

隔热保温涂料的研究发展及应用

姚梦佳¹, 李春福¹, 何俊波¹, 罗平亚¹, 侯宇²

(1. 西南石油大学 油气田地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610500;

2. 大庆油田采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163000)

摘要:从隔热保温涂料的基本原理出发,根据隔热机理和隔热方式的不同将隔热保温涂料分为阻隔型、反射型和辐射型三类,简要介绍了这三种类型隔热保温涂料的隔热机理,概述了隔热保温涂料的应用现状,同时结合石油工业中稠油热采存在的问题与采油油管表面的工作要求,提出了在隔热油管表面采用无机高效隔热涂层的应用构想,总结了隔热保温涂料的发展趋势,最后指出了目前隔热保温涂料发展研究存在的问题与不足。

关键词:隔热保温涂料;稠油热采;隔热机理

中图分类号: TQ637 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)07-0061-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.012

Research Development and Application of Heat Insulation Coating

YAO Meng-jia¹, LI Chun-fu¹, HE Jun-bo¹, LUO Ping-ya¹, HOU Yu²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Daqing Oilfield Production Engineering & Research Institute, Daqing 163000, China)

ABSTRACT: This article proceeded from the basic principle of heat insulation coating. Based on the mechanism of heat insulation and insulation, heat insulation coatings can be divided into three different types, i. e., blocking, reflecting and radiating. Mechanisms of heat insulation of the three types of heat insulation coatings were briefly introduced, the application status of heat insulation coatings was summarized. Combining the problems existing in the thermal recovery of heavy oil in the oil industry and the work requirements on the surface of oil tubing, an application idea of using an inorganic and efficient heat insulation coating that overlaid on the surface of the insulated tubing was proposed, the development trend of heat insulation coatings was summarized. In the end, the development direction of the heat insulation coating was forecasted, and the problems and deficiencies in development researches of heat insulation coatings were pointed out.

KEY WORDS: heat insulation coatings; heavy oil thermal recovery; mechanism of heat insulation

随着社会的发展和低碳环保的要求,节能降耗已成为能源应用和科学研究中的重大问题^[1]。隔热保

温涂料是在这种社会背景下发展起来的一类新型功能性涂料^[2-4],这类涂料能够根据具体的环境要求采

收稿日期: 2015-04-08; 修订日期: 2015-05-18

Received: 2015-04-08; Revised: 2015-05-18

作者简介: 姚梦佳(1991—),女,河南灵宝人,硕士,主要从事表面工程技术研究。

Biography: YAO Meng-jia (1991—), Female, from Lingbao, Henan, Master, Research focus: surface engineering technology.

通讯作者: 李春福(1947—),男,博导,教授,主要从事表面工程技术研究。

Corresponding author: LI Chun-fu (1947—), Male, Doctoral tutor, Professor, Research focus: surface engineering technology.

用不同的复配方案来有效地阻止热量传递,从而达到节能降耗、改善工作环境的目的。

近年来,新兴纳米技术的蓬勃发展为隔热涂料的深入研究提供了前所未有的机遇和可能,从涂层形成的强度到隔热保温效果,以及应用领域的扩展均取得了很大的进步。因此,文中从阐述隔热保温涂料的机理出发,综述了隔热保温涂料的分类及应用领域。针对石油工业中的稠油热采现状,提出了将其应用在热采油管表面的构想,并总结了隔热保温涂料的发展趋势以及发展研究所面临的问题。

1 隔热保温涂料的原理与分类

1.1 隔热保温原理

隔热保温涂料是将涂料的浆体状态与保温材料的隔热保温功能结合于一体发展起来的一类新型功能性涂料,在高温管道、设备、容器等的表面涂刷,干燥固化后会形成具有一定强度和韧性的隔热保温涂层,可以有效地抑制热量损失,且所需费用较普通保温材料便宜^[5]。

热传递主要是通过导热、对流和辐射三种途径来实现的^[6],隔热保温涂料的热导率是由这三种方式的综合效应决定的。其中导热主要指涂料中固体的传热、间隙中气体热运动造成的传热以及气体与固体发生碰撞产生的热传递^[7]。对流指的是气流宏观运动所引起的热转移和气流中分子导热两部分,因此对流时必然伴随着导热^[8]。辐射与前两种方式较为不同,它主要是由涂料中的固相物质产生辐射热,然后通过传播、吸收和反射来实现热传递的^[9]。如图1所示。

