

太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展

熊德华^{1,2}, 陈炜², 李宏¹

1. 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070
2. 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹), 武汉 430074

摘要 随着全球能源、环境问题的日益加剧,太阳能光热利用成为广泛关注的焦点问题之一。太阳能选择性吸收涂层,是太阳能光热转换器件中最核心的部分,对器件的光热转换效率起决定性的影响。本文从太阳能选择性吸收涂层的技术原理出发,综述涂层材料、结构、制备方法、工业化应用等方面的国内外发展状况,探讨太阳能选择性吸收涂层存在的问题及今后研究发展的方向。

关键词 太阳能;光热利用;选择性吸收涂层;吸收率;发射率

中图分类号 TK5;TB3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.09.007

Recent Progress in Solar-thermal Selective Absorber Coatings

XIONG Dehua^{1,2}, CHEN Wei², LI Hong¹

1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China
2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract It is urgent to solve the problem of energy shortage and the growing environmental problems, and to effectively utilize the clean and renewable solar energy via the photothermal conversion. The highly efficient solar selective absorber coating is the most critical part of solar thermal conversion devices, the property of which plays a decisive role in the device performance. This paper reviews the recent development of the solar-thermal selective absorber coatings, including the material selections, the coating structures, their preparation methods and their commercial applications. The existing problems of the solar selective coatings and their possible solutions are commented.

Keywords solar energy; photothermal conversion; selective solar absorber; photothermal absorber; emissivity

随着全球性能源危机的加剧以及环境问题(污染、温室效应)的日益严重,太阳能作为一种理想洁净的新能源,其有效利用受到广泛关注。太阳能是一种取之不尽、用之不竭的可再生能源,也是清洁能源,不会对环境产生任何污染。利用太阳能的各种新材料、新设计、新技术成为当今新能源领域的研究热点^[1-5]。目前,太阳能的能量利用主要有光热转换、光电转换、光化学转换3种方式,其中太阳能光热转换是目前世界范围内最普及的利用太阳能的一种形式^[5-8]。太阳

能光热转换的基本原理是:通过设计选择性吸收材料及其结构将太阳辐射能收集起来,通过光与物质的相互作用转换成热能加以利用。但由于太阳能是一种低品质能源,能量密度较低,要想获得较高的光热转化效率,必须采用相应的技术和装置(如太阳光集热器)对太阳能进行采集。利用聚光(聚焦)集热技术,可以有效提升太阳能光热转换温度,从而提高太阳能集热系统的综合转换效率,实现在中高温领域的太阳能热利用^[9]。太阳能选择性吸收涂层是太阳能集热器的主要

收稿日期:2013-09-29;修回日期:2014-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(21103058);湖北省科技支撑计划项目(2013BAA095)

作者简介:熊德华,博士,研究方向为纳米半导体材料合成与应用,电子信箱:xiongedhua2010@gmail.com;陈炜(通信作者),副教授,研究方向为纳米能源材料、太阳能转换器件,电子信箱:wnlochenwei@hust.edu.cn

引用格式:熊德华,陈炜,李宏.太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展[J].科技导报,2014,32(9):50-58.

功能组件之一,是太阳能光热转换中最为关键的部分,其质量和光学性质决定着器件的热捕集性能。为使太阳能得到充分有效的利用,应最大限度地对入射的太阳辐射进行吸收,尽量减少消光材料本体对环境的热辐射损失。如何实现太阳能选择性吸收涂层同时具有高的太阳辐射吸收率和低的红外辐射发射率,有效提高太阳能系统集热温度和集热效率等重要技术参数,是太阳能热利用研究的核心问题^[9,10]。

1 太阳能选择性吸收涂层的分类

太阳光谱在不同光波段的能量分布情况如图1所示。大部分的太阳辐射能集中在可见光区域(380~780 nm)和近红外区域(780~2500 nm),这部分能量加上一部分紫外光能量占总太阳辐射能的98%。一般来说,可以用300~2500 nm波段的吸收率 α 和2500~25000 nm波段的热发射率 ε 表征涂层对太阳光选择性吸收能力^[5-10]。 α/ε 的比值越高,表明材料的选择性吸收越强。理想的选择性吸收涂层在300~2500 nm区域的吸收率 $\alpha \approx 1$,在大于2500 nm的远红外光谱区的发射率 $\varepsilon \approx 0$ ^[5-9]。

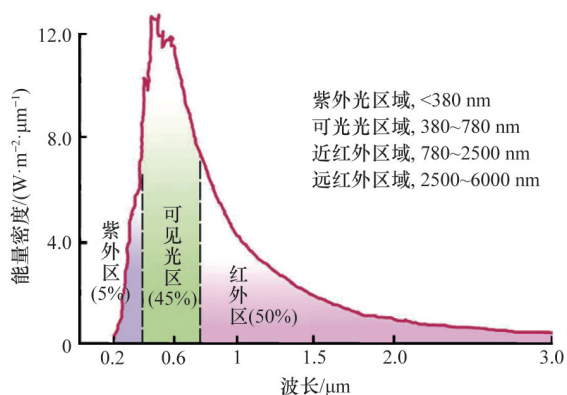


图1 太阳光辐射的能量分布图

Fig. 1 Energy distribution of solar radiationspectrum

按照吸收原理和涂层结构的不同,太阳能选择性吸收涂层一般可分为:本征吸收涂层、金属半导体涂层、光干涉型涂层、金属-电介质复合涂层、光学陷阱涂层、选择性透射黑体吸收涂层,如图2所示^[2]。目前,优质的太阳能选择性吸收涂层往往是将几种机制结合设计而成。太阳能集热器中应用最多的是金属-电介质复合涂层、光干涉型涂层,其中金属陶瓷涂层一般为具有高吸收性的金属颗粒和陶瓷(电介质)的复合物,即在电介质基体中含有细小金属颗粒的复合涂层,如图2(d)所示。由于金属的带间跃迁和小颗粒共振,使复合涂层对太阳光谱辐射区具有很高的 α ,在红外区域具有很高的透明性。由于金属-电介质复合涂层的制备工艺比较容易控制、光学性能好,在中、低温太阳能热利用领域具有广泛的应用前景。另外,利用光的干涉效应使得涂层在太阳辐射高能量波段产生强烈的吸收,在红外波段不吸收,与衬底的红外高反射特性形成匹配,实现干涉滤波型涂层,如图2(c)所

示。光干涉型涂层主要由多层光学常数不同的分层周期交替组成,每层薄膜的折射率和厚度都应严格控制,分层材料可以是金属或介质单相材料,也可以是金属-介质复合材料。干涉型涂层具有较低的高温热发射率,更适用于太阳能高温利用的光-热转换,但对薄膜的制备工艺和厚度控制要求很严格,在大规模应用方面还存在不少困难。

