

“关-开”型铜(II)离子荧光探针的研究进展

吴平,任红*,韩丹丹,高文秀,芦菲

(吉林化工学院化学与制药工程学院,吉林 吉林 132022)

摘要:从荧光探针分子识别机制角度出发,综述了近 5 年络合型和反应型的“关-开”型铜(II)离子荧光探针的研究进展,在此基础上对“关-开”型铜离子荧光探针的发展前景做了展望。

关键词:铜离子;荧光探针;关-开;反应型;络合型

中图分类号: O655

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)11-0238-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.11.050

Research progress on “off-on” fluorescent probes for Cu(II) ion

WU Ping, REN Hong*, HAN Dan-dan, GAO Wen-xiu, LU Fei

(School of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: The research progress in “off-on” fluorescent probes for Cu²⁺ in the past five years is reviewed from the viewpoint of molecular recognition mechanism of fluorescence probe (complexation probe and reaction probe). On this basis, the development prospect of “off-on” copper ion fluorescence probe is expected.

Key words: Cu ion; fluorescent probes; off-on; reactive type; complexation type

铜元素广泛存在于大气、土壤以及水体环境中,同时也是众多蛋白质或酶的重要组成部分。如果人体在生长的过程中缺少金属铜元素,就会导致人体造血功能下降、胆固醇升高以及相应的一些合成酶成分下降等,甚至会导致冠心病;但是如果过量的铜元素被人体摄入,也会发生很多问题,比如会抑制人体内部细胞酶的活性,导致人体铜中毒^[1-2]。世界卫生组织(WHO)规定饮用水中 Cu²⁺的最大允许浓度在 30 μmol/L 左右,并且成人每日铜的平均摄入量不应超过 10~12 mg^[3]。

传统检测过渡金属离子的仪器方法有分光光度法、电化学法、原子吸收法、色谱分析法和质谱分析法等,虽然可以得到很精密的测量值,但由于设备成本高、样品制备烦琐或测试时间长等缺陷限制了这些仪器分析方法在实际检测、原位检测,特别是生物体系比如体外检测和活体检测中的应用。荧光分子探针分析法选择性好、灵敏度高、操作简单且重现性好,近年来引起了研究者的广泛兴趣。由于 Cu²⁺的顺磁性质,大多数 Cu²⁺荧光探针在一定程度上表现

出荧光猝灭,即属于“开-关”型荧光化学传感器^[4-6];但“开-关”型感应材料的荧光猝灭可能由于其他环境因素而导致,干扰铜离子的测定进而产生假阳性结果。为克服这一缺点,近年来“关-开”型荧光探针得到研究者的重视。所以,根据铜离子检测的荧光探针的不同识别机制,大致可分为 2 类:“开-关(on-off)”、“关-开(off-on)”。然而,“关-开”型铜离子荧光探针的数量和种类还是远远少于经典的“开-关”型 Cu²⁺荧光探针,具有广阔的拓展空间。本文中从不同的荧光探针识别 Cu²⁺离子机制出发,集中讨论近 5 年来报道的“关-开”型 Cu²⁺荧光探针。除此之外,部分“关-开”型铜离子探针在离子响应过程中在可见光波长范围内会呈现明显的颜色变化,即比色检测在文中也有涉及。

1 络合型荧光探针

络合型荧光探针的分子结构通常由络合基团、荧光基团和它们之间的连接基团 3 部分组成,或者由络合基团与荧光基团直接共价连接组成。其中,

收稿日期:2020-07-13;修回日期:2020-09-04

基金项目:吉林省自然科学基金项目(20170101211JC);吉林化工学院重大科技项目(2019014);吉林化工学院科学技术研究项目(2018030)

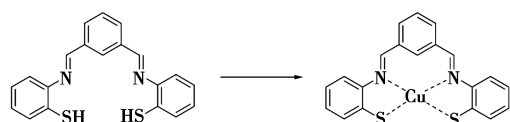
作者简介:吴平(1981-),男,博士,副教授,主要从事有机合成、精细化学品合成及化工助剂研究,wuping0927@163.com;任红(1981-),女,博士,副教授,主要从事金属探针分子的设计合成与应用方面研究,通讯联系人,renhong-ji@163.com。