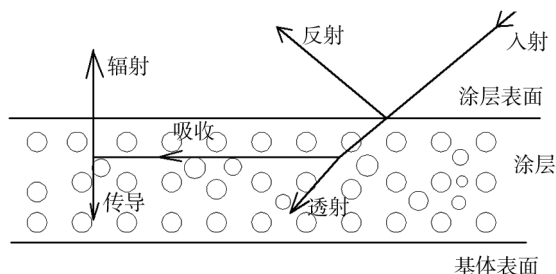


图1 涂层的热传递途径

Fig. 1 Heat transfer way of coating

1.2 分类

隔热保温涂料按照其隔热机理的不同可分为阻隔型、反射型和辐射型三类^[10]。

1.2.1 阻隔型隔热涂料

阻隔型隔热涂料是一种具有低热导率和高阻抗的被动式涂料。这种涂料的隔热机理较为简单,主要是选取具有低热导率的材料作为隔热骨料或在涂膜中引入空气(热导率极低),以密度小、气孔率高等特点的无机矿物为功能性填料,然后选取耐候性好、成膜性好的基料粘结剂经工艺加工制成一种膏状涂料,涂敷于设备表面,固化形成具有一定厚度的隔热保温层来获得良好的隔热效果^[11]。涂料中各组分导热系数的大小对涂料隔热性能的好坏起着决定性的作用^[12]。

1.2.2 反射型隔热涂料

反射型隔热涂料是指添加合适的基料、颜料和填料制备出具有高反射率的涂层,对可见光与红外光进行反射使材料表面隔热降温^[13],是建立在铝基反射隔热涂料的基础上发展而来^[14-15]。太阳的能量产生于热核反应,具有3个辐射光谱区,其中波长为 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 的紫外区产生的能量占总能量的5%,波长为 $0.4 \sim 0.72 \mu\text{m}$ 的可见光区占45%,波长为 $0.72 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的红外区占50%。

可见太阳光的能量主要集中在可见光区和红外光区,在这范围内,涂料的反射率越高,隔热效果就越显著^[16]。一般是在涂料中加入具有高反射率、高气孔率的隔热颜填料,主要是因为其内部具有封闭的孔隙结构可促使进入涂层内部的热量发生二次反射和散射,经过反复的反射和散射后,绝大部分的热量都会被阻隔于涂层以外,从而实现隔热保温的目的^[17]。在反射型隔热涂料中,基料与颜填料的折射率的差值对涂料的隔热性能有直接的影响。同时,颜填料的粒径大小、尺寸分布、颗粒形状及用量等方面都会对反射率造成较大的影响,常用反射颜料有钛白粉、ZnO等^[18]。

1.2.3 辐射型隔热涂料

物质的分子吸收光子,进行能量转化,促使分子的振动、转动能量发生改变,使晶格、键团不断地振动产生碰撞,使分子能态级产生从高到低的热发射,这便将吸收的部分能量以红外辐射的方式发散到外部空间,从而降低物质内部的温度。因此,辐射型隔热涂料的机理就是将材料已吸收的热量转化为热反射电磁波辐射到大气中^[19]。阻隔型、反射型隔热涂料只能减缓热量传递的速度,而辐射型隔热涂料能够将已经吸收的热量以电磁波的形式发射出去,不至于困顿其中^[20]。通常所用的颜填料为具有高热发射率的金属氧化物,如 Fe_2O_3 、CuO的尖晶石型物质^[21]。

2 隔热保温涂料的应用

隔热保温涂料具有高效、隔热、节能环保、使用方便及良好的经济效应等特点,其功能性已跨越众多领域^[22]。如在石油化工行业,其应用于储罐、油罐、油库、管道、裂解设备、海洋钻井平台等;在建筑行业应用于外墙保温系统、内墙装饰环保系统、玻璃等;在汽车行业应用于汽车车身、内部部件、车窗玻璃、排气管、发动机部件等;在其他行业也有应用,如应用在加热炉、蒸汽管道、锅炉、热交换器、烟囱烟道等。

