



孙修伟,梁为民,李敏敏,等. 低温和含水率对重塑性煤体抗剪强度影响研究[J]. 矿业安全与环保,2024,51(2):127-132.
SUN Xiuwei,LIANG Weimin,LI Minmin,et al. Study on the influence of low temperature and moisture content on the shear strength of remodeling coal[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(2):127-132.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20221084

扫码阅读下载

低温和含水率对重塑性煤体抗剪强度影响研究

孙修伟,梁为民,李敏敏,岳高伟,蔺海晓

(河南理工大学 土木工程学院,河南 焦作 454000)

摘要:为了研究温度—含水率耦合作用下重塑性煤体抗剪强度的变化规律,保障松软煤层安全高效稳定开采,采用直剪试验分析了重塑性煤体在较低温度(20、0、-10、-20、-30、-40 ℃)、一定含水率(0、0.8%、4%、8%、12%、16%)耦合作用下的抗剪强度特性,并通过数学统计分析了温度与含水率对抗剪强度的影响。研究表明:含水率为 0 时重塑性煤体的黏聚力随着温度的降低呈幂指数增加;温度—含水率耦合作用下重塑性煤体的抗剪强度均与垂向应力成正比,均符合莫尔-库仑准则;在温度为 10~20 ℃、含水率为 12%~16%时,黏聚力达到最大值 322.9 kPa,最小值 138.0 kPa 出现在温度-40 ℃、含水率 4%附近;在-20~-40 ℃温度下,重塑性煤体内摩擦角随含水率的增加逐渐降低至最小值 18.25°;当含水率为 6%~13%、温度为-20~10 ℃时,内摩擦角达到最大值 31.45°,对应抗剪强度达到最大值。温度—含水率耦合作用下,重塑性煤体抗剪强度、内摩擦角与黏聚力均受温度的影响较大。

关键词:重塑性煤;低温;含水率;抗剪强度;黏聚力;内摩擦角

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)02-0127-06

Study on the influence of low temperature and moisture content on the shear strength of remodeling coal

SUN Xiuwei,LIANG Weimin,LI Minmin,YUE Gaowei,LIN Haixiao

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to ensure safe, efficient and stable mining of soft coal seam, the direct shear test was conducted to analyze the shear strength characteristics of remodeling coal under the coupling effect from low temperature (20 ℃, 0 ℃, -10 ℃, -20 ℃, -30 ℃, -40 ℃) and moisture (0, 0.8%, 4%, 8%, 12%, 16%). The mathematical statistics was used to discuss the influence mechanism of temperature and moisture on the shear strength. The results show that, when the moisture is 0, the cohesion exponentially increases with the decrease of temperature. The shear strength of remodeling coal is proportional to the vertical stress, thereby conforming to the Mohr-Coulomb criterion. When the temperature increase from 10 ℃ to 20 ℃, the water content increase from 12% to 16%, the cohesion reaches the maximum of 322.9 kPa. The minimum cohesive of 138.0 kPa occurs near the temperature of -40 ℃ and the moisture of 4%. When the temperature ranging from -20 ℃ to -40 ℃, the internal friction angle gradually decreases to the minimum value of 18.25° with the increase of water content. When the moisture content increase from 6% to 13% and the temperature decrease from -20 ℃ to 10 ℃, the internal friction angle reaches the maximum value of 31.45° and the corresponding shear strength reaches the maximum value. Under the coupling effect from temperature and moisture, the shear strength, internal friction angle and cohesion are more affected by the temperature.

Keywords: remodeling coal; low temperature; moisture; shear strength; cohesion; internal friction angle

我国煤炭资源丰富,其中,60%~80%的煤层属

于松软煤层。研究煤体力学性质对煤层的安全开采有着重要的作用,但以往关于不同影响因素下重塑性煤体抗剪强度的研究较少。

目前,国内外学者的研究成果大多集中在含水率对煤体剪切强度的影响方面^[1-5]。齐学元等^[6]研究了浸水耦合作用对煤体抗剪强度的影响,煤样各项强度指标均随着浸水时间的增加而逐渐减小;樊

收稿日期:2022-10-26;2024-04-10 修订

基金项目:国家自然科学基金项目(41772163)

作者简介:孙修伟(1997—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事煤层瓦斯治理与预防方面的研究工作。E-mail:sunxiuwei0824@163.com。