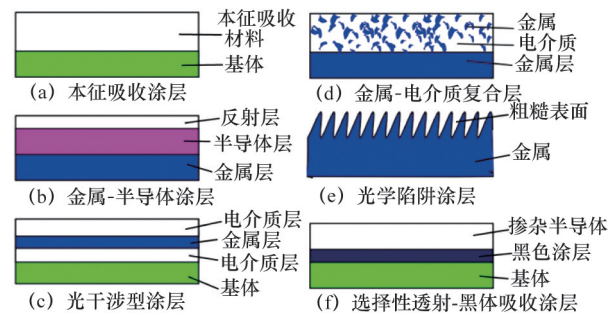


图2 常用选择性吸收涂层分类

Fig. 2 Schematic design of solar absorber coatings

2 太阳能选择性吸收涂层的发展状况

20世纪50年代,Tabor等首次提出太阳能选择性吸收涂层的概念^[3]。几十年来,选择性吸收涂层一直是太阳能热利用技术领域一项十分活跃的研究课题。目前,有关选择性吸收涂层系统的研究很多^[8-10],选择性吸收涂层材料包括金属氧化物、硫化物、碳化物、氮化物以及近年来出现的金属-陶瓷复合材料等,其发展是从金属氧化物涂料、黑镍、黑铬到铝阳极化涂层再到超级蓝膜涂层的更新换代过程。膜系也由最基本的干涉滤波型、体吸收型发展到多层渐变型、干涉吸收型,制备工艺由简单的涂覆方法、电化学方法,发展到真空蒸镀、磁控溅射等近代薄膜物理方法。简单来说,主要经历了涂料型涂层、电化学涂层、气相沉积涂层、湿法化学涂层等几个重要阶段。

2.1 涂料型涂层

涂料型涂层材料主要有普通黑漆、硫化铅^[11]、黑铬^[12]、金属氧化物涂料(铁锰铜、钴锰铜氧化物等)^[13-15],使用时将其和黏合剂混合在一起喷涂到吸热板表面。虽然这些本征选择性吸收材料具有较好的吸收率($\alpha > 0.90$),但是由于其光学折射率高,光反射损失较多, ε 较大(0.15~0.50)。

2.2 电化学涂层

电化学涂层法主要包括电镀法制备黑镍^[16-18]、黑铬、黑钴^[19]、黑铜^[20]、黑钨等吸收涂层以及阳极氧化电解法制备铝、氧化铜、钢等着色涂层^[21,22],其中以黑铬、铝阳极氧化着色涂层技术较为成熟。在中国早期研究阶段,殷志强等^[16]采用电镀法制备的用于全玻璃真空集热器的黑镍选择性涂层,其 α 值为0.89~0.91, ε 值为0.10~0.16,由于黑镍的湿敏感性,它常用于真空太阳能集热管。李剑虹等^[17]报道利用交流电阳极氧

化方法电镀制备黑镍涂层,涂层的 α 达到0.93,200℃加热2 h性能保持不变。另外,Bayati等^[21]通过电化学方法制备的多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层 α 达到0.99, ϵ 仅为0.06。Miao等^[22]利用化学转化法制备 CuO_x 吸收涂层,优化后的多孔带状 CuO_x 涂层 α 和 ϵ 分别为0.94和0.08。

2.3 气相沉积涂层

气相沉积技术是利用气相中发生的物理、化学过程,在基体表面沉积功能薄膜的技术。一般可分为化学气相沉积、物理气相沉积和等离子体气相沉积。目前,已报道的太阳光谱选择性吸收涂层一般可以通过物理气相沉积制备,主要包括真空蒸镀、溅射镀膜、电弧等离子体镀膜等方法。

2.3.1 蒸镀法

早期研究人员采用蒸镀法制备半导体本征吸收涂层,如Ge、PbS、Si、Te、Se、黑铬等涂层,但这些涂层的 ϵ 较高^[9]。如Schmidt等^[23]利用蒸镀法制备多层 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo-Al}_2\text{O}_3$ (AMA)金属吸收涂层,这种AMA结构涂层具有良好的高温稳定性,在500℃下发射率为0.11,1000℃下 ϵ 为0.22。该涂层热稳定性很好,在真空条件下可在920℃保温500 h不失效,但在空气中400℃保温24 h后失效。随后,研究者先后报道利用蒸镀法制备出一系列Ni- Al_2O_3 、Pt- Al_2O_3 、Au- Al_2O_3 、Ag- Al_2O_3 、Cr- Al_2O_3 、Cr-Spinel、Cu-Spinel、Ni-MgO、Ni-SiO₂、Ni-MgF、V- Al_2O_3 、V-SiO₂、V-MgO、Fe- Al_2O_3 、Fe-MgO、Mo- Al_2O_3 、Co- Al_2O_3 等吸收涂层^[9]。这些涂层的 α 均大于0.90, ϵ 小于0.10;且具有良好的中高温热稳定性(真空中大于400℃)。如Nyberg等^[24]利用蒸镀法制备出Mo- Al_2O_3 渐变型金属陶瓷涂层,结构如图3(a)所示。在400℃时制备出的Mo- Al_2O_3 吸收涂层 α 为0.92, ϵ 为0.07(200℃);在600℃时制备出的Mo- Al_2O_3 吸收涂层 α 为0.975, ϵ 为0.08(200℃),涂层表面粗糙度明显增大。随后,他们在涂层底层增加一层微粗糙表面的Mo- Al_2O_3 吸收层(图3

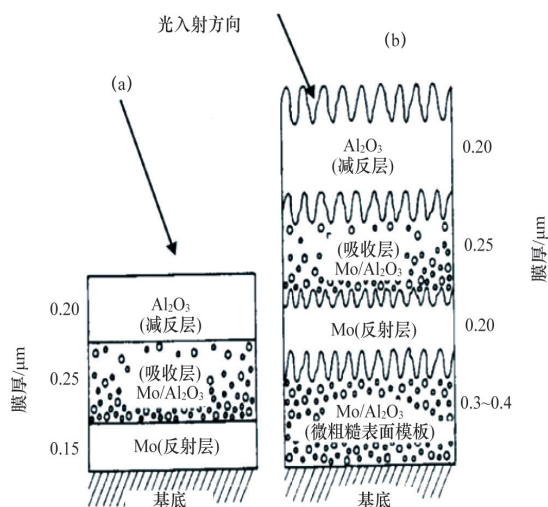


图3 金属陶瓷涂层(a)和改进的金属陶瓷涂层(b)截面结构示意图

Fig. 3 Cross-sectional schematic diagram of the standard graded-index tandem absorber(a) and the Modified design (b)

