

综 述

自分层涂料的研究进展

孙艳荣, 范 涛, 李 鑫, 肖聪利, 马利国, 刘 峰

(北华航天工业学院材料工程系, 廊坊 065000)

摘要: 与常规的多次涂膜体系相比, 自分层涂料可以实现多层涂膜一次涂装, 解决层间附着力差的问题, 节约生产成本, 提高使用寿命。本文综述了自分层过程及其驱动力, 详细讨论了相容性和表面张力等影响自分层的因素, 分别从溶剂型、无溶剂型和水性涂料方面阐述了自分层涂料的研究进展。自分层涂料已在众多领域得到了广泛应用, 环境友好型自分层涂料是其今后研究发展的方向。

关键词: 自分层涂料; 相容性; 表面张力; 环境友好

引言

因为涂膜厚度不够、附着力不强或不能同时实现装饰及保护功能, 单层涂膜技术很少应用于涂料及膜保护体系的实际工程中^[1]。为满足涂料(或油漆)使用时应具备的防腐、隔热、保护、装饰等功能, 往往需要连续涂覆两层或多层功能不同的涂层, 而且功能各异、材质不同的涂层之间还要使用各种粘接剂、防腐剂、表面光滑剂等不同助剂。这种常规的多次涂膜法, 体系复杂、施工繁琐, 虽然能在一定程度上满足工程需求, 但劳动力消耗大, 原材料浪费严重, 且涂层间结合力不强, 严重影响了各膜层的性能, 大大降低了涂层的使用寿命^[2]。

区别于常规的多次涂膜法, 自分层涂料能够实现多层涂膜一次涂装, 从而缩短涂装时间, 减少涂料损耗, 降低生产成本^[3]。自分层涂料由两种或更多不相容(或部分相容)的树脂组成^[4,5], 一次施工在底材上之后, 随着溶剂的挥发或组分固化, 由于表面能的不同, 组分将自发地产生相分离和迁移, 在成膜过程中分成两个(或多个)连续的具有不同功能的涂层, 各涂层之间存在一个过渡层, 每层显示出不同的性能^[6]。自分层涂料解决了多层涂膜层间附着力差的问题^[7], 大大提高了涂料的使用寿命、耐候性、机械稳定性等, 在有毒或暴露环境中使用尤其重要^[8]。

1 自分层过程及其驱动力

上世纪 70 年代, Funke 等首先对不相容高分子混合物和多相结构用于有机涂料体系进行研究, 并创新性地提出了自分层涂料的基本概念^[9]。自分层涂料在施工之后, 经过自动的分层过程, 可以替代原来的分步操作, 直接形成双层或多层涂膜^[10]。自分层过程是自相分离的结果, 如溶剂型自分层涂料, 当高分子溶液因组分或温度变化而失稳时, 相分离随即发生。此即初次相分离^[11], 如果控制得当, 自动分层的液体相就会形成, 并在成膜过程中最终成为均相成层的上层和异相基体层。上层的分层相组分没有参与分层的部分仍然会残留在基体相中, 形成较大的初级分散结构。如果引入适当的交联反应^[11], 在成膜的较后阶段还会发生二次相分离, 从而在基体相中生成精细分散的显微异相高分子/高分子复合结构。

自分层过程导致两种类型高分子膜结构^[11], 作为基体相的高分子/高分子显微异相结构, 以及双层

收稿: 2010-10-17; 修回: 2010-11-20;

基金项目: 获河北省教育厅项目(Z2008402)、清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室开放课题(KF09011)、北华航天工业学院科研基金项目(KY-09-01-B)和材料系材料加工重点发展学科资助;

作者简介: 孙艳荣, 女, 博士, 副教授, 从事高分子化学的教学与科研工作, E-mail: sunyanrong@pku.edu.cn.

