

〈材料与器件〉

低发射率兼低光泽颜填料 Al-Sr10 的制备及其消光机理研究

王业健¹, 徐国跃², 谭淑娟², 王梅丰³

(1. 中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035
2. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106;
3. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 为了探究 Al-Sr10 具有低光泽属性的本质, 对该材料进行 X 射线衍射、X 射线能量色散谱、面扫元素分析、8~14 μm 红外发射率、光泽度及 400~760 nm 可见光反射率测试。并采用高能球磨法制备该颜填料, 通过扫描电子显微镜等手段探究 Al-Sr10 颜填料的组分、形态和光学性能随球磨时间的变化。结果表明, Al-Sr10 表面易氧化形成灰黑色氧化锶, 以及固溶体中的锶元素产生等离激元效应共同作用导致材料消光; Al-Sr10 颜填料的物相不会随球磨时间变化, 在一定时间内, 材料的片化程度、发射率和光泽度性能随时间的延长得到改善, 其中球磨 15 h 后的颜填料其片化程度高, 发射率低至 0.123, 光泽度低至 3.8。

关键词: Al-Sr10; 低光泽; 等离激元效应; 发射率; 球磨时间

中图分类号: TN213 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)04-0413-06

Preparation of Low Emissivity and Low Gloss Filler Al-Sr10 and its Extinction Mechanism

WANG Yejian¹, XU Guoyue², TAN Shujuan², WANG Meifeng³

(1. Key Laboratory of Structural Corrosion Protection and Control Aerospace Science and Technology, China Special Aircraft Research Institute, Jingmen 448035, China

2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To evaluate the nature of the low gloss properties of Al-Sr10, X-ray diffraction, X-ray energy dispersive spectroscopy, face scan elemental analysis, 8–14 μm infrared emissivity, gloss, and 400–760 nm visible reflectance tests are performed on the material. The Al-Sr10 filler is prepared by high-energy ball milling, and changes in the components, morphology, and optical properties of the Al-Sr10 filler with the ball milling time are evaluated by scanning electron microscopy. The results show that the surface of Al-Sr10 is easily oxidized to form gray-black strontium oxide, and the effect of strontium in the solid solution leads to the extinction of the material. The components of the Al-Sr10 filler do not change with the ball milling time, and the lamellarization, emissivity, and gloss properties of the material increase with time. The degree of lamellarization of the filler after 15 h of ball milling is high, the emissivity is as low as 0.123, and the gloss is as low as 3.8.

Key words: Al-Sr10, low gloss, Plasma excitation effect, emissivity, ball milling time

0 引言

低发射率颜填料对涂层的红外光学性能起主导作

用, 是组成红外兼容涂层必不可少的成分之一^[1-3]。按材料种类可分为 3 大类: 金属颜填料、半导体颜填料和合金颜填料, 其中金属颜填料类, 如铝在 8~14 μm

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-08-23。

作者简介: 王业健 (1998-), 男, 湖北荆州人, 助理工程师, 硕士, 研究方向: 材料的腐蚀损伤分析, 多频谱兼容隐身材料。

通信作者: 徐国跃 (1958-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 特种功能材料关键技术。E-mail: xuguoy@nuaa.edu.cn。

波段具有低吸收率和高反射率,因而被广泛用于制备红外兼容涂层^[4]。目前,涂层的红外发射率已达到低于0.1的水平,然而由于金属自身的高光泽属性,使得涂层在可见光波段的性能较差,对红外兼容涂层的发展提出了更高的要求。

现阶段,国内外主要使用漂浮型片状化铝粉或铜粉^[5-8]等金属颜填料来研制红外兼容涂层材料,均是通过添加其他成分或改良涂层结构来减少涂层材料在可见光波段的反射,从而降低光泽度,极少涉及通过材料自身属性来降低光泽度。徐等人^[9]采用添加消光剂、炭黑颜料等方式来降低涂层的光泽度,研究表明,该方法有良好的消光效果,但发射率有所上升。李等人^[10]以消光理论为指导,通过在铝粉中添加银纳米颗粒来降低光泽度,制备出了低发射率兼低光泽颜填料,但由于操作复杂且成本昂贵,不利于大量应用。Liu等人^[11]采用直接着色法,通过研究纳米色浆对涂层色泽和光泽的影响,制备出了低光泽多色系涂层,但色浆的添加同样会引起发射率的升高。因此,本文前期依据材料属性原则^[12-14],通过大量选材,确定了Al-Sr10(被命名为Z-X)颜填料具有低发射率兼低光泽属性。本文将在此基础上探究Z-X颜填料的消光机理,并选用高能球磨(干)法制备该颜填料。一般而言,球磨时间越长,越有助于提升填料效果。若球磨时间过短,则会使研磨不充分;球磨时间过长,会造成已研磨细颗粒产生新团聚,且填料的状态因为破碎、剪切力、韧性等因素无法继续细化,间接降低了球磨效率,同时也会对球磨罐和填料均造成一定程度的污染,对仪器的使用寿命不利^[15-18]。因此本文还将分析Z-X颜填料的组分、形态和光学性能随球磨时间的变化。

