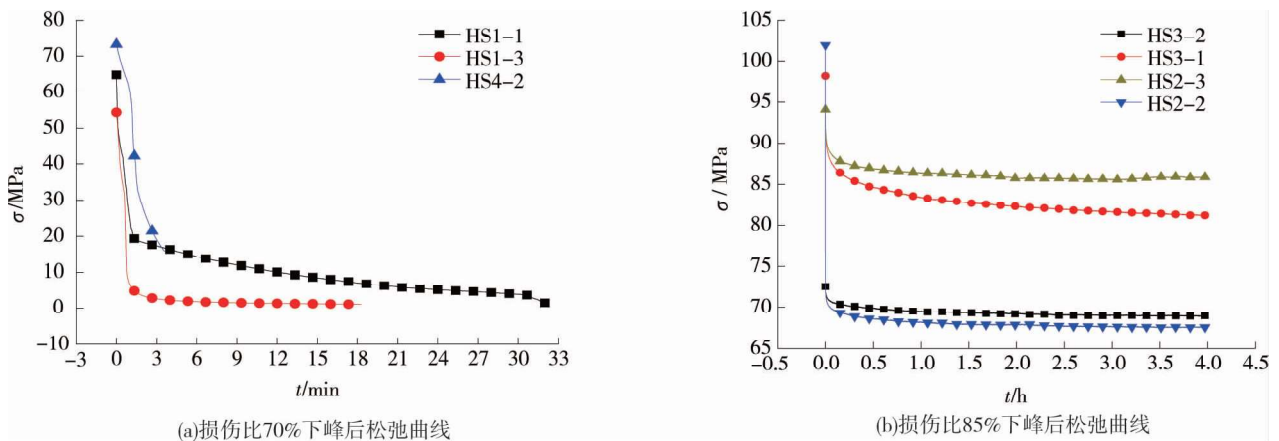


图 3 不同损伤比下峰后松弛曲线

为研究应力松弛量与初始应力的关系,绘制了不同损伤比下初始应力-应力衰减量曲线如图 4.可以看出,无论在何种损伤比下,应力衰减量总是随着初始应力增大而增大,且初始应力较小时,应力衰减量极小,初始应力增大,应力衰减量近似以一定函数关系呈非线性增大.究其原因,岩样的应力松弛并没有外来能量的供给,仅是由于岩石材料结构的弱化而引起内部应力降低,在岩样破裂初期,内部微裂纹的产生和扩展速度最快,应力下降速率较快,应力松弛量也较大,随着时间的推移,应力松弛速率逐渐减小,应力也逐渐趋于恒定.此外,同一初始应力下,损伤比 75%的峰后松弛曲线始终在损伤比 85%上方,说明损伤程度越大,应力衰减量越大.由此可知,峰后松弛曲线主要由瞬时松弛阶段和减速松弛阶段组成,在较小损伤程度下,曲线呈非完全衰减型类型;损伤程度、位移加载速率以及初始应力对峰后松弛有重要的影响,增大位移加载速率能在一定程度上延长峰后松弛失稳时间,减小损伤程度能使峰后松弛以衰减松弛为主,很快趋于稳定.岩石峰后应力松弛量与损

