

TEZHONG
GONGNENG TUCENG
特种功能涂层

● 胡传炘 主编 ● 杨爱弟 副主编

北京工业大学出版社

BEIJING GONGYE DAXUE CHUBANSHE

特种功能涂层

胡传炘 主 编
杨爱弟 副主编

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

特种功能涂层/胡传炘主编. —北京: 北京工业大学出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-5639-2127-0

I. 特… II. 胡… III. 功能—涂层 IV. TB43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 111022 号

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100124 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷有限公司印刷

*

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

889 mm×1 194 mm 32 开 18 印张 442 千字

ISBN 978-7-5639-2127-0

定价: 36.00 元

前 言

近些年来,随着表面技术及工程的发展,各种功能涂层愈来愈引起人们的重视,其应用范围涉及能源、石油化工、纺织、海洋、水利工程、建筑、机械、航空航天、交通、军事等诸多领域,与国家经济建设、国防及人们的日常生活关系日益紧密,已成为表面工程技术的一个重要组成部分。

编写本书的意图在于,对于一些较成熟的功能涂层,从原理、制备、应用及发展趋势作一个简明扼要的介绍,不追求叙述的完备,但求内容翔实新颖、数据可靠、观点明确、概念清楚。

本书在某些方面也是作者及其课题组近些年在功能涂层研究方面的总结,主要包括:节能涂层、重防腐涂层、特殊耐磨涂层、隐身涂层、防火及建筑防水涂层、防霉及海洋防污涂层、磁性涂层、润滑及防滑涂层、示温及阻尼涂层。编写本书的目的是为生产技术人员及科研人员服务,也可供大专院校师生参考。

本书主编胡传炘、副主编杨爱弟。具体分工如下:第1、8、9章由胡传炘、胡家辉编写,第2章由胡传炘、张存编写,第3章由杨爱弟、杨自强编写,第4章4.1~4.3节由颜家斌编写,4.4~4.6节由杨爱弟编写,第5章由胡传炘、武世伟编写,第6章由胡传炘编写,第7章由黄继强编写。

本书在编写过程中参考了大量文献资料,难一一列举,书后所列挂一漏万,谨在此对原文献作者表示诚挚的敬意。

胡传炘

2008年10月13日于北京工业大学

目 录

前言	(I)
----------	-----

第1章 节能涂层

1.1 热反射型隔热涂层	(2)
1.1.1 基本概念	(2)
1.1.2 作用原理	(3)
1.1.3 制备	(5)
1.1.4 性能及检测	(14)
1.1.5 现状、发展趋势及局限性	(22)
1.1.6 应用举例	(26)
1.2 热辐射型隔热涂层	(31)
1.2.1 基本概念	(31)
1.2.2 作用原理	(33)
1.2.3 制备	(36)
1.2.4 性能及检测	(38)
1.2.5 现状、发展趋势及局限性、应用举例	(38)
1.3 阻隔型隔热涂层	(39)
1.3.1 基本概念	(39)
1.3.2 作用原理	(41)
1.3.3 制备	(48)
1.3.4 性能及检测	(55)
1.3.5 应用举例	(59)
1.4 相变型隔热涂层	(62)
1.4.1 基本概念	(62)
1.4.2 作用原理	(63)

1.4.3	相变微胶囊制备方法	(75)
1.4.4	相变微胶囊性能表征及测量	(77)
1.4.5	相变微胶囊涂层制备及温度控制性能	(83)
1.4.6	应用	(84)
1.5	热辐射型节能涂层	(85)
1.5.1	基本概念及红外加热原理	(85)
1.5.2	制备	(87)
1.5.3	性能	(89)
1.5.4	现状及发展趋势	(89)
1.5.5	应用举例	(91)
1.6	节能玻璃涂层	(92)
1.6.1	基本概念	(92)
1.6.2	制备方法	(93)
1.6.3	性能、作用原理及应用	(94)
参考文献		(98)

第2章 重防腐涂层

2.1	概述	(101)
2.1.1	概念	(101)
2.1.2	分类	(103)
2.2	环氧类重防腐涂料涂层	(105)
2.2.1	主要品种及性能	(105)
2.2.2	改性环氧重防腐涂料	(107)
2.2.3	环氧树脂粉末及环氧-聚酯粉末重防腐涂料	(109)
2.3	鳞片类重防腐涂料涂层	(110)
2.3.1	鳞片的作用	(110)
2.3.2	鳞片类重防腐涂料的种类、性能及用途	(111)
2.4	含氟树脂类重防腐涂料涂层	(113)
2.4.1	氯化橡胶重防腐涂料	(113)
2.4.2	高氯化聚乙烯重防腐涂料	(118)
2.5	聚氨酯类重防腐涂料涂层	(123)