育豪等^[7]研究了重塑黄土的黏聚力在最优含水率的两侧呈现出先递增后递减的趋势;WANG 等^[8]结合工程实践得出提高含水率可以提高软煤的剪切强度和塑性变形能力,随着含水率的提高,煤体峰值剪应力和应变不断增大、黏聚力逐渐增大、内摩擦角先增大后减小,在含水率为 4.23% 时内摩擦角达到最大;孙佳楠等^[9]通过直剪实验和理论分析总结了含水率和粒径对煤体抗剪强度的影响规律。

基于直剪试验结果,不少学者相继采用理论分析和模拟的方法验证了煤体剪切破坏及抗剪强度指标的变化规律^[10-16]。赵科等^[17-18]通过三维摄影测量得出各法向应力下剪切强度、刚度、黏聚力、内摩擦角的估算范围值,数值模拟得到抗剪强度指标的变化规律及结构面的细观变形破坏特征;成乾龙^[19]通过相似模拟实验,分析了煤体剪切强度与剪切速率及法向应力的关系;马兆瑞^[20]通过理论与实验分析得出:黏聚力与煤体塑性应变呈负相关关系,内摩擦角与之相反。

笔者以重塑性煤体为研究对象,研究不同温度—含水率耦合作用下的抗剪强度参数的变化规律,采用数学统计中的极差与方差分析温度—含水率对煤体抗剪强度的耦合影响,为提高煤体的稳定性,保障松软煤层安全高效稳定开采提供一定的理论支撑。

1 实验方法及过程

1.1 试样制备

实验煤样取自大峪沟镇二叠系山西组煤层,该煤层厚度平均为 4.62 m,煤层倾角平均为 7°,最大涌水量为 125.5 m³/h。将煤样自然风干,用粉碎机将煤样粉碎,筛分出 60~80 目(粒径 0.25~0.18 mm)的实验煤样。采用 YNS300 微机控制电液伺服万能试验机(见图 1)对煤体进行重塑。含水率初步设定为 20%,煤颗粒与纯净水按质量比 5:1 混合后压制成 50 mm×20 mm 的 3 组实验煤样,记为煤样 1、煤样 2、煤样 3。根据 3 组煤样含水率随着烘干时间的变化规律(见图 2),选取含水率依次为 16%、12%、8%、4%、0.8%、0 作为实验含水率控制的依据,在烘干箱内控制重塑性煤样的含水率,对煤样在 DW-40 型低温箱中进行冷冻处理,低温冷冻时间不少于 8 h(设置 10 h),以保证煤样完全冻结。在不同温度(20、0、-10、-20、-30、-40 °C)下进行剪切实验。煤样在不同水平、不同因素下的取值,记为 I 水平(20 °C, 0)、II 水平(0 °C, 0.8%)、III 水平(-10 °C, 4%)、IV 水平(-20 °C, 8%)、V 水平(-30 °C, 12%)、VI 水平(-40 °C, 16%)。



图 1 YNS300 微机控制电液伺服万能试验机
Fig. 1 YNS300 microcomputer-controlled electro-hydraulic servo universal testing machine

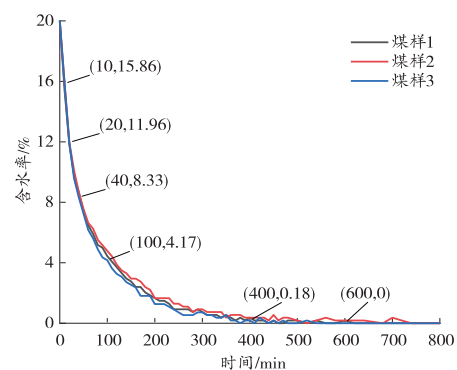


图 2 含水率随烘干时间的变化规律
Fig. 2 Variation of moisture content with drying time

1.2 实验过程

对不同温度—含水率耦合作用下的煤样进行剪切实验,直剪装置如图 3 所示。

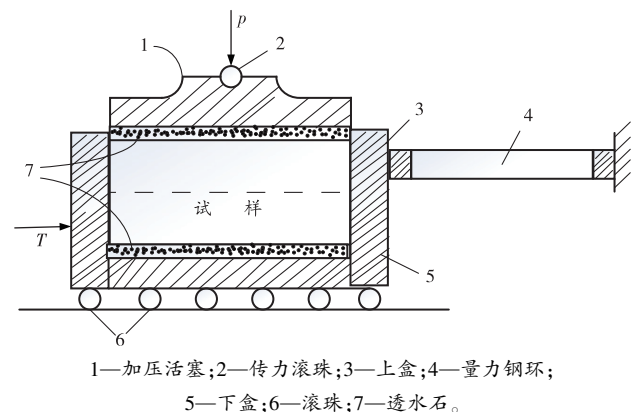


图 3 直剪装置简图
Fig. 3 Direct shear device diagram

将冻结在不同温度下的煤样迅速取出,放入剪切盒内,固定上盒,沿水平方向滑动下盒到重合位置,插上销钉,使上下盒暂时不能产生相对位移,在煤样上下铺透水石,盖上加压盖,放置传力滚珠和加力框架。首先施加竖向压力,然后拔下插销,将百分表归零,以 4~6 r/min 的速度转动手轮,直到煤样被剪切破坏。实验对不同温度—含水率耦合作用下的 36 组煤样进行直剪破坏,煤样剪切破坏图如图 4 所示。

