

离子液体复配溶液吸收 CO₂ 的研究进展

刘忠海, 丁玉栋*, 廖强, 朱恂, 王宏, 宋淦

(低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400044)

摘要: 综述了近年来国内外利用离子液体吸收 CO₂ 的研究状况, 重点分析了离子液体-水复配溶液和离子液体-有机胺复配溶液吸收分离 CO₂ 的特点及其机理, 讨论了温度、压力、配比、特殊基团等相关影响因素对脱碳过程的影响。对尚存在的问题提出建议, 并对前景做了展望。

关键词: 离子液体; CO₂; 吸收; 复配溶液

中图分类号: TK121

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)07-0031-05

Review on CO₂ absorption with ionic liquids mixed solution

LIU Zhong-hai, DING Yu-dong*, LIAO Qiang, ZHU Xun, WANG Hong, SONG Gan

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The recent progress of CO₂ absorption with ionic liquids mixed solution is reviewed. The CO₂ absorption characteristics and mechanisms with mixed ionic liquids-water solution and ionic liquids-alkanolamine solution are mainly analyzed. The effects of temperature, CO₂ partial pressure, concentration and special functional group on the decarbonation process are discussed. Some advices are proposed for solving the existing problems. The outlook for CO₂ absorption with ionic liquids mixed solution in the future is also put forward.

Key words: ionic liquid; carbon dioxide; absorption; mixed solution

随着人类社会的进步和发展,化石能源的大量开采和使用造成 CO₂ 排放量越来越大,导致全球变暖进一步加剧。因此,CO₂ 减排正越来越引起全世界的关注。目前,二氧化碳捕集与封存技术(CCS)被认为是能够大幅减少来自大量化石燃料使用产生的温室气体(GHG)排放的技术^[1]。当今,对于 CO₂ 的捕集方法主要有溶剂吸收法、膜分离法、吸附法和低温分离法^[2],其中溶剂吸收法由于具有分离效果好、工艺简单等优势,受到工业界的广泛关注。众多研究者对高效、低成本吸收剂的不断追求,使得吸收剂从传统的氨水、热钾碱和有机胺等逐步过渡到了新型的混胺、离子液体-水以及离子液体-有机胺复配溶液。

本文中从2个方面,离子液体单一工质和离子液体复合工质,分别综述国内外采用溶剂吸收法捕集 CO₂ 的研究现状及进展,重点分析离子液体-水复配法、离子液体-有机胺复配法吸收 CO₂ 的优缺点,对尚存在的问题提出建议,并对捕碳技术前景进行展望。

1 离子液体

离子液体是由特定阴阳离子构成的室温或近于

室温下呈液态的低温熔融盐,是一种新型溶剂。Zhang 等^[3]总结了近些年国内外有关离子液体吸收-转化 CO₂ 的研究状况,大量研究成果表明,离子液体对 CO₂ 具有很好的溶解能力。根据离子液体的结构特征和吸收 CO₂ 的机理,离子液体可以分为2类,即常规离子液体和功能型离子液体。常规离子液体吸收 CO₂ 的能力较差,主要是因为它仅能通过物理作用吸收固定 CO₂;而功能型离子液体具有碱性基团可以通过化学反应吸收大量的 CO₂,因而其吸收性能良好。

1.1 常规离子液体

常规离子液体主要包括咪唑类、吡啶类、氨基酸类和吡咯类等。目前报道的吸收 CO₂ 的常规离子液体主要集中在咪唑类离子液体,如阳离子为1-烷基-3-甲基咪唑,阴离子为 [BF₄]⁻、[PF₆]⁻、[Tf₂N]⁻、[NO₃]⁻、[EtSO₄]⁻ 等的离子液体。1999年,Blanchard 等^[4]首次报道了 CO₂ 在离子液体 [bmim][PF₆] 中具有较大的溶解度,如在 8.3 kPa 时,CO₂ 的溶解度可达 0.75(摩尔分数)。

由于常规离子液体主要通过物理作用,即离子液体利用特有的氢键网络结构以及阴离子与 CO₂

收稿日期:2014-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51276205);中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目(CDJZR12140035);国家自然科学基金重点项目(51136007)

