

平行磁场下电极材料对 DBD 降解亚甲基蓝的影响

金东翰^{1,2}, 卢洪伟^{1,2*} (1. 东华大学理学院, 上海 201620; 2. 东华大学, 纺织行业先进等离子体技术与应用重点实验室, 上海 201620)

摘要: 采用介质阻挡放电等离子体技术, 以镍、铁、钼、不锈钢 4 种材料作为电极, 分别在有平行磁场和无平行磁场的条件下, 考察了不同电极材料对亚甲基蓝降解率和能量利用率的影响。实验中发现电极材料的不同会影响亚甲基蓝的降解效果, 其中镍电极在处理 8min 后亚甲基蓝降解率可达 99%, 降解效果最好, 电极材料还会影响平行磁场对亚甲基蓝降解的促进效果, 铁和镍电极的能量利用率相比无磁场时提高了约 20%, 而钼和不锈钢只有 5%~10%。通过研究介质阻挡放电等离子体的产生机理和二次电子发射原理, 发现这些差异是由电极材料的二次电子发射系数和磁导率的不同导致的, 4 种材料中铁的二次电子发射系数最大, 电子雪崩过程中产生的高能电子更多, 因此降解效果最好, 铁和镍的磁导率最大, 放电空间内的磁感应强度更高, 因此平行磁场对亚甲基蓝降解率和能量利用率的提升更大。

关键词: 低温等离子体; 介质阻挡放电; 电极材料; 磁场; 亚甲基蓝; 废水处理

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)04-1570-07

Effect of electrode materials on degradation of methylene blue wastewater by DBD plasma under parallel magnetic field. JIN Dong-han^{1,2}, LU Hong-wei^{1,2*} (1. College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Key Laboratory of Advanced Plasma Technology and Application in Textile, Donghua University, Shanghai 201620, China). *China Environmental Science*, 2020, 40(4): 1570~1576

Abstract: The methylene blue aqueous solution has been treated by dielectric barrier discharge plasma technique as simulated wastewater. Nickel, iron, molybdenum and stainless steel were used as electrodes. The effects of different electrode materials on the degradation rate and energy efficiency were investigated under parallel magnetic field. It has been found that the difference in electrode materials could affect the degradation of methylene blue. For the nickel electrode, the degradation rate of methylene blue could reach 99% after 8min treatment, which could induce the best effect of degradation. The electrode material could also affect the promotion of parallel magnetic field on the degradation of methylene blue. The energy efficiency of iron and nickel electrodes could increase 20% compared to no magnetic field, while molybdenum and stainless steel only 5%~10%. By applying the mechanism of the dielectric barrier discharge (DBD) plasma and the secondary electron emission theories, it has been found that these differences were caused by the differences in secondary emission coefficient and magnetic permeability of the electrode material. The secondary emission coefficient of nickel is the largest among the four materials, so it has the best degradation effect. Iron and nickel had larger magnetic permeability, and the magnetic induction intensity in the discharge space was higher, which induced the more definite improvement of the parallel magnetic field on the degradation rate and energy efficiency of methylene blue.

Key words: low temperature plasma; dielectric barrier discharge; electrode material; magnetic field; methylene blue; wastewater treatment

随着科学和工业技术的迅速发展, 人类对水资源的需求不断增加, 水环境的污染问题也日益严重^[1]。印染废水包含各种有机高分子化合物, 并且有色度较高, pH 值变化幅度大, 结构稳定难降解等特点。随着工业技术的发展, 各种复杂助剂的不加入, 越来越多的难降解物质出现在印染废水中, 染料废水的处理难度越来越高, 是工业废水处理中的难点之一^[2]。目前处理染料废水的方法主要有吸附法, 化学混凝法, 膜分离法和高级氧化法等, 这些方法虽然能够降解高浓度染料废水, 但大多有设备投资较大, 处理费用高, 反应效率低, 反应不彻底需要进一步处理

等缺点, 有些方法还会引起二次污染。因此, 等离子体水处理技术作为一种高新技术逐渐受到人们的关注^[3-5]。

介质阻挡放电(DBD)利用高电压下的气体放电产生等离子体, DBD 等离子体水处理的原理与气体放电过程产生的高能电子有关, 这些高能电子会攻击废水中的染料分子, 使染料分子的化学键断裂, 降

收稿日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11205029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(16D110918, 17D110910, 19D110914)

* 责任作者, 副教授, hwlu@dhu.edu.cn

解为小分子物质.另外,这些高能电子还会与氧气和水分子发生反应,使其激发为活性状态,生成羟基自由基,臭氧,游离氧等活性基团,这些活性基团会与污染物发生反应,将其氧化为无害的物质^[9-11].

