

氟橡胶改性技术研究进展

曹鸿璋^{1,2}, 刘杰民^{1*}, 张玉玺², 于晓丽², 刘铃声²

(1. 北京科技大学 化学与生物工程学院, 北京 100083; 2. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014030)

摘要:综述国内外氟橡胶改性技术研究进展, 包括主链改性、橡胶并用、填充改性和表面改性等。主链改性主要是在氟橡胶主链上引入其他基团或原子等以获得新的性能, 但成本较高, 限制其推广和应用; 橡胶并用是将氟橡胶与其他橡胶并用, 该方法简单高效, 但由于氟橡胶的结构特殊, 较难选择共硫化体系, 且会部分降低氟橡胶独有的特性; 填充改性是指加入新型填充剂, 可提高氟橡胶的物理性能; 表面改性是指在不影响氟橡胶性能的基础上改变其表面性质而赋予其某些特殊性能。

关键词:氟橡胶; 主链改性; 并用改性; 表面改性

中图分类号: TQ333.93 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2014)03-0187-05

氟橡胶是主链或侧链碳原子接有电负性极强氟原子的一种特种合成弹性体。由于 C—F 键能较大($485\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), 而且氟原子共价半径为 0.064 nm , 相当于 C—C 键长的一半, 因此氟原子可以把 C—C 主链很好地屏蔽起来, 保证 C—C 链的稳定性, 使它具有其他橡胶不可比拟的优异性能, 如较好的耐油和化学药品腐蚀性能、良好的物理性能、耐候性能、电绝缘性和抗辐射性等^[1-2]。

氟橡胶主要用于制备耐高温、耐介质制品, 如各种密封件、隔膜、胶管、胶布等, 也可用作电线外皮、防腐衬里等。在航空、汽车、石油、化工等领域得到了广泛的应用。在军工领域, 氟橡胶主要用于航天、航空及运载火箭、卫星、战斗机、新型坦克的密封件、油管和电气线路护套等方面, 是国防尖端工业中无法替代的关键材料^[3]。

目前, 全球氟橡胶的年生产能力约为 4 万 t, 50 多个品种 (包括配合胶), 实际年产量约为 3 万 t, 主要生产国为美国、德国和意大利等。国外氟橡胶的发展趋势向高氟含量、耐低温、耐碱方向发展, 相继开发了性能优异的新品种, 如高纯氟橡

胶、无需硫化的氟橡胶、偏氟乙烯系橡胶、液体氟橡胶等^[4-5], 且目前国外仍源源不断开发新型高性能的氟橡胶产品^[6-7]。

我国自 20 世纪 60 年代开始研制氟橡胶, 先后成功研制出 23 型、26 型、TP-2 型等以聚烯烃为主的氟橡胶和羧基亚硝基氟橡胶。自 20 世纪 90 年代中期以来, 国内氟橡胶消费量年均增长率高达 31.6%; 进入 21 世纪后, 个别年份年消费增长率更是接近 50%^[3]。但与迅速增长的消费量相比, 国内氟橡胶的生产能力目前远不能满足市场需求, 以至于许多领域只能依赖进口。目前, 我国氟橡胶主要的生产企业有上海三爱富新材料股份有限公司、中昊晨光化工研究院、江苏梅兰化工集团有限公司等^[8]。

氟橡胶的特殊性能是由其分子中含有的氟原子的结构特点所决定, 但氟橡胶也存在不足之处, 如弹性差、撕裂强度低、耐低温性能欠佳、易压缩变形、生胶加工性能差等。为了提高氟橡胶及其制品的性能, 国内外对氟橡胶进行了大量的改性研究工作, 包括主链改性、橡胶并用、填充改性和表面改性等。本文主要介绍氟橡胶的改性技术研究进展。

1 主链改性

主链改性是指通过化学反应在分子链上引入其他基团或原子, 使分子链具有极性或改变柔性,

基金项目: 内蒙古自治区包头市重大科技发展项目 (2011Z2002)

作者简介: 曹鸿璋 (1980—), 男, 内蒙古察右中旗人, 包头稀土研究院工程师, 北京科技大学在读硕士研究生, 主要从事稀土湿法冶金及稀土助剂在高分子材料中的应用研究。