2.5.1 丙烯酸聚氨酯重防腐涂料	(123)
2.5.2 环氧改性聚氨酯防腐涂料	(126)
2.6 氟碳类重防腐涂料涂层	(132)
2.6.1 概述	(132)
2.6.2 氟橡胶重防腐涂料涂层	(132)
2.7 喷涂聚脲重防腐涂层	(140)
2.7.1 特点	(140)
2.7.2 聚脲产品主要性能指标	(141)
2.7.3 制备及工程应用举例	(143)
参考文献	(144)

第3章 特殊耐磨涂层

3.1 基础知识	(146)
3.1.1 摩擦与磨损	(146)
3.1.2 耐磨性	(152)
3.2 陶瓷耐磨涂层	(157)
3.2.1 陶瓷摩擦学	(157)
3.2.2 涂层及研究现状	(163)
3.2.3 应用	(181)
3.3 高分子耐磨复合涂层	(187)
3.3.1 影响因素	(187)
3.3.2 环氧树脂 (EP) 耐磨涂层	(190)
3.3.3 聚氨酯 (PU) 耐磨涂层	(197)
3.3.4 聚醚醚酮 (PEEK) 耐磨涂层	(199)
3.3.5 聚苯硫醚 (PPS) 耐磨涂层	(200)
3.3.6 改性聚四氟乙烯 (PTFE) 耐磨涂层	(201)
3.3.7 超高相对分子质量聚乙烯 (UHMW-PE) 耐磨涂层	(202)
3.3.8 聚氯乙烯 (PVC) 改性丁腈橡胶 (NBR) 涂层	(203)
3.3.9 改性酚醛-环氧耐磨涂层	(203)
3.4 减摩耐磨涂层	(204)
3.4.1 渗硫减摩耐磨技术	(205)

3.4.2 减摩自修复技术·····	(215)
3.4.3 纳米减摩耐磨技术·····	(223)
3.5 金属硅化物高温耐磨涂层·····	(239)
3.5.1 Mo-Si 及 Mo-Ni-Si 系耐磨材料 ·····	(240)
3.5.2 Cr-Si 及 Cr-Ni-Si 系耐磨材料 ·····	(243)
3.5.3 W-Ni-Si 系耐磨材料 ·····	(246)
参考文献 ·····	(247)

第 4 章 隐 身 涂 层

4.1 概述·····	(251)
4.1.1 基本概念·····	(251)
4.1.2 隐身技术与反隐身技术·····	(252)
4.2 光学隐身涂层·····	(255)
4.2.1 基本概念·····	(255)
4.2.2 光学侦察手段·····	(258)
4.2.3 可见光隐身技术·····	(259)
4.2.4 近红外隐身技术·····	(266)
4.3 红外隐身涂层·····	(272)
4.3.1 基本概念·····	(272)
4.3.2 军用红外技术·····	(276)
4.3.3 红外隐身技术·····	(279)
4.3.4 热红外隐身涂层·····	(285)
4.3.5 相变控温涂层·····	(300)
4.3.6 红外雷达兼容隐身涂层·····	(303)
4.4 雷达隐身涂层·····	(308)
4.4.1 基本概念·····	(308)
4.4.2 雷达隐身技术·····	(309)
4.4.3 雷达隐身涂层·····	(313)
4.4.4 等离子体隐身涂层·····	(328)
4.4.5 雷达纳米复合隐身涂层·····	(332)
4.5 激光隐身涂层·····	(335)

4.5.1 基本概念	(335)
4.5.2 军用激光技术	(339)
4.5.3 激光隐身技术	(353)
4.5.4 激光隐身涂层	(365)
4.6 声隐身涂层	(369)
4.6.1 基本概念	(369)
4.6.2 声隐身技术	(372)
4.6.3 声隐身涂层	(374)
参考文献	(397)

