

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2501055

微波辐射破乳预处理切削液废水研究

李苏琳, 于静洁, 张茹悦

(天津城建大学 a. 环境与市政工程学院; b. 天津市水质科学与技术重点实验室;
c. 环境与市政市级实验教学示范中心, 天津 300384)

摘要: 采用微波辐射对切削液废水进行预处理, 在不同微波功率下(150, 300, 450, 600, 700, 900 W)使切削液废水达到不同温度范围(40~50, 50~60, 60~70, 70~80, 80~90, 90~100 °C)。将辐射后废水分为上、中、下3层(上层 160 mL、中层 300 mL、下层 100 mL), 并检测各层废水的 COD 和粒径, 以探究能耗、有机物挥发量, 并确定最佳破乳参数(微波功率、辐射后废水温度)。实验结果表明: 各功率下, 微波辐射后温度在 70~80 °C 范围内时, 破乳效果最佳; 微波功率为 600 W 时, 有机物挥发量和能量损耗最小, 故微波功率 600 W, 预处理温度为 70~80 °C 之间, 为微波预处理切削液废水的最佳操作条件。

关键词: 切削液; 废水; 微波; 破乳

中图分类号: X76

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2025)01-0055-06

Study on Pretreatment of Cutting Fluid Wastewater by Microwave Radiation Demulsification

LI Sulin, YU Jingjie, ZHANG Ruyue

(a. School of Environmental and Municipal Engineering; b. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology;
c. Municipal Experimental Teaching Demonstration Center of Environmental and Municipal Engineering, TCU,
Tianjin 300384, China)

Abstract: The cutting fluid wastewater was pretreated by microwave radiation under different microwave power (150, 300, 450, 600, 700, 900 W) in the different temperature ranges (40–50, 50–60, 60–70, 70–80, 80–90, 90–100 °C). The radiated wastewater was divided into upper, middle, and lower layers (upper layer: 160 mL, middle layer: 300 mL, and lower layer: 100 mL), and the COD and the droplet size of each layer of wastewater were detected to explore the energy consumption and quantity of the organic volatilization, and to determine the best demulsification parameters (microwave power and temperature of the radiated wastewater). The experimental results show that under different microwave power, the demulsification effect is the best when the radiated wastewater temperature is in the range of 70–80 °C; when the microwave power is 600 W, the quantity of organic volatilization and lost energy are the least; therefore, the microwave power is 600 W and the radiated wastewater temperature is between 70–80 °C, which are the best operating condition for microwave pretreatment of cutting fluid wastewater.

Key words: cutting fluid; wastewater; microwave; demulsification

在金属加工过程中, 金属刀具、切屑和工件之间会产生摩擦和热量, 这对刀具的使用寿命和工件的表面质量影响较大; 如果切削过程中产生的碎屑没有及时清理, 同样对工件质量和刀具寿命有影响^[1]; 此外, 在加工后的存储期间, 工件容易与空气发生反应, 导

致生锈^[2]。因此, 性能优异的切削液需要具有解决上述问题的降温、润滑、清洗和防锈等作用。

切削液废水通常由油、表面活性剂和各种添加剂(防锈剂、极压添加剂等)组成, 其 COD、TOC 和油浓度都很高^[3]。若切削液废水未经处理直接排入自然水体

收稿日期: 2023-08-30; 修订日期: 2023-09-18

作者简介: 李苏琳(1998—), 女, 四川成都人, 天津城建大学硕士生

通讯作者: 于静洁(1978—), 女, 教授, 博士, 从事污水处理与工艺系统模拟研究, E-mail: yjj.mary@163.com.

中,水面会形成一层油膜,使得水体缺氧同时影响阳光的射入进而威胁水生生物的生长.切削液废水中含有的有机物等污染物质也会对土壤造成严重污染,影响土壤的肥力和生态系统的平衡.此外,切削液废水中含有大量可挥发性有机物,若随意排放不仅会产生臭味而且严重影响空气质量.最终,当人类使用或饮用了被切削液废水污染的水将会引发癌症等各类疾病,危害人类健康^[4-9].因此,为防止切削液废水对环境 and 人类造成危害,切削液废水被列入《国家危险废物名录》^[10],经处理达标后才可排放.