* 通信联系人

或通过接枝、嵌段引入支链,使其具有新的性能以达到改性的目的^[9-10]。通常主链上含双键和醚键结构橡胶的耐低温性能良好,而主链上不含双键、侧链上含有极性基团橡胶的耐低温性能最差。为了改善氟橡胶的耐低温性能,采用在其分子结构中引入含有醚键基团的方法,使其在低温下保持一定的柔顺性,从而提高耐低温性能。如美国杜邦公司开发的全氟醚橡胶就是通过聚合过程中共聚全氟乙烯醚单体引入醚键而开发出的一种具有较好耐低温性能的新型氟橡胶,以及在聚合过程中引入含氟硅类单体的氟硅橡胶^[11]。

美国埃克森美孚公司开发了一种具有四氟乙烯-丙烯类共聚化学结构的新颖氟橡胶,其在热和腐蚀性环境中可提高工作极限温度并延长使用寿命,用于各种密封制品的生产^[12]。美国费尔斯通公司合成的氟化磷腈橡胶,虽然氟含量低,但对许多化学介质具有较好的耐受能力及具有优异的耐温性能,耐温范围为 $-55\sim+230\text{ }^{\circ}\text{C}$,其性能类似硅橡胶和其他氟橡胶,并具有优异耐磨和耐低温性能^[12]。美国3M公司合成的高相对分子质量的三氟氯乙烯-偏氟乙烯弹性体,具有耐高温和对强氧化剂、强无机酸及高温油的化学稳定性^[12]。日本信越化学公司开发的液体氟弹性体(SH-ETSV-SFIEL系列),是一种主链含有全氟醚结构可在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加工并具有优良耐油、耐溶剂、耐低温性能($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仍具有弹性)的氟橡胶^[13]。

2 并用改性

氟橡胶并用改性是一种简便有效的方法,通过并用弥补氟橡胶性能的不足,提高其流动性,改善加工性能,也可降低使用成本,扩大其应用范围。北京航空材料研究院通过并用少量氟醚橡胶制出FX13型氟橡胶,改善了氟橡胶的耐低温性能,其脆性温度低至 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$,已成功地用于制造长征系列运载火箭伺服机构密封件,确保了长征系列火箭多次商业发射的成功^[14]。

硅橡胶是一种兼具无机和有机性质的高分子弹性体,具有优异的耐热性能、弹性和耐寒性能,优良的脱模性能、电气性能、导热性能、防水性能和温度稳定性能。将硅橡胶与氟橡胶并用,可获兼具两种橡胶特性的并用胶。A. Ghosh等^[15]将

硅橡胶与氟橡胶并用,发现在不同的温度下,并用胶的损耗因子随着氟橡胶用量的增大而增大,并用比为75/25的硅橡胶/氟橡胶并用胶中由于均匀分散着氟橡胶微粒,并用胶的介电常数提高了46.5%^[16]。

以2,2,2-三氟乙基甲基丙烯酸酯接枝硅橡胶(MVQ-g-TFEMA),可改善氟橡胶/硅橡胶并用胶的相容性。试验结果表明,加入MVQ-g-TFEMA后,氟橡胶与硅橡胶的相容性改善,提高了气相法白炭黑填充氟橡胶/硅橡胶并用胶的物理性能、热老化性能、耐油性能、低温性能及橡胶-填料间的相互作用。谭锋等^[17]制备了四丙氟橡胶(FEPM)/氟硅橡胶(FMVQ)并用胶,并对其性能进行了研究。结果表明:FEPM与FMVQ能够实现共硫化;与FEPM相比,FEPM/FMVQ并用胶耐低温性能改善。

氟橡胶与丙烯酸酯橡胶(ACM)并用旨在制备具有较好耐油、耐高温性能且可在某些场合替代氟橡胶使用的低成本制品^[18]。M. Abdul Kader等^[19]研究了氟橡胶/ACM并用胶的性能,制备出适用于高温下使用的耐油、耐高温的氟橡胶/ACM并用胶。陈春明^[20]在氟橡胶的丙酮溶液中采用原位聚合法制备ACM/氟橡胶并用胶,结果表明,原位聚合ACM与氟橡胶的相容性较好,与ACM相比,ACM/氟橡胶并用胶的物理性能和热稳定性明显提高。