络合基团的作用是选择性结合金属离子,荧光基团的作用是光的吸收和荧光信号的发射,连接基团将络合基团和荧光基团2部分连成1个分子,或者调节络合能力和荧光性质,将识别信号有效转化成特定的光信号。

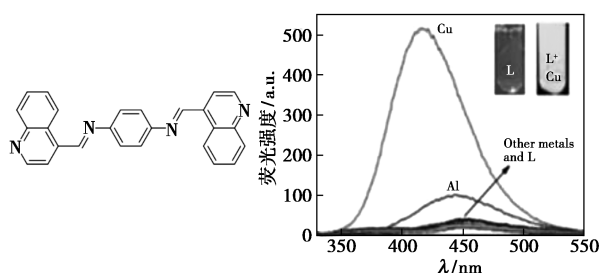
1.1 席夫碱类络合型探针

2017年,Diao等^[7]设计了一个具有对称结构的席夫碱探针 PMBB,分子中连有硫醇取代基,分子内存在光诱导电子转移(photoinduced electron transfer, PET)效应,导致分子无荧光发射。PMBB是一个四齿配体,经 Job's plot法和 ESI-Mass 谱图证明 Cu^{2+} 与 PMBB 形成 1:1 配合物,加入 Cu^{2+} 后, Cu^{2+} 与 PMBB 形成的配合物阻断 PET 效应,且产生配位增强(chelation enhanced fluorescence, CHEF)效应,在 365 nm 处有强荧光发射峰出现,同时溶液颜色由无色变为黄色,可实现肉眼监测。 Cu^{2+} 离子检测线性范围为 0.2 ~ 50 $\mu\text{mol/L}$,检出限为 0.2 $\mu\text{mol/L}$ [图 1(a)]^[7]。

与 PMBB 多齿配体不同,Ghorai等^[8]研制了一种带有喹啉取代基的席夫碱类单齿配体 L,由于 PET 效应在 450 nm 处有微弱荧光。分子中有 2 种氮原子与 Cu^{2+} 存在螯合作用,在不同溶剂中分别通过荧光检测 Cu^{2+} 和 Al^{3+} 。此实验比较特殊的是,检测 Cu^{2+} 需要在 CH_3CN 溶液中进行。随着 Cu^{2+} 的不断加入,金属离子与识别基团结合,对分子的推-拉电子作用产生影响,引起偶极矩的变化,荧光峰蓝移 33 nm,在 417 nm 处出现了明显的荧光发射峰。初始时 L 的荧光量子效率为 0.018,加入 Cu^{2+} 后的“L+ Cu^{2+} ”荧光量子效率为 0.387,荧光增强机理为 CHEF 效应。其中, Cu^{2+} 与 L 形成的配合物配比为



(a) 席夫碱探针(PMBB)结构和 PMBB-Cu 配合物



(b) 席夫碱探针 L 结构和 L 在 Cu^{2+} 作用下的荧光光谱

图 1 以席夫碱为母体的络合荧光探针

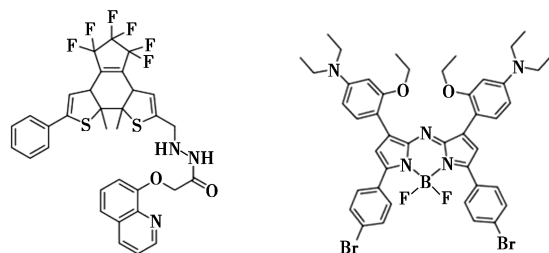
2:1(经 Mass 谱图证实),蓝移现象的产生是由于分子内电荷转移(intramolecular charge transfer, ICT)导致。尽管 Cu^{2+} 在 CH_3CN 溶液中能产生明显的荧光增强效应,而在乙醇溶液中却观察不到离子感应现象,这可能归结为在 CH_3CN 溶液中,乙腈 N 原子与 Cu^{2+} 离子存在配位作用,或者乙醇中存在着其他作用,这还需要进一步研究。EDTA 和铜离子的交替循环加入可使荧光感应过程可逆进行,佐证了络合作用机理。需要说明的是,络合型 L 探针分子灵敏度非常高,检测限低至 18.4 nmol/L,在 $\text{pH}>4$ 的范围内对 Cu^{2+} 离子感应效果比较理想[图 1(b)]^[8]。