或多层膜结构(这种结构由高分子/高分子显微异相基体和清晰分层的上层组成)。自分层过程所形成的典型界面结构如图1所示^[4]。

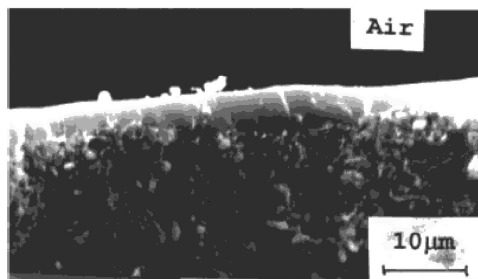


图1 典型自分层涂料界面的SEM照片(环氧树脂/硅树脂改性醇酸树脂)

Figure 1 The SEM microphotograph of cross-section of a typical self-stratifying coating (epoxy/silicone-modified alkyd)

驱动自分层过程主要有表面张力梯度、底材润湿力、相收缩力和静电力等四种力^[4]。表面张力梯度和底材润湿力都是和组分表面能相关联的内力^[11]。表面张力梯度源于组分间表面能的差异,因马兰各尼表面流动效应(Marangoni Surface Flow Effect)^[9],促使低表面能的组分铺展在高表面能的组分上,主要应用于低粘度溶剂基或薄层热固化自分层涂料体系中。底材润湿力由于底材的选择性润湿或对多孔底材的渗透,其驱动自分层的能力也归因于组分间表面能的差异,但是与表面张力梯度不同的是,这种驱动力与表面张力和接触角的乘积成比例^[4]。相收缩力是成膜体系干燥到一定程度产生的毛细管收缩内力^[11],由于溶剂的快速蒸发导致相互贯穿的毛细管网络体系,能够逐步“泵”(Pump)高分子溶液到顶层界面上形成分层相。静电力属于外部控制力^[11],主要基于不同的带电颗粒在外电场下具有不同的运动方式^[4],常用于粉末涂料体系的自分层,水性电泳沉积涂料体系也会产生相同的分层行为。图2是这四种力驱动自分层过程的示意图^[4]。

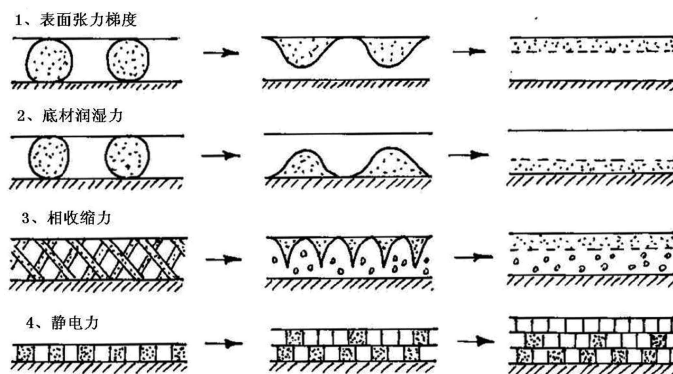


图2 自分层过程示意图

Figure 2 Schematic representations of self-stratifying processes

2 自分层过程的影响因素

多层涂膜自发形成的自分层过程主要依赖于高分子组分间的不相容性和体系表面能和界面能的总和^[10]。黄志军等^[12]利用环氧树脂与有机硅树脂的不相容性,制备出无溶剂可自分层固化环氧-有机硅涂层,其研究结果表明:自分层涂料组分间不相容性是其分层的热力学条件,而组分间的表面张力差异则是分层的动力学条件。

树脂的相容性是判断是否发生自分层的首要条件^[13]。根据 Hansen 溶解度理论,观察两种树脂的溶解球,可以通过其交叠程度来判断这两种树脂的不相容性^[10]。当重叠程度 $V < 55$ 时,预期能够发生良好的自分层行为。但是,重叠率具体数值的大小并不是判断体系能否分层的标准^[8],因为随溶剂的挥发,混