凌维丰等^[21]研究了配方因素对ACM/氟橡胶并用胶耐热老化性能的影响。结果表明,经 $180\text{ }^{\circ}\text{C}\times 48\text{ h}$ 热老化后,并用胶的物理性能保持率随着ACM用量的增大而减小; $0\sim 50$ 份炭黑补强并用胶的耐热老化性能随着炭黑用量的增大而提高,使用软化剂硅油的并用胶耐热老化性能较好。C. M. Chen等^[22]采用双螺杆挤出机通过熔融共混法制备了环氧丙烯酸酯橡胶(EACM)/氟橡胶并用胶,研究结果显示,在并用比范围内并用胶呈现出完美的两相连续结构相态,并用体系的相畴尺寸随着EACM用量的改变而改变,当EACM/氟橡胶并用比为20/80时,EACM在氟橡胶的基体中形成最完善的网络结构,同时两相产生协同效应,EACM/氟橡胶并用胶的拉伸强度和撕裂强度达到最大值。

钱丽丽等^[23]研究了具有不同并用比的氯醚橡胶(ECO)/氟橡胶并用胶性能。结果表明:当ECO用量小于20份时,并用胶的100%定伸应力、拉伸强度及压缩永久变形与纯氟橡胶硫化胶相当;当ECO用量为20~40份时,并用胶的拉伸强度和压缩永久变形均急剧下降;当ECO用量大于40份时,下降趋势放缓。ECO/氟橡胶并用胶耐老化性能保持率达到85%。杨剑^[24]提出采用聚醚型热塑性聚氨酯弹性体(TPU)来制备TPU/氟橡胶共混物,以期改善氟橡胶的低温性能、弹性、加工性能差及成本高昂等缺陷。研究结果表明,TPU/氟橡胶共混可以改善氟橡胶的低温性能、弹性、加工性能,降低成本。

丁腈橡胶(NBR)是常用的耐油橡胶,与氟橡胶并用的目的是改善氟橡胶的加工性能,制得低硬度的氟橡胶产品,提高氟橡胶的耐疲劳性能,并在耐热性和耐化学介质性方面处于中间状态,同时大幅降低产品的价格。张孟存等^[25]将氟橡胶与NBR并用,制备出综合性能优异的新型并用胶。

何显儒等^[26]以DCP为相容剂,采用聚氯乙烯树脂(PVC)共混改性氟橡胶。当二次硫化条件为160℃×8h时,共混物具有较好的物理性能;氟橡胶/PVC并用比为80/20时,可得到综合性能较好的共混物;相容剂DCP用量为1份时,效果最佳。

并用三元乙丙橡胶(EPDM)可改善氟橡胶的耐低温性能,降低成本。但氟橡胶与EPDM的极性相差较大,为热力学不相容体系。当采用过氧化物硫化体系(硫化剂DCP/助交联剂TAIC硫化体系)时,氟橡胶和EPDM之间可通过自由基反应形成共交联结构,提高二者之间界面结合力及相容性,从而改善并用胶的性能,但该硫化体系对氟橡胶的硫化效率较低,不能使其充分硫化。双酚AF/促进剂BPP硫化体系是氟橡胶传统的硫化体系,对氟橡胶具有较高的硫化活性,但其对EPDM没有硫化作用。余慧等^[27]采用双硫化体系(双酚AF/促进剂BPP硫化体系+过氧化物硫化体系),获得了综合性能较好的并用胶,拓宽了应用范围。

3 填充改性

填充改性是通过加入新的填充剂改进胶料的加工性能并赋予氟橡胶优异的性能,提高拉伸强度、模量、硬度、耐热老化性能等。M. Abdul Kader等^[28]通过将氟橡胶与层状粘土熔融共混制备粘土/氟橡胶纳米复合材料,对粘土的分散性、相态、流变性能和热性能进行研究。结果显示,粘土的加入提高了氟橡胶的加工流动性能和热稳定性。陈军等^[29]研究了两种不同形态的填料/氟橡胶体系及加工工艺与胶料拉伸性能之间的关系,结果表明:对于高纵横比的填料而言,混炼工艺的改变将对硫化胶的拉伸性能产生一定影响,但填料对混炼胶无补强效果;球形填料/氟橡胶体系则对加工条件的依赖不大。