(b)),调整后的Mo- Al_2O_3 吸收涂层的 α 得到明显提高,高达0.99。

2.3.2 磁控溅射法

从1977年开始,Fan等^[25,26]利用磁控溅射法制备Cr-Cr₂O₃吸收涂层,采用Cr₂O₃作为减反射层时,其 α 大于0.90, ϵ 小于0.08,该涂层在空气中300℃(真空中500℃)热处理后性能稳定。随后,先后报道一系列利用溅射法制备金属陶瓷涂层,如Au-MgO、Cu- Al_2O_3 、Fe-SiO₂、Cr-SiO₂、Ni-SiO₂、Mo- Al_2O_3 、V- Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Pt- Al_2O_3 、Ni- Al_2O_3 、Pt- Al_2O_3 、 $\text{MoSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、Fe- Al_2O_3 、Ni-NiO、Cr₂O₃/Cr/Cr₂O₃^[27]、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[28]、Cr-Cr₂O₃^[29]、Ag- Al_2O_3 ^[30]、Mo-SiO₂^[31]等。如Barshilia等^[27,28]利用脉冲溅射法制备出Cr₂O₃/Cr/Cr₂O₃和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 系列高温吸收涂层, α 大于0.90, ϵ 小于0.10。其中,不锈钢基板上的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层在空气中400℃下加热2h后,其 α 和 ϵ 分别为0.901和0.06,涂层的预期寿命长达25年;Mo基板上的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层在真空中800℃下加热2h后,其 α 和 ϵ 分别为0.934和0.05,展现出涂层良好的高温热稳定性。殷志强^[31]、Wang等^[32]采用磁控溅射制备Mo-SiO₂选择性吸收涂层,该涂层的 α 大于0.95, ϵ 小于0.10;具有良好的高温热稳定性,在空气中500~600℃退火1 h后,涂层反射曲线基本不变^[31]。另外,Chen等^[33]利用磁控溅射法制备SiO₂/Cr/SiO₂/Al多层吸收涂层,这种金属-电介质涂层 α 高达0.95,真空中600℃时热稳定性能较好。

同时,研究者相继报道一些关于金属非氧化物(碳化物、氮化物、氮氧化物)的涂层,主要有Ni-C、SS-C、Ni-C、SS-N、Al-C-F、Al-C-O、Al-N、 AlN_xO_y 、Mo-AlN、W-AlN、SS-AlN、AlCuFe、TiN_x、ZrC_xN_y、TiAlON、SiO₂-TiN_xO_y-Cu、Ti_{1-x}Al_xN、TiAlN/TiAlON/Si₃N₄、CrMoN/CrON、CrN_xO_y等^[34~37]。其中日本东工器株式会社已将不锈钢-碳(SS-C)吸收涂层商业化生产销售^[9],殷志强^[38]发明的“磁控溅射渐变Al-N/Al太阳选择性吸收涂层”,已广泛应用于大规模生产和商业化的太阳能集热管。Zhang等^[39~41]系统研究利用磁控溅射法制备的(W、Mo、SS)-AlN吸收涂层(图4),其 α 为0.93~0.96, ϵ 为0.03~0.04;该涂层具有良好的高温热稳定性(真空中500℃);已被皇明太阳能股份有限公司(TurboSun公司)商品化生产。

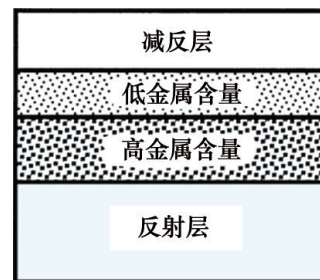


图4 双层金属陶瓷吸收涂层结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a selective absorber with two sublayers of cermet

从2006年开始, Barshilia 等^[42-45]先后利用磁控溅射法制备 TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ 吸收涂层(图5), 铜基板上的 TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ 涂层 α 和 ϵ 分别为0.90和0.05(82℃), 该涂层在真空中800℃(空气中550℃)具有良好的高温热稳定性。同时, 他们还研究 TiAlN/AlON、NbAlN/NbAlON/Si₃N₄、TiAlN/CrAlON/Si₃N₄、HfMoN/HfON/Al₂O₃ 系列高温吸收涂层^[46-49], 其中不锈钢基板上 HfMoN/HfON/Al₂O₃ 涂层 α 和 ϵ 分别为0.95和0.13(82℃), 该涂层在真空中650℃加热125 h(空气中600℃加热450 h)后具有良好的高温热稳定性。Du 等^[50]报道的 Ti_xAl_yN/AlN 吸收涂层、Rebouta 等^[51]报道的 TiAlSiN/TiAlSiON/SiO₂ 吸收涂层, 同样具有较高的选择性吸收性能, 涂层的 α 大于0.945, ϵ 小于0.05(82℃)。

另外, 一些过渡金属氧化物(如 ZrO₂^[52]、HfO₂^[53,54]、MoO₃、WO₃ 等)^[9]也被用作选择性吸收涂层材料, 表现出良好的光学性能和热稳定性。如 Selvakumar 等^[54]报道利用磁控溅射法制备 HfO₂/Mo/HfO₂ 吸收涂层, 铜基板上 Mo/HfO₂/Mo/HfO₂ 涂层在500℃下加热2 h后, 其 α 和 ϵ 分别为0.872和0.09; 不锈钢基板上 Mo/HfO₂/Mo/HfO₂ 涂层在空气中500℃(真空中800℃)具有良好的高温热稳定性。

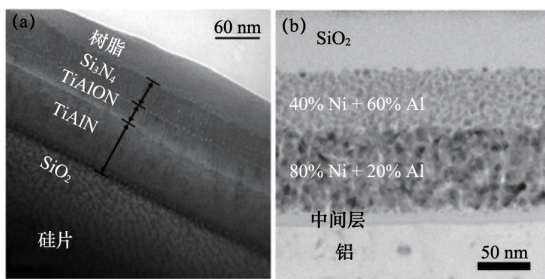


图5 硅基板上 TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ 吸收涂层截面(a)及溶胶凝胶法制备 Ni-Al₂O₃ 涂层(b)

Fig. 5 Cross-sectional view of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ tandem absorber deposited on Si substrate (a) and TEM image of the Ni-Al₂O₃ absorber (b)

2.3.3 其他气相沉积方法

除蒸镀法和溅射法制备吸收涂层之外, Chen 等^[55]利用脉冲激光沉积法制备 Ti-Al₂O₃ 吸收涂层, 优化后的 Ti-Al₂O₃ 涂层在可见光区域具有很低的反射率, 在红外区域具有很高的反射率, 可以作为选择性吸收涂层材料使用。另外, Hao 等^[56-58]利用多弧离子镀膜法在铜和不锈钢基板上制备 TiAl/TiAlN/TiAlON/TiAlO 吸收涂层, 他们在抛光不锈钢表面制备 TiAl/TiN/TiN-AlN(高含量)/TiN-AlN(低含量)/AlN 梯度吸收涂层^[57], 在空气中对涂层进行600℃热处理后, 涂层的 α 和 ϵ 为0.92和0.16, 可用作太阳能热发电材料。