由于切削液废水是乳化液,具有良好稳定性且成分复杂,因此一般需要经过破乳预处理,以进行油水分离^[11].切削液废水的有机物浓度高、难生物降解,常采用物理法或化学法先对其进行预处理.

物理法破乳中,膜分离法处理切削液废水具有除油效率高、过程简单、能耗低等优点,但该方法对膜的材料、孔径以及结构等方面有很高的要求,且膜污染仍是一个目前需要解决的重点问题.重力分离法是利用油水密度差,在重力作用下去除废水中游离油和悬浮物质的方法,具有成本低等优点,但是对于含有乳化油的废水其处理效果不理想.气浮法是使废水中的油滴附着在注入废水中的微小气泡上,在浮力的作用下油滴被带至水面,通过收集水面浮油层从而达到油水分离的目的^[12],具有除油效率高、污泥量少、操作简单等优点,但是耗电高,运营费用高,且处理悬浮物浓度高的废水易造成减压释放器堵塞.

化学法破乳中,酸析法是利用切削液废水大多呈碱性,通过投加酸使得废水中溶解态或胶体态物质变为悬浮物质从而破乳的方法^[13],但最终呈酸性的出水极易腐蚀设备,又需要投加额外的试剂进行酸碱中和.混凝沉淀法作为破乳实验中广泛采用的方法,具有成本低、操作简单等优点,韩卓然等^[14]利用聚合氯化铝(PAC)和聚合硫酸铁(PES)作为混凝剂对切削液废水进行处理,结果表明 PAC 对于切削液废水有更好的处理效果,然而该方法会产生大量的絮凝污泥难以处理.Fenton 氧化法是指在酸性条件下,利用 Fe^{2+} 将 H_2O_2 转化成具有强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ 以氧化降解有机物^[15],但是该法的活性氧利用效率较低,对于高浓度有机废水处理成本较高.

以上物理及化学法处理含油废水均存在一定问题,因此本研究拟采用一种不投加化学药剂、不产生二次污染的方法进行破乳预处理.微波破乳预处理具有加热速度快,易于控制,即用即停,安全卫生等优点.傅大放等^[16]利用微波辐射破乳预处理油水乳状液,结

果表明微波辐射是一种有效的破乳方法且具有工业化应用前景.杨小刚^[17]试验对比了热化学法和微波化学法在原油乳状液破乳上的应用,发现微波化学法所需破乳剂用量更少,破乳时间更短.

目前,对微波辐射破乳预处理切削液废水的研究较少,且将微波后废水温度作为破乳效果主控参数的研究也较少,另外将能量利用率和有机物挥发占比作为确定微波最佳功率评判依据的研究几乎未见报道.因此,本研究对切削液废水采用微波破乳预处理,通过测量微波后切削液废水的 COD、粒径,对微波后有机物挥发量和微波能量利用率进行分析,综合确定切削液废水破乳预处理的最佳操作参数(即最佳微波功率、最适宜的破乳温度).

1 实验材料与方法

1.1 切削液废水

实验所用切削液废水来自天津某机械加工厂.该切削液废水的 COD 为 $15\,240\text{ mg/L} \pm 15\text{ mg/L}$, BOD_5 为 $1\,725\text{ mg/L} \pm 10\text{ mg/L}$,含油量为 $1\,918.34\text{ mg/L} \pm 5\text{ mg/L}$,粒径为 $15.25\ \mu\text{m} \pm 5\ \mu\text{m}$.

1.2 实验仪器

本实验使用的仪器主要包括 SANYO EM-L520H 微波炉(惠而浦(中国)股份有限公司);Water Bath SY-1230 恒温水浴箱;快速 COD 消解仪(杭州齐威仪器有限公司)和 DR1900 便携式可见分光光度计(上海世禄仪器有限公司);Hydro 2000 马尔文粒径分析仪.

1.3 实验操作方法

将盛有 560 mL 切削液废水的烧杯置于恒温水浴箱中,控制切削液废水初始温度为 $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 1.2\text{ }^\circ\text{C}$.后将切削液废水在不同微波功率下(150, 300, 450, 600, 700, 900 W)辐射到不同温度范围($40\sim 50$, $50\sim 60$, $60\sim 70$, $70\sim 80$, $80\sim 90$, $90\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$).辐射后废水静置 5 h,通过观察静置后废水情况:废水从上至下由清澈逐渐变为浑浊,因此根据自然分层情况将其分为上、中、下 3 层,其中上层为 160 mL,中层为 300 mL,下层为 100 mL,之后取样对各层废水测定其 COD 和粒径.