1.2 喹啉类络合型探针

Shi等^[9]报道了一个以喹啉为母体的螯合型荧光探针 10,由于分子中存在 PET 效应,没有荧光发射。当荧光探针 10 与铜离子结合,螯合物中存在 CHEF 效应且抑制了 PET 作用。10 与 Cu^{2+} 在乙腈溶液中以配合比 1:1 配位,结合常数 K 为 $1.50 \times 10^5 \text{ M}^{-1}$,当 Cu^{2+} 加入量为 10 物质质量的 5 倍时达到荧光强度平衡,在 510 nm 处出现了高达 45 倍荧光增强,溶液颜色由无色变为蓝色,检测限为 0.38 $\mu\text{mol/L}$ 。EDTA 的加入使荧光检测过程循环,进一步证明了探针分子和 Cu^{2+} 离子间存在络合作用[图 2(a)]^[9]。

1.3 氟化硼二吡咯类络合型探针

与席夫碱、脲等含有亚胺结构的化合物因存在分子内 PET 效应而没有荧光发射不同,2019年,Gawale等^[10]设计了一种基于 B—N 键的氟化硼二吡咯(BODIPY)探针,该分子本身具有荧光,当引入 2 个外周二乙基氨基,发生了分子内 PET 导致分子没有荧光,而二乙基氨基作为配位基团与 Cu^{2+} 作用,随着 Cu^{2+} 不断加入,分子产生较弱的荧光,在 620、700 nm 处的荧光强度不断增强。尤其是当 Cu^{2+} :BODIPY 摩尔比超过 3 时,2 个甲氧基和吡咯相邻 N 原子与铜发生螯合作用,螯合物在 700 nm 处



(a) 喹啉-酰肼型络合

荧光探针 10

(b) BODIPY 型络合荧光探针

图 2 螯合型荧光探针结构图

的荧光显著增强,使得 BODIPY 探针可作为良好的近红外荧光探针。此外,在荧光响应 Cu^{2+} 离子过程中,溶液的颜色伴随着浅蓝到深蓝的明显变化,可有效实现 Cu^{2+} 可视检测[图 2(b)]^[10]。

1.4 偶氮苯类络合型探针

偶氮化合物是一种常用染料,可以作为普通的酸碱指示剂,具有顺、反几何异构体,通常反式结构比顺式要稳定,2 种异构体在特定波长的光照或加热条件下可以相互转换。但由于会发生光异构化,偶氮化合物一般没有荧光或荧光很弱。偶氮化合物如果要作为荧光探针,就需要克服光异构化作用。偶氮基团中的 2 个氮原子上都有孤对电子,可以参与配位,当偶氮键的邻位有其他络合基团时,偶氮分子就成为螯合剂,与金属离子形成螯合物后产生荧光,比如刚果红(BDA)是酸碱指示剂,本身没有荧光,但 BDA 与 Cu^{2+} 之间形成配合物后在 407 nm 产生荧光发射(图 3)。BDA 与 Cu^{2+} 离子配位比为 2:1,结合常数 $K=3.5 \times 10^5 \text{ M}^{-1}$,加入 EDTA 后荧光淬灭,再加入 Cu^{2+} 铜离子后荧光恢复,在 EDTA 和 Cu^{2+} 交替作用下可循环 3~4 次,说明 Cu^{2+} 检测可逆,为“络合型”荧光探针。在 $\text{CH}_3\text{CN}/\text{H}_2\text{O}$ ($v/v=1/9$, $\text{pH}=7.2$) 溶剂中,该配位反应 10 s 内能快速平衡,线性检出范围为 0~5 $\mu\text{mol/L}$,检出限为 0.12 $\mu\text{mol/L}$ ^[11]。

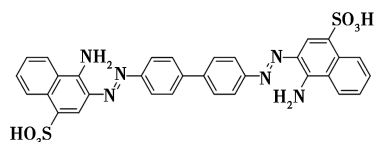


图 3 刚果红

上述这几种络合型荧光探针在与铜发生络合时,原有抑制发射荧光的因素,比如 PET 效应、光异构化等,在配位作用促进下得以克服,从而产生荧光,实现通过“关-开”型模式来检测 Cu^{2+} 离子。