1 实验

1.1 颜填料的制备

采用金相显微镜观察Z-X和纯铝的组织结构,并通过打磨的方式得到粗粉末。然后用60目筛子进行除杂,过滤大颗粒及杂质。用研钵反复研磨该粗

粉末,分别经过60目、100目直至200目筛子过筛得到粗加工粉末。用电子天平称取2.5g的粗加工粉末于100mL球磨罐中,并在球磨罐中加入3%硬脂酸^[10]及5%葡萄糖酸钠作为球磨助剂和表面活性剂,并按40:1的球料比称取球磨介质球。高能球磨机采用恒定模式,球磨转速为550r/min,球磨时间分别设置为5h、10h、15h、20h。球磨后得到的粉体经过超声搅拌器洗涤以及80℃真空干燥得到Z-X精加工粉体。再次研磨,经过60目、100目直至200目筛子过筛得到粒径均匀的Z-X和纯铝颜填料。

1.2 测试与表征

采用日本理学Smart Lab-SE X射线衍射仪对Z-X粉末进行物相测试;利用ZEISS Gemini300扫描电子显微镜对样品微观形貌进行表征;采用英国牛津Ultim Extreme能谱仪测试颜填料的能谱图;IR-2型双波段红外发射率测量仪(中科院上海技术物理研究所)测量颜填料8~14μm波段的红外发射率;利用KGZ-IA光泽度仪表测光泽度;利用M203-30型金相显微镜拍摄试样金相图片;采用岛津UV3600紫外可见分光计测试颜填料在400~760nm的反射率光谱曲线。

2 结果与讨论

2.1 Z-X低光泽机理分析

结合Z-X的二元相图,可以确定常温时在Z-X样品中存在单质元素锶,而在XRD的测试结果图1(a)中却并未出现单质锶元素,这是由于锶性质极其活泼,在自然界中不会以单质形式存在,此处以固溶体Al(Sr)的形式存在于铝中,因此难以被检测出,同时由测试数据可知,样品组织内只存在两相,几乎不含其他杂质元素。从金相照片图1(b)和(c)中得知,Z-X样品的基体上分布有针状第二相,可以看出试样的第一相为少量锶溶解于铝形成的固溶体,第二相为金属间互化物Al₄Sr。而纯铝样品中不含有第二相,所以其金相组织只有金属铝。于是通过XRD确定了材料的组织无其他杂质干扰,为后面性能分析提供了参考。

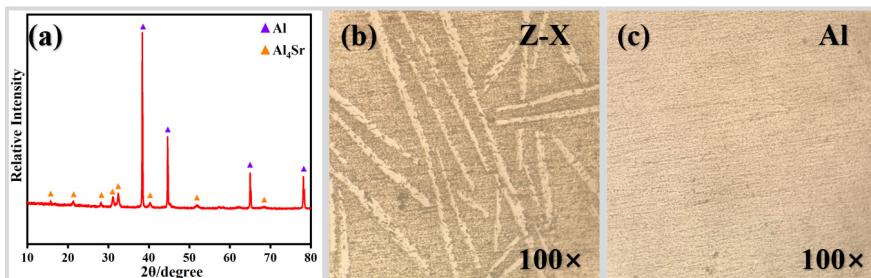


图1 Z-X材料的XRD测试曲线及金相显微结构: (a) Z-X材料的XRD衍射强度; (b) Z-X的金相照片; (c) 铝的金相照片
Fig.1 XRD and metallographic microstructure of Z-X powder:(a) XRD diffraction intensity of Z-X materials; (b) Metallographic photograph of Z-X; (c) Metallographic photograph of Al

由表 1 可知, Z-X 与纯铝的发射率相近, 但光泽度明显低于后者。研究表明金属材料的等离子振动频率 ω_p 取决于等离子体的浓度^[19]。而 Z-X 与纯铝的等离子浓度及阻尼系数相近, 因此由自由电子近似的 Drude 色散理论^[20]可知, Z-X 与纯铝在 8~14 μm 的反射率相近, 所以两者的红外发射率数值相近。

