

中文引用格式:郭鑫,李大芳,鲁义,等.高流态浆体材料固结微观力学性能研究[J].中国安全科学学报,2025,35(5):116-123.

英文引用格式:GUO Xin, LI Dafang, LU Yi, et al. Research on microstructure mechanical properties of consolidation of high-fluid slurry materials [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 116-123.

高流态浆体材料固结微观力学性能研究*

郭鑫^{1,2}副教授,李大芳¹,鲁义^{**1}教授,施式亮¹教授,李贺¹教授,宋译¹讲师

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心,安徽 淮南 232001)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0804

基金项目:国家自然科学基金资助(52174180);湖南省杰出青年基金资助(2022JJ10026);湖南省青年基金资助(2023JJ40284);煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心项目(EC2023019)。

【摘要】 为探究高流态浆体材料注浆后对煤体微观力学性能的影响,首先通过扫描电镜(SEM)扫描不同注浆材料注浆后与煤形成异质体的过渡区,并进行纳米压痕试验,进而分析高流态浆体材料对煤体微观结构特征以及微观力学性能的影响;然后,针对普通水泥材料注浆后,固结面存在的结构缺陷,分析高流态浆体材料对异质体过渡区的结构改性与力学强化机制。结果表明:高流态注浆材料与煤体过渡区的力学性能是异质体结构中最弱的区域,容易发生破断;高流态注浆材料与煤过渡区的压痕模量、压痕硬度,均随着注浆煤体结构面力学性能的提高而增大;普通水泥注浆后,与煤体过渡区的范围较大,晶体密度低,材料与煤体之间有明显的裂隙,微观力学性能较弱;高流态注浆材料注浆后,与煤过渡区的范围微观结构紧密,固结面过渡区的范围较小,界面过渡区(ITZ)微观力学性能较好,有助于提升瓦斯抽采钻孔抵御塌孔变形的能力。

【关键词】 高流态浆体材料; 固结面; 力学性能; 异质体; 纳米压痕

Research on microstructure mechanical properties of consolidation of high-fluid slurry materials

GUO Xin^{1,2}, LI Dafang¹, LU Yi¹, SHI Shiliang¹, LI He¹, SONG Yi¹

(1 School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to explore the effect of high fluid slurry materials on the micromechanical properties of coal, the transition area formed by different slurry materials and coal after grouting was scanned by scanning electron microscopy (SEM). Nanoindentation tests were carried out to analyze the effects of high fluid slurry materials on the microstructural characteristics and micromechanical properties of coal. Structural defects existed in the consolidated surface after grouting of ordinary cement materials. In view of this, the structural modification and mechanical strengthening mechanism of the transition area of the heterogeneous body were analyzed. The results show that the mechanical properties of the transition area

* 文章编号:1003-3033(2025)05-0116-08; 收稿日期:2024-12-11; 修稿日期:2025-02-20

** 通信作者:鲁义(1986—),男,江西新干人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿井灾害防治方面的研究。E-mail:luyijx@163.com。

between the high flow grouting material and the coal body are the weakest in the heterogeneous structure. This area is easy to break. The indentation modulus and indentation hardness in the transition zone between high flow grouting material and coal increase with the increase of mechanical properties of coal structure surface. After the ordinary cement grouting, the transition zone between the material and the coal body is large. The crystal density is low, there are obvious cracks between the material and the coal body, and the micromechanical properties are weak. After grouting, the high flow grouting material has close microstructure in the transition zone with coal. The transition zone with consolidated surface is small. Meanwhile, the interface transition zone (ITZ) has good micromechanical properties. These characteristics are helpful to improve the ability of gas extraction borehole deformation resistance.

Keywords: high flow slurry materials; plane of consolidation; mechanical property; anisoplast; nano-indentation

0 引 言

随着煤层气勘探开发工作的不断加强,工作中经常会遇到断层破碎带、煤矿采空区和风化带等不良地质环境,其岩性多呈松散破碎的软流塑状^[1-2]。对破碎煤岩体注浆,可在一定程度上解决岩体内部裂隙的扩展及破坏问题^[3-4],但是在应力的影响下,煤体受到压缩破坏影响,无法形成完整的型煤,很难进行常规的力学测试^[5]。因此,研究新的力学测试方法、克服破碎煤体无法进行常规力学测试的限制具有重要意义。