2 反应型荧光探针

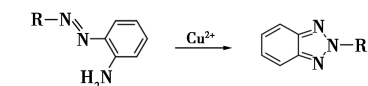
除了 Cu^{2+} 离子与探针络合外,荧光探针还可以通过与待测物发生反应,生成新的化合物并产生不同荧光来对 Cu^{2+} 离子进行检测。金属 Cu^{2+} 离子具有氧化或催化作用,可以诱导有机化合物的特定官能团发生化学反应。在设计荧光探针分子结构时,将可能与铜发生反应或被铜催化的官能团引入到分子结构当中,在 Cu^{2+} 离子的存在下,相应的氨基、羟

基或双键等官能团就会发生化学反应,生成不同结构的光活性化合物,使得光谱性质或颜色对应改变,进而引起探针荧光信号的改变。这种在 Cu^{2+} 离子存在下发生化学反应生成新的有机分子的荧光探针被称为反应型荧光探针。

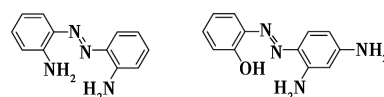
2.1 偶氮类反应型荧光探针

偶氮化合物除了前述刚果红与铜通过络合作用产生荧光,还可以通过与铜反应生成新的荧光分子。比如,邻氨基偶氮苯因发生光异构化现象而无荧光发射,但在适当条件下会在铜离子的作用下发生成环反应,生成含有 1,2,3-三氮唑基团的强荧光物质[图 4(a)]。2012 年,Jo 等^[12]合成了一系列具有不同给电子基团的邻氨基偶氮苯,由于 Cu^{2+} 催化邻氨基偶氮苯的环化反应,室温下水溶液 ($\text{pH}=6.0\sim 8.0$) 中荧光探针的荧光强度增至 80 倍。随着给电子能力的增强,室温下生成三氮唑的反应速度也逐渐加快。

以邻氨基偶氮苯作为识别基团,本研究团队也先后合成 2,2'-二氨基偶氮苯(L1)和 2,4-二氨基-2'-羟基偶氮苯(L1-OH)[图 4(b)]^[13-14]。L1 和 L1-OH 在 Cu^{2+} 离子作用下,邻氨基偶氮基团可脱氢环化生成三唑杂环。为了揭示脱氢成环机理,分别合成了 L1 和 L1-OH 的环化产物苯并三氮唑、L1-BTA 和 L1-OH-BTA。在 365 nm 激发波长下,L1-BTA、L1-OH-BTA 的荧光发射峰为 475、478 nm,对应于“探针分子+ Cu^{2+} ”的荧光光谱。进一步在“L1(L1-OH)+ Cu^{2+} ”的混合液中添加螯合剂 EDTA,荧光光谱发射峰的强度和位置没有变化,EDTA 不会干扰铜存在下的苯并三氮唑荧光发射,这表明脱氢环化过程的不可逆性。2,2'-二氨基偶氮苯(L1)和 2'-羟基-间二氨基偶氮苯(L1-OH)与 Cu^{2+} 离子的荧光检测过程属于典型反应型探针。



(a) 邻氨基偶氮基团转变为三唑环



(b) 探针 L1, L1-OH 结构

图 4 反应型邻氨基偶氮型探针对于 Cu^{2+} 离子检测机理示意图

2.2 罗丹明类反应型荧光探针

反应型罗丹明类铜离子荧光探针多基于 Cu^{2+}

催化螺环酰胺结构的开环水解,反应过程中伴随C—N键断裂^[15-17]。2018年,Wechakorn等^[18]设计了一例以罗丹明为母体的荧光探针RHT,Cu²⁺首先与氮、氧等原子络合,Job's plot法证明探针与Cu²⁺以1:1络合,随后发生水解反应生成罗丹明B和1,2,3-三氮唑衍生物,在579 nm处出现荧光信号峰,属于典型的络合水解型探针。该探针具有较宽的pH适用范围(5~9),反应灵敏度很高,检测限低至1 nmol/L[图5(a)]^[18]。

