

等离子体的产生及其在矿物浮选中的应用

张怀瑶, 田付强, 李亚超, 郝海青, 范桂侠

郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450000

中图分类号: TD923 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0060-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.009

摘要 等离子体作为一种绿色环保的表面改性技术, 因其操作简单、反应速度快、能耗低、工艺干法化等优良性能而备受人们关注。综述了等离子体的产生方式及其在矿物浮选领域中的应用, 阐述了其在浮选中对矿物表面改性和药剂改性的作用机理, 并展望了等离子体在矿物加工领域中的应用前景, 以期等离子体技术在矿产资源高效利用领域的推广应用提供参考。

关键词 等离子体; 浮选; 脱泥; 产生; 应用

引言

我国矿产资源丰富, 但随着开采力度的不断加大, 矿产资源呈现出“贫、细、杂”等特点^[1], 导致矿产资源的利用率较低。浮选是实现矿物高效分选行之有效的方法之一^[2-3], 其主要通过浮选药剂使矿物表面性质发生改变而实现提质除杂的目标^[4]。而常规的浮选药剂存在用量大、分选效果差和环境污染问题, 无法满足工业生产的需要, 因此, 开发绿色环保、高效的表面改性技术, 对矿物加工领域绿色、可持续发展具有重要意义。

等离子体状态为物质除固、液、气三种状态之外的第四种状态^[5]。气体在外力的作用下发生电离, 产生数量相等、电荷相反的电子和正离子以及游离基, 电子、离子和游离基之间又可复合成原子和分子。由于就总体而言是电中性的, 故称之为等离子体。等离子体主要包含六种典型的粒子: 电子、正离子、负离子、受激原子或分子、基态原子或分子和光子, 因其具有绿色环保、操作简单、反应速度快、工艺干法化等优良特性, 被广泛应用于材料表面改性^[6,7]、矿物表面改性^[8-10]、材料清洁^[11,12]等领域中。等离子体所产生的高能粒子破坏材料、矿物表面的化学键键合结构, 从而使极性官能团自由基与材料、矿物表面的化学键重新键合, 在其表面形成新的羟基、羧基、羰基等极性基团, 以实现表面改性的目的。近年来, 广大选矿工作者将等离子体表面改性技术应用于硫化矿物、煤

泥分选中^[10,13], 实现目的矿物与脉石矿物高效分选, 提高矿产资源综合利用率, 同时具有绿色环保、效率高等优势, 应用前景看好。本文详细综述了等离子体的放电模式及其在矿物浮选领域中的应用, 并对其在矿物加工的领域应用进行展望, 以期等离子体表面改性技术的应用提供理论指导。

1 等离子体产生方式及特点

不同发生装置产生等离子体的原理、方式有所不同, 其主要分为介质阻挡放电、射流放电、微波放电、辉光放电、火花放电等^[14]。这些放电模式均可使处于低气压状态的气体物质转变成等离子体状态。如图1所示, 放电情况下, 高温使得原子的外层电子摆脱原子核的束缚而成为自由电子, 电子经过电场加速获得高能量变成激发态, 并进一步与气体分子碰撞使其激发、电离和裂解变成等离子体状态, 当材料置于等离子体中时, 高能电子与材料表面碰撞, 会导致能量交换、电荷转移、分子分解或复合以及电子吸附, 在材料表面引起物理或化学反应, 从而实现材料的表面改性。

现阶段实验室多采用正负极板间高电压击穿空气方法, 利用电场加速电子击穿空气, 获得电子和活性粒子, 产生等离子体^[15]。

1.1 介质阻挡模式

介质阻挡模式是在高频高压交流电压下放电, 工作频率大多在千赫兹(kHz)数量级, 放电空间插入绝

收稿日期: 2022-12-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3900100); 国家自然科学基金资助项目(U1908226); 河南省重点研发专项项目(221111320300); 中国博士后科学基金项目(2022M710851)