文献[30]介绍了用特种低表面积白炭黑替代炭黑N990的效果。德墨西亚试验结果表明,白炭黑填充硫化胶具有较好的抗屈挠龟裂性,不会对热稳定性和耐油性能产生负面影响。填料添加量似乎有可能由30份增大至40份,不仅大大节省原材料成本,而且加工工艺更简单。

朱立新等^[31]选择具有代表性的聚四氟乙烯、石墨、二硫化钼作为填料,研究其对氟橡胶摩擦和磨耗性能的影响。结果表明,在双酚AF硫化体系下,加入少量二硫化钼对氟橡胶的耐磨性能有较大提高,在填料用量添加5份时,二硫化钼填充氟橡胶的摩擦因数减小了2/3,磨耗量减小了1/2,且氟橡胶的物理性能得以维持,压缩永久变形有所减小。

杨钧^[32]发明了一种在氟橡胶预混胶中加入特定的碳纤维从而显著提高氟橡胶撕裂强度的方法。方晓波等^[33]研究了氟化钙、硫酸钡、炭黑等填料对氟橡胶物理性能及加工性能的影响。结果表明,氟化钙对氟橡胶的补强作用最明显,但降低了压缩永久变形性能;而炭黑对氟橡胶综合性能的改善效果最佳。陈磊等^[34]提出了以纳米二氧化锡粉末作为氟橡胶的补强和耐热性填料从而提高氟橡胶的物理性能的方法。刘皓等^[35]介绍了一种具有改善抗热撕裂性能的氟橡胶预混胶制备方法,所得到的氟橡胶预混胶的耐热撕裂性能较好,可有效提高氟橡胶制品的合格率。

徐竹等^[36]认为不同填料体系因其形态、结构组成以及在基体中微观分布的不同,在氟橡胶的使用中填料各具特点。纳米碳酸钙对氟橡胶 246 的补强作用最为明显,而且硬度增幅不大。李恩军等^[37]采用聚四氟乙烯微粉部分替代炭黑制备聚四氟乙烯/炭黑/氟橡胶复合材料,所得硫化胶的拉伸强度、拉断伸长率及撕裂强度均明显增大,耐磨性能提高。

4 表面改性

橡胶表面改性是在不影响橡胶基体性质的基础上,通过改变橡胶的表面性质来适应某些特定的用途或赋予橡胶某些特殊的性能。

刘永刚等^[38]利用氩气等离子体对氟橡胶 F2311 进行了表面亲水改性处理,结果表明,经氩气等离子体处理后,等离子体聚合在 F2311 表面形成含碳、氧、氮覆盖层,较好地改善了氟橡胶 F2311 的表面亲水性,并赋予较好的表面动力学性质,且所获得的亲水性可以保持很长时间。

5 前景与展望

综上所述,主链改性由于开发生产成本过高,从而限制了其推广和应用;采用橡胶并用的方法,即将氟橡胶与一些通用橡胶或特种橡胶并用,由于氟橡胶自身结构特点,共硫化体系选择比较困难,而且并用会部分降低氟橡胶独有的特性。因此开发新型的填充剂改善氟橡胶的相关性能具有更广阔的应用前景。

稀土元素具有 $[\text{Xe}]4f^{0-14}5d^{1-10}6s^2$ 的电子构型,由于 4f 轨道的特殊性和 5d 轨道的存在,因而具有光、电、磁等优异性能,且稀土离子具有丰富的电子能级,离子半径较大,电荷较高,又有较强的络合能力,这为化学合成稀土新材料提供了更多途径^[39]。

由于性质独特,作为橡胶填充剂,稀土无论在改善工艺还是改进性能方面都起到了一定作用。它能用作硫化促进剂和交联剂,具有抗热氧化、提高热稳定性、抗疲劳等作用,也可用作橡胶的功能性填充剂,使橡胶具有射线屏蔽性能、磁性能和阻燃性能^[40]。