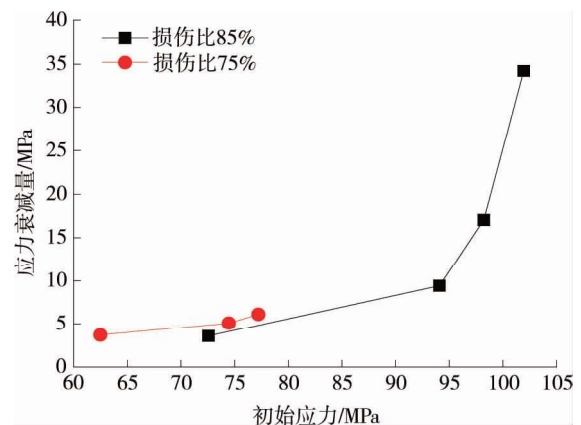


图 4 不同损伤比下初始应力-衰减量曲线

伤程度、初始应力有关,损伤程度越大或初始应力越大,应力松弛量也越大,反之亦然。

表 1 松弛试验特征参数

试样编号	损伤比/%	位移加载 速率/(mm/s)	松弛时 长/h	初始应 力/MPa	稳定应 力/MPa	应力衰减 量/MPa	剩余应力 百分比/%	围压/MPa
HS1-1	70	10 ⁻³	0.530	64.87	1.45	63.42	-	15
HS1-3	70	10 ⁻⁴	0.304	54.39	1.13	53.26	-	
HS4-2	70	10 ⁻³	0.077	73.22	1.22	72.00	-	
HS2-2	85	10 ⁻³	4.200	101.94	67.74	34.20	66.45	
HS2-3	85	10 ⁻³	12.550	94.09	84.68	9.41	90.00	
HS3-1	85	10 ⁻³	4.000	98.22	81.19	17.03	82.66	
HS3-2	85	10 ⁻³	4.000	72.57	69.00	3.57	95.10	
HS5-1	75	10 ⁻³	4.000	62.49	58.81	3.68	94.10	
HS5-2	75	10 ⁻³	4.000	77.22	72.14	5.08	93.40	
HS8-1	75	10 ⁻³	4.000	68.22	61.84	6.38	91.48	
HS6-1	75	10 ⁻³	4.000	88.25	66.82	21.43	75.72	10
HS6-2	75	10 ⁻³	4.000	89.39	61.80	27.59	69.14	
HS6-3	75	10 ⁻³	4.000	74.21	66.08	8.13	89.04	
HS7-1	75	10 ⁻³	4.000	79.87	70.10	9.77	87.77	
HS7-2	75	10 ⁻³	4.000	77.66	69.04	8.62	88.90	

2.2 围压对峰后松弛的影响

在上述试验基础上,进行不同围压下峰后松弛试验,峰后松弛曲线如图 5,不同围压下的初始应力-应力衰减量曲线如图 6.由图 5 可知,10 MPa 围压下峰后松弛曲线依然反映出松弛 2 阶段特征,减小围压后,瞬时松弛阶段应力衰减量明显增大.由图 6 可知,不同围压下应力衰减量依然随着初始应力的升高而增大,同一初始应力下,10 MPa 围压下峰后松弛曲线始终在 15 MPa 围压下峰后松弛曲线上方,可见减小围压,应力衰减量加大.为了进一步分析围压和损伤程度对峰后松弛的影响,依据试验数据拟合了不同围压与损伤比下初始应力-应力衰减量关系曲线,如图 7 所示.

10 MPa 围压下损伤比 75%时岩样初始应力-应力衰减量拟合曲线方程为 $y = \exp(38.845 - 0.969x + 0.00639x^2)$; $R^2 = 0.98999$.

15 MPa 围压下损伤比 85%时岩样初始应力-应力衰减量拟合曲线方程为 $y = \exp(26.721 - 0.0655x + 0.004199x^2)$; $R^2 = 0.99958$.

从图 7 知,围压和损伤程度对峰后松弛特性有显著的影响.总体上,应力衰减量总是随着初始应力的增大而增大.若围压越大,损伤程度越小,则应力衰减量越小;若围压越小,损伤程度越大,则应力衰减量越大,说明应力松弛量与围压呈负相关,与损伤程度呈正相关.