除了C—N键断裂,在Cu²⁺作用下罗丹明母体中的C—C键也可发生活化。Majumdar等^[19]在罗丹明作骨架上引入苯并咪唑基团,构建了一种新型Cu²⁺荧光探针1,其检测机理非常独特。在Cu²⁺作用下罗丹明母体分子发生了C—C键断裂,罗丹明的开环反应通过¹HNMR谱图中 4.84×10^{-6} 处H_a的吸收峰消失得到了证明。在Cu²⁺催化反应中,形成了1:1的配合物,结合常数K为 $(1.25 \pm 0.019) \times 10^4 \text{ M}^{-1}$ 。在乙腈-水(4/1, v/v)溶液中,与Cu²⁺作用在595 nm处的荧光强度随Cu²⁺浓度(50~150 μmol/L)增加线性增强,随着体系荧光强度增强,颜色由无色变为粉红色,检出限为0.554 μmol/L。在纯乙腈溶液中,C—C键断裂的速度最快,荧光强度在5 min内达到平衡[图5(b)]。

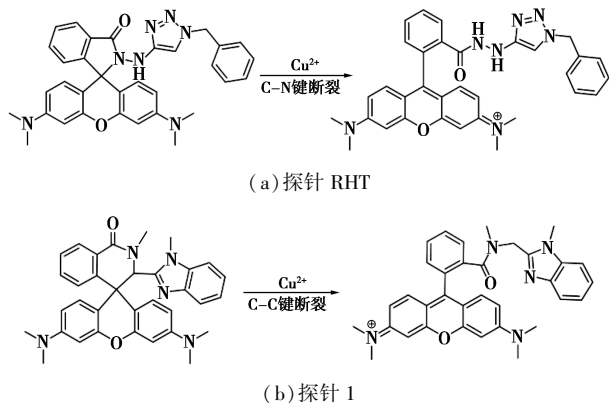


图5 以罗丹明为母体检测Cu²⁺离子机理示意图

2.3 香豆素类反应型荧光探针

与反应型罗丹明类铜离子荧光探针类似,香豆素作为常用荧光染料也被用来检测Cu²⁺离子。由于香豆素分子有荧光,所以设计“关-开”型铜离子荧光探针就需要在分子结构中引入可以淬灭香豆素荧光的基团或光化学效应。Cao等^[20]设计合成了一个包含香豆素和偶氮基团的“关-开”型荧光铜探针,偶氮键的存在淬灭了香豆素的荧光,分子处于“关”的状态。当分子中的邻氨基偶氮结构单元在

Cu²⁺的作用下转化为强荧光发射的1,2,3-三氮唑基团,检测体系处于“开”的状态,是典型的反应型荧光探针^[20]。此外,在该检测体系中荧光探针分子在Cu²⁺作用下,溶液颜色由黄变粉,具有理想的比色检测效果,该探针pH适用范围为3~10。2019年,张长丽等^[21]以香豆素为荧光团,设计合成了一种基于铜催化酰胺水解反应的荧光探针Cou-P。对Cou-P识别Cu²⁺机理研究表明,Cou-P与Cu²⁺先形成稳定的配合物,络合比1:1,Cou-P/Cu²⁺配合物进一步在Cu²⁺催化下水解为香豆素取代类羧酸(Cou-COOH),见图6。

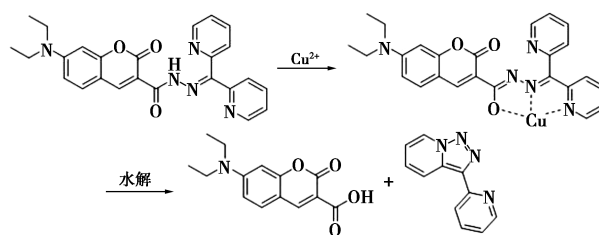


图6 以香豆素为母体检测Cu²⁺离子机理示意图

3 结语与展望

从荧光响应机理角度对近年来“关-开”型Cu²⁺荧光探针进行了总结,虽然铜离子荧光探针分子在设计及应用方面都取得了较大进展,但是仍然存在有待解决的问题。从探针分子作为感应材料本身而言,探针分子设计策略还有待优化,灵敏度、光稳定性、荧光亮度、特异性、响应时间和抗干扰性等指标均需进一步提高。本综述为“关-开”型铜荧光探针领域构建小分子荧光探针提供重要线索,为进一步设计具有不同荧光母体和识别基团的荧光探针提供重要思路。随着科学技术的不断发展,研究者将开发出更为优异的“关-开”型铜离子荧光探针,从而更好地为工农业生产、疾病诊断和临床医学、环境治理等学科和研究领域服务。