合溶剂的溶解度参数能否从两树脂的交叠区域移出,以及移出的方向和时机才是决定因素。由于自分层涂料基于使用不相容高分子的混合物,结果使得可应用的树脂范围变窄。目前,可供选择的不相容树脂组合相当有限^[1]。

表面能也是影响自分层过程的关键因素,可利用表面能关系判断体系能否发生分层及分层顺序。通常,表面能较高与底材润湿良好的成膜物成为底漆,具有低表面张力的成膜物在分层过程中则迁移到空气界面,形成面漆,最终实现体系能量最低。对于溶剂型自分层涂料,还要考虑溶剂对系统表面能的影响,起作用的是分离相溶液的表面能而不是纯聚合物固体的表面能^[10]。表 1^[4] 给出了可选用的具有高表面能

表 1 高表面能树脂与低表面能树脂

底漆树脂 (HFSE)	分层树脂 (LFSE)
表面能 > 40 mN/m	表面能 < 25 mN/m
三聚氰胺树脂 (57)	聚四氟乙烯 (21 ~ 22)
聚乙烯醇缩丁醛 (54)	硅树脂 (22 ~ 25)
环氧树脂 (42 ~ 46)	改性氟树脂 (20 ~ 25)
涤纶 (41 ~ 44)	有机硅改性醇酸聚酯树脂 (22 ~ 28)
聚氯乙烯 (42)	聚酯树脂 (22 ~ 28)

注:表中数据通过西斯曼方法计算出表面临界能或者表面自由能(数据采集于不同的资源)。

(Higher free surface energy, HFSE)的底漆树脂和较低表面能(Lower free surface energy, LFSE)的分层树脂。

此外,一些动力学因素也是自分层必须考虑的重要问题,如溶剂种类、溶剂蒸发速率、添加剂和固化剂等,也会通过影响体系达到能量最低的条件而影响自分层^[10]。溶剂的作用和影响将在下文溶剂型自分层涂料的部分专门讨论。不同种类的添加剂或助剂对自分层过程的影响效果不同^[8],通常分散剂、润湿剂和流平剂等对自分层过程具有不良影响,一般情况下交联剂会促进自分层。固化剂的使用对自分层过程有正反两方面的影响^[2],一方面固化剂使聚合物分子量增大,不相容性增加,利于分层,但是固化的进行又使整个体系的粘度增大,阻碍迁移,不利于分层。不同粒径颜填料的存在会有利于自分层过程,如环氧树脂/氟树脂(Lumiflon LF200)自分层涂料^[7],用含氨基的硅烷偶联剂处理的钛白粉与 LF200 配合,再与环氧树脂和防锈颜料混合,整个体系表现出良好的分层效果,改性的钛白粉可与面漆很好地亲和,而防锈颜料氧化铁或磷酸锌则主要存在于环氧树脂中。

3 自 分 层 涂 料 的 开 发

3.1 溶剂型自分层涂料

Verkholtantsev 最早将自分层概念引入溶剂型系统^[9]并发展了相关理论。溶剂型自分层涂料配方设计实现的关键在于溶剂的选择和匹配。对于含有两种不相容树脂组分的自分层涂料体系,由于其低共溶性,通常需要选用混合溶剂^[3]。混合溶剂配方中应该包含一种对两种树脂均可溶的快挥发溶剂(即共溶剂),以及一种只溶解其中一种树脂(低表面张力组分),挥发速度慢且表面张力也较小的溶剂^[7]。混合溶剂的初始配比应该使其溶解度参数在两树脂的重叠区域内,随着共溶剂的优先挥发,溶解度参数逐渐发生变化,并从重叠区域移入到其中一种树脂的溶解区域,此时混合溶剂对另一种树脂表现为不溶,从而分相^[8];如果溶解度参数始终不能够移出重叠区域或几乎同时跨出两树脂的溶解区域,则不能实现分层。此外,混合溶剂的选择不仅要保证涂料在存贮期间具有足够的稳定性^[5],还要求挥发速率适中,使体系粘度不至于过快增长,以提供分层所需要的时间^[2]。