表 1 块材发射率及光泽度等测试数据

Table 1 Test data of block emissivities and glossiness

| Sample | Emissivities | Glossiness (60°) | $\omega_p/(10^{13})$ (10 ¹⁵ rad/s) | $\omega_p/(10^{13})$ rad/s) |
|--------|--------------|---------------------|--|--------------------------------|
| Z-X | 0.145 | 10.9 | 21.73 ^[19] | 10.81 ^[19] |
| Al | 0.128 | 15.2 | 22.42 ^[19] | 12.43 ^[19] |

且由 Z-X 未球磨粉体的能谱图 2(a)可知, 锶元素的量少, 但势能大于铝元素, 在形成固溶体的过程中, 锶元素的加入会使晶格弯曲, 造成系统势能增加, 而系统总是趋向于势能降低才能稳定^[20-21]。因此部分锶原子会被挤压至材料表面, 造成溶质元素富集于表面, 部分暴露于空气中。此外, 谷等人发现由于碱土金属锶活泼且与非金属元素的电负性相差较大, 很容易与空气中的氧气、水蒸气、二氧化碳等形成灰黑色氧化锶^[22], 使材料表面变暗, 从而使 Z-X 的光泽度有所降低。由于暴露在空气中的锶元素极少, 且空气中的水蒸气约占 0.03%^[22], 生成的氢氧化锶可忽略不计。

另外, 何等人^[21]证明了只有金属才能发生等离激元共振现象。由于锶原子最外层电子数较少, 即可作为自由电子存在于锶原子最外层, 而这些自由电子可看作等离子体, 亦可因外界因素脱去成为游离电子, 造成金属内部电子分布不均衡, 形成正负电荷中心。固体物理学认为, 质量相同时, 材料的固有频率与弹性模量成反比。由 Z-X 未球磨粉体的面扫元素 (Mapping) 图 2(b)和(c)可知, 固溶体在材料内较为分散且相对均匀, 因此可看作成分均匀物体。由弹性接触理论^[23]可知, 材料的弹性模量与硬度之间的关系取决于材料的局部能量耗散, 而组织相对均匀且材料宏观结构单一的物体在无外界施加力的影响下, 各处的能量耗散均相同, 因此可以忽略。从而模量与硬度之间的关系可简化成: 弹性模量随着硬度的增大而增大。由固溶强化可知, 固溶体的强度硬度均高于单一组元, 因此 Z-X 固溶体的硬度及弹性模量均高于纯铝, 因此固溶体的固有频率小于纯铝的固有频率, 而纯铝的固有频率为 72 GHz, 远小于可见光波段固有频率 (可见光固有频率为 380 THz)^[24], 即固溶体的固有频率远小于可见光的固有频率。

因此由等离激元共振理论可知, 当可见光入射到比入射波频率小很多的固溶体表面上时, 固溶体相中的锶元素因电子分布不均衡形成正负电荷中心, 锶元素的等离激元振动模型如图 3 所示。在库仑引力的

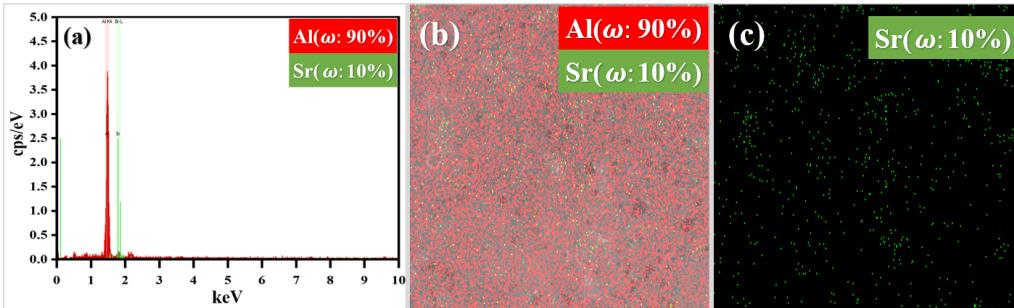


图 2 Z-X 粉体能谱测试及 Mapping 数据: (a) Z-X 粉体的能谱图; (b) Z-X 的面扫元素图; (c) Sr 在(b)图中的分布

Fig.2 Z-X powder energy spectrum test and Mapping data:(a) Energy spectra of Z-X powder; (b) Surface-swept element diagram of Z-X; (c) Distribution of Sr in (b)

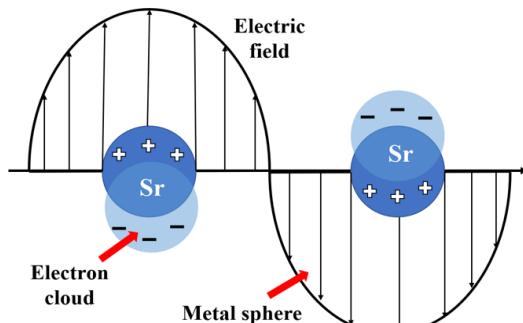


图 3 Sr 元素等离激元振动模型

Fig.3 Plasma primitive vibration model of Sr element

作用下,正电荷中心吸引周围的负电荷粒子,因惯性存在,中心会聚集很多带负电的电子,但由于同性相斥,许多电子便会自发排斥分开,离开该电荷区域,如此往复就形成了电子振荡云,从而增强锶元素周围的电场,提升了锶元素对可见光的散射吸收能力。图4为Z-X与纯铝颜填料在400~760 nm对可见光的反射率测试结果,因Z-X样品中的锶元素存在对光的散射和吸收作用,因此在可见光波段(400~760 nm)对光的反射作用弱于纯铝,故Z-X的反射率低于纯铝,导致其光泽度得到进一步降低。

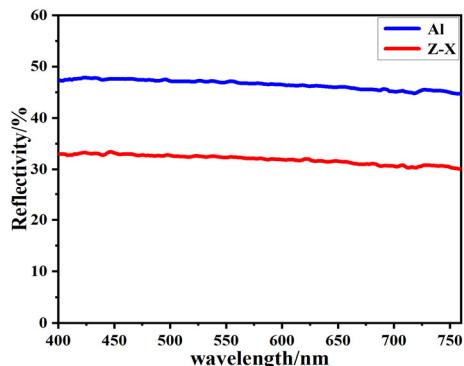


图4 未球磨粉体400~760 nm可见光反射率曲线

Fig.4 Visible light reflectance curve at 400–760 nm of non-ball-milled powder

2.2 Z-X 颜填料的组分随球磨时间的变化

Z-X 颜填料的 XRD 测试结果如图 5 所示,可以发现,球磨时间的长短对颜填料的物相几乎没有影响。但颜填料中的部分铝和锶元素会与硬脂酸发生化学反应生成硬脂酸铝和硬脂酸锶,包覆于颜填料表面。由于表面化合物不能构成单独的相,不会对晶格产生破坏,且无法脱离颜填料表面而存在^[25],因此在图 5 中并未显示。其中硬脂酸盐类如硬脂酸铝或硬脂酸锶是常见的消光剂^[26],金属皂之一,对材料表面消光有一定促进作用。

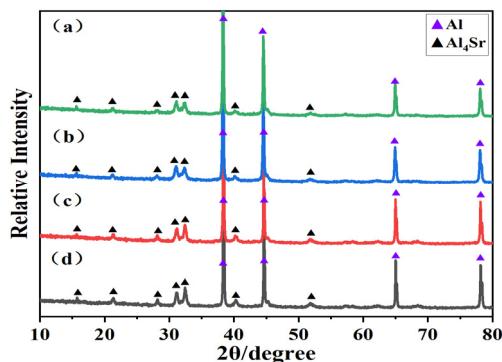


图5 不同球磨时间下Z-X的XRD衍射强度数据:

(a) 5 h; (b) 10 h; (c) 15 h; (d) 20 h

Fig.5 XRD diffraction intensity of Z-X under different ball milling time: (a) 5 h; (b) 10 h; (c) 15 h; (d) 20 h

2.3 Z-X 颜填料的形态随球磨时间的变化

为了探究颜填料的形态随球磨时间的变化过程,分别对 Al-Sr10 和纯铝颜填料进行 SEM 测试,结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 与图 7 中均可以看出,Z-X 粉末与纯铝粉末的球磨变化过程基本一致,类球状的粉末(a)经过充足的球磨化过程后变成了片状化(d),达到了良好的球磨效果。由(a)~(b)出现了少量的片状化粉末,类球状程度开始慢慢减少但不是很明显。这是由于在球磨过程中,时间太短,填料之间的挤压、冷焊没有充分进行,无法成型,形成径厚比较高的片状化结构。随着时间的延长,直至(c)和(d)时,片状化程度最高,填料拥有较高的径厚比,且能从图片中观察到大量大小不一致的片状材料,粒径分布宽,大约在 10~60 μm,且片与片之间较为分散,没有出现明显的团聚现象,而从球磨时间达 20 h 的(e)中可知,尽管出现了理想的片状化填料,但同时也出现了明显的团聚,效果较(d)有所下降。

2.4 Z-X 颜填料的光学性能随球磨时间的变化

如图 8 所示,为两种