

doi: 10.12029/gc20221009002

李志忠, 罗腾跃, 张毅, 夏鹏, 穆华一, 孙萍萍, 王建华, 王鑫. 2025. 鄂尔多斯盆地铝土矿岩石物理学特征及深部勘探开采构想[J]. 中国地质, 52(4): 1216–1229.

Li Zhizhong, Luo Tengyue, Zhang Yi, Xia Peng, Mu Huayi, Sun Pingping, Wang Jianhua, Wang Xin. 2025. Petrophysical characteristics of bauxite in Ordos Basin and conception of deep exploration and mining[J]. Geology in China, 52(4): 1216–1229(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地铝土矿岩石物理学特征及深部勘探 开采构想

李志忠^{1,2}, 罗腾跃^{2,3}, 张毅^{2,3}, 夏鹏^{4,5}, 穆华一^{1,2}, 孙萍萍^{2,6}, 王建华^{2,7}, 王鑫^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西部绿色发展研究院, 陕西 西安 710054;
3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075; 4. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
5. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 6. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710054;
7. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101)

摘要:【研究目的】鄂尔多斯盆地是中国重要的能源基地, 拥有丰富的石油、天然气和煤炭资源, 以及铝土矿、铀矿等矿产资源。在盆地周缘铝土矿丰富, 但盆地内深部铝土矿研究甚少。油气钻探显示盆地内铝土矿资源丰富, 埋深在 100–4000 m, 如果能实现深部铝土矿勘探开采, 将极大缓解中国铝土矿资源不足的局面。【研究方法】本文以鄂尔多斯盆地铜川地区铝土矿为研究对象, 开展了铝土矿地质特征及岩石物理学特征研究。【研究结果】(1) 盆地深部铝土矿电性特征明显, 具有“四高两低”特征, 参考油气测井解释方法, 可建立铝土矿识别标准和铝土矿测井解释模型, 获取一水硬铝石含量, 完成铝土矿的评价; (2) 盆地铝土矿分布受古生界马家沟组古地貌控制, 矿层稳定分布, 资源量可观, 具有很大勘探潜力; (3) 铝土矿属于沉积岩, 具有一定的孔隙和渗透性, 且呈现夹心构造, 渗透性较高铝土矿层常被渗透性较低黏土岩包围, 满足原位溶浸开采的地质条件; (4) 根据应力敏感分析, 铝土矿具有可压性, 在一定应力下会出现新的孔隙或裂缝, 可以进一步改善矿层渗透性, 增加铝土矿原位溶浸开采可能性。【结论】利用测井技术可以开展鄂尔多斯盆地深部铝土矿资源评价, 结合铝土矿的岩石物理特征, 铝土矿可以考虑采用原位溶浸开采。

关键词: 铝土矿; 赋存状态; 微观结构; 应力敏感; 核磁共振; 深部勘探开采; 矿产勘查工程; 鄂尔多斯盆地

创新点: (1) 构建了深部铝土资源测井评价模型; (2) 评价了深部铝土矿岩石物理学特征; (3) 首次提出了铝土矿原位溶浸开采技术思路。

中图分类号: P618.45; TD862.5 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2025)04–1216–14

Petrophysical characteristics of bauxite in Ordos Basin and conception of deep exploration and mining

LI Zhizhong^{1,2}, LUO Tengyue^{2,3}, ZHANG Yi^{2,3}, XIA Peng^{4,5}, MU Huayi^{1,2}, SUN Pingping^{2,6},
WANG Jianhua^{2,7}, WANG Xin^{1,2}

(1. Xi'an Center of Geological survey, China Geological survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Green Development Institute of

收稿日期: 2022–10–09; 改回日期: 2023–01–09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221774)资助。

作者简介: 李志忠, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 长期从事地质科技研究; E-mail: lizz2009@vip.163.com。

通信作者: 罗腾跃, 男, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 长期从事油气地质综合研究; E-mail: 120787713@QQ.com。

Western China, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Company Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 4. Development and Research Center, China Geology Survey, Beijing 100037, China; 5. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 6. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 7. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Ordos Basin is an important energy base in China, with rich oil, natural gas and coal resources, bauxite, uranium and other mineral resources. Bauxite is abundant around the basin, but there is little research on deep bauxite in the basin. Oil and gas drilling shows that the basin is rich in bauxite resources, with a buried depth of one hundred to four kilometers. If the exploration and mining of deep bauxite can be realized, the situation of insufficient bauxite resources in China will be greatly alleviated. **[Methods]** The geological characteristics and petrophysical characteristics of bauxite in Tongchuan area, Ordos basin are studied in this paper. **[Results]** (1) The deep bauxite in the basin has obvious electrical characteristics, which is characterized by "four high and two low". With reference to oil and gas logging interpretation methods, bauxite identification standards and bauxite logging interpretation models can be established to obtain diaspore content and complete the evaluation of bauxite; (2) The distribution of bauxite in the basin is controlled by the palaeogeomorphology of the Paleozoic Majiagou Formation, and the ore bed is stably distributed, with considerable resources and great exploration potential; (3) Bauxite belongs to sedimentary rock, which has certain porosity and permeability, and presents sandwich structure. The bauxite ore bed with high permeability is often surrounded by clay rock with low permeability, meeting the geological conditions of in-situ solution mining; (4) According to stress sensitivity analysis, bauxite is compressible, and new pores or cracks will appear under certain stress, which can further improve the permeability of the ore bed and increase the possibility of in-situ leaching mining of bauxite. **[Conclusions]** Logging technology can be used to evaluate the deep bauxite resources in Ordos Basin. In combination with the petrophysical characteristics of bauxite, in-situ leaching mining can be considered for bauxite.

Key words: bauxite; occurrence state; microstructure; stress sensitive; nuclear magnetic resonance; deep exploration and mining; mineral exploration engineering; Ordos Basin

Highlights: (1) A logging evaluation model for deep bauxite resources was established; (2) The rock physical characteristics of deep bauxite were evaluated; (3) The concept of in-situ leaching mining technology for bauxite was proposed for the first time.

About the first author: LI Zhizhong, male, born in 1963, doctor, researcher, engaged in geological science and technology research; E-mail: lizz2009@vip.163.com.

About the corresponding author: LUO Tengyue, male, born in 1982, master, senior engineer, engaged in geological research on oil and gas; E-mail: 120787713@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20221774).

1 引言

鄂尔多斯盆地是中国内陆大型沉积盆地, 面积约 25 万 km², 是中国重要的能源资源基地, 拥有丰富的石油、天然气和煤炭资源(图 1)。此外, 还含有铝土矿、铀矿、岩盐、油页岩、水泥灰岩、芒硝、石膏等矿产资源, 其中天然气、煤层气、煤炭、铀矿、岩盐等资源探明储量均居全国盆地之首, 石油探明地质储量居全国第四。盆地周缘铝土矿资源丰富, 主要分布在陕西、山西、内蒙古和甘肃境内(焦赞超

等, 2014; 路玉林等, 2015; 高兰等, 2015)。

国内学者对鄂尔多斯盆地周缘铝土矿分布、成因、分类及典型矿产地质特征研究较多(刘长龄等, 1988; 吴国炎, 1997; 孟健寅等, 2011; 王庆飞等, 2012; Wang et al., 2017; 孙思磊, 2018; 杜远生和余文超, 2020; Bhukte, 2020; 张海坤等, 2021), 对鄂尔多斯盆地内深层铝土矿研究较少。油气钻探发现: 盆地内分布着丰富铝土矿资源, 埋深在 100~4000 m, 如果能实现深部铝土矿勘探开采, 将极大缓解中国铝土矿资源不足的局面。但是, 中国铝土

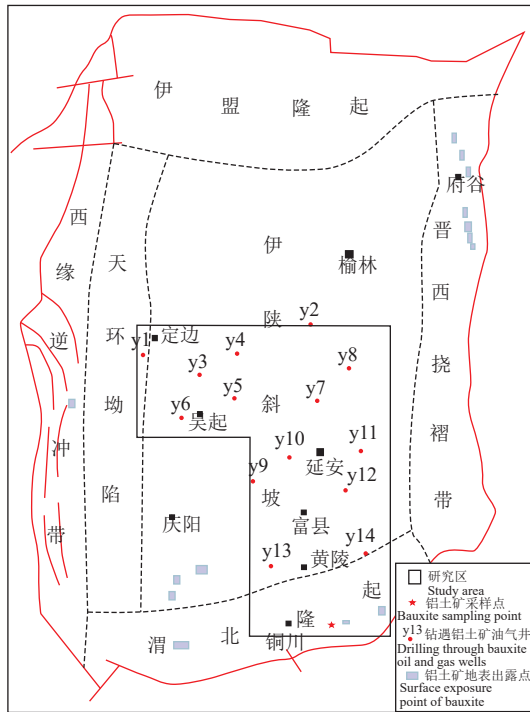


图1 鄂尔多斯盆地构造简图及铝土矿出露点
Fig.1 Geotectonic map of Ordos Basin and bauxite outcrop
矿目前主要采用露天开采和井工开采两种方式, 只能开采 500 m 以浅的矿体, 如何有效动用盆地深部铝土矿资源, 是铝土矿行业面临的一大难题(谢和平等, 2017; Chen, 2022)。