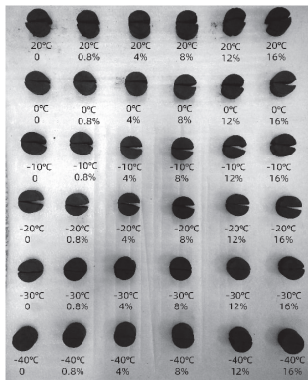


图 4 煤样剪切破坏图
Fig. 4 Coal sample shear failure diagram

1.3 抗剪强度指标的确定

由于重塑性煤体的应力变化范围很小,根据莫尔-库仑定律 $\tau=C+\sigma \tan \varphi$ 可知,剪切强度与法向应力之间存在线性函数关系。通过对水平方向上手轮

施加水平应力,直至测力计读数达到峰值,计算水平方向的应力大小,即为抗剪应力。根据抗剪强度包络线可以得出内摩擦角 φ 和黏聚力 C 。采用最小二乘法计算 $\tan \varphi$ 和 C 值:

$$\tan \varphi = a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (1)$$

$$C = \bar{y} - a \bar{x} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan a \quad (3)$$

式中: \bar{x} 、 \bar{y} 分别为对应实验条件下正应力和切应力的平均值; x_i 、 y_i 分别为对应正应力和切应力的实验值; C 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

由式(1)~(3)计算得出不同含水率、较低温度耦合作用下重塑性煤体内摩擦角与黏聚力的值,各级水平下直剪实验计算结果见表 1。

表 1 直剪实验条件及计算结果
Table 1 Direct shear results

含水率/ %	温度/ °C	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	150 kPa 竖向压力下 抗剪强度/kPa	含水率/ %	温度/ °C	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	150 kPa 竖向压力下 抗剪强度/kPa
0	20	27.62	220.09	312.65	8	20	24.84	220.53	219.60
	0	28.42	228.09	305.20		0	31.69	184.22	215.88
	-10	27.09	226.14	320.09		-10	18.34	198.21	228.90
	-20	26.25	220.53	290.36		-20	21.66	154.47	219.60
	-30	28.25	249.37	353.59		-30	17.05	174.01	228.90
	-40	27.22	322.89	357.56		-40	28.33	147.02	219.60
0.8	20	26.24	228.10	290.32	12	20	31.39	249.37	223.32
	0	24.59	228.90	307.07		0	24.00	226.11	223.32
	-10	25.00	174.03	264.26		-10	31.57	164.79	212.15
	-20	24.00	147.94	307.07		-20	29.26	145.17	219.60
	-30	26.08	139.57	299.62		-30	16.78	195.40	254.96
	-40	23.79	120.16	292.18		-40	19.07	174.01	260.54
4	20	29.04	226.10	247.06	16	20	27.93	322.89	187.96
	0	21.04	209.40	241.93		0	21.49	225.18	189.82
	-10	20.25	204.70	256.82		-10	26.57	156.33	200.99
	-20	22.97	155.39	241.93		-20	26.73	143.29	227.04
	-30	21.93	149.82	260.54		-30	17.45	207.43	254.96
	-40	24.25	135.85	240.07		-40	17.26	198.12	245.65

2 实验结果分析

2.1 温度对重塑性煤体抗剪强度的影响

不同温度下抗剪强度与垂直应力的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出,不同温度下重塑性煤体的抗剪强度均随着垂直应力的增大而增大。在垂直应力一定时,抗剪强度随着温度的降低逐渐增高。相比较 20 °C,同一垂直应力下重塑性煤体抗剪强度在 0、-10、-20、-30、-40 °C 最大依次提高了 1.04%、4.66%、8.29%、19.17%、33.68%。温度对抗剪强度的影响较小,这是由于煤样烘干后含水率几乎接近 0,煤体孔隙率受低温冻结作用影响小,水所产生的冻

