

# 苯并咪唑类光电功能配合物的研究进展\*

张 蓉, 李锦堂, 傅翠梨, 罗学涛

(厦门大学材料学院材料科学与工程系, 厦门 361005)

**摘要** 主要概述了苯并咪唑类光电材料的研究进展。苯并咪唑类配合物的电致发光材料成膜性好、热稳定性高和色纯度高,但发光效率、寿命等仍偏低,发光机理尚不清楚;苯并咪唑类配合物具有良好的刚性平面结构和丰富的 $\pi$ 电子,选择合适的离子掺杂,有可能得到高效的发光材料;苯并咪唑类配合物还可用于制备有机太阳能电池,其钉配合物的染料敏化太阳能电池保持着最高的光电转化效率。

**关键词** 苯并咪唑 配合物 电致发光 光致发光 有机太阳能电池

## Research Progress in Benzimidazole Photoelectric Complexes

ZHANG Rong, LI Jintang, FU Cuili, LUO Xuetao

(Department of Materials Science and Engineering, College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract** Research on complexes of benzimidazole is reviewed, complexes of benzimidazole have been employed in electroluminescent materials due to its high film forming performance, good thermal stability, and high color purity, but such properties as luminous efficiency and lifetime need to be improved, as well as the mechanism of its luminous needs to be investigated. The perfect rigid planar structure and its wealth of  $\pi$  electrons make it feasible to obtain high efficiency luminous materials by inducing proper ion in complexes of benzimidazole. Furthermore, complexes of benzimidazole have also been used in making organic solar cells. At present, the dye sensitized solar cell made of rutherfordium complexes has the highest photoelectric conversion efficiency.

**Key words** benzimidazole, coordination compound, electroluminescent, luminous, organic solar cells

## 0 引言

苯并咪唑是一种含有2个氮原子的杂环化合物,其独特的电子结构和光电性能使得苯并咪唑配合物具有良好的荧光性质和导电性能。近年来,国内外在利用苯并咪唑分子进行设计和合成光电功能材料及光电器件的研究上取得了重大进展<sup>[1,2]</sup>。此外,苯并咪唑以其良好的热稳定性而成为耐高温有机发光材料的研制重点之一。本文主要概述了苯并咪唑光电配合物在有机电致发光材料、有机光致发光材料和有机太阳能电池等领域的研究进展。

## 1 有机电致发光材料

1963年Pope等<sup>[3]</sup>在蒽单晶两端施加400V的驱动电压时发现淡蓝色的光发出,然而极高的驱动电压和很低的发光效率导致这一发现并未引起太多的关注。直到1987年,美国Eastman Kodak公司的C. W. Tang等<sup>[4,5]</sup>以芳香二胺为空穴传输材料,成膜性较好的8-羟基喹啉铝(AIQ)作为发光层和电子传输层材料,低功函的镁银合金为阴极材料,制成了双层有机薄膜夹在两个电极之间的具有“三明治”结构的电致发光器件。这种设计和结构极大地提高了电荷的注入

效率,使器件在10V的驱动电压下发射出绿光,最高亮度达1000cd/m<sup>2</sup>,外量子效率达1%(1.5lm/W)。

苯并咪唑类配合物具有很好的刚性平面结构和丰富的 $\pi$ 电子,以及优良的电子离域环境,而且苯并咪唑上芳香环的 $\pi$ - $\pi$ 堆积作用使得该类超分子配合物稳定性更强。这些优点使得苯并咪唑类配合物被广泛应用于发光材料。Huang等<sup>[6]</sup>报道了一组基于苯并咪唑结构的铱配合物有机电致发光器件,该组配合物的化学结构式及其相应名称代号见图1,这些配体及相应的部分光物理性质见表1。

表1 基于苯并咪唑结构的铱配合物的部分光物理性质  
Table 1 Partial photophysical properties of benzimidazole-based iridium complexes

配体	pbi	nbi	pmbi	cbi	fbi	tbi	tabi	pybi
发射 波长/nm	523	604	651	520	563	507	620	566

由此可以看出,含氮五元杂环小分子配体在金属配合物电致发光材料的性能方面具有决定性作用。

高继红等<sup>[7]</sup>合成了N,N,N'-三(2-甲基苯并咪唑)胺及其稀土配合物(La<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>, Y<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup>)。这些配

\* 福建省自然科学基金(2010J05120)

