节能环保与综合利用

铁矿烧结疏水性粉尘高效润湿界面化学研究

赵宇辰，李梦闪，俸 曾，刘小溪，唐鸿鹄，王 丽，孙 伟
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 铁矿烧结过程会产生大量 $PM_{2.5}$ 粉尘，其中富含重金属、二噁英等有毒物质，既严重污染环境，又危害人体健康，其表面特殊的强疏水性更是严重制约了该类粉尘的高效湿式除尘与有价元素湿法冶金回收。文章详细分析了铁矿烧结粉尘的元素、物相组成与表面润湿性等特征，系统探究了不同类型非离子型表面活性剂对疏水性粉尘的润湿规律，结合 FT-IR 与 XPS 表征对非离子型表面活性剂高效润湿铁矿烧结粉尘机理进行初步探明。结果表明：铁矿烧结粉尘的疏水性源自其表面由烷烃链和芳香基组成的疏水外壳；使用非离子表面活性剂聚乙二醇辛基苯基醚（Triton X-405）溶液对疏水性粉尘进行润湿有最好的润湿效果。初步推断该高效润湿界面化学过程：Triton X-405 通过其分子中的疏水基与铁矿烧结粉尘颗粒表面的疏水外壳发生吸附，并将其分子中的亲水基如羟基、醚键等引入粉尘表面，以实现强疏水性粉尘的高效润湿。本研究可为铁矿烧结烟尘的粉尘控制与湿法回收提供理论基础。

关键词： 铁矿；烧结粉尘；润湿；表面性质；界面化学；动态接触角
中图分类号： X757；TQ131.13 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）05－0086－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.075

Research on efficient wetting interface chemistry of hydrophobic dust of iron ore sintering

ZHAO Yuchen，LI Mengshan，FENG Zeng，LIU Xiaoxi，TANG Honghu，WANG Li，SUN Wei
（School of Minerals Processing and Bioengineering，Central South University，Changsha 410083，Hunan，China）

Abstract: A large amount of $PM_{2.5}$ dust，rich in heavy metals，dioxins and other toxic substances，will be produced during the iron ore sintering process，not only seriously polluting the environment，but also endangering human health. The special strong hydrophobicity on the surface of $PM_{2.5}$ dust seriously restricts the efficient wet dust removal and hydrometallurgical recovery of valuable elements of this type of dust. In this paper，the elements，phase composition and surface wettability of iron ore sintering dust are analyzed in detail，the wetting law of hydrophobic dust by different types of nonionic surfactants is systematically explored，and the mechanism of efficient wetting of iron ore sintering dust by nonionic surfactants is preliminarily explored by FT-IR and XPS manifestation. The results show that the hydrophobicity of iron ore sintering dust comes from the hydrophobic shell composed of alkane chains and aromatic base on its surface. Using non-ionic surfactant polyethylene glycol octylphenyl ether（Triton X-405）solution has the best wetting effect to moisturize hydrophobic dust. It is preliminarily inferred that the chemical process of the efficient wetting interface is as follows: Triton X-405 adsorbs the hydrophobic shell on the surface of iron ore sintering dust particles through the hydrophobic group in its molecule，and introduces the hydrophilic groups in its molecule such as hydroxyl groups and ether bonds into the dust surface to achieve

收稿日期： 2022－06－10；**修回日期：** 2022－08－23
基金项目： 国家自然科学基金资助项目（52004335），湖南省科技创新计划项目（2023RC3067），湖南省自然科学基金资助项目（2023JJ20071）
作者简介： 赵宇辰（2000—），男，硕士研究生，从事固体废弃物综合利用方面的研究。
通信作者： 唐鸿鹄（1988—），男，副教授，硕士生导师，从事固体废弃物综合利用及浮选理论与工艺方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

efficient wetting of strong hydrophobic dust. This research can provide a theoretical basis for dust control and wetting recovery of iron ore sintering dust.

Key words: iron ore; sintering dust; wetting; surface property; interface chemistry; dynamic contact angle

铁矿烧结工艺是传统钢铁冶炼工艺中的重要流程，而铁矿烧结粉尘排放量占到了全国工业粉尘排放总量的 5.6%～6.4%[1]，据估算全国烧结粉尘年产量高达 1 370 万～2 750 万吨[2]。这些粉尘中含大量的可吸入颗粒物 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$、重金属(Pb、Cu、Ag、Fe 等)和二噁英等[3-4]，会严重污染环境并危害人身健康，环保部早已将其列入重点污染行业大气污染限期治理行动计划中。《湖南省“十三五”环境保护规划》也将钢铁行业列为工业气型污染源重点治理行业，继续推进企业清洁生产技术改造。

已有研究发现铁矿烧结粉尘具有强疏水界面性质[5-6]，但针对这类疏水性 $PM_{2.5}$ 粉尘的综合研究少有开展。同时，也缺乏针对性的润湿、除尘理论及工艺研究。现有的粉尘捕集装备 90% 左右采用的是性价比较高的静电除尘器，对 10 μm 以下(特别是 $PM_{2.5}$ 以下)的微细粒子难以捕集，大量的微细粒子的逃逸造成烟气颗粒物质量浓度排放过大，难以达到现行大气颗粒物排放要求[7]。而对人体有害的主要污染物大多聚集在 10 μm 以下的粉尘颗粒中，大气中大量的微细粒子严重影响了人们的身体健康[8]。