胀率不大于孔隙率,因此,重塑性煤体抗剪强度相对增长率受温度影响变化不大。

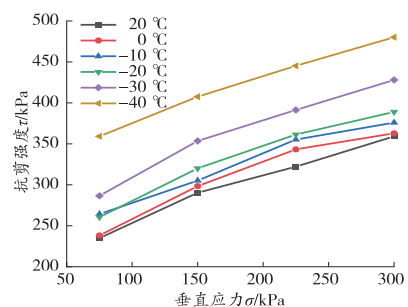


图 5 重塑性煤体 $\tau-\sigma$ 关系图
Fig. 5 Remolded coal relationship diagram of $\tau-\sigma$

重塑性煤体的黏聚力、内摩擦角与温度之间的关系如图6所示。从图6可以看出,在一定温度范围内(-40~20℃),随着温度的增高,黏聚力逐渐降低,与幂指数函数曲线拟合效果较好。这是由于重塑性煤体在烘干过程中一部分水分残留,低温作用下残留水分冻结成冰,煤体内部的黏结作用增强。温度高于0℃,黏聚力随温度的变化较小。这是由于随着温度的升高,部分残留水分进入煤体内部,浸润煤体,加速了煤体颗粒的流动,导致煤体的黏聚力有降低的趋势。随着温度的增高,重塑性煤体的内摩擦角在27.5°上下波动,表明温度的变化对重塑性煤体内摩擦角的影响较小。

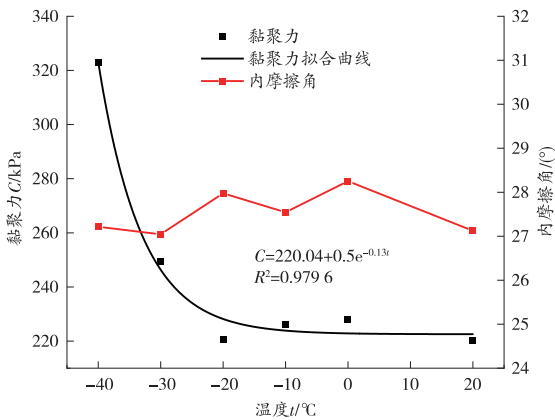


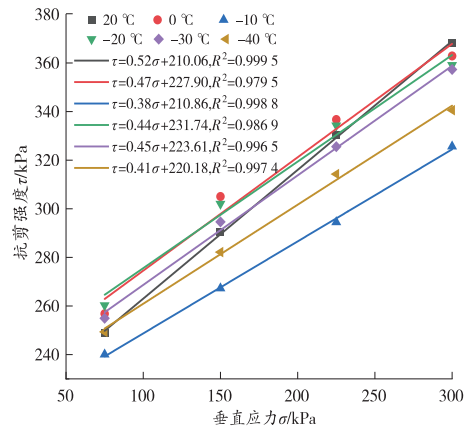
图6 黏聚力、内摩擦角与温度之间的关系

Fig. 6 The relationship between cohesion, internal friction angle and temperature

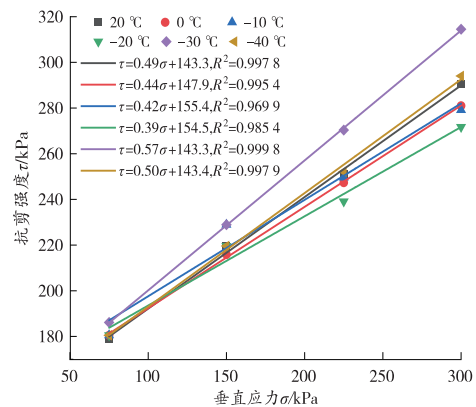
2.2 温度—含水率耦合作用下对重塑性煤体抗剪强度的影响

对重塑性煤体进行6个温度、5种含水率条件下的交叉剪切实验,拟合得到了不同温度—含水率耦合作用下重塑性煤体抗剪强度与垂直应力的关系曲线,如图7所示。可以看出,温度—含水率耦合作用下重塑性煤体抗剪强度均随着垂直应力的增大而线性增大。含水率较低(0.8%)时,呈现出温度越高,抗剪强度越大的趋势;含水率为4%、8%时,均表现出温度在-30℃抗剪强度最大,-20℃抗剪强度最小;随着含水率的继续提高,在-40℃下抗剪强度达到最大、-10℃下抗剪强度最小;当含水率达到16%时,抗剪强度在-20℃下最大,-40℃次之,20℃达到最小。一方面,由于温度—含水率耦合作用下会改变重塑性煤体的内部结构,煤体颗粒间的孔裂隙逐渐被填充,剪切面附近煤体被逐渐压实,煤体的孔隙率减小,煤体的抗剪强度得到提高;另一方面,一定含水率下煤体中水分重新迁移,分布不均匀,使煤体中的固、液、气三相界面减少,低温冻结作用下,水在孔隙中冻结成冰,降低煤颗粒间的黏结作用,界面间的摩擦力减小,煤体抗剪强度降低。因此,温度—含水率耦合作用下煤体抗剪强度呈现出差异性变化。重塑性煤体