通信作者: 范桂侠, 副教授, 博士, E-mail: cumtfgx@126.com。

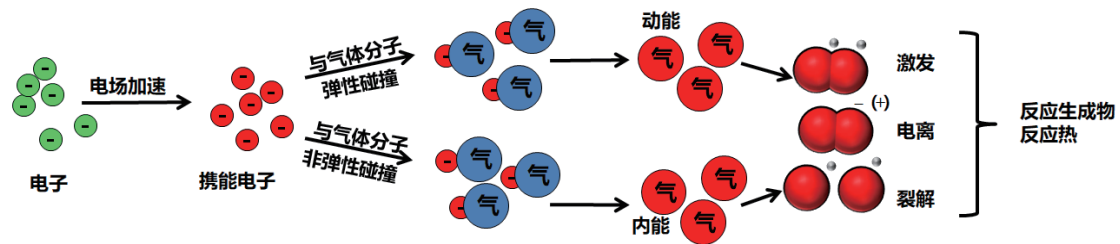
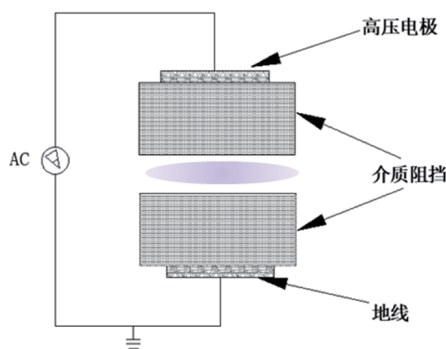


图 1 等离子体产生过程及改性

Fig. 1 Plasma generation process and modification

缘介质,因而能够有效地抑制局部火花或电弧的产生,从而产生大面积、高能量密度等离子体^[14,16]。其放电示意图如图 2 所示。

图 2 介质阻挡放电示意图^[16]Fig. 2 Schematic diagram of dielectric barrier discharge^[16]

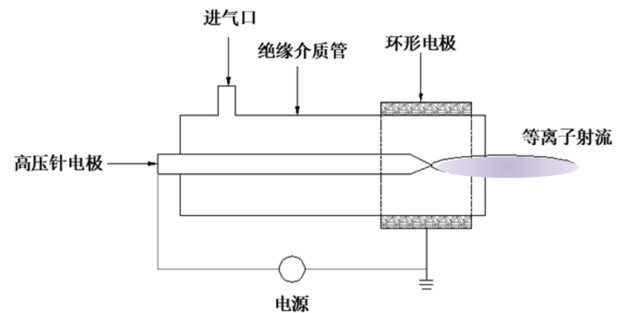
Lin 等^[17]使用介质阻挡放电等离子体将丙烯酸接枝到聚四氟乙烯膜表面,以达到提高表面润湿性的目的,结果表明处理后聚四氟乙烯膜表面接触角由 140.9°降至 48.6°,亲水性显著提高。魏钰坤等^[18]通过介质阻挡放电等离子体在不同修饰剂下辅助球磨以提高纳米 TiO₂ 粉体亲油化度,改性后纳米 TiO₂ 粉体的亲油化度值由 21% 增至 60.9%。朱希峰等^[19]以甲苯和苯系混合物为反应物,使用圆筒形双介质阻挡放电模式产生低温等离子体来脱除挥发性有机物,在 350 °C 时,能量密度只需达到 160 J/L,去除率接近 100%。Lin 等^[20]选择镀锌铁为金属基底,使用介质阻挡等离子体改变在不同药剂环境下的金属润湿性,试验证明,不同药剂的分解表现为不同润湿性的变化,使用全氟辛基三乙氧基硅烷(POTS)时,改性后接触角由 100°大幅度降至 24.9°;但使用聚乙二醇为药剂时,接触角由 100°增至 125.6°。

该放电模式具有放电稳定、易发生化学反应、低功耗、结构简单和常温常压操作等一系列独特优点,但介质阻挡等离子体一般表现为丝状的流注放电形式,所产生的放电电流在时间和空间上都是无序的、不均匀的^[13]。

1.2 射流模式

射流模式放电原理是在大气压下,电场和气流共

同作用,使放电产生的等离子体从产生区域喷出,让其在外界开放的环境中朝着工作区域方向作定向移动^[21],该模式采用了单针电极、针-环、单环(双环)和微空腔等结构放电产生等离子体羽辉或羽流的放电形式,其装置示意图如图 3 所示。