基于微观尺度的纳米压痕和原子力显微镜技术在表征煤样力学性能时,具有宏观试验不可替代的作用,越来越多的学者们开始了煤样微观力学特性的研究。纳米级力学性能测试技术目前已被应用于水泥基以及煤岩体材料的微观力学性能的研究中^[6-8],除了这些常规的物体力学特性,纳米压痕技术还适用于测试煤岩体流变特性和特殊材料的力学性能。如孙长伦等^[9]利用纳米压痕技术测试了砂岩的力学特性,并分析了砂岩的力学本构方程,指出在岩石流变变形过程中,蠕变载荷稳定阶段和卸载阶段会加剧砂岩矿物中孔、裂隙的发育;蔡益栋等^[10]利用纳米压痕技术研究了不同变质煤岩体的力学性能以及影响因素,结果表明:镜质组微观力学强度随煤化程度的加深呈现出先升后降再升的趋势,而惰质组的微观力学性能随煤岩成熟度升高持续增加;曹鹏等^[11]利用纳米压痕技术测试了合金内部不同的晶粒尺寸对合金力学性能的影响,结果表明:合金内部晶粒尺寸越小,纳米压痕测试仪压头下方的内应力分布越均匀,沿压痕方向的弹性恢复比越小;WANG Yuli 等^[12]采用纳米压痕测试技术研究了不同石灰石粉掺量对混凝土抗压强度的影响,结

果表明:随着石灰石粉含量的增加,界面过渡区 (Interface Transition Zone, ITZ) 厚度先减小后增大,膏体的总孔隙率先减小后增大;SHI Xiangyun 等^[13]提出了一种将纳米压痕与数据分析相结合的方法,有效地提取了粘土的微力学参数,并通过分析细粒、黏土为主的复合材料特性,在微观尺度上分析了压实过程引起的强度变化。

纳米压痕测试技术虽然应用越来越广泛,但在注浆后形成的异质体微观力学特性和固结面结构优化机制方面的研究成果较少。此外,该技术只需要少量样品即可测试煤样的力学特性,不再受限于煤样尺寸和完整性,降低了力学测试的难度。鉴于此,笔者采用纳米压痕技术,结合扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 试验,探究普通水泥浆液和高流态注浆材料浆液在注浆后煤体的注浆材料与煤固结面微观结构特征与微观力学性能,揭示高流态浆体材料对注浆材料与煤 ITZ 微观力学性能以及注浆结构面力学特性的影响机制,以为注浆材料固结性能的研究提供参考依据。

1 浆体材料注浆加固面力学性能研究

1.1 测试方法与设备

高流态浆体材料可用于瓦斯抽采钻孔的封孔、破碎岩体加固等过程,将超细水泥、减水剂、缓凝剂和膨胀剂按照 1 : 0.5% : 0.04% : 8% 的配比进行混合,其主要成分为氧化钙 (CaO)、二氧化硅 (SiO₂)、三氧化二铝 (Al₂O₃) 和氧化铁 (FeO)。对煤样施加单轴应力,产生结构面 (图 1)。注浆时,首先,将试样置于钢模中;其次,向试样中注入制备好的高流态注浆材料,待注浆材料凝固以后脱模;然后,将脱模后的固结体切割成 1 cm×1 cm×0.5 cm 的试样,并放置于无水乙醇溶液中浸泡 24 h,之后取

出试样并打磨其表面;最后,将清洁后的试样放入干燥箱中,进行干燥处理。

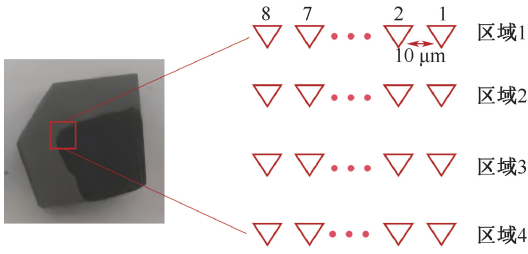


图1 注浆煤体结构面

Fig. 1 Structural plane of grouting coal

纳米压痕仪是利用金刚石探针对测试材料施加一定的压力,使材料表面形成凹陷,维持一段时间后,将施加的压力完全卸载,根据载荷-位移曲线计算出材料的模量和硬度。

试验中,首先,以 0.4 mN/s 的速率将压头压力加载到 2 mN,压头压入试样后,保持压力 10 s,试验完成后,压头按照 0.5 mN/s 的速率进行卸载。在试样表面光滑的位置选取试验区域,将试验区域均匀分为 4 行,每行设置 8 个压痕点,每个测点之间距离取 10 μm。