近年来, 油气勘探过程中, 在铝土矿层获得工业气流, 改变了前人对铝土矿层致密只能作为区域盖层的认识(傅金华, 1991), 且证实了铝土矿体发育微裂缝和溶孔, 具有较好的孔隙网络, 是有效储层(刘文辉等, 2015)。受此启发, 本文以鄂尔多斯盆地铝土矿为研究对象, 开展铝土矿地质特征及岩石物理学特征研究, 以期对鄂尔多斯盆地深部铝土矿勘探与开采提供理论依据。

2 鄂尔多斯盆地南部铝土矿地质特征

2.1 含矿岩系本溪组地质特征

鄂尔多斯盆地南部富县—铜川地区铝土矿赋存于上石炭统本溪组中下部的含铝岩系中, 埋深在 100~4000 m, 由盆地边缘到盆地内部埋藏深度逐渐增加。本溪组为晚古生代初期沉积物, 其基底地貌为加里东期奥陶系侵蚀风化地貌, 主要以填平补齐的形式沉积在风化面较低凹的古地貌部位。沉积厚度主要受古地貌控制, 一般为 10~80 m, 总体东厚西薄。

本溪组的岩石类型主要为风化产物的铝土矿、滨浅海相碎屑岩、潮坪相灰岩滨海沼泽相煤岩及炭质泥岩等, 具有含黄铁矿及菱铁矿结核或条带的铁铝岩组合特征。纵向上本溪组可分为本 1 和本 2 两段(图 2), 本 1 段上部岩性主要为深灰色泥晶灰

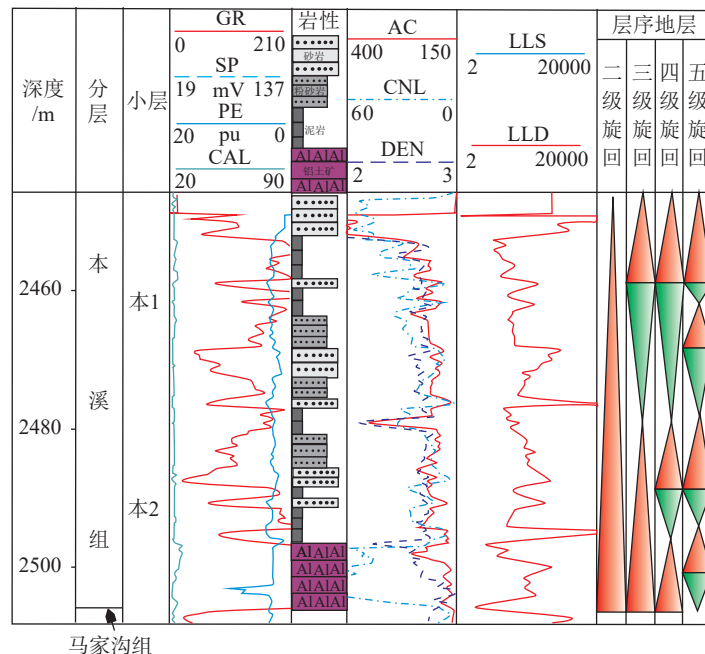


图2 鄂尔多斯盆地南部石炭系本溪组沉积特征图(以 y11 井为例)
Fig.2 Sedimentary characteristics of Carboniferous Benxi Formation in the south of Ordos Basin (take Well y11 as an example)

岩和煤层,夹灰色粗砂岩及含砾粗砂岩呈块状;本 1 段下部深灰色泥岩为主,夹灰色薄层砂岩、灰岩。本 2 段上部岩性为灰色、浅灰色中—粗砂岩与深灰色泥岩,局部夹薄层泥晶灰岩;本 2 段中部岩性深灰色泥岩、浅灰色砾岩、含砾粗砂岩;本 2 段下部为高伽玛铝土质泥岩,其厚度一般为在 3~6 m,之下为马家沟组灰岩或白云岩。

2.2 铝土矿层结构及厚度变化

奥陶系碳酸盐岩古侵蚀面上,垂向上含铝岩系具有分层特征,呈现夹心构造,即铝土矿常被包围在顶底黏土岩或页岩之间。含铝岩系发育于不整合面上,基底岩石通常为碳酸盐岩,底部为铝铁质铝土岩和铝土质泥岩,厚度 2~4 m,物性较差,孔隙度为 3.5%~10.7%,平均 7.8%,渗透率最高为 $0.076 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.011 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;中部为铝土矿层及多孔铝土岩段,平均厚度约 6.3 m,物性较好,孔隙度在 5.6%~24.3%,平均 12.5%;渗透率介于 $(0.01 \sim 30.22) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均达 $5.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上部一般发育黑色炭质泥岩,厚度 1~2 m 物性较差,孔隙度一般在 0.5%~5.2%,平均 1.9%,渗透率一般为 $(0.01 \sim 0.17) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3)。

铝土矿分布受岩溶古地貌控制,古地形平坦,矿体呈层状或似层状,古地形凹凸不平,多呈透镜状。在平面上,铝土矿主要沉积在较低凹的古地貌部位,呈条带状或片状分布(图 4),在同条带或片区内,铝土矿层稳定分布,连续性好(图 5),矿层平均厚度 3~8.2 m,与含矿岩系厚度呈现正相关,相关系数 0.38~0.76。

3 铝土矿岩石物理学特征

3.1 铝土矿电性特征

铝土矿电性特征明显(孙大鹏等, 2021; 刘可等, 2022),在油气勘探中一直作为本溪组底部重要的标志层,自然伽马(GR)异常高,一般在 300 API 以上;电阻率(LLD, LLM)一般约为 $35 \Omega \cdot \text{m}$,最大值为 $100 \Omega \cdot \text{m}$;补偿中子(CNL)孔隙度呈高值,一般在 60% 左右;密度(RHOB)为高值,普遍约为 2.74 g/cm^3 ,声波时差(AC)为低值,普遍约为 $170 \mu\text{s/m}$ (图 6)。

因此,利用岩心刻度测井,借助常规测井和特殊测井可以建立铝土矿识别标准和铝土矿测井参

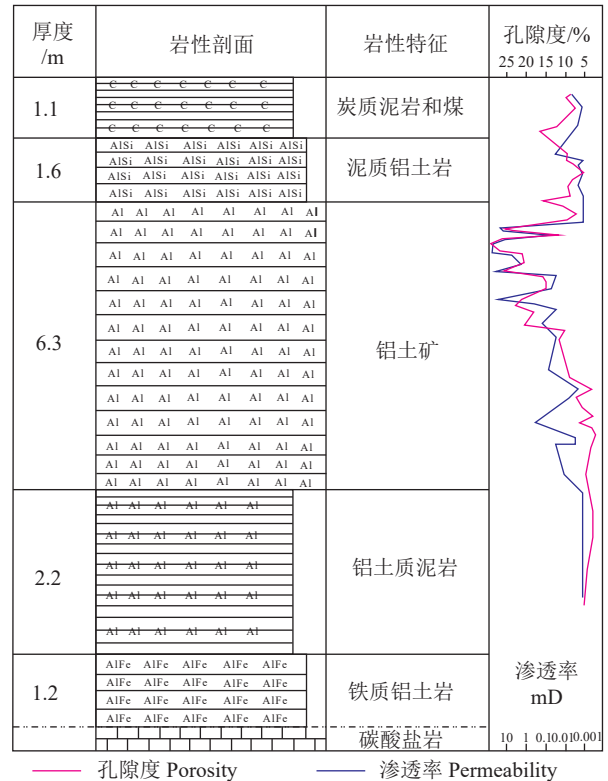


图 3 鄂尔多斯盆地南部本溪组铝土矿沉积序列及纵向物性特征图(以 y13 为例)

Fig.3 Sedimentary sequence and vertical physical properties of bauxite Benxi Formation in the south of Ordos Basin (take Well y13 as an example)

数模型,计算一水硬铝石含量及铝硅比等铝土矿评价指标,可以完成深部铝土矿的评价。

3.2 铝土矿微观结构

为深入认识铝土矿微观结构特征,本文选取鄂尔多斯盆地南部铜川陈炉矿区地面露头铝土矿进行研究,通过铸体薄片、X 射线衍射、扫描电镜、常规物性及恒压压汞等分析测试手段,对鄂尔多斯盆地南部铜川陈炉矿区铝土矿层矿物成分、孔隙结构进行系统研究。研究过程中使用仪器设备主要包括:德国布鲁克公司 D8 Focus X 射线衍射仪,美国 Corlab 公司的 CMS300 孔渗测定仪,9520 II 恒压压汞仪,美国 FEI 公司的 QuantaFEG 450 场发射扫描电镜,德国 Leica 公司 4500P 型偏光显微镜等。

3.2.1 矿物成分及其赋存状态

X 射线衍射分析,铝土矿石矿物成分主要为一水硬水铝石或勃姆石,含量 40%~77%;次为高岭石为主的黏土矿物,含量 3%~37%;微量矿物成分包括石英、长石、赤铁矿、锐钛矿、针铁矿等,含量