第5章 防火及建筑防水涂层

5.1 防火涂料涂层概述	(401)
5.1.1 防火涂层的意义	(401)
5.1.2 应用防火涂层的必要性	(402)
5.2 防火涂料的种类、防火机理及应用	(404)
5.2.1 防火涂料的种类及应用	(404)
5.2.2 防火涂料的一般防火机理	(405)
5.2.3 膨胀型防火涂料的防火机理	(406)
5.2.4 非膨胀型防火涂料的防火机理	(408)
5.3 钢结构防火涂料	(408)
5.3.1 分类及应用	(408)
5.3.2 质量要求	(409)
5.3.3 防火性能	(410)
5.3.4 钢结构防火涂料性能举例	(411)
5.3.5 钢结构防火涂料配方举例	(412)
5.4 饰面型防火涂料	(414)
5.4.1 分类及应用	(414)
5.4.2 质量要求	(415)
5.4.3 防火性能检测	(416)
5.4.4 饰面型防火涂料性能举例	(416)
5.4.5 饰面型防火涂料配方举例	(417)

5.5 建筑防水涂料涂层概述	(418)
5.5.1 建筑防水涂料涂层特点.....	(418)
5.5.2 建筑防水涂料涂层应用现状.....	(419)
5.5.3 建筑防水涂料的分类.....	(421)
5.6 聚氨酯防水涂料涂层	(422)
5.6.1 双组分沥青基聚氨酯防水涂料.....	(422)
5.6.2 单组分沥青基聚氨酯防水涂料.....	(426)
5.6.3 聚氨酯防水涂料应用中的问题.....	(427)
5.7 橡胶改性沥青防水涂料涂层	(428)
5.7.1 溶剂型氯丁橡胶改性沥青防水涂料.....	(428)
5.7.2 水乳型氯丁橡胶改性沥青防水涂料.....	(430)
5.7.3 水乳型 SBS 改性沥青防水涂料	(433)
5.8 聚合物水泥防水涂料 (JS 防水涂料) 涂层	(435)
5.8.1 聚合物水泥防水涂料的构成、特点及成膜机理.....	(435)
5.8.2 聚合物水泥防水涂料的主要性能指标及应用.....	(436)
参考文献	(437)

第 6 章 防霉及海洋防污涂层

6.1 防霉涂料涂层概述	(439)
6.1.1 概念、构成及应用.....	(439)
6.1.2 制备途径.....	(440)
6.2 防霉剂	(441)
6.2.1 杀菌机理.....	(441)
6.2.2 选用及品种简介.....	(442)
6.3 防霉涂料有关组分分析	(444)
6.3.1 基料.....	(444)
6.3.2 助剂.....	(445)
6.3.3 颜料和填料.....	(446)
6.4 防霉涂料配方举例及涂层制备	(447)
6.4.1 配方举例.....	(447)
6.4.2 涂层制备.....	(447)

6.5 海洋防污涂料涂层概述	(449)
6.5.1 海洋附着生物对海洋设施的危害	(449)
6.5.2 海洋附着生物的分类及作用机理	(451)
6.5.3 技术要求	(454)
6.5.4 种类	(454)
6.6 基料可溶型传统海洋防污涂料涂层	(456)
6.6.1 传统型海洋防污涂料	(456)
6.6.2 有机锡自抛光型海洋防污涂料	(457)
6.7 基料不溶型传统防污涂料	(458)
6.7.1 接触型	(458)
6.7.2 扩散型	(459)
6.7.3 几点分析	(460)
6.8 低表面能海洋防污涂料涂层	(461)
6.8.1 特点	(461)
6.8.2 种类及特点分析	(461)
6.9 以可溶性硅酸盐为防污剂的防污涂层和不含有机锡的自抛光防污涂层	(463)
6.9.1 以可溶性硅酸盐为防污剂的防污涂层	(463)
6.9.2 不含有机锡的自抛光防污涂层	(463)
6.10 天然防污涂料涂层及仿生防污涂料涂层	(465)
6.10.1 天然防污涂料涂层	(465)
6.10.2 仿生防污涂料涂层	(466)
参考文献	(469)

第7章 磁性涂层

7.1 概述	(470)
7.2 磁性涂层原理	(471)
7.3 磁性涂层制备工艺	(473)
7.3.1 组成	(473)
7.3.2 制备工艺	(490)
7.4 涂层性能检测	(493)

7.4.1	磁层厚度及其检测方法	(493)
7.4.2	拉断力及其检测方法	(495)
7.4.3	屈服力 (5%F) 及其检测方法	(495)
7.4.4	层间黏附及其检测方法	(495)
7.4.5	磁层电阻及其检测方法	(496)
7.4.6	矫顽力、剩余磁感应强度及其检测方法	(496)
7.4.7	音频灵敏度及其检测方法	(498)
7.4.8	音频信噪比及其检测方法	(498)
7.5	应用实例	(499)
7.5.1	磁带	(499)
7.5.2	磁盘	(500)
7.5.3	磁卡	(500)
7.5.4	磁光盘	(500)
参考文献		(501)

