

彩色铝粉 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}$ 的液相沉积制备与表征

韩 凯, 张赢超, 叶红齐

(中南大学 化学化工学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用分步液相沉积法在片状铝粉表面包覆 SiO_2 与 Fe_2O_3 双层薄膜制备了具有金属光泽的彩色铝粉, 以彩度与光泽度为主要评价指标, 探讨 Fe_2O_3 用量与 pH 值对铝粉包覆效果的影响, 利用原子力显微镜(AFM)、扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)等手段对包覆前后的铝粉进行表征。结果表明: 当 SiO_2 包覆量为 20%(质量分数)时, 随着 Fe_2O_3 膜厚的增加, 铝粉颜色由浅黄→金黄→红黄过渡, 光泽度下降; 当 $m(\text{Fe}_2\text{O}_3):m(\text{SiO}_2):m(\text{Al})=0.75:0.2:1$ 时, 铝粉具有良好的彩度与光泽度, 铝粉表面粗糙度由 5.05 nm 增大到 20.6 nm; 反应过程 pH 值对 Fe_2O_3 包覆效果有重要影响, pH 值宜控制在 3.9~4.0; 表面活性剂 PVP 的加入有利于提高 Fe_2O_3 膜层与 SiO_2 和 Al 基体的结合力, 从而提高颜色稳定性。

关键词: 片状铝粉; 表面包覆; 氧化铁; 彩度; 光泽度

中图分类号: TQ050.4, TQ624

文献标志码: A

Preparation and characterization of colored aluminum powder $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}$ by liquid deposition

HAN Kai, ZHANG Ying-chao, YE Hong-qi

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The colored aluminum flake powder with metallic luster was prepared by encapsulating SiO_2 and Fe_2O_3 double-layer film via step liquid-phase deposition method. Using the chromaticity and gloss as the main targets, the influence of Fe_2O_3 amount and pH value on the coating effect was studied. The unencapsulated and encapsulated aluminum powders were characterized by AFM, SEM and XRD. The results show that when the amount of SiO_2 is 20% (mass fraction), with the increase of Fe_2O_3 amount, the aluminum powder changed colors from pale-yellow to golden-yellow, and then to red-yellow, and the gloss is reduced. Under the condition of $m(\text{Fe}_2\text{O}_3):m(\text{SiO}_2):m(\text{Al})=0.75:0.2:1$, the encapsulated sample has good chromaticity and gloss synchronously, and the surface roughness of the aluminum powder increases from 5.05 nm to 20.6 nm. Furthermore, pH value should be controlled between 3.9 to 4.0. The addition of PVP is helpful to improve the color stability property of the aluminum powder, the Fe_2O_3 film is firmly combined with SiO_2 and Al.

Key words: flake aluminum powder; surface coating; ferric oxide; chromaticity; gloss

片状铝粉由于具有特殊的二维鳞片状结构与良好的金属效应被广泛用于建筑、涂料、印刷印染等工业领域, 是众多金属颜料中发展最快、应用最广的一类^[1-3]。但铝粉颜料色泽单一, 无法满足高档面漆或装饰性油墨领域的要求, 使其进一步发展受到限制^[4]。近年来, 多彩铝粉颜料的研制逐渐成为热点^[5-6]。多彩

铝粉颜料是一种经过表面改性处理的片状铝粉颜料, 既具有铝粉的金属光泽, 又有鲜艳的颜色^[7-8]。传统的包覆方法往往对铝粉光滑的表面有一定的破坏作用, 使其金属光泽下降, 因此, 如何在大幅降低铝粉光泽度的同时对其颜色进行改善是多彩铝粉的研究重点^[9]。吴垠等^[10]在铝粉粒子表面包覆有机聚合物

