

# 微波激励下煤岩颗粒间电场强化特性研究

孙晓婉<sup>1</sup>, 洪溢都<sup>1</sup>, 龙盛壹<sup>1</sup>, 李 贺<sup>2</sup>, 刘 猛<sup>3</sup>, 阳富强<sup>1</sup>

(1. 福州大学 环境与安全工程学院, 福建 福州 350108; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100020)

**摘 要:**微波辐射诱发的热效应与非热效应均会对煤岩产生一系列的影响, 微波感应放电属于微波非热效应中的一种现象。煤作为一种非均质性强的多孔、富矿的骨架结构, 内部的孔隙、矿物等均会对电场产生影响, 不同组分颗粒间的微波放电现象及电场强化特性具有较大差别; 而目前相关研究主要围绕在煤体中的煤基质上, 忽略了煤体中的矿物及矿物本身形状不规则性带来的影响, 导致对真实矿物颗粒间的放电机理以及影响其放电强度的因素仍不清楚。因此, 通过绘图软件将电子计算机 X 射线断层扫描机 (XCT) 扫描获得的真实煤岩颗粒形状描绘出来, 利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟了微波场下真实煤岩颗粒的电场强化特性, 并探讨了其产生的原因。结果表明: 微波的传播方式及极化特性对颗粒间电场强化有显著影响, 颗粒间电场强度在  $x$  传播  $y$  极化时最大; 相对于其他 5 种颗粒组合, 粒径和间距对黄铁矿-黄铁矿组合的电场强化效果最明显, 煤岩颗粒组合电场强化的最佳效果出现在大粒径、无间距的情况下; 颗粒间夹角的变化对电场强化效果有一定的影响, 且各颗粒形状对应的电场强化最大值均出现在夹角为  $0^\circ$  时; 规则矿石颗粒 (圆、正方形、五边形等) 的电场强化效果与颗粒圆度系数直接相关, 颗粒间电场强度最大值出现在颗粒尖端角度为  $60^\circ$  左右、圆度系数为 0.71 的正三角形时; 而不规则矿石颗粒的电场强度与圆度系数、分形维数并无关系, 且随曲率的增大而逐渐增大; 此外, 碳质材料的石墨化程度会对电场强化效应产生较大的影响, 电场强度随着石墨化程度增加而增加。

**关键词:**微波; 电场强化; 散射; 数值模拟; 不规则煤岩

**中图分类号:** TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1597-12

## Characteristics of electric field strengthening between coal-mineral particles under microwave irradiation

SUN Xiaowan<sup>1</sup>, HONG Yidu<sup>1</sup>, LONG Shengyi<sup>1</sup>, LI He<sup>2</sup>, LIU Meng<sup>3</sup>, YANG Fuqiang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Environmental and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100020, China)

**Abstract:** Both thermal and non-thermal effects induced by microwave radiation can produce a series of effects on coal and rock, and microwave induced discharge is one of the phenomena of microwave non-thermal effects. Coal has a porous and ore-rich skeleton structure with strong heterogeneity. Its internal pores and minerals can affect the electric field. The microwave discharge phenomenon and electric field strengthening characteristics between different component particles are quite different. At present, the relevant researches mainly focus on the coal matrix in the coal body, ignoring

收稿日期: 2024-01-25 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0106

基金项目: 福建省自然科学基金面上资助项目 (2022J01109); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51904285)

作者简介: 孙晓婉 (2000—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生。E-mail: sunxiaowan2022@126.com

通讯作者: 洪溢都 (1989—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士。E-mail: yidu.hong@fzu.edu.cn

引用格式: 孙晓婉, 洪溢都, 龙盛壹, 等. 微波激励下煤岩颗粒间电场强化特性研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1597-1608.

SUN Xiaowan, HONG Yidu, LONG Shengyi, et al. Characteristics of electric field strengthening between coal-mineral particles under microwave irradiation[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1597-1608.



移动阅读

the influence of the minerals in the coal body and the irregular shape of the minerals themselves. As a result, the discharge mechanism between real mineral particles and the factors affecting its discharge intensity are still unclear. Therefore, the shape of real coal and rock particles scanned by electronic X-ray tomography (XCT) was described by drawing software, and COMSOL Multiphysics software was used by in this work to discuss the electric field strengthening characteristics of real coal and rock particles under a microwave field and the causes. The results show that the propagation mode and polarization characteristics of microwave have a significant effect on the enhancement of the intergranular electric field, and the intensity of the intergranular electric field is the largest in  $x$  propagation and  $y$  polarization. Compared with the other five particle combinations, the particle size and spacing have the most obvious effect on the electric field strengthening of the pyrite-pyrite combination, and the best effect of the electric field strengthening of the coal-rock particle combination appears in the case of large particle size and no spacing. The change of the Angle between particles has a certain influence on the effect of electric field strengthening, and the maximum value of electric field strengthening corresponding to each particle shape appears when the Angle is  $0^\circ$ . The electric field strengthening effect of regular ore particles (round, square, pentagon, etc.) is directly related to the roundness coefficient of the particles. The maximum electric field strength between particles occurs when the Angle of particle tip is about  $60^\circ$  and the roundness coefficient is 0.71. However, the electric field intensity of irregular ore particles has no relation with roundness coefficient and fractal dimension, but gradually increases with the increase of curvature. In addition, the degree of graphitization of carbonaceous materials has a great influence on the electric field strengthening effect, and the electric field intensity increases with the increase of graphitization degree.

**Key words:** microwave; electric field strengthening; scattering; numerical simulation; irregular coal rock

## 0 引 言

煤炭是我国最重要的基础能源和原料, 2022 年煤炭消费量占能源消费总量的 56.20%<sup>[1]</sup>。尽管煤炭工业对我国经济发展做出了巨大的贡献, 但是其安全形势却不容乐观。随着煤炭利用的增加, 相关安全生产问题也随之出现, 瓦斯事故因其破坏性强、人员伤亡多、经济损失大等特点成为众多煤矿事故类型中控制的重点<sup>[2]</sup>。在 2016—2022 年, 我国共发生 119 起煤矿瓦斯事故, 造成 618 人死亡<sup>[3]</sup>。瓦斯不仅是煤矿重大灾害源, 同时也是典型的温室气体, 其温室效应指数是二氧化碳的 20 倍。与此同时, 瓦斯也是一种高效的清洁能源, 其发热量高达  $33.50 \sim 36.80 \text{ MJ/m}^3$ 。因此, 如果能够实现瓦斯的安全、高效和清洁开采, 不仅可以解决煤矿安全生产问题, 同时也能够满足我国日益增长的能源需求, 具有重要的现实意义。

我国煤层普遍存在微孔发育、渗透性低、吸附性高等特性, 这些特性不利于瓦斯的开采和利用, 需对煤层进行适当的改造。常见的开采方法包括密集钻孔抽采、水力压裂和水射流割缝等, 这些方法在实际工程应用中通常能够取得较好的抽采效果并具备各自独特的优势, 但仍存在一定的局限性。以水力压裂为例, 压裂过程中容易形成水锁效应, 从而限制煤层气体的释放和高效抽采; 此外, 水力压裂对煤层完整性要求较高, 当煤层内存在断层、溶洞, 甚至存在与地

面贯通的大裂纹时, 水力压裂技术的适用性将受到影响<sup>[4]</sup>。因此, 为了弥补现有技术的不足, 研究者开始探索以微波注热法为代表的物理场激励法。微波是指频率在 300 MHz~300 GHz 的高频电磁波。微波加热通常具有加热均匀、加热速度快、选择性加热、渗透加热等特点, 在家用、工业、科研等领域已获得广泛的应用。已有研究表明: 在煤层进行持续微波加热过程中, 热影响区域的渗透性显著提高, 从而提高瓦斯抽采量, 证实了微波注热法的工程应用价值<sup>[5]</sup>。