将载荷与位移进行拟合^[14]:

$$P = \alpha(h - h_f)^m \quad (1)$$

式中: P 为载荷, N; α 为压头形状的不规则性偏差的修正系数, m 为表征硬度或弹性模量随压痕深度或载荷变化速率的系数, α 和 m 是通过拟合载荷和压痕深度参数得到的; h 为压头在最大载荷下进入材料的深度, μm ; h_f 为完全卸载后的深度, μm 。

对式(1)进行求导可得:

$$S = \frac{dp}{dh(h=h_{\max})} = \alpha m(h_{\max} - h_f)^{m-1} \quad (2)$$

接触深度 h_c 可通过下式得到:

$$h_c = h_{\max} - \frac{\varepsilon P_{\max}}{S} \quad (3)$$

式中: S 为压痕的投影面积, μm^2 ; ε 为常数,通常与形状有关,文中试验设备的压头为金字塔形压头,波氏压头取 0.75^[15]; $h_{\max}$ 为最大压入深度, μm ; $h_c = P_{\max}$ 为最大压头载荷时的接触深度, μm 。其中:

$$A_c = 24.5h_c^2 \quad (4)$$

式中 A_c 为接触面积, μm^2 。

纳米压痕硬度 H 和弹性模量 E 分别通过下式得到:

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \quad (5)$$

$$E = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A_c}} \quad (6)$$

式中: H 为纳米压痕硬度, GPa; E 为模量, GPa; β 为波氏压头修正系数,对于金字塔形压头,取 1.034^[16]。

在注浆材料与煤体的固结面上选取试验区域,保证表面平整无突起,不同注浆材料与煤体试样均匀设置 4 行试验区域,每 1 个试验区域内,间隔 10 μm 设置 1 个测点,共设置 8 个测点,将注浆材料与煤体的固结体放入仪器开始测试(图 2)。

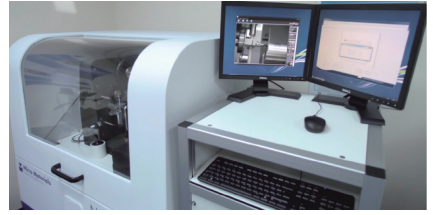


图2 纳米压痕测试仪

Fig. 2 Nano indentation experimental equipment

1.2 异质体固结面微观力学性能研究

测试结束后,绘制不同材料形成异质体的压痕深度曲线,因为数据较多,为了更好地展示异质体的微观力学性能,只选取其中 1 组试验区域的数据进行绘制,如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知:高流态浆体材料与煤形成异质体后,其过渡区的强度较低,过渡区范围较小,压头在由煤体向高流态浆体材料测试时,压痕深度呈现先增加后缩小的趋势;而普通水泥材料注浆后,过渡区范围较大,过渡区的压痕深度比高流态浆体材料注浆后形成的过渡区压痕深度高出 300 nm。表明 2 种材料注浆后,在过渡区内的分散程度有较大的差异。

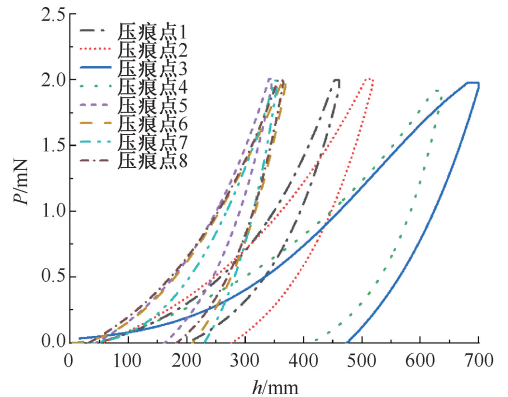


图3 高流态浆体材料与煤体 ITZ 载荷曲线

Fig. 3 Load curve of high flow slurry material-coal ITZ

当水泥基材料注入煤体时,沿着孔隙、裂隙向煤

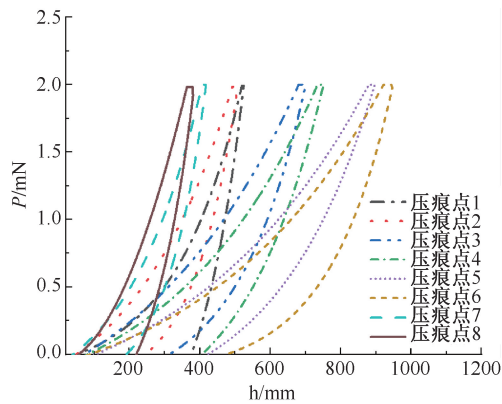


图 4 普通水泥封孔材料与煤体 ITZ 载荷曲线
Fig. 4 Load curve of common cement sealing material-coal body ITZ