PMMA 制备了金色铝粉颜料, 并利用 SEM 和 XPS 对表面膜层的组成和结构进行了研究。周毅^[11]将铝粉置于氧化液中进行化学氧化, 使其表面形成一层多孔性的氧化膜, 然后浸渍于有机或无机颜料溶液中着色, 成功制得了金黄色铝粉。这些表面处理方法虽然制得了彩色铝粉颜料, 但其稳定性不高, 并且都未对彩色铝粉光泽度以及颜色特性进行表征。德国 ECKART 公司^[12]采用湿化学反应和化学气相沉积(CVD)相结合的方法在片状铝粉表面包覆 SiO_2 与 Fe_2O_3 双层膜, 所制得铝粉颜料具有明亮的随角异色效果, 然而气相沉积对反应过程条件要求苛刻, 产品成本较高, 不利于工业化生产。国内目前的研究主要集中在云母基珠光颜料^[13-14], 对多彩铝粉鲜有报道。

为此, 本文作者试图在较温和的液相条件下对片状铝粉进行 SiO_2 与 Fe_2O_3 双层包覆, 在 SiO_2 包覆量一定的情况下, 采用三氯化铁水解沉积的方法, 在不大幅降低铝粉光泽度的前提下对其彩度进行改善, 通过 CIE(1976)标准色度 L 、 a 、 b 系统对其颜色进行表征评价, 并利用 AFM、SEM、FT-IR 和 XRD 等对包覆前后铝粉的表面形貌和结构进行了分析。

1 实验

片状铝粉(平均粒径为 20 μm)为广东省惠州市派斯特实业有限公司生产。正硅酸乙酯(TEOS)、氨水、无水乙醇、三氯化铁、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司生产。实验用水为自制去离子水。

分析与检测设备如下: WSC-S 型测色色差仪与 WGG-60 型光泽度仪, 上海精密科学仪器有限公司; 原子力显微镜(AFM), Dimension V 型, 美国 veeco 公司; 扫描电子显微镜(SEM), JSM-6360LV 型, 日本电子公司。X 射线衍射(XRD), 日本理学 D/max2550, 管电压 36 kV, 管电流 30 mA, 扫描速度为 8 ($^\circ$)/min, 扫描角度范围为 20 $^\circ$ ~80 $^\circ$ 。

由于在制备过程中助磨剂的加入, 片状铝粉颜料表面往往包覆有一层有机膜(硬脂酸等), 表现为强烈的疏水性^[15], 因此, 首先在片状铝粉表面包覆一层三维网状结构的 SiO_2 膜使其表面亲水性, 然后再沉积氧化铁膜。另外, 由于二氧化硅具有较低的折射率(1.5), 而氧化铁膜的折射率较高(3.0), 因此, 当光线射过此双层膜时可产生干涉现象, 不仅利于使颜料的色彩更鲜艳, 且能产生随角异色效应^[16]。包覆过程示意图 1 所示。

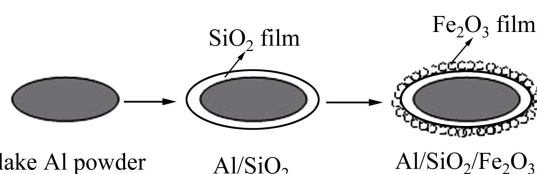


图 1 片状铝粉表面 SiO_2 与 Fe_2O_3 双层包覆过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of process of SiO_2 and Fe_2O_3 films coating aluminum flake powder

称取一定量铝粉于异丙醇溶剂中超声分散 10 min 后转移至 500 mL 三口烧瓶, 置于 40 $^\circ\text{C}$ 恒温水浴中机械搅拌; 配制滴加液的步骤如下: 按 $m(\text{SiO}_2)/m(\text{Al})=0.2$ 量取 TEOS, 按体积比 1:3 加入异丙醇稀释配制 TEOS 溶液; 水溶液的配制步骤如下: 以水硅摩尔比为 30 量取水, 按体积比 1:2 加入异丙醇, 然后加入 TEOS 质量 2% 的乙二醇胺催化剂混合均匀。用恒压滴液漏斗同时并流缓慢滴加 TEOS 溶液与水溶液, 滴加结束自然冷却并陈化 2~3 h, 抽滤并用无水乙醇洗涤、干燥得氧化硅包覆的片状铝粉颗粒。