大量研究表明, 微波辐射诱发的热效应与非热效应(当介质材料处于微波场中产生了不归属于温度变化的系统响应)均会对煤体产生一系列的影响。微波感应放电属于微波非热效应中的一种现象, 其宏观表现为等离子体击穿。这种现象的形成主要是由于在微波场中, 高介电参数材料表面易感应、集聚大量的自由电荷, 而气体本身含有的少量自由电子在微波场中高速撞击气体分子形成带电粒子, 这些带电粒子的指数增长和聚集形成等离子体, 等离子体在相碰复合时会释放光和热, 最终形成气体击穿放电现象。等离子体通道在极速膨胀与冲击作用下会产生强大的冲击波和张应力<sup>[6-7]</sup>, 使煤体发生破碎, 实现煤层的致裂增透。等离子体可以将煤破碎成小块, 导致孔隙率提高数百倍以上, 从而有效改善其渗透性。击穿后煤体内部的流动状态由“达西流”转变为“非达西流”, 形成的裂隙结构对流体运移形成非常明显的诱导作用,

渗透率增长倍数达到 27~426 倍<sup>[8-9]</sup>,成功地将等离子体应用于煤层气开采领域。由此可见,微波辐射不仅可以通过热效应影响煤体的孔隙结构,还能通过非热效应(如等离子体放电)改变煤岩孔裂隙结构。

煤作为一种非均质性强的多孔材料,其内部组分(如煤基质、瓦斯气体和矿物)之间存在显著的电学性质差异<sup>[10]</sup>。由于这种差异的存在,电场强度在不同组分之间容易引起畸变,导致电场强度在局部区域集中,从而使得等离子体对煤体的致裂有一定的选择性。虽然等离子体致裂煤体的技术已经有了一定的研究基础,但目前相关研究主要集中在煤体致裂后的增透效果上,而对煤岩颗粒间等离子体的放电机理及电场强化的特性尚不明确。

刘海玉等<sup>[11-12]</sup>通过试验发现空速会影响微波诱导活性焦放电强度,进而影响活性炭的孔隙结构。刘强<sup>[13]</sup>发现金属基颗粒导致的电场畸变促进了金属基表面微波放电等离子体的形成。CAI 等<sup>[14]</sup>发现放电现象可以将微波能转化为热能的效率提高 48.41%,而且氧化的金属放电性能明显低于未氧化金属。KHATTAKA 等<sup>[15]</sup>发现微波辐射下 2 个葡萄颗粒之间会形成微腔共振效应,即微波在葡萄颗粒间交界处出现交叠现象进而形成微波共振腔。当葡萄颗粒接触点的共振叠加十分强烈时,会形成热点,这些热点会导致钠和钾离子电离,进而形成等离子体放电现象。MENÉNDEZ 等<sup>[16]</sup>通过研究发现微波加热碳材料会形成球状闪电或电弧放电等等离子体放电现象,且有序度较高的碳颗粒之间形成的等离子体强度更明显。LI 等<sup>[17]</sup>发现微波功率、气体种类及流量、球形颗粒形貌、石墨化程度等与放电强度密切相关,而且提高生物炭的石墨化程度可以改善微波放电性能。QIAO 等<sup>[18]</sup>通过模拟研究微波照射下微米和毫米级的球形煤粉颗粒的微波电场增强现象,证明了电场强化效应是固态无机化合物快速烧结的原因,增强程度随化合物的介电常数、两颗粒之间的距离、电场方向与两球相邻点表面法线的夹角而变化。LIU 等<sup>[19]</sup>模拟探究了微波场下颗粒形状和间隙距离对焦炭放电现象的影响,发现粒径接近微波波长的焦炭颗粒之间会产生强电场,原因是特定尺寸的颗粒之间会产生微腔共振,但这种机制不适用于亚毫米级的碳材料颗粒。此外,活性炭<sup>[20-21]</sup>、碳化硅<sup>[22]</sup>、无烟煤和石墨等含碳材料在受到微波辐照时,也会产生间歇性的星点或电弧状电火花。

综上所述,空速、微波功率、气体种类及流量、球形颗粒形貌、石墨化程度等参数与放电强度密切相关。许多试验现象共同表明规则颗粒的小间距机制会对

微波放电前的电场强化产生较大的影响,但在研究时忽略了真实颗粒本身的不规则性,未考虑到实际应用中颗粒的极不规则形状对微波放电机理及电场强化效应造成的影响。另外,煤作为一种多孔、富矿的骨架结构,内部的孔隙结构、矿物组分等均会对电场产生影响,但目前的研究多为金属、生物炭、焦炭等单一物质的微波放电试验,对多种矿物组分颗粒的放电机理以及影响其放电强度的因素仍不清楚,而真实矿物颗粒间的电场强化机理是认识放电机理的必要前提。因此,本文通过数值模拟研究进一步阐释煤岩颗粒间电场强化效应的特性和机理,为厘清微波辐射下真实煤岩颗粒的放电机理奠定理论基础。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程和边界条件

本文的数值模拟通过 COMSOL Multiphysics 射频 (RF) 模块进行模型构建,微波频率设为 2.45 GHz,场强设为 1.00 V/m,计算域是边长为 14.68 cm(约为波长的 1.20 倍)的正方形,两颗粒放置在正方形的中心。在二维几何中模拟无限大空间里双颗粒间的电场强化现象需要引入电磁场接口,微波背景散射场波形采用高斯光束。为确保波通过域边界而不反射,将无穷远处的边界设为散射边界条件,散射波类型为二阶平面波,如图 1 所示。由于本文所用材料磁性很弱,模型中不考虑磁场的传播及损耗,所以介质假设为无磁性。

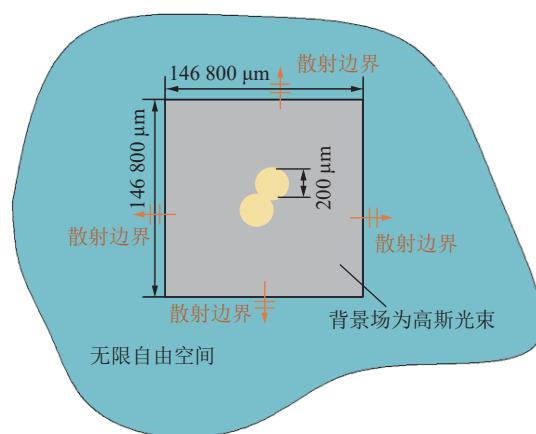


图1 模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the model

电磁场的计算采用频域麦克斯韦方程,背景场波形采用高斯光束,表达式如下<sup>[23]</sup>

$$\nabla \times u_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

式中:  $u_r$  为相对磁导率;  $\mathbf{E}$  为微波电场强度, V/m;  $k_0$  为



自由空间波数, rad/m;  $\epsilon_r$  为相对介电常数;  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m;  $\sigma$  为电导率, S/m;  $\omega$  为角频率, rad/s。

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} \quad (2)$$

式中:  $c_0$  为真空中光速, m/s。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

式中:  $\epsilon^*$  为复介电常数, F/m;  $\epsilon'$  为介电常数的实部, F/m;  $\epsilon''$  为介电常数的虚部, F/m。

微波电磁场计算中, 散射边界条件为二阶平面波, 表达式如下

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times (\mathbf{E} + \mathbf{E}_b)) - jk_0 \mathbf{n} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{n}) - \frac{1}{2jk_0} \nabla \times (\mathbf{n} \mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{E})) = 0 \quad (4)$$