目前，国内的钢铁烟尘处理方法多采用传统混料返回烧结或直接堆砌处理，容易造成二次扬尘污染和土壤污染，并且烧结粉尘中大量的有色金属资源未充分利用。大多钢铁厂产生的粉尘中都含有可供提取的 Fe、Zn、Cu、Pb 等金属元素，NaCl、KCl 等物质的质量分数也通常在 20%～30%[9-10]。这些元素和物质多以盐类有色金属物质存在于烧结粉尘当中，用传统的方法提取和富集这些元素较为困难，而现有的铁矿烧结粉尘综合利用技术也只能针对其中的个别金属元素进行回收，其表面的强疏水特性也使常规回收利用技术更难以实施。

因此，开展铁矿烧结疏水性粉尘界面化学基础研究可为疏水性粉尘高效降尘与湿法回收处理提供方法参考，同时有利于解决煤炭燃烧、垃圾焚烧产生的疏水性粉尘难润湿、难除尘、资源回收不充分等问题。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用代表性铁矿烧结粉尘样品收集自中国某钢铁公司静电除尘器四级电场除尘产品，其元素与物相分析分别见表 1 和图 1。由表 1 和图 1 可知，该铁矿烧结粉尘中主要有价元素有碱金属如 K、Na、Rb 等，有色金属如 Pb、Cu、Zn 等。此外，还有少量的 Fe、Mn、Ca 等元素，其中主要的物相组成为 KCl、NaCl、$K_3Na(SO_4)_2$。

表 1　铁矿烧结粉尘主要元素成分(质量分数)

Table 1　Main composition of iron ore sintering dust　　%

O	F	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K
21.91	0.494	7.185	0.155	0.139	0.208	0.014	6.999	24.425	29.212
Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Se	Br	Rb	Pb	Bi
1.638	0.039	4.108	0.361	0.121	0.038	0.575	0.239	2.106	0.026

研究使用非离子型表面活性剂聚氧乙烯辛基苯基醚(结构式见图 2)作为润湿剂，其主要型号有聚氧乙烯聚合度较高的 Triton 系列与聚合度较低的 OP 系列，试剂均为分析纯，无须进一步处理。

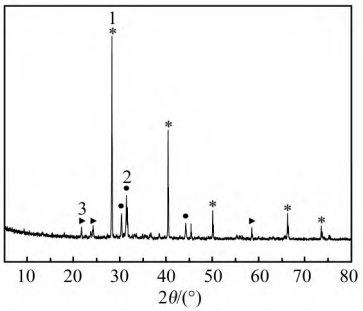
1.2　试验方法

1.2.1　动态接触角测定

使用 JC-2000R8 动态接触角测试仪测量非离子型表面活性剂在样品表面的动态接触角。首先将 0.5 g 粉尘样品用模具压片法制成测试用样品表面，压强为 500 Pa，样品表面直径为 5 cm，使用去离子水、表面活性剂溶液作为液滴(图 3)，测量液滴从接触试样表面后一定时间内接触角的实

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时变化，液滴大小为 3 μL。



1—KCl；2—$K_3Na(SO_4)_2$；3—NaCl。

图 1 铁矿烧结粉尘 XRD 图谱

Fig. 1 XRD diagram of iron ore sintering dust

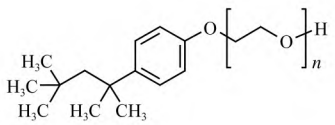


图 2 聚氧乙烯辛基苯基醚结构式

Fig. 2 Structural formula of polyoxyethylene octylphenyl ether

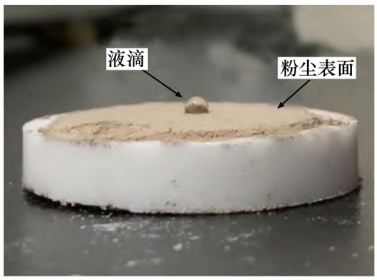


图 3 液滴在粉尘表面形成接触角

Fig. 3 Droplets form contact angles on the dust surface

1.2.2 润湿溶解行为研究

为探究非离子表面活性剂实际润湿样品粉尘的效果，开展试验：取 20.0 g 样品粉尘，用 100 mL 润湿剂 Triton X-405(聚乙二醇辛基苯基醚，$C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$，$n=35$) 溶液在磁力搅拌作用下进行搅拌溶解，分别设置以搅拌溶解时间、搅拌转速、Triton X-405 用量的质量百分浓度作为变量，观察粉尘样品在不同条件下的润湿溶解行为。同时每组试验用 100 mL 去离子水搅拌溶解样品粉尘作对照试验。对润湿后的样品过滤、洗涤、烘干，称量剩余固体的质量，对固相进行元素成分检测并计算其中主要有价元素的溶出率及富集比。