1.4 挥发有机物占比计算

各微波功率的最适宜破乳温度下,分别测定各层废水的 COD 浓度(C_i),将各层废水的 COD 浓度分别乘以该层的体积(V_i)得到各层 COD 的质量(M_i),之后通过差减法计算出切削液废水经微波辐射之后挥发到空气中的 COD 质量,公式分别如下

$$M_0 = C_0 V_0 \quad (1)$$

$$M_i = C_i V_i \quad (2)$$

$$M_{挥} = M_0 - \sum M_i \quad (3)$$

式中: M_0 表示原切削液废水的 COD 质量, mg; C_0 表示原切削液废水的 COD 质量浓度, mg/L; V_0 表示原切削液废水的体积, L; i 表示上、中、下, 分别代表微波辐射后的上层、中层和下层废水; M_i 表示上、中、下各层 COD 质量, mg; C_i 表示上、中、下各层 COD 质量浓度, mg/L; V_i 表示上、中、下各层废水体积, L; $M_{挥}$ 表示挥发到空气中的 COD 质量, mg.

挥发量 $M_{挥}$ 占 M_0 比值为

$$\eta_{挥} = \frac{M_{挥}}{M_0} \times 100\% \quad (4)$$

1.5 能量利用率计算

依据切削液废水辐射前后的温度、质量测量结果, 进行能耗计算, 其计算公式如下^[18]

$$P_{耗} = \frac{M_a C_p (T - T_0)}{\Delta t} \quad (5)$$

式中: $P_{耗}$ 为耗用功率, W; M_a 为样品质量, kg; C_p 为样品比热容^[19], 取 4 074 J/kg·°C; T 为辐射后样品温度, °C; T_0 为辐射前样品温度, °C; Δt 为辐射时间, s.

耗用功率 $P_{耗}$ 占输入功率 $P_{输}$ 的比值为

$$\varphi = \frac{P_{耗}}{P_{输}} \quad (6)$$

式中: φ 为 $P_{耗}$ 与 $P_{输}$ 的比值; $P_{输}$ 为耗用功率对应的输入功率, 分别为 150 W、300 W、450 W、600 W、700 W、900 W.

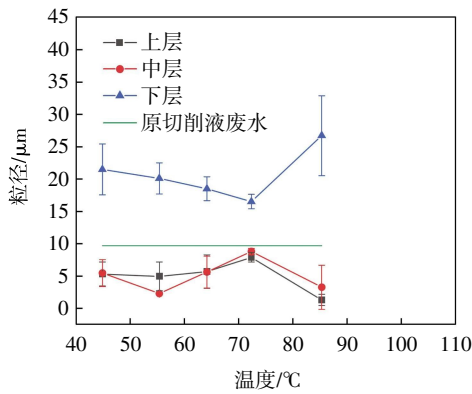
2 结果与讨论

2.1 微波辐射后切削液废水粒径变化

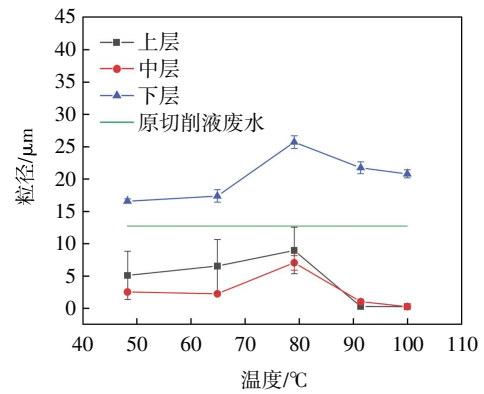
图 1 为各微波功率下, 辐射后切削液废水达到不同温度范围各层的粒径变化. 由图 1 可知, 不同辐射功率下所有温度范围内, 上层与中层的粒径差别不显著, 而下层粒径均大于上、中层, 这可能是由于经过微波辐射之后, 切削液废水中乳化液滴发生团聚, 静置后沉降至下层. 其次, 各微波功率下, 各层粒径随微波辐射后废水温度的变化而波动, 表明破乳效果与辐射后温度有关, 且在 70~80 °C 之间时, 各层粒径均有峰值.