体内部扩散。在这个过程中,较小的孔隙会对水泥基材料的流动产生一定的阻力,而较大的孔隙则更容易被水泥基材料填充。由于煤体孔隙表面的粗糙度和不规则性,水泥基材料在渗透过程中会逐渐附着在煤体表面。水泥基材料中的硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)等发生水化反应,水化产物逐渐沉淀并形成凝胶。这些凝胶一方面填充煤体孔隙,另一方面开始在煤体与水泥浆的交界面上形成初始的固结结构。由于煤体表面的化学性质和物理结构的特殊性,水化产物在界面处的生长和分布与在水泥浆内部有所不同。在固结界面处,水化产物相互叠加,使煤体与水泥基材料之间的连接更加紧密。水泥基材料内部的晶体结构逐渐发育完善,形成具有一定强度的异质体结构。同时,在固结

界面上,异质体与煤体之间通过物理吸附和化学粘结等作用,最终形成稳定的固结界面。

在固结界面上,氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)晶体和水化硅酸钙晶体(C-S-H)的分布呈现出一定的梯度性。靠近水泥的一侧,晶体生长较为规则,而靠近煤体的一侧,由于受到煤体表面化学性质和物理结构的影响,晶体生长受到抑制或者改变生长方向。煤体表面的某些矿物质吸附 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,改变了其在界面处的浓度分布,从而影响晶体的生长形态和分布密度。当过渡区范围较大时,水化产生的晶体密度低,导致力学性能较弱;当材料过渡区的范围较小时,力学性能越高,探针下压造成的压痕深度就越小^[17]。

由图 3 与图 4 可看出,高流态浆体材料注浆后,材料与煤体形成的过渡区内水化产物密度更高,提高了微观力学性能。此外,煤体粗糙的表面使得水泥水化产物能够嵌入其中,形成类似于“齿合”的结构,提高注浆后煤体的抗压强度。而物理吸附作用也会对固结面的强度有影响,水泥水化产物表面带有电荷,煤体表面也具有一定的电荷特性,二者之间会产生静电吸附作用,从而提高注浆后煤体的微观力学性能。

为了更清晰地反映出不同材料在注浆后,材料与煤体过渡区的微观力学性能差异,引入弹性模量和硬度值,绘制每一个试样中的 4 个试验区的弹性模量和硬度值曲线,以图 1 中设置的压痕点位置(X)作为横坐标,如图 5 和图 6 所示。

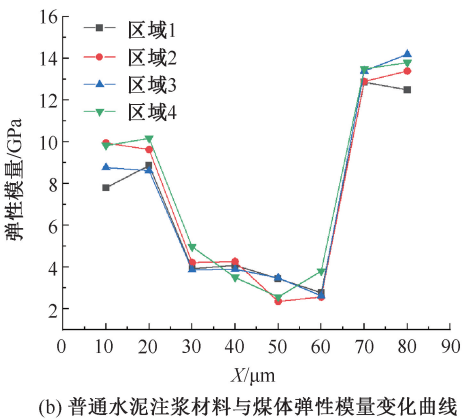
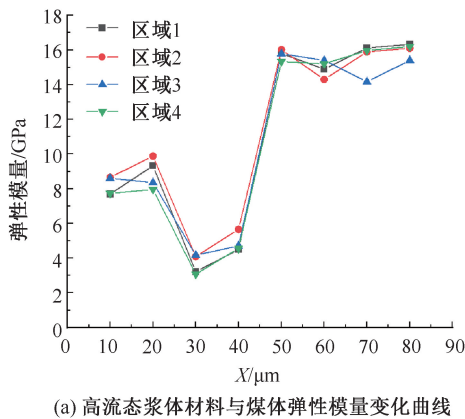


图 5 不同注浆材料与煤体弹性模量变化曲线

Fig. 5 Change curves of elastic modulus between different grouting materials and coal body

1.3 异质体固结面力学性能的影响因素

固结面与水泥的弹性模量差异也会影响固结界面的力学性能。如果二者弹性模量差异过大,在受到外力作用时,固结界面处的应力分布不均匀,容易

导致应力集中,进而降低固结界面的抗压强度,使得煤体不能很好地承受外部载荷。由图 5 和图 6 可知:不同材料注浆后,随着距离煤体和注浆材料长度的增加,过渡区的弹性模量和硬度开始降低,此时探