1.2.3 红外光谱分析

使用 IRAffinity 型傅里叶变换红外光谱仪对经 Triton X-405 润湿处理前后的样品粉尘进行检测。采用 KBr 压片法，取烘干后的样品粉尘与 KBr 粉末按质量比 1∶100 在玛瑙研钵中充分研磨、混匀。用压片机在 15 MPa 压强下压片，保压时间为 30 s。设置红外光谱仪波数范围 4 000 ~ 400 cm^{-1}，分辨率为 2 cm^{-1}，扫描次数为 16 次。

1.2.4 XPS 检测

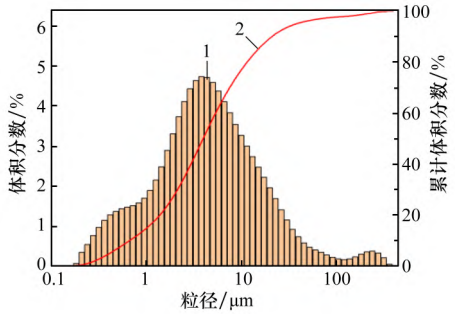
使用 ESCALLAB 250 Xi 型 X 射线光电子能谱仪对经 Triton X-405 润湿处理前后的粉尘样品进行 XPS 检测，测试全谱和 C 元素的精细谱。全谱扫描时，测试通能为 100 eV，步长为 1.0 eV；对 C 元素精细扫谱时通能为 50 eV，步长为 0.05 eV。荷电效应校正采用 C1s(284.6 eV)。

2 结果与讨论

2.1 非离子表面活性剂润湿过程动态接触角分析

2.1.1 铁矿烧结烟尘疏水现象

粉尘样品的粒度分布曲线与累计分布律见图 4。由图 4 可知，其粒级为微米级或亚微米级，粒度呈三峰分布，最集中分布在 3.8 ~ 4.3 μm 范围内。样品的 D_{10} 为 0.77 μm，D_{50} 为 4.55 μm，D_{90} 为 23.49 μm(D_{10}、D_{50}、D_{90} 分别为粉尘样品的累计粒度分布百分数达到 10%、50%、90% 时所对应的粒径)。粉尘样品的粒度极其微细，使其具有较强的表面活性[11]，在湿法处理烧结粉尘的过程中，可观察到其具有强疏水性，水难以在其表面快速铺展。粉尘与水接触后会聚团漂浮在溶液表层[12]，难以被润湿，见图 5。



1—粒径分布率；2—累计分布率。

图 4 粉尘样品粒度分布

Fig. 4 Particle size distribution of the sintering dust sample

2.1.2 水润湿铁矿烧结烟尘动态接触角

用压片法测得水在粉尘表面的接触角[θ,(°)]为116°,90 s后接触角稳定为110°(图6)。粉尘

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 5　烧结粉尘疏水现象

Fig. 5　Hydrophobicity of sintering dust

表面表现出极强的疏水性，严重阻碍了颗粒的分散和溶液的润湿，影响了湿法综合回收的进行。

2.1.3　非离子表面活性剂润湿铁矿烧结粉尘动态接触角

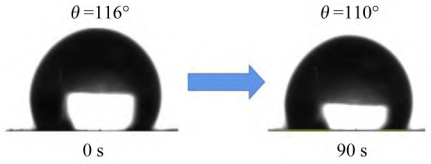


图 6　去离子水润湿烧结粉尘接触角变化

Fig. 6　Contact angle changes of sintered dust wetted with deionized water

润湿剂在固体表面润湿存在 3 个过程[13]：首先，液滴在固液界面上形成初始接触角；其次，在初始接触角形成后润湿剂在矿粒表面扩散或下渗，接触角逐渐变小；最后，接触角稳定在一个最小的数值。图 7 为 0.02% Triton X-405 溶液润湿样品粉尘过程接触角的变化。

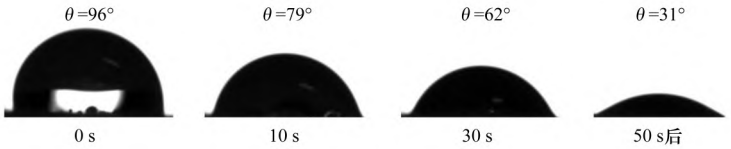
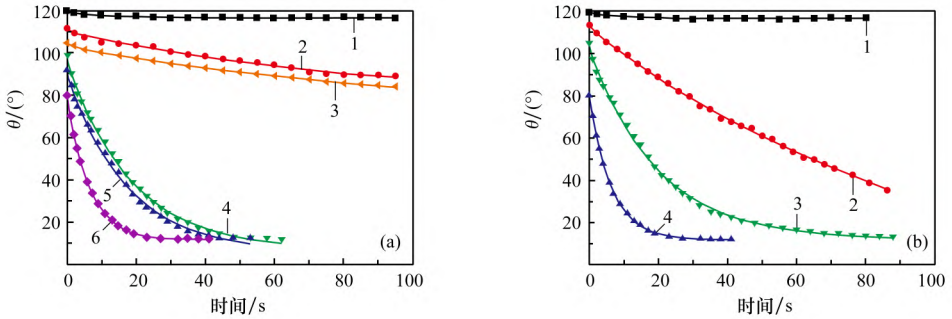