近年来,随着纳米技术的发展,关于微纳米材

料的研究十分活跃。微纳米稀土氧化物粒径超细化,导致其晶体结构和表面电子结构发生变化,产生了普通粒子所不具备的量子尺寸效应、表面效应和宏观量子效应等特点。将微纳米稀土氧化物改性与常规材料相比,可显示出优异的性能。微纳米稀土氧化物作为一种新型材料在氟橡胶改性领域有着非常广阔的应用前景,对于开发具有高性能的氟橡胶有着十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 蔡树铭,梁星宇,蔡洪志. 氟橡胶应用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [2] 刘伯南. 26 类氟橡胶技术[J]. 有机氟工业,2011(3):59-64.
- [3] 钱伯章. 氟橡胶的国内外发展现状及应用[J]. 化工新型材料,2007,35(10):31-32.
- [4] Patrick Lederer. Technology Associate New-generation Dupont Dow Viton Fluoroelastomer Made with Advanced Polymer Architecture[J]. Sealing Technology,2004,204(5):6-9.
- [5] Wang S H, John M Legare. Perfluoroelastomer and Fluoroelastomer Seals for Semiconductor Wafer Processing Equipment [J]. Journal of Fluorine Chemistry,2003,122(1):113-119.
- [6] Toshifumi Sugama. Surface Analyses of Fluoroelastomer Bearings Exposed Together Thermal Environments[J]. Materials Letters,2001,45(50):66-72.
- [7] Susanta Mitra, Afshin Ghanbari-Siahkali, Peter Kingshott, et al. Chemical Degradation of Fluoroelastomer in an Alkaline Environment[J]. Polymer Degradation and Stability,2004,125(2):303-314.
- [8] 萧楠. 氟橡胶的应用与开发[J]. 中国石油和化工,2005,12(3):26-29.
- [9] Bruno Ameduri, Bernadr Boutevin. Update on Fluoroelastomer. From Perfluoroelastomers to Fluorosilicones and Fluorophos Phazenes [J]. Journal of Fluorine Chemistry,2005,126(2):221-229.
- [10] Bernard Boutevin, Gerardo Caporiccio, Francine Guida-Pietrasanta, et al. Poly-silafluoroalkyleneoligosiloxanes. A Class of Fluoroelastomers with Low Glass Transition Temperature[J]. Journal of Fluorine Chemistry,2003,124(2):131-138.
- [11] Marco Apostolo, Francesco Triulzi. Properties of Fluoroelastomer/Semicrystalline Perfluoropolymer Nano-blends [J]. Journal of Fluorine Chemistry,2004,125(2):303-314.
- [12] 蔡树铭,李竹. 氟橡胶的性能和加工要点[J]. 中国橡胶,2000,22(1):14-26.
- [13] 刘岭梅. 氟橡胶的性能及应用概述[J]. 有机氟工业,2001,5