张蓉:硕士生,主要从事有机光电功能配合物的研究 E-mail: zhangrong032008@126.com 罗学涛:通讯作者 Tel: 0592

2184881 E-mail: xuetao@xmu.edu.cn

合物热稳定性好,有良好的荧光性质,特别是  $Tb^{3+}$  配合物是高效的稀土有机发光配合物,可用于荧光材料的研究。王艳丽等<sup>[8]</sup>合成了一种纯蓝的 2-(2-羟基苯基)苯并咪唑铟配合物  $Zn(pbm)_2$ , 该配合物具有良好的成膜性和热稳定性。在紫外光激发下,其粉体产生强发射的蓝色荧光,色纯度高,可溶于  $CH_3Cl$ 、DMF、DMSO 等有机溶剂中,可以蒸镀成膜,有望通过合理的设计运用到有机电致发光器件中,实现白光的 OLED 器件。王卓渊制得的 1,4-双(2-苯并咪唑基)苯发射很强的紫色荧光,荧光寿命为 0.52ns,再将稀土金属离子  $Er^{3+}$  与 1,4-双(2-苯并咪唑基)苯配位,所得  $Er(III)$  配合物发射蓝色荧光,荧光强度增大到原化合物的 3 倍,荧光寿命也延长到 0.99ns<sup>[9]</sup>。王卓渊合成得到的 1,2-双(2-苯并咪唑基)-1,2-乙二醇及其  $Co(II)$ 、 $Cu(II)$  和  $Fe(II)$  的配合物,2,2-(氧二亚甲基)双苯并咪唑及其  $Ni(II)$  和  $La(III)$  的配合物都是良好的荧光物质<sup>[10,11]</sup>。王卓渊合成得到 2,2-对亚苯基双苯并咪唑的铜、钴、镍配合物,发现  $Ni(II)$  配合物的荧光发射峰红移了 101nm,荧光寿命延长到配体的 12 倍<sup>[12]</sup>。

光寿命( $\tau$ )分别为 52.0ns 和 43.6ns,在 CBP 薄膜中的  $\tau$  分别为 3.7ns 和 3.3ns,如此短的重三重态寿命目前尚未见报道。此外,还发现高效的  $Ir(ppy)_2acac$  的绿电致发光(EL)性能与短三重态寿命密切相关,7%(质量分数)  $Ir(ppy)_2acac$  掺杂的器件给出  $55060cd/m^2$  的最高亮度( $L$ ),对应 13.4% 的最大外量子效率( $\eta$ )。

有机电致发光器件经过几十年的研究发展已经取得了巨大的成就,但是在大批量实用化的道路上仍然存在以下几个问题:(1)器件的发光效率仍然偏低;(2)器件的使用寿命太短;(3)器件的稳定性亟待提高;(4)发光机理的研究仍未透彻。有机电致发光器件主要应用于平板型大屏幕显示,高蓝光稳定性、高效率、高亮度、低驱动电压的有机电致发光显示器将是今后有机电致发光器件的主要发展方向。

我国 OLED 技术始于 1996 年,目前研制的有机电致发光塑料显示屏已达国际先进水平。随着对有机电致发光器件研究的不断深入,将着重围绕以下问题开展工作:(1)发光机理的基础性研究;(2)新的有机材料的设计与器件的研究,如新型高效蓝光、红光、白光材料及器件结构;(3)器件寿命和稳定性的研究;(4)有机高分子发光显示器用有源驱动器的研究;(5)三线态发光材料的研究;(6)有机聚合物激光器的研究。

苯并咪唑类功能金属配合物应用于光电领域的历史并不长,故以苯并咪唑及其衍生物为配体的配合物的相应报道也不多。在发光方面,有一些文献报道了这类化合物与镧系元素的配合物的荧光光谱,但在所查阅的文献中,对其电致发光性质的研究报道还很少。