中国兵器工业第五九研究所在热反射隔热涂料中添加了彩色陶瓷空心微珠,研制出了多种颜色的高太阳反射比的涂料,这种涂料尤其适合在建筑物外表面使用,同时也能满足高温工业设施的节能需求,具有广泛的应用前景^[23]。张娜等^[24]研制了一种高效高温硅酸铝纤维复合隔热材料,在排气管上涂覆8~10 mm厚的该种涂料,可以使内部800℃高温的排气管外表面温度降低到200℃以下。

涂料改性是促进涂料市场和节能保温材料应用领域拓展的关键所在,通过选择合适的基料、新型的颜填料以及优化配方组成可以赋予涂料某些方面更优异的性能,使之满足一些特殊设备表面的性能要求,拓展其应用领域^[25]。例如,在稠油热采的过程中,需向地层注入20 MPa,350℃的干蒸汽,然而蒸汽流经井筒时,既要与井筒内壁发生对流换热,又会向井筒外进行热传导,因此在蒸汽的注入过程存在着很大的热损失,减少了到达目的层的热量^[26]。目前国内外普遍采用具有暖水瓶结构的隔热油管来阻隔热量的传递,减少能量损失^[27-28],但其保温效果有限,且两管接箍处无保温材料。若想将隔热涂料应用到油管表面,在这样特殊的工作环境下就要求涂料具有更好的结合强度、高硬度、较低的导热能力和对流传热能力以及良好的抗腐蚀性能,这就必须对隔热保温涂料进行改性。可以采用粘结强度高、耐高温性好的磷酸盐粘结剂为基料,以导热系数极低的SiO₂气凝胶和空心微珠为隔热骨料,同时添加一些可提高涂层韧性的无机纤维来制备出一种无机高效隔热保温涂料,使其满足油管表面的工作要求,推动石油工业与涂料工业的共同发展。

3 隔热保温涂料的发展趋势

早在20世纪七八十年代,美国就有资料^[29]显

示,由丙烯酸乳液和复合材料制备的绝缘涂膜适用于金属表面起到隔热作用,随后美国开始研发陶瓷隔热涂料,特别是将其应用在燃气轮机、柴油机行业^[30]。我国对隔热涂料的研究起步较晚,最先研究应用的是阻隔型隔热涂料,尤其是目前使用最广泛的复合硅酸盐类隔热保温涂料,这类涂料是20世纪80年代末才发展起来的^[31-32]。隔热保温涂料的应用引起了国内外学者的关注,并对其进行了研究。Raouf等^[33]将富勒烯应用到新型隔热保温材料中,制得的微米级富勒烯薄膜可使基体在800℃的环境中表面温度降低100℃以上。德国盾牌选取极小粒径的真空陶瓷微珠加入到陶瓷隔热涂料中,使涂膜对太阳光有很高的反射率,涂覆0.3 mm左右即可令被涂物内部温度大大降低,节能40%^[34]。美国研发的一种水性超薄隔热保温涂料的隔热性能可与10 cm厚的R20等级泡沫绝热材料相媲美,在基体表面涂刷0.33 mm就可将95%~98%的外部热量阻隔在基体之外^[35]。虞夏等^[36]以纯丙乳液为成膜基料,高性能空心玻璃微珠为填料制备出了一种新型隔热保温涂料。刘杰等^[37]以金红石型TiO₂、空心陶瓷微珠及SiO₂为隔热颜填料经特殊工艺研制了一种太阳热反射隔热涂料,这种涂料的隔热性能非常良好,在满足隔热、耐候及装饰功能的同时,也达到了节能环保的目的。

科学研究的不断进步、生产技术的不断成熟及应用领域的不断扩展为隔热保温涂料的发展提供着无限的可能性。

3.1 多功能薄型隔热保温涂料

在露天环境中,最理想的隔热保温涂料需具备全面协同的光谱特征和高的阻抗^[38]。这三种隔热涂料各具优良特性,但不够全面,因此集多种保温功效于一体的多功能薄型隔热保温涂料成为众多科研工作者研究的重中之重。目前对于这种涂料的研究已经有所成绩,例如,李小兵等^[39]以水性聚氨酯为成膜剂,以分散良好的滑石粉和绢云母为填料,金红石型TiO₂、空心玻璃微珠为隔热颜填料,采用高速分散提高纳米填料在涂料中的分散性,制备具有3种隔热机理协同作用的水性纳米复合隔热涂料。殷武等^[40]制备的新型多功能薄层保温涂料不仅具有良好的耐久性和高热反射率,而且导热系数较低,适用于外墙保温体系中,能够降低能耗并延长体系的使用寿命。志盛威华科技发展有限公司研发了一种ZS-221型防晒隔热涂料,它综合了3种隔热机理,对400~2500 nm