2.4 湿法化学涂层

具有尖晶石结构的黑色过渡金属氧化物呈现出优异的光学选择性和高温热稳定性, CuFeMnO₄、CuCoMnO₄、

CuMnCoO₄/SiO₂、Co₃O₄/SS、CuMnO_x^[59-61]、FeCuMnO_x^[62]等黑色吸收涂层材料先后被报道, 有望发展成为新型选择性吸收薄膜材料^[8,9]。如 Bayón 等^[59,60]利用溶胶-凝胶法制备 CuMnO_x 吸收涂层, 通过调整 Cu/Mn 比来优化涂层光学性能, CuMnO_x/SiO₂ 涂层的 α 和 ϵ 分别为0.94和0.06。随后, 他们利用溶胶凝胶提拉法制备 Al/CuMnO_x/SiO₂ 吸收涂层^[61], 涂层的 α 高达0.95; 大面积(30 cm×30 cm)涂层的 α 和 ϵ 分别为0.935和0.04, 且该膜系在250℃时加热200 h后具有很好的热稳定性和湿度稳定性。

与磁控溅射法制备金属陶瓷 Ni-Al₂O₃ 吸收涂层类似, Boström 等^[63,64]利用溶胶凝胶法制备出 Ni-Al₂O₃ 吸收涂层(如图5(b)), 将 Ni 纳米颗粒(5~10 nm)混入 Al₂O₃ 溶胶, 在铝基板上旋涂成膜, 高温烧结后得到 Ni-Al₂O₃ 涂层。在 SiO₂ 减反射层的作用下, 涂层的 α 和 ϵ 分别为0.97和0.03, 并具有良好的湿度耐受性。蒋家兴等^[65]以乙醇或水替代 Boström 报道的甲醇为溶剂, 利用溶胶凝胶法制备出 Ni₈₀Al₂₀ 薄膜。虽然 Ni-Al₂O₃ 薄膜具有优良的光学性能和湿度耐受性, 但是由于吸收层纳米 Ni 颗粒容易被高温氧化, 从而限制了薄膜的高温热稳定性。解决高温氧化的另一合适途径是选用具有合适光学特性但难以氧化的非金属作填充材料。Mastai 等^[66]以甲基化- β -环糊精和正硅酸甲酯为前驱体, 利用溶胶-凝胶旋涂法制备 C-SiO₂ 吸收涂层, 该涂层的 α 和 ϵ 分别为0.94和0.15, 且薄膜具有较好的耐中高温(250~300℃)和耐湿度特性。随后, Katumba 等^[67,68]以蔗糖和正硅酸乙酯为前驱体, 利用溶胶-凝胶旋涂法制备 C-SiO₂ 吸收涂层。为降低发射率, 改用弱红外吸收特性的 ZnO 和 NiO 作电介质基体, 优化后的薄膜 α 和 ϵ 分别为0.89和0.14, 0.93和0.10。

3 太阳能选择性吸收涂层的商业化应用

目前, 太阳能光热转换的主要应用包括: 太阳能热水器、干燥器、温室与太阳房、太阳灶、采暖和制冷、海水淡化装置、太阳能热发电装置和高温太阳炉等。国外对各类型选择性吸收涂层材料研究起步早, 吸收涂层材料种类丰富, 各种温度范围内的太阳能光热利用技术比较成熟。但中国的研究起步较晚, 目前主要应用于中低温领域(<400℃), 其中太阳能热水器是太阳能热利用中应用最广泛、产业化发展最迅速的领域。

目前, 已商业化生产的选择性吸收涂层主要有: SS-C、SS-AlN、CrN-Cr₂O₃、TiNO_x、a-C:H/Cr、TiC/TiO_xN_y/AlN、Ni-NiO、Mo-SiO₂、W-Al₂O₃、Mo-Al₂O₃、M-AlN(M 主要为 SS、W、Mo)等^[9]。其中国外的生产公司主要有 Nitto Kohki、Turbosun、Alanod Solar、BlueTec、Almecco-TiNOX、Ikarus Coatings、Plasma、S-Solar、Luz International Ltd、Siemens、Archimede SolarEnergy、Schott 等公司^[9], 中国的生产公司主要有清华阳光、皇明太阳能、日出东方、海达克、鹏桑普、嘉普通、东泰、兴业等多家公司。

3.1 国外相关应用概况

国外对各种温度范围内的太阳能光热利用技术的研究比较成熟,可简单分为低温热利用(<100℃)、中温热利用(100~400℃)和高温热利用(>400℃)三大应用领域(表1)。

自20世纪80年代以来,美国、德国、瑞典、意大利、澳大利亚等发达国家相继建立起不同类型的示范系统,促进了太阳能热发电技术(高温热利用)的发展。据报道当前全球光热发电正在建设和已投运的总装机容量达7.5 GW,另有8.5 GW正在计划开发,这将意味着全球光热发电产业进入第三次繁荣期^[69,70]。

值得注意的是,德国在太阳能光热利用领域处于领先地位,众多公司开发出多种高性能的吸热涂层产品。其中采用磁控溅射法在金属卷带上连续沉积金属陶瓷选择性吸收涂

层,是当前的主流方向之一。如德国Almeco公司商品化生产的超级蓝膜-TiNOX^[71],该涂层基于SiO₂-TiN_xO_y-Cu金属陶瓷涂层(图6),该涂层α达到0.95,ε为0.04(100℃)。和TiNOX蓝膜类似,德国BlueTec公司报道了一种溅射法制备的“eta plus”金属陶瓷吸收涂层(图7)^[72],但具体组成成分未见报道。该涂层α为0.95,ε为0.05(100℃),热稳定性较好在真空中295℃时热稳定性较好。

德国Schott公司生产的PTR[®]70型集热管吸收涂层α大于0.955,ε小于0.095,但该涂层的成分未见报道^[73]。新型高端集热管(PTR[®]70 Premium)携带有惰性气瓶,能为集热管提供终生的技术保障,可将其预期寿命延长至25年以上。截至2012年11月底,德国Schott公司的PTR[®]70型集热管已有超过100万支交付给世界各地的太阳能热发电站。