作者简介:刘忠海(1986-),男,硕士生;丁玉栋(1976-),副教授,通讯联系人,023-65102474,dingyudong@cqu.edu.cn。

之间的弱 Lewis 酸碱作用将 CO₂ 置于离子液的网络空隙中固定^[5], 这使得常规离子液体在低压下对 CO₂ 溶解能力有限, 因此当前的研究重点主要集中在高压条件下。

Cadena 等^[6]通过实验和分子动力学模拟研究了 CO₂ 在咪唑类离子液体中的溶解度变化规律。结果发现, 阴离子对 CO₂ 在离子液体中的溶解度有着重要影响。随后, Kanakubo 等^[7]用高压下 [BMIM][PF₆]-CO₂ 体系的 X 射线衍射实验进一步论证了该结论的正确性。

此外, CO₂ 的溶解度还受到阳离子中咪唑环取代基的影响。Shariati 等^[8]研究发现 CO₂ 的溶解度几乎随咪唑环烷基链长度增加而呈线性递增。其主要原因是, 咪唑类离子液体的密度随咪唑环上烷基取代基的增长而减小, 烷基链较长的离子液体自由体积相对较大, 具有更大的 CO₂ 溶解能力^[9]。Cadena 等^[6]对咪唑环 C2 位的取代基作了相关研究, 表明用 -CH₃ 去取代阳离子 [bmim]⁺ 上 C2 位的氢原子后, 会减弱 CO₂ 与阴离子间的相互作用, 以致降低了 CO₂ 的溶解度。

1.2 功能型离子液体

为进一步增大离子液体对 CO₂ 的溶解能力, 在常规离子液体结构中引入极性基团 (如 -F-、-NH₂-、-O- 等), 设计并合成具有明确目标和特殊功能的离子液体已成为当今捕碳技术的研究热点之一。

Bates 等^[10]合成了含胺基 (-NH₂) 的功能型离子液体 [apbim][BF₄], 研究发现, 引入 -NH₂ 官能团后吸收 CO₂ 的能力有了较大的提高, 吸收容量达质量分数 7.4% (图 1)。Tang 等^[11]对比分析了 [apbim][BF₄] 吸收 CO₂ 前后的 FT-IR 和 ¹³CNMR 谱图, 确定该过程为可逆的化学吸收且在反应中生成了氨基甲酸酯铵盐, 离子液体可以循环使用。Yu 等^[12]运用量子化学及分子动力学进行了吸收机理方面的研究, 提出了离子液体 [apbim][BF₄] 的氢键结构。

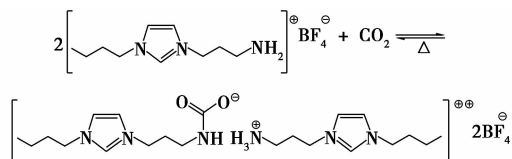


图 1 [apbim][BF₄] 吸收 CO₂ 的反应

Muldoon 等^[13]报道了 CO₂ 在全氟取代烷基-三氟硼酸根离子液体中的溶解性能, 实验表明, 随着阴

离子中碳氟链的增长, 离子液体对 CO₂ 的亨利系数变小, 溶解度增大。Mahurin 等^[14]在 1-烷基-3-甲基咪唑盐阴离子中引入不同数量的腈基, 合成了 3 种离子液体 [bmim][N(CN)₂], [bmim][C(CN)₃] 和 [emim][B(CN)₄]。结果表明, 室温下 [emim][B(CN)₄] 离子液体吸附 CO₂ 的量比 [emim][Tf₂N] 高 30%, 对 CO₂/N₂ 的选择吸收比例约为 53。

2 离子液体复合工质

近年来, 有越来越多的研究者把注意力集中在含有 2 种或者 2 种以上不同工质配制成的复配溶液对 CO₂ 吸收性能及机理研究上来。一般来说, 复合工质能够较好地整合其组分工质的优点, 如吸收速率快、吸收容量大、再生能耗低、低腐蚀性以及低成本等。通常离子液体复配溶液可以分为 2 类, 离子液体-水复配溶液、离子液体-有机胺复配溶液。