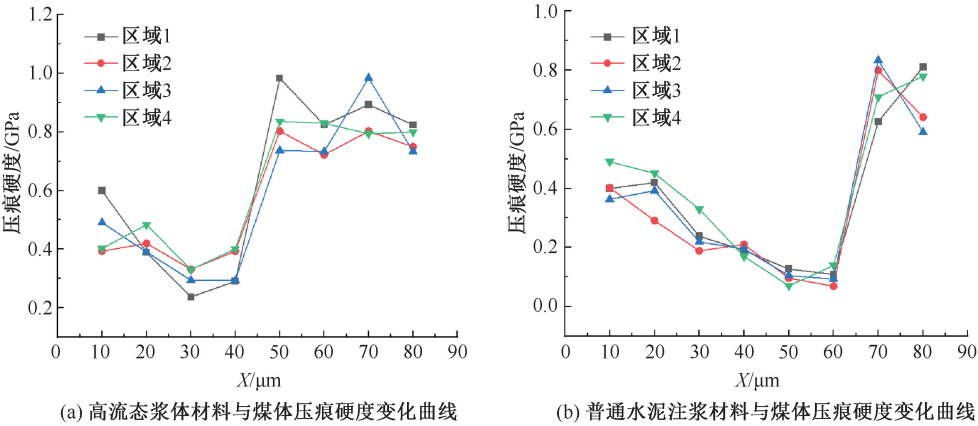


图 6 不同注浆材料与煤体压痕硬度变化曲线
Fig. 6 Indentation hardness curve of coal body with different grouting materials

针处于异质体的过渡区内,高流态注浆材料注浆后形成的异质体其过渡区弹性模量的最小值 $E = 3.22\text{ GPa}$,硬度的最小值 0.2669 GPa ,异质体过渡区范围为 $20\sim40\text{ }\mu\text{m}$;普通水泥注浆材料注浆后形成的异质体其过渡区的弹性模量的最小值 $E = 2.35\text{ GPa}$,硬度的最小值 0.069 GPa ,异质体过渡区范围为 $20\sim70\text{ }\mu\text{m}$ 。高流态浆体材料异质体过渡区弹性模量是普通水泥注浆材料异质体过渡区弹性模量的 1.37 倍,而高流态浆体材料异质体过渡区硬度是普通水泥注浆材料异质体过渡区的 3.868 倍,表明高流态浆体材料注浆形成的异质体,其过渡区的力学性能要比普通水泥注浆材料更加优越。

高流态浆体材料和普通水泥材料注浆后,异质体在不同位置处的弹性模量如图 7 所示。由图 7 可知:不同注浆材料向煤体注浆后,形成的异质体弹性模量分为 3 部分,分别代表煤体、注浆材料以及过渡区;高流态浆体材料注浆后,形成异质体的结构面范围较小,约为 $15\text{ }\mu\text{m}$,这是由于水泥基注浆材料中的

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 在水化过程中会生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等产物,这些产物与煤体中的矿物质发生反应,从而影响过渡区微观结构和范围,高流态浆体材料水化反应更充分,水化产物也更多,因此,过渡区范围也更小,晶体堆积密度越高,弹性模量和硬度也越高;而普通水泥材料向煤体注浆后,形成的异质体结构面范围较大,约为 $40\text{ }\mu\text{m}$,这是因为普通水泥水化反应不充分,水化产物较少,因此,过渡区范围也更大,异质体结构面范围越大,其范围内的水化产物密度越小,导致其过渡区力学强度差;测试点从煤体到注浆材料过程中,其弹性模量先减小后增大,因为水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体和 C-S-H 晶体在靠近水泥一侧生长较为规则,堆积厚度也越大。而越靠近煤体,过渡区由于受到煤体表面化学性质和物理结构的影响,晶体生长受到抑制,高流态浆体材料注浆后,异质体结构面的弹性模量约为 $14.3\sim16.33\text{ GPa}$,普通水泥材料注浆后,异质体结构面的弹性模量约为 $2.35\sim10.17\text{ GPa}$,表明高流态浆体材料注浆后,