表1 国内外商品化的太阳能光谱选择性吸收涂层

Table 1 Commercially available solar selective absorber coatings

公司名称	吸收涂层	吸收率	发射率
日本 Nitto Kohki 公司	SS-C	0.93	0.04(100℃)
美国 Luz International Ltd. 公司	Mo-Al ₂ O ₃	0.96	0.16(350℃)
意大利 Archimede Solar Energy 公司	Mo-SiO ₂	0.94	0.13(580℃)
	W-Al ₂ O ₃	0.93	0.14(550℃)
瑞典 S-Solar(Sunstrip) 公司	Ni-NiO	0.96	0.10(100℃)
马其顿 Plasma 公司	SiO ₂ -TiN _x O _y -Cu	0.95	0.10(100℃)
德国 Alanod Solar 公司	CrN-Cr ₂ O ₃	0.95	0.05(100℃)
	Mirotherm [®] (Al)	0.95	0.05*
德国 Almeco-TiNOX 公司	Mirosol [®] (Al)	0.90	0.15*
	TiNOX-Al	0.95	0.04(100℃)
德国 BlueTec 公司	TiNOX-Cu	0.95	0.04(100℃)
	eta plus	0.95	0.05(100℃)
德国 IKARUS Coatings 公司	a-C:H/Cr	0.92	0.08~0.09(100℃)
德国 Siemens (Solel) 公司	Al ₂ O ₃ 基陶瓷	0.96	0.10(400℃)
	Mo-Al ₂ O ₃	0.96	0.16(350℃)
	W-Al ₂ O ₃	0.96	0.16(350℃)
德国 Schott 公司	ALUXID [®]	0.95	0.05*
	PTR [®] 70	0.95	0.10(400℃)
香港 TurboSun 公司 (2001年被皇明公司并购)	W-AlN	0.92-0.94	0.08-0.10(350℃)
	SS-AlN	0.94-0.95	0.12-0.14(350℃)
北京清华阳光能源开发有限责任公司	Al-N/Al	≥0.93	≤0.05*
皇明太阳能股份有限公司 ^[65]	SS-AlN _x /Cu	0.956±0.003	0.043±0.003*
深圳海达克新能源材料有限公司 ^[74]	黑铬	0.96	<0.102(80℃)
深圳市鹏桑普太阳能股份有限公司 ^[75]	黑铬	0.96±0.03	0.09±0.05*
	蓝膜	0.96±0.02	0.05±0.02*
深圳市嘉普通太阳能有限公司 ^[76]	铝阳极氧化涂层	0.94	0.10*
攀枝花东泰新能源科技有限公司 ^[77]	蓝膜	>0.93	<0.07*
湖南兴业太阳能科技有限公司 ^[78]	蓝膜	0.95±0.02	0.06±0.02*

注:*,详细测试温度未见报道。

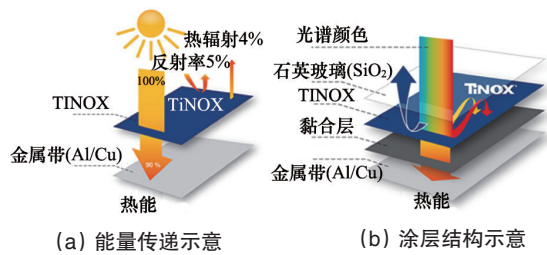


图6 德国 TiNOX 超级蓝膜

Fig. 6 TiNOX solar absorber from AlmeCo

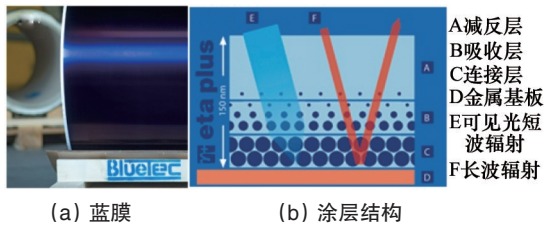


图7 德国 BlueTec 公司生产“eta plus”蓝膜

Fig. 7 Highly selective absorber: eta plus from BlueTec

3.2 中国相关应用概况

中国从20世纪80年代开始加快了在太阳能选择性吸收材料领域的研究,清华大学、北京太阳能研究所等单位先后研制出一系列优良的选择性涂层薄膜。目前主要应用于中低温领域,其中太阳能热水器是太阳能热利用中应用最广泛、产业化发展最迅速的领域。2012年4月,相关专家对深圳海达克新能源材料有限公司“宽幅连续电沉积黑铬太阳能吸热板技术及工艺装备”进行了科学技术成果鉴定^[74]。2013年3月,深圳嘉普通公司推出卷绕式宽幅铝阳极氧化太阳光谱选择性吸收涂层,该产品经国家太阳能热水器质量监督检验中心检测,各项技术指标达到国际同类产品水平^[76]。近年来,中国多家公司已自主研发或引进德国超级蓝膜生产技术,东泰、兴业、金川、蓝色海洋、夏博士、粤海等公司已经投产。

在高温应用领域,欧美等国的太阳能热电站已经运行多年,具有较好经济性和环保性;中国的太阳能热电站的研究和开发起步较晚,目前只有实验电站建成。亚洲首座太阳能热发电实验电站,中国首个、亚洲最大的塔式太阳能热发电电站——八达岭1 MW 太阳能热发电实验电站在北京延庆建成,于2012年8月成功发电。这也使中国成为继美国、西班牙、以色列之后,世界上第4个掌握太阳能热发电技术的国家^[79]。2013年7月,青海中控德令哈50 MW 塔式太阳能热发电电站一期10 MW 工程顺利并入青海电网发电,标志着中国自主研发的太阳能光热发电技术向商业化运行迈出了坚实步伐,填补了中国没有太阳能光热电站并网发电的空白^[80]。