2.2 微波辐射后切削液废水 COD 变化

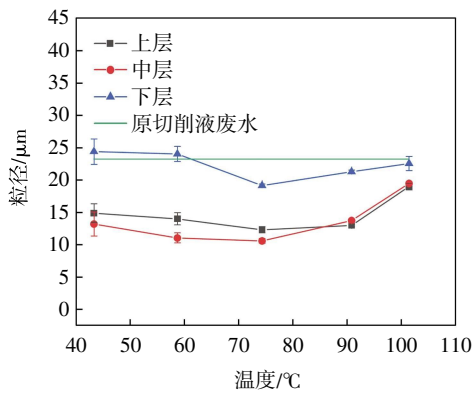
图 2 为各微波功率下, 辐射后切削液废水达到不同温度范围各层的 COD 变化. 由图 2 可知, 不同辐射功率下所有温度范围内, 上层与中层的 COD 差别不显著, 而下层 COD 均明显大于上、中层. 结合图 1 各层粒



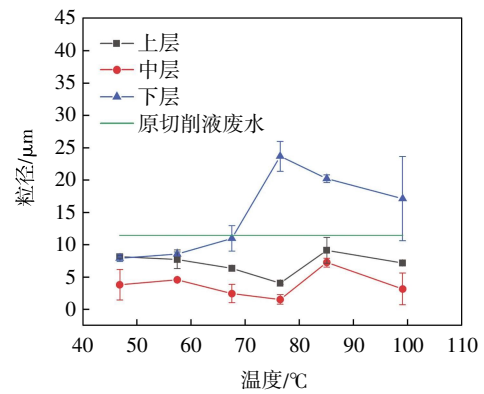
(a) 150 W



(b) 300 W



(c) 450 W



(d) 600 W

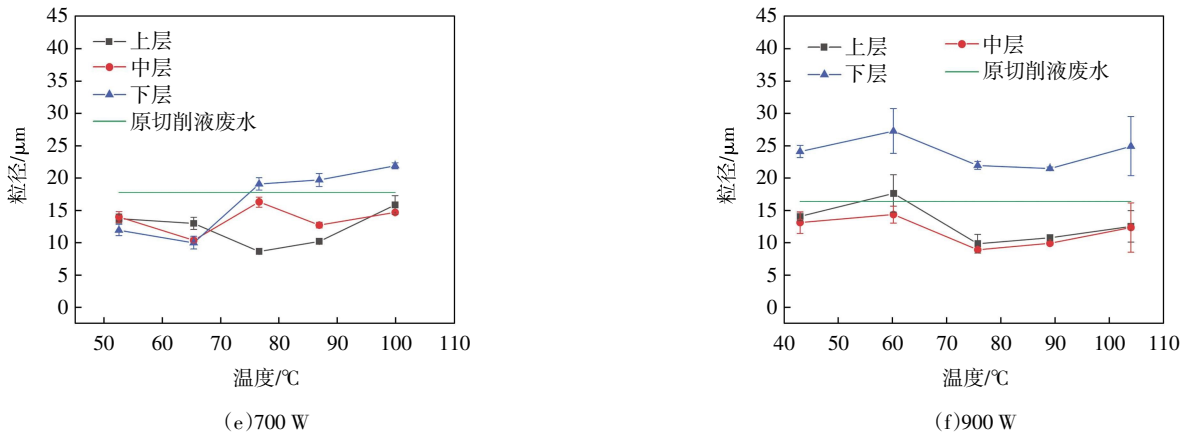


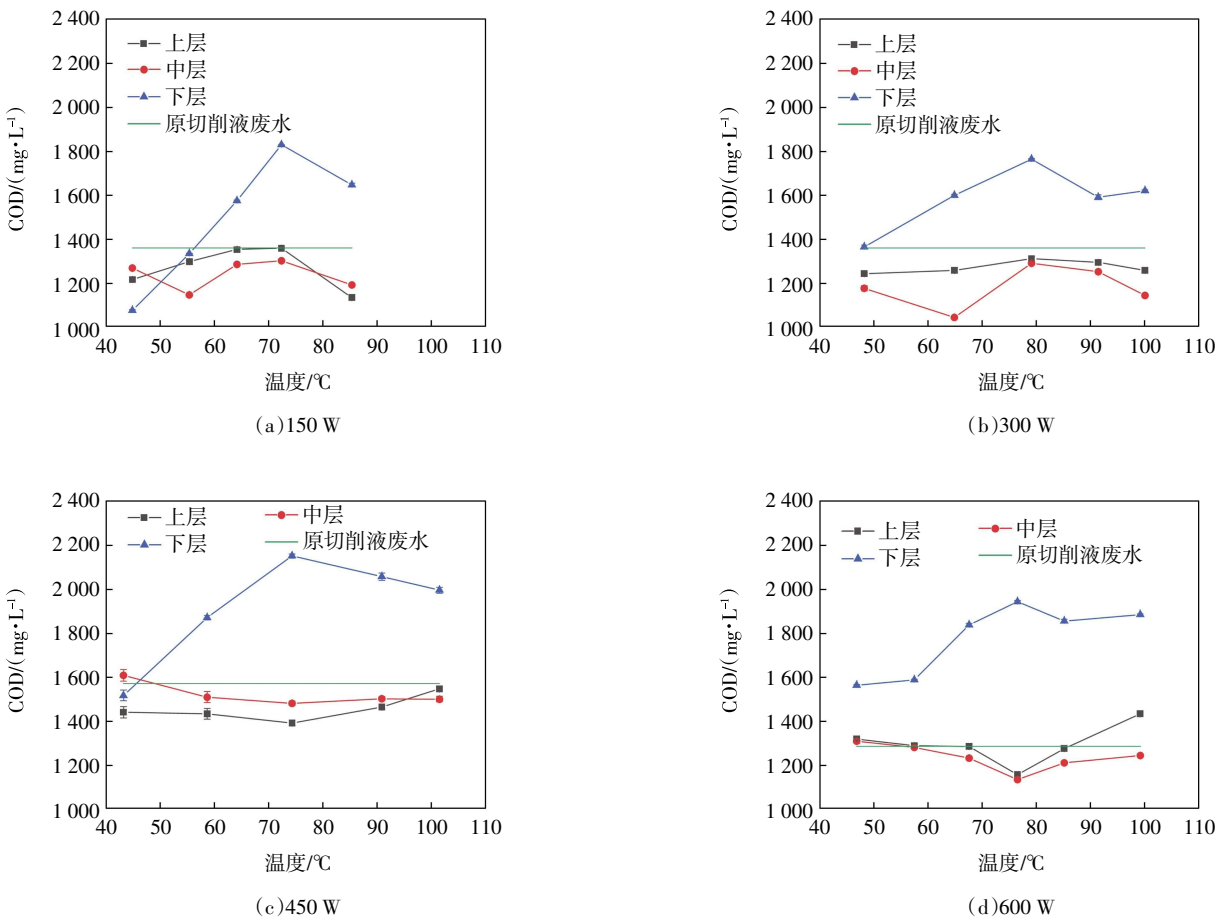
图 1 各微波功率下不同处理温度范围粒径变化

径测定结果可知,微波辐射后,切削液废水中乳化液滴发生团聚,静置后沉降至下层,因此微波后废水温度升高到一定程度后,下层 COD 明显高于上、中层.其次,各微波功率下,各层 COD 随微波辐射后废水温度的变化而波动,表明破乳效果与辐射后温度有关,且下层 COD 在 70~80 °C 之间时,均有高位峰值,因此确定 70~80 °C 温度范围为各辐射功率下的最佳破乳温度.

2.3 微波辐射后挥发量分析

图 3 为各辐射功率下切削液废水升温到不同温度范围内所需的时间.由图 3 可知,功率越小,升温到同一温度范围所需的时间越长;反之,功率越大,升温到同一温度范围所需的时间越短.