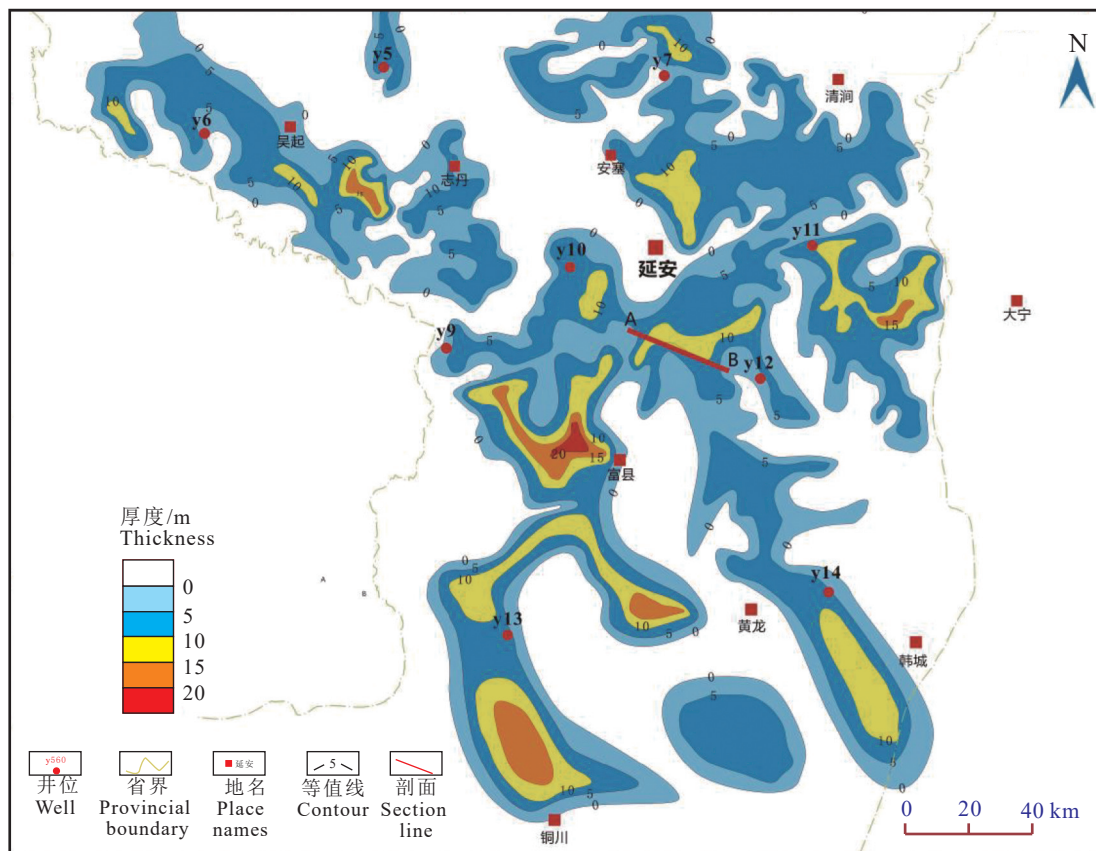


图 4 鄂尔多斯盆地南部铝土岩厚度等值图
Fig.4 Thickness contour map of bauxite in the south of Ordos Basin

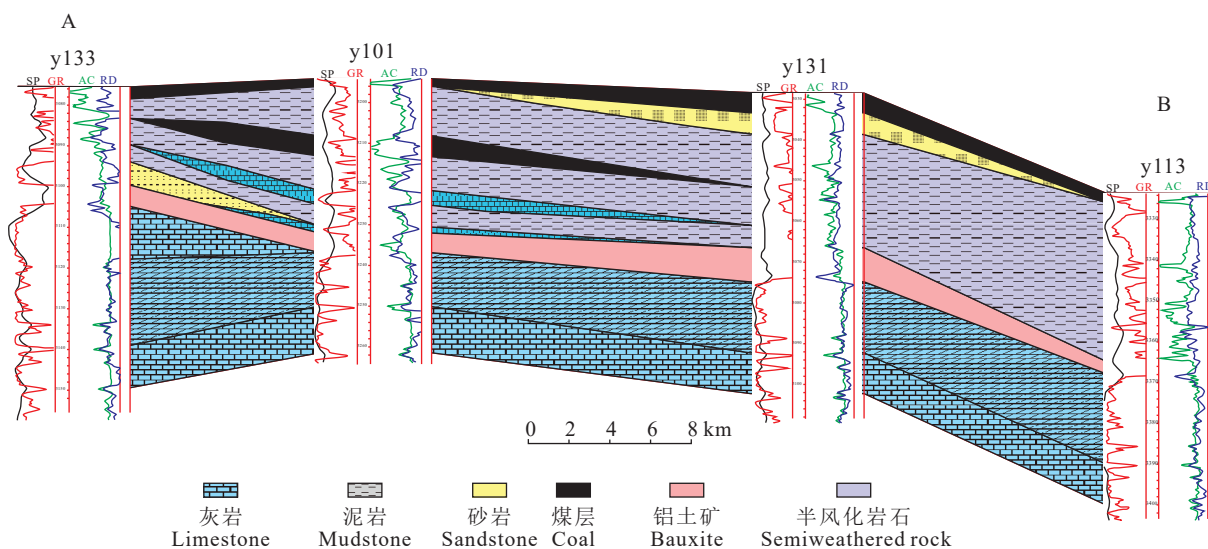


图 5 鄂尔多斯盆地南部铝土矿层顶底部岩性结构图(剖面位置见图 4)
Fig.5 Lithological structure of top and bottom of bauxite deposit in the south of Ordos Basin (section position shown in Fig. 4)

1%~11%; 部分可见孔隙充填方解石、(铁)白云石, 柱状晶体, 也可见片状、鳞片状产出, 其中, 片状、鳞片状一水硬铝石以充填物充填在豆、鲕粒之间; 高

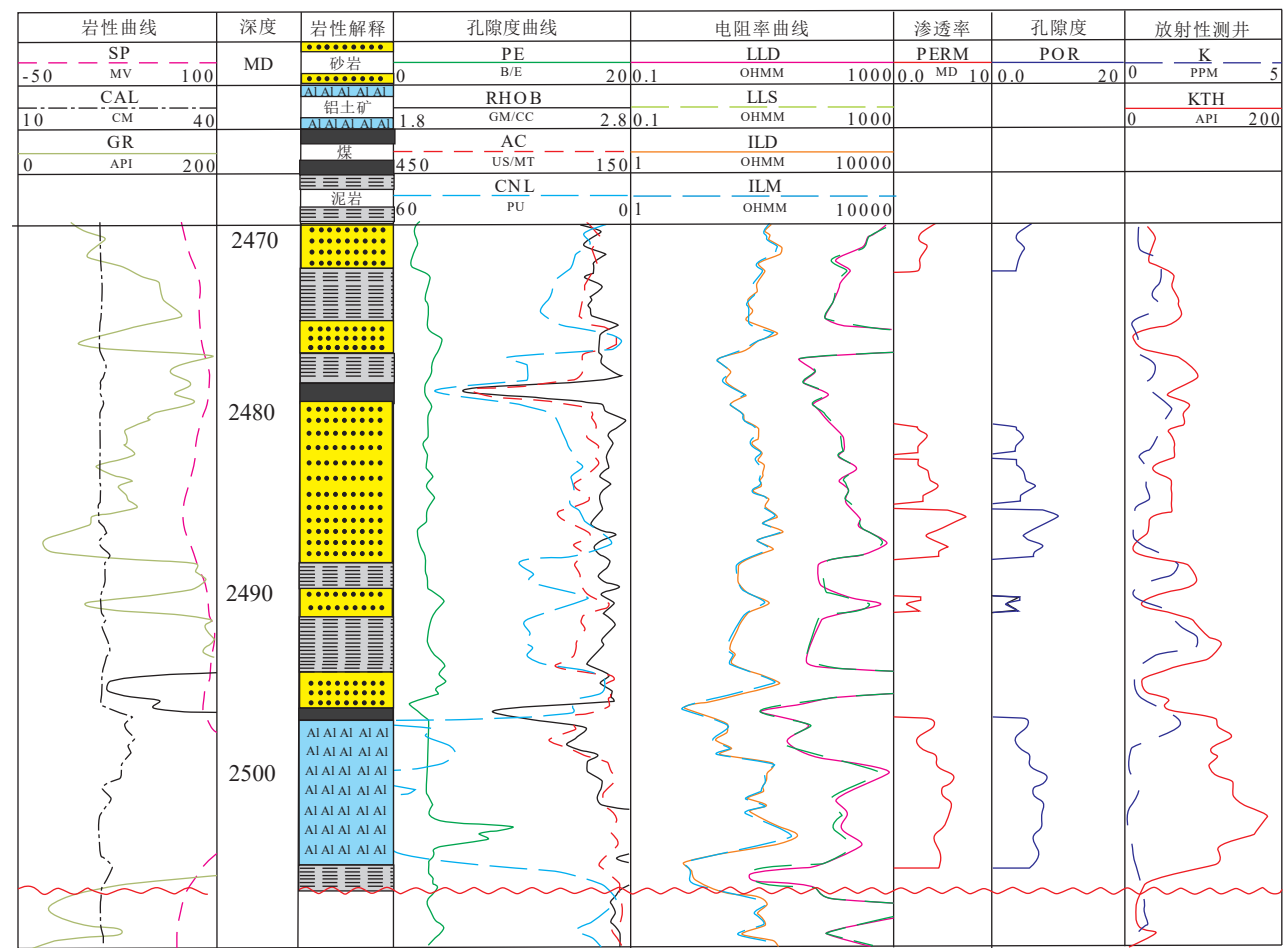


图 6 鄂尔多斯盆地南部铝土矿层测井响应特征(以 y10 井为例)
Fig.6 Logging response characteristics of bauxite in the south of Ordos Basin (take Well y10 as an example)

