

重金属捕集剂在电镀重金属废水中的应用研究

潘思文¹, 仇康², 孙同华^{1*}, 张宏波¹, 贾金平¹

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240;
2. 南京新城实业有限公司, 江苏 南京 210047)

摘要:针对传统化学沉淀方法处理实际电镀综合废水中重金属离子无法达标的问题,选取了3种市售重金属捕集剂对实际电镀废水中的 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 进行同步深度处理,采用红外光谱分析仪对3种捕集剂的分子结构进行表征,并比较了三者对电镀废水中重金属离子的处理效果。结果发现,三聚硫氰酸三钠(Trimercaptotriazine,简称TMT)对 Cu^{2+} 的去除效果最为显著,投加量少且效果稳定,但对 Ni^{2+} 的去除效果较差。在二硫代氨基甲酸盐类(Dithiocarbamate,简称DTC)捕集剂中, Me_2DTC ($\text{Me}=\text{—CH}_3$)的适用性最强,对3种重金属离子均具有良好的去除效果,可达到《电镀废水排放标准》(GB 21900—2008)中表3的排放标准,且在 $\text{pH}=9.70$ 时,处理效果最佳; Et_2DTC ($\text{Et}=\text{—CH}_2\text{CH}_3$)对 Ni^{2+} 的去除效果不佳,表明DTC分子结构中的取代基种类不同,可能会对 Ni^{2+} 的捕集效果产生较大影响。

关键词:电镀综合废水;重金属捕集剂;DTC;TMT

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)02-0061-05

Application of chelating agents for heavy metal removal from electroplating effluent

PAN Si-wen¹, QIU Kang², SUN Tong-hua^{1*}, ZHANG Hong-bo¹, JIA Jin-ping¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Nanjing Xincheng Industrial Co., Ltd., Nanjing 210047, China)

Abstract: Chemical precipitation method shows less effectiveness in decreasing heavy metals to the emission standard level. To solve this problem, chelation method is introduced in this study. Three commercial chelating agents are characterized by FTIR. Their performances of simultaneously removing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Ni^{2+} in the electroplating effluent are investigated with atomic absorption spectroscopy (AAS). It is found that trimercaptotriazine (TMT) shows remarkable effectiveness in removing Cu^{2+} , but fails to remove Ni^{2+} . Dimethyldithiocarbamate (Me_2DTC) performs excellently in removing all of the three heavy metals. The concentrations of them all reach the most strict emission standard when pH is 9.70. Diethyldithiocarbamate (Et_2DTC) has poor efficiency in Ni^{2+} removal, which is quite different from Me_2DTC , although they both belong to DTC chelating agents. It indicates that the difference in the substituent group may have great influence on Ni^{2+} removal.

Key words: electroplating effluent; heavy metal chelating agents; DTC; TMT

电镀废水中含有的Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、Pb等元素毒性较大,可通过食物链的富集作用在人体内积累,导致许多疾病的发生,危害极大^[1]。

电镀废水的集中处置,有效解决了电镀污染扩散面广的难题,但也带来了一个新问题:统一收集的综合废水比原先单独处理的废水成分更为复杂,多种重金属离子共存、可溶性重金属络合物的存在,给电镀废水的处理带来了很大难度。我国新出台的《电镀废水排放标准》(GB 21900—2008)中,对重金属离子的排放浓度制订了非常严格的标准。

常用的重金属处理技术包括化学沉淀、吸附、离子交换、电絮凝、反渗透等^[2-7],其中,化学沉淀法因

成本低廉、工艺成熟,被广泛应用于电镀废水的处理中。然而,随着电镀废水的成分越来越复杂,尤其是当存在一些性质稳定的重金属络合物时,仅仅采用化学沉淀的方法已无法保证出水中重金属离子的质量浓度能够全部达到新标准的要求。而重金属捕集剂是一种新型的重金属处理技术,其通过与水中重金属离子或重金属络合物反应,生成难溶于水的螯合物,达到去除重金属的目的。目前,有关重金属捕集剂的研究多以单一重金属模拟废水为对象,针对多金属共存的实际电镀综合废水研究较少。笔者选取了3种市售重金属捕集剂,通过红外光谱分析仪对三者的分子结构进行了初步的分析和推测,比较