范围的红外线和紫外线具有高反射率,能够自动发生热量辐射散热降温。同时由于涂料中加入导热系数极低的空心微珠,因此能够阻隔热传导,保证了物体内部温度恒久不变^[41]。

3.2 纳米孔超级绝热涂料

纳米孔超级绝热材料是建立在低密度和超级细孔(小于50 nm)的结构基础上,其导热系数可趋近于0^[42]。SiO₂气凝胶及其复合材料是目前研究较深入的纳米孔超级隔热材料,且又具有防水阻热、环保节能、耐候性好、使用寿命长等优点^[43]。近年来,采用纳米SiO₂气凝胶来开发高效隔热保温涂料已成为主流趋势。李建涛^[44]根据传热学的机理,选取硅气凝胶和空心玻璃微珠为功能性填料研制了一种新型的隔热保温涂料,展望了其在多个领域的应用前景。刘红霞等^[45]将自制的SiO₂凝胶经表面疏水改性后作为隔热填料,掺入到丙烯酸酯白色外墙涂料中制成了一种高效的隔热涂料。2010年上海世博会零碳馆及万科实验楼都采用了气凝胶超级绝热涂料,表明这种涂料具有突出的节能效果^[46]。

3.3 真空隔热涂料

热传递方式中的导热和对流都是基于分子间的碰撞和能量的传递来进行的,而真空状态下无分子的相对运动,因此这两种热传递方式无法进行,很大程度上减少了热传递的途径^[47]。由此采用真空的功能性填料来制备隔热保温涂料,势必赋予涂料更加优异的隔热性能,成为未来的发展方向。

3.4 环境友好型涂料

社会进步就要求人类的生产和生活对环境的不良影响越来越小,因此,水性、环保型、无溶剂型涂料也将成为涂料发展的必然趋势^[48]。

4 隔热保温涂料发展研究存在的问题

对于阻隔型隔热涂料的研究已经相当成熟,在各个领域都有着广阔的应用,对于反射型隔热涂料,仍在综合研究阶段,在生产实际中也有一定的应用。对于辐射型隔热涂料,还仅限于实验室研究阶段,研究报道不多。制约它们发展所面临的问题有以下几点。