2.1 离子液体与水复配法

纯的离子液体黏度大、成本高, 影响其在工业脱碳上的推广应用。为克服这一缺陷并显著降低吸收剂成本, 亲水性离子液体-水复配吸收剂的制备引起众多研究者的关注。

王赞霞等^[15]研究了含水量变化对双氨基功能化季 ■ 类离子液体-[aP₄₄₄₃][Gly] 吸收 CO₂ 性能的影响。结果表明, 添加适量水可以提升 [aP₄₄₄₃][Gly] 吸收 CO₂ 的性能。这主要是因为加入水降低了离子液体的黏度, 有利于 CO₂ 气体在液体中的扩散, 提高了离子液体捕获 CO₂ 的效率。

李天成等^[16]以 [NH₂-C₃mim][Br]-H₂O 复配溶液作为吸收剂在平衡吸收装置中开展了常温加压吸收及常温减压解吸再生实验。研究发现, 随着复配吸收剂中离子液体成分配比增大, 吸收速率也随之增大。但当配比超过 0.5 时, 吸收速率不升反降, 其原因是受复配溶液中复杂氢键网络场效应减弱及黏度增大的影响。

吴永良等^[17]合成一种含氨基的离子液体——1-(1-氨基丙基)-3-甲基咪唑盐 ([NH₂p-mim]Br), 与水复配成质量分数为 45% 的混合溶液。当温度为 40℃, CO₂ 分压为 106 kPa 时, 该吸收剂的饱和吸收量为 0.444 mol/mol, 此值接近理论值 0.5 mol/mol。饱和吸收剂在 90℃ 条件下真空干燥解吸, 重复吸收 5 次发现吸收性能差异不大。

Guo 等^[18]研究了 [Hmim][Gly] 水溶液吸收 CO₂ 的动力学。在 303 K 时, [Hmim][Gly] 水溶液

对CO₂的吸收速率高于同浓度的MEA、DEA及AMP水溶液。其主要原因在于[Hmim][Gly]与CO₂一级反应产生的一COO⁻与[Gly]⁻结合后水解产生—COOH和OH⁻,而OH⁻对CO₂有比较强的捕获能力。对[Hmim][Gly]水溶液进行不同温度下再生实验发现,富液再生60 min内完成,最高再生率高达99.11%。

Stevanovic等^[19]报道了离子液体水溶液溶解CO₂的能力。结果表明,[C₁C₄PyrrO][OAc]-H₂O体系比[C₁C₂Im][OAc]-H₂O、[C₁C₄Im][OAc]-H₂O体系吸收CO₂能力强。用分子动力学方法探究了其吸收CO₂的机理,发现CO₂在非极性溶剂中溶解性更好,而且相对于阳离子来说,CO₂与阴离子交互作用占主导作用。

Kumezan等^[20]测定了CO₂在新型离子液体[bmim][CH₃SO₄]水溶液中的溶解度,研究发现,在293~373 K、1~10 MPa实验条件下,CO₂在[bmim][CH₃SO₄]水溶液中的最大溶解度为1.64 mol/kg(质量摩尔浓度)。同时用严格的热力学模型对溶解度数据进行关联。

Lim等^[21]研究了温度、压力、水的含量以及阴阳离子种类等因素对离子液体溶解CO₂性能的影响,结果发现,较低的温度、较高的CO₂分压、较低的含水量、阳离子含有较长的烷基链且阴离子具有更低的极性的实验条件下有利于CO₂在离子液体中溶解度的提升。其中在313.15 K、8~10 MPa,当水的含量增长4~10倍,该离子液体对CO₂的溶解度减少7%~8%。在20~30 MPa时,溶解度减少2%~3%。

Zhang等^[22]合成了6种含双阳离子的离子液体(DILs),研究了不同温度、压力、水含量等因素对CO₂溶解度的影响。研究表明,随压力升高,CO₂溶解度呈直线增长;在中等压力(500 kPa)范围内,随温度升高,CO₂溶解度随之减小。4种AA-DILs在与水复配后其脱除CO₂的性能有了较大的改善,如[Bis(mim)C₄][Pro]₂与水复配后,由于黏度减小导致气液传质阻力大大减小,其吸收性能呈几何级数增加。