式中:  $E_b$  为背景电场的电场强度, V/m;  $\mathbf{n}$  为单位法向量。

## 1.2 材料参数

本次数值模拟以煤基质、黄铁矿和方解石为研究对象, 材料参数见表 1。黄铁矿是煤岩中常见的杂质, 化学式为  $\text{FeS}_2$ , 其理论化学成分中 Fe 占 46.55%, S 占 53.45%, 在环境作用下的成矿过程中, 与其化学性质相似的 As、Se、Te、Co、N 等元素也可能分布其中<sup>[24]</sup>。为便于理论分析, 后文模拟中把黄铁矿颗粒简化为  $\text{FeS}_2$  颗粒。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料属性	相对介电常数	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
黄铁矿	25.66-6.83j	5 018
方解石	5.15-0.04j	2 680
煤基质	3.00-0.15j	1 400

相对复介电常数和相对复磁导率是吸波材料自身的电磁参数, 主要受材料自身的性质影响。其中相对复介电常数和相对复磁导率的实部, 用来表征吸波材料的极化和磁化的程度, 代表材料存储电能 (磁能) 的能力<sup>[25]</sup>。相对复介电常数和相对复磁导率的虚部, 表示消耗电能 (磁能) 的能力, 进一步代表吸波材料介电损耗和磁损耗的程度, 由传导、偶极、共振和弛豫机制产生的能量耗散能力决定<sup>[26]</sup>。其中介电常数是常量, 用于度量介质在外加电场作用下其电荷分布情况的极化程度, 一般定义为电通量密度与外加电场强度的比值。当介质中存在电偶极子, 且这些电偶极子按一定方向分布时, 表明介质已经在外加电场的作用下发生了极化。介电常数的大小取决于电介质在外加

电场下的极化能力<sup>[27]</sup>, 极化能力越强, 介电常数越大。当没有外加电场时, 介质中的电荷分布会恢复到未极化的初始状态, 这个过程被称为松弛过程。黄铁矿介电常数大, 其极化和储存电能的能力较强; 而煤基质和方解石介电常数较黄铁矿小, 其极化能力微弱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 散射特性

本次数值模拟对比分析了同一条件下黄铁矿颗粒 (粒径 400  $\mu\text{m}$ 、间距 10  $\mu\text{m}$ ) 分别在  $x$  传播  $z$  极化、 $y$  传播  $z$  极化、 $y$  传播  $x$  极化、 $x$  传播  $y$  极化方向的散射特性 (图 2), 模拟结果得出黄铁矿颗粒在 4 种传播情况下颗粒间电场强度最大值分别为 1.01、1.01、0.04、7.37 V/m, 显然在微波在  $x$  传播  $y$  极化下的电场强度最大。本文后续研究主要分析煤岩颗粒在  $x$  传播  $y$  极化下的电场强化特性。

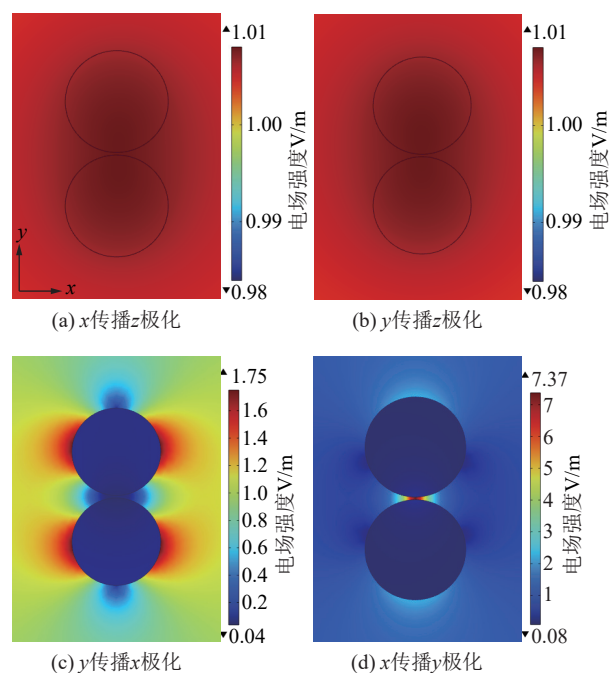


图 2 高斯光束传播特性

Fig. 2 Propagation characteristics of Gaussian beam

图 3 分别为黄铁矿-黄铁矿组合、方解石-方解石组合、煤-煤、黄铁矿-方解石、黄铁矿-煤、方解石-煤组合在  $x$  传播  $y$  极化下的电场分布, 仿真计算得出 6 种组合颗粒间最大电场强度分别为 7.37、3.85、2.63、5.16、4.04、3.15 V/m。6 种组合中, 双黄铁矿颗粒间的电场强度最大, 与煤、方解石组合后会降低颗粒间电场强化效果, 这是由于材料介电常数的影响。当颗粒周围存在电磁场时, 会在电场的作用下发生极化现象, 导致颗粒中出现电偶极矩, 进而引起电场的变化。因此, 颗粒的介电常数会随着外加电场的极化程度变

化而发生变化。黄铁矿较煤基质和方解石,其介电常数更大,对电场的响应能力更强,更容易产生极化现象,从而使颗粒间接触区电场强度更大,电场集聚效果更明显。所以微波辐射下的黄铁矿-黄铁矿组合颗粒间的最大电场强度显然高于另外 5 种组合。

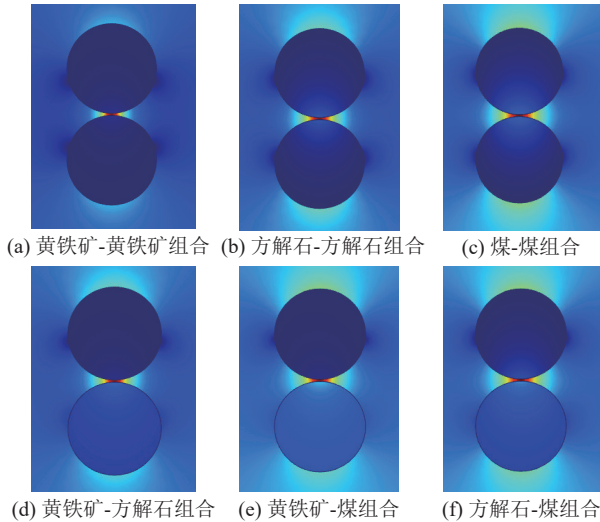


图 3 不同颗粒组合在  $x$  传播  $y$  极化下的微波电场分布

Fig.3 Distribution of microwave electric field under  $x$  propagation and  $y$  polarization of different particle combinations

## 2.2 粒径及间距对电场强化效应的影响

为探究矿石颗粒的粒径及间距对电场强化效应的影响,选取 6 组形状为圆形的煤岩颗粒组合(黄铁矿-黄铁矿、方解石-方解石、煤-煤、黄铁矿-方解石、黄铁矿-煤、方解石-煤)进行研究,基本参数见表 2。

表 2 煤岩的基本参数

Table 2 Basic parameters of coal and rock

组别	名称	粒径/ $\mu\text{m}$	间距/ $\mu\text{m}$
1	黄-黄、黄-方、黄-煤、 方-方、方-煤、煤-煤	400	0~10
2		800	0~10
3		1 200	0~10
4		1 600	0~10
5		2000	0~10
6		2 400	0~10

双颗粒处于微波背景散射场为高斯光束( $x$  传播  $y$  极化)的辐射下,颗粒间连接处为两颗粒间电磁波可传播的最大范围,如图 4a 所示的黄色区域。其中角  $\beta$  是入射角,角  $\beta'$  是反射角,反射波与法线的夹角与入射角相同,  $R$  为两颗粒的半径,  $O$  与  $O'$  为两圆的圆心。

微波背景散射场波形为高斯光束  $x$  传播  $y$  极化,其能够像光线一样近似直线传播。入射到颗粒的电磁波与表面相互作用后会形成两束平面波<sup>[28]</sup>: 反射波、