孙培勤等^[14]选择不同的混合溶剂体系考察部分相容的环氧树脂和丙烯酸树脂的自分层行为。研究表明:混合溶剂的相对挥发速率不同,两树脂的分相和分层时间不同,膜厚为 1000 μm 时,挥发速率较低的四氢呋喃/甲苯及四氢呋喃/二甲苯体系均有分层现象出现,而挥发速率相对较高的四氢呋喃/正丁醇体系只有分相现象没有分层出现。该研究将混合溶剂近似看做理想溶液,通过计算不同混合溶剂溶解度参数在溶剂挥发过程中的变化,预测混合溶剂对两种树脂的溶解情况,考察不同的混合溶剂体系对两树脂分层效果的影响,这种研究方法具有理论指导意义。Langer 等^[15]通过实验检测在溶剂蒸发过程中溶

解度参数变化的方法来分析判断环氧树脂/丙烯酸树脂二元体系的自分层过程,则具有较大的实践意义。该研究采用气相色谱分析方法,确定不同蒸发阶段混合体系中特殊组分的重量分数,并根据重量分数计算得到溶解度参数和表面张力,进而通过这两个参数的变化趋势来预测体系的自分层行为。

溶剂型自分层涂料的配方设计,不仅要考虑溶剂的性质,成膜树脂的筛选和配合也同等重要。文献^[16]研究了环氧低聚物和不同的丙烯酸聚合物混合体系,发现其自分层行为依赖树脂组分的物理化学性质,特别是表面能及其极性分量,环氧数在 0.11~0.21 之间的低聚物和具有低极性的丙烯酸树脂组合可以获得有效的分层。丙烯酸树脂表面能和极性越低,则体系分层度越高。对金属底材的粘结实验表明,完全分层的结构往往造成较低的附着力,因此,最终通过性能优化的涂料配方既可保证分层效果,又能获得好的机械性能、表面光滑度和界面附着力。此外,不应忽视固化剂的筛选和使用。固化剂不仅通过固化的进行来影响自分层过程,其化学结构对体系相容性也会产生影响进而影响体系自分层行为^[17]。固化剂选择的基本原则是既要保证一定的固化速度,而且要与相对应的树脂具有较好的相容性^[12]。

研究表明^[14],溶剂型自分层涂料分层效果与膜厚有关,厚膜比薄膜的分层效果好。Abbasian 等采用二甲苯和甲基异丁基甲酮作为混合溶剂,对不同热塑性丙烯酸共聚物和一种环氧树脂组成的涂料体系自分层行为进行研究^[17],结果表明:成膜厚度越大,涂膜越容易分层,对于厚膜,分层的层厚也大。可见,厚膜有充足的时间保证分层,而且自分层机制不是扩散控制,而是对流控制。

溶剂型自分层涂料是一个复杂的混合物体系,也有研究者采用组合与高通量筛选的实验方法优化其配方设计,比如对硅氧烷-聚氨酯自分层涂料函数库的设计规划和筛选^[18]。所研究的函数库涉及两种聚硅氧烷,共进行四个自变量分析,通过涂膜表面能和仿甲壳动物附着力(Pseudobarnacle adhesion)两种性能的对比分析优化最终获得涂料的性能。

3.2 无溶剂型自分层涂料

过去,自分层涂料的主要研究尚且局限在以热塑性树脂为基础的、有机溶剂挥发的涂料树脂范围内。溶剂型自分层涂料需要使用大量的挥发性溶剂,要求精确控制各组成和应用条件,具有一定局限性。随着当今世界对在涂料中使用溶剂的要求越来越严格,发展环境友好的无溶剂型自分层涂料尤为重要。无溶剂型自分层涂料在配方设计上可以避免溶剂匹配因素的影响,同时还减少挥发性物质的排放,满足环境保护的要求。