收稿日期:2014-08-21

基金项目:国家自然科学基金(51278295);国家自然科学基金(21377083)

作者简介:潘思文(1990-),女,硕士生,研究方向为电镀综合废水中的重金属处理研究,psw107@sina.com;孙同华(1963-),男,博士,研究员,研究方向为工业污染控制新技术、固体废弃物处理,通讯联系人,sunth@sjtu.edu.cn。

了这 3 种捕集剂对实际电镀废水中不同重金属离子的同步去除效果,从而得出了不同捕集剂的捕集特性,为实际电镀废水重金属达标排放提供了数据支持和理论依据。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

ContrAA 700 型连续光源原子吸收光谱分析仪,德国 analytikjena 公司生产; Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪,美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产;雷磁 PHS-29A 型 pH 计,上海仪电科学仪器公司生产; 85-2 型恒温磁力搅拌器,常州国华电器有限公司生产。市售重金属捕集剂 A、B、C; 电镀集控园区的电镀综合废水,主要含有 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 。

电镀废水的基本水质情况如表 1 所示。

表 1 待处理电镀废水的基本水质

pH	COD	$\rho(\text{Cu}^{2+})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Zn}^{2+})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Ni}^{2+})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
5.95	160	12.975	32.485	21.310

1.2 实验方法

取 100 mL 电镀废水于 100 mL 烧杯中,加入搅拌子,置于恒温磁力搅拌器上。滴加适量 NaOH 调节 pH,搅拌 2~3 min; 加入一定量重金属捕集剂,搅拌 30 min; 加入聚合氯化铝 PAC(60 mg/L) 和聚丙烯酰胺 PAM(2 mg/L),快速搅拌混凝,慢速絮凝沉淀,静置 15 min。经中速滤纸过滤,加酸调节滤液呈弱酸性,用原子吸收分光光度法测定滤液中重金属离子的质量浓度。

2 结果与讨论

2.1 重金属捕集剂的成分分析

捕集剂 A 的红外吸收光谱如图 1 所示。由图 1 可以看出,1 467 cm^{-1} 处是 $\text{N}-\text{CS}_2$ 的伸缩振动峰,该峰处在 $\text{C}-\text{N}$ 单键(1 030~1 230 cm^{-1}) 和 $\text{C}=\text{N}$ 双键(1 640~1 690 cm^{-1}) 之间,说明该键具有相当大的双键性质^[8-9]; 1 166.72 cm^{-1} 处是 $\text{C}=\text{S}$ 的伸缩振动; 971.95 cm^{-1} 处是 $\text{C}-\text{S}$ 的伸缩振动。这 3 处的吸收峰与文献报道的二硫代氨基甲酸盐类(Dithiocarbamate,简称 DTC) 捕集剂的特征吸收峰较为一致^[9],说明捕集剂 A 属于 DTC 类重金属捕集剂。2 952.48 cm^{-1} 和 2 852.20 cm^{-1} 2 处的吸收峰是 $\text{C}-\text{H}$ 的伸缩振动; 1 446~1 500 cm^{-1} 范围内出

现了多个峰的重叠,其中有一处是 $\text{C}-\text{H}$ 的弯曲振动。1 400 cm^{-1} 处推测是 $-\text{CH}_3$ 的对称弯曲振动; 720~780 cm^{-1} 内未出现明显的吸收峰,说明分子结构中不存在 $-(\text{CH}_2)_n-$ 长链。综上所述,推测捕集剂 A 中仅存在甲基,是一种甲基取代的 DTC 类物质。