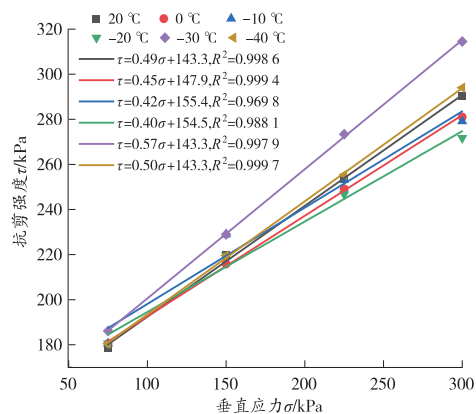
抗剪强度拟合曲线均基本符合莫尔-库仑强度准则。



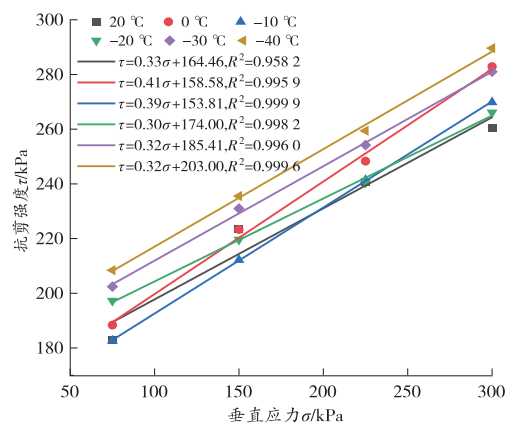
(a) 含水率为0.8%



(b) 含水率为4%



(c) 含水率为8%



(d) 含水率为12%

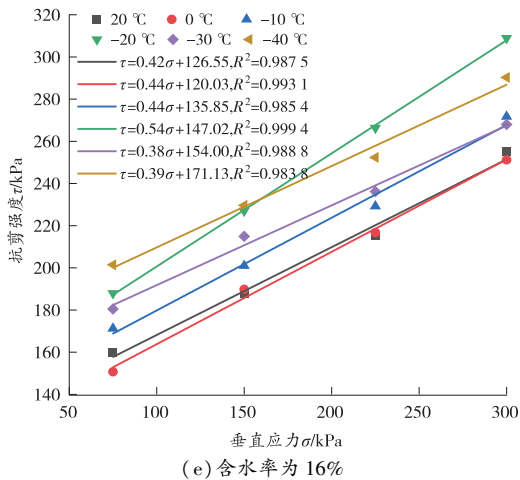


图 7 温度—含水率耦合下重塑性煤体抗剪强度拟合曲线
Fig. 7 Fitting curve of shear strength of remolded coal under temperature moisture coupling

2.3 温度—含水率耦合作用下对重塑性煤体抗剪强度指标的影响

图 8 为含水率—温度耦合作用下重塑性煤体内摩擦角等直线分布图。由图 8 可知,温度为-40~20 °C 时,随着含水率的提高,重塑性煤体内摩擦角呈现出逐渐减小的趋势。内摩擦角在温度为-40~-30 °C、含水率为 8%~16% 范围内达到最小值 18.25°。这是由于含水率较高、温度较低时,大部分水被冻结成冰,使煤体颗粒之间相对滑移变大,内摩擦角逐渐变小;温度为-20~10 °C 时,内摩擦角表现出上下波动的趋势,即先降低后增高最后再降低;当含水率为 6%~13% 时,内摩擦角出现极大值 31.45°;温度为 10~20 °C、含水率约为 13% 时,内摩擦角相对较大,达到 30.20°。这是由于温度的升高,使水分子逐渐从固态冰转变成液态水,随着水分子的增多,煤粒表面将被水分子包裹,对煤体起着润滑的作用,内摩擦力下降;当含水率继续增大,水更多地留在煤粒表面,水膜变厚,润滑作用增大,颗粒之间滑移更快,形成煤粒与煤粒之间紧密接触、互相咬合,从而又形成新的摩擦阻力。