由于等离子体是由大量带电高能粒子组成的,当放电空间存在磁场时,这些带电粒子会受到洛伦兹力的作用,洛伦兹力会改变带电粒子的运动方向,从而对等离子体的性质产生影响^[12-13].姜炜曼等^[14]发现垂直于电场方向垂直的磁场可以增加和改善放电的均匀性.王长全等^[15]发现平行磁场会导致高能电子和其他粒子的碰撞几率增加,提高等离子体的化学活性.在 DBD 中,由于被电场加速的电子和其他粒子频繁的碰撞效应,电子的速度并非严格沿着电场方向,而是具有一定的横向速度,产生横越电场的运动.当施加平行于电场方向的磁场时,电子在洛伦兹力的作用下围绕磁力线做螺旋前进的运动,可以减缓电子横越磁场的运动趋势,进而可以约束放电空间中电子的运动,增加带电粒子在放电空间内的停留时间,增加 DBD 过程中微放电通道的数目^[16].

本实验采用 DBD 等离子体技术处理亚甲基蓝模拟废水,以镍,铁,钼,316L 不锈钢等金属材料作为放电电极进行实验,通过比较各电极材料的二次电子发射系数,考察亚甲基蓝的降解率和能量利用效率,研究了电极材料的变化对污染物降解效果的影响,并利用钕磁铁施加平行于电场方向的磁场,考察了平行磁场下电极材料的变化对污染物降解效果的影响.

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

高压交流电源(大连泰斯曼科技有限公司),TDS1000C-SC 示波器(泰克科技有限公司),UV-2600 紫外可见分光光度计(岛津仪器有限公司),P6015A 高压探头(泰克科技有限公司),P6021A 电流探头(泰克科技有限公司),OTS950X2 全无油润滑压缩机(台州市奥突斯工贸有限公司),MQK-FA2204B 电子天平(上海米青科实业有限公司),GM55 数字高斯计(上海天瑞实业有限公司),亚甲基蓝(分析纯),纯净水(华润怡宝饮料有限公司),镍,铁,钼,316L 不锈钢(诚硕金属材料有限公司).

1.2 装置和试验方法

如图 1 所示,实验装置主要由石英玻璃反应器和电源构成.高压电源为高压交流电源,最大输出峰值电压可达 40kV,频率为 19kHz.反应器是直径 10cm,高 1.5cm 的圆柱形容器,石英玻璃的厚度为 2mm,两边有通气口,材质为石英玻璃,可处理的废水体积为 20mL.为了方便研究电极材料对染料废水降解效果的影响,电极采用直径 9mm,厚度 3mm 的金属片,可用不同材料的金属片替换,电极间距约 15mm,放电时的气隙间距约为 7mm.电极下方放置一块可拆卸的钕磁铁,磁场方向与电场方向平行,用于研究平行磁场下染料废水的降解效果,利用高斯计测量磁铁表面的磁感应强度约为 0.3T.使用 100mg/L 的亚甲基蓝溶液作为模拟染料废水,放电过程中的实验条件为:峰值电压 31kV,充气速率 0.2L/min,处理时间 2~8min.

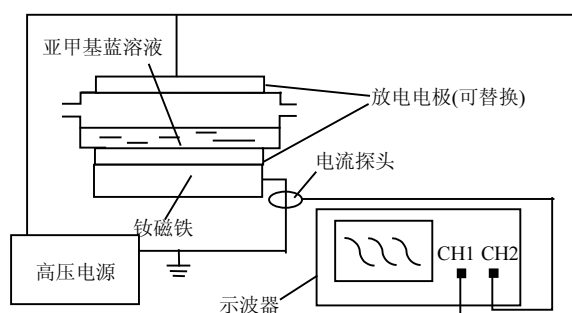


图 1 DBD 反应装置示意

Fig.1 The schematic diagram of the DBD reactor

1.3 降解率的测定

降解率反映了放电过程中亚甲基蓝的降解效果,配制浓度分别为 1mg/L, 2.5mg/L, 5mg/L, 10mg/L, 15mg/L 的亚甲基蓝溶液,利用紫外可见分光光度计分别测量其在 665nm 处的吸收值,绘制出亚甲基蓝溶液的标准曲线.