岭土以细小片状、纤维状分布于豆鲕粒的核心或与一水硬铝石混合形成豆粒、鲕粒的环带,也作为充填物在颗粒间;方解石、(铁)白云石多以填隙物的方式出现,偶尔可见在颗粒核部或环带结构中(图 8)。

铝土矿矿石化学成分主要为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 , 少量 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等(图 9)。

3.2.2 矿体物性及孔隙结构特征

根据铝土矿的扫描电镜和孔渗分析等测试数据,铝土矿发育孔隙和裂缝,储层物性较好。孔隙度平均为 12.5%;渗透率平均达到 $5.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

扫描电镜显示,铝土矿及铝土质泥岩主要以一水硬铝石的晶间孔(孔径最大可达 $1.2 \mu\text{m}$)、粒间和粒内溶蚀孔为主,发育微裂缝(图 10)。

恒压压汞表明,高渗储层段孔隙连通性好,排驱压力介于 0.21~0.42 MPa,最大连通孔喉半径分布

于 $1.81 \sim 5.22 \mu\text{m}$; 中值压力分布于 5.90~6.11 MPa,平均喉道半径一般在 $0.09 \sim 0.67 \mu\text{m}$,这是溶孔型储层普遍特征。

3.3 铝土矿压力敏感性特征

3.3.1 加压-卸压条件下铝土矿的敏感性实验条件

为研究鄂尔多斯盆地深部铝土矿压力敏感性特征,选取铜川陈炉矿区露头铝土矿样品,开展加压-卸压过程进行应力敏感评价并开展核磁共振实验,实验样品选用 X 射线衍射中 2#和 5#样品,所选样品一水硬铝石含量高,并且物性参数较好,具有一定的代表性,岩样均为圆柱状。岩样参数如表 1 所示。实验采用 AP-608 自动孔渗仪,测试净覆压下铝土矿的孔隙度和渗透性。核磁共振实验使用 MicroMR23-060H-1 型核磁共振分析仪,共振频率 21.36 MHz,磁体强度 0.5 T,线圈直径为 25.4 mm,磁体温度为 32°C 。本次实验依照中国石油天然气

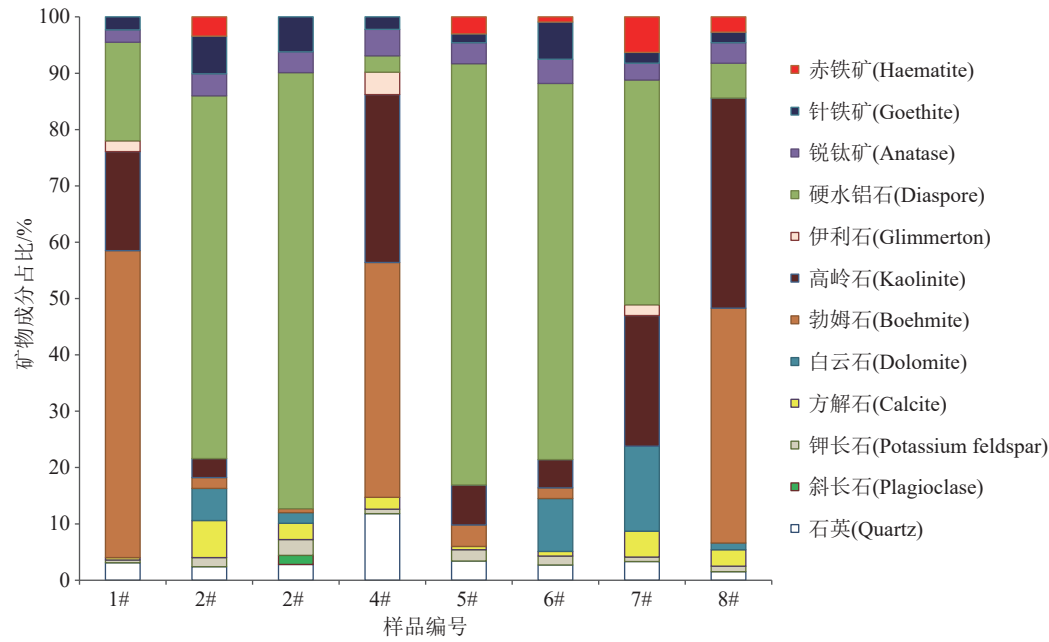


图 7 铜川陈炉矿区铝土矿 X 衍射矿物组分图
Fig.7 X-ray diffraction mineral composition map of bauxite in Tongchuan Chenlu Mining Area

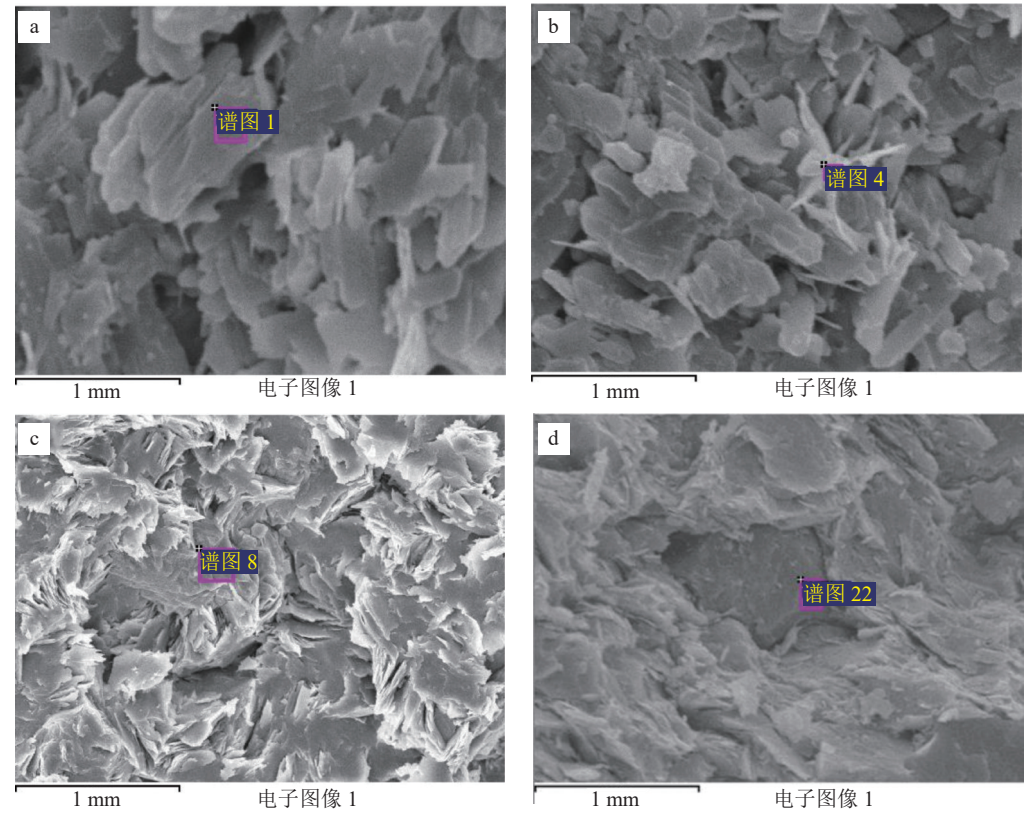


图 8 铜川陈炉矿区铝土矿扫描电镜下铝土矿的微观结构
a—致密板状—水硬铝石; b——水硬铝石、锐钛矿; c—鳞片状—水硬铝石; d—细小片状高岭土
Fig.8 Microstructure of bauxite under scanning electron microscope in Tongchuan Chenlu Mining Area
a—Dense spotty diaspora; b—Diaspore, anatase; c—Scaly diaspora; d—Fine sheet kaolin

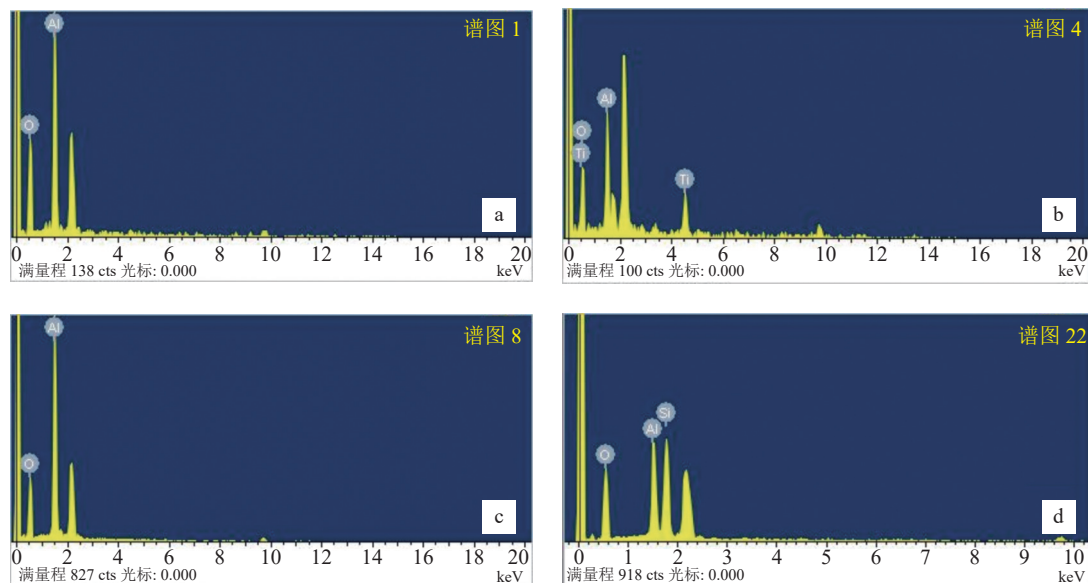


图 9 铜川陈炉矿区铝土矿 EDS 分析

a—致密板状—水硬铝石; b—水硬铝石、锐钛矿; c—鳞片状—水硬铝石; d—细小片状高岭土

Fig.9 EDS analysis of bauxite in Tongchuan Chenlu Mining Area

a—Dense spotty diaspora; b—Diaspore, anatase; c—Scaly diaspora; d—Fine sheet kaolin