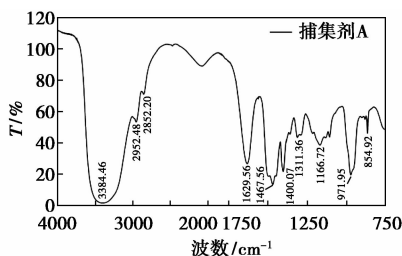


图 1 捕集剂 A 的红外吸收光谱图

捕集剂 B 的红外吸收光谱图如图 2 所示。

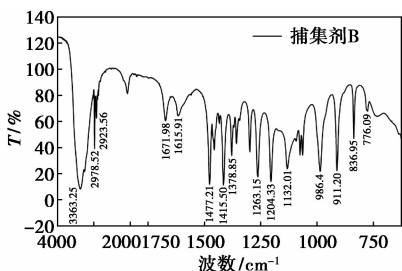


图 2 捕集剂 B 的红外吸收光谱图

由图 2 可以看出,1 477.21、1 132.01、986.41 cm^{-1} 的特征峰分别归属于 $\text{N}-\text{CS}_2$ 、 $\text{C}=\text{S}$ 和 $\text{C}-\text{S}$ 的伸缩振动,说明该捕集剂中含有二硫代氨基甲酸盐的特征官能团。2 969.56~2 978.52 cm^{-1} 是 $\text{C}-\text{H}$ 的伸缩振动吸收; 1 415 cm^{-1} 和 1 378.85 cm^{-1} 分别是 $\text{C}-\text{H}$ 的弯曲振动和 $-\text{CH}_3$ 的对称弯曲振动; 776.09 cm^{-1} 处的吸收则是由乙基的平面摇摆振动引起的,说明捕集剂 B 的分子结构中含有乙基。3 363.25 cm^{-1} 和 1 671.98、1 615 cm^{-1} 处的吸收峰表明了该物质中结晶水的存在。通过与 $\text{Na}(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{NCS}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的标准红外吸收谱图比较可知,捕集剂 B 在特征峰出现的位置、峰型和峰强都与标准谱图较为一致,因此,推测捕集剂 B 是一种乙基取代的 DTC。

捕集剂 C 的红外吸收光谱如图 3 所示。

由图 3 可以看出,1 421、1 218.79 cm^{-1} 及 850.45 cm^{-1} 处的吸收峰表明了捕集剂结构中三嗪环和三巯基结构的存,两者均是捕集剂三聚硫氰酸三钠 $\text{Na}_3\text{TMT}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (TMT, trimercaptotriazine) 的特征基团^[10-12]。3 200~3 500 cm^{-1} 处的吸收峰以

及 1654.62 cm^{-1} 处呈锯齿状的吸收峰表明结晶水的存在。

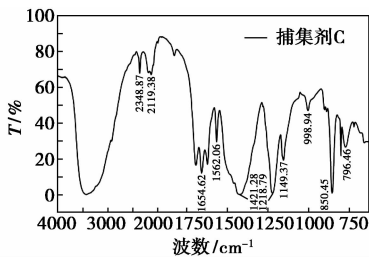


图3 捕集剂C的红外吸收光谱图

综上所述,捕集剂A、B均为DTC类捕集剂,捕集剂C是TMT捕集剂。DTC和TMT是2种常见的重金属捕集剂,两者的分子结构如图4所示。



图4 DTC和TMT的化学结构式

从DTC的分子结构可知,N原子上共有2个取代基位置,因此可推测A为二甲基二硫代氨基甲酸钠(Me_2DTC , $Me = -CH_3$),B为二乙基二硫代氨基甲酸钠(Et_2DTC , $Et = -CH_2CH_3$)。