配制浓度为 100mg/L 的亚甲基蓝水溶液,作为实验的模拟废水,取 20mL 模拟废水通入反应器,将电源电压设置为 31kV,通过流量计将充气速率控制在 0.2L/min,选择合适的电极材料,分别处理 2, 4, 6, 8min.利用紫外可见分光光度计测量反应后溶液在 665nm 波长下的吸光度;并利用功率计测量电源功率,通过标准曲线公式计算出反应后亚甲基蓝废水的浓度及降解率.根据标准曲线得出处理后的亚甲

基蓝溶液浓度,计算亚甲基蓝的降解率 η :

$$\eta = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c_0 (mg/L)和 c_t (mg/L)分别是放电处理前和处理时间 t (s)后亚甲基蓝的浓度.

1.4 能量利用率的计算

能量利用率反映了反应器消耗单位能量处理亚甲基蓝的能力,是衡量反应器和电源效率的重要经济性指标.向反应器中加入体积 V 为 20mL,初始浓度 c_0 为 100mg/L 的亚甲基蓝溶液,设置不同的处理时间 t (min),采用紫外可见分光光度计法测量溶液中亚甲基蓝的浓度 c (mg/L),利用功率计测量放电过程中电源消耗的功率 P (W),计算能量利用率 G (mg/J).

计算公式如下:

$$G = \frac{(c_0 - c_t) \times V}{P \times t} \quad (2)$$

保留计算后的数据,绘制计算能量利用率 G 随时间变化的曲线.

2.1 亚甲基蓝的紫外可见吸收光谱

配制初始浓度 1g/L 的亚甲基蓝溶液,用纯净水稀释至 1mg/L, 2.5mg/L, 5mg/L, 10mg/L, 15mg/L,通过紫外可见分光光度计进行扫描,得到不同浓度亚甲基蓝溶液的吸收光谱,光谱图如图 2 所示:

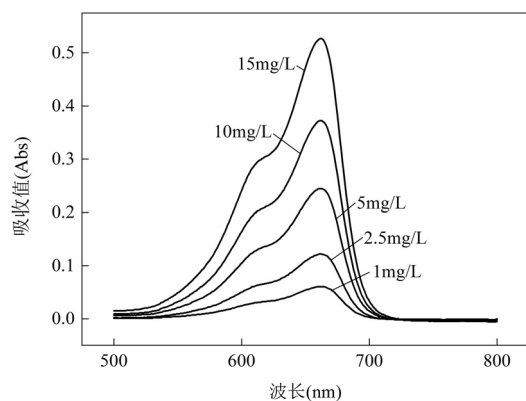


图2 不同浓度亚甲基蓝溶液的紫外可见吸收光谱图

Fig.2 The UV-VIS absorption spectra of different concentrations of methylene blue

如图 2 所示,亚甲基蓝在 665nm 吸收值最大,所以实验取 665nm 为亚甲基蓝的最大吸收波长.通过观察不同浓度亚甲基蓝溶液的紫外可见吸收光谱,得到亚甲基蓝溶液最大吸收值与浓度的线性关系,并拟合出亚甲基蓝溶液的标准曲线.

标准曲线方程为 $y=0.1535x-0.0591$,在拟合区间内,亚甲基蓝标准曲线的相关度 $R^2=0.999$,说明吸收值和浓度之间存在良好的线性关系.利用标准曲线可以得出放电处理后亚甲基蓝溶液的浓度,从而计算亚甲基蓝的降解率.

2.2 电极材料对亚甲基蓝降解效果的影响

将电极材料替换为镍片,铁片,钼片和不锈钢片,重复实验,得到不同电极材料亚甲基蓝模拟废水的降解率曲线.