1) 成膜基料的选择和研发对于生产高性能的隔热保温涂料至关重要^[49],根据各个应用领域的特点,

因地制宜,研制出高性能的基料具有一定的困难。

2) 纳米化已成为涂料发展的必然趋势,纳米颜填料的分散状况直接影响着涂层的性能^[50-51],然而其分散问题并没有完全解决,其储存稳定性也有待进一步的提高。

3) 目前针对光、热的反射和辐射理论研究还存在不足,因而对于开发性能更为优异的新型反射、辐射型隔热材料的研究具有较大的困难。

4) 多种隔热材料(SiO₂气凝胶、中空微珠、纳米半导体等)的理论研究较成熟,但将其作为隔热填料加入到隔热涂料的系统性试验研究还较少。

5) 目前涂料隔热性能的测试方法并不规范,且不统一,性能表征指标也不够严格,这样对涂料性能的判断不是很准确,制约着涂料的发展。

参考文献

- [1] 汪世平. 建筑隔热保温涂料及其研究进展[J]. 上海涂料, 2005, 43(3): 13—15.
WANG Shi-ping. Building Heat Insulation Coatings and Its Research Progress [J]. Shanghai Coatings, 2005, 43(3): 13—15.
- [2] 王琳, 魏浩, 桂泰江. 影响反射隔热涂料隔热效果的因素研究[J]. 现代涂料与涂装, 2009, 11(12): 8—11.
WANG Lin, WEI Hao, GUI Tai-jiang. Study on Influencing Factors to Heat-Insulating Effect of Reflective Heat-Insulating Paint [J]. Modern Paint & Finishing, 2009, 11(12): 8—11.
- [3] 陆洪彬, 陈建华, 冯春霞, 等. 复合型外墙隔热涂料的研究[J]. 化工新型材料, 2007, 35(6): 77—78.
LU Hong-bin, CHEN Jian-hua, FENG Chun-xia, et al. Study on Composite Heat-Insulated Paint of Outer Wall [J]. New Chemical Materials, 2007, 35(6): 77—78.
- [4] 杨巍. 隔热保温涂料在建筑节能中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2010(4): 271—271.
YANG Wei. Heat Insulation Coating Application in Building Energy Efficiency [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(4): 271—271.
- [5] 尹万云, 乔军, 陶新秀, 等. 建筑外墙隔热保温涂料[J]. 安徽工业大学学报, 2011, 28(1): 59—62.
YIN Wan-yun, QIAO Jun, TAO Xin-xiu, et al. Thermal-Insulating Coating for Exterior Wall of Building [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2011, 28(1): 59—62.
- [6] 马刘宝, 朱靖. 红外辐射涂料的研究与发展趋势[J]. 表面技术, 2007, 36(1): 68—70.

- MA Liu-bao, ZHU Jing. Trend in Development and Research of Infrared Radioactive Coatings [J]. Surface Technology, 2007, 36(1): 68—70.
- [7] 辛转红. 有机硅改性丙烯酸酯外墙外保温涂料的研制和性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011.
- XIN Zhuan-hong. Preparation and Properties of Silicone Modified Acrylic Exterior Insulation Coating [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011.
- [8] 裘肖光, 江国华, 王小红, 等. 碳纳米管/环氧树脂复合粉末涂料的制备及其性能研究[J]. 浙江理工大学学报, 2013, 30(6): 838—843.
- QIU Xiao-guang, JIANG Guo-hua, WANG Xiao-hong, et al. Study on The Properties and Preparation of Epoxy Resin/Carbon Nanotube Composite Powder Coating [J]. Journal of Zhejiang Scitech University, 2013, 30(6): 838—843.
- [9] 靳涛, 刘立强. 颜填料研究现状及其在隔热涂料中的应用[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 26—30.
- JIN Tao, LIU Li-qiang. Research Status and Application of Pigments and Fillers in Thermal Insulation Coatings [J]. Materials Review, 2008, 22(5): 26—30.
- [10] 杜红波, 张琳萍, 毛志平, 等. 新型环保隔热涂料的研究[J]. 涂料工业, 2010, 40(3): 53—56.
- DU Hong-bo, ZHANG Lin-ping, MAO Zhi-ping, et al. Research on A New Environmental-Friendly Thermal Insulation Coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(3): 53—56.
- [11] 徐梦漪, 王鹏, 皮丕辉, 等. 隔热预涂金属卷材涂料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(3): 44—47.
- XU Meng-yi, WANG Peng, PI Pi-hui, et al. The Research Progress of Heat Insulation Coating Metal Coil Coatings [J]. Chemical New Materials, 2010, 38(3): 44—47.
- [12] 邹宁宇, 鹿成滨, 张德信. 绝热材料应用技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005: 17—23.
- ZOU Ning-yu, LU Cheng-bin, ZHANG De-xin. The Insulation Application Technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005: 17—23.
- [13] ADAYUKI Ad, JAMES M Akidge. High-Albedo Roof Coating Impact on Energy Consumption [J]. ASHREA Transactions, 1998, 104: 1.
- [14] 林宣益. 隔热保温涂料和外墙外保温[J]. 上海涂料, 2008, 45(11): 28—30.
- LIN Xuan-yi. Heat Insulation Coatings and Exterior Insulation [J]. Shanghai Coatings, 2008, 45(11): 28—30.
- [15] 向佳瑜, 万小梅. 反射隔热涂料研究进展及应用[J]. 上海涂料, 2011, 49(10): 28—31.
- XIANG Jia-yu, WAN Xiao-mei. Research Progress and Application of Reflective Insulation Coating [J]. Shanghai Coatings, 2011, 49(10): 28—31.
- [16] 李雪. 隔热性材料的设计与性能研究[D]. 石家庄: 河北工业大学, 2011.
- LI Xue. Design and Properties of Heat-Insulating Materials [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Technology, 2011.
- [17] 李景. 降温涂料中颜填料对降温效果的影响研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
- LI Jing. The Influence of Cooling Paint Pigments and Fillers on The Cooling Effect of Cooling Paint [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010.
- [18] 徐永祥, 李运德, 师华, 等. 太阳热反射隔热涂料研究进展[J]. 涂料工业, 2010, 40(1): 70—74.
- XU Yong-xiang, LI Yun-de, SHI Hua, et al. Present Situation and Progress of Solar Heat Reflective Thermal Insulating Coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(1): 70—74.
- [19] 曹延鑫, 冀志江, 王静. 隔热涂料研究进展与发展方向[J]. 建设科技, 2009(7): 34—35.
- CAO Yan-xin, JI Zhi-jiang, WANG Jing. Research Progress and Development Direction of Heat Insulation Coatings [J]. The Construction of Science and Technology, 2009(7): 34—35.
- [20] 王晓伟. 水性复合型外墙隔热保温涂料的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- WANG Xiao-wei. Preparation and Characterization of Building Waterborne Thermal Insulation Coating Using Composite Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [21] 李泉灵. 耐高温高发射率涂层材料制备及抗热震性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LI Quan-ling. Study on Preparation and Thermal Shock Resistance Properties of High Emissivity Coatings for High Temperature [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [22] 孙宇. 金属表面隔热保温陶瓷涂料的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011.
- SUN Yu. Study on Ceramic Heat Insulation Coating for Metal Surface [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011.
- [23] 周学梅, 李兵, 曹红锦, 等. 彩色建筑节能热反射隔热涂料研究[J]. 表面技术, 2009, 38(5): 39—41.
- ZHOU Xue-mei, LI Bing, CAO Hong-jin, et al. Research on Thermal Insulation Coating for Colorful Buildings [J]. Surface Technology, 2009, 38(5): 39—41.
- [24] 张娜, 张玉军. 硅酸铝纤维复合隔热材料的研制[J]. 陶瓷, 2009(5): 48—52.
- ZHANG Na, ZHANG Yu-jun. The Study of the Thermal Insulations Made of the Alumina-silica Fiber [J]. Ceramics, 2009(5): 48—52.
- [25] 黄俊涛. 建筑环保节能涂料及玻璃透明隔热涂料的研制