图 4 为各微波功率下有机物最大挥发量 ($\eta_{挥}$) 占比.由图 4 可知, $\eta_{挥}$ 随着功率的增加,先减小,在 450 W 和 600 W 达到最小值(0%),后随着功率的继续增加



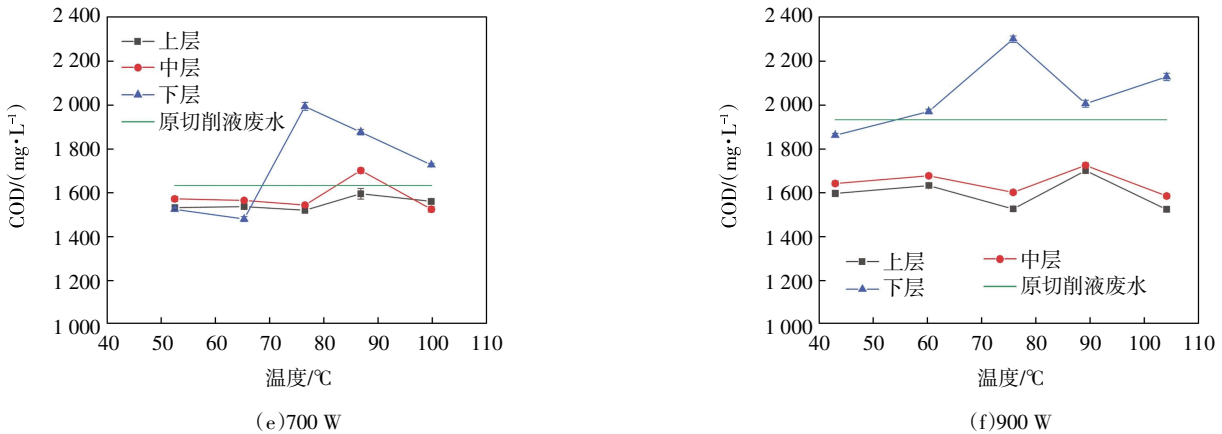


图 2 各功率下不同处理温度范围 COD 变化

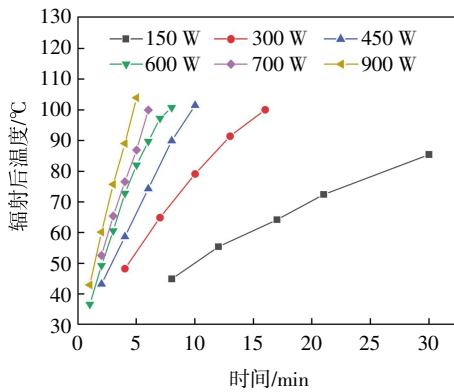


图 3 各功率下处理温度随辐射时间的变化

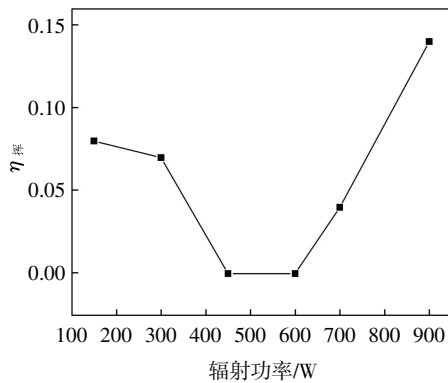


图 4 各微波功率下 η_{挥发} 值

输入功率的比值(φ)的变化情况. φ 越大表明能量利用率越大、能量损耗越小;反之表明能量利用率越低、能量损耗越大. 由图 5 可知, 在 30~85 °C 之间, 600 W 的 φ 值为最大, 150 W 为最小, 表明在该温度范围内, 600 W 的能量利用率最高、能量损耗最小, 150 W 的能量利用率最低、能量耗损最大; 在 85~100 °C 之间, 300 W 的 φ 值略低, 450 W、600 W、700 W、900 W, 各 φ 值相差不大. 结合各微波功率下, 有机物挥发占比分析及能耗分析, 得到最佳辐射功率为 600 W. 综上可知, 微波破乳预处理切削液最佳操作条件为: 微波辐射功率 600 W, 破乳废水温度在 70~80 °C 之间.

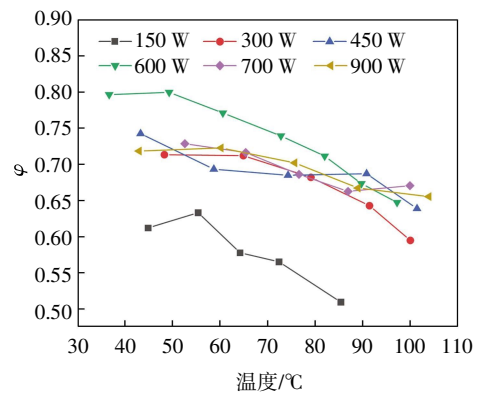


图 5 各功率下 φ 随处理温度的变化

而增大. 原因可能是小功率(150 W、300 W)达到同一温度范围所需要的时间更长, 因此挥发量会增大; 而大功率(700 W、900 W)虽然能够在短时间内达到同一温度范围, 但是因为功率过大, 也会导致挥发量增加; 而在 450 W 和 600 W 微波辐射下, 功率和微波时间均适中, 没有有机物挥发到空气, 最有利于空气污染防治.