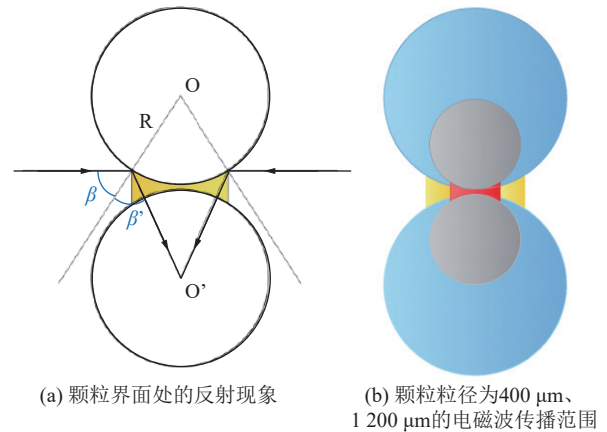


图 4 颗粒间电场强度

Fig.4 Schematic diagram of the enhanced electric field between particles

折射波或透射波;一束波为表面向上的反射波,其与法线夹角和入射角相等,但方向相反;另一束为表面向下的折射波或透射波。当入射波到达颗粒壁面时,会发生多种反射和传输现象。首先,部分电磁波会发生表面反射,即以相同角度和频率反射回空气介质,因此照射到颗粒表面的电磁波部分会被反射回去。除了形成一部分反射波,另一部分电磁波会进入颗粒内部产生折射波,并在内部经历多次反射和吸收,这些波在材料内部的传播路径上会发生衰减和损耗,部分能量被转化为热能或其他形式的能量。根据电磁波吸收理论,发生折射或透射的波将入射到材料内部,并经历一定程度的能量损耗,这种损耗的强度与颗粒的介电常数虚部密切相关。颗粒的介电常数虚部越高,表明对入射到颗粒内部的电磁波电能分支的损耗能力越强,进而电磁波能量在材料内部的衰减耗散就越彻底<sup>[29]</sup>。经过颗粒内部衰减耗散后的折射波或透射波穿出颗粒,这时折射波或透射波与入射波在颗粒表面产生交叠,导致颗粒表面的电场强度增强。然而,随着颗粒粒径的增加,颗粒间电磁波可传播的范围逐渐扩大,如图 4b 所示。红色区域表示粒径均为  $400\ \mu\text{m}$  的双颗粒间电磁波可传播的最大范围,黄色区域则表示在不同煤岩粒径下,颗粒间电磁波可传播范围的差值,可明显观察到随双颗粒粒径的增大,可入射到颗粒间的电磁波范围逐渐增加。因此,颗粒间距同为  $5\ \mu\text{m}$  时,随着颗粒粒径的增加,间隙处的电场强度最大值逐渐增加,如图 5a 所示。黄铁矿-黄铁矿颗粒组合与煤基质-煤基质颗粒组合、方解石-方解石颗粒组合相比,黄铁矿-黄铁矿颗粒组合粒径的变化对颗粒间电场强度的影响更明显,这是由于表面散射的强度随介质表面的复介电常数的增加而增加<sup>[28]</sup>,黄铁矿的复介电常数远高于煤基质和方解石,所以黄铁矿的散

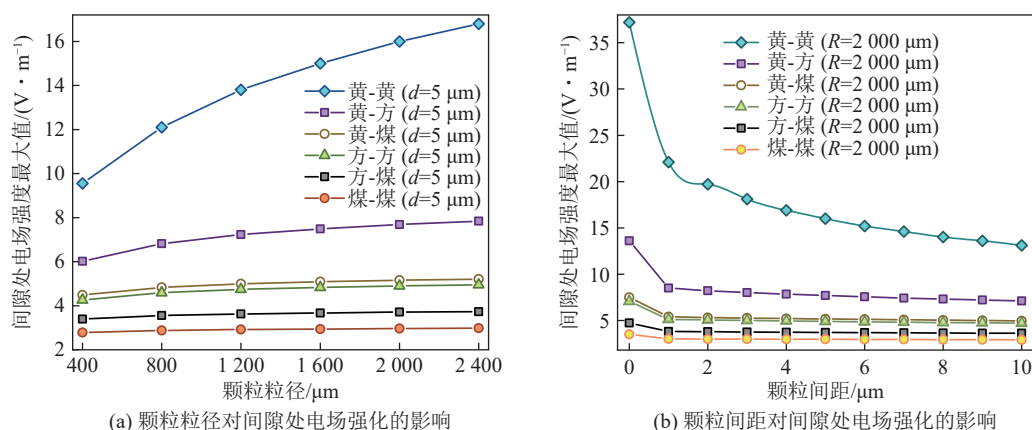


图 5 规则颗粒间的电场强化效果

Fig.5 The effect of regular electric field strengthening between particles

射强度远高于煤基质和方解石,进而反射波或透射波的能量也远高于其他组合。

另一方面,在双颗粒粒径同为 2 000  $\mu m$  的条件下,随着颗粒间距的增加,颗粒间电场强度最大值呈下降趋势,如图 5b 所示。这是由于电磁波同时射入粒径大小相同的两颗粒,随着颗粒间距的增加,波的可传播范围变大,间隙处射入的电磁波越来越不集中,电磁波在颗粒间的聚集效果变差,从而导致颗粒间隙处电场强化效应逐渐衰减。同条件下,黄铁矿-黄铁矿间距的改变对颗粒间电场强化的影响更显著。颗粒在外电场作用下会发生极化现象,导致颗粒表面聚集电荷,黄铁矿较方解石与煤基质来说,介电常数更大,从而对电场的响应能力更强,更容易产生极化现象,同一微波条件下改变黄铁矿颗粒的粒径和间距对电场强度的影响更明显。

此外, HORIKOSHI<sup>[30]</sup>等使用 COMSOL Multiphysics 软件的 RF 模块,在模拟活性炭颗粒在微波频率为 2.45 GHz 下电场强度的分布时,将甲苯中的双活性炭颗粒(直径为 0.65 mm)间的距离分别设置为 0、0.10、0.01、0.001 mm;结果表明,在间距为 0 mm 时,最大电场分布在颗粒两端,超过此值后衰减,两颗粒间的电场强度仅为 813 V/m;而当活性炭颗粒之间的距离为 0.001 mm 时,电场则完全集中在双活性炭的间隙处,最大电场强度达到 11 838 V/m;双颗粒间距仅变化 0.001 mm,电场强度增大了 14.60 倍;但这种“小间距”机制只适用于各类碳材料(如活性炭、焦炭、石墨等)。对于煤岩颗粒组合,当颗粒粒径一定时,随颗粒间距增加,颗粒间电场强度最大值呈下降趋势,双颗粒间电场强化的最大值始终出现在颗粒间距为 0 时,而不是“小间距”。

### 2.3 夹角对电场强化效应的影响

本文对比分析了夹角( $0^\circ \sim 90^\circ$ )对黄铁矿-黄铁

矿组合颗粒(粒径 1 200  $\mu m$ 、间距 10  $\mu m$ )电场强化效应的影响。将两颗粒间对称线的法线 $n_0$ 与 $y$ 轴正方向间的夹角定义为角度 $\theta_0$ (图 6a),得到电场随 $\theta_0$ 变化关系图(图 6b)。