## 2 有机光致发光材料

在有机光致发光领域, $\beta$ -二酮类稀土有机配合物的发光效率最高,其中铱配合物比较多<sup>[14-20]</sup>。有机光致发光材料在结构上的共同特点<sup>[21]</sup>有以下 3 个方面。(1)具有大的  $\pi$  键结构。共轭体系越大,离域  $\pi$  电子越容易被激发,荧光较容易产生。一般来说,芳香体系越大,其荧光峰越向长波方向移动,而且荧光强度往往也加强。(2)刚性平面结构。在大量的研究中发现,具有较为刚性结构特别是平面结构的化合物有着较好的荧光性能,这主要是由于振动耗散引起的内转换几率减小的结果。(3)取代基中有较多的给电子基团。一般来说,化合物的共轭体系上如果具有强的给电子基团,可以在一定程度上加强化合物的荧光,因为含这类基团的荧光体,其激发态常由环外的羟基或氨基上的电子激发转移到环上而产生。由于它们的电子云几乎与芳环上的轨道平行,实际上它们共享了共轭电子结构,同时扩大了其共轭双键体系。

近年来,苯并咪唑衍生物已被广泛应用于光致发光材料<sup>[22,23]</sup>。与其衍生物相比,苯并咪唑类配合物具有更好的刚性平面结构和更丰富的  $\pi$  电子,是一种非常有应用前景的光致发光材料。

Rau Sven 等<sup>[24]</sup>发现二咪唑或二苯并咪唑型配体和钌( $Ru$ )的配合物同样具有光致发光性能。其钌配合物结构见

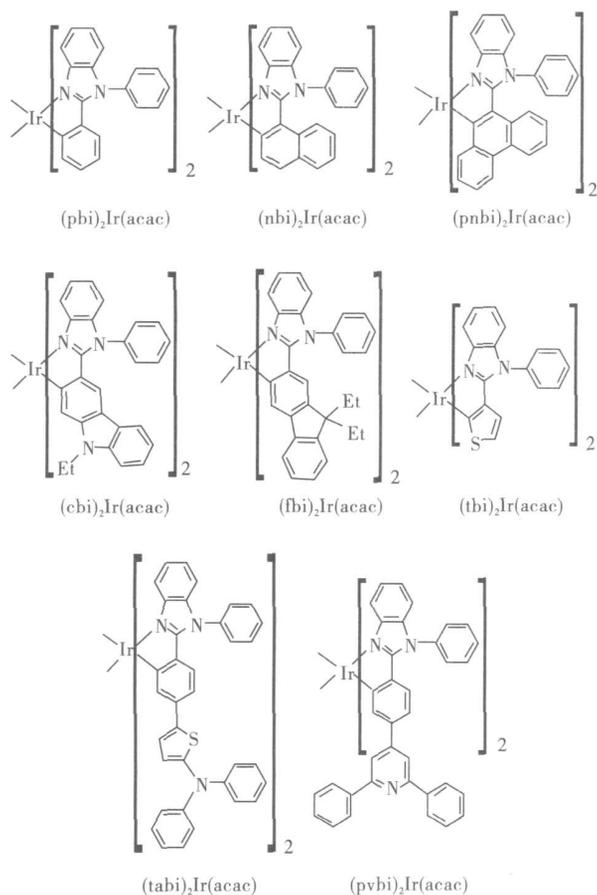


图 1 基于苯并咪唑结构的铱配合物

Fig. 1 The structure of benzimidazole-based iridium complexes

韩亮亮等<sup>[13]</sup>设计了两种有机电致发光材料,  $Ir(ppy)_2acac$  和  $Ir(MeOppy)_2acac$ , 其中  $ppy$  和  $MeO-ppy$  分别为 2-苯基苯并咪唑和 2-(4-甲氧基苯基)苯并咪唑,  $acac$  为乙酰丙酮。 $Ir(ppy)_2acac$  和  $Ir(MeO-ppy)_2acac$  在二氯甲烷溶液中的磷

图 2。

Chen 研究组<sup>[25]</sup>合成了两种新的以 2-(2-羟基苯)苯并咪唑为配体的 Zn(II) 配合物即  $[Zn(pbm)_2]$  和  $[Zn(apbm)_2] \cdot C_2H_5OH \cdot H_2O$  (apbm 为 2-(2-羟基苯)苯并咪唑), 发现这两种配合物在蓝色区域内均表现出优良的光致发光性能。两种锌配合物的配位结构示意图见图 3。