图 7　0.02% Triton X-405 溶液液滴在铁矿烧结烟尘表面润湿过程的动态接触角照片

Fig. 7　Dynamic contact angle of sintering dust during 0.02% Triton X-405 wetting

试验选用 Triton 系列、OP 系列的多种非离子型表面活性剂对样品进行润湿，具体结果如图 8 所示。由图 8(a) 可知，Triton 系列非离子表面活性剂对粉尘样品的润湿效果强于 OP 系列。对比 Triton 系列的 3 种润湿剂(Triton X-45、Triton X-100、Triton X-405)在 0.1% 质量百分浓度(以下统称“浓度”)下的润湿效果，Triton X-405 润湿时接触角下降最快，润湿速率最高。Triton 系列 3 种表面活性剂的结构差别为分子中聚醚的链长不同，Triton X-405 的聚醚链最长，基团活性较高。此外，Triton X-45、Triton X-100 和 Triton X-405 三种试剂的 HLB 值分别为 9.5、14.0 和 17.8，Triton X-405 的 HLB 值在三者中最高，与粉尘颗粒作用后，粉尘表现出较强的亲水性。



(a) 质量百分浓度为 0.1% 不同表面活性剂：1—H_2O；2—OP-10；3—OP-20；4—Triton X-45；5—Triton X-100；6—Triton X-405；(b) 不同质量百分浓度的 Triton X-405 溶液：1—H_2O；2—0.01%；3—0.02%；4—0.1%。

图 8　粉尘润湿过程动态接触角

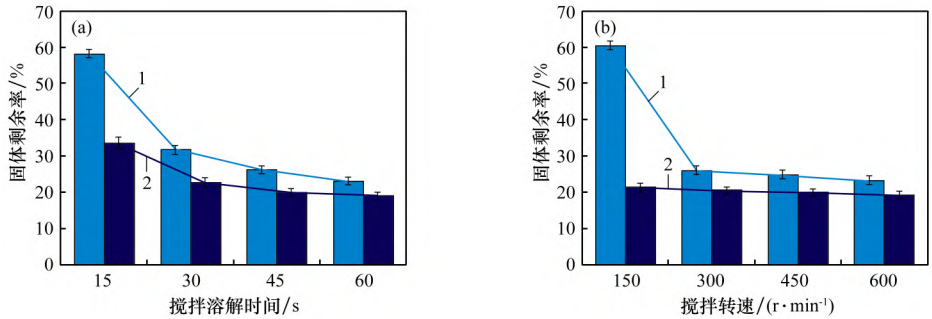
Fig. 8　Dynamic contact angle during wetting dust

同时，由图 8(b) 可知：当 Triton X-405 浓度为 0.01% 时，接触角无法稳定在一个较小的数值；当其浓度为 0.02% 时，接触角最后稳定在 10°，但润湿所用的时间较长；当其浓度达到 0.1% 时，接触角在短时间内快速下降，20 s 时稳定在 10°，润湿效果最好。因此，最终确定最佳的润湿剂为 0.1% Triton X-405 溶液。

2.2　疏水性粉尘高效润湿溶解行为研究

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用非离子表面活性剂搅拌溶解润湿样品粉尘过程中，搅拌时间、搅拌速率等条件对润湿溶解效果有较大的影响。图 9(a) 为在 300 r/min 转速下，20.0 g 样品粉尘经 100 mL 去离子水和 0.1% Triton X-405 搅拌润湿溶解后固体剩余率与搅拌时间的关系。图 9(b) 为搅拌时间为 60 s 时，固体剩余率与搅拌转速的关系。由图 9 可以看出，在相同条件下，粉尘在 0.1% Triton X-405 中的溶解量要大于在去离子水中的溶解量，尤其是在短时间，低转速的搅拌条件下，两者溶解量的差距非常大。由图 10 实物图也可以看出粉尘溶解量的差距，在去离子水中搅拌时部分颗粒没有被润湿，而是聚团漂浮在水面上。这说明在机械作用相同时，Triton X-405 对疏水性粉尘的润湿效果比水更好。

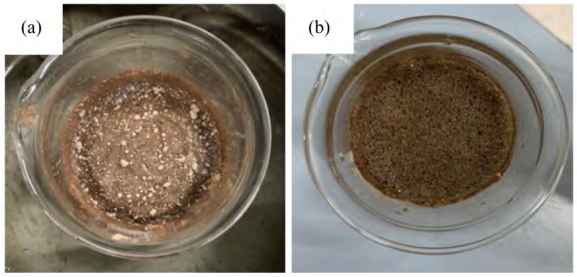


(a) 搅拌时间与固体剩余率的关系；(b) 搅拌转速与固体剩余率的关系

1—H_2O；2—0.1% Triton X-405。

图 9 机械搅拌强度对溶解效果的影响

Fig. 9 Influence of mechanical stirring strength on dissolution



(a) 去离子水；(b) 0.1% Triton X-405 溶液

图 10 粉尘润湿溶解照片

Fig. 10 Photos of sintering dust dissolution

20.0 g 样品粉尘经上述相同的溶解、洗涤、过滤、烘干等处理后，所得剩余固体质量随 Triton X-405 浓度的变化见图 11。由图 11 可知，Triton X-405 浓度越高，溶解剩余的固体质量越少，粉尘溶解越充分，溶液对粉尘的润湿效果也更好。