在装有搅拌器、恒压滴液漏斗、pH 自动控制仪的 500 mL 三口烧瓶中加入一定量经氧化硅包覆的片状铝粉, 置于 70~75 $^\circ\text{C}$ 恒温水浴中充分搅拌, 加入铝粉质量 2% 的 PVP, 用酸或碱调节 pH 值, 然后将一定量的 0.2 mol/L 三氯化铁溶液由恒压滴液漏斗缓慢滴加至烧瓶中, 控制滴速为每滴 3 s, pH 自动控制仪通过碱泵加入 2 mol/L 的氨水维持反应体系恒定的 pH 值, 反应结束后陈化 2~3 h, 抽滤、蒸馏水洗涤 2 次、干燥后放入马弗炉中于 450 $^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h 得到 SiO_2 与 Fe_2O_3 双层包覆的片状铝粉。

用 WSC-S 型测色色差仪(D6 光源)对包覆前后铝粉进行色彩表征, 根据 GB/T 11186.3—1989 将所测 a 与 b 值按式(1)转换为彩度 c 值即颜色的饱和度对样品颜色进行评价^[17]:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

将包覆前后的铝粉、光油树脂和稀释剂按照质量比 1:3:2 调匀, 用刮样器刮板于白卡纸上, 膜厚为 100 μm , 自然干燥后用 WGG-60 型光泽度仪测定其光泽度。

2 结果与分析

2.1 Fe_2O_3 包覆量对铝粉彩度与光泽度的影响

在 SiO_2 膜层一定的情况下, 铝粉颜料的彩度与光

泽度主要由 Fe_2O_3 膜层厚度即包覆量决定。图2所示为 $m(\text{SiO}_2)/m(\text{Al})=0.2$ 时 Fe_2O_3 包覆量对铝粉彩度与光泽度的影响。 $m(\text{Fe}_2\text{O}_3)/m(\text{Al})=0$ 即为包覆前的铝粉,与之相比,随着包覆量的增加铝粉的彩度显著提高,肉眼观察铝粉颜色从包覆前的银白→浅黄→绿相黄→金黄→红黄变化;与此同时其光泽度却有所下降。因此,找到彩度与光泽度的平衡点成为实验的关键。由图2可知,当 $m(\text{Fe}_2\text{O}_3)/m(\text{Al})=0.75$ 时,表面包覆 SiO_2 与 Fe_2O_3 双层膜的铝粉呈现金黄色,具有较佳的彩度与光泽度。与包覆前铝粉相比,彩度由 28.38 提高到 87.89,光泽度由 96.23 降至 85.96,仅降低 0.1。

2.2 反应过程 pH 值对铝粉彩度与光泽度的影响

图3所示为 pH 值对包覆后铝粉彩度与光泽度的影响。

三氯化铁水解过程对体系 pH 值十分敏感,水解率与水解速率均受 pH 值影响较大^[18],另外,根据 Zeta 电位原理^[19],不同 pH 值体系中颗粒表面带电性能不

同,调节 pH 值使得 SiO_2/Al 粒子表面与 FeOOH 表面带不同电荷,异性电荷相吸从而使 FeOOH 粒子与 SiO_2/Al 基体牢固结合,对提高产品颜色稳定性有利。因此,控制合适的 pH 值是 Fe_2O_3 膜包覆反应过程的关键。由图3可见,在所研究 pH 值范围 3.5~4.5 之间,包覆后铝粉的彩度均大于未包覆铝粉的(28.38),光泽度均下降,当 pH 值控制在 3.9~4.0 之间时,铝粉的彩度与光泽度较佳。这是因为在此条件下,三氯化铁水解速率适中, FeOOH 粒子较均匀地沉积在铝粉表面, Fe_2O_3 膜厚度适宜;若 pH 值增大,则水解过快, FeOOH 粒子生长速度大于成核速度,导致团聚现象严重,使得铝粉表面平整度降低,彩度与光泽度大幅下降。需要说明的是,光泽度出现先增大后减小的变化趋势,分析可能是包覆后铝粉的光泽度同时受其固有金属光泽效应与 $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 双层膜的干涉效应影响,双层膜包覆使铝粉金属光泽效应降低,但包覆膜干涉效应在一定程度上对光泽度起到增强作用。