图 3 射流等离子体装置示意图^[22]Fig. 3 Schematic diagram of jet plasma device^[22]

Narimisa 等^[23]以氟气和氮气为反应气体,通过大气压射流产生等离子体作用于聚对苯二甲酸乙二醇酯,分析可得改性后聚合物表面 C-O、O-C-O 键数量显著增加,极大提高了聚合物的亲水性,接触角由 87°直接降至 20°。

该放电模式不局限于狭窄的放电空间,可在开放空间对材料进行处理,在材料表面改性和薄膜沉积等方面具有广阔的应用前景,具有以下优点:(1)设计简单,生产成本低;(2)灵活高效,启停迅速;(3)常温常压可进行,无须外加热源;(4)放电区和反应区分离,互相不受影响^[14]。

1.3 微波模式

微波放电模式原理是微波源产生微波传输到放电室,电离气体放电,维持高密度放电,其装置示意图如图 4 所示。微波放电又称无电极放电,分为电容耦合式和电感耦合式,两者分别以高频电容电场和涡旋电场来获得等离子体。

Tamargo 等^[25]使用微波等离子体处理高表面积石墨,等离子体的清洁效果有助于除去研磨过程中产生的无序表面垢,随着处理时间延长,石墨表面引入大量含氧基团、粗糙度增加,石墨表面更加活跃。安晓明等^[26]采用微波放电等离子体对金刚石薄膜表面进

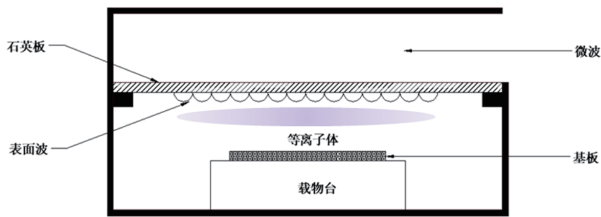


图4 微波等离子体装置示意图^[24]
Fig. 4 Schematic diagram of microwave plasma device^[24]

行改性处理,处理后薄膜表面接触角从 81° 下降至 20° ,形成了亲水性良好的表面。Stanishevsky等^[27]以 H_2 、 N_2 和 O_2 为反应气,使用微波放电产生等离子体,使纳米金刚石表面氧化、刻蚀,引入大量酰胺基团、C-N、C-O键。

该放电模式在表面改性方面有很大优势:(1)操作简便,激发电压低,无电极污染,所产生的等离子体纯度高,密度大,稳定性强,富含大量长寿命自由基,有利于促进一些特殊的化学反应;(2)可实现电子回旋共振及磁场输送等离子体等^[24,27]。

1.4 小结

相较于微波模式放电,介质阻挡模式和射流模式应用更广泛,其中介质阻挡模式能量体积大、作用范围广,多应用于农业、化工、制药及印染的工业废水降解中。射流模式放电因其电极结构灵活多变,活性粒子种类多及操作易控等特点,常用于薄膜沉积、污水处理和材料表面改性中。

2 等离子体在矿物浮选领域中的应用

等离子体技术不仅能改变浮选药剂的极性基团;还能从矿物本身出发,引起矿物颗粒表面电荷变化,从而影响矿物颗粒与浮选药剂之间的相互作用,实现一种简便、高效、环保的矿物分选新工艺。

2.1 等离子体在浮选界面改性领域中的应用

等离子体可改善矿物表面的亲疏水性,主要体现在两个方面:一方面等离子体技术可将高选择性的极性/非极性官能团引入浮选药剂结构中,以实现浮选药剂与矿物表面的靶向作用;另一方面等离子体可直接作用在矿物表面,使其表面产生新的化学结构,有效扩大目的矿物和脉石矿物的可浮性差异。

2.1.1 浮选药剂的改性

捕收剂可与矿物表面活性位点键合而吸附在矿物表面,实现矿物颗粒分选,捕收剂的选择性和捕收能力直接决定浮选结果。等离子体中的主要成分活性氧可直接或间接与药剂发生反应,生成烷烃自由基和水分子,再进一步生成含氧官能团,从而在非极性捕收剂分子结构基础上生成、引入大量的极性官能团,