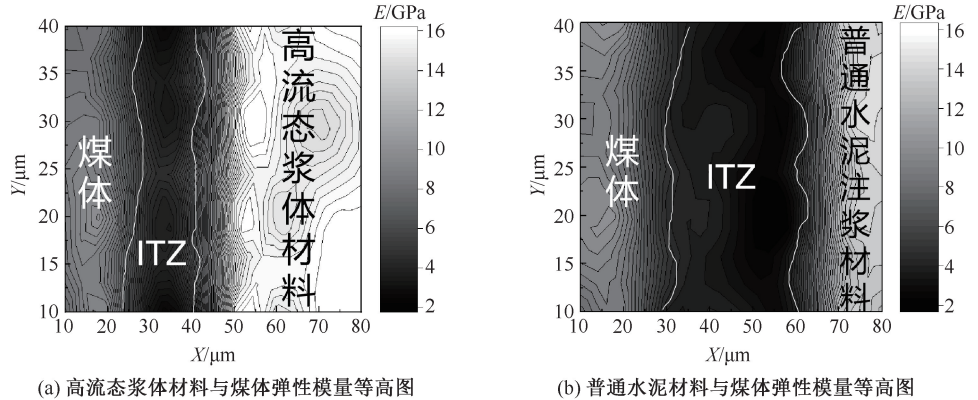


图 7 弹性模量距边界距离变化的等高图

Fig. 7 Contour plot of change of elastic modulus from boundary distance

提升了异质体结构面的力学性能。

高流态浆体材料和普通水泥材料注浆后,异质体固结面过渡区的压痕硬度等高图如图 8 所示。其中左侧代表测试点处位于煤体上,右侧则代表测试点处位于注浆材料处。高流态浆体材料向煤体注浆后,异质体的过渡界面厚度值较高,过渡区范围较

小,这也与前文中过渡区弹性模量的结果相呼应,高流态浆体材过渡区内堆积的 C-S-H 凝胶体更多,硬度也更高,过渡区硬度值约为 0.266 9 GPa;而普通水泥注浆后过渡区的硬度为 0.069 GPa,证明了高流态浆体材料注浆后,提高了异质体结构面微观力学性能。

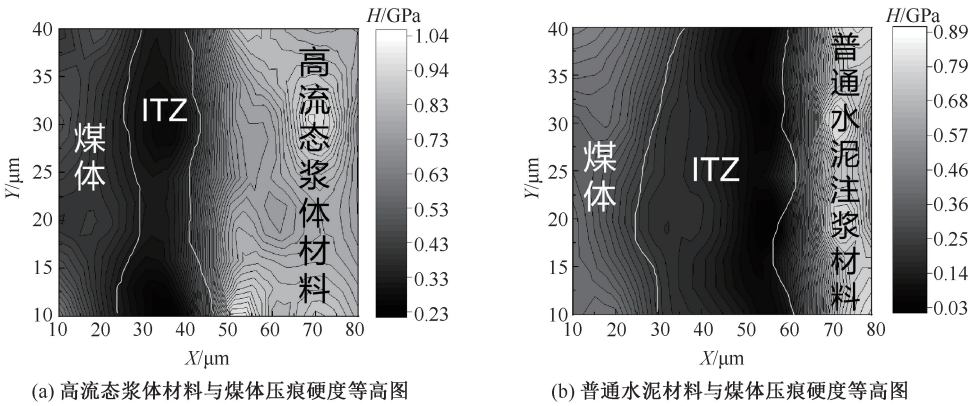


图 8 压痕硬度距边界距离变化的等高图

Fig. 8 Contour plot of indentation hardness change from boundary distance

2 浆体材料与煤固结特性分析

注浆形成的异质体力学性能受注浆固结面过渡区因素影响^[18-19],利用 SEM 扫描异质体固结面过渡区的微观形貌,探究高流态浆体材料对固结面过渡区结构改性与力学优化机制。SEM 试验开始前,对注浆后的试样施加应力直至其破坏,将其放置于无水乙醇溶液中清洗,清洗之后的试样干燥 24 h。选取尺寸为 1 mm×2 mm 的试块,粘贴在导电胶上,对试样进行喷金,随后开始 SEM 测试。对试样舱抽真空,寻找异质体的固结面,调整 SEM 仪倍数进行拍照,结束 SEM 测试。

煤体表面并非完全光滑,存在各种尺度的孔隙、裂隙和凸起,这些孔隙形成了一个毛细网络。不同材料注浆后煤界面微观结构如图 9 所示。当注浆材料注入时,注浆材料的表面张力和煤体孔隙结合,产生毛细作用,其颗粒会填充到煤体表面的孔隙和裂隙中,并包裹煤体表面的凸起部分,如图 9a 所示。水泥基注浆材料凝固后与煤体表面产生黏合力,使注浆材料黏附在煤体上,这种黏合力取决于煤体表面的粗糙度,粗糙度越大,可供注浆材料填充和附着的空间就越多,黏合力也就越强。由图 9 可以看出,普通水泥材料注浆后,材料与煤体过渡区结合程度较低,界面存在明显裂隙,还存在一些孔洞,普通水泥材料水化反应后,生成的 C-S-H 凝胶等水化产