2.3 PVP 的加入对铝粉彩度与光泽度的影响

在实验过程中发现,不加表面活性剂用蒸馏水洗涤样品时洗液呈浅黄色甚至红色,这是由 FeOOH 包覆膜与 SiO_2/Al 基体结合不牢固、在洗涤过程中容易脱落所致。当在反应体系中加入含 2% 铝粉量的 PVP 时,结果发现洗涤过程中洗液接近无色,产品的彩度与光泽度数值基本保持不变,但颜色稳定性提高,对其在高档水性涂料领域的使用有重大意义。

这可能是因为在 PVP 在水溶液中会形成环状或者线形,其高分子链的立体化学构象对溶液中的粒子起到了较好的分散作用;此外,PVP 的多个 $\text{C}=\text{O}$ 基团会与基体 SiO_2/Al 表面的羟基发生键合反应稳定结合,而在 FeOOH 沉积过程中 O 原子会对 Fe 金属离子有吸引作用,从而提高 FeOOH 包覆膜与 SiO_2/Al 基体的结合能力。

2.4 扫描电镜(SEM)分析

图4所示为包覆前后铝粉的 SEM 像。由图4可看出,未包覆的铝粉表面光滑平整,经 SiO_2 与 Fe_2O_3 包覆后,铝粉表面被颗粒覆盖,边缘处较为模糊,这说明 Fe_2O_3 是以颗粒形式均匀沉积在铝粉表面成膜,而 SiO_2 则是以网状结构直接成膜。

2.5 EDS 能谱分析

为了确定实际 SiO_2 与 Fe_2O_3 包覆量,对包覆后铝粉进行表面元素分析,得到的 EDS 能谱如图5所示,元素含量见表1(Au 是由检测喷金过程引入)。