使其同时兼顾极性亲固基和非极性疏水基,有效提高捕收剂分子在矿物表面的吸附作用^[28]。

李琛光等^[29]采用介质阻挡放电等离子体预处理技术,利用活性氧成分向捕收剂十二烷中引入C-O、C=O、-OH等丰富的极性基团,改性后十二烷中的非极性键与煤表面的疏水位点键合,极性键与煤表面的亲水位点键合,协同提高了浮选气泡与煤颗粒黏附力,在节省2/3药剂用量的情况下,可燃体回收率由48.16%升至70.53%。

Zhen等^[30]通过等离子体将柴油氧化,引入大量-OH、-C=O和-COOH等极性基团,并用于低阶煤浮选;与原始柴油相比,在45 V和90 W、充气流量为100 mL/min处理条件下的氧化柴油,用量为5 kg/t时,低阶煤接触角由 44.2° 升至 80.4° ;氧化前后,柴油与低阶煤的反应热由-6 J/g增加至-9 J/g。通过浮选试验,精煤回收率由44.95%提高至59.44%,表明柴油经等离子体氧化作用后,生成了大量的氧官能团,可以与低阶煤表面的极性官能团结合,提高浮选效率。

王大鹏等^[31]进一步将十二烷与仲辛醇复配后采用等离子体处理10 min制备新型捕收剂,较处理前精煤产率提升了15个百分点,药剂用量降低了50%以上。结果表明等离子作用下该复配药剂发生直接氧化、产生烷烃自由基、交联等一系列复杂化学反应,生成的长链含氧基团有机物通过氢键和物理吸附的作用方式吸附在煤泥表面,同煤泥表面的非极性官能团及-OH、C-O、C=O极性官能团发生相互作用有效覆盖低阶煤泥表面亲水位点,使煤样表面C-C/C-H含量相较原煤提高了7.41个百分点,O元素含量降低了2.61个百分点,疏水性大幅提高。

等离子体技术作为一种绿色高效的表面改性技术,富含高能粒子,对浮选药剂进行改性,可显著提高药剂性能,提高资源利用率,应用前景看好。

2.1.2 矿物颗粒的改性

等离子体直接作用于矿物表面有两种形式,如图1所示,一是等离子体流中的高能带电粒子及亚稳态粒子与矿物表面碰撞,导致表面分子激发、电离、化学键裂解与重组等,使矿物表面产生化学交联作用,产生新的化学结构,不同矿物在等离子体作用下的转化产物和氧化速度差别很大,提高矿物间的可浮性差异;二是等离子体中的高能量电子加速较低温度的活性粒子,粒子动能增加会冲击矿样表面引起溅射反应,清除杂质并刻蚀表面,提高矿物表面粗糙度,进而影响矿物表面的亲疏水性。

李琛光等^[29]采用电感耦合放电低温等离子体技术,对煤泥进行改性,改性时间为1 min时,煤泥表面含氧基团量显著提升,接触角由 75° 迅速下降至 0° ,而黄铁矿的接触角从 82.1° 降到 60.7° ,下降幅度远小于

煤泥, 两者亲水性差异明显增大。

Wang 等^[32] 使用射流放电等离子体对煤样表面改性, 处理后煤样表面粗糙度增加, C-C 键和 C-H 键断裂, -COOH 键含量增加。处理时间为 10 s 时, 煤表面的接触角从 75° 降为 0°, 浮选回收率从 60% 降至 15%, 处理 5 min 后回收率稳定在 10% 左右。

Hirajima 等^[33] 用等离子体对黄铜矿和辉钼矿预处理, 然后用 pH=9 的溶液清洗, 检测等离子体处理前后黄铜矿和辉钼矿在不同洗涤时间下的 AFM 图像可知, 未经处理的黄铜矿表面光滑, 等离子体处理之后变得粗糙, 洗涤后仍保持相似粗糙度; 对于辉钼矿, 未经处