粉末涂料属于无溶剂的范畴。粉末涂料的自分层,除考虑不同组分间的混溶性外,固化温度下的表面张力也是影响分层的重要因素,分层的驱动力是熔融态下树脂间的表面张力应具有较大的差异。例如表面张力高的环氧粉末和表面张力低的聚烯烃,能产生自分层的涂层,聚烯烃在空气界面,环氧在底材界面^[8]。

国内,黄志军等^[12,19]开展了无溶剂自分层涂料的相关研究,利用环氧树脂与有机硅树脂的不相容性,制备出自分层环氧-有机硅涂层,并采用扫描电镜分析(SEM-EDAX)及傅里叶变换红外光谱分析(FTIR-ATR)的方法表征涂层的分层效果,研究表明:为了达到分层固化的目的,自分层体系中A组分(环氧组分)的表面张力要比较大,B组分(有机硅)的表面张力要相对较小,同时要求A、B两组分之间具有较差的相容性,树脂与其对应固化剂(组分中的物质)具有较好的相容性。

国外,Ming等^[20-23]用无溶剂的液态低聚酯(SLO, Solventless liquid oligoester)设计无溶剂自分层涂料,研究了三种混合体系,包括低聚酯和氟化的低聚酯以及液态的多异氰酸酯交联剂^[20]、低聚酯和部分氟化的异氰酸酯以及非氟化的多异氰酸酯^[21,22]、低聚酯和氟化嵌段的异氰酸酯以及嵌段的多异氰酸酯^[23]。利用自分层的原理,这三种体系均可以实现低表面张力氟组分在表面的富集,在较少的氟用量下就能够获得优越的表面性质,从不使用溶剂和消减昂贵的氟组分量两个方面大大降低了涂料的成本,同时确保了低表面张力、低润湿性和低摩擦系数等表面功能。

3.3 水性自分层涂料

水性聚合物涂料也是环境友好型涂料的发展方向。水性自分层涂料在国外已有研究和应用^[3],“现场磷化涂料(ISPCs)”和“直接涂覆于金属(Direct-To-Metal)涂料实际上就是水性自分层涂料,其成膜时

能够自发地形成两层连续的网络,而且后者在国外已有商品销售,具有广阔的市场应用前景。

近年来,我国在水性自分层涂料方面也开展了一定的研究。卢迪斯等^[24, 25]研制了水性自分层聚四氟乙烯(PTEE)耐高温防粘涂料。张人韬^[26]以氟树脂与非氟树脂共混改性,开发了水性自分层氟硅建筑涂料。为制备出高性能、低成本的含氟树脂,秦总根等^[13, 27]在优选出环氧固化剂的基础上,将含氟乳液与环氧乳液共混,通过控制好共混乳液间表面张力差、共混工艺、GMA(甲基丙烯酸缩水甘油酯)用量等影响因素,成膜时树脂会产生自分层,表层富集含氟树脂,底层则以环氧树脂为主,中间依靠两种树脂中的反应基团形成过渡层,涂膜具有优异的表面性能和良好的附着性能。刘鲁梅等^[28]用自制的核壳型含氟反应性微凝胶与叔丙乳液复配成水性自分层涂料,研究了两种成膜物在涂膜中的形貌、分布以及对涂膜表面动态接触角的影响。结果表明氟碳组分有明显向表面迁移的倾向,在涂膜干燥过程中发生了自分层,含氟微凝胶的引入增强了涂膜的疏水能力。