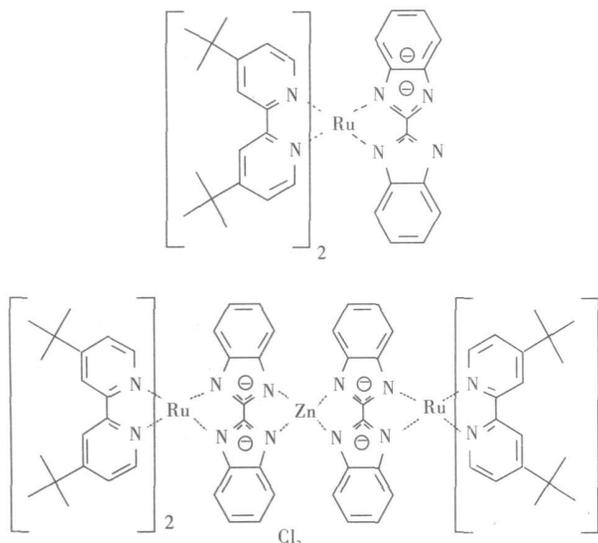


图 2 二苯并咪唑钌络合物的结构示意图

Fig. 2 Structure of dibenzo-imidazole ruthenium complexes

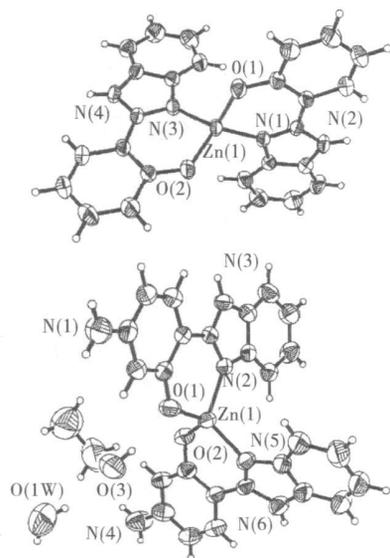


图 3 两种锌配合物的配位结构示意图

Fig. 3 Structure of two zinc complexes

王党辉等<sup>[26]</sup>合成了新型 2-乙酰基苯并咪唑甘氨酸 Schiff 碱镨(III)配合物,  $Pr^{3+}$  的引入增强了配体的荧光效率。该配合物在不同激光的激发下有不同的荧光发射, 在光开关以及光限幅方面可以得到应用。同时考虑到其宽带吸收和发射, 将该配合物作为基质, 选择合适的离子掺杂, 有可能得到高效的发光材料。

赵天成等<sup>[27]</sup>研究了氯化苯并咪唑钨配合物的光致发光

性质, 发现该配合物具有很好的荧光性能, 且其固态及水溶液都具有优异的升频转换荧光性质, 在可见光的激发下能在紫外和近紫外区产生能量高的发射光, 因而在发光材料的设计、创制和红外光谱探测仪研制方面很有价值。

目前国外对有机发光材料的研究非常广泛, 从合成方法、材料的各项性能参数等方面对材料的发光性能进行了大量的研究。国内有机发光材料的开发多处于实验室阶段, 且新种类较少, 大规模生产也有限。虽然苯并咪唑类有机发光器件的产业前景被一致看好, 但是目前对其中的工作机制不是十分清楚。它的工作机制涉及到很多有机半导体的电学和光学物理过程, 而这些过程对器件的发光性能, 如亮度、效率、功耗等都有着直接而决定性的影响。

### 3 有机太阳能电池

20 世纪 70 年代, 人们开始探索将一些具有共轭结构的有机化合物应用到太阳能电池。有机太阳能电池材料的特点在于有机化合物的种类繁多, 有机分子的化学结构容易修饰, 化合物的制备提纯加工简便, 可以制成大面积的柔性薄膜器件, 拥有未来成本上的优势以及资源分布的广泛性。有机太阳能电池的研究起步较晚, 目前全固态有机太阳能电池的转化效率小于 5%。在近年的研究中, 染料敏化太阳能电池(DSSC) 由于光吸收和电荷分离过程是分开的, 其效率与非晶硅电池相当, 也成为有机太阳能电池研究的热点。

太阳能电池的工作原理<sup>[28]</sup>是基于半导体的异质结或金属半导体界面附近的光生伏特效应, 所以太阳能电池又称为光伏电池。当光子入射到光敏材料时, 激发材料内部产生电子和空穴对, 在多种因素导致的静电势能作用下分离, 然后被接触电极收集。电子移向负极, 空穴移向正极, 这样外电路就有电流通过。当光照射到光电转换材料时, 只有光子的能量大于该材料的禁带宽度时, 才可能把价带上的电子激发到导带去, 使价带产生空穴。