理的表面具有较大的分布峰, 等离子体处理后出现了许多尖锐的峰, 而等离子体清洗后, 表面变得更光滑。两种矿样原始接触角均在 80° 左右, 等离子体处理后均急剧降低至 22°, 这与矿样表面引入的大量含氧基团有关, 洗涤 30 min 时, 黄铜矿样品的接触角缓慢升至 45° 左右, 而辉钼矿接触角迅速增大至原始值, 实现了黄铜矿与辉钼矿的浮选分离。

Ran 等^[34] 使用介质阻挡放电等离子体处理黄铁矿和砷黄铁矿, 如图 5 所示, 介质阻挡放电使氧分子激发为氧自由基, 在电场作用下冲击矿样表面进行改性, 且改性优先发生在矿物边缘及粗糙区域。

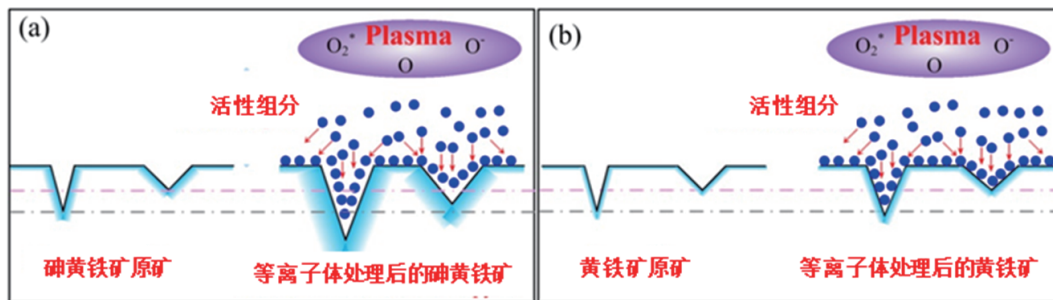


图 5 氧气等离子体在砷黄铁矿和黄铁矿表面处理过程^[34]

Fig. 5 Oxygen plasma in arsenopyrite and pyrite surface treatment process^[34]

矿样经预处理后进行浮选试验, 结果表明等离子体未处理之前, 两者的回收率均在 90% 以上, 但处理之后黄铁矿回收率降至 70%, 砷黄铁矿回收率大幅降至 13%。等离子体对砷黄铁矿和黄铁矿氧化速率有较大差异。砷黄铁矿表面氧化速度较快, 大量的铁和硫原子被转化为高度亲水的氧化状态, 硫酸盐浓度的增加增强了砷黄铁矿表面的溶解, 并进一步减少了捕收剂吸附铁位点的数量, 而黄铁矿表面氧化速度较慢, 受等离子体影响较小, 两种矿物的表面物化性质差异增大, 达到良好的分离效果。

等离子体对矿物颗粒改性工艺高效且环保, 其对颗粒表面直接改性实现了矿物在低药剂用量下高效去杂提质的目标, 对矿物加工领域绿色、可持续发展具有重要意义。

2.2 等离子体在脱泥浮选领域中的潜在应用

细/微细颗粒易产生泥化现象, 恶化浮选环境^[35], 且其表面能高、氧化速度快^[36], 更容易附着在粗颗粒表面^[37], 为浮选带来诸多不良影响。因此, 若能在浮选前进行脱泥预处理, 减少后续浮选中的机械夹带, 可有效提高浮选效果。而等离子体富含较多高能粒子, 通过物理溅射作用可有效降低细泥在矿物颗粒表面附着的现象, 实现细泥的有效脱除。