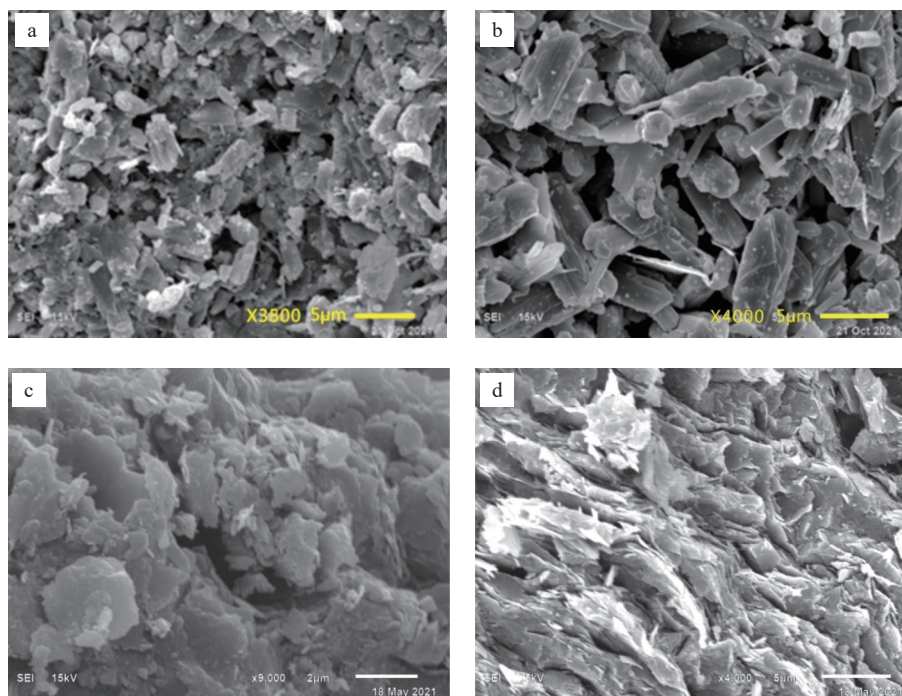


图 10 铜川陈炉矿区铝土矿微观孔喉结构特征

a—紧密堆积的水铝石, 呈半自形—自形假六方片状, 水铝石晶间孔; b—水铝石, 呈半自形—自形假六方片状, 水铝石晶间孔; c—水铝石, 多呈半自形假六方片状或它形, 粒间溶蚀孔; d—黏土矿物层间缝

Fig.10 Characteristics of micro pore throat structure of bauxite in Tongchuan Chenlu Mining Area

a—Closely packed boehmite exhibiting semi-euhedral to euhedral pseudo-hexagonal plate-like morphology, with intercrystalline porosity observed between boehmite crystals; b—Boehmite displaying semi-euhedral to euhedral pseudo-hexagonal plate-like habit, characterized by intercrystalline pores within the boehmite structure; c—Predominantly semi-euhedral pseudo-hexagonal plate-like or anhedral boehmite, associated with intergranular dissolution pores; d—Interlayer zone composed of clay minerals

表 1 岩心基本参数

Table 1 Basic core parameters

编号	直径/mm	长度/mm	孔隙度/%	渗透率/mD
2#	2.564	3.474	0.846	0.516
5#	2.574	5.604	1.38	1.247

行业标准《覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法》(SY/T 6385—2016)及《岩样核磁共振参数实验室测量规范》(SY/T 6490—2014),采用围压升降法对岩心加压-卸压过程进行应力敏感评价和核磁共振实验。

实验过程中气源采用高压空气,温度为常温,设计驱替压差为 0.2 MPa,围压值分别为 3.0 MPa、5.0 MPa、7.0 MPa、9.0 MPa、11.0 MPa、13.0 MPa、15.0 MPa,在加压-卸压过程并保持每个应力点持续时间保持平衡在 30 min 以上,测定不同应力点

下气体的渗透率值,并通过核磁共振实验测定 T2 谱、总信号、束缚水信号等数据。

3.3.2 加压-卸压条件下铝土矿孔隙变化

从图 11 可以看出,在加压过程中,2#、5#样品孔隙信号整体趋势在增大,孔隙增大,说明加压过程岩心内部形成了微裂缝,导致孔隙增大。其中,2#样品在 7 MPa 的时候孔隙信号持续增大,在 9 MPa 时孔隙信号快速增大,分析认为 7 MPa 为 2#样品弹性形变的临界值,9 MPa 为临界破坏压力值;5#样品在 13 MPa 时候孔隙信号快速增大,分析认为 13 MPa 为临界破坏压力值。对比 2#和 5#样品,5#样品孔隙信号增大幅度更大,形成裂缝更多。在卸压过程中,2#、5#样品孔隙信号整体趋势在减小,孔隙减小,卸压造成裂缝闭合,卸压过程最小孔隙度信号值较加压过程最小孔隙度信号值大,

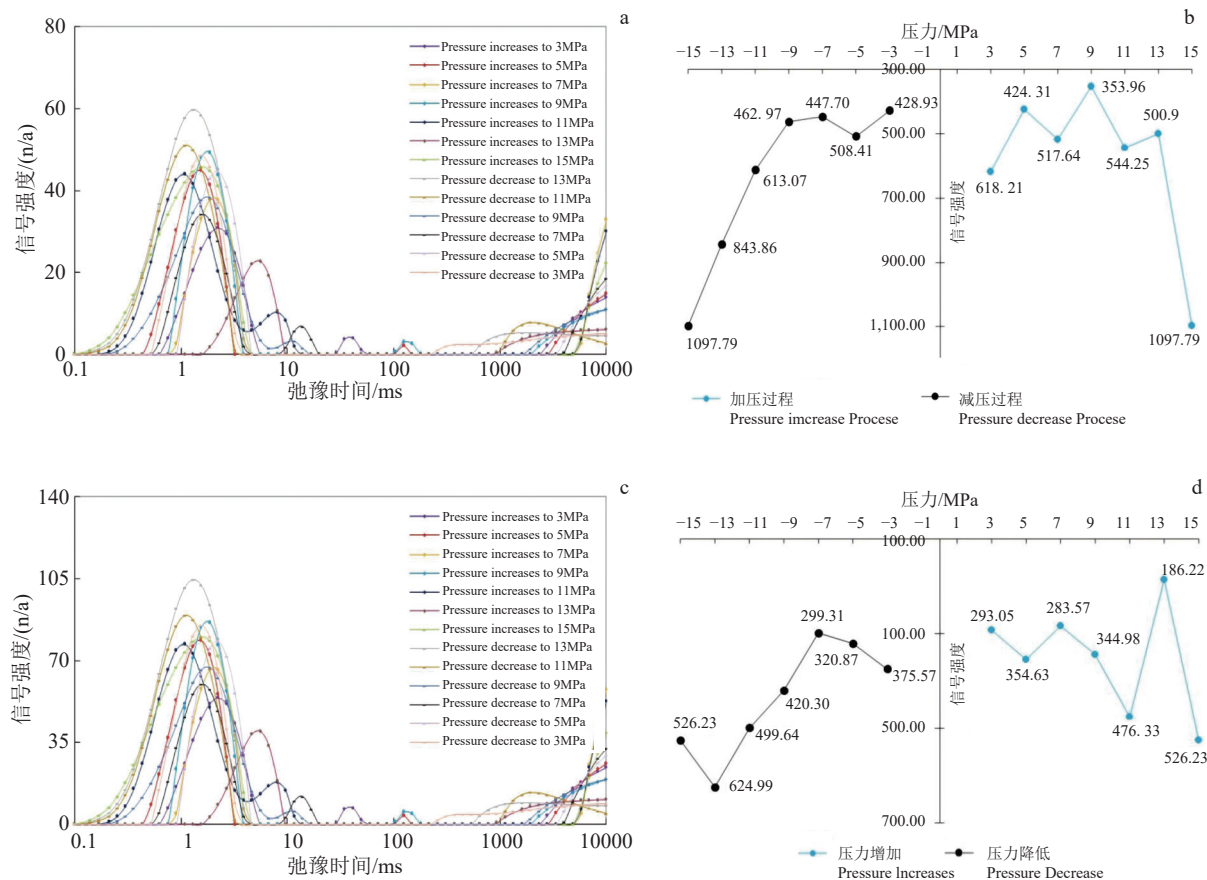


图 11 铜川陈炉矿区铝土矿岩心加压-卸压过程核磁共振测试

a—2#岩心三轴径向压缩核磁共振 T₂ 图谱; b—2#岩心总信号值随径向压力变化曲线; c—5#岩心三轴径向压缩核磁共振 T₂ 图谱; d—5#岩心总信号值随径向压力变化曲线