也有一些研究涉足非氟组分水性自分层涂料。杨泽生等^[29]利用预乳化连续滴加的合成工艺和有机硅氧烷开环缩聚及其与丙烯酸酯自由基共聚的反应机理,制备了一种有机硅改性丙烯酸酯乳液。该乳液除具有常规的弹性乳液和乳胶膜性能外,在成膜过程中具有自分层的性能,使涂膜表面含有较高的有机硅成分,大大提高了建筑涂料的耐粘污性和耐候性。胡剑青等^[30]结合自分层涂料的概念和阴极电泳涂料体系的特点,设计了合成环氧树脂和丙烯酸树脂自分层阴极电泳涂料,获得的涂层具有优异的耐候性和良好的耐腐蚀性,实现了电泳涂装的底面合一。潘元佳等^[31]研制的自分层型高耐候性阴极电泳漆实现了耐蚀性与耐候性的良好兼顾,适用于车架、零部件、五金等各类对防腐性和耐候性要求较高的工业产品的涂覆。

4 自 分 层 涂 料 的 应 用 和 展 望

作为一种智能化涂料^[32],自分层涂料一次涂装就可获得复合涂膜结构,其基体层实现附着并保护底材的功能,而表面层则提供所希望的装饰外观、耐久性和抗化学品的能力。自分层涂料已经在以下领域获得了研究和应用:

(1)借助如前所述的显微异相高分子/高分子复合结构,可获得良好的力学和隔离性能^[11],从而用于耐磨损涂料、重防腐或锈蚀表面的防腐漆、海洋防腐涂料^[8]等;

(2)利用低表面张力组分在表面层的富集,可获得优越的表面性质^[4, 7, 20],用于自润滑涂料、耐粘污涂料^[24, 25, 29, 33]、自洁功能外墙涂料^[34]、海洋防污涂料^[18]等;

(3)适用于需要附着力和保护性好的环氧底漆,同时又要求耐候性好的丙烯酸或聚氨酯面漆的场合,如用于汽车阴极电泳涂料^[31, 35];

(4)用于木材的多种聚合物的溶液,由于木材底材的多孔性,利用自分层涂料中两相的渗透性差别,来填补这些孔洞^[2],还可用作绝缘漆包线漆、烘烤磁漆等。

综上所述,自分层涂料的设计和应用拓展了涂料科学的范畴,同时也丰富了高分子科学的内容,为促进其研究和开发,今后要致力于以下两方面的工作:

(1)适应现代涂料的发展潮流,沿着水性化、无溶剂化和高固体分化等环境友好的方向发展^[9],基于新的配方体系,从理论分析和实验测定两方面深入探究其自分层行为,分析涂膜分层的影响因素,最终优化涂料的性能;

(2)基于高分子科学的理论指导,采用氟、硅等改性自分层体系中的传统树脂,既可以减少昂贵树脂的使用,降低成本,又能保持涂膜优异的综合性能^[9];同时通过对颜料进行表面处理,加强颜料对自分层体系中不同树脂亲和力的研究^[3],从而为“着色自分层涂料”的开发和利用提供理论支持和实践指导。

参 考 文 献:

[1] 孙培勤, 孙绍晖, 刘大壮. 涂料工业, 2005, 35(2): 54~57.

[2] 董雪, 戎宗明, 英徐根. 涂料工业, 2001, (1): 1~6.