等离子体清洗包含两个方面: 一是物理溅射作用, 高能粒子通过轰击将材料表面污物去除^[38], 多使用惰性气体; 二是活化作用, 活性基团活化材料表面的有

机残留并去除^[32]。Miller 等^[39] 发现等离子体的高能粒子具有刻蚀作用, 使用 Ar/He 介质阻挡放电等离子体处理铝颗粒时, 表面氧化铝的厚度减少了 40%。Stefanova 等^[38] 在混合气体 Ar/O₂ 浓度为 99.8%/0.2%、功率为 8 W、气流量为 5.5 L/min 时, 使用射流放电等离子体清理装裱画表面老化的油漆和烟尘, 试验证明, 处理 1 min 后表面灰尘沉积物被完全清除。Pham 等^[40] 通过空气辅助电感耦合放电等离子体对石墨烯表面进行清洁, 证明表面空气辅助等离子体清洗后减少了杂质和聚合物残留物, 但石墨烯网络没有无序化, 很好地保护了样品内部结构。可见经等离子体处理可有效清理材料表面污物, 说明通过等离子体处理可有助于清洁粗颗粒表面附着的细颗粒, 提高浮选入料品位, 为浮选脱泥预处理工艺提供了一条新思路。

2.3 小结

等离子体改性技术可将高选择性的极性官能团引入到浮选药剂结构中, 以实现浮选药剂与矿物表面的靶向作用; 同时可直接作用在矿物表面, 使其表面产生新的化学结构, 有效扩大目的矿物与脉石矿物的可浮性差异。同时, 等离子体技术为浮选脱泥预处理技术提供新思路, 具有广泛的应用前景。

3 展望

近年来, 等离子体技术应用在矿物加工领域取得了一定进展, 从等离子体改性矿物表面扩展至改性浮

选药剂, 科研工作者对等离子体技术的认识以及研究更加深入。但等离子体改性的机理复杂, 物化反应迅速难以捕捉, 实验理论依据不足, 大部分等离子体改性处理仅停留在实验室研究阶段, 不能有效地指导和解决生产过程中的实际问题。科研工作者应充分把握等离子体的改性过程, 同时结合工业生产中的实际问题, 揭示等离子体改性原理, 提高等离子体在工业生产中的应用。

绿色、环保、高效的等离子体技术应用于选矿领域, 不仅能有效提高药剂在矿物表面的吸附作用, 改变矿物表面的物理化学性质, 扩大目的矿物和脉石矿物的可浮性差异。同时, 等离子体活化水内富含强氧化活性成分, 具有低 pH、高氧化还原电位等特殊理化性质, 应展开广泛深入的研究, 为开发新型浮选技术提供理论指导。

参考文献:

- [1] 张添钧. 化学选矿技术在低品位矿石处理中的应用[J]. 有色矿冶, 2022, 38(1): 20-22.
ZHANG T J. The application of chemical beneficiation technology in the treatment of low grade ore[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2022, 38(1): 20-22.
- [2] CHANGPING G, ZHIGANG Y, JIHUA Z, et al. Surface modification of ilmenite by a novel surfactant dodecyliminodimethylenediphosphonic acid and its sequent influence on ilmenite floatability[J]. Separation Science and Technology, 2020, 55(2): 358-368.
- [3] 杨光, 苏兴国, 马自飞, 等. 东鞍山贫杂铁矿石选矿技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 140-148.
YANG G, SU X G, MA Z F, et al. Research status and development trend of beneficiation technology for Donganshan iron ore with low grade and complex composition[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 140-148.
- [4] XIAOLONG Z, XIAOTIAN G, HAN YUEXIN, et al. Flotation of Iron Ores: A Review[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2019, 42(3): 184-212.
- [5] WANG W, SNOECKX R, ZHANG X, et al. Modeling plasma-based CO₂ and CH₄ conversion in mixtures with N₂, O₂ and H₂O: the bigger plasma chemistry picture[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(16): 8704-8723.
- [6] ZHAO Y, HAN F, GUO L, et al. Flotation separation of hazardous polyvinyl chloride from waste plastics based on green plasma modification[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 318: 128569.
- [7] CORREIA D M, NUNES-PEREIRA J, ALIKIN D, et al. Surface wettability modification of poly(vinylidene fluoride) and copolymer films and membranes by plasma treatment[J]. Polymer, 2019, 169: 138-147.
- [8] KOZHONOV A, SAMSALIEV A, TOPORKOVA Y I. Studies on microwave-plasma treatment of froth flotation tailings[J]. Solid State Phenomena, 2020, 299: 1044-1051.
- [9] RAN J, QIU X, HU Z, et al. Enhance flotation separation of arsenopyrite and pyrite by low-temperature oxygen plasma surface modification[J]. Applied Surface Science, 2019, 480: 1136-1146.
- [10] MAY F, GOCK E, VOGT V, et al. Plasma-modification of sulfides for optimizing froth-flotation properties[J]. Minerals Engineering, 2012, 35: 67-74.
- [11] 金英. 等离子体射流特性及在金属表面清洗中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
JIN Y. The properties of plasma jet and its application on metal surface cleaning [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [12] DONG B, DRIVER M S, EMESH I, et al. Surface chemistry and fundamental limitations on the plasma cleaning of metals[J]. Applied Surface Science, 2016, 384: 294-297.
- [13] 胥萌, 晋伟, 周济, 等. 低温等离子体在矿物加工领域应用现状[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 201-208.
XU M, JIN W, ZHOU J, et al. Application status of low temperature plasma in mineral processing field[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 201-208.
- [14] 黄静颖. 大气压射流等离子体用于CO₂和CH₄转化的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
HUANG J Y. Experimental study on CO₂ and CH₄ conversion by using atmospheric pressure plasmatron[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [15] 马哈博. Mn₂O₃涂敷强化低温等离子体再生处理废活性炭[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2021.
Ma H B. Mn₂O₃ coating enhanced low temperature plasma regeneration treatment of waste activated carbon [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [16] HE J, WEN X, WU L, et al. Dielectric barrier discharge plasma for nanomaterials: fabrication, modification and analytical applications [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2022, 156.
- [17] LIN L, RUI L, LI C, et al. Study on CO₂-based plasmas for surface modification of polytetrafluoroethylene and the wettability effects[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2021, 53: 101752.
- [18] 魏钰坤, 廖海峰, 颜海涛, 等. 介质阻挡放电等离子体辅助球磨对纳米TiO₂粉体的表面改性[J]. 材料导报, 2020, 34(14): 14039-14044.
WEI Y K, LIAO H F, YAN H T, et al. Surface modification of nano TiO₂ powders by dielectric barrier discharge plasma assisted ball milling[J]. Materials Reports, 2020, 34(14): 14039-14044.
- [19] 朱希峰. 介质阻挡放电低温等离子体脱除挥发性有机物的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
ZHU X F. Research on removal of volatile organic compounds by DBD nonthermal plasma [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021.
- [20] LIN L, RUI L, TAO Y, et al. Surface modification of metal substrates using dielectric barrier discharge plasma and the wettability study[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2022, 138: 104467.
- [21] 陈东. 大气压射流等离子体特性研究及其应用[D]. 广州: 广州大学, 2019.
CHEN D. Study on characteristics of atmospheric pressure jet plasma and its application [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [22] 李文浩, 田朝, 冯绅绅, 等. 大气压等离子体射流装置及应用研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(8): 695-707.
LI W H, TIAN C, FENG S S, et al. Advance in atmospheric pressure plasma jet and its applications[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(8): 695-707.
- [23] NARIMISA M, ONYSHCHENKO Y, MORENT R, et al. Improvement of PET surface modification using an atmospheric pressure plasma jet with different shielding gases[J]. Polymer, 2021, 215: 123421.
- [24] 朱珠. 微波等离子体设备及其在硫化钼复合材料表面改性的研