物较少,且过渡区范围较大,导致过渡区的微观结构比较疏松,注浆后过渡区力学性能薄弱,在受到外力作用时,过渡区会产生应力集中现象,导致异质体内部煤体与注浆材料发生分离,力学强度降低。

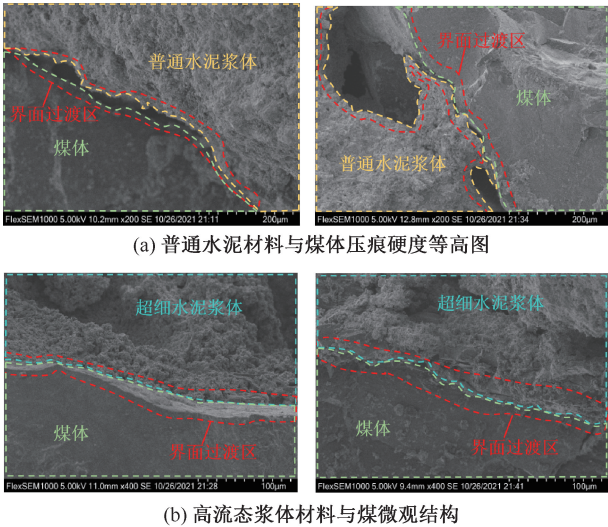


图 9 不同材料注浆后煤界面微观结构

Fig. 9 Microstructure of coal interface after grouting with different materials

高流态注浆材料黏度较低,因此,注浆过程中会在毛细作用下被吸入到煤体的细小孔隙中。毛细作用使得高流态注浆材料能够深入煤体内部,促使高流态注浆材料在煤体孔隙中均匀分布,形成稳定的

固结界面,进而提高黏附效果。而且水泥基材料水化后浆液呈碱性,而煤体表面含有羧基(−COOH)、酚羟基(−OH)等酸性官能团。在注浆过程中,材料与煤体表面的酸性官能团会发生反应,其中水泥水化过程中产生的Ca(OH)₂会与煤体表面的羧基发生反应:Ca(OH)₂+2R−COOH→(R−COO)₂Ca+2H₂O(其中,R表示煤体上含羧基的有机基团),反应产物形成了新的化学键,从而增强了二者之间的黏附性,由于高流态浆体材料水化反应更充分,水化产物的Ca(OH)₂也更多,因此高流态浆体材料与煤体结合程度高,形成的异质体内部不存在明显的缝隙,水化产物能够充填过渡区,微观结构比较紧密。所以注浆后的煤体在受到外力作用时,异质体内部煤体与注浆材料不会分离,使异质体结构更加稳定,导致强度升高。

3 结 论

- 1) 高流态浆体材料水化后凝胶产物更多,过渡区范围较小,因此,过渡区内结构较为致密,注浆后与煤体的黏合性更好;而普通水泥注浆材料水化后凝胶产物较少,过渡区范围较大,在过渡区内结构较为疏松,与煤体的结合性较差。
- 2) 高流态浆体材料注浆后,过渡区中的压痕模量和压痕硬度要显著大于普通水泥材料与煤体过渡区固结面。注浆材料与煤固结面的微观力学性能影响着注浆煤体的宏观力学强度特性。
- 3) 高流态浆体材料能够优化注浆材料与煤过渡区的微观结构,使微观结构更致密,同时减小固结面过渡区的范围,提升了注浆材料与煤过渡区的微观力学性能,强化注浆煤体的宏观力学性能。

参 考 文 献

[1] 李术才,张伟杰,张庆松,等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 744–752.
LI Shucui, ZHANG Weijie, ZHANG Qingsong, et al. Research on advantage fracture grouting mechanism and controlled grouting method in water-rich fault zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 744–752.

[2] 田强,孙斐,范会峰,等. 综放工作面破碎围岩超前注浆加固技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(增2): 194–198.
TIAN Qiang, SUN Fei, FAN Huifeng, et al. Study on advanced grouting reinforcement technology of broken surrounding rock in fully-mechanized top-coal caving face [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 194–198.

[3] 李文洲,康红普,姜志云,等. 深部裂隙煤岩体变形破坏机理及高压注浆改性强化试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 912–923.
LI Wenzhou, KANG Hongpu, JIANG Zhiyun, et al. Deformation failure mechanism of fractured deep coal rock mass and high pressure grouting modification strengthening testing [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 912–923.