2.4 能耗分析

图 5 为各功率下, 不同温度范围内, 耗用功率与

3 结论

本研究采用微波辐射破乳预处理切削液废水, 将微波功率和微波后废水温度作为破乳效果的主控参数, 对微波后各层切削液废水的 COD 和粒径变化进行了测量, 并对不同微波功率下能耗和有机物挥发量进行了分析, 研究得到结论如下:

(1) 各微波辐射功率下, 废水最佳破乳温度均在70~80 ℃之间.

(2) 微波辐射功率为450 W和600 W时, 没有有机物挥发到空气中.

(3) 微波后废水温度在30~85 ℃之间时, 微波功率600 W的能量利用率最高、能量损耗最小.

(4) 最终确定辐射功率600 W, 微波后废水温度在70~80 ℃之间, 为微波破乳预处理切削液废水最佳操作参数.

参考文献

- [1] 巴索国际贸易(上海)有限公司. 金属切削液减少刀具磨损超过20%[J]. 现代制造, 2020(14): 29.
- [2] WU X F, LI C H, ZHOU Z M, et al. Circulating purification of cutting fluid: an overview[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(9/10): 2565–2600.
- [3] GREELEY M, RAJAGOPALAN N. Impact of environmental contaminants on machining properties of metalworking fluids[J]. Tribology International, 2004, 37(4): 327–332.
- [4] 李延珍, 张洪静. 废金属切削液的处理[J]. 现代化工, 2021, 41(增刊1): 282–285.
- [5] AL-HUSAINI I S, YUSOFF A R M, LAU W J, et al. Fabrication of polyethersulfone electrospun nanofibrous membranes incorporated with hydrous manganese dioxide for enhanced ultrafiltration of oily solution[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 212: 205–214.
- [6] KUMAR S, MANDAL A, GURIA C. Synthesis, characterization and performance studies of polysulfone and polysulfone/polymer-grafted bentonite based ultrafiltration membranes for the efficient separation of oil field oily wastewater[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 102: 214–228.
- [7] PARK R M. Risk assessment for metalworking fluids and respiratory outcomes[J]. Safety and Health at Work, 2019, 10(4): 428–436.
- [8] SOKOVIĆ M, MIJANOVIĆ K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(1): 181–189.
- [9] NAJIHA M S, RAHMAN M M, YUSOFF A R. Environmental impacts and hazards associated with metal working fluids and recent advances in the sustainable systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1008–1031.
- [10] 国家危险废物名录(2021年版)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(4): 18–46.
- [11] 沈连捷, 刘佳莉, 徐嘉乐. 一种废切削液资源化技术研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(9): 101–104.
- [12] MOOSAI R, DAWE R A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup[J]. Separation and Purification Technology, 2003, 33(3): 303–314.
- [13] 李雪伟. 废切削乳化液处理工艺研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- [14] 韩卓然, 于静洁, 王少坡, 等. 铝盐和铁盐混凝对切削液废水中有机物的去除特性[J]. 工业水处理, 2018, 38(3): 81–85.
- [15] GÖDE J N, HOEFLING SOUZA D, TREVISAN V, et al. Application of the Fenton and Fenton-like processes in the landfill leachate tertiary treatment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(5): 103352.
- [16] 傅大放, 吴海锁. 微波辐射破乳的试验研究[J]. 中国给水排水, 1998(4): 8–10.
- [17] 杨小刚. 微波辐射原油破乳技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [18] 张兆镗. 微波加热过程中的热平衡与热失控[C]//第11届中国微波能应用学术研讨会论文集. 南京, 2003: 22–27.
- [19] 邵芳, 刘战强, 万熠. 基于热力学熵的金属切削液比热容的选用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008(8): 82–85.