目前, 国内外关于苯并咪唑配合物应用于有机太阳能电池的文献报道较少。1996 年 Oliver Kohle 等<sup>[29]</sup>合成了一系列含 2, 6 双(1-甲基苯并咪唑-2)-4 苯基的 Ru 配合物, 其可用于有机太阳能电池器件。2003 年 Crayston 等<sup>[30]</sup>合成了 2-(2-吡啶)苯并咪唑的 Ru 配合物, 并将该配合物用作染料敏化太阳能电池的光敏剂。所制成的染料敏化太阳能电池由于光敏剂和表面电荷低激发态耦合效率不佳, 其光电转化效率不高。

2007 年 Zhang<sup>[31]</sup>等合成一种新的配合物  $Eu(DBM)_3$  (CPyBM), 将该配合物用作有机光伏器件中的电子受体和电子传输层, 其光电转换效率为 1.04%, 较以前报道的铕配合物类有机光伏器件有明显的提高。配合物的结构见图 4, 所制备的有机光伏器件结构见图 5。

目前应用于有机太阳能电池的苯并咪唑配合物主要是钌配合物, 且该类染料敏化的太阳能电池保持着最高的光电转化效率。虽然近年来将苯并咪唑类配合物应用于有机太阳能电池已取得较大的进展, 但与无机硅太阳能电池相比, 在转换效率、光谱响应范围、电池的稳定性方面还有待提高。

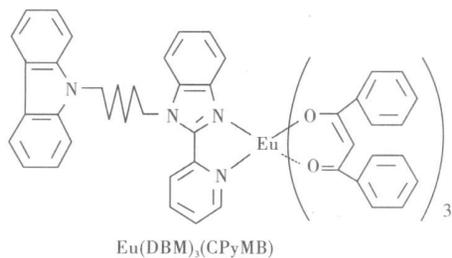


图4 配合物 Eu(DBM)<sub>3</sub>(CPyMB) 的结构示意图  
Fig. 4 Structure of complexes Eu(DBM)<sub>3</sub>(CPyMB)

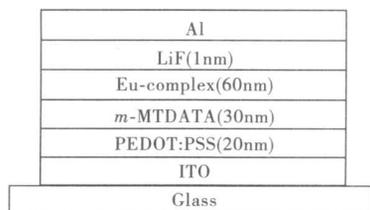


图5 有机光伏电池的简要结构示意图  
Fig. 5 Structure of organic photovoltaic cells

## 4 展望

除了在有机电致发光材料、有机光致发光材料和有机太阳能电池等光电领域的应用外, 苯并咪唑类配合物在非线性光学、磁性材料、光电导材料等诸多领域都表现出巨大的应用潜能, 在未来相当长一段时间内都将是有机光电功能材料研究的热点。

近年来苯并咪唑类衍生物及其配合物的合成发展很快, 对其配合物的光化学和光物理过程的了解更加深入, 但苯并咪唑类光电材料的应用和器件开发还相对落后。目前苯并咪唑类光电配合物的研究正处于快速发展阶段, 设计和制备全新的苯并咪唑类光电功能材料、开发新的器件和新的用途, 是一个需要多学科交叉综合研究的课题。另外, 加深对苯并咪唑类光电功能材料基础科学问题的研究, 将为设计和制备性能更优越的光电功能材料与器件提供重要的理论。

### 参考文献

- 1 Malatesh A P, Timmanagoud D B. Aromatics hydrogenation with a new class of metal oxides[J]. *Transition Met Chem*, 1988, 13: 423
- 2 Duan Lian, Hou Liudong, Lee Tae Woo, et al. Solution processable small molecules for organic light emitting diodes [J]. *J Mater Chem*, 2010, 20: 6392
- 3 PoPe M, Kallmann H P, Magnante P Z. Electroluminescence in organic crystals[J]. *Chem Phys*, 1963, 38(8): 2042
- 4 Tang C W, Vanslyle S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl Phys Lett*, 1987, 51(12): 913
- 5 Tang C W, Vanslyle S A, et al. Electroluminescence of doped organic thin films[J]. *Appl Phys*, 1989, 65(9): 3610
- 6 Huang W S, Liu J T, Chien C H, et al. Highly phosphor