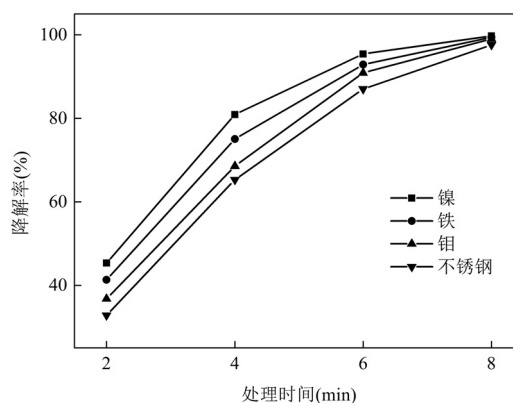


图3 不同电极材料下亚甲基蓝降解率随时间的变化

Fig.3 The degradation rate of methylene blue under different electrode materials

如图 3 所示,随着处理时间的增加,亚甲基蓝在等离子体的作用下不断被降解,亚甲基蓝降解率逐渐升高.不同电极材料亚甲基蓝的降解效果不同,8min 后镍电极的亚甲基蓝降解率可达 99%,降解效果最好,其次是铁,钼,不锈钢效果最差,这与 DBD 的放电机理及 4 种电极材料的二次电子反射系数有关.

固体内原子的核外电子受到其他电子轰击会离开物体表面,称为二次电子,单个一次电子能引发的平均二次电子数目称为二次电子发射系数 δ , δ 与一次电子入射能量 E_{PO} 有关, E_{PO} 越高,产生的二次电子越多, δ 越大,但 E_{PO} 越高二次电子产生的位置距离固体表面越深,电子到达表面的几率越小,因此当 E_{PO} 达到一定值后, δ 有最大值 δ_{max} , δ_{max} 可以看作物质的常数,镍,铁,钼,不锈钢的最大二次电子发射系数分别为 1.35,1.3,1.25,1.24^[17].

2.3 材料二次电子发射系数对 DBD 等离子体的影响

DBD 是一种高压下的非平衡放电,当极板间施加高电场时,放电空间内的气体被电离,最终导致气体间隙被击穿,形成放电通道,这些放电通道无法通过直流电维持,必须通过交流电不断产生,因此看似稳定的 DBD 实际上是一个放电,熄灭,然后再次放电的重复过程。Massines 等^[19]的研究表明一个放电通道的微放电过程就是放电空间的某一区域被高度电离,迅速传播随后消失的过程。利用流柱击穿理论可以很好地解释微放电的过程,在 DBD 中流光放电包括如下阶段,分别是开始(AB),击穿(BC),发展(CD)及熄灭(DA),如图 4 所示:

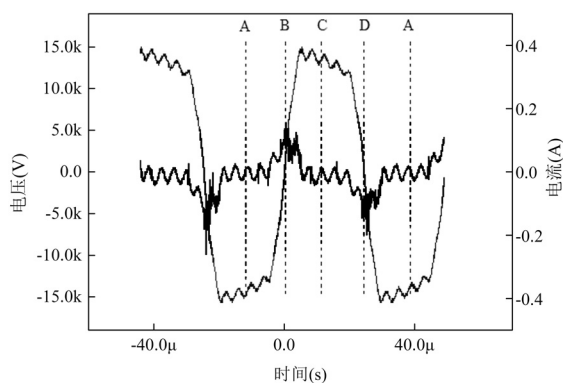


图 4 放电电压与电流波形图

Fig.4 Waveform of discharge voltage and current

2.3.1 开始阶段(AB) 上一个放电过程熄灭后,大量电子积累在介质层表面,A 时刻后,随着电压逐渐降低,放电间隙间的电场减弱,这些电子开始在气隙之间移动。

2.3.2 击穿阶段(BC) B 时刻后,随着极板间电压逐渐升高,电子会通过电场获得能量,当放电空间内的电场强度足够大时,这些电子会与周围的分子和原子发生非弹性碰撞,使其电离,并产生更多电子,引发电子雪崩。随着电子雪崩的发展,电子的数目呈指数式增长。由于电子具有很强的流动性,因此可以在极短的时间内通过其体间隙,但流动性较差的离子被滞留在后面,这些离子流柱头部不断积累形成空间电荷,空间电荷产生的本征电场与外电场叠加,使得雪崩中产生的高能电子以更快的速度向阳极运动,气体电离的范围迅速扩大并产生光子,在极板间形成明亮的放电通道,导致了单个微放电的形成^[18]。

2.3.3 发展阶段(CD) 空间电荷一旦到达阳极,放

电通道形成,代表击穿过程已经完成。由于阻挡介质具有绝缘性质,这些放电通道可以出现在很多位置上,最终均匀稳定的充满整个放电间隙。放电通道形成后,高能自由电荷在本征电场的作用下轰击阳极,产生二次电子,引发新的电子雪崩,即二次雪崩,二次雪崩由阳极向阴极扩散,与主电子雪崩汇合,使得放电区域内充满各种正离子,负离子和电子,从而产生等离子体。C 时刻后极板间电压下降,电荷开始向阳极运动。