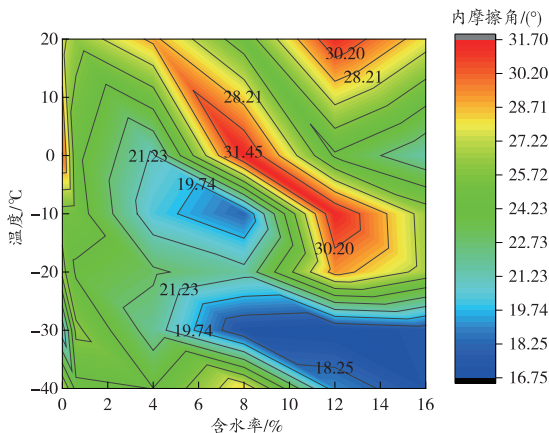


图 8 含水率—温度耦合作用下内摩擦角等直线分布图
Fig. 8 Straight line distribution of internal friction angle under water content-temperature coupling

图 9 为温度—含水率耦合作用下黏聚力等直线分布图。由图 9 可知,含水率在 8% 以下,温度越低,黏聚力越小,最小黏聚力为 138.0 kPa。当温度为-40~-20 °C 时,随着水分含量的增加,黏聚力逐渐升高;当含水率大于 8%、温度为-20~20 °C 时,温度越高,黏聚力越大;当温度为-40~-20 °C 时,煤样的黏聚力呈现出先增高后降低的趋势,最大黏聚力出现在温度 10~20 °C、含水率 12%~16% 范围内,最大值为 322.9 kPa。这是由于常温下水分没有冻结,颗粒之间的水膜变厚,产生的湿吸力增强,同时由于毛细管受力而产生的吸力也随之增强,宏观上表现为煤样的黏聚力增大。

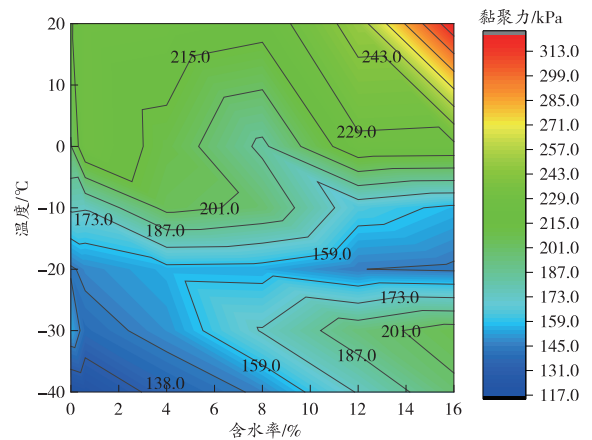


图 9 含水率—温度耦合作用下黏聚力等直线分布图
Fig. 9 Straight line distribution of cohesion under water content-temperature coupling

3 数学统计分析

3.1 抗剪强度指标极差分析

极差反映了不同水平下影响因素的主次关系,通过计算可以得出不同因素、不同水平下的抗剪强度指标的平均值与极值。对不同水平下内摩擦角和黏聚力的平均值分别进行极差分析,计算结果见表 2。

表 2 内摩擦角、黏聚力在不同因素下的平均值及极值
Table 2 The average value and extreme value of internal friction angle and cohesion under different factors

温度/ °C	内摩擦角平 均值/(°)	黏聚力平 均值/kPa	含水率/ %	内摩擦角平 均值/(°)	黏聚力平 均值/kPa
20	27.84	244.51	0	26.11	244.52
0	25.51	216.98	0.8	24.95	173.12
-10	24.47	187.37	4	23.24	180.21
-20	25.15	161.13	8	23.65	179.74
-30	19.92	185.93	12	25.34	192.47
-40	23.32	183.01	16	22.91	208.87
R(极值)	7.92	83.38	R(极值)	3.20	71.40

重塑性煤体抗剪强度指标的极差是指温度—含水率耦合作用下煤体黏聚力、内摩擦角各自的最大值与最小值的差值。通过采用数学统计中极差分析煤体的内摩擦角和黏聚力得出,随着温度、含水率等影响因素的变化,内摩擦角与黏聚力的平均值均呈现出先降低后增高的趋势。内摩擦角与黏聚力在温度水平下的极差均比含水率极差大。说明温度的变化对重塑性煤体内摩擦角和黏聚力的影响更大,进一步说明温度—含水率耦合作用下,温度对抗剪强度指标影响较大。