- 7 rescent bis-cyclometalated iridium complexes containing benzimidazole based ligands[J]. *Chem Mater*, 2004, 16: 2480
- 7 高继红, 杨天林, 吴根亮. N, N, N'-三(2-甲基苯并咪唑)胺及其稀土配合物的合成与荧光性质研究[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(4): 344
- 8 王艳丽, 陈柳青, 等. 2-(2-羟基苯基)苯并咪唑锌的合成及其光谱性能研究[J]. *功能材料*, 2008, 39(6): 971
- 9 王卓渊. 1,4-双(2-苯并咪唑基)苯的合成和荧光性质改进[J]. *化工技术与开发*, 2009, 38(6): 1
- 10 王卓渊. 对亚苯基双苯并咪唑过渡金属配合物的合成和荧光性质研究[J]. *四川化工*, 2009, 12(2): 32
- 11 王卓渊. 双苯并咪唑基乙二醇及其配合物的合成与荧光性质[J]. *广东化工*, 2009, 36(6): 20
- 12 王卓渊. (氧二亚甲基)双苯并咪唑及其配合物的合成与荧光性质[J]. *安徽化工*, 2009, 35(3): 17
- 13 韩亮亮, 杨栋芳, 等. 短寿命铽(III)配合物在有机电致发光(OLED)中的应用[J]. *功能材料*, 2009, 40(10): 1598
- 14 Liu L, Li W L, Hong Z R, et al. Europium complexes as emitters in organic electroluminescent devices [J]. *Synth Met*, 1997, 91: 267
- 15 Liang C J, Zhao D, et al. Improved performance of electroluminescent devices based on an europium complex [J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 67
- 16 Huang L, Wang K Z, Huang C H, et al. Bright red electroluminescent devices using novel second ligand contained europium complexes as emitting layers [J]. *J Mater Chem*, 2001, 11: 790
- 17 Sun P P, Duma J P, Cheng C H. Synthesis of new europium complexes and their application in electroluminescent devices [J]. *Adv Funct Mater*, 2003, 13: 683
- 18 Shi M, Li F, Yi T, et al. Tuning the triplet energy levels of pyrazolone ligands to match the SD0 level of europium(III) [J]. *Inorg Chem*, 2005, 44, 8929
- 19 Yu J, Zhou L, Zhang H. Efficient electroluminescence from new lanthanide (Eu<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>) complexes [J]. *Inorg Chem*, 2005, 44: 1611
- 20 Xu H, Wang L H, Huang W. Application of chelate phosphine oxide ligand in Eu<sup>III</sup> complex with mezzo triplet energy level, highly efficient photoluminescent and electroluminescent performances [J]. *J Phys Chem B*, 2006, 110: 3023
- 21 于凯, 关淑霞, 等. 有机光致发光材料研究进展 [J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2006, 22(3): 70
- 22 Gostev F E, Koltsova L S, et al. Spectral luminescent properties and dynamics of intramolecular processes in 2,4,5-triarylimidazoles [J]. *J Photochem Photobiology A: Chem*, 2003, 156(F3): 15
- 23 Park S, Kwon Oh H, et al. Imidazole based excited state intramolecular proton transfer materials: Synthesis and amplified spontaneous emission from a large single crystal [J]. *J Am Chem Sci*, 2005, 127: 10070

(下转第96页)