然而有些研究者却得出了相悖的结论,如Aparicio等^[23]用分子动力学模型探究了水的含量对亲水性离子液体[HE3MA]、[3HEMA]MS吸收CO₂性能的影响。结果发现,水分子的存在不会影响CO₂分子在溶液中的扩散速率及水分子在离子周围的分布情况。因此,水的存在不会对亲水性离子液

体[HE3MA]和[3HEMA]MS吸收CO₂的性能产生太大的影响。

2.2 离子液体与有机胺复配法

离子液体直接应用于脱碳工业似乎困难重重,一方面是由于这些离子液体黏度比较大,造成吸收过程中的气液传质障碍;另一方面离子液体在合成过程考虑到原料不易获得,合成、提纯困难,因此其生产成本会远远高于现在工业上已经广泛应用的有机胺溶液。实际上,有机胺溶液捕集CO₂也存在诸多缺点,如胺对运行设备有强腐蚀性,会增加安装运行成本;胺在高温下易发生降解(尤其是在解吸过程中),再生耗能大;胺的易挥发性会造成对环境的二次污染并增加操作成本。因此,找到一种更经济、性能更好的混合吸收剂成为该领域的研究重点。

Camper等^[24]在2008年首次提出并分析了离子液体-醇胺溶液复配溶液吸收CO₂的可行性,指出复配溶液的最大优势在于可以获得其成分溶质兼有的优点,其应用研究开发前景比较乐观,值得深入研究。

王渊涛等^[25]为了改善MDEA水溶液对CO₂气体的吸收性能,合成4种氨基酸功能型离子液体作为活化剂与其复配成新型的CO₂吸收剂,考察了离子液体浓度、种类等因素对吸收CO₂性能的影响。结果表明,离子液体能够显著提高MDEA水溶液吸收CO₂的速率,且吸收速率随着添加量的增加而提高,含[N₁₁₁₁]⁺的溶液吸收速率大于含[N₂₂₂₂]⁺的溶液。此外,由于受侧链氨基的影响,赖氨酸离子液体对CO₂的吸收负荷大于甘氨酸离子液体。随后,Zhang等^[26]在研究中发现随温度的升高,MDEA-IL复配溶液对CO₂的吸收速率增大,但吸收容量有所减少。当CO₂分压低于25 kPa时,4种MDEA-IL复配溶液吸收性能接近,当高于25 kPa时,含基团[Gly]的MDEA-IL体系的吸收性能要优于含基团[Lys]。

Zhang等^[27]在质量分数为30%~50%的MDEA溶液中加入质量分数为2.5%~15%的[N₁₁₁₁][Gly]后进行复配,结果表明,[N₁₁₁₁][Gly]的加入能很好地改善MDEA吸收CO₂的性能。当加入的[N₁₁₁₁][Gly]为5%~10%时,对MDEA溶液吸收CO₂性能改善效果显著;当加入[N₁₁₁₁][Gly]超过10%时,由于复合液黏度过大影响气液传质效率,因此阻碍了CO₂吸收性能的进一步提升。另一方面,由于[N₁₁₁₁][Gly]与MDEA复配溶液的黏度

低于 30 mPa·s,且表面张力较大,使得其在工业应用上更具有竞争优势。

Ahmady 等^[28]在 MDEA 溶液中加入常规咪唑离子液体 [bmim][BF₄], [bmim][AC], [bmim][DCA] 后发现, MDEA 溶液对 CO₂ 的饱和和吸收量均有所降低,尤其当离子液体浓度偏大时这种减弱趋势更加明显,其原因可能是常规离子液体的加入导致原有吸收剂中水含量的减少,而常规离子液体仅能通过物理作用吸收 CO₂,且吸收量很小,因此原有复配体系的吸收量下降。Ahmady 等^[29]在随后的研究中发现,在 4 mol/L MDEA 中加入 2 mol/L [bmim][BF₄] 后复合溶液的二级反应活化能由 43.32 kJ/mol 降至 8.65 kJ/mol。