由图 6b 可以看出,颗粒间电场强度最大值出现在夹角  $0^\circ$  时(13.20 V/m),随着夹角的逐渐增大,颗粒间电场强度的最大值逐渐减小,在夹角  $90^\circ$  时达到最小值(0.03 V/m)。定义两颗粒间最小间距在 $y$ 方向上的投影距离为 $l(l = \cos \theta_0)$ ,如图 6a 所示。在颗粒间隙一定的情况下,随着两颗粒间的夹角减小, $l$ 也逐渐减小, $l$ 值越小代表水平方向可以入射到间隙处的电磁波越少,反射效果越不明显,电场强化效应越弱。夹角从  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$ , $l$ 从最大值变为 0,夹角为  $90^\circ$  时颗粒间已没有电磁波可以入射进去,所以电场强度降为最低。但此时颗粒间的电场强度不是零场强,主要原因是颗粒表面入射的电磁波一部分会折射或透射到颗粒内部并经历一定程度的能量损耗,以微弱的能量折射或透射出来,折射或透射出的电磁波有一部分聚集到颗粒间,导致夹角旋转到  $90^\circ$  时颗粒间仍存有微弱电场。

考虑到实际矿物颗粒的不规则性,以 CHARIKINYA 等<sup>[31]</sup>在研究中获得真实矿石颗粒形状为参考,选取其中一种颗粒形状,探究不规则颗粒间夹角的变化对电场强化效应的影响。为方便观察到颗粒间隙处的电场强度变化,从完整的颗粒电场图中截取颗粒间隙的局部电场图(图 7)。为方便讨论,设定不规则颗粒面积与圆形颗粒面积相同。通过图 8 可以看出,不规则黄铁矿颗粒间的电场强度最大值随颗粒夹角的增大而减小,这与图 6b 中规则颗粒间的电场强度与夹角的变化关系是一致的。当夹角为  $0^\circ$  时,规则黄铁矿颗粒间电场强度最大值为 13.20 V/m,不规则黄铁矿颗粒间电场强度最大值为 48.50 V/m;同为双黄



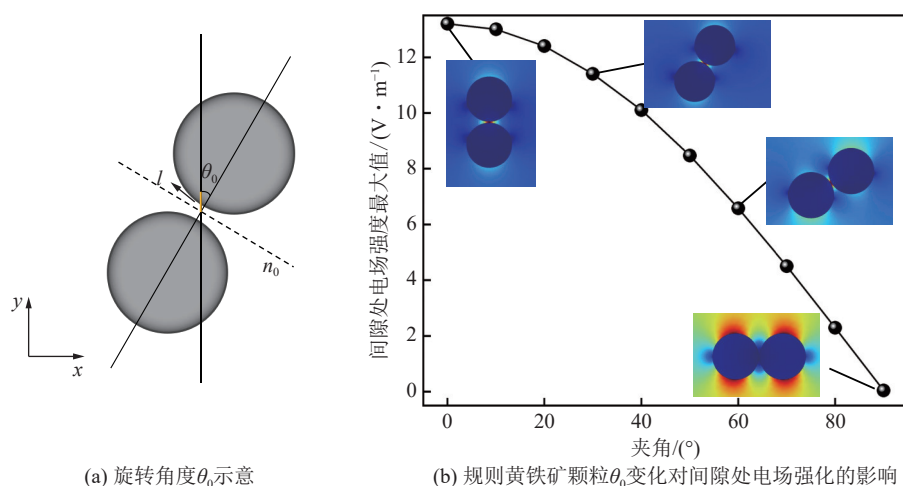


图6 夹角对电场强化的影响

Fig.6 Effect of included Angle on electric field strengthening

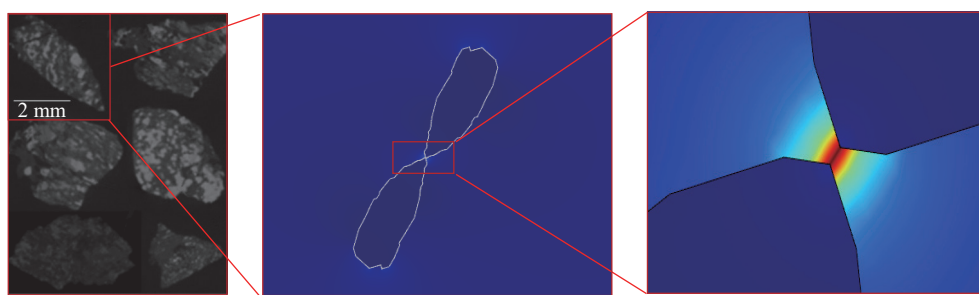


图7 真实矿石颗粒间电场强度示意 (夹角 30°)

Fig.7 Schematic diagram of electric field strength between real ore particles (Angle 30 degrees)

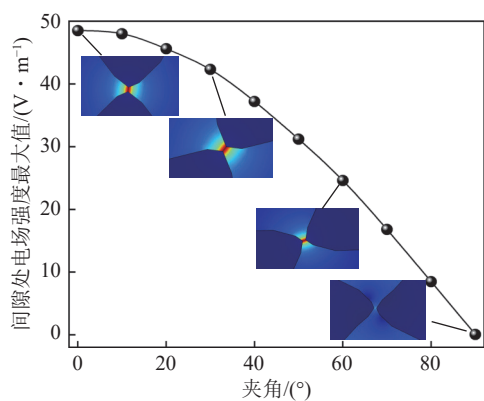


图8 真实黄铁矿颗粒夹角对电场强化的影响

Fig.8 Effect of real pyrite particle Angle on electric field strengthening

铁矿颗粒组合,不规则颗粒间电场强度的最大值远高出规则颗粒 2.67 倍。经对比分析得出,颗粒尖锐的边缘和不规则区域会更容易产生强电场,颗粒的形状机制对颗粒间电场强化效果十分明显。微波诱导煤岩颗粒放电的前提是颗粒间的电场强化效应,由于颗粒表面的不规则性,颗粒的表面电荷在外加电场的作用下更易从颗粒的凸起位置或尖锐边缘逃逸,致使充斥在颗粒尖锐边缘或尖端的气体介质被击穿,进而产生

煤岩颗粒间放电现象。

#### 2.4 形状对电场强化效应的影响

由颗粒间夹角对电场强化的影响规律可见,不规则黄铁矿颗粒间的电场强度最大值比圆形颗粒高出近 3 倍,说明颗粒形状对颗粒间电场强化效应影响显著。因此,为进一步探明颗粒形状对电场强化效果的影响,选取正三角形、正四边形、正五边形、正六边形和圆 5 种不同形状的黄铁矿颗粒开展数值模拟研究,其中黄铁矿颗粒间隙均为  $10\text{ }\mu\text{m}$ ,且两颗粒夹角均为  $0^\circ$ 。为了量化研究形状对电场强化的影响,本文引入无量纲数值圆度系数  $A$ ,公式如下

$$A = 2 \frac{C_{\text{re}}}{C_{\text{ci}}} \quad (5)$$

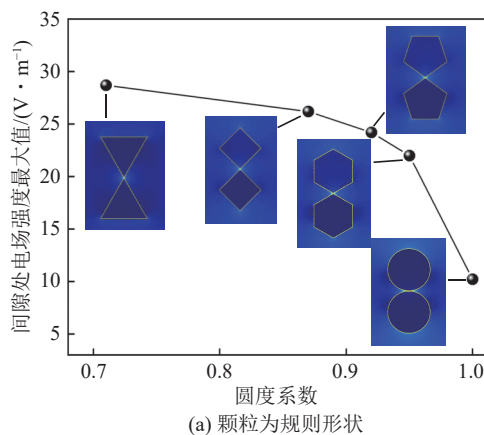
式中: $A$  为定义的圆度系数; $C_{\text{re}}$  为不同形状下生物炭的周长,  $\text{m}$ ;  $C_{\text{ci}}$  为与各形状同面积下圆形生物炭的周长,  $\text{m}$ 。