- 30 Jörg Rüdiger Hill, Johann Plank. Retardation of setting of plaster of paris by organic acids: Understanding the mechanism through molecular modeling [J]. *J Computational Chem*, 2004, 25(12): 1438
- 31 Encarnación Ruiz Agudo, et al. Sodium sulfate crystallization in the presence of phosphates: Implications in ornamental stone conservation [J]. *Crystal Growth Design*, 2006, 6(7): 1575
- 32 Eipeltaufer E. Die Bedeutung kalorimetrischer messungen für die gipserzeugung und gipsprüfung [J]. *Zement Kalk Gips*, 1956(9): 501
- 33 Tydlitá V, et al. Effects of the type of calorimeter and the use of plasticizers and hydrophobizers on the measured hydration heat development of FGD gypsum [J]. *J Thermal Analysis Calorimetry*, 2008, 91: 791
- 34 刘伟华. 无机外加剂对 $\alpha$ 半水石膏性能的影响及其作用机理研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2005
- 35 Vellmer C, Middendorf B, Singh N B. Hydration of  $\alpha$  hemihydrate in the presence of carboxylic acids [J]. *J Thermal Analysis Calorimetry*, 2006, 86(3): 721
- 36 彭家惠. 建筑石膏减水剂与缓凝剂作用机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004
- 37 Magallanes Rivera R X, Escalante Gardá J I, Gorokhovskiy A. Hydration reactions and microstructural characteristics of hemihydrate with citric and malic acid [J]. *Construction Building Mater*, 2009, 23(3): 1298
- 38 Doğan Ö, et al. Polyelectrolytes inhibition effect on crystallization of gypsum [J]. *Crystal Res Techn*, 2004, 39(12): 1108
- 39 彭家惠, 张建新, 陈明凤, 等. 三聚磷酸钠对二水石膏晶体生长习性与其晶体形貌的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(6): 723
- 40 彭家惠, 彭志辉, 瞿金东, 等. 缓凝剂对建筑石膏结构与强度的负面影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(9): 1177
- 41 周峻鹏, 彭瑜, 柳华实. 外加剂对石膏性能的影响 [J]. *建材技术与应用*, 2005(3): 3
- 42 Amathieu L, Boistelle R. Improvement of the mechanical properties of set plasters by means of four organic additives inducing  $\{101\}$  faces [J]. *J Crystal Growth*, 1986, 79(F3): 169
- 43 张高科, 谢毅, 朱瀛波, 等. 减水剂对石膏微观结构及性能的影响 [J]. *非金属矿*, 2003, 26(5): 6
- 44 姜伟, 刘健飞, 范立琪, 等. SM 及 HC 减水剂对脱硫石膏性能影响 [C] // 第三届全国石膏生产与应用技术交流会论文集, 2008: 172
- 45 Schiller K. Strength of highly porous brittle materials [J]. *Nature*, 1957, 180(4591): 862
- 46 Plank J, Winter C H. Competitive adsorption between superplasticizer and retarder molecules on mineral binder surface [J]. *Cem Concr Res*, 2008, 38(5): 599
- 47 Weijnen M P C, van Rosmalen G M. Adsorption of phosphates on gypsum crystals [J]. *J Crystal Growth*, 1986, 79(1-3): 157
- 48 Walinsky S W, Morton B J, O'Neil J J. On crystal growth from solution [C] // ACS meeting, symposium. Washington DC, 1983
- 49 Weijnen M P C, van Rosmalen G M. The influence of various polyelectrolytes on the precipitation of gypsum [J]. *Desalination*, 1985, 54(2): 239

(责任编辑 王炎)

(上接第64页)

- 24 Rau S, Buttner T, Temme C, et al. A Bibenzimidazole containing ruthenium(II) complex acting as a cation driven molecular switch [J]. *Inorg Chem*, 2000, 39: 1621
- 25 Tong Yiping, Zheng Shaoliang, et al. Structures, photoluminescence and theoretical studies of two Zn(II) complexes with substituted 2-(2-hydroxyphenyl) benzimidazoles [J]. *Eur J Inorg Chem*, 2005, 3734
- 26 王党辉, 杨一心, 等. 2-乙酰基苯并咪唑缩甘氨酸 Schiff 碱镉(III)配合物的合成及性质 [J]. *科学通报*, 2005, 50(23): 2593
- 27 赵天成, 杨一心, 等. 氯化钕与苯并咪唑二元配合物的荧光光谱 [J]. *西北大学学报*, 2007, 37(2): 242
- 28 段晓菲, 王金亮, 等. 有机太阳能电池材料的研究进展 [J]. *大学化学*, 2005, 20(3): 1
- 29 Oliver Kohle, Stefan Ruile, Michael Gratzel. Ruthenium(II) charge transfer sensitizers containing 4,4-dicarboxy 2,2'-bipyridine. Synthesis, properties, and bonding mode of coordinated thio- and selenocyanates [J]. *Inorg Chem*, 1996, 35: 4779
- 30 Yi H N, Crayston J A, Irvine J T S. Ruthenium complexes of 2-(2-pyridyl) benzimidazole as photosensitizers for dye sensitized solar cells [J]. *Dalton Trans*, 2003, 4: 685
- 31 Zhang Liying, Li Bin, Yue Shumei, et al. Synthesis and photovoltaic properties of new europium complex Eu(DBM)<sub>3</sub>(CPyBM) [J]. *Chinese Chem Lett*, 2007, 18: 333

(责任编辑 王炎)