2.3.4 熄灭阶段(DA) D 时刻后,极板间电势反向,由于电介质是绝缘的,当电荷向阳极移动时,会覆盖在电介质表面,形成静电场,放电空间内的电场被削弱,当放电空间内的电场强度无法维持放电通道时,放电过程停止^[20]。

金心宇等^[21]的研究表明电极材料的二次电子发射系数会影响等离子体中高能粒子数量。在 DBD 等离子体中,二次电子发射主要影响等离子体的发展阶段,材料的二次电子发射系数越大,二次雪崩中产生的种子电子越多,产生的等离子体中的高能粒子数就越多,亚甲基蓝的降解率也就越高。

2.4 电极材料对能量利用率的影响

利用以上实验测量的电源功率和反应后亚甲基蓝浓度,可以计算亚甲基蓝降解过程中的能量利用率。

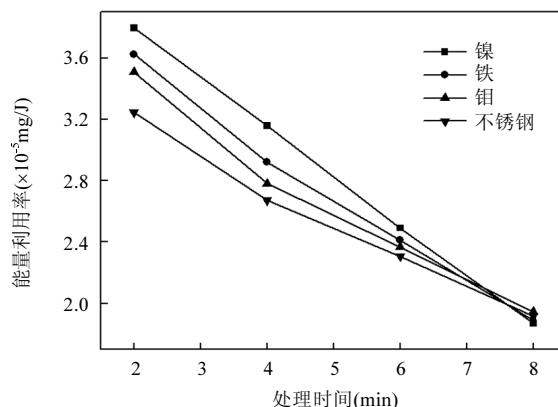


图 5 不同电极材料下亚甲基蓝能量利用率随时间的变化
Fig.5 The energy efficiency of methylene blue under different electrode materials

如图 5 所示,能量利用率随处理时间的增加而降低,这是因为随着处理时间的增加,亚甲基蓝的浓度逐渐降低,降解速率变慢,单位时间内被降解的亚甲基蓝减少,因此能量利用率下降。不同电极材料下能

量利用率的大小也不同,不同电极材料能量利用率由大到小的排列顺序与降解率的排列顺序基本一致,说明电极材料的二次电子发射系数并不是简单地影响亚甲基蓝的降解率,而是对等离子体中的高能电子产生了影响,电极材料的二次电子发射系数越高,二次电子发射中高能电子的数量越多,等离子体的放电强

度越高,反应的能量利用率越高,降解一定量的亚甲基蓝所需的能量越少,能效和经济性越好.

2.5 有无磁场条件下各电极材料降解率和能量利用率的对比

铁,镍,钼,不锈钢 4 种材料分别在有磁场和无磁场条件下亚甲基蓝降解率的变化如图 6 所示.