DTC和TMT均是通过配位作用与重金属形成稳定的交联网状螯合物,如图5所示。

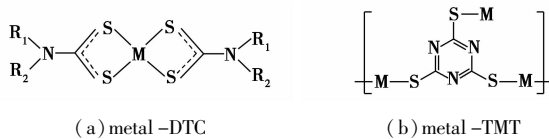


图5 DTC和TMT与重金属形成的螯合物

2.2 化学沉淀法对重金属离子的去除效果

采用化学沉淀法处理该电镀综合废水,调节水样pH为9.70,加入PAC(60 mg/L)和PAM(2 mg/L)进行混凝沉淀。处理结果以及《电镀废水排放标准》(GB 21900—2008)中的排放标准如表2所示。由表2可以看出, Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的剩余质量浓度较高。该废水的COD值为160,有机物质量浓度较高,因此,可能存在一些Cu和Ni的重金属络合物,导致化

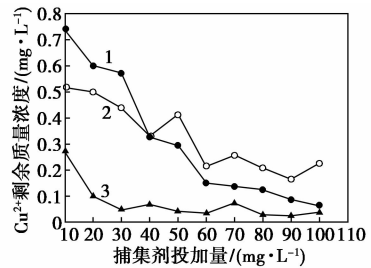
表2 化学沉淀法处理结果与排放标准

	$\rho(Cu^{2+}) / (mg \cdot L^{-1})$	$\rho(Zn^{2+}) / (mg \cdot L^{-1})$	$\rho(Ni^{2+}) / (mg \cdot L^{-1})$
标准中表2	0.5	1.5	0.5
标准中表3	0.3	1.0	0.1
化学沉淀法处理结果	0.5114	0.0168	0.5844

学沉淀法效率不高。所以,笔者将重点考察捕集剂对废水中 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的去除效果。

2.3 不同捕集剂对重金属去除效果的影响

当pH=9.70时,3种捕集剂的投加量对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的同步去除效果如图6所示。

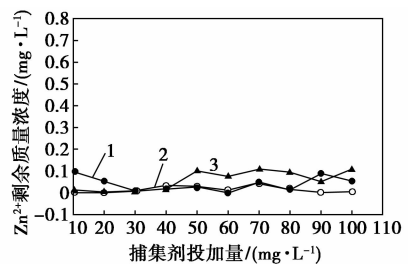


1— Me_2DTC ; 2— Et_2DTC ; 3—TMT

图6 捕集剂投加量对 Cu^{2+} 去除效果的影响

由图6可以看出,采用不同捕集剂, Cu^{2+} 剩余质量浓度均呈现出随投加量增加而减小的趋势,并都能使出水中 Cu^{2+} 质量浓度低于0.3 mg/L,达到标准中表3标准。其中,TMT对 Cu^{2+} 的去除效果尤为显著,使 Cu^{2+} 达标排放时的投加量为10 mg/L,仅为其他2种捕集剂的1/5~1/6。当 Me_2DTC 投加量在10~50 mg/L, Cu^{2+} 质量浓度随投加量的增大而显著减小,之后趋于平缓。 Cu^{2+} 剩余质量浓度随 Et_2DTC 捕集剂投加量的变化速率较为均匀,最后稳定在0.2~0.25 mg/L。因此,综合 Cu^{2+} 去除效果和捕集剂投加量考虑,TMT表现出的性能最佳。

捕集剂投加量对 Zn^{2+} 去除效果的影响如图7所示。



1— Me_2DTC ; 2— Et_2DTC ; 3—TMT

图7 捕集剂投加量对 Zn^{2+} 去除效果的影响

从图7中可以看出,加入捕集剂后, Zn^{2+} 剩余质量浓度基本保持在0.1 mg/L以下,与化学沉淀法的去除效果相近,较难判断出捕集剂对 Zn^{2+} 的去除是否存在一定的作用。