Fig.11 Nuclear magnetic resonance testing of bauxite core pressure relief process in Tongchuan Chenlu Mining Area
a—2# core triaxial radial compression T₂ spectrum of nuclear magnetic resonance; b—2# core changing with radial pressure total signal value;
c—5# core triaxial radial compression T₂ spectrum of nuclear magnetic resonance; d—5# core changing with radial pressure total signal value

说明加压可以改善铝土矿的孔隙空间。

3.3.3 岩石应力敏感损害程度评价

岩石应力敏感损害程度可采用净应力变化前后的岩心样品渗透率变化率来衡量(李传亮, 2006)。根据石油行业标准《储层敏感性流动实验评价方法》(SY/T5358—2010), 岩心样品应力敏感损害程度分为 5 个等级, 具体指标如表 2 所示。

图 12a、c 表示加压和卸压过程中应力变化前后渗透率变化率, 根据岩石压敏曲线可知, 2#和 5#样品均存在应力敏感, 2#样品应力敏感损害率为 53.9%, 损害程度属于中等偏强; 5#样品应力敏感损害率为 72.1%, 损害程度属于强。

图 12b、d 中两点连线斜率表示增压和减压后相同压力点渗透率变化幅度、渗流空间恢复能力或弹性指数, 根据不同应力变化下渗透率变化率可知, 随着应力增加, 渗透空间恢复能力或弹性指数降低, 其中, 2#样品斜率值由 0.1069 降至 0.0005, 5#样品斜率值由 0.2679 降至 0.001。可为后期溶漫

表 2 应力敏感损害率评价标准

Table 2 Evaluation criteria for stress sensitive damage rate

应力敏 损害率%	损害程度
$Dv \leq 5$	无
$5 < Dv \leq 30$	弱
$30 < Dv \leq 50$	中等偏弱
$50 < Dv \leq 70$	中等偏强
$Dv > 70$	强

注入压力调控提供依据。

4 深部铝土矿勘探开采构想

4.1 深部铝土矿勘探

4.1.1 深部铝土矿床控制因素

受加里东运动影响而地壳上升, 马家沟组厚层碳酸盐岩经历了长期的风化剥蚀, 逐渐发生红土化导致铁铝富集, 为本溪组铝土矿沉积提供了丰富的物质基础。长期风化剥蚀造成的准平原化造就了本溪组基底的岩溶古地貌。因此, 在古陆或古隆起周缘物源充足, 易形成铝土矿, 同时, 铝土矿分布受

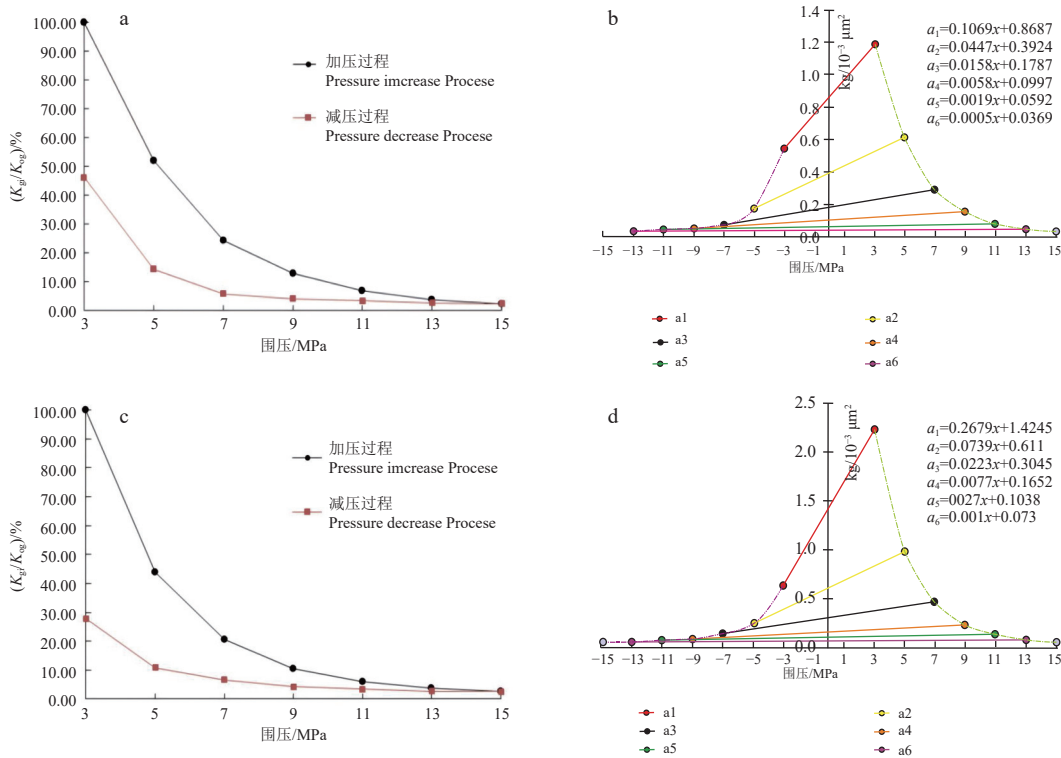


图 12 铜川陈炉矿区铝土矿岩心应力敏感试验
a—2#岩心压敏曲线图; b—2#岩心不同应力下渗透率变化率曲线图; c—5#岩心压敏曲线图; d—5#岩心不同应力下渗透率变化率曲线图
Fig.12 Bauxite core stress sensitivity in Tongchuan Chenlu Mining Area
a—2# core pressure sensitivity curve; b—2# permeability change rate curve under different stress; c—5# core pressure sensitivity curve;
d—5# permeability change rate curve under different stress

岩溶古地貌控制,在沟槽中形成溶斗型铝土矿,矿体规模较小,在岩溶斜坡形成层状、似层状的铝土矿(王银川等, 2011; 杨合群等, 2012; 王高平等, 2013; 李建全等, 2016; 席善峰等, 2019)。控矿因素为深部铝土矿勘探指明方向,古陆或古隆起周缘的岩溶斜坡、古沟槽等古地貌单元为有利成矿区域。

4.1.2 深部铝土矿测井评价

油气勘探中,测井显示本溪组底部发育铝土矿层,埋藏深度在 100~4000 m。此前,在地层对比中,该套铝土矿一直作为本溪组与下伏马家沟组标志层,在油气勘探中,一直被当做风化壳气藏的区域盖层(袁珍等, 2016)。

铝土矿层作为标志层电性特征明显,表现为“四高两低”即高伽马、高钍含量、高铀含量、高补偿中子、低电阻、低声波时差。自然伽马(GR)异常高,由于铝土矿颗粒较细,比表面较大,容易吸附铀、钍和钷等放射性物质,自然伽马与一水硬铝石含量呈正相关,当一水硬铝石含量超过 75% 时,自然伽马大于 450.0 API,因此,自然伽马可作为识别铝土岩最关键的测井参数。双侧向电阻率(LLD, LLM)一般为 35 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,最大值为 100 $\Omega\cdot\text{m}$,出现伽马高值段相对应的电阻率普遍降低,并且双侧向电阻率测井曲线正差异明显,由于伽马高值段铝土质的含量高,铝土矿较脆,容易形成微裂缝和溶孔,导致电阻率降低(孟卫工等, 2021)。

铝土矿层参数表征是铝土矿识别、评价及储量计算的基础,在 X 射线衍射全岩矿物分析、矿石物性测量、扫描电镜等资料的基础上,基于岩心刻度,建立铝土矿层参数解释模型。依据经典岩石体积模型矿物类型,根据 X 射线衍射全岩矿物分析结果,利用自然伽马和密度拟合,确定一水硬铝石含量。利用岩心分析孔隙度与声波时差交会,建立孔隙度模型,根据孔隙度与渗透率的相关性,利用孔隙度求得铝土矿层渗透率(南珺祥等, 2022)。最终可以完成深部铝土矿测井评价,实现铝土矿识别、评价及储量估算。

特殊测井包括元素俘获能谱(ECS)测井、核磁测井、偶极声波测井、声电成像测井等也可以完成铝土矿层的评价。ECS 元素测井可求取地层元素含量、岩石矿物成分,能满足评价地层各种性质、获取地层物性参数、计算黏土矿物含量;偶极声波测

井能提供纵横波时差,可进行各向异性分析处理,判断水平最大地层应力方向,计算地层水平最大、最小地层应力,求取岩石泊松比、杨氏模量、剪切模量、破裂压力等重要岩石力学参数,满足岩石力学参数计算模型建立的要求,指导压裂改造。声电成像测井具有高分辨率、高井眼覆盖率和可视性特点,识别裂缝类型,对指导改造、评定开发效果有重要意义(伍天洪等, 2007; 刘双莲和陆黄生, 2011)。

基于上述研究成果,对鄂尔多斯盆地南部铝土矿资源进行了评价,在鄂尔多斯盆地铝土矿分布广泛,与其下伏的奥陶系岩溶古地貌有很好相关性,铝土矿受奥陶系微地貌控制,呈条带状、透镜状分布,具有很大勘探潜力。