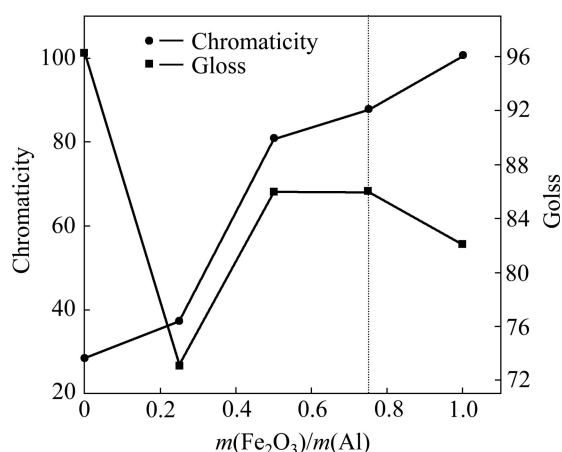


图2 Fe_2O_3 包覆量对彩度与光泽度的影响

Fig.2 Effect of Fe_2O_3 amount on chromaticity and gloss

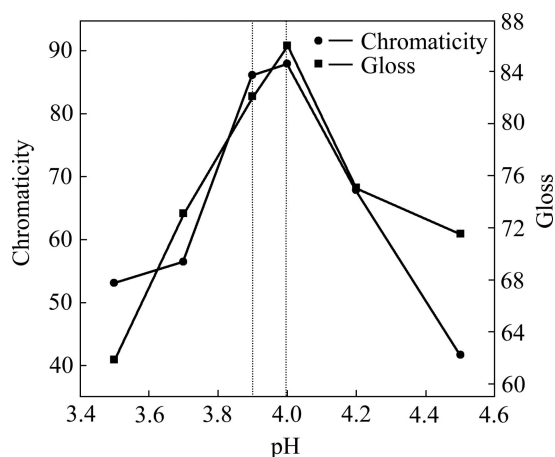


图3 pH 值对彩度与光泽度的影响

Fig.3 Effect of pH value on chromaticity and gloss

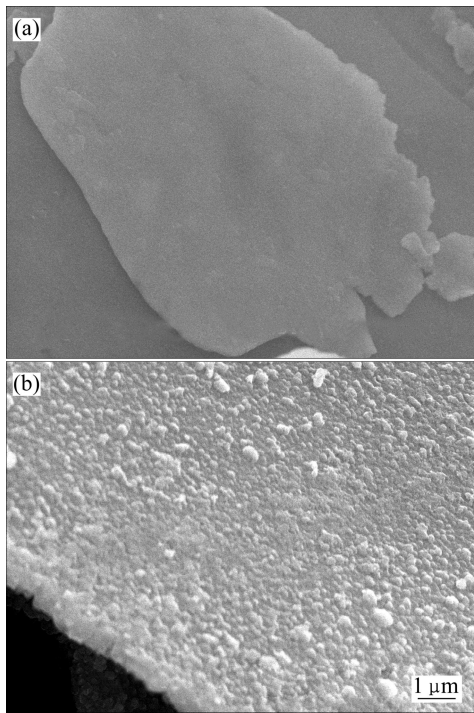


图 4 包覆前后铝粉的 SEM 像

Fig.4 SEM images of unencapsulated(a) and encapsulated(b) aluminum powders: (a) Pure Al; (b) Fe₂O₃/SiO₂/Al

表 1 SiO₂ 与 Fe₂O₃ 双层包覆铝粉的表面元素含量

Table 1 Content of surface elements of Fe₂O₃ and SiO₂ coated aluminum powders

Element	Mass fraction/%
Al	38.25
O	7.45
Si	6.75
Fe	26.80
Au	20.75

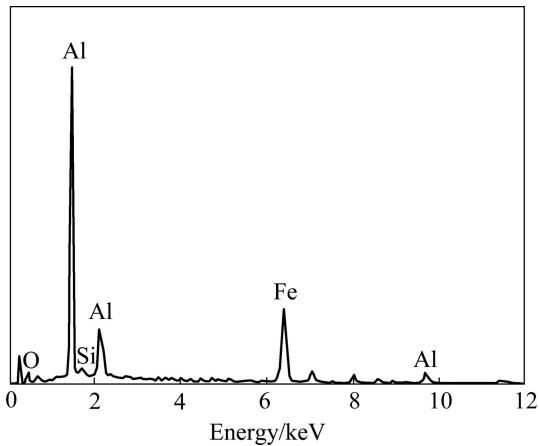


图 5 包覆后铝粉的 EDS 谱

Fig.5 EDS spectrum of encapsulated aluminum powders

由图 5 可以看出, 在片状铝粉表面层含有 Si、Fe 和 O 元素, 说明在铝粉表面包覆的物质是氧化硅和氧化铁膜。根据表 1 计算, Si 与 Fe 含量分别为 Al 的 17.7%、70.2%, 与理论包覆量有一定偏差, 主要是由反应及后处理过程中少量 Si 与 Fe 损失引起的。