参考文献

- [1] Chan S I, Yu S S F. Copper protein constructs for methane oxidation [J]. *Nat Catal*, 2019, 2: 286-287.
- [2] Rihel J. Copper on the brain [J]. *Nat Chem Bio*, 2018, 14: 638-641.
- [3] WHO. WHO guidelines values for chemicals that are of health significance in drinking water [Z]. *Guidelines for Drinking Water Quality*, Geneva, 3rd en, 2008.
- [4] Sun T, Li Y, Niu Q F, et al. Highly selective and sensitive determi-

- nation of Cu^{2+} in drink and water samples based on a 1,8-diaminonaphthalene derived fluorescent sensors[J]. *Spectrochim Acta A*, 2018, 195: 142–147.
- [5] Sun T, Niu Q F, Li T D, *et al.* A simple, reversible, colorimetric and water-soluble fluorescent chemosensor for the naked-eye detection of Cu^{2+} in ~100% aqueous media and application to real samples [J]. *Spectrochim Acta A*, 2018, 188: 411–417.
- [6] Huang G Z, Li C, Han X T, *et al.* Sensitive and selective detection of $\text{Cu}(\text{II})$ ion: A new effective 1,8-naphthalimide-based fluorescence “turn-off” sensor[J]. *Luminescence*, 2018, 33(4): 660–669.
- [7] Diao H P, Niu W P, Liu W, *et al.* Design, properties and application of a facile fluorescence switch for $\text{Cu}(\text{II})$ [J]. *Spectrochim Acta A*, 2017, 170: 65–68.
- [8] Ghorai A, Mondal J, Chowdhury S, *et al.* Solvent-dependent fluorescent-colorimetric probe for dual monitoring of Al^{3+} and Cu^{2+} in aqueous solution: An application to bio-imaging[J]. *Dalton Trans*, 2016, 45: 11540–11553.
- [9] Shi Z L, Tu Y Y, Wang R J, *et al.* Highly sensitive and selective turn-on fluorescent sensor for dual recognition of Cu^{2+} and CN^- based on a methylquinoline derivative [J]. *Dyes and Pigments*, 2018, 149: 764–773.
- [10] Gawale Y, Adarsh S M N, Joseph J, *et al.* Novel Aza-BODIPY based turn on selective and sensitive probe for on-site visual detection of bivalent copper ions [J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 171: 107684.
- [11] Wang Q M, Wu S S, Tan Y Z, *et al.* A highly selective, fast-response and fluorescent turn on chemosensor for the detection of Cu^{2+} ions and its potential applications [J]. *J Photochem Photobiol: A*, 2018, 357: 149–155.
- [12] Jo J Y, Lee H Y, Liu W J, *et al.* Reactivity-based detection of Copper (II) ion in water: Oxidative cyclization of azoaromatics as fluorescence turn-on signaling mechanism [J]. *J Am Chem Soc*, 2012, 134: 16000–16007.
- [13] Ren H, Wu P, Li F, *et al.* Visual colorimetric and fluorescence turn-on probe for $\text{Cu}(\text{II})$ ion based on coordination and catalyzed oxidative cyclization of ortho amino azobenzene [J]. *Inorg Chim Acta*, 2019, 487: 234–239.
- [14] Ren H, Wu P, Li F, *et al.* Development of a colorimetric and fluorescent Cu^{2+} ion probe based on 2'-hydroxy-2,4-diaminoazobenzene and its application in real water sample and living cells [J]. *Inorg Chim Acta*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119583>.
- [15] Dujols V, Ford F, Czarnik A W. A long-wavelength fluorescent chemodosimeter selective for $\text{Cu}(\text{II})$ ion in water [J]. *J Am Chem Soc*, 1997, 119: 7386–7387.
- [16] 付杨, 颜范勇, 郑坦承, 等. 反应型罗丹明类荧光探针 [J]. *化学进展*, 2015, 27(9): 1213–1229.
- [17] Wang L, Ye D D, Li W X, *et al.* Fluorescent and colorimetric detection of $\text{Fe}(\text{III})$ and $\text{Cu}(\text{II})$ by a difunctional rhodamine-based probe [J]. *Spectrochim Acta A*, 2017, 183: 291–297.
- [18] Wechakorn K, Prabhais S, Suksen K, *et al.* A rhodamine-triazole fluorescent chemodosimeter for Cu^{2+} detection and its application in bioimaging [J]. *Luminescence*, 2018, 33: 64–70.
- [19] Majumdar A, Lim C S, Kim H M, *et al.* New six-membered pH-insensitive rhodamine spirocycle in selective sensing of Cu^{2+} through C—C bond cleavage and its application in cell imaging [J]. *ACS Omega*, 2017, 2: 8167–8176.
- [20] Cao S, Jin Q Y, Geng L, *et al.* A “turn-on” fluorescent probe for the detection of Cu^{2+} in living cells based on a signaling mechanism of $\text{N}=\text{N}$ isomerization [J]. *New J Chem*, 2016, 40: 6264–6269.
- [21] 张长丽, 张虹, 何风云, 等. 基于香豆素的增强型铜离子荧光探针及其在细胞成像中的应用 [J]. *无机化学学报*, 2019, 35(10): 1869–1876. ■