- [3] 王俊卿, 曾汉民. 材料导报, 2004, 18(6): 5~7.
- [4] Verkholtantsev V V. Pigment and Resin Technology, 2003, 32(5): 300~306.
- [5] 肖新颜, 刘健飞, 万彩霞, 张会平. 材料导报, 2007, 21(6): 52~54.
- [6] 秦总根, 涂伟萍, 夏正斌. 合成树脂及塑料, 2004, 21(4): 81~84.
- [7] 朱东. 涂料技术与文摘, 2007, (4): 1~4.
- [8] 蔡森. 涂料技术与文摘, 2008, (12): 15~18.
- [9] Verkholtantsev V V. Eur Coat J, 2005, (1-2): 20~23.
- [10] Sudip Nath. Paintindia 2002, 52(10): 31~40.
- [11] Verkholtantsev V V. Eur Coat J, 2000, (12): 707~712.
- [12] 黄志军, 叶章基, 任润桃, 汤黎容. 涂料工业, 2009, 39(3): 48~52.
- [13] 秦总根, 涂伟萍. 皮革化工, 2006, 23(2): 8~11.
- [14] 孙培勤, 常静, 孙绍晖, 刘大壮. 涂料工业, 2008, 38(2): 13~16.
- [15] Langer E, Kuczyńska H, Kamńska-Tarnawska E, Lukaszczyk J, Kaminska-Bach G. Prog Org Coat, 2009, 66(3): 228~234.
- [16] Kuczyńska H, Langer E, Kamńska-Tarnawska E, Kulikov D A, Indeikin E A. J Coat Technol Res, 2009, 6(3): 345~352.
- [17] Abbasian A, Ghaffarian S R, Mohammadi N. Iran Polym J, 2004, 13(1): 61~68.
- [18] Ekin A, Webster D C. J Comb Chem, 2007, 9(1): 178~188.
- [19] 黄志军, 叶章基, 任润桃, 汤黎容. 现代涂料与涂装, 2008, 11(4): 7~9.
- [20] Ming W H, Laven J, van der Linde R. Macromolecules, 2000, 33(18): 6886~6891.
- [21] Ming W, Tian M, van de Grampel R D, Melis F, Jia X, Loos J, van der Linde R. Macromolecules, 2002, 35(18): 6920~6929.
- [22] Ming W, Melis F, van de Grampel R D, van Ravenstein L, Tian M, van der Linde R. Prog Org Coat, 2003, 48(2): 316~321.
- [23] van Ravenstein L, Ming W, van de Grampel R D, van der Linde R, de With G, Loonjens T, Thune P C, Niemantsverdriet J W. Macromolecules, 2004, 37(2): 408~419.
- [24] 卢迪斯, 罗国钦, 林既森. 精细与专用化学品, 2000, (18): 27~29.
- [25] 罗国钦, 卢迪斯, 林既森, 周添国. 涂料工业, 2001, (3): 38~40.
- [26] 张人韬. 新型建筑材料, 2002, (6): 19~21.
- [27] 秦总根, 涂伟萍. 精细化工, 2006, 23(5): 497~501.
- [28] 刘鲁梅, 刘永庆, 胡正水. 涂料工业, 2009, 39(10): 49~51.
- [29] 杨泽生, 王俊卿. 广东化工, 2009, 36(5): 34~37.
- [30] 胡剑青, 周子鹄, 瞿金清, 涂伟萍. 云南大学学报(自然科学版), 2002, 24(1A): 208~212.
- [31] 潘元佳, 王春明. 上海涂料, 2010, 48(3): 6~9.
- [32] Padhye A D, Sawant V K. Paintindia, 2005, 55(4): 53~66.
- [33] 李金辉. 上海涂料, 2009, 47(8): 22~25.
- [34] 王叶, 肖新颜, 万彩霞. 化工新型材料, 2008, 36(3): 12~14.
- [35] 姐喜红, 胡剑青, 涂伟萍. 电镀与涂饰, 2008, 27(8): 51~54.

Progress in Self-stratification Coating

SUN Yan-rong, FAN Tao, LI Xin, XIAO Cong-li, MA Li-guo, LIU Feng

(Department of Materials Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: Compared with conventional multi-coating system, self-stratification coating, capable of producing multilayer structure in one operation, results in outstanding interfacial adhesion, low production cost and long service life. In this article, the self-stratifying processes and corresponding driving forces have been reviewed and suggested, and the various factors effecting on self-stratification have been discussed in detail. The progress in self-stratification coating based on solventborne, waterborne and solventless coatings has been expatiated. The coating has widely been applied in many fields, and its investigation should focus on environmentally friendly coating for the future.

Key words: Self-stratification coating; Compatibility; Surface tension; Environmentally friendly