4 结论

太阳能光热利用的核心研究内容是开发具有优异性能的选择性吸收涂层材料,如何提高吸收涂层的吸收率,降低

涂层的发射率,并使涂层具有良好的耐高温和耐候性能,是相关材料和技术研发的重要方向。与相对成熟的低温吸收涂层技术相比,研发中高温选择性吸收涂层面临着更大的挑战,如材料在高温下的氧化、循环使用后光学性能下降、高温下膜层开裂脱落等问题。解决这些问题,需要对材料、结构以及制备工艺进行更深入、系统地研究和分析,如采用磁控溅射法制备干型金属陶瓷吸收涂层,是当前的主流方向之一。引入新兴的纳米级金属陶瓷复合材料、涂层表面微不平化、多层复合结构等涂层技术,有望制备出性能优异的中高温太阳能选择性吸收涂层。由于光热发电成本较高,急需开发性价比比较高的新材料、新工艺和新技术。同时,关于涂层性能评价体系还需进一步完善,除研究涂层的光学性能和耐热性能外,其他耐候性能如耐盐雾性、耐湿性、耐风雨性能等值得关注。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Q C. Recent progress in high-temperature solar selective coatings [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, 62(1): 63-74.
- [2] Kennedy C E. Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials[M]. Golden Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [3] Granqvist C G. Solar energy materials[J]. *Advanced Materials*, 2003, 15 (21): 1789-1803.
- [4] Farooq M, Raja I A. Optimisation of metal sputtered and electroplated substrates for solar selective coatings[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33 (6): 1275-1285.
- [5] 蒋家兴, 赵剑曦, 姜蓉. 太阳光热转换吸收薄膜制备方法: 现状与发展 [J]. *材料导报*, 2009, 23(21): 101-104.
Jiang Jiaying, Zhao Jianxi, Jiang Rong. Preparation methods for solar thermal absorbing film: Present situation and development[J]. *Materials Review*, 2009, 23(21): 101-104.
- [6] 谢光明. 太阳能光热转换的核心材料-光谱选择性吸收涂层的研究与发展过程[J]. *新材料产业*, 2011(5): 55-58.
Xie Guangming. The core material of solar thermal conversion - development of spectral selective absorbing coating[J]. *Advanced Materials Industry*, 2011(5): 55-58.
- [7] 高祥虎, 赵鑫, 耿庆芬, 等. 光谱选择性太阳能吸收涂层的研究进展 [J]. *材料导报*, 2012, 26(13): 26-31.
Gao Xianghu, Zhao Xin, Geng Qingfen, et al. Recent advance of spectrally selective solar absorber coating[J]. *Materials Review*, 2012, 26 (13): 26-31.
- [8] 李镇祥, 赵剑曦. 溶胶-凝胶法制备太阳光谱选择性吸收薄膜的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(5): 762-768.
Li Zhenxiang, Zhao Jianxi. Development on solar selective absorbing coatings prepared by sol-gel method[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(5): 762-768.
- [9] Selvakumar N, Barshilia H C. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 98: 1-23.
- [10] 张霖, 赵腾, 陈大鹏, 等. 太阳能选择性吸收薄膜研究进展及展望[J]. *真空*, 2013, 50(3): 57-62.
Zhang Lin, Zhao Teng, Chen Dapeng, et al. Research progress and

- prospect of solar selective absorbing thin film[J]. *Vacuum*, 2013, 50(3): 57-62.
- [11] 赵玉文, 庄秀治, 张超英, 等. 硫化铅选择性涂层的研制[J]. *太阳能学报*, 1982, 3(1): 61-66.
Zhao Yuwen, Zhuang Xiuzhi, Zhang Chaoying, et al. Developing of lead sulfide selective paint[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 1982, 3(1): 61-66.
- [12] 马涛, 叶卫平, 程旭东, 等. 等离子喷涂法制备黑铬太阳能选择性吸收涂层[J]. *材料导报*, 2012, 26(2): 63-66.
Ma Tao, Ye Weiping, Cheng Xudong, et al. Plasma spraying black chrome for solar selective absorbing coatings[J]. *Materials Review*, 2012, 26(2): 63-66.
- [13] Geng Q F, Zhao X, Gao X H, et al. Sol-gel combustion-derived CoCuMnO₃ spinels as pigment for spectrally selective paints[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94(3): 827-832.
- [14] 于红超, 刘刚, 赵鑫, 等. CuCoMnO₃ 光谱选择性吸收涂层的研究[J]. *精细化工*, 2012, 29(3): 218-221.
Yu Hongchao, Liu Gang, Zhao Xin, et al. Research into CuCoMnO₃ spectrally selective paint coatings[J]. *Fine Chemicals*, 2012, 29(3): 218-221.
- [15] 于红超, 赵鑫, 耿庆芬, 等. 太阳能光谱选择性吸收涂层研究进展[J]. *化工新型材料*, 2012, 40(2): 7-9.
Yu Hongchao, Zhao Xin, Geng Qingfen, et al. Research progress in solar spectrally selective absorber coatings[J]. *New Chemical Materials*, 2012, 40(2): 7-9.
- [16] 殷志强, 史月艳, 林子为. 用于全玻璃真空集热管的黑镍选择性涂层[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1982, 22(2): 49-67.
Yin Zhiqiang, Shi Yueyan, Lin Ziwei. Black nickel selective coating for glass vacuum tubular collector[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1982, 22(2): 49-67.
- [17] 李剑虹, 李娜. 铝合金交流电阳极氧化膜电镀黑镍的研究[J]. *电镀与环保*, 2010, 30(2): 37-40.
Li Jianhong, Li Na. A study of black nickel electroplating on AC aluminum alloy anodic oxide coating[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2010, 30(2): 37-40.
- [18] 王涛, 叶卫平, 程旭东, 等. 黑镍太阳能选择性吸收涂层的研制[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(5): 1-5.
Wang Tao, Ye Weiping, Cheng Xudong, et al. Study on black-nickel solar selective absorbing coatings[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(5): 1-5.
- [19] Hamid Z A, Aal A A, Schmuki P. Nanostructured black cobalt coatings for solar absorbers[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2008, 40(11): 1493-1499.
- [20] Tharamani C N, Mayanna S M. Low-cost black Cu-Ni alloy coatings for solar selective applications[J]. *Solar Energy Mater Sol Cells*, 2007, 91(8): 664-669.
- [21] Bayati M R, Zargar H R, Talimian A, et al. Characterization of Al₂O₃-TiO₂ nano porous solar absorbers derived via MAO/sol-gel hybrid process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(7): 2483-2489.
- [22] Xiao X, Miao L, Xu G, et al. A facile process to prepare copper oxide thin films as solar selective absorbers[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(24): 10729-10736.
- [23] Schmidt R N, Park K C. High-temperature space-stable selective solar absorber coatings[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(8): 917-925.
- [24] Nyberg G A, Buhrman R A. Macroscopic surface roughness in metal-dielectric composite films: Photothermal absorber applications[J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 40(2): 129-131.
- [25] Fan J C C, Spura S A. Selective black absorbers using rf-sputtered Cr₂O₃/Cr cermet films[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 30(10): 511-513.
- [26] Fan J C C. Selective-black absorbers using sputtered cermet films[J]. *Thin Solid Films*, 1978, 54(2): 139-148.
- [27] Barshilia H C, Selvakumar N, Rajam K S, et al. Structure and optical properties of pulsed sputter deposited Cr₂O₃/Cr/Cr₂O₃ solar selective coatings[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(2): 023507.
- [28] Barshilia H C, Selvakumar N, Vignesh G, et al. Optical properties and thermal stability of pulsed-sputter-deposited Al₂O₃/Al/Al₂O₃ multilayer absorber coatings[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(3): 315-323.
- [29] Yin Y, Pan Y, Hang L X, et al. Direct current reactive sputtering Cr-Cr₂O₃ cermet solar selective surfaces for solar hot water applications [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(5): 1601-1606.
- [30] Barshilia H C, Kumar P, Rajam K S, et al. Structure and optical properties of Ag-Al₂O₃ nanocermet solar selective coatings prepared using unbalanced magnetron sputtering[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(7): 1707-1715.
- [31] 魏其睿, 王健, 李德杰, 等. Mo-SiO₂ 太阳选择性吸收涂层的空气高温热稳定性[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(8): 1186-1189.
Wei Qirui, Wang Jian, Li Dejie, et al. Thermal stability of Mo-SiO₂ solar selective coating at high temperatures in air [J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2011, 32(8): 1186-1189.
- [32] Wang J, Wei B, Wei Q, et al. Optical property and thermal stability of Mo/Mo-SiO₂/SiO₂ solar-selective coating prepared by magnetron sputtering[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2011, 208(3): 664-667.
- [33] Zhou W X, Shen Y, Hu E T, et al. Nano-Cr-film-based solar selective absorber with high photo-thermal conversion efficiency and good thermal stability[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28953-28962.
- [34] Godinho V, Philippon D, Rojas T C, et al. Characterization of Ti_{1-x}Al_xN coatings with selective IR reflectivity[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(8): 1397-1401.
- [35] Zhu D, Mao F, Zhao S. The influence of oxygen in TiAlO_xN_y on the optical properties of colored solar-absorbing coatings[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 98: 179-184.
- [36] Selvakumar N, Santhoshkumar S, Basu S, et al. Spectrally selective CrMoN/CrON tandem absorber for mid-temperature solar thermal applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 109: 97-103.
- [37] Wu L, Gao J, Liu Z, et al. Thermal aging characteristics of CrN_xO_y solar selective absorber coating for flat plate solar thermal collector applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 114: 186-191.
- [38] 殷志强. 溅射太阳选择性吸收涂层: 中国, 85100142[P]. 1986-07-23.
Yin Zhiqiang. Sputtering solar selective absorption coating: CN, 85100142[P]. 1986-07-23.
- [39] Zhang Q C. High efficiency Al-N cermet solar coatings with double cermet layer film structures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(15): 1938-1944.
- [40] 章其初, 陈革, 王双, 等. 全玻璃 SS-AlN 金属陶瓷真空太阳集热管 [J]. *真空*, 2010, 47(4): 27-31.
Zhang Qichu, Chen Ge, Wang Shuang, et al. All-glass vacuum solar