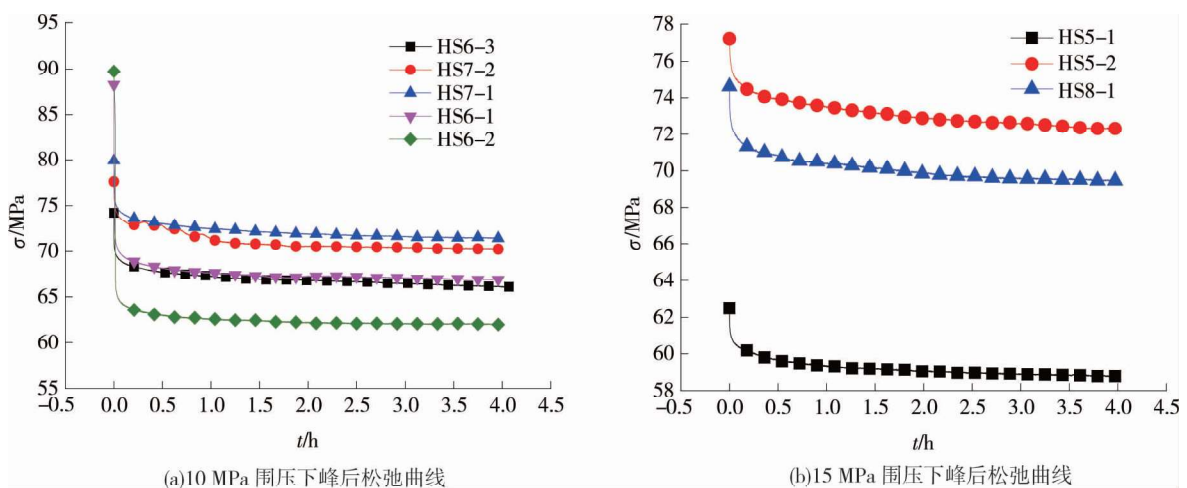


图 5 不同围压下峰后松弛曲线

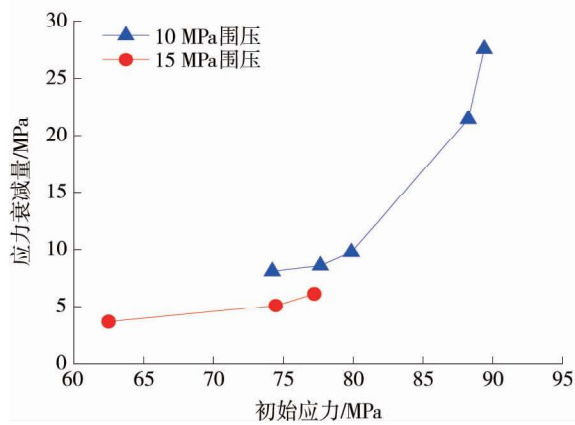


图6 不同围压下初始应力-衰减量曲线

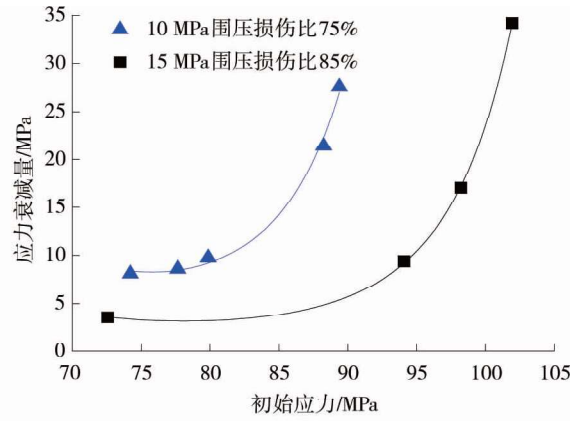


图7 不同围压与损伤程度下应力-衰减量拟合曲线

3 结论

1) 红砂岩峰后松弛效应显著,峰后松弛曲线主要由瞬时松弛段和减速松弛段组成,较小损伤程度下,峰后松弛曲线呈非完全衰减型类型。

2) 损伤程度和位移加载速率对峰后松弛特性有重要的影响,损伤程度较大时,岩样峰后松弛后没有承载能力,减小损伤程度,岩样峰后松弛后并不失稳破坏,而是保留一定的强度.增大位移加载速率能在一定程度上延长岩样峰后松弛失稳时间,减小损伤程度能使峰后松弛以衰减松弛为主,很快趋于稳定。

3) 应力松弛量与围压、损伤程度以及初始应力有关.不同的围压和损伤程度下,应力松弛量总是随着初始应力的增大而增大.围压越大,损伤程度越小,应力松弛量越小;围压越小,损伤程度越大,应力松弛量越大,即应力松弛量与围压负相关,与损伤程度正相关。

参考文献:

- [1] И Л 切尔尼亚克, Ю И 布尔恰科夫. 深矿井采准巷道围压控制[M], 常惊鸿, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [2] 王襄禹, 柏建彪, 陈勇, 等. 深井巷道围岩应力松弛效应与控制技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1072-1077.
- [3] 熊良宵, 杨林德, 张尧. 绿片岩多轴受压应力松弛试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1158-1165.
- [4] 刘小伟, 湛文武, 张帆宇, 等. 新近系红层软岩流变特性试验研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1268-1274.
- [5] 刘志勇, 肖明砾, 谢红强, 等. 基于损伤演化的片岩应力松弛特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(s1): 101-107.
- [6] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [7] 于怀昌, 周敏, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 803-811.
- [8] 田洪铭, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 宜一巴高速公路泥质红砂岩三轴应力松弛特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 981-986.
- [9] 唐礼忠, 潘长良. 岩石在峰值荷载变形条件下的松弛试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 940-942.
- [10] 于怀昌, 董金玉, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩峰前、峰后应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(s1): 2663-2672.
- [11] 李晓, 王思敬, 李焯芬. 破裂岩石的时效特性及长期强度[C]//中国岩石力学与工程学会第5次学术大会论文集. 北京: 1998: 214-219.

厚土层厚基岩大采高综采面矿压规律

唐仁龙^{1*}, 李龙清¹, 唐永刚²

(1.西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2.西安科技大学 高新学院, 陕西 西安 710109)

摘要:以小保当煤矿2⁻²煤层300 m埋深5 m大采高综采面地质条件为背景,采用理论分析和相似模拟相结合的方法,对厚土层厚基岩工作面上覆岩层结构、来压步距和支架工作阻力等进行研究.结果表明:2⁻²煤上覆岩层存在“双关键层”结构,亚关键层和主关键层共同作用导致工作面的大小周期来压现象,大、小周期来压步距分别为23,12 m.动载系数1.31,工作面来压较为剧烈.来压过程中支架工作阻力平均为12 643 kN,最大工作阻力为13 633 kN.工作面煤壁支承压力峰值为14.73 MPa,峰值位于采场煤壁前方5.5~20 m,支承压力增幅剧烈的区域为煤壁前方50 m范围内.小保当矿2⁻²煤厚土层厚基岩大采高综采面矿压规律与榆神府矿区近浅埋煤层矿压特点相似,为小保当煤矿2⁻²煤安全开采提供依据.