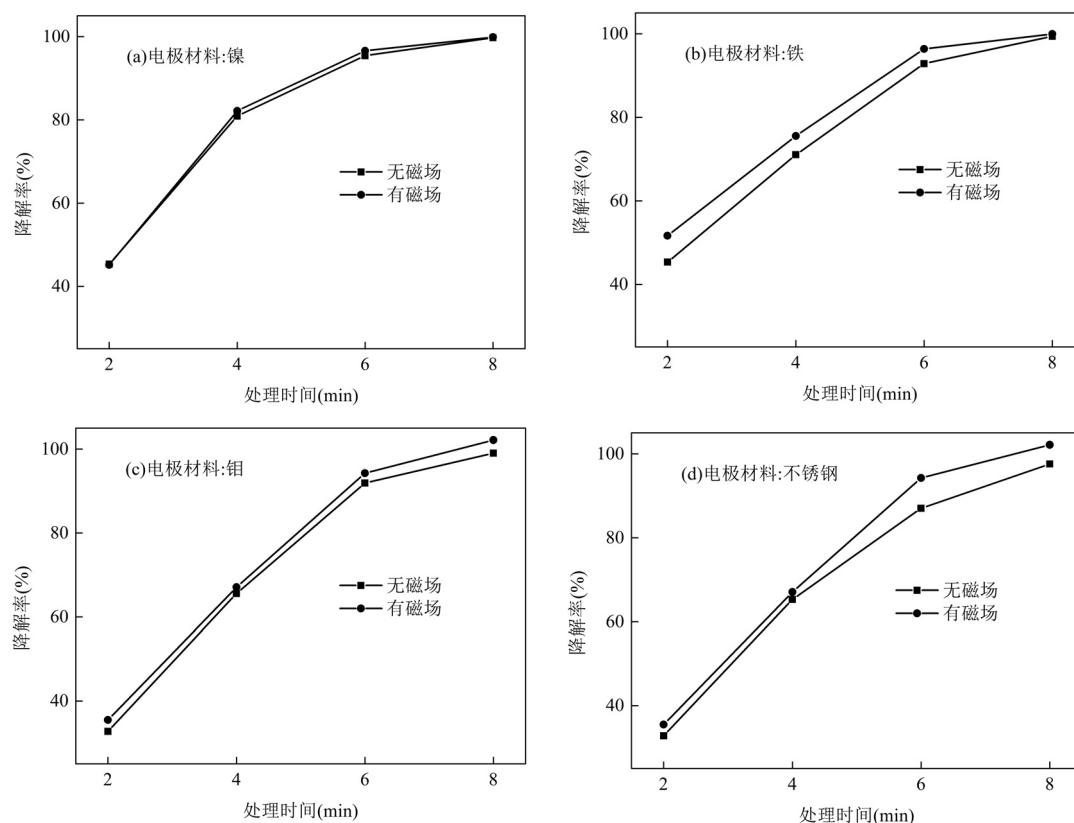


图 6 不同电极材料有无磁场条件下亚甲基蓝降解率对比

Fig.6 Comparison of degradation rate of methylene blue in the presence or absence of magnetic field using different electrode

如图 6 所示,随着处理时间的增加,亚甲基蓝染料分子不断与等离子体中的高能粒子,自由基等强氧化性基团接触反应,降解率逐渐升高,在 8 min 亚甲基蓝已经超过 90%,几乎被完全降解.随着放电时间的增加,降解率的变化幅度逐渐减小,这是因为随着放电时间的增加,亚甲基蓝的浓度逐渐降低,等离子体产生的高能粒子与染料分子反应的几率降低,反应速率减小.

在有磁场的条件下,各电极材料下亚甲基蓝的降解率与无磁场条件下相比普遍提高,说明平行磁场的加入可以约束等离子体中电子的运动,从而提高亚甲基蓝降解效果.由于极板间存在强电场,等离子体中的高能电荷应沿电场方向移动,但由于粒子间

的碰撞和放电通道之间的相互影响,电子不会严格按照电场方向移动,本实验中磁场方向于电场方向平行,因此沿电场方向运动的电子基本不会受到磁场的作用,当电子速度具有垂直与磁场方向的分量时,电子受到洛伦兹力的作用,会沿电场方向做螺旋线运动,这在一定程度上规范了电子的行为,减弱了电子的横向运动,迫使电子沿电场方向运动,促使更多的电子参与到电子雪崩中,有利于放电通道的形成,提高放电强度.因此平行磁场下亚甲基蓝的降解效果更好,电极材料的影响更加明显.

铁,镍,钼,不锈钢四种材料分别在有磁场和无磁场条件下,能量利用率的变化如图 8 所示:

从图 7 中可以看出,随着处理时间的增加,反应

的能量利用率逐渐降低,这是因为在放电过程中电源功率相对稳定,单位时间内电源消耗的能量变化不大,但随着放电时间的增加,溶液中亚甲基蓝浓度的降低,反应速率越来越小,单位时间内降解的亚甲基蓝的量逐渐减小,因此能量利用率逐渐降低.但在有磁场的条件下,各电极材料亚甲基蓝的降解率与无磁场条件下相比普遍提高,说明在平行磁场的约束下,更多的电子参与到电子雪崩的发展中,放电产生高能电子更多,因此能量利用率更高.

此外还发现图 7(c),7(d)中有磁场条件下钨和不锈钢电极的能量利用率比无磁场时提高了 5%~10%,

而图 7(a),7(b)中铁和镍电极的能量利用率提高了约 20%,为了解释这一现象,本文测量了实验中镍,铁,钨,316L 不锈钢 4 种电极表面的磁感应强度,分别为 0.42T, 0.44T, 0.35T, 0.36T.

可以发现铁和镍作为电极时,电极表面的磁感应强度更高,这是因为铁和镍的磁导率较高,这也导致了铁和镍作为电极材料时,放电空间中的磁场强度更高,磁场对电子的束缚能力越强,更多的电子参与到电子雪崩的发展中,高能电子的利用率更高,因此铁和镍作为电极时磁场对能量利用率的提升幅度更大.