捕集剂投加量对 Ni^{2+} 去除效果的影响如图8所示。

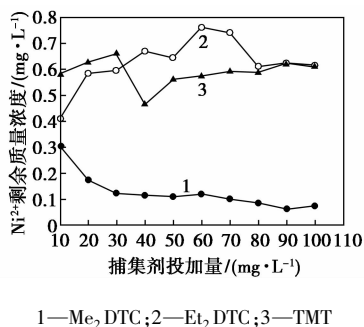


图 8 捕集剂投加量对 Ni^{2+} 去除效果的影响

从图 8 中可以看出,不同捕集剂对废水中 Ni^{2+} 的去除效果具有较大差异。

(1) Ni^{2+} 质量浓度随 Me_2DTC 投加量的增加而减小,且逐渐趋于平缓。当投加量 $\geq 80 \text{ mg/L}$ 时, Ni^{2+} 质量浓度可稳定在 0.1 mg/L 以下。

(2) Et_2DTC 的投加量在 $10 \sim 60 \text{ mg/L}$, Ni^{2+} 剩余质量浓度随投加量的增大而增大。投加量 $> 60 \text{ mg/L}$, Ni^{2+} 质量浓度下降,最终稳定在 0.62 mg/L 左右。可见,在一定投加范围内, Et_2DTC 投加量的增加会对 Ni^{2+} 的去除产生不利影响。

(3) TMT 的投加量在 $10 \sim 40 \text{ mg/L}$ 范围内, Ni^{2+} 质量浓度呈先增大后减小的趋势,最高时超过 0.65 mg/L 。投加量 $> 50 \text{ mg/L}$, Ni^{2+} 质量浓度基本稳定在 $0.56 \sim 0.62 \text{ mg/L}$ 范围内,处理效果不佳。

Et_2DTC 和 TMT 对 Ni^{2+} 处理效果不理想,由多方面因素造成。首先,本实验中所用的废水来源于电镀集控园区内多家企业的工业废水排放,成分复杂,其中的有机化合物,如 EDTA、柠檬酸等,易与重金属离子形成稳定的络合物,若该络合物的稳定性强于捕集剂对重金属的螯合作用,则捕集剂对重金属离子的去除作用就会受到很大的限制。其次,同一类捕集剂对不同重金属离子的螯合能力存在差异,如图 9 所示。由图 9(a) 可知,相同 Me_2DTC 投加量下, Ni^{2+} 的去除效果优于 Cu^{2+} , 尤其是当投加量 $< 30 \text{ mg/L}$ 时,两者的质量浓度相差较大,说明当 Me_2DTC 投加量较小时,其选择先与 Ni^{2+} 结合,增大投加量后, Ni^{2+} 剩余质量浓度趋于稳定, Cu^{2+} 质量浓度显著降低。Georgieva 等^[13] 发现, R_2DTC ($\text{R} = \text{Me}, \text{Et}$) 最易与 Ni^{2+} 结合,其次为 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 。这与本实验中 Me_2DTC 对 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 的去除效果较为一致。但对于实验所用的 Et_2DTC 而言,该规律仅在捕集剂投加量 $< 20 \text{ mg/L}$ 时成立,当投加量 $> 20 \text{ mg/L}$ 后, Cu^{2+} 的去除效果明显优于 Ni^{2+} , 如图 9(b) 所示,这与廖强强^[14] 关于 Et_2DTC 与 Cu^{2+} 、

Ni^{2+} 络合能力的研究结果一致。

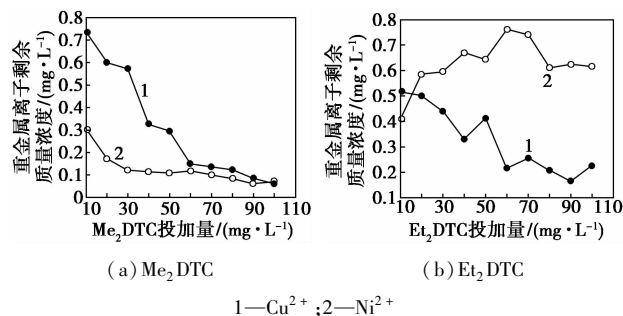


图 9 不同 DTC 对 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 去除效果影响的比较

理想的捕集剂应具备较强的螯合能力,能同时对废水中的 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 表现出良好的去除效果,实现废水的达标排放,同时简化处理过程,免去分类处理的繁琐。在实验选取的 3 种市售捕集剂中, Me_2DTC 较为符合实验对理想捕集剂的要求。