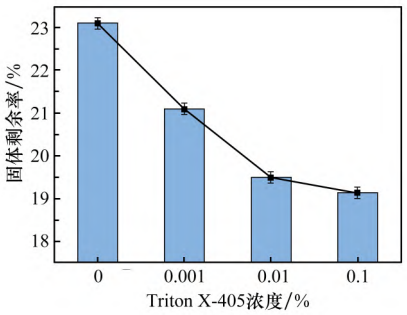


图 11 溶解后固体剩余量与溶解所用溶液 Triton X-405 浓度关系

Fig. 11 Relationship between residual solid after dissolution and Triton X-405 content of solution used for dissolution

经 X 射线荧光光谱(XRF)检测，在 0.1% Triton X-405 与去离子水溶解下，部分元素的质量分数、溶出率与富集比分别见表 2 和表 3。由表 2 可知：原始样品经 0.1% Triton X-405 润湿溶解后，其中 Na、K、Cl、Rb 等元素的溶出率均高于在水中溶解的溶出率，都在 97% 以上，这些元素可转移至液相中回收。由表 3 可知：粉尘中 Fe、Cu、Zn、Mn、Pb 等金属元素在样品润湿溶解后富集于固相，其中有较高价值的 Pb、Zn、Cu 金属元素均有较高富集比，后续可针对这些元素对溶解润湿后的粉尘进行进一步选别。

通过探究疏水性粉尘搅拌润湿溶解过程中搅拌时间、搅拌转速、表面活性剂添加浓度对溶解效果的影响，可以发现：在相同的机械搅拌条件下，用 Triton X-405 处理时，可溶性元素的浸出率、重金属元素的富集比均比用去离子水时有大幅提升。同时可知，搅拌时间、搅拌转速对溶解效果的影响较大，但即使在较高机械强度的搅拌

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　润湿溶解前后烧结粉尘中部分元素的质量分数与溶出率

Table 2　Dissolution rate and content of some elements in sintering dust before and after wetting dissolution

元素	润湿前质量分数/%	H_2O 中溶解		Triton X-405 中溶解	
		质量分数/%	浸出率/%	质量分数/%	浸出率/%
Na	7. 18	2. 96	90. 89	0. 46	98. 65
K	29. 21	10. 98	91. 69	3. 18	97. 72
Cl	24. 42	5. 57	94. 96	1. 54	98. 68
Rb	0. 24	0. 12	88. 95	0. 02	98. 25

表 3　润湿溶解前后烧结粉尘中部分重金属元素的质量分数与富集比

Table 3　Enrichment ratio and content of some heavy metal elements in sintering dust before and after wetting dissolution

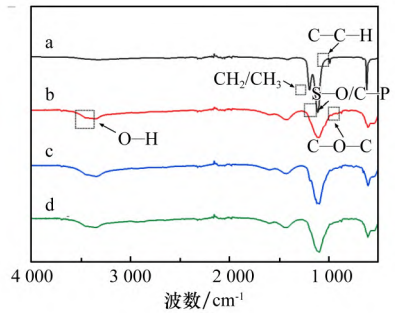
元素	润湿前质量分数/%	H_2O 中溶解		Triton X-405 中溶解	
		质量分数/%	富集比	质量分数/%	富集比
Mn	0. 04	0. 16	3. 95	0. 18	4. 50
Fe	4. 11	18. 08	4. 40	21. 31	5. 18
Cu	0. 36	1. 55	4. 31	1. 88	5. 22
Zn	0. 12	0. 47	3. 92	0. 59	4. 92
Pb	2. 11	9. 29	4. 40	10. 75	5. 09

条件下，烧结粉尘在水中的可溶性元素浸出率和重金属元素富集比也均小于在 Triton X-405 溶液中。因此，工业实践过程中，采用 Triton X-405 溶液进行烧结烟尘的润湿浸出，一方面可以大幅降低搅拌强度和能源消耗；另一方面可以显著提升其中可溶性元素的浸出率、重金属元素的富集比；再一方面，还可以降低处理过程中疏水性粉尘的二次扬尘，有效减少环境污染的风险。

2. 3　红外光谱分析

为探究粉尘表面强疏水性的成因及非离子表面活性剂高效润湿粉尘的机理，对 Triton X-405 溶液润湿前后的样品进行傅里叶红外光谱(FT-IR)分析，测试结果见图 12。由图 12 可知：处理前，粉尘在 1 410 cm^{-1}附近出现了芳香基伸缩震动吸收峰；在 990 cm^{-1}处出现了芳香环 C—C—H 平面外弯曲振动吸收峰[14]，表明有芳香族有机物存在；此外，1 200 cm^{-1}处的吸收峰表明有烷烃链的存在[15]。因此，可以推断样品粉尘表面含有烷烃与芳香族有机物，这是导致粉尘表面疏水的主要原因。