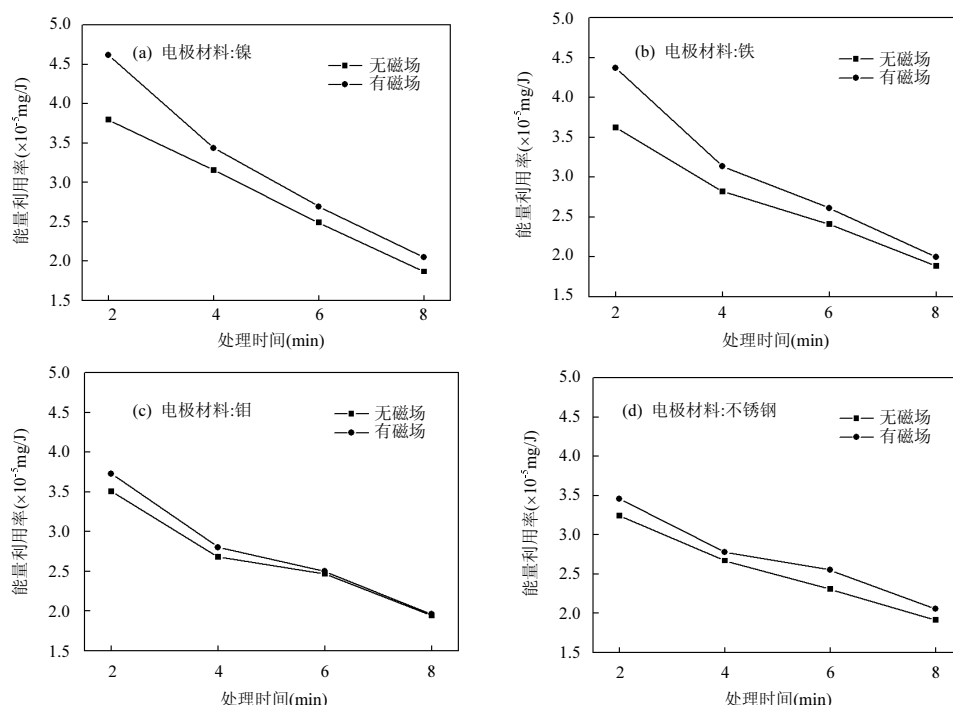


图 7 不同电极材料有无磁场条件下能量利用率对比

Fig.7 Comparison of energy efficiency in the presence or absence of magnetic field using different electrode

3 结论

3.1 电极材料的二次电子发射系数越大,等离子体中的高能粒子数量越多,亚甲基蓝的降解效果越好,镍,铁,钨,316L 不锈钢 4 种电极料中镍电极的降解效果最好,处理 8min 后亚甲基蓝的降解率可达 99%,能量利用率为 $1.9 \times 10^{-5} \text{ mg/J}$.

3.2 平行磁场对 DBD 等离子体降解亚甲基蓝模拟废水具有正向的促进作用.铁和镍的磁导率较高,铁和镍作为电极材料时,放电空间内的磁感应强度更高,有磁场条件下钨和不锈钢电极的能量利用率比

无磁场时提高了 5%~10%,而铁和镍电极的能量利用率提高了约 20%.

参考文献:

- [1] 陈明功,齐永涛,张鑫敏,等.低温等离子体与絮凝剂处理印染废水的协同效应 [J]. 中国环境科学, 2010,30(9):1207-1212.
Chen M G, Qi Y T, Zhang X M, et al. Cooperation effect between non-thermal plasma and flocculants for treatment dyeing wastewater [J]. China Environmental Science, 2010,30(9):1207-1212.
- [2] 曹宝,罗宏,王秀波.中国水污染物排放特征及其环境经济分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010,20(3):261-264.
Cao B, Luo H, Wang X B. Water pollutant discharge characteristics and environmental economic analysis in China [J]. China Population,