第 8 章 润滑及防滑涂层

8.1	润滑涂层概述	(502)
8.1.1	概念	(502)
8.1.2	发展	(503)
8.2	润滑涂层的分类及特点	(504)
8.2.1	概念	(504)
8.2.2	分类	(504)
8.2.3	有机黏结润滑涂料涂层	(504)
8.2.4	无机黏结润滑涂料涂层	(505)
8.3	固体润滑剂	(506)
8.3.1	理想固体润滑剂的性能	(506)
8.3.2	各种固体润滑剂	(507)
8.3.3	新型固体润滑剂	(507)
8.4	润滑涂料配方举例及应用	(508)
8.4.1	涂料中组分间的相容性	(508)
8.4.2	配方举例	(509)

8.4.3 应用	(512)
8.5 防滑涂层概述	(513)
8.5.1 摩擦力与静摩擦因数	(513)
8.5.2 摩擦状态	(514)
8.5.3 发展现状	(514)
8.6 防滑涂料的组成	(515)
8.6.1 基料(成膜剂)	(515)
8.6.2 防滑剂(防滑粒料)	(516)
8.6.3 助剂	(517)
8.6.4 防滑剂的表面处理及加入方式	(517)
8.7 防滑涂料配方举例及应用	(519)
8.7.1 配方举例	(519)
8.7.2 应用及施工	(521)
8.8 国外舰载飞机甲板用防滑涂层	(523)
8.8.1 分类	(523)
8.8.2 一般特性	(523)
8.8.3 树脂基防滑涂层	(524)
8.8.4 金属基防滑涂层	(526)
参考文献	(528)

第9章 示温及阻尼涂层

9.1 示温涂层概述	(529)
9.1.1 概念及示温原理	(529)
9.1.2 种类	(529)
9.1.3 发展现状	(530)
9.2 可逆型示温涂料涂层	(531)
9.2.1 无机可逆示温涂料(层)	(531)
9.2.2 有机可逆示温涂料(层)	(534)
9.2.3 高分子液晶可逆示温涂料(层)	(536)
9.2.4 应用	(537)
9.3 单变色不可逆示温涂料涂层	(537)

9.3.1	概述	(537)
9.3.2	变色机理	(538)
9.3.3	变色颜料	(539)
9.3.4	制备	(540)
9.3.5	应用	(541)
9.4	多变色不可逆示温涂料涂层	(541)
9.4.1	变色机理	(541)
9.4.2	制备	(542)
9.4.3	应用	(542)
9.5	阻尼涂层	(543)
9.5.1	工程中应用的阻尼材料	(543)
9.5.2	发展	(543)
9.5.3	分类	(544)
9.5.4	阻尼性能测量及评价	(544)
9.6	阻尼涂料阻尼机理	(545)
9.6.1	宏观数学描述——黏弹性体的应变滞后现象	(545)
9.6.2	微观分析——大分子间的内摩擦	(546)
9.7	溶剂型阻尼涂料涂层	(547)
9.7.1	构成	(547)
9.7.2	配方举例	(548)
9.8	水性阻尼涂料涂层	(549)
9.8.1	概述	(549)
9.8.2	配方举例	(549)
9.9	互穿聚合物网络阻尼涂料涂层	(550)
9.9.1	概述	(550)
9.9.2	研究进展	(550)
9.9.3	乳胶互穿聚合物网络阻尼涂料配方举例	(551)
参考文献		(552)

第1章 节能涂层

热运动产生热能，热能传递的量称为热量。人们的生活及生产活动，离不开热量。例如：在原油输送或贮存过程中，原油输送管道或原油贮罐，必须保证原油有一定的流动性。输油管道每隔一段距离，均有一个加热站，燃烧原油向输油管道提供热量，以满足输油需要，但这将耗费大量燃油能。为避免加大燃油能耗，要求输油管道及贮罐外壁具有良好的隔热涂层或隔热层。又例如：在寒冷地区或冬冷夏热地区，冬天室内要取暖，为避免增加取暖能耗，建筑外围护结构（主要是外墙和门窗）要采用隔热涂层或隔热层。但热量太多也不行。例如：炎热的夏天，在灼热的太阳光照射下，为保证轻质油（如汽油）或酒精贮罐的安全和减少油或酒精的蒸发，必须维持罐在一定温度下运行，因此罐外也必须具有良好的隔热涂层或隔热层，同时也可节省为降温而消耗的能源及资源，目前采取的措施多为淋水，既消耗能源又浪费水资源。