2.6 原子力显微镜(AFM)分析

在原子力显微镜下可以清楚地观察到包覆前后铝粉的表面形貌, 如图 6 所示(在 5 μm×5 μm 范围内)。

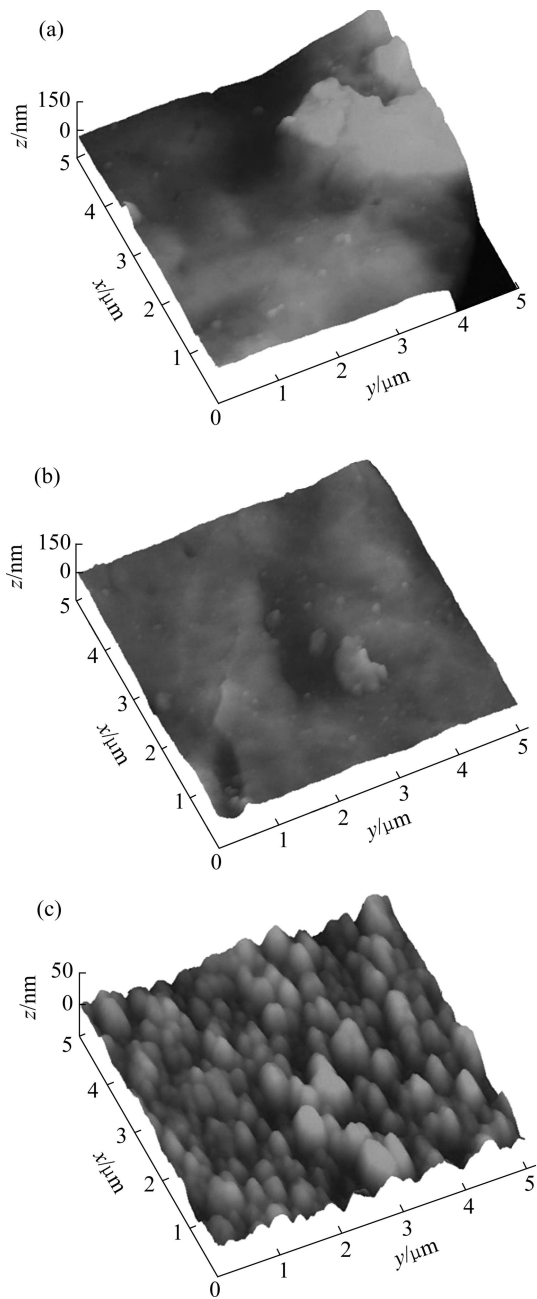


图 6 包覆前后铝粉表面微观形貌的 AFM 像

Fig.6 AFM micrographs of unencapsulated (a) and encapsulated ((b), (c)) aluminum powders: (a) Pure Al; (b) SiO₂/Al; (c) Fe₂O₃/SiO₂/Al

由图6可以看出, 未包覆铝粉表面平整光滑, 其粗糙度为 5.05 nm; SiO_2 的包覆方式主要是以三维网状膜覆盖, 有少量颗粒沉积, 因此对铝粉表面平整性影响不大, 此时粗糙度增加到 10.4 nm; Fe_2O_3 则全部是以颗粒形式生长、沉积, 这些颗粒粒径不一致, 大部分颗粒粒径为 100~300 nm, 但这些颗粒聚集致密, 完全覆盖了铝粉表面。 Fe_2O_3 包覆后铝粉表面的粗糙度为 20.6 nm, 且铝粉表面的最高点到最低点之间的距离为 351 nm。由研究可知, Fe_2O_3 颗粒沉积的均匀性与致密性主要受其生长速率控制, 当生长速率过慢时, 表面会有部分铝粉裸露, 产品颜色不均匀; 而当生长速度过快时则会出现大块团聚体, 使得铝粉表面粗糙度大幅增加, 不利于铝粉在涂料中的分散及涂膜。 Fe_2O_3 颗粒的生长速率主要受三氯化铁水解速率的影响, 而 pH 值的调节对水解速率的控制起关键作用, 结合 2.2 节的研究可知, pH 值对于铝粉表面 Fe_2O_3 薄膜的生长状况具有很重要的作用。