Aziz 等^[30]实验研究了 MDEA 和 [gua]⁺[FAP]⁻ 复配溶液在高压 (0.5 ~ 3.0 MPa) 下吸收 CO₂ 的性能。结果表明,在 MDEA 中添加 [gua]⁺[FAP]⁻ 使 MDEA 吸收 CO₂ 性能下降,并且随 [gua]⁺[FAP]⁻ 浓度增加,这种抑制效果越明显。建立相关性方程,并预测了复配溶液的 CO₂ 吸收容量,最后实验结果表明,实验结果与预测结果一致性良好。

王占丽等^[31]考察了 2 种复配体系 MDEA-[N₂₂₂₂][Ala]、MDEA-[N₂₂₂₂][Ser] 的捕碳能力。结果表明, [N₂₂₂₂][Ala] 和 [N₂₂₂₂][Ser] 的加入对 MDEA 吸收 CO₂ 均有增强作用,且影响程度顺序为 [N₂₂₂₂][Ala] > [N₂₂₂₂][Ser]。当加入质量分数为 10% 时,体系对 CO₂ 吸收负荷分别增加了 8.63% 和 5.40%。其原因是功能化离子液体本身含有一 NH₂,可以加强吸收效果,同时它对 MDEA 也具有一定的活化作用,促进 MDEA 吸收 CO₂。

Taib 等^[32]研究了离子液体 [bheea] 和 [bmim][BF₄] 与 MEA 水溶液复配成混合吸收剂脱除 CO₂ 的能力。结果发现, [bheea]/MEA 比 [bmim][BF₄]/MEA 脱除 CO₂ 效果好,其主要原因是前者主要靠物理吸收起主导作用,吸收能力与压力呈正相关关系;后者由于反应生成可溶解的碳酸盐,吸收能力与压力不呈正相关关系。但是,该学者未提到混合吸收剂的再生性能研究。

3 前景展望

综上所述,离子液体复配吸收剂较好地克服了纯离子液体在捕集 CO₂ 过程中存在着一些固有缺陷,如离子液体黏度大、成本高等。但同时应该看到,由于许多离子液体复配吸收剂还处于实验研究

阶段,尚有许多研究亟待展开。

(1) 积极开发合成高效捕碳、成本较低的新型功能离子液体,为离子液体复配溶液捕碳的工业推广应用奠定坚实的基础。

(2) 当前离子液体复配吸收剂捕集 CO₂ 主要针对高浓度纯 CO₂ 气体,今后需根据工业的需要,结合不同单一工质吸收剂吸收 CO₂ 的特点,优选出性价比高、任务专一,能直接从各种混合气体固定低浓度 CO₂ 气体的复配体系。

(3) 利用计算机模拟技术,对不同种类离子液体复配吸收剂溶解 CO₂ 的微观机理进行深入研究,从分子水平上揭示复配体系内不同工质之间的相互作用规律与机制,包括吸收过程中的界面特性、扩散传质机理以及吸附-脱附机理等,为设计合成高效的复配吸收剂提供理论基础。