据统计，建筑能耗占我国社会终端总能耗的 30%，2020 年将达到 40%。其中空调和取暖耗能占建筑总能耗的 55%，北方采暖能耗占总建筑能耗的 36%，全国符合节能标准的建筑不到 3%。由此可见，研制并大力推广节能隔热涂层意义重大。

目前已经成功应用并即将大力推广的节能隔热涂层，按其作用机理，大致可分为热反射型隔热涂层、热辐射型隔热涂层、热阻隔型隔热涂层及相变型隔热涂层（亦称梯度智能控温涂层）4 种。此外，节能涂层还有热辐射加热型（节能）涂层、玻璃节能涂层等。以下逐节叙述。

1.1 热反射型隔热涂层

最近 20 余年来,可令被涂物在太阳光照射下产生降温效果的涂料引起人们的广泛关注,各类名为太阳能屏蔽涂料、热反射涂料、太空隔热涂料、节能保温涂料、红外伪装降温涂料、隔热胶等的涂料,不断被报道或有商品问世,并且有些已应用多年。

尽管 2007 年 11 月 1 日国家发改委已正式决定 JC/T 1040—2007《建筑外表面用热反射隔热涂料》在全国实施,2008 年 7 月 1 日由建设部及国家质检总局联合发布的 GB 50393—2008《钢质石油储罐防腐蚀工程技术规范》中亦提出热反射隔热涂料在全国石化工业实施,但对于这种涂料的降温机理、涂料制备关键、复合涂层设计、性能指标及降温性能测试方法等仍极少有人分析,尤其缺乏从基本概念和基本理论出发的分析。

1.1.1 基本概念

(1) 热辐射 (thermal radiation)

由分子或原子的热运动而引起的不断辐射的电磁波,称为热辐射。热辐射与物体表面性质、材料结构及温度有关。室温或温度更低的物体均可产生热辐射。

(2) 黑体 (black body)

在任何温度下都能全部吸收照射到它表面上各种波长的辐射的物体,称为黑体。黑体是热辐射研究的理想物体。

(3) 灰体 (gray body)

指光谱发射率不随波长变化的物体,即它发射的光谱和黑体的相似,只是光谱辐射力在所有波长范围内都比黑体的小,且按比例缩小。很多工程材料在红外波段可近似看做灰体。

(4) 反射率/反射比 (reflectance)

指物体表面反射的辐射能量与入射到该物体表面的辐射能量之比,一般以 ρ 表示。

(5) 吸收率/吸收比 (absorptance)

指物体表面吸收的辐射能量与入射到该物体表面的辐射能量之比,一般以 α 表示。

(6) 透射率/透射比 (transmission/transmittance)

指透过物体的辐射能量与入射到该物体表面的辐射能量之比,一般以 τ 表示。

根据能量分配,有 $\alpha + \rho + \tau = 1$ 。

对不透明固体, $\tau = 0$, 则 $\rho = 1 - \alpha$ 。

(7) 太阳光反射率/太阳光反射比 (solar reflectance)

指物体反射到半球空间的太阳辐射通量与入射到该物体表面上的太阳辐射通量的比值。

(8) 半球发射率 (hemispherical emittance)

指一个辐射源在半球方向上的辐射出射度与其有同一温度的黑体辐射源的辐射出射度的比值。关于发射率的进一步物理分析会在后文中评述。

(9) 热辐射隔热涂料 (reflective thermal insulating coating)

指在波长 $\lambda = 0.3 \sim 1.35 \mu\text{m}$ 区间具有较高太阳光反射率,同时在波长 $\lambda = 8 \sim 13.5 \mu\text{m}$ 区间具有较高红外发射率的涂料。

1.1.2 作用原理

1.1.2.1 太阳光热能分布

太阳光按波长的热能分布如表 1-1 所示。

表 1-1 太阳光热能按波长的分布

太阳光谱	波长 $\lambda/\mu\text{m}$	所占热能比例/%
紫外光	<0.3	5
可见光	$0.3 \sim 0.76$	45
近红外光	$0.76 \sim 1.35$	45
其他	>1.35	5