- Resources and Environment, 2010,20(3):261-264.
- [3] Li D, Haneda H, Hishita S, et al. Visible-light-driven N-F-codoped TiO₂ photocatalysts. 2. Optical characterization, photocatalysis, and potential application to air purification [J]. Chemistry of Materials, 2005,17(10):2596-2602.
- [4] All. D V C, Finazzi E, Pacchioni G, et al. Density functional theory and electron paramagnetic resonance study on the effect of N-F codoping of TiO₂ [J]. Chemistry of Materials, 2008,20(11):3706.
- [5] Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T. Visible-light photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides [J]. Science, 2001,293(5528):269-271.
- [6] Mwabora J M. Photoelectrochemical and optical properties of nitrogen doped titanium dioxide prepared by reactive D.C. magnetron sputtering [J]. J.phys.chem.b, 2007,107(24):5709-5716.
- [7] Yamaki T, Umebayashi T, Sumita T, et al. Fluorine-doping in titanium dioxide by ion implantation technique [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. B, Beam Interactions with Materials and Atoms, 2003,206(3):254-258.
- [8] 李胜利,李 劲,王泽文,等.用高压脉冲放电等离子体处理印染废水的研究 [J]. 中国环境科学, 1996,16(1):73-76.
- Li S L, Li J, Wang Z W, et al. Study on treatment of dyeing wastewater by high voltage pulse discharge plasma [J]. China Environmental Science, 1996,16(1):74-76.
- [9] Nickelsen M G, Cooper W J, Kurucz C N, et al. Removal of benzene and selected alkyl-substituted benzenes from aqueous solution utilizing continuous high-energy electron irradiation [J]. Environmental Science & Technology, 1992,26(1):144-152.
- [10] Kim Y K, Kim S A, Lee S B, et al. Decomposition of ethylenediaminetetraacetic acid using He-Ar-O₂ dielectric barrier discharge [J]. Plasma Processes & Polymers, 2005,2(3):252-255.
- [11] Jing X, Chen L I, Wang H. Degradation mechanism of Alizarin Red in hybrid gas-liquid phase dielectric barrier discharge plasmas: Experimental and theoretical examination [J]. Chemical Engineering Journal, 2008,138(1):120-127.
- [12] Feng Z, Saeki N, Kuroki T, et al. Magnetic-field-assisted gliding arc discharge plasma for surface modification [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011,39(11):2846-2847.
- [13] Gangoli S P, Gutsol A F, Fridman A A. A non-equilibrium plasma source: magnetically stabilized gliding arc discharge: I. Design and diagnostics [J]. Plasma Sources Science & Technology, 2010,19(6):065003.
- [14] Jiang W, Jie T, Wang Y, et al. A low-power magnetic-field-assisted plasma jet generated by dielectric-barrier discharge enhanced direct-current glow discharge at atmospheric pressure [J]. Applied Physics Letters, 2014,104(013505):1-4.
- [15] Wang C, Zhang G, Wang X, et al. Surface modification of poly(ethylene terephthalate) (PET) by magnet enhanced dielectric barrier discharge air plasma [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(21):4993-4999.
- [16] Qiao Y, Li B, Ouyang J. On the mechanism of pattern formation in glow dielectric barrier discharge [J]. Physics of Plasmas, 2016,23(1):33-51.
- [17] Mizuno A, Clements J S, Davis R H. A method for the removal of sulfur dioxide from exhaust gas utilizing pulsed streamer corona for electron energization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008,22(3):516-522.
- [18] 蔡忆昔,王 军,刘志楠,等.介质阻挡放电等离子体发生器的负载特性 [J]. 高电压技术, 2006,32(10):62-64.
- Cai Y X, Wang J, Liu Z N, et al. Load characteristics of a dielectric barrier discharge plasma generator [J]. High Voltage Technology, 2006,32(10):62-64.
- [19] Radu I, Bartnikas R, Wertheimer M R. Diagnostics and modelling of noble gas atmospheric pressure dielectric barrier discharges in homogeneous or diverging electric fields [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2005,38(4):539-546.
- [20] Massines F, Rabehi A, Decomps P, et al. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier [J]. Journal of Applied Physics, 1998,83(6):2950-2975.
- [21] 金心宇,张 昱,姜玄珍,等.电极材料对脉冲等离子体降解有机废气的影响分析 [J]. 中国环境科学, 1998,18(3):213-217.
- Jin X Y, Zhang Y, Jiang X Z, et al. Analysis of electrode material effect on organic exhaust gas decomposition by pulsed plasma [J]. China Environmental Science, 1998,18(3):213-217.

作者简介: 金东翰(1995-),男,辽宁鞍山人,东华大学硕士研究生,主要从事介质阻挡放电处理印染废水技术的研究。