(4) 加快建立和完善离子液体复配体系数据库,凝炼出离子液体复配体系固碳的通用准则和共性规律,使得复合吸收剂的规模化工业应用早日取得突破性进展。

参考文献

- [1] Niall M D, Nick F, Antoine B. An overview of CO₂ capture technologies[J]. *Energy Environ Sci*, 2010, 103: 1645 - 1669.
- [2] 郑修新, 张晓云, 余青霓. CO₂ 吸收材料的研究进展[J]. *化工进展*, 2012, 31(2): 360 - 366.
- [3] Zhang Suojiang, Chen Yuhuan, Li Fuwei, *et al.* Fixation and conversion of CO₂ using ionic liquids[J]. *Catalysis Today*, 2006, 115(1/2/3/4): 61 - 69.
- [4] Blanchard L A, Hancu D, Beckman E, *et al.* Green processing using ionic liquids and CO₂[J]. *Nature*, 1999, 399(28/29): 28 - 29.
- [5] Camper De, Bara J E, Douglas L, *et al.* Room-temperature ionic liquid-amine solution tunable solvents for efficient and reversible capture of CO₂[J]. *Phys Chem*, 2008, 47(21): 7315 - 7320.
- [6] Cadena C, Anthony J L, Brennecke J F, *et al.* Why is CO₂ soluble in imidazolium-based ionic liquids[J]. *Am Chem Soc*, 2004, 126(16): 5300 - 5308.
- [7] Kanakubo M, Umecky T, Hiejima Y, *et al.* Solution structures of 1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ionic liquid saturated with CO₂: Experimental evidence of specific anion-CO₂ interaction[J]. *Physical Chemistry*, 2005, 109(29): 13847 - 13850.
- [8] Shariati A, Peters C J. High-pressure phase equilibria of systems with ionic liquids[J]. *Supercritical Fluids*, 2005, 34(2): 171 - 176.
- [9] Anthony J L, Anderson J L, Maginn E J, *et al.* Anion effects on gas solubility in ionic liquids[J]. *J Phys Chem B*, 2005, 109(13): 6366 - 6374.
- [10] Bates E, Mayton R, Ntai I, *et al.* CO₂ Capture by a task-specific ionic liquid[J]. *J Am Chem Soc*, 2002, 124(6): 926 - 927.

- [11] Tang J B, Sun W L, Tang H D, *et al.* Poly(ionic liquids) as new materials for CO₂ absorption [J]. *Polym Sci: Part A Polym Chem*, 2005, 43(22): 5477-5789.
- [12] Yu G R, Zhang S J, Yao X Q, *et al.* Design of task-specific ionic liquids for capturing CO₂: A molecular orbital study [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45(8): 2875-2880.
- [13] Muldoon M J, Aki S N V K, Anderson J L, *et al.* Improving carbon dioxide solubility in ionic liquids [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2007, 111(30): 9001-9009.
- [14] Mahurin S M, Lee J S, Baker G A, *et al.* Performance of nitrile-containing anions in task-specific ionic liquid for improved CO₂/N₂ separation [J]. *Membrane Science*, 2010, 353(1/2): 177-183.
- [15] 王赞霞, 傅莉, 张建敏, 等. [ap4443][Gly]-H₂O 两元体系物性测定及CO₂吸收性能[J]. *过程工程学报*, 2011, 11(5): 818-822.
- [16] 李天成, 孔庆华, 陈柳, 等. 离子液体-水复配吸收剂捕获CO₂性能[J]. *化工学报*, 2013, 64(2): 600-607.
- [17] 吴永良, 焦真, 王冠楠, 等. 用于CO₂吸收的离子液体的合成、表征及吸收性能[J]. *精细化工*, 2007, 24(4): 324-340.
- [18] Guo Hongxiu, Zhou Zuoming, Jing Guohua. Kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous [Hmim][Gly] solution [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 16(8): 197-205.
- [19] Stevanovic S, Podgorsek A, Moura L, *et al.* Absorption of carbon dioxide by ionic liquids with carboxylate anions [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 17(9): 78-88.
- [20] Kumezan J, Kamps A P S, Tuma D. Solubility of carbon dioxide in liquid mixtures of water + [bmim][CH₃SO₄] [J]. *J Chem Eng Data*, 2011, 56(12): 4505-4515.
- [21] Lim B H, Choe W H, Shim J J, *et al.* High-pressure solubility of carbon dioxide in imidazolium-based ionic liquids with anions [PF₆] and [BF₄] [J]. *Korean J Chem Eng*, 2009, 26(4): 1130-1136.
- [22] Zhang Yi, Yu Ping, Luo Yunbai. Absorption of CO₂ by amino acid-functionalized and traditional dicationic ionic liquids: Properties, Henry's law constants and mechanisms [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 214(1): 355-363.
- [23] Aparicio S, Atilhan M. Water effect on CO₂ absorption for hydroxyl-ammonium based ionic liquids: A molecular dynamics study [J]. *Chemical Physics*, 2012, 400(5): 118-125.
- [24] Camper D, Bara J E, Gin D L. Room-temperature ionic liquid-amine solutions: Tunable solvents for efficient and reversible capture of CO₂ [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2008, 47(21): 8496-8498.
- [25] 王渊涛, 方诚刚, 张锋, 等. 氨基酸离子液体-MDEA混合水溶液中的CO₂吸收性能[J]. *化工学报*, 2009, 60(11): 2781-2786.
- [26] Zhang Feng, Fang Chenggang, Wu Youting, *et al.* Absorption of CO₂ in the aqueous solutions of functionalized ionic liquids and MDEA [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 160(2): 691-697.
- [27] Zhang Feng, Wen Majing, Zhou Zheng, *et al.* Study on the absorption of carbon dioxide in high concentrated MDEA and ILs solutions [J]. *Chemical Engineering*, 2012, 181/182(1): 222-228.
- [28] Ahmady A, Hashim M A, Aroua M K. Absorption of carbon dioxide in the aqueous mixtures of methyldiethanolamine with three types of imidazolium-based ionic liquids [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2011, 309(1): 76-82.
- [29] Ahmady A, Hashim M A, Aroua M K. Kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous MDEA + [bmim][BF₄] solutions from 303 to 333 K [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 200/201/202(15): 317-328.
- [30] Aziz N, Yusoff R, Aroua M K. Absorption of CO₂ in aqueous mixtures of *N*-methyldiethanolamine and guanidinium tris(pentafluoroethyl)trifluorophosphate ionic liquid at high-pressure [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2012, 322/323(25): 120-125.
- [31] 王占丽, 徐凡, 邢小林, 等. 功能化离子液体-MDEA复配体系吸收CO₂ [J]. *化工进展*, 2013, 32(2): 394-399.
- [32] Taib M M, Murugesan T. Solubilities of CO₂ in aqueous solutions of ionic liquids (ILs) and monoethanolamine (MEA) at pressures from 100 to 1 600 kPa [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181/182(1): 56-62. ■