- 究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2018.
- ZHU Z. Microwave plasma generator and its application of surface modification on molybdenum sulfide composites [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2018.
- [25] TAMARGO-MARTÍNEZ K, VILLAR-RODIL S, MARTÍNEZ-ALONSO A, et al. Surface modification of high-surface area graphites by oxygen plasma treatments[J]. Applied Surface Science, 2022, 575: 151675.
- [26] 安晓明, 苟立, 何琨, 等. 微波等离子体改性对金刚石薄膜表面亲水性的影响[J]. 表面技术, 2009, 38(1): 14-16.
- AN X M, GOU L, HE K, et al. Effece of microwave plasma modification on the hydrophilic properties of diamondFilm[J]. Surface Technology, 2009, 38(1): 14-16.
- [27] STANISHEVSKY A V, WALOCK M J, CATLEDGE S A. Surface modification and stability of detonation nanodiamonds in microwave gas discharge plasma[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 1403-1409.
- [28] WANG D, XU M, HE J, et al. Flotation of low rank coal using dodecane after pretreatment by dielectric barrier discharge (DBD) air plasma[J]. Fuel, 2019, 251: 543-550.
- [29] 李琛光, 王大鹏, 胥萌, 等. 低温等离子体改性技术对煤泥浮选效果的影响[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 256-261.
- LI C G, WANG D P, XU M, et al. Effect of low temperature plasma modification technology on coal slime flotation[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 256-261.
- [30] ZHEN K, ZHANG H, LI C, et al. Effect of oxidized diesel oil on the flotation response of the low-rank coal by plasma oxidation method[J]. Fuel, 2019, 245: 13-20.
- [31] 王大鹏, 李文秀, 王振飞, 等. 复配-等离子体协同制备低阶煤捕收剂研究[J/OL]. 煤炭学报, 2022, 1-7.
- WANG D P, LI W X, WANG Z F, et al. Flotation intensification of low-rank coal using a new collector prepared by composition and following plasma [J/OL]. Journal of china coal society, 2022,1-7. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1213.
- [32] WANG D, XU M, HE J, et al. Effects of low-temperature air plasma pretreatment on the surface properties of low-rank coal[J]. Powder Technology, 2018, 340: 227-233.
- [33] HIRAJIMA T, MORI M, ICHIKAWA O, et al. Selective flotation of chalcopyrite and molybdenite with plasma pre-treatment[J]. Minerals Engineering, 2014, 66: 102-111.
- [34] RAN J, QIU X, HU Z, et al. Selective flotation of pyrite from arsenopyrite by low temperature oxygen plasma pre-treatment[J]. Minerals, 2018, 8(12): 568.
- [35] XU D, AMETOV I, GRANO S R. Quantifying rheological and fine particle attachment contributions to coarse particle recovery in flotation[J]. Minerals Engineering, 2012, 39: 89-98.
- [36] 张晓亮. 微细粒赤铁矿絮凝浮选行为及机理研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
- Zhang X L. The research on the behavior and mechanism of ultrafine hematite in the flocculation-flotation [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016.
- [37] HUANG Y, HAN G, LIU J, et al. A facile disposal of bayer red mud based on selective flocculation desliming with organic humics[J]. J Hazard Mater, 2016, 301: 46-55.
- [38] STEFANOVA M, KAMENAROV Z. Using atmospheric pressure plasma as a tool in the cleaning of icon paintings[J]. International Conference Florence Heri-Tech:The Future of Heritage Science and Technologies, 2020, 949(1): 012087.
- [39] MILLER K K, SHANCITA I, BHATTACHARIA S K, et al. Surface modifications of plasma treated aluminum particles and direct evidence for altered reactivity[J]. Materials & Design, 2021, 210: 110119.
- [40] PHAM P V. Cleaning of graphene surfaces by low-pressure air plasma[J]. R Soc Open Sci, 2018, 5(5): 172395.

Generation of Plasma and Its Application in Mineral Flotation

ZHANG Huaiyao, TIAN Fuqiang, LI Yachao, HAO Haiqing, FAN Guixia

School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Plasma, a green and environmental friendly surface modification technology, has attracted more attention as its excellent properties, such as simple operation, rapid response, low energy consumption and dry process. In this paper, the producing method of plasma and its application in the field of mineral flotation were summarized, as well as the mechanism of its action on mineral and reagent modification in flotation, and the application of plasma in the mineral processing field was prospected. The review would provide a guidance for the popularization and application of plasma technology for efficient utilization of the mineral resources.

Keywords: plasma; flotation; deslime; generation; application.

引用格式: 张怀瑶, 田付强, 李亚超, 郝海青, 范桂侠. 等离子体的产生及其在矿物浮选中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 60-65.

ZHANG Huaiyao, TIAN Fuqiang, LI Yachao, HAO Haiqing, FAN Guixia. Generation of plasma and its application in mineral flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 60-65.