- [J]. 中国建材科技, 2011(1): 9.
- HUANG Jun-tao. A Brief Analysis of Building Thermal Insulation Coatings and The Production and Application of Transparent Thermal Insulation Coatings [J]. China Building Materials Science and Technology, 2011(1): 9.
- [26] 刘花军, 孙永涛, 马增华, 等. 海上热采隔热型井下工具的研制 [J]. 石油机械, 2015, 43(1): 69—72.
- LIU Hua-jun, SUN Yong-tao, MA Zeng-hua, et al. Development of Thermal Insulation Downhole Tools for Offshore Thermal Recovery Well [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(1): 69—72.
- [27] 曹喜承, 王忠华, 刘晓燕. 真空隔热油管传热性能研究 [J]. 节能技术, 2010, 28(5): 419—423.
- CAO Xi-cheng, WANG Zhong-hua, LIU Xiao-yan. Study on The Heat Transfer Performance of Vacuum Heat Pipe [J]. Energy Conservation Technology, 2010, 28(5): 419—423.
- [28] 邓晶, 周成龙, 徐永香, 等. 真空隔热油管隔热性能失效机理分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012(10): 253—254.
- DENG Jing, ZHOU Cheng-long, XU Yong-xiang, et al. The Failure Mechanism Analysis of Heat Insulation Performance of Vacuum Heat Pipe [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012(10): 253—254.
- [29] ZAGROMOV Yu A, KULIKOV V V, TOKAR B Z. Thermophysical Characteristics of Thermalinsulation on Metal Backing [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1978, 35(1): 778—782.
- [30] LIMA C R C, R da Exaltacao Trevisan. Temperature Measurements and Adhesion Properties of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8(2): 323—327.
- [31] 许志荣. 金属表面薄层保温隔热涂料的制备及性能研究 [J]. 铸造技术, 2014(12): 67.
- XU Zhi-rong. Preparation and Properties of Heat Insulation Coating on Metal Surface [J]. Foundry Technology, 2014(12): 67.
- [32] 方媛. 隔热保温涂料的制备与性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
- FANG Yuan. Research of the Preparation and Performance of the Thermal Insulation Paint [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2014.
- [33] LOUFFY R O, WEXLER E M. Perspectives of Fullerene Nanotechnology [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2002.
- [34] LIU H F, SHENG M S, PAN Z J, et al. Synthesis of P (St-Ba-Maa-Spaa) Nano Latex and Its Application in Highanti-Corrosive Coating [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1): 54—58.
- [35] 赵金榜. 世界涂料发展重点及水性隔热保温涂料发展历程 [J]. 上海涂料, 2007, 45(3): 45—46.
- ZHAO Jin-bang. Development Focus of the World Coatings and Development Course of Water-based Heat Insulation Coatings [J]. Shanghai Coatings, 2007, 45(3): 45—46.
- [36] 虞夏, 许传华. 高性能空心玻璃微珠对涂料隔热性能影响的研究 [J]. 涂料工业, 2014, 44(4): 1—5.
- YU Xia, XU Chuan-hua. Influence of High-Performance Hollow Glass Microsphere on Thermal Insulation of Coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(4): 1—5.
- [37] 刘杰, 李翔, 魏刚. 水性太阳热反射隔热涂料的研究 [J]. 北京化工大学学报, 2009, 16(1): 44—49.
- LIU Jie, LI Xiang, WEI Gang. Research on Water-based Solar Heat Reflective Thermal Insulating Coatings [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2009, 16(1): 44—49.
- [38] 常乐. 一种新型保温涂料的保温隔热性能研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- CHANG Le. A New Type of Heat Preservation Coating and Heat Insulation Performance Study [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013.
- [39] 李小兵, 周顺清, 余桂英, 等. 多功能水性纳米复合建筑隔热涂料的制备 [J]. 化工新型材料, 2015, 43(1): 55—57.
- LI Xiao-bing, ZHOU Shun-qing, YU Gui-ying, et al. Preparation of Water-based Nanocomposite Thermal Insulation Coatings [J]. Chemical New Materials, 2015, 43(1): 55—57.
- [40] 殷武, 孔志元, 蔡青青, 等. 新型薄层保温隔热涂料的研制 [J]. 涂料工业, 2010, 40(2): 27—29.
- YIN Wu, KONG Zhi-yuan, CAI Qing-qing, et al. Development of Novel Thin-Film Thermal Insulation Coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(2): 27—29.
- [41] 杨忠敏. 低碳经济引发节能涂料的“绿色生机” [J]. 居业, 2013(2): 64—67.
- YANG Zhong-min. Low Carbon Economy Cause "Green Life" of Energy Saving Coating [J]. Create Living, 2013(2): 64—67.
- [42] 徐晓青, 张箭. 纳米超级绝热材料的绝热原理及建筑领域的应用 [J]. 科技风, 2012(4): 250.
- XU Xiao-qing, ZHANG Jian. Adiabatic Principle of Nano Super Thermal Insulation Material and Application in The Field of Architecture [J]. The Wind of Science and Technology, 2012(4): 250.
- [43] BHAGAT S D, KIM Y H, AHN Y S, et al. Textural Properties of Ambient Pressure Dried Water-Glass Based Silica Aerogel Beads: One Bay Synthesis [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2006, 96(1): 237—244.
- [44] 李建涛, 韩兵正. 硅气凝胶/空心玻璃微珠保温涂料的研