关键词:大采高;厚土层;厚基岩;矿压规律;双关键层

中图分类号:TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)02-0054-06

On Mine Strata Pressure Law for Fully Mechanized Face of Large Mining Height with Thick Bedrock and Alluvium

Tang Renlong¹, Li Longqing¹, Tang Yonggang²

(1.School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Kedagaoxin University, Xi'an 710109, China)

Abstract: With the background of fully mechanized face of 5.0 m height and 500 m buried depth of Xiaobaodang 2⁻² coal seam, and through the theoretical analysis and similar material simulation experiment, this paper analyzes the strata structure and weighting distance, etc. Results show that, there are two groups of key layer of overlying strata of the 2⁻² coal seam. The broken of the main key stratum and the secondary key stratum thus the roof weighting distance will be alternatively varied in size, that is 23 m and 12 m. The dynamic load coefficient is 1.31 and the intensity of mine pressure is more violent. During the roof weighting, the average support load and maximum support load are 12 643 kN and 13 633 kN. Dramatic increase region of abutment pressure is 50 m range in front of coal wall, abutment pressure peak value is 14.73 MPa and locates in the front of the coal wall 5.5~20 m range. The mine strata pressure law for fully mechanized face of large mining height with thick bedrock and alluvium of Xiaobaodang 2⁻² coal seam has the similar mine pressure characteristics of near shallow seam in Yushen mining area. These parameters have provided scientific basis for safe mining of Xiaobaodang 2⁻² coal seam.

Keywords: large mining height; thick bedrock; thick alluvium; mine strata pressure law; double-key strata

神东、榆神矿区煤层赋存的突出特点是埋藏浅、顶板基岩薄、地表被厚风积沙所覆盖.根据矿井初期实践结果,浅埋煤层厚松散层下与普通非浅埋煤层采动影响形成的顶板结构和来压特征具有明显区别,且长壁回采工作面普遍出现台阶下沉现象,矿压显现比较强烈^[1,2].很多学者对埋深浅、基岩薄、上覆厚松散层的煤层和大采高采场的矿压理论进行了深入的研究^[3-5],取得了一定成果.但榆神矿区小保当煤矿2⁻²煤

层平均埋藏深度 300 m,基岩厚 250 m 左右,其上覆盖土层厚度 50 m 左右,不同于一般条件下榆神矿区的特点.当覆岩层赋存条件不同时,煤层开采将表现出不同的工作面矿压规律,上覆岩层的运移规律也存在较大的差异.我国研究者目前对此条件下的矿压规律研究较少,所以有必要对该地质条件下的矿压规律进行研究.

1 开采条件分析

1.1 开采条件

小保当主要可采煤层 2⁻²煤,其埋深为 194.53~401.22 m,平均埋深 300 m,基岩厚 250 m 左右,其上覆盖土层厚度 50 m 左右.2⁻²煤厚度为 3.30~9.86 m,平均煤厚 5.5 m.标准差 1.52,变异系数 0.27,全区可采.直接顶岩性以薄层粉砂岩为主,厚度一般为 2~5 m;基本顶岩性以粉砂岩、细粒砂岩、中粒砂岩为主,具有厚层节理不发育的整体均质特征,属于易软化的中硬类岩石.2⁻²煤层直接顶与基本顶岩石物理力学参数见表 1,2⁻²煤层钻孔柱状见图 1.

表 1 岩石物理力学参数

煤层 顶板	岩性	天然容重 /(g/cm ³)	饱和抗压 强度/MPa	抗拉强度 /MPa	抗剪强度		弹性模量/ (10 ⁴ MPa)	泊松比
					C/MPa	φ/(°)		
	粉砂岩	2.36(1)	22.70(1)	1.32(1)	2.92(1)	41.65(1)	2.785(1)	0.18(1)
2 ⁻² 煤 基本顶	细粒砂岩	2.33~2.50	16.00~27.20	1.18~1.65	2.0~3.12	37.3~38.12	1.426~2.987	0.16~0.24
		2.42(2)	21.60(2)	1.42(2)	2.59(2)	37.74(2)	2.207(2)	0.20(2)
	中粒砂岩	2.28(1)	20.70(1)	0.67(1)	1.30(1)	37.69(1)	1.247(1)	0.16(1)
2 ⁻² 煤 直接顶	粉砂岩	2.34~2.38	17.20~25.30	1.46~1.53	2.8	38.4~38.65	0.648~2.658	0.20~0.25
		2.36(2)	21.25(2)	1.50(2)	2.80(2)	38.56(2)	1.653(2)	0.23(2)



图 1 2⁻²煤钻孔柱状图