此外，与未润湿的粉尘相比，经 Triton X-405 润湿后的样品在 3 300 ~ 3 500 cm^{-1}附近新出现一条宽峰，对应羟基(—OH)的缔合峰；1 100 cm^{-1}处的C—O基团伸缩振动峰证明有含氧亲水基团



(a) 粉尘原样；Triton X-405 溶液润湿浓度；(b) 0. 001%；(c) 0. 01%；(d) 0. 1%。

图 12　Triton X-405 溶液润湿前后样品 FT-IR 分析

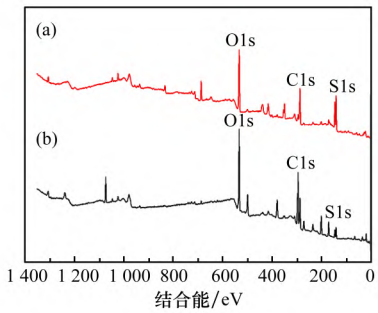
Fig. 12　FT-IR analysis of samples before and after wetting with Triton X-405 solution

的存在，在 874 cm^{-1}处新出现醚键(C—O—C)的对称振动吸收峰，峰强随 Triton X-405 浓度的提高而增强，这初步说明了 Triton X-405 在粉尘表面发生了吸附，分子中的醚键提高了粉尘表面的亲水性。

2. 4　XPS 分析

为进一步探究 Triton X-405 在粉尘表面的吸附机理，对润湿溶解前后的粉尘进行 X 射线光电子能谱分析(XPS)。粉尘经 0. 1% Triton X-405 润湿前后的 XPS 全谱图如图 13 所示。由图 13 可知，润湿后粉尘的 O1s 与 C1s 特征吸收峰强度较润湿前更强，可推断润湿后粉尘表面亲水官能团(—OH、C—O—C 等)含量增多。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

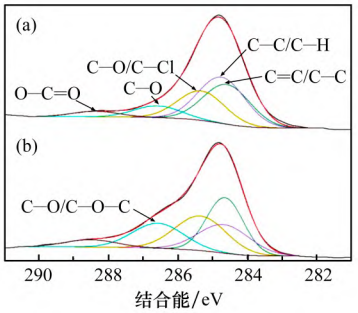


(a) 粉尘原样; (b) 粉尘经 0.1% Triton X-405 溶液润湿

图 13 TritonX-405 处理前后粉尘表面 XPS 全谱

Fig. 13 XPS spectrum of sintering dust before and after treated by Triton X-405

粉尘样品的 C1s 窄区 XPS 能谱如图 14 所示，经分峰处理，各峰值对应的结合能可确定 C 的化学环境[16]：284.5、285.0 eV 分别对应芳香环中的 C—C/C═C 键、脂肪烃中的 C—C/C—H 键[17-18]；285.6、286.15、289.0 eV 分别对应 C—O/C—Cl 键、醚键或烷氧基(C—O—C/C—O)、羧基碳(O—C═O)[19-20]；各峰的相对面积可表示对应基团的相对原子百分含量(表 4)。由图 14 与表 4 可知，润湿前，粉尘中芳香环 C—C/C═C 键相对原子百分含量为 38.58%，脂肪烃 C—C/C—H 键相对原子百分含量为 31.50%，疏水基团在粉尘表面占比较大。亲水性含氧基团(C—O/C—Cl、C—O—C/C—O、C═O)总的相对原子百分含量为 29.92%，占比较小。而润湿后的粉尘中，醚键与烷氧基(C—O—C，C—O)的相对原子百分含量从 6.83% 提高到了 18.44%，亲水性含氧基团



(a) 粉尘原样; (b) 粉尘经 0.1% Triton X-405 溶液润湿

图 14 Triton X-405 处理前后粉尘表面 C 元素的窄区扫描图谱

Fig. 14 Narrow zone scanning spectroscopy of C elements on dust surface before and after treated by Triton X-405

表 4 粉尘表面基团的结合能与相对原子百分含量

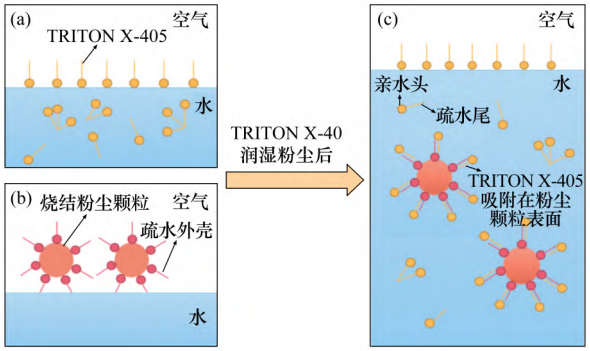
Table 4 Binding energy and relative atom content of functional group on sintering dust

基团	结合能/eV	相对原子百分含量/%	
		润湿前	润湿后
芳香环 C—C/C═C	284.50	38.58	29.41
烷烃 C—C/C—H	285.00	31.50	21.10
C—O/C—Cl	285.60	19.84	25.62
C—O—C/C—O	286.15	6.83	18.44
C═O	289.00	3.25	5.43