2.4 pH 对重金属去除效果的影响

鉴于 Me_2DTC 对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 良好的处理效果,选取的 pH 范围为 $5.95 \sim 10.61$, Me_2DTC 投加量为 80 mg/L , pH 对 Me_2DTC 去除重金属离子的影响如图 10 所示。

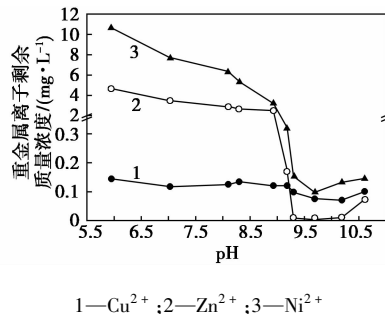


图 10 pH 对 Me_2DTC 去除重金属离子的影响

由图 10 可以看出, Cu^{2+} 的去除效果受 pH 影响不大,始终保持在 $0.07 \sim 0.15 \text{ mg/L}$ 。 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 对 pH 较为敏感, pH 在 $5.95 \sim 9.30$ 范围内,两者的质量浓度随 pH 的增大而显著减小。当 $\text{pH} > 9.30$ 后, Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的质量浓度变化较为平缓。当 $\text{pH} = 9.70$ 时, Ni^{2+} 质量浓度 $< 0.1 \text{ mg/L}$, 此时, 3 种重金属离子的质量浓度均已达到标准中表 3 的排放标准。进一步增大 pH, 各重金属离子质量浓度均有所上升。因此,最佳的 pH 为 9.70 。

3 结论

通过红外光谱分析仪对 3 种市售捕集剂的分子结构进行了分析和推测,比较了这 3 种捕集剂同时去除电镀废水中 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的效果,可以得出

以下结论:

(1) 3种捕集剂中,2种是DTC类捕集剂,推测为 Me_2DTC 和 Et_2DTC 。另一种捕集剂是TMT。

(2) TMT对 Cu^{2+} 的去除作用最为显著,达标投加量少且效果稳定,但对 Ni^{2+} 处理效果不佳。因此,TMT适用于处理单一的含铜废水。 Me_2DTC 对3种重金属离子均表现出良好的螯合能力,能保证出水中 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的质量浓度同时达到标准中表3所列的标准,对电镀综合废水的适用性较强。 Et_2DTC 在 Ni^{2+} 处理方面的表现不理想,与 Me_2DTC 的处理效果相差较大。两者在取代基上的差异对 Ni^{2+} 的捕集效果产生了较大影响。

(3) Me_2DTC 在 $\text{pH}=9.70$ 时对3种重金属离子的去除效果最好,升高或降低 pH 会导致出水中 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 质量浓度的升高。

参考文献

- [1] Kurniawan T A, Chan G Y S, Lo W H, *et al.* Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 118(1/2): 83-98.
- [2] Djedidi Z, Khaled J B, Cheikh R B, *et al.* Comparative study of de-watering characteristics of metal precipitates generated during treatment of monometallic solutions[J]. Hydrometallurgy, 2009, 95(1/2): 61-69.
- [3] Dabrowski A, Hubicki Z, Podkościelny P, *et al.* Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method[J]. Chemosphere, 2004, 56(2): 91-106.
- [4] Heidmann I, Calmano W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 934-941.