- collector tubes incorporating sputtered SS-AIN cermet solar coatings [J]. *Vacuum*, 2010, 47(4): 27-31.
- [41] 池华敬, 郭帅, 熊凯, 等. 高性能 SS-AIN 金属陶瓷真空太阳集热管的制备[J]. *真空*, 2012, 49(2): 56-60.
Chi Huajing, Guo Shuai, Xiong Kai, et al. Preparation of high performance evacuated SS-AIN cermet solar collector tubes [J]. *Vacuum*, 2012, 49(2): 56-60.
- [42] Barshilia H C, Selvakumar N, Rajam K S, et al. TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ tandem absorber for high temperature solar selective applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19): 191909.
- [43] Barshilia H C, Selvakumar N, Rajam K S. Thermal stability of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ tandem absorbers prepared by reactive direct current magnetron sputtering[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2007, 25(2): 383-390.
- [44] Barshilia H C, Selvakumar N, Rajam K S, et al. Deposition and characterization of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ tandem absorbers prepared using reactive direct current magnetron sputtering[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(18): 6071-6078.
- [45] Barshilia H C, Selvakumar N, Rajam K S, et al. Optical properties and thermal stability of TiAlN/AlON tandem absorber prepared by reactive DC/RF magnetron sputtering[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(11): 1425-1433.
- [46] Barshilia H C, Selvakumar N, Rajam K S, et al. Spectrally selective NbAlN/NbAlON/Si₃N₄ tandem absorber for high-temperature solar applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(4): 495-504.
- [47] Selvakumar N, Barshilia H C, Rajam K S, et al. Spectrally selective TiAlN/CrAlON/Si₃N₄ tandem absorber for high temperature solar applications[C]. *Renewable Energy Asia 2008 - An International Conference*, New Delhi, India, December 11-13, 2008.
- [48] Biswas A, Bhattacharyya D, Barshilia H C, et al. Spectroscopic ellipsometric characterization of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ tandem absorber for solar selective applications[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(6): 1694-1699.
- [49] Selvakumar N, Manikandanath N T, Biswas A, et al. Design and fabrication of highly thermally stable HfMoN/HfON/Al₂O₃ tandem absorber for solar thermal power generation applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 102: 86-92.
- [50] Du M, Hao L, Mi J, et al. Optimization design of Ti_{0.5}Al_{0.5}N/Ti_{0.25}Al_{0.75}N/AlN coating used for solar selective applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(4): 1193-1196.
- [51] Rebouta L, Capela P, Andritschky M, et al. Characterization of TiAlSiN/TiAlSiON/SiO₂ optical stack designed by modelling calculations for solar selective applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 105: 202-207.
- [52] Zhang Q C, Hadavi M S, Lee K D, et al. Zr-ZrO₂ cermet solar coatings designed by modelling calculations and deposited by dc magnetron sputtering[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(6): 723-729.
- [53] Khoshman J M, Kordesch M E. Optical properties of a-HfO₂ thin films [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6): 3530-3535.
- [54] Selvakumar N, Barshilia H C, Rajam K S, et al. Structure, optical properties and thermal stability of pulsed sputter deposited high temperature HfO₂/Mo/HfO₂ solar selective absorbers[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(8): 1412-1420.
- [55] Chen B, Yang D, Charpentier P A, et al. Optical and structural properties of pulsed laser deposited Ti:Al₂O₃ thin films[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(9): 1025-1029.
- [56] Hao L, Wang S M, Jiang L J, et al. Preparation and thermal stability on non-vacuum high temperature solar selective absorbing coatings[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(8): 1451-1454.
- [57] Hao L, Du M, Liu X P, et al. Thermal stability of nitride solar selective absorbing coatings used in high temperature parabolic trough current[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(6): 1507-1512.
- [58] 郝雷, 王树茂, 蒋利军, 等. 非真空高温太阳光谱选择性吸收涂层的研制[J]. *科学通报*, 2009, 54(2): 251-254.
Hao Lei, Wang Shumao, Jiang Lijun, et al. Development of non-vacuum high temperature solar selective absorbing coating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(2): 251-254.
- [59] Bayón R, San Vicente G, Maffiotte C, et al. Preparation of selective absorbers based on CuMn spinels by dip-coating method[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(2): 348-353.
- [60] Bayón R, San Vicente G, Maffiotte C, et al. Characterization of copper-manganese-oxide thin films deposited by dip-coating[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(10): 1211-1216.
- [61] Bayón R, San Vicente G, Morales Á. Durability tests and up-scaling of selective absorbers based on copper-manganese oxide deposited by dip-coating[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(6): 998-1004.
- [62] 李海亮, 孔祥永, 褚路轩, 等. 新型中高温太阳能选择性吸收涂层的研制[J]. *涂料工业*, 2011, 41(5): 22-25.
Li Hailiang, Kong Xiangyong, Chu Luxuan, et al. Development of new solar selective absorbing coating for medium/high temperature application [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2011, 41(5): 22-25.
- [63] Boström T, Jensen J, Valizadeh S, et al. ERDA of Ni-Al₂O₃/SiO₂ solar thermal selective absorbers[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(10): 1177-1182.
- [64] Boström T, Valizadeh S, Lu J, et al. Structure and morphology of nickel-alumina/silica solar thermal selective absorbers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(5): 1370-1375.
- [65] 蒋家兴, 赵剑曦, 廖新焕, 等. 溶胶-凝胶法制备 Ni-Al₂O₃ 太阳光热转换吸收薄膜: 过渡金属筛选和还原[J]. *功能材料*, 2009, 40(10): 1685-1687.
Jiang Jiaying, Zhao Jianxi, Liao Xinhuan, et al. Ni-Al₂O₃ solar thermal absorbing film prepared by sol-gel method: Screening and reduction of the transition metals[J]. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(10): 1685-1687.
- [66] Mastai Y, Polarz S, Antonietti M. Silica-carbon nanocomposites: A new concept for the design of solar absorbers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2002, 12(3): 197-202.
- [67] Katumba G, Makiwa G, Baisitse T R, et al. Solar selective absorber functionality of carbon nanoparticles embedded in SiO₂, ZnO and NiO matrices[J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2008, 5(2): 549-551.
- [68] Katumba G, Olumekor L, Forbes A, et al. Optical, thermal and structural characteristics of carbon nanoparticles embedded in ZnO and NiO as selective solar absorbers[J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2008, 92(10): 1285-1292.
- [69] Esposito S, Antonaia A, Addonizio M L, et al. Fabrication and optimisation of highly efficient cermet-based spectrally selective coatings for high operating temperature[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(21): 6000-6006.