4.2 深部铝土矿开采

原位溶浸采矿是有效动用盆地深部铝土矿资源的最佳方式,鄂尔多斯盆地铝土矿体沉积稳定性、顶底板条件、矿体渗透性等方面与原位溶浸开采具有很好匹配的特性,优选埋藏深度在 500~1000 m 的铝土矿层开展试验,初步计划在鄂尔多斯盆地南缘铜川、盆地东缘府谷及山西吕梁地区开展原位溶浸试验。

铝土矿属于沉积岩,具有一定的孔隙和渗透性,且呈现夹心构造,常被包围在顶底黏土岩之间,具有采用原位溶浸开采的地质条件,特别是根据应力敏感测试,铝土矿随着应力增加会出现新的孔隙或裂缝,可以改善矿层渗透性。借鉴原位溶浸开采铀矿、稀土矿的技术,可以考虑铝土矿原位溶浸开采。

原位溶浸开采利用注液井向目标矿体注入特定的溶浸液,经过一系列物理化学反应将有用金属浸出,通过抽液井将溶浸液提出地表,在地表工厂实现有用金属萃取的过程(梁卫国等, 2012; 赵阳升等, 2019, 2021)。如图 13 所示,铝土矿原位溶浸开采主要实施步骤包括:

(1) 钻井:采用从式井,以反九点法、反七点法或反五点法布注采井网,包括注液井和排采井,注液井位于中间位置,排采井位于周边位置,其中,注液井为直井,排采井为定向井;钻井钻穿铝土矿的上伏岩层至铝土矿底层基岩 20 m,采用套管完井。

(2) 矿层改造:注液井在铝土矿层顶部设置射孔段,排采井在铝土矿层底部设置射孔段,以注液井

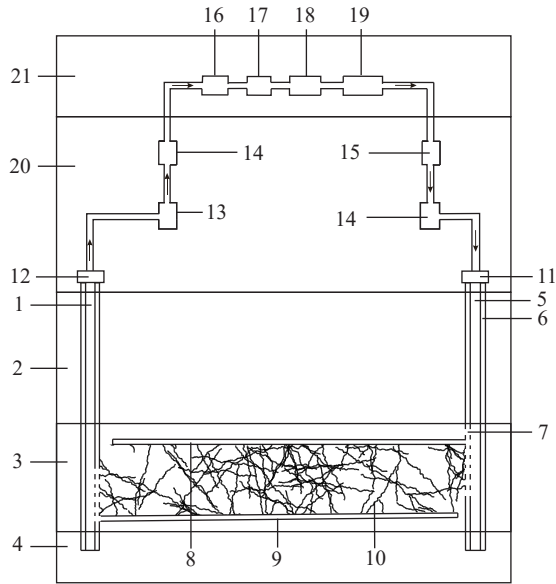


图 13 鄂尔多斯盆地铜川地区铝土矿的原位溶浸开采构想图

1—排采井; 2—上伏地层; 3—铝土矿层; 4—铝土矿底层基岩; 5—注液井; 6—套管; 7—射孔段; 8—顶部水平钻孔; 9—底部水平钻孔; 10—压裂裂缝; 11—注液井的井口装置; 12—排采井的井口装置; 13—沉降罐; 14—泵房; 15—溶浸液罐; 16—分离装置; 17—净化处理装置; 18—萃取装置; 19—溶浸液制备装置; 20—注采区; 21—溶浸液处理区

Fig.13 In-situ leaching of bauxite mining concept map in Tongchuan Area, Ordos Basin

1—Production well; 2—Overlying ground; 3—Bauxite; 4—Bedrock; 5—Injection Well; 6—Bushing; 7—Perforation; 8—Top horizontal drilling; 9—Bottom horizontal drilling; 10—Fracturing cracks; 11—Injection wellhead; 12—Production wellhead; 13—Sedimentation tank; 14—Pump; 15—Leaching tank; 16—Separation device; 17—Extraction plant; 18—Purification plant; 19—Leaching solution preparation device; 20—Injection mining area; 21—Leach solution treatment area

为起始端、排采井为终止端在铝土矿层顶部钻取水平钻孔, 水平钻孔自注液井到排采井平行于矿层顶板水平延伸, 第一水平钻孔与排采井不连通, 再以排采井为起始端、注液井为终止端在铝土矿层底部钻取水平钻孔, 水平钻孔自排采井到注液井的倾角向上倾斜, 该水平钻孔与注液井不连通, 对注液井通过水力压裂或者爆破增渗, 在铝土矿层中形成压裂裂缝, 建立渗流通道。

(3)溶浸作业: 由注液井注入溶浸液, 通过注液井的射孔段及顶部水平钻孔进入铝土矿层, 通过压裂裂缝向下渗流溶蚀铝土矿, 再通过底部水平钻孔及排采井的射孔段的渗流到排采井底, 再将含铝土矿的溶浸液抽取至地面。

(4)地面作业: 将含铝土矿的溶浸液经沉降后,

完成含铝土矿的溶浸液分离及萃取, 再经净化处理后实现重复利用。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地南部富县、铜川地区本溪组地层中铝土矿垂向上呈现夹心构造, 即铝土矿常被包围在顶底黏土岩或页岩之间。基底为碳酸盐岩, 底部为铝铁质黏土岩, 中部为铝土矿层, 上部一般发育黑色炭质页岩。矿层呈透镜状或层状, 与含矿岩系厚度呈现正相关。

(2)鄂尔多斯盆地南部铜川陈炉矿区铝土矿物成分主要为一水硬铝石, 含量 40%~77%; 次为高岭石为主的黏土矿物, 其含量 3%~37%; 铁质和泥质含量 1%~11%。一水硬铝石呈现鲕粒状、豆状、粒碎屑状出现, 也有以填隙物充填在豆、鲕粒之间。铝土矿的物源主要来自碳酸盐岩的红土风化壳, 铝土矿呈似层状、透镜状叠置于基底的碳酸盐岩风化壳上, 矿层厚度、矿石结构、构造及矿层产状的变化主要受底部的岩溶古地貌的控制。

(3)利用测井技术可以开展鄂尔多斯盆地深部铝土矿资源评价, 铝土矿发育孔隙、裂缝, 储层物性较好, 微观孔隙结构以晶间孔、粒间和粒内溶蚀孔为主, 同时发育微裂缝, 测井显示具有孔渗特征。铝土矿随着应力增加会出现新的孔隙或裂缝, 可以改善矿层渗透性, 但是铝土矿存在强应力敏感, 需要考虑增压、降压对铝土矿层物性的影响, 结合铝土矿的岩石物理特征, 铝土矿可以考虑采用原位溶浸开采。

致谢: 论文在编写过程中得到汤中立院士、张国伟院士、毛景文院士、郝芳院士、邓军院士、成秋明院士、王瑞江教授、鞠建华教授等专家的关心支持, 在此表示感谢!

References

- Bhukte P G. 2020. Geochemical, mineralogical and petrological characteristics of lateritic bauxite deposits formed on Deccan trap basalt with reference to high-level and coastal (low level) deposits of Maharashtra[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 95: 587–598.
- Chen X F. 2022. The development and utilization of bauxite resources in the Guizhou Province and relevant challenges to the ecology and the environment[J]. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-mineral*