2.7 XRD 分析

为了进一步证实铝粉表面沉积有 SiO_2 与 Fe_2O_3 , 采用 XRD 对物相进行分析, 其结果如图 7 所示。由图 7 可知, 包覆前后样品晶体结构清晰, 都存在铝粉的典型特征峰(38.493° 、 44.763° 、 65.130° 、 78.248°)。未包覆铝粉曲线出现毛刺, 不平滑, 这是由于片状铝粉在生产过程中表面附带有非晶型的有机物, 在 XRD 谱中产生了相对应的非晶包。包覆 SiO_2 单层膜后, 由于 SiO_2 也为非晶型, 故样品谱图没有明显变化, 毛刺现象减少。 Fe_2O_3 膜包覆后, XRD 谱中出现明显的 Fe_2O_3 特征峰(分别在 33.198° 、 35.680° 、 49.455° 、

54.395° 、 62.563°), 与标准卡片 JCPDS72—469 对比, Fe_2O_3 主要以 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 晶型存在。

3 结论

1) 在 SiO_2 膜层一定时, 随着 Fe_2O_3 包覆量(薄膜厚度)的增加, 铝粉颜色从浅黄→金黄→红黄的变化。包覆后铝粉的光泽度同时受到其固有金属光泽效应与 $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 双层膜干涉效应的影响。当 $m(\text{Fe}_2\text{O}_3):m(\text{SiO}_2):m(\text{Al})=0.75:0.2:1$ 时, 铝粉具有良好的彩度与光泽度, 彩度从 28.38 提高到 87.89; 光泽度由 96.23 降至 85.96, 仅降低 10%, 肉眼观察铝粉呈现闪亮的金黄色。

2) pH 值对于铝粉表面 Fe_2O_3 薄膜的生长状况具有很重要的作用, 包覆过程 pH 值宜控制在 3.9~4.0。表面活性剂 PVP 的加入可以提高 Fe_2O_3 薄膜与 SiO_2/Al 基体的结合力, 使铝粉颜色稳定性提高, 其主要原因是提高了铝粉基体的亲水性, 并且改善了颗粒的分散性。

3) 通过分步液相沉积方法成功地将 SiO_2 与 Fe_2O_3 包覆在铝粉的表面, 显著地改善了铝粉的颜色性能。同时, SiO_2 膜层是以三维网状形式包覆, 而 Fe_2O_3 膜层是以颗粒形式紧密排列沉积而成。

REFERENCES

- [1] 朱骥良, 吴申年. 颜料工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 300~304.
ZHU Ji-liang, WU Shen-nian. Pigment technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 300~304.
- [2] TAYLOR M L, MORRIS G E, SMART R S C. Influence of aluminum doping on titania pigment structural and dispersion properties[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 262(1): 81~88.
- [3] KERR J D. Process improvements in the dispersion of metallic pigments[J]. Paint & Coatings Industry, 2003, 3: 45~47.
- [4] LI Li-jun, WEN Xiu-fang, YANG Zhuo-ru. Optimization of sol-gel coatings on the surface of aluminum pigments for corrosion protection[J]. Corrosion Science, 2008, 50(3): 795~803.
- [5] MÜLLER B. Corrosion inhibition of aluminum and zinc pigments by saccharides[J]. Corrosion Science, 2002, 44(7): 1583~1591.
- [6] KIEHL A, GREIWE K. Encapsulated aluminum pigments[J]. Progress in Organic Coatings, 1999, 37: 179~183.
- [7] MAAYTA A K, AL-RAWASHDEH N A F. Inhibition of acidic

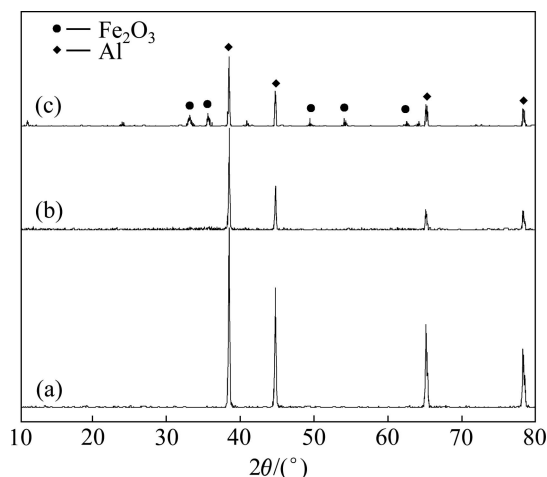


图7 包覆前后铝粉的 XRD 谱

Fig.7 XRD patterns of unencapsulated(a) and encapsulated(b), (c) aluminum powders: (a) Al; (b) SiO_2/Al ; (c) $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}$