[4] 赵康,王庆,王军强,等. 破碎围岩结构面特征及稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 138–143.
ZHAO Kang, WANG Qing, WANG Junqiang, et al. Structural plane characteristics and stability of broken surrounding rocks [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 138–143.

[5] 孙长伦,李桂臣,GOMAH M E,等. 基于纳米压痕技术的破碎煤样力学特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增2): 682–691.
SUN Changlun, LI Guichen, GOMAH M E, et al. Experimental investigation on the mechanical properties of crushed coal samples based on the nanoindentation technique [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 682–691.

[6] 盖海东,冯春花,董一娇,等. 纳米压痕技术应用于水泥基材料的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(7): 7 107–7 114.
GE Haidong, FENG Chunhua, DONG Yijiao, et al. A review on the application of nanoindentation in the research of cement-based materials [J]. Materials Reports, 2020, 34(7): 7 107–7 114.

[7] 李西凡,熊祖强,王鹏. 高水巷旁充填材料力学性能改进试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(5): 95–100.
LI Xifan, XIONG Zuqiang, WANG Peng. Experimental study on improvement of mechanical properties of high-water filling materials in gob-side entry retaining [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(5): 95–100.

[8] LIU Kouqi, OSTADHASSAN M, BUBACH B, et al. Statistical grid nanoindentation analysis to estimate macro-mechanical properties of the Bakken Shale [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 53: 181–190.

- [9] 孙长伦, 李桂臣, 许嘉徽, 等. 砂岩矿物组分流变特性纳米压痕实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 77-87.
SUN Changlun, LI Guichen, XU Jiahui, et al. Rheological characteristics of mineral components in sandstone based on nanoindentation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 77-87.
- [10] 蔡益栋, 贾丁, 邱峰, 等. 基于纳米压痕的煤岩微观力学特性及其影响因素剖析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 879-890.
CAI Yidong, JIA Ding, QIU Feng, et al. Micromechanical properties of coal and its influencing factors based on nanoindentation [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 879-890.
- [11] 曹鹏, 芮执元, 付蓉, 等. 晶粒尺寸对 γ -TiAl 合金力学性能影响的纳米压痕研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(6): 2 052-2 060.
CAO Peng, RUI Zhiyuan, FU Rong, et al. Effect of grain size on mechanical properties of γ -TiAl alloy by nanoindentation [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(6): 2 052-2 060.
- [12] WANG Yuli, ZHANG Wanyu, LOU Guanghui, et al. Effect of limestone powder on mechanical properties of concrete based on Griffith's microcracking theory [J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138413.
- [13] SHI Xiangyun, DAVID M, LUAKS S, et al. Unraveling mudstone compaction at microscale: a combined approach of nanoindentation mapping and machine learning data analysis [J]. Marine and Petroleum Geology, 2024: DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.107083.
- [14] TANG Ding, ZHAO Leilei, WANG Huamiao, et al. The role of rough surface in the size-dependent behavior upon nano-indentation [J]. Mechanics of Materials, 2021, 157: DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.103836.
- [15] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1 564-1 583.
- [16] 陈小文, 韩宇栋, 丁小平, 等. 水泥净浆弹性模量的纳米压痕表征与多尺度计算[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(9): 1 199-1 207.
CHEN Xiaowen, HAN Yudong, DING Xiaoping, et al. Multiscale calculation of elastic modulus of cement paste based on grid nanoindentation technology [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(9): 1 199-1 207.
- [17] 李一凡, 管学茂, 刘松辉, 等. 压痕点数及解卷积法对水泥纳米压痕试验的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 291-295, 312.
LI Yifan, GUAN Xuemao, LIU Songhui, et al. Effect of number of indentation points and deconvolution method on cement nanoindentation test [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 291-295, 312.
- [18] 陆银龙, 贺梦奇, 李文帅, 等. 岩石结构面注浆加固微观力学机制与浆-岩黏结界面结构优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1 808-1 818.
LU Yinlong, HE Mengqi, LI Wenshuai, et al. Micromechanical mechanisms of grouting reinforcement in rock joints and microstructure optimization of grout-rock bonding interfaces [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1 808-1 818.
- [19] 李桂臣, 孙长伦, 孙元田, 等. 基于“两介质-三界面”模型的散煤注浆固结宏观细观规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 427-434.
LI Guichen, SUN Changlun, SUN Yuantian, et al. Macroscopic and microcosmic consolidation law of loose coal grouting based on the "two media-three interfaces" model [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 427-434.



作者简介: 郭鑫 (1994—),男,山东菏泽人,博士,副教授,主要从事矿井灾害防治等方面的研究。E-mail: guoxin190510@163.com。