计算使用的 5 种颗粒面积均为  $7 \times 10^5\text{ }\mu\text{m}^2$ ,从正三角形到圆形的边长依次为 2040、1789、1706、1671、1585  $\mu\text{m}$ ,通过上式计算得出圆度系数分别为 0.71、0.87、0.92、0.95、1.00。

颗粒形状对电场强度分布情况的影响如图 9a 所

示。从图中可以看出,随着颗粒圆度系数的增大,颗粒间隙的电场强度最大值逐渐减小。规则形状对电场强化效应影响的最大值出现在圆度系数为 0.71,形状为正三角形附近,也就是颗粒尖端角度约为  $60^\circ$  时。圆度系数越大形状越接近圆形,表面越光滑,颗粒间电场越难集中;反之,圆度系数越小,颗粒形状表面越尖锐,颗粒间电场集中越容易。

考虑到实际的矿物颗粒通常并不是理想化规则



形状,因此进一步模拟了真实形状的黄铁矿颗粒对电场强化的影响。使用 3 种不规则黄铁矿颗粒 (间距  $10\text{ }\mu\text{m}$ 、面积同为  $7\times 10^5\text{ }\mu\text{m}^2$ ), 3 种形状的边长依次为  $4\,015$ 、 $3\,762$ 、 $3\,446\text{ }\mu\text{m}$ , 通过上式计算得出圆度系数分别为  $0.65$ 、 $0.73$ 、 $0.84$ , 所有颗粒形状对电场强度分布情况的影响如图 9b 所示。可以发现,不规则矿石颗粒的电场强度与圆度系数并无关系,圆度系数值只能表征颗粒为规则形状的场强变化规律。

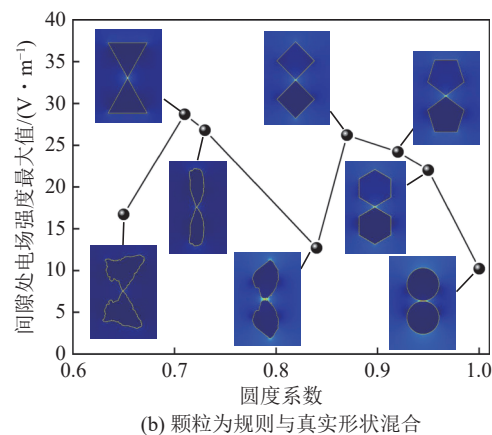


图 9 黄铁矿颗粒的圆度系数对电场强化的影响

Fig.9 Effect of roundness coefficient of pyrite particles on electric field strengthening

引入分形维数 ( $D$ ) 来表征矿石颗粒形状的不规则度 (表 3)。分形维数可以反映了复杂形体占有空间的有效性,是复杂形体不规则性的量度, $D$  值越大,形状越复杂<sup>[32]</sup>。计盒法测量误差较小且是目前计算分形维数时应用最为广泛的方法之一,其计算的分形维数也被称为计盒维数,所以选用计盒法来测量各种不规则形状下黄铁矿的分形维数。将面积、夹角和间距都相等的 6 种不同形状的真实黄铁矿的分形图形放置在均匀分割的网格上,通过逐步精化网格并计算所需覆盖数目的变化来计算计盒维数。该方法的第一步是对图像进行灰度化处理,选取适当的阈值对图像进行二值化运算,即可得到二值化后的图像。将预处理后的图像划分成盒子边长为  $r$  的若干个盒子 ( $r=2i$ ,

$i=1, 2, 3, \dots; 2i < d$ ,  $d$  是图像长度和宽度的最小值)。计算不同  $r$  时图像中包含分形图像块的盒子数目,记作  $N(r)$ ,从而得到多组数据对  $(r, N(r))$ 。将数据通过双对数坐标系下的曲线拟合,用线性回归法求得其斜率,即为计盒维的数值。

如图 10a, 随机选取面积、夹角和间距都相等的 6 种不同形状真实黄铁矿颗粒,计算其分形维数值。由图 10b 观察到,分形维数与颗粒间隙处的电场强化效果几乎没有关系。在分形维数为 1.76 时,电场强度达到最大值,颗粒形状类似针状,其现象可由尖端放电原理阐述。尖端放电是一种在强电场作用下,物体表面尖锐部分发生的放电现象,属于电晕放电的一种<sup>[33]</sup>。尖端放电的原理基于电场强度和电势梯度的关系,电极表面的尖锐程度会影响电势梯度的大小;尖锐的电极表面会形成较高的电场强度和较大的电荷密度,从而使尖锐的电极表面会产生更大的电势梯度,电场强度是电势梯度的一种表现形式,电势梯度越大,电场强度越大,电子越容易从电极上脱离,从而产生放电<sup>[34]</sup>。由此可见,真实矿石颗粒的形状对电场强化的影响因素与颗粒尖端的尖锐程度有关。

与计算分形维数相同,选取面积、夹角和间距都相等的 6 种不同形状 (图 10a) 的真实黄铁矿颗粒,计算其尖端曲率的大小 (表 4)。在计算平面折线的曲率

表 3 不规则黄铁矿颗粒的分形维数及电场强度

Table 3 Fractal dimension and electric field intensity of irregular pyrite particles

形状	分形维数	颗粒间电场强度最大值/( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ )
形状1	$y = 1.76x + 8.03$	51.30
形状2	$y = 1.79x + 8.06$	42.40
形状3	$y = 1.68x + 7.93$	28.90
形状4	$y = 1.80x + 8.08$	38.90
形状5	$y = 1.77x + 8.02$	34.60
形状6	$y = 1.69x + 7.94$	24.80



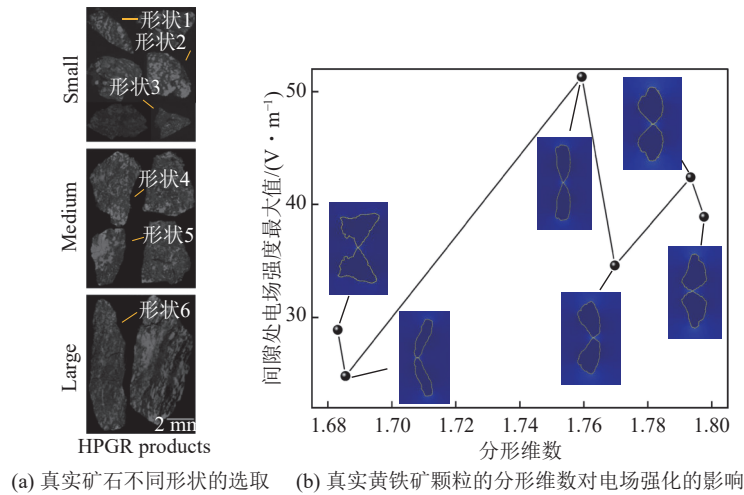


图 10 黄铁矿颗粒的分形维数对电场强化的影响

Fig.10 Influence of fractal dimension of pyrite particles on electric field reinforcement

与平面曲线曲率时方法稍有不同, 曲线曲率是针对曲线上某个点的切线方向角对弧长的转动率, 通过微分来定义, 表明曲线偏离直线的程度; 而平面上折线顶点处的曲率为顶点的法向偏转角除以顶点的 2 条边长度的一半之和。

表 4 真实黄铁矿颗粒尖端的曲率及电场强度  
Table 4 Curvature and electric field strength of real pyrite particle tip

形状	尖端曲率	颗粒间电场强度最大值/(V · m <sup>-1</sup> )
形状1	9.04	70.50
形状2	0.81	45.30
形状3	4.82	63.90
形状4	1.34	45.50
形状5	2.46	57.10
形状6	2.54	57.70

$$K_i = \frac{a_i}{l_{i1} + l_{i2}} \quad (6)$$

式中:  $K_i$  为颗粒尖端处的曲率;  $a_i$  为尖端顶点处的法向偏转角, (°);  $l_{i1}$  为顶点左边长度的一半, m;  $l_{i2}$  为顶点右边长度的一半, m。