- corrosion of pure aluminum by some organic compounds[J]. Corrosion Science, 2004, 46(5): 1129–1140.
- [8] YOSHIKI H. Colored aluminum pigment, its production method and coating material composition: JP2003096334[P]. 2003.
- [9] SMITH G B, GENTLE A, SWIFT P D, SMITH G B, GENTLE A, SWIFT P D, EARP A, MRONGA N. Colored paints based on iron oxide and silicon oxide coated flakes of aluminum as the pigment, for energy efficient paint: optical and thermal experiments[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003, 79(2): 179–197.
- [10] 吴 垠, 李凤生, 白华萍, 姜 炜, 杨 毅. 金色闪光铝粉颜料的制备研究[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(6): 923–925. WU Yin, LI Feng-sheng, BAI Hua-ping, JIANG Wei, YANG Yi. Study on preparation of golden flash aluminum flake pigments[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(6): 923–925.
- [11] 周 毅. 金黄色铝粉的制法[J]. 涂料工业, 1991(6): 18–19. ZHOU Yi. Preparation of golden aluminum powders[J]. Paint & Coatings Industry, 1991(6): 18–19.
- [12] Eckart Company. Paint & Coatings Industry[J]. Paint & Coatings Industry, 2002, 1: 46–49.
- [13] 张景峰, 向卫东, 梁晓娟. 金红石型云母钛珠光颜料的合成及表征[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S2): 652–654. ZHANG Jing-feng, XIANG Wei-dong, LIANG Xiao-juan. The preparation and analysis of ruffle titania-mica pearlescent pigment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S2): 652–654.
- [14] 颜家振, 黄婉霞, 张 月, 刘小杰, 涂铭旌. 不同衬底上 VO_2 薄膜的微观结构和光学性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(5): 819–822. YAN Jia-zhen, HUANG Wan-xia, ZHANG Yue, LIU Xiao-Jie, TU Ming-jing. Microstructure and optic properties of VO_2 films fabricated on different substrates[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(5): 819–822.
- [15] 张 川, 夏书标, 舒 波, 娄 萃, 黄世弘. 铝银浆制备中助剂的作用机理研究[J]. 金属功能材料, 2006, 13(3): 38–40. ZHANG Chuan, XIA Shu-biao, SHU Bo, LOU Cui, HUANG Shi-hong. Research the function mechanism in making aluminum silver starch[J]. Metallic Functional Materials, 2006, 13(3): 38–40.
- [16] 张高科, 黄志雄. Fe_2O_3 -云母珠光颜料复合机理的研究[J]. 武汉工业大学学报, 1997, 19(1): 83–85. ZHANG Gao-ke, HUANG Zhi-xiong. Study on composition mechanism of Fe_2O_3 -mica pearlescent pigment[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1997, 19(1): 83–85.
- [17] WONG W. Principles of color[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 50.
- [18] SINGH V K, PATRA M K, MANOTH M, GOWD G S, VADERA S R, KUMAR N. In situ synthesis of grapheme oxide and its composites with iron oxide[J]. New Carbon Materials, 2009, 24(2): 147–152.
- [19] 胡晓珊, 秦毅红, 黄小卫, 胡运生, 王东辉, 庄卫东. $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ 荧光粉表面包覆 In_2O_3 的研究[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(3): 284–288. HU Xiao-shan, QIN Yi-hong, HUANG Xiao-wei, HU Yun-sheng, WANG Dong-hui, ZHANG Wei-dong. In_2O_3 coating on grain surface of $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ phosphor[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2006, 24(3): 284–288.

(编辑 李艳红)