(C—O/C—Cl、C—O—C/C—O、C═O)总的相对原子百分含量达到了 49.49%。C—O—C/C—O 基团含量的提高进一步证明了 Triton X-405 在粉尘表面上充分吸附，使粉尘表面亲水性提高。

2.5 润湿机理分析

FT-IR 与 XPS 的检测结果证实了 Triton X-405 分子在粉尘表面发生吸附，推测其吸附机理：当 Triton X-405 溶液浓度低于临界胶团浓度时，少部分 Triton X-405 分子在水面上呈单分子层排列，其余分子存在于溶液当中[图 15(a)]。疏水性粉尘表面紧密围绕着一层由烷基链与芳香族有机物组成的疏水外壳，使粉尘表面具有强疏水性，导致粉尘颗粒漂浮在水面上而不被水润湿[图 15(b)]。当 Triton X-405 分子进入水与粉尘组成的体系中时，Triton X-405 分子在粉尘表面发生物理吸附，吸附作用力主要为 Triton X-405 分子中苯环与粉尘表面芳香基之间的 π-π 堆叠作用，以及 Triton X-405 分子的疏水端与粉尘表面疏水基团之间的相互作用



(a) Triton X-405 溶液; (b) 烧结粉尘颗粒在水面疏水漂浮; (c) 烧结粉尘颗粒被 Triton X-405 润湿

图 15 Triton X-405 润湿粉尘颗粒机理示意

Fig. 15 Illustration of the possible mechanism of sintering dust wetted by Triton X-405

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力。这导致溶液中 Triton X-405 分子通过其疏水尾吸附到粉尘表面，而其另一端的亲水头则朝外，与水亲和［图 15(c)］。因此，表面吸附了 Triton X-405 的粉尘表面亲水性提高，能被高效润湿。此外，Triton X-405 对铁矿烧结粉尘的高效润湿也可为钢铁厂粉尘收集湿法处理方案提供参考。

2.6　铁矿烧结粉尘湿法润湿与回收工艺展望

铁矿烧结粉尘中有价元素的赋存多以盐类有色金属矿物存在，在粉尘能被润湿的前提下，可采用湿法处理对其中的各种资源进行回收[21-22]，见图 16。由图 16 可知，烧结粉尘在充分润湿浸出后，Na、K、Rb 等碱金属进入浸出液，可通过重结晶、离子交换等方法提取。金属则被富集在浸出渣中，Pb、Zn、Cu 等有色金属可通过浮选等方法提取作为金属原料，剩余的黑色金属则返回烧结。

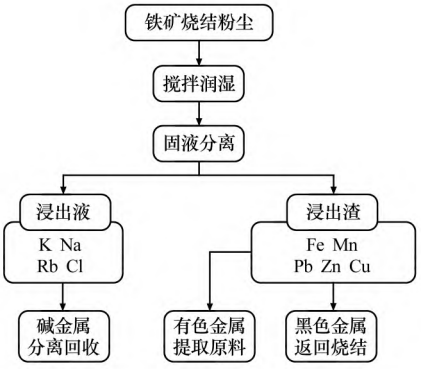


图 16　铁矿烧结粉尘湿法润湿与有价组分回收基本流程

Fig. 16　Basic flow of wetting and recovery of valuable components of iron ore sintering dust

3　结　论

(1) 铁矿烧结粉尘表面具有很强的疏水性，严重阻碍粉尘的湿法处理。非离子型表面活性剂 Triton X-405 可以高效润湿疏水性粉尘。在 0.1% 的质量百分浓度下，Triton X-405 可以在 20 s 内快速润湿粉尘，润湿效果最好。非离子表面润湿剂的润湿效果随活性基团浓度的提高而增强。

(2) 粉尘表面的烷烃链与芳香基是造成烧结粉尘表面疏水的主要原因。非离子表面活性剂 Triton X-405 高效润湿粉尘的机理为：Triton X-405 分子的疏水端通过 π-π 堆叠作用与疏水基团相互作用力吸附在粉尘表面，其另一端的亲水基团(C—O—C)暴露在外，提高了粉尘表面整体的亲水性，实现粉尘的高效润湿。

(3) 使用非离子型表面活性剂 Triton X-405 润湿疏水性铁矿烧结粉尘为钢铁厂收集处理粉尘提供了一种合理的思路。烧结粉尘经润湿溶解后，各种有价元素相互分离并分别富集于固相与液相中，可进行进一步提取利用。铁矿烧结烟尘的高效润湿界面化学研究不仅有利于工业粉尘的处置、利用、有价资源的回收，而且对环境保护、保障人类健康具有十分重要的理论与实践意义。

参考文献:

[1] 龙红明. 铁矿粉烧结原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社,2010.
LONG H M. Principle and technology of iron ore powder sintering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[2] 中华人民共和国冶金工业部发展规划司. 中国钢铁统计[M]. 北京: 冶金工业部信息标准研究院,2010.
Department of Development Planning, Ministry of Metallurgical Industry of the People's Republic of China. China iron and steel statistics [M]. Beijing: Information Standards Research Institute, Ministry of Metallurgical Industry, 2010.