3.2 抗剪强度方差分析

为了分析抗剪强度在不同影响因素下的影响关系,采用 SPSS 对 150 kPa 竖向压力下抗剪强度进行方差分量估计分析,结果见表 3。

表 3 方差分量估计分析
Table 3 Variance component estimation analysis

来源	偏差平方和	自由度	均方偏差	F
含水率	4 908.66	5	981.732	0.477
温度	54 961.65	5	10 992.330	28.280
误差	6 751.16	25	270.050	
校正后总数	66 621.47	35		

在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, $F_{1-\alpha}(5, 35) = 8.48$, 含水率的 $F = 0.477 < F_{1-\alpha}(5, 35) = 8.48$, 说明在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下含水率的变化对 150 kPa 竖向压力下的抗剪强度没有显著意义。温度的 $F = 28.280 > F_{1-\alpha}(5, 35) = 8.48$, 说明在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下温度的变化对 150 kPa 竖向压力下的抗剪强度有显著意义,其他竖向压力下影响结果相同。由此可以从理论上得出:在温度—含水率耦合作用下,温度的变化对抗剪强度的影响大于含水率的影响。

4 结论

1) 温度—含水率耦合作用下,重塑性煤体剪切强度均随着垂直应力的增大呈线性增大趋势,温度越低,剪切强度越大。当含水率为 0 时,温度对重塑性煤体的内摩擦角影响较小,黏聚力随着温度的升高而逐渐降低,与指数函数拟合效果较好。

2) 温度—含水率耦合作用下,重塑性煤体内摩擦角取值范围为 $18.25^\circ \sim 31.45^\circ$ 。随着温度的降低,在含水率低于 8% 时,黏聚力逐渐降低;当含水率大于 8% 时,黏聚力呈现出先降低后增高的趋势。黏聚力最大值出现在温度为 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 、含水率为 12%~16% 区间内,最大为 322.9 kPa。

3) 温度—含水率耦合作用下,温度对 150 kPa 竖向压力下的重塑性煤体抗剪强度和抗剪强度指标的影响较大。

参考文献(References):

[1] 段天柱,任亚平.不同含水率砂岩单轴压缩力学特性及波速法损伤[J].煤田地质与勘探,2019,47(4):153-158.
DUAN Tianzhu, REN Yaping. Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4):153-158.

[2] 冯康武.水力化卸压增透技术在石门快速揭煤中的应用研究[J].矿业安全与环保,2020,47(4):62-65.
FENG Kangwu. Research on the application of hydraulic pressure relieved and permeability enhanced technology in cross-cut rapid uncovering coal[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(4):62-65.

[3] 李回贵,李化敏,许国胜.含水率对弱胶结砂岩力学特征的影响规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):60-66.
LI Huigui, LI Huamin, XU Guosheng. Influence of water content on mechanical characteristics of weakly cemented sandstone[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4):60-66.

[4] 周鹏,张博.极松软煤层抗剪强度的水敏性试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(5):103-108.
ZHOU Peng, ZHANG Bo. Experimental study on water sensitivity of shear strength of extremely soft coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5):103-108.

[5] 安鹏飞,林志峰,孙亚平.基于不同含水率的尾矿抗剪强度试验分析[J].内蒙古煤炭经济,2021(3):48-49.
AN Pengfei, LIN Zhifeng, SUN Yaping. Experimental analysis on shear strength of tailings based on different moisture content[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(3):48-49.

[6] 齐学元,邓广哲.浸水耦合作用对煤体强度影响试验研究[J].煤炭技术,2022,41(1):4-7.
QI Xueyuan, DENG Guangzhe. Experimental study on effect of water immersion coupling on coal strength[J]. Coal Technology, 2022, 41(1):4-7.

[7] 樊育豪,钱思众,李金华.不同击实能作用下填方场地重塑黄土强度试验研究[J].矿业安全与环保,2020,47(6):59-62.
FAN Yuhao, QIAN Sizhong, LI Jinhua. Experimental study on the strength of remolded loess on filled sites under different compaction energies[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(6):59-62.

[8] WANG C, GAO Y W, GUO C Y, et al. Experimental study on the influence of moisture content on soft coal strength characteristics[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2021, 12(3):163.

[9] 孙佳楠,范超.含水率及粒径对煤的抗剪强度影响研究[J].煤炭技术,2017,36(1):184-187.
SUN Jianan, FAN Chao. Research on effects of water content and particle size on shear strength of coal[J]. Coal Technology, 2017, 36(1):184-187.

[10] LI C X, NIE B S, FENG Z W, et al. Experimental study of the influence of moisture content on the pore structure and permeability of anthracite treated by liquid nitrogen freeze-thaw[J]. ACS Omega, 2022, 7(9):7777-7790.