- 制[J]. 涂料工业, 2013, 43(7): 24—28.
- LI Jian-tao, HAN Bing-zheng. Development of Silica Aerogel and Hollow Glass Microspheres Based Heat-Insulating Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(7): 24—28.
- [45] 刘红霞, 陈松, 贾铭琳, 等. 疏水 SiO_2 气凝胶的常压制备及在建筑隔热涂料中的应用[J]. 涂料工业, 2011, 41(8): 64—67.
- LIU Hong-xia, CHEN Song, JIA Ming-lin, et al. Preparation of Hydrophobic SiO_2 Aerogel under Ambient Pressure and Its Application in Heat-Insulating Architectural Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(8): 64—67.
- [46] 郭晓煜, 张光磊, 赵霄云, 等. 气凝胶在建筑节能领域的应用形式与效果[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(2): 444—449.
- GUO Xiao-yu, ZHANG Guang-lei, ZHAO Xiao-yun, et al. Forms and Effect of Aerogels as Insulation Materials in Building Energy-saving[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2): 444—449.
- [47] 刘侃, 盛明爽, 张小红, 等. 隔热涂料分类及发展趋势[J]. 材料保护, 2011, 44(4): 14—18.
- LIU Kan, SHENG Ming-shuang, ZHANG Xiao-hong, et al. The Classification and Development Trend of Insulating Coatings[J]. Materials Protection, 2011, 44(4): 14—18.
- [48] 吴国坚, 金骏, 蔡玉斌. 隔热涂料的研究现状及发展趋势[J]. 建筑节能, 2011, 39(242): 56—58.
- WU Guo-jian, JIN Jun, CAI Yu-bin. Research Status and Development Trends of Thermal Insulation Coatings[J]. Building Energy Efficiency, 2011, 39(242): 56—58.
- [49] 刘成楼, 曹永久, 郭立群, 等. 薄层外墙纳米隔热涂料的研制[J]. 涂料技术与文摘, 2014, 35(7): 15—18.
- LIU Cheng-lou, CAO Yong-jiu, GUO Li-qun, et al. Preparation of Thin-film Nano-scale Thermal Insulation Coatings for Exterior Wall[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2014, 35(7): 15—18.
- [50] 李楚忠, 刘晓国. 水性透明隔热涂料中纳米ATO的分散技术[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 119—121.
- LI Chu-zhong, LIU Xiao-guo. Nano-ATO Particles Dispersed Technology in the Preparation of Water-based Transparent and Heat Insulating Coatings[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 119—121.
- [51] 肖军, 樊会涛, 周惠娣. 颜/填料分散工艺对环氧隔热涂层性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 150—155.
- XIAO Jun, FAN Hui-tao, ZHOU Hui-di. Effect of Dispersing Technique of Fillers and Paints on the Properties of Epoxy Thermo-protective Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 150—155.