- [5] Lin L, Xu X, Papelis, *et al.* Sorption of metals and metalloids from reverse osmosis concentrate on drinking water treatment solids[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 134: 37-45.
- [6] Gao J, Sun S P, Zhu W P, *et al.* Chelating polymer modified P84 nanofiltration (NF) hollow fiber membranes for high efficient heavy metal removal[J]. Water Research, 2014, 63: 252-261.
- [7] Zaini M A A, Amano Y, Machida M. Adsorption of heavy metals onto activated carbons derived from polyacrylonitrile fiber[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 180(1/2/3): 552-560.
- [8] Khan S, Nami S A A, Siddiqi K S. Piperazine pivoted transition metal dithiocarbamates[J]. Journal of Molecular Structure, 2008, 875(1/2/3): 478-485.
- [9] Bai L, Hu H, Fu W, *et al.* Synthesis of a novel silica-supported dithiocarbamate adsorbent and its properties for the removal of heavy metal ions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195: 261-275.
- [10] Haiduc I, Mahon M F, Molloy K C, *et al.* Synthesis and spectral characterisation of organotin(IV) 1,3,5-triazine-2,4,6-trithiolato complexes, including the crystal structures of 1,3,5-(R_3Sn) $_3\text{C}_3\text{N}_3\text{S}_3$ (R = Me, Ph) [J]. Journal of Organometallic Chemistry, 2001, 627(1): 6-12.
- [11] Krepps M K, Parkin S, Atwood D A. Hydrogen bonding with sulfur [J]. Crystal Growth & Design, 2001, 1(4): 291-297.
- [12] Bailey J R, Hatfield M J, Henke K R, *et al.* Transition metal complexes of 2,4,6-trimercapto-1,3,5-triazine (TMT): Potential precursors to nanoparticulate metal sulfides[J]. Journal of Organometallic Chemistry, 2001, 623(1/2): 185-190.
- [13] Georgieva I, Trendafilova N. Bonding analyses, formation energies, and vibrational properties of M-R $_2$ dtc complexes (M = Ag(I), Ni(II), Cu(II), or Zn(II)) [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2007, 111(50): 13075-13087.
- [14] 廖强强. 环境友好型淀粉改性重金属捕集剂的结构与其性能的关系研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. ■

拜耳聚碳酸酯助力伟巴斯特打造首款具有吸收红外功能全景天窗

2015年1月,伟巴斯特(Webasto)开始为第三代smart fortwo汽车生产固定式全景天窗。该透明天窗面板面积为1.2 m²,采用的轻量材料聚碳酸酯是由拜耳材料科技的模克隆®(Makrolon®)制成的,可使大量光线照进车内,营造一个愉悦、宽敞的驾乘空间。

该天窗系统的技术亮点在于它能够吸收太阳能,红外线被隔离在汽车之外,可以防止车内温度过高。这是由于聚碳酸酯中加入了红外吸收剂——具体来说就是制造天窗面板的树脂粒子中加入了红外吸收剂。色号为771079的具有热稳性、可吸收热量的模克隆®(Makrolon®)AG2677首次被用于新款smart之中。

红外吸收性能还具有生态优势。如果车内得以避免过高温度,也就不太需要开启空调系统。这样就减少了燃油消耗。这种创新的天窗系统使得伟巴斯特和拜耳在营造驾

乘舒适体验度的工作上达到了又一个里程碑。

这种材料极其耐冲击、防风防雨而且质量轻。由聚碳酸酯制成的天窗重量与玻璃天窗相比可轻达50%。新款smart fortwo上的天窗面板质量仅为9.8 kg。由于天窗质量减轻,令这种小型城市汽车降低了油耗,并且天窗还提高了驾驶灵活性,因为汽车的重心得以进一步放低。全景天窗上的涂层还可以防止刮伤和雨水腐蚀。该天窗系统是世界上最的带有透明涂层和红外吸收功能的注塑成型汽车天窗。

伟巴斯特在其自有的轻量技术中心制造这种聚碳酸酯天窗,该中心位于德国雷根斯堡(Regensburg)附近的希灵(Schierling)。拜耳材料科技在该天窗的开发过程中针对聚碳酸酯汽车玻璃提供了全套服务,包括(但不限于)模具填充和热膨胀的模拟计算、材料的开发与选择、测试技术与分析方法论以及加工技术。(薛勃丽)