拜耳乐颜料扮靓巴西

2014年6月17日消息,此次巴西世界杯,巴西的建筑和基础设施项目使用了120多吨朗盛拜耳乐和Colortherm品牌的无机颜料,为这一世界最盛大的足球赛事披上炫丽色彩。

其中一个应用案例即是座落在巴西北里奥格兰德州(Rio Grande do Norte)海滨的纳塔尔市(Natal)的沙丘体育场(Arena das Dunas)。该体育场周围的彩色混凝土铺装材料采用了朗盛 Bayferrox 918LO、Bayferrox 601、Bayferrox 975M黄色和棕色颜料,营造出非常明亮友好的氛围。

另一个例子是座落在巴西库亚巴市(Cuiabá)的潘塔纳尔体育场(Arena Pantanal)。库亚巴市有550 000居民,因为其处于巴西重要的生态系统——“潘塔纳尔湿地”——的北部,绿地面积比例非常高,巴西人将这座城市称为“绿色城市”。因此,在设计潘塔纳尔这座新的多功能体育场时,设计师采用了生态环保的理念,包括回收利用施工所产生的瓦砾,使用可持续来源的建筑木材等。使用可持续工

艺生产的 Bayferrox 921 黄色颜料完美地符合这一设计理念。在该体育场的前场铺装了带温馨友好黄色调的混凝土板,成为一道亮丽的风景线,让体育场和谐地融入自然环境之中。

除了应用于各大体育场,例如:沙丘体育场(Arena das Dunas)、潘塔纳尔体育场(Arena Pantanal)、马拉卡纳体育场(Maracanã)以及米内罗体育场(Mineirão),朗盛拜耳乐颜料还为巴西的一些市政工程增添色彩。例如,拜耳乐颜料使新的 Luiz Gonzaga 博物馆焕发光彩。该博物馆位于巴西东北部伯南布哥州(Pernambuco)的 Cais do Sertão 综合旅游设施内,负责该工程的两位建筑师 Marcelo Ferraz 和 Francisco Fanucci 选用了朗盛 Bayferrox 975M 颜料为混凝土着色,因为这种颜料最匹配 Sertão(“内陆地区”)砂岩的原始赭色调。Ferraz 说道:“我们想要的是既能反映该地区砂岩原本面貌又能与覆盖部分外立面的白色花边网格形成反差的材料。”(潘晓懿)