- [70] Antonaia A, Castaldo A, Addonizio M L, et al. Stability of W- Al₂O₃ cermet based solar coating for receiver tube operating at high temperature[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(10): 1604-1611.
- [71] Almeco-TiNOX. 太阳能吸热体[EB/OL]. [2013-09-01]. http://www.almecosolar.com/cn/products/solar_absorber.
Almeco-TiNOX. Solar absorber[EB/OL]. [2013-09-01]. http://www.almecosolar.com/cn/products/solar_absorber.
- [72] BlueTec. 高选择性能: eta plus—我们新一代的吸收镀膜[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.bluetec.eu/index.php?id=25&L=3>.
BlueTec. The high performance selective absorbing coating: eta plus - a new generation of absorbing coating[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.bluetec.eu/index.php?id=25&L=3>.
- [73] Schott Solar. 肖特太阳能集热管[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.schott.com/csp/chinese/schott-solar-receivers.html?so=china&lang=chinese>.
Schott Solar. Schott solar receivers[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.schott.com/csp/chinese/schott-solar-receivers.html?so=china&lang=chinese>.
- [74] 鹏飞. 海达克黑铬涂层技术成果达到国际先进水平[J]. 太阳能, 2012(11): 55-57.
Peng Fei. The black chrome coating technology from Shenzhen Haidake Co., Ltd. reached the advanced international level[J]. Solar Energy, 2012(11): 55-57.
- [75] 深圳市鹏桑普太阳能股份有限公司. 平板太阳能集热器[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.szpsp.com/cn/proClass?id=176>.
Shenzhen Prosunpro Solar Energy Co., Ltd. Flat plate solar collectors [EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.szpsp.com/cn/proClass?id=176>.
- [76] 鹏飞. 国内外首创宽幅阳极化涂层在嘉普通问世[J]. 太阳能, 2013(5): 58-59.
Peng Fei. The first wide anodized selective absorbing coating were produced in Shenzhen Commonpraise Solar Co., Ltd.[J]. Solar Energy, 2013(5): 58-59.
- [77] 深圳市鹏桑普太阳能股份有限公司. 平板太阳能集热系统[EB/OL]. [2013-08-22]. <http://pzhsolar.tungtay.com/news.asp?id=951>.
Shenzhen Prosunpro Solar Energy CO., LTD. Flat plate solar collector system[EB/OL]. [2013-08-22]. <http://pzhsolar.tungtay.com/news.asp?id=951>.
- [78] 曾正春. 高效环保太阳能蓝膜推广及应用[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.21tyn.com/news/echo.php?id=33579>.
Zeng Zhengchun. The promotion and application of an efficient and environmentally solar absorber-blue film[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.21tyn.com/news/echo.php?id=33579>.
- [79] 华东电力. 亚洲最大塔式光热发电电站建成[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 161.
East China Electric Power. The Asia's largest solar power tower was built in Beijing[J]. East China Electric Power, 2013, 41(3): 161.
- [80] Cspplaza. 中控德令哈光热电站一期成功并网发电[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.cspplaza.com/article-2001-1.html>.
Cspplaza. The first phase construction project of solar thermal power station in Qing hai Zhong kong Co.,Ltd. have completed and began generating power[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.cspplaza.com/article-2001-1.html>.

(编辑 田恬)

· 学术动态 ·



中国科学技术协会

中国科协与辽宁省签订 《落实全民科学素质行动计划纲要共建协议》

中国科协与辽宁省人民政府在北京正式签订《落实全民科学素质行动计划纲要共建协议》。协议签署前,中国科协常务副主席、党组书记、书记处第一书记申维辰与辽宁省委副书记、省长陈政高,辽宁省副省长刘强一行就全民科学素质共建工作进行座谈。签约仪式由中国科协党组成员、书记处书记徐延豪主持,中国科协党组成员、办公厅主任吴海鹰,中国科协党组成员、中国科技馆馆长束为出席签约仪式。

根据协议,辽宁省政府与中国科协将通过开展公民科学素质建设共建工作,落实公民科学素质建设的目标责任,建立完善监测评估和支持制度,充分调动各地各部门实现公民科学素质建设目标的积极性、主动性和责任感,辽宁省到2015年实现本辖区公民具备基本科学素质的比例超过5%,为实现国务院《关于深化科技体制改革加快国家创新体系建设的意见》所提出的有关目标任务提供有力支撑。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15473546.html>。