- Resources Management, 38: 5–30.
- Du Yuansheng, Yu Wenchao. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 812–826 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jinhua. 1991. A study of the sealing properties of the Palaeozoic caprocks in Erdusi Basin[J]. Natural Gas Industry, 11(6): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, Li Huaqin. 2015. Minerogenetic characteristics and resource potential analysis of bauxite in China[J]. Geology in China, 42(4): 853–863 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Zanchao, Liang Huijuan, Liu Chuanquan, Ma Ruishen, Wang Chunli. 2014. Geological characteristics, metallogenic regularity, sources of ore-forming material of the bauxite district, Yushan, Xin'an, Henan Province[J]. Northwestern Geology, 47(1): 221–233 (in Chinese with English abstract).
- Li Chuanliang. 2006. Evaluation method for stress sensitivity of reservoir rock[J]. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing, 25(1): 40–42 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianquan, Zhou Hongchun, Cao Gaoshe, Ma Shenrui, Li Aiyong. 2016. Geological characteristics of bauxite deposit in the deep of Yanlong orefield in Henan Province[J]. Geology and Resources, 25(4): 345–350 (in Chinese with English abstract).
- Liang Weiguo, Zhao Yangsheng, Xu Suguo, Yu Yanmei. 2012. Theoretical study of in situ solution mining[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 43(3): 382–387 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changling, Wang Enfu, Yan Jinrui. 1988. Geological features and genesis of Carboniferous bauxite in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(3): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Keke, Fu Xin, Rong Wei, Wang Jianxiong, Cheng Xiang. 2022. Analysis of bauxite reservoir in X area of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 37(2): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuanglian, Lu Huangsheng. 2011. Evaluation methods and characteristics of log evaluation technology in shale gas[J]. Well Logging Technology, 35(2): 112–116 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenhui, Pan Heping, Li Jianwei, Zhang Yongqing, Chen Hongliang. 2015. Well logging evaluation on bauxitic mudstone reservoirs in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 35(5): 24–30 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yulin, Lin Yan, Yi Jining, Yu Yanmei, Liu Yuling. 2015. The current situation of mineral resources in the Ordos Basin and suggestions for exploration and development[J]. China Mining, 24(10): 15–32 (in Chinese with English abstract).
- Meng Jianyin, Wang Qingfei, Liu Xuefei, Li Zhongming, Cui Xiexiang. 2011. Mineralogy and geochemistry of the Pangjiazhuang bauxite deposit in county, Shanxi Province[J]. Geology and Exploration, 47(4): 593–604 (in Chinese with English abstract).
- Meng Weigong, Li Xiaoguang, Wu Bingwei, Li Jing, Sun Lixu. 2021. Research on gas accumulation characteristics of aluminiferous rock series of Taiyuan Formation in Well Ninggu 3 and its geological significance, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(3): 79–87 (in Chinese with English abstract).
- Nan Junxiang, Liu Na, Wang Xingying, Xie Guwei, Yin Peng, Yang Yanning. 2022. Characteristics and formation mechanism of bauxite reservoir in Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 33(2): 288–296 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dapeng, Tang Chao, Wei Jialin, Zeng Hui, Chen Jun, Xiao Defu. 2021. Logging responsive characteristics of formation lithology from Nenjiang Formation to Taikang Formation in southern Daqing Placanticline[J]. North China Geology, 44(1): 14–20, 26 (in Chinese with English abstract).
- Sun Silei. 2018. Division of bauxite metallogenic belt and characteristics of ore bearing rock series in Baode Xingxian County, Shanxi Province[J]. Land and resources in North China, (6): 13–14 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gaoping, Wang Zhenliang, Zhao Xuejiao, Zhang Daofa, Li Xinyu. 2013. Palaeogeomorphology restoring of Ordovician weathering crust in Yan'an Aea, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(4): 563–570 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingfei, Deng Jun, Liu Xuefei, Li Zhongming, Zhang Jian. 2012. Review on research of bauxite geology and genesis in China[J]. Geology and Exploration, 48(3): 430–448 (in Chinese with English abstract).
- Wang S, Li X, Du K. 2017. Grade distribution and orebody demarcation of bauxite seam based on coupled Interpolation[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 42: 3963–3972.
- Wang Yinchuan, Li Zhaokun, Zhai Zifeng, Du Chunyang, Li Guangjun. 2011. Benxi formation bauxite mineralization condition and rule in Shanxi Province[J]. Northwestern Geology, 44(4): 82–88 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guoyan. 1997. A discussion on material source and metallogenic model of bauxite deposits in North China[J]. Henan Geology, 15(3): 161–166 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tianhong, Wang Yi, Wang Chuangang. 2007. Geophysical indicators of oil, natural gas, coals, sandstone uranium and their applications in co-exploration of multiple energy minerals[J]. Geology in China, 38(3): 486–489 (in Chinese with English abstract).
- Xi Shanfeng, Ouyang Zao zhuo, Li Jian quan, Zhou Hongchun, Ma Ruishen. 2019. Study on the geology and orecontrolling conditions of the bauxite deposits in Sanmenxia area, Henan Province[J]. Geology and Resources, 28(4): 339–344 (in Chinese with English abstract).
- Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, Liu Jianzhong, Jiang Yaodong. 2017.

- Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 42(3): 547–556 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenyuan, Zhao Donghong, Wang Yonghe. 2012. On metallogenic regularities of bauxite deposits in northwest China[J]. Geology and Exploration, 48(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhen, Wu Fuli, Feng Rong. 2016. The distribution rule and its geological significance of bauxite in Yanchang Gasfield of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 36(6): 843–848 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haikun, Hu Peng, Jiang Junsheng, ChengXiang, Wang Jianxiong, Liu Jiangtao, Xiang Peng. 2021. Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources[J]. Geology in China, 48(1): 68–81 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yangsheng, Liang Weiguo, Feng Zijun. 2019. Introduction to in-situ Modified Fluid Mining[M]. Beijing: Science Press, 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yangsheng, Liang Weiguo, Feng Zijun, Wang Kai, Yu Yanmei. 2021. Science, technology and engineering of in-situ modified mining by fluidization[J]. Journal of China Coal Society, 46(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- 储层分析[J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 37(2): 25–31.
- 刘双莲, 陆黄生. 2011. 页岩气测井评价技术特点及评价方法探讨[J]. 测井技术, 35(2): 112–116.
- 刘文辉, 潘和平, 李健伟, 张永清, 陈宏亮. 2015. 鄂尔多斯盆地大牛地气田铝土质泥岩储层的测井评价[J]. 天然气工业, 35(5): 24–30.
- 路玉林, 林燕, 易继宁, 于艳梅, 刘玉玲. 2015. 鄂尔多斯盆地矿产资源现状及勘查开发建议[J]. 中国矿业, 24(10): 15–32.
- 孟健寅, 王庆飞, 刘学飞, 李中明, 崔燮祥. 2011. 山西交口县庞家庄铝土矿矿物学与地球化学研究[J]. 地质与勘探, 47(4): 593–604.
- 孟卫工, 李晓光, 吴炳伟, 李晶, 孙立旭. 2021. 鄂尔多斯盆地宁古3井太原组含铝岩系天然气成藏特征及地质意义[J]. 中国石油勘探, 26(3): 79–87.
- 南珺祥, 柳娜, 王邢颖, 解古巍, 尹鹏, 杨艳宁. 2022. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩储层特征及形成机理[J]. 天然气地球科学, 33(2): 288–296.
- 孙大鹏, 汤超, 魏佳林, 曾辉, 陈军, 肖德富. 2021. 大庆长垣南端含铀岩系地层测井响应特征及应用[J]. 华北地质, 44(1): 14–20, 26.
- 孙思磊. 2018. 山西省保德-兴县铝土矿成矿区带划分及含矿岩系特征[J]. 华北国土资源, (6): 13–14.
- 王高平, 王震亮, 赵雪娇, 张道法, 李新玉. 2013. 鄂尔多斯盆地延安地区奥陶系风化石古地貌恢复[J]. 沉积学报, 31(4): 563–570.
- 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 李中明, 张健. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. 地质与勘探, 48(3): 430–448.
- 王银川, 李昭坤, 翟自峰, 杜春阳, 李广军. 2011. 山西本溪组铝土矿成矿条件及成矿规律探讨[J]. 西北地质, 44(4): 82–88.
- 吴国炎. 1997. 华北铝土矿的物质来源及成矿模式探讨[J]. 河南地质, 15(3): 161–166.
- 伍天洪, 王毅, 王传刚. 2007. 多种能源矿产的地球物理判识标志及其在协同勘探上的应用[J]. 中国地质, 38(3): 486–489.
- 席善峰, 欧阳兆灼, 李健全, 周红春, 马瑞申. 2019. 河南省三门峡铝土矿地质特征及控矿条件研究[J]. 地质与资源, 28(4): 339–344.
- 谢和平, 高峰, 鞠杨, 刘见中, 姜耀东. 2017. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 42(3): 547–556.
- 杨合群, 李英, 李文渊, 赵东宏, 王永和. 2012. 西北地区铝土矿成矿规律概论[J]. 地质与勘探, 48(1): 1–11.
- 袁珍, 武富礼, 封蓉. 2016. 鄂尔多斯延长气田铝土岩分布规律及其地质意义[J]. 西安科技大学学报, 36(6): 843–848.
- 张海坤, 胡鹏, 姜军胜, 程湘, 王建雄, 刘江涛, 向鹏. 2021. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. 中国地质, 48(1): 68–81.
- 赵阳升, 梁卫国, 冯子军. 2019. 原位改性流体化采矿导论[M]. 北京: 科学出版社, 1–5.
- 赵阳升, 梁卫国, 冯子军, 王开, 于艳梅. 2021. 原位改性流体化采矿科学、技术与工程[J]. 煤炭学报, 46(1): 1–13.

附中文参考文献

- 杜远生, 余文超. 2020. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用: 兼论铝土矿床的成因分类[J]. 古地理学报, 22(5): 812–826.
- 傅金华. 1991. 鄂尔多斯盆地古生界盖层封盖性研究[J]. 天然气工业, 11(6): 6–11.
- 高兰, 王登红, 熊晓云, 李华芹, 陈郑辉. 2015. 中国铝土矿资源特征及潜力分析[J]. 中国地质, 42(4): 853–863.
- 焦赞超, 梁会娟, 刘传权, 马瑞申, 王春丽. 2014. 河南新安县郁山铝土矿床地质特征、成矿规律及成矿物质来源[J]. 西北地质, 47(1): 221–233.
- 李传亮. 2006. 储层岩石的应力敏感性评价方法[J]. 大庆石油地质, 25(1): 40–42.
- 李健全, 周红春, 曹高社, 马瑞申, 李爱勇. 2016. 河南省偃龙煤田深部铝土矿床地质特征[J]. 地质与资源, 25(4): 345–350.
- 梁卫国, 赵阳升, 徐素国, 于艳梅. 2012. 原位溶浸采矿理论研究[J]. 太原理工大学学报, 43(3): 382–387.
- 刘长龄, 王恩孚, 严进瑞. 1988. 中国石炭纪铝土矿的地质特征与成因[J]. 沉积学报, 6(3): 1–10.
- 刘可可, 付鑫, 荣伟, 王建雄, 程湘. 2022. 鄂尔多斯盆地 X 区铝土岩