如图 11 所示, 随着黄铁矿颗粒尖端曲率的增大, 颗粒间电场强度逐渐增加。由于尖端和弯曲较大的部分会聚集更多的电荷, 而平滑的部分聚集较少的电荷, 所以颗粒表面的曲率会直接影响电荷的分布。曲率越大的部位, 其表面电荷密度越大, 该部位的电场强度就越大。综上所述, 真实矿石颗粒的形状对电场强化的影响因素与圆度系数和分形维数并无关系, 而是与颗粒尖端的曲率大小直接相关。

## 2.5 石墨化程度对电场强化效应的影响

煤作为一种特殊的碳质材料, 除了上述所提到的

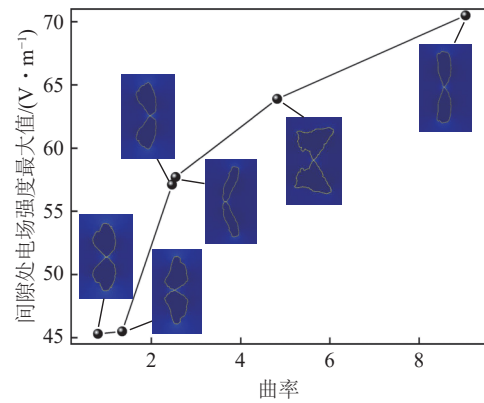


图 11 真实黄铁矿颗粒尖端的曲率对电场强化的影响

Fig.11 Effect of curvature of real pyrite particle tip on electric field strengthening

颗粒间夹角、粒径、间隙、尖端角度会对电场强化效应造成影响, 碳质材料的石墨化程度也是不可忽略的影响因素。选取 5 种碳质材料, 分别命名为 SB、SB<sub>1</sub>、SB<sub>2</sub>、SB<sub>3</sub>、SG, 石墨化程度依次增加, 材料的介电特性源自 LI 等<sup>[17]</sup>在研究中使用的数据 (表 5)。在探究石墨化程度对电场强化的影响时选用图 10a 中的形状 4、间距为 10 μm 且两颗粒间对称线的法线  $n_0$  与 y 轴正方向间的夹角为 0°进行模拟。如图 12 所示, 随着石墨化程度的增加, 颗粒间电场强度的最大值也随之增大。原因是碳质材料的局部区域存在与石墨具有相似平面结构的芳香碳网络, 它能够通过  $\pi$  键提供大量自由电子, 也有利于自由电子的运动<sup>[35]</sup>。随着石墨化程度的增加, 颗粒间电场强度的最大值也逐渐增大。其原因是石墨由大量具有规则层状结构的六边形组成, 具有优越的层结构和优异的热稳定性<sup>[36]</sup>。石墨化程度的提高会使电导率的增加远大于磁导率的降低, 从而降低颗粒的趋肤深度, 增强其趋肤效应。另外,

表 5 材料属性  
Table 5 Material property

石墨化程度/%	电导率/(S · m <sup>-1</sup> )	相对介电常数	相对磁导率	电场强度最大值/(V · m <sup>-1</sup> )
0(SB)	3.12	11.03	1.13	46.30
25(SB <sub>1</sub> )	4.58	15.81	1.10	50.40
50(SB <sub>2</sub> )	7.88	16.59	1.09	55.40
75(SB <sub>3</sub> )	25.22	21.75	1.09	58.70
100(SG)	1 787.30	34.11	1.04	59.20

随着石墨化程度的提高,还增加了碳基颗粒的电容和介电常数,使碳基颗粒在激发电场的作用下产生更强的电偶极矩,从而使颗粒表面的束缚电荷更加丰富<sup>[17]</sup>。因此,石墨化程度能够影响颗粒间的电场强化效应。

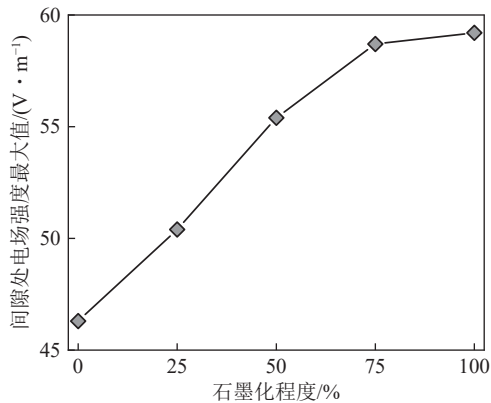


图 12 碳质材料石墨化程度对电场强化的影响  
Fig.12 Effect of graphitization degree of carbonaceous materials on electric field strengthening

3 结 论

- 1) 对比同一条件下双圆形黄铁矿颗粒分别在  $x$  传播  $y$  极化、 $x$  传播  $z$  极化、 $y$  传播  $z$  极化、 $y$  传播  $x$  极化方向的散射特性,颗粒在 4 种传播情况下的电场强度分别为 7.37、1.01、1.01、0.04 V/m,颗粒间电场强度在微波散射  $x$  传播  $y$  极化下达到最大值。同在  $x$  传播  $y$  极化条件下,由于材料介电常数的影响,黄铁矿-黄铁矿组合颗粒间的最大电场强度显然高于煤-煤、煤-黄铁矿、煤-方解石、方解石-黄铁矿、方解石-方解石组合。
- 2) 随着圆形颗粒粒径的增加,间隙处的电场强度最大值逐渐增加;随着圆形颗粒间距的增加,颗粒间电场强度最大值呈下降趋势;由于介电常数大的颗粒对电场的响应能力更强,更容易产生极化现象,同一条件下改变黄铁矿-黄铁矿组合的粒径和间距对颗粒间电场强度的变化更显著。
- 3) 圆形颗粒间电场强度最大值出现在夹角 0°时,

随夹角的逐渐增大,颗粒间电场强度的最大值逐渐减小,在夹角 90°时达到最小值,该规律同样适用于不规则颗粒。

- 4) 对于规则形状(正多边形、圆)的颗粒,随着颗粒圆度系数的增大,各形状尖端处的电场强度最大值逐渐减小。规则形状对电场强化效应影响的最大值出现在颗粒尖端的角度约为 60°、圆度系数为 0.71 的正三角形时。而对于真实不规则矿石颗粒,其电场强化效果与圆度系数、分形维数并无关系,但与颗粒尖端的曲率大小直接相关。随曲率的增加,颗粒间电场强化效应逐渐增大。
- 5) 碳质材料的石墨化程度会对电场强化效应产生较大的影响,随着石墨化程度的增加,颗粒间电场强度的最大值也随之增大。
- 6) 多组分颗粒中不同矿物的含量和分布状态对颗粒间电场强化及放电的影响在本文并未考虑,后续会进一步深入考虑和分析。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2022 年我国能源生产和消费相关数据[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202303/t20230302\\_1350587.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202303/t20230302_1350587.html), 2023-03-02.

[2] 袁晓芳, 朱明杰, 孙林辉. 基于 csQCA 的煤矿瓦斯爆炸事故影响因素及路径研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(10): 237-242.  
YUAN Xiaofang, ZHU Mingjie, SUN Linhui. Research on influencing factors and paths of gas explosion accidents in coal mines based on csQCA method[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(10): 237-242.

[3] 程磊, 孙洁. 2016—2022 年我国煤矿事故统计与规律分析[J]. 煤炭工程, 2023, 55(11): 125-129.  
CHENG Lei, SUN Jie. Statistics and law analysis of coal mine accidents in China from 2016 to 2022[J]. Coal Engineering, 2023, 55(11): 125-129.

[4] RANATHUNGA A S, PERERA M A, RANJITH P G. Deep coal seams as a greener energy source: A review[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2014, 11(6): 063001.