(上接第44页)

- [11] 余煜玺, 李效东, 陈国明, 等. 含铝碳化硅纤维耐高温性能[J]. 硅酸盐学报, 2004(7): 812—815.
- YU Y X, LI X D, CHEN G M. High-temperature Resistance Properties of Silicon Carbide Fibers Containing Aluminum[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004(7): 812—815.
- [12] 陈思员, 姜贵庆, 俞继军, 等. 碳化硅材料被动氧化机理及转换温度分析[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(3): 21—24.
- CHEN Si-yuan, JIANG Gui-qing, YU Ji-jun. Passive Oxidation Mechanism and Transition Temperature of Silicon Carbide[J]. Aerospace Material & Technology, 2009, 39(3): 21—24.
- [13] 段曦东, 李文芳, 周珊, 等. 含铍碳化硅陶瓷先驱体聚铍碳硅烷的合成[J]. 功能材料, 2012, 43(12): 1647—1650.
- DUAN X D, LI W F, ZHOU S. Synthesis of Precursor of SiC Ceramic Containing Beryllium[J]. Functional Materials, 2012, 43(12): 1647—1650.
- [14] HUANG X Z, ZHOU S, CHENG Y. Synthesis and Ceramization of Polycarbosilane Containing Beryllium[J]. Journal of Central South University, 2014(1): 71—75.
- [15] 周珊. 含铍碳化硅陶瓷的制备及其电磁性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- ZHOU Shan. Synthesis of Silicon Carbide Containing Beryllium and the Research of Electromagnetic Performance[D]. Changsha: Central South University, 2014.

(上接第60页)

- [15] RANELLA A, BARBEROGLU M, BAKOGIANNI S, et al. Tuning Cell Adhesion by Controlling the Roughness and Wettability of 3D Micro/Nano Silicon Structures. [J]. Acta Biomaterialia, 2010, 6(7): 2711—2720.
- [16] BUSER D, BROGGINI N, WIELAND M, et al. Enhanced Bone Apposition to a Chemically Modified SLA Titanium Surface[J]. J Dent Res, 2004, 83(7): 529—533.
- [17] ELLINGSEN J E, JOHANSSON C B, WENNERBERG A, et al. Improved Retention and Bone-implant Contact with Fluoride-modified Titanium Implants[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2004, 19(5): 65—66.
- [18] SHALABI M M, GORTEMAKER A, JANSEN J A, et al. Implant Surface Roughness and Bone Healing: a Systematic Review[J]. J Dent Res, 2006, 85(6): 496—500.