朗盛出品以聚酰胺 6 为基体的新型阻燃热塑性复合材料

朗盛出品的 Tepex 连续纤维增强热塑性复合材料具有较高的固有阻燃性能, 其中一个原因在于其具有较高的纤维含量。因此, 这种材料在没有阻燃配方的情况下已通过许多典型应用所要求的可燃性测试。然而, 对于某些应用 (如控制柜外壳或电动汽车的高压蓄电池部件), 通常必须具备美国测试机构保险商实验室公司 (Underwriters Laboratories Inc.) 的 UL 94 可燃性测试的 V-0 等级。针对这种情况, 朗盛已经开发出 3 种以聚酰胺 6 为基体的新型无卤阻燃 Tepex 材料。

(1) 3 种产品可供选择

Tepex dynalite 102fr-RG600(x)/47% 采用粗纱玻璃纤维增强。这些纤维也可以多轴排列, 从而精确地匹配部件中的负载转移点和负载路径。该复合材料应用范围广泛, 适用于电动汽车蓄电池的分隔板、盖板、控制单元外壳等高压部件。

Tepex dynalite 102fr-FG290 主要应用于电气和电子应用领域。凭借增强的细玻璃纤维, 该材料可用于制作易于喷漆的高质量表面。例如, 它适用于要求符合 DIN

EN 45545-2 标准“铁路应用—铁路车辆的防火保护”的小型外壳。

Tepex dynalite 202fr 采用碳纤维增强, 适用于承受极端机械应力的部件, 如高强度电子外壳。

(2) 机械性能与标准材料类似

这 3 种结构材料都可以大规模提供, 也可以将碳纤维织物或将金属表面涂层嵌入复合材料中打造具有电磁屏蔽性能的材料。UL 94 V-0 等级针对的是厚度介于 0.5~3.5 mm 之间的样本。“选用的阻燃添加剂使复合材料的机械性能不受负面影响, 并与相应的标准材料相媲美。例如, Tepex dynalite 202fr 的弯曲强度超过 600 MPa”, Bond-Laminates 的材料开发人员 Simon Rosen 解释。所有阻燃材料均符合欧盟 RoHS (有害物质限制) 指令和欧盟 REACH 法规 (化学品注册、评估、许可和限制法规 (EC) 第 1907/2006 号)。

除了这 3 款新产品, 朗盛还供应其他以聚碳酸酯为基体的无卤素阻燃 Tepex 材料, 其中大多数已通过 UL 94 V-0 认证。(余婷)