[5] LI H, LIN B Q, YANG W, et al. A fully coupled electromagnetic-thermal-mechanical model for coalbed methane extraction with microwave heating[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,

- 2017, 46: 830–844.
- [6] ZHANG X L, LIN B Q, ZHU C J, et al. Improvement of the electrical disintegration of coal sample with different concentrations of NaCl solution[J]. *Fuel*, 2018, 222: 695–704.
- [7] 林柏泉, 闫发志, 朱传杰, 等. 基于空气环境下的高压击穿电热致裂煤体实验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 94–99.
- LIN Baiquan, YAN Fazhi, ZHU Chuanjie, et al. Experimental study on crushing coal by electric and heat in the process of highvoltage breakdown in the air condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 94–99.
- [8] ZHANG X L, LIN B Q, SHEN J. Experimental research on the effect of plasma on the pore-fracture structures and adsorption-desorption of coal body[J]. *Fuel*, 2022, 307: 121809.
- [9] 林柏泉, 张祥良. 低透难抽煤层等离子体致裂增透机制及研究进展[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(6): 1041–1057.
- LIN Baiquan, ZHANG Xiangliang. Mechanism and research progress of plasma induced cracking and enhancement in low permeability and hard to extract coal seams[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(6): 1041–1057.
- [10] 林柏泉, 张祥良, 李彦君, 等. 等离子体对煤体选择性破碎的实验与数值模拟分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3472–3479.
- LIN (Bai Bo)(Quan), ZHANG Xiangliang, LI Yanjun, et al. Experiment and simulation of selective cracking of coal samples by plasma[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3472–3479.
- [11] 邵晶, 刘海玉, 乔晓磊, 等. 不同空速下微波放电对活性炭同时脱硫脱硝的影响[J]. *动力工程学报*, 2020, 40(12): 1014–1018.
- SHAO Jing, LIU Haiyu, QIAO Xiaolei, et al. Effect of Microwave Discharge on Simultaneous Desulfurization and Denitrification of Activated Coke at Different Space Velocities[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2020, 40(12): 1014–1018.
- [12] 樊向黎, 刘海玉, 乔晓磊, 等. 空速对微波诱导活性炭放电脱硫的影响[J]. *炭素技术*, 2020, 39(1): 60–63.
- FAN Xiangli, LIU Haiyu, QIAO Xiaolei, et al. Effect of airspeed on microwave-induced activated carbon discharge desulfurization[J]. *Carbon Techniques*, 2020, 39(1): 60–63.
- [13] 刘强. 金属基颗粒与微波放电等离子体协同特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 13–15.
- LIU Qiang. Study on synergistic characteristics of metal-based particles and microwave discharge plasma[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 13–15.
- [14] CAI D Q, TAN Y D, ZHANG L J, et al. Dynamic characteristics and energy analysis of Microwave-induced metal discharge[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 100: 277–284.
- [15] KHATTAK H K, BIANUCCI P, SLEPKOV A D. Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(10): 4000–4005.
- [16] MENÉNDEZ J A, JUÁREZ-PÉREZ E J, RUISÁNCHEZ E, et al. Ball lightning plasma and plasma arc formation during the microwave heating of carbons[J]. *Carbon*, 2011, 49(1): 346–349.
- [17] LI L Z, ZHANG Y, CAI D Q, et al. Characteristics and mechanism of microwave-induced discharge of spherical bio-char with graphite addition[J]. *Fuel*, 2023, 331: 125771.
- [18] QIAO X C, XIE X Y. The effect of electric field intensification at interparticle contacts in microwave sintering[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32163.
- [19] LIU M J, ZHANG L, ZHOU W, et al. The mechanism of microwave-induced discharge between submillimeter active coke[J]. *Plasma Sources Science Technology*, 2020, 29(7): 075015.
- [20] DAWSON E A, PARKES G M B, BARNES P A, et al. The generation of microwave-induced plasma in granular active carbons under fluidised bed conditions[J]. *Carbon*, 2008, 46(2): 220–228.
- [21] 徐云鹏, 田志坚, 徐竹生, 等. 活性炭引发的常压连续微波放电下甲烷转化制 C<sub>2</sub> 烃[J]. *石油与天然气化工*, 2002, 31(1): 15–17, 2.
- XU Yunpeng, TIAN Zhijian, XU Zhusheng, et al. Conversion of methane to C<sub>2</sub> hydrocarbons via active carbon induced continuous microwave discharge under atmospheric pressure[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2002, 31(1): 15–17, 2.
- [22] WANG W L, WANG B, SUN J, et al. Numerical simulation of hot-spot effects in microwave heating due to the existence of strong microwave-absorbing media[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(58): 52974–52981.
- [23] HONG Y D, LIN B Q, LI H, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 1145–1154.
- [24] 吴昊, 祝向平, 贾强, 等. 西藏巴达铜金矿床黄铁矿原位主微量元素特征及其环境效应[J]. *地质学报*, 2023, 97(7): 2261–2280.
- WU Hao, ZHU Xiangping, JIA Qiang, et al. Characteristics and environmental effects of *in situ* major and trace elements in pyrite from the Bada copper-gold deposit in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(7): 2261–2280.
- [25] PICKLES C A. Microwave heating behaviour of nickeliferous limonitic laterite ores[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(6): 775–784.
- [26] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 92–100.
- [27] 王秀丽. 典型地物介电常数测量方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 7–9.
- WANG Xiuli. Study on measurement method of dielectric constant of typical ground objects[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011: 7–9.
- [28] 贾明权. 典型地物微波介电特性实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 9–11.
- JIA Mingquan. Experimental study on microwave dielectric characteristics of typical ground objects[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 9–11.
- [29] 刘大伟. 分级结构镍、碳及其复合材料的制备与电磁波吸收性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 1–8.
- LIU Dawei. Preparation and electromagnetic wave absorption properties of hierarchical nickel, carbon and their composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 1–8.
- [30] HORIKOSHI S, OSAWA A, SAKAMOTO S, et al. Control of mi-



- crowave-generated hot spots. Part V. Mechanisms of hot-spot generation and aggregation of catalyst in a microwave-assisted reaction in toluene catalyzed by Pd-loaded AC particulates[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2013, 460: 52–60.
- [31] CHARIKINYA E, BRADSHAW S, BECKER M. Characterising and quantifying microwave induced damage in coarse sphalerite ore particles[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 82: 14–24.
- [32] 张涛, 孙林, 黄爱民. 图像分形维数的差分盒方法的改进研究[J]. *电光与控制*, 2007, 14(5): 55–57.  
ZHANG Tao, SUN Lin, HUANG Aimin. Research on improvement of DBC algorithm for image's fractal dimension calculation[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(5): 55–57.
- [33] 张家源. 典型局部放电过程流体动力学仿真与放电脉冲特性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020: 8–10.  
ZHANG Jiayuan. Hydrodynamic simulation of typical partial discharge process and analysis of discharge pulse characteristics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020: 8–10.
- [34] 孙兴, 孙志, 赵大帅, 等. 亚毫米间隙负直流电晕放电 Trichel 脉冲特性[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(7): 59–66.  
SUN Xing, SUN Zhi, ZHAO Dashuai, et al. Trichel pulse characteristics of negative DC corona discharge in submillimeter gap[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(7): 59–66.
- [35] ZHANG F S, ZHANG X R, SONG Z L, et al. Fe/HZSM-5 synergizes with biomass pyrolysis carbon to reform  $\text{CH}_4\text{--CO}_2$  to syngas in microwave field[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(21): 11153–11163.
- [36] WU S, LI T X, TONG Z, et al. High-performance thermally conductive phase change composites by large-size oriented graphite sheets for scalable thermal energy harvesting[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(49): e1905099.