[11] TANG C J, YAO Q L, CHEN T, et al. Effects of water content on mechanical failure behaviors of coal samples[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(3):87.

(下转第 140 页)

- weighting-TOPSIS method[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 5-10.
- [14] 黄骏,李永宾,温玉涛. 基于 GA-AHP 算法的多目标威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 90-96.
HUANG Jun, LI Yongbin, WEN Yutao. Multi-target threat assessment based on GA-AHP algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 90-96.
- [15] 孙凌云, 狄比布拉·司马义, 王颖红, 等. 基于变异系数-综合指数法的乌鲁木齐城市脆弱性评价[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(6): 14-19.
SUN Lingyun, ZIBIBULA · Simayi, WANG Yinghong, et al. Evaluation of urban vulnerability of Urumqi based on the variation coefficient - comprehensive index method [J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(6): 14-19.
- [16] 甘浪雄, 程小东, 王晨. 基于云物元理论的引航环境风险评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 418-422.
GAN Langxiong, CHENG Xiaodong, WANG Chen. On the evaluation for the pilotage navigation environment risks based on the cloud matter - element model [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 418-422.
- [17] 孙秋霞, 孙一心, 孙璐. 基于云物元模型的汽车客运站绿色等级评价[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 81-86.
SUN Qiuxia, SUN Yixin, SUN Lu. Evaluation on green grade of bus terminal based on cloud matter element model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 81-86.
- [18] 梁唐杰, 谢庆, 柳春芳, 等. 基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 12-17.
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 12-17.
- [19] 黄成, 朱金善, 张锋, 等. 基于云模型改进物元结构的船舶夜航光环境评价模型[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(4): 43-48.
HUANG Cheng, ZHU Jinshan, ZHANG Feng, et al. Light environment evaluation model for ship night navigation based on improved cloud matter - element structure [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018, 44(4): 43-48.
- [20] 广西凤凰银业有限责任公司凤凰山银矿矿山地质环境保护与土地复垦方案[Z]. 南宁: 广西壮族自治区自然资源厅, 2020.
(责任编辑: 林桂玲)

(上接第 132 页)

- [12] 郝宪杰, 袁亮, 王飞, 等. 三轴压缩煤样破坏规律及剪切强度参数的反演[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 730-738.
HAO Xianjie, YUAN Liang, WANG Fei, et al. Analysis of failure of coal under tri-axial compression and inversion of its shear strength parameters [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 730-738.
- [13] 蒋明镜, 张望城, 王剑锋. 密实散粒体剪切破坏能量演化的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 551-558.
JIANG Mingjing, ZHANG Wangcheng, WANG Jianfeng. Energy evolution of dense granules subjected to shear failure by discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 551-558.
- [14] 尹大伟, 陈绍杰, 陈兵, 等. 煤样贯穿节理对岩-煤组合体强度及破坏特征影响模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 1054-1062.
YIN Dawei, CHEN Shaojie, CHEN Bing, et al. Simulation study on effects of coal persistent joint on strength and failure characteristics of rock - coal combined body [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 1054-1062.
- [15] 吉辰, 蹇开林, 郝忠. 煤与瓦斯突出过程中煤体破坏的有限元模拟[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(4): 85-93.
JI Chen, JIAN Kailin, HAO Zhong. Finite element simulation of coal body failure in coal and gas outburst process [J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(4): 85-93.
- [16] 李梅华. 基于原位推剪试验的露天矿边坡土石混合体力学特性分析[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(5): 21-24.
LI Meihua. Study on mechanical properties of soil-rock mixture in open-pit slope based on in-situ push shear test [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(5): 21-24.
- [17] 赵科, 康红普, 王晓卿, 等. 晋城无烟煤结构面剪切参数的试验测定与估算方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2432-2437.
ZHAO Ke, KANG Hongpu, WANG Xiaoqing, et al. Test and estimation on the shear parameters of structural plane from Jincheng anthracite coal [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2432-2437.
- [18] 赵科. 煤体结构面剪切力学特性的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 89-95.
ZHAO Ke. Numerical simulation of shear mechanical properties of coal structural plane [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 89-95.
- [19] 成乾龙. 剪切速率及法向应力对煤散体抗剪强度影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 81-85.
CHENG Qianlong. Study on influence of shear rate and normal stress on shear strength of coal bulk [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(3): 81-85.
- [20] 马兆瑞. 大采高工作面煤壁片帮拉-剪破坏共存机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 81-87.
MA Zhaorui. Study on co-existence mechanism of tensile-shear failure of rib spalling in large mining height working face [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 81-87.
(责任编辑: 樊淑兰)