[3] 杨晓东,张玲,姜德旺,等. 钢铁工业废气及 $PM_{2.5}$ 排放特性与污染控制对策[J]. 工程研究跨学科视野中的工程,2013(3):240-251.
YANG X D, ZHANG L, JIANG D W, et al. Emission characteristics of steel industry waste gas and $PM_{2.5}$ and pollution control countermeasures [J]. Engineering Research-Engineering in an Interdisciplinary Perspective, 2013(3): 240-251.

[4] 闻胜,惠阳,张晓岭,等. 烧结厂烟尘和静电除尘器灰尘中二噁英的分布特征[J]. 环境化学,2007(6):823-827.
WEN S, HUI Y, ZHANG X L, et al. Distribution characteristics of dioxins in sintering plant soot and electrostatic precipitator dust [J]. Environmental Chemistry, 2007(6): 823-827.

[5] ZHAN G, GUO Z C. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(6): 1226-1234.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] 李海英,胡秋冬,程欢,等. 化学团聚作用对烧结微细粉尘除尘效率的影响[J]. 现代化工,2020,40(8):139-143.
LI H Y,HU Q D,CHENG H,et al. Effect of chemical agglomeration on dust removal efficiency of sintered fine dust [J]. Modern Engineering,2020,40(8):139-143.

[7] 魏娜,赵乃勤,贾威,等. 利用除尘灰制备活性炭的工艺研究[J]. 离子交换与吸附,2003(3):247-253.
WEI N,ZHAO N Q,JIA W,et al. Process study on the preparation of activated carbon by dust removal ash [J]. Ion Exchange and Adsorption,2003(3):247-253.

[8] 李宝才,李洋,李健. 一种电除尘水雾荷电凝并捕集$PM_{2.5}$微细粒子的装置:2013205169089 [P]. 2014-02-12.
LI B C,LI Y,LI J. A device for electrostatic precipitator water mist charge to electrocoagulation and capture of $PM_{2.5}$ fine particles:2013205169089 [P]. 2014-02-12.

[9] 张梅,付志刚,吴滨,等. 钢铁冶金烧结机头电除尘灰中氯化钾的回收[J]. 过程工程学报,2014,14(6):979-983.
ZHANG M,FU Z G,WU B,et al. Recovery of potassium chloride in electrostatic precipitator ash of iron and steel metallurgical sintering machine [J]. Journal of Process Engineering,2014,14(6):979-983.

[10] TANG H H,SUN W,HAN H S. A novel method for comprehensive utilization of sintering dust [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(12):4192-4200.

[11] 唐鸿鹄,赵立华,韩海生,等. 铁矿烧结烟尘特性及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(3):88-98.
TANG H H,ZHAO L H,HAN H S,et al. Review on the characteristics and comprehensive utilization of iron sintering dust [J]. Mineral Protection and Utilization,2019,39(3):88-98.

[12] ZHAN G,GUO Z C. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery [J]. Journal of Environmental Sciences,2013,25(6):1226-1234.

[13] LI Q,LIN B,SHUAI Z,et al. Surface physical properties and its effects on the wetting behaviors of respirable coal mine dust [J]. Powder Technology,2013,233:137-145.

[14] YANG J,WU X K,GAO J G,et al. Surface characteristics and wetting mechanism of respirable coal dust [J]. Mining Science and Technology,2010,20(3):365-371.

[15] JIA X F,LI J,WANG E K. One-pot green synthesis of optically pH-sensitive carbon dots with upconversion luminescence [J]. Nanoscale,2012,4(18):5572-5575.

[16] QIANG H,WANG Z,XIA J,et al. Facile and tunable fabrication of Fe_3O_4/graphene oxide nanocomposites and their application in the magnetic solid-phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental water samples [J]. Talanta,2012,101:388-395.

[17] OXLEY J D,MDLELENI M M,SUSLICK K S. Hydrodehalogenation with sonochemically prepared Mo_2C and W_2C [J]. Catalysis Today,2004,88(3-4):139-151.

[18] ZHANG X,SUI Z,XU B,et al. Mechanically strong and highly conductive graphene aerogel and its use as electrodes for electrochemical power sources [J]. Journal of Materials Chemistry,2011,21(18):6494-6499.

[19] GRAF N,YEGEN E,GROSS T,et al. XPS and NEXAFS studies of aliphatic and aromatic amine species on functionalized surfaces [J]. Surface Science,2009,603(18):2849-2860.

[20] LI B,LIU T,WANG Y,et al. ZnO/graphene-oxide nanocomposite with remarkably enhanced visible-light-driven photocatalytic performance [J]. Journal of Colloid & Interface Science,2012,377(1):114-121.

[21] 于恒,王海风,张春霞. 铁矿烧结污染物排放特征探讨[J]. 环境工程,2014,32(2):87-90.
YU H,WANG H F,ZHANG C X. Discussion on the emission characteristics of iron ore sintering pollutants [J]. Environmental Engineering,2014,32(2):87-90.

[22] 吴滨. 烧结机头电除尘灰中银、铜、锌等有价元素的回收[D]. 湘潭:湘潭大学,2014.
WU B. Recovery of silver,copper,zinc and other valuable elements in sintered machine head electrostatic dusting ash [D]. Xiangtan:Xiangtan University,2014.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net