- (2);5-7.
- [14] 边俊峰,王珍,谭光志,等. 高性能系列氟橡胶[J]. 橡胶工业,2003,50(4):12-14.
- [15] Ghosh A,Naskar A K,Khastgir D,et al. Dielectric Properties of Blends of Silicone Rubber and Tetrafluoroethylene/Propylene/Vinylidene Fluoride Terpolymer [J]. Polymer,2001,42(24):9848-9849.
- [16] Ghosh A, Antony P,Bhattacharya A K,et al. The Effect of Hard and Soft Segment Composition and Molecular Architecture on the Morphology and Mechanical Properties of Polystyrene—Polyisobutylene Thermoplastic Elastomeric Block Co-polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science,2001,568(12):7854-7856.
- [17] 谭锋,王亚明,彭兵,等. 四丙氟橡胶/氟硅橡胶并用胶性能研究[J]. 橡胶工业,2011,58(12):721-723.
- [18] 武卫莉. ACM/FKM 并用胶耐热性和耐油性研究[J]. 弹性体,2002,12(5):40-41.
- [19] Abdul Kader M,Bhowmick Anil K. Thermal Ageing,Degradation and Swelling of Acrylate Rubber, Fluororubber and Their Blends Containing Polyfunctional Acrylates[J]. Polymer Degradation and Stability,2003,2(79):283-295.
- [20] 陈春明. 氟橡胶的改性及其纳米尺度互穿网络形态研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
- [21] 凌维丰,王川里,罗权焜. 影响 ACM/FKM 硫化胶耐热老化性能的配方因素[J]. 弹性体,2010,20(1):70-73.
- [22] Chen C M,Xiong C X. Co-continuous Phase Morphology and Properties of Fluoroelastomer/Epoxy Acrylate Elastomer Blends[J]. China Synthetic Rubber Industry,2009,32(4):293-297.
- [23] 钱丽丽,黄承亚. 氯醚橡胶/氟橡胶共混物性能的研究[J]. 特种橡胶制品,2009,30(2):40-42.
- [24] 杨剑. 氟橡胶的改性、结构与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
- [25] 张孟存,孟祥考,谷文军,等. 氟橡胶/丁腈橡胶混炼胶的研制[J]. 特种橡胶制品,2009,30(3):59-61.
- [26] 何显儒,余慧,荣耀强,等. 氟橡胶/PVC 共混物性能研究[J]. 塑料工业,2012,40(12):82-85.
- [27] 余慧,何显儒,荣耀强,等. 氟橡胶/三元乙丙橡胶密封材料的制备及性能研究[J]. 润滑与密封,2013(1):39-44.
- [28] Abdul Kader M, Min-Young Lyu,Changwoon Nah. A Study on Melt Processing and Thermal Properties of Fluoroelastomer Nanocomposites [J]. Composites Science and Technology,2005,20(10):15-16.
- [29] 陈军,倪海鹰,张旭刚. 填料形态及加工工艺与氟橡胶拉伸性能关系[J]. 特种橡胶制品,2004,25(3):53-57.
- [30] 佚名. 用作氟橡胶填料的特种低表面积白炭黑[J]. 朱永康,译. 有机氟工业,2010(2):53-57.
- [31] 朱立新,林城,贾德民. 不同结构填料对氟橡胶耐磨性能的影响[J]. 广东橡胶,2008(8):7-11.
- [32] 杨钧. 具有改善的撕裂强度的氟橡胶及其制备方法[P]. 中国:CN 1935893A,2007-03-28.
- [33] 方晓波,黄承亚. 不同填料对氟橡胶性能的影响[J]. 特种橡胶制品,2008,29(3):32-34.
- [34] 陈磊,韦璇. 一种可改性的氟橡胶制备方法[P]. 中国:CN 101397390A,2009-04-01.
- [35] 刘皓,周家发,张林. 一种具有抗热撕裂性能的氟橡胶预混胶及其制备方法[P]. 中国:CN 102260398A,2011-11-30.
- [36] 徐竹,马俊辉,陈军,等. 不同填料对 246 型氟橡胶性能的影响[J]. 特种橡胶制品,2005,26(6):21-23.
- [37] 李恩军,张勇,任文坛,等. FKM/PTFE/炭黑复合材料的性能研究[J]. 橡胶工业,2009,56(1):20-24.
- [38] 刘永刚,黄明,黄忠,等. Ar 等离子体对氟橡胶 F2311 表面的改性[J]. 化学研究与应用,2003,15(4):492-494.
- [39] 魏延志,陈彦模,张瑜,等. 稀土在高聚物改性中的应用[J]. 高分子材料科学与工程,2005,21(1):52-56.
- [40] 史振学,李梅,柳召刚,等. 稀土在橡胶生产中的应用[J]. 稀土,2006,27(2):75-80.

收稿日期:2013-09-07

一种处理橡胶防老剂 RD 生产废水的方法

中图分类号:X783.3;TQ330.38⁺2 文献标志码:D

由科迈化工股份有限公司申请的专利(公开号 CN 102849876A,公开日期 2013-01-02)“一种处理橡胶防老剂 RD 生产废水的方法”,提供了一种处理橡胶防老剂 RD 生产废水的方法:即用酸将防老剂 RD 生产废水的 pH 值调至 2.5,倒入装有铁碳电极的容器中,微电解 2~4 h;将经过微电解的废水进行过滤,加 10~20 mL·L⁻¹ 质量分数为 0.30 的双氧水溶液,再用

酸将 pH 值调至 3,芬顿氧化 2~4 h;将芬顿氧化后的废水过滤,加 3~5 mg·L⁻¹ 聚合氯化铝,用碱溶液将 pH 值调至 8~9,絮凝。经过上述处理的废水过滤测得的化学需氧量(COD)低于 1 000 mg·L⁻¹,且颜色明显变淡。该发明设备简单,投资少,易于工业化,能有效降低废水的 COD,且处理后的废水能够当作工艺水重复利用,降低了生产成本,避免了废水排放污染环境,实现了废水的资源化利用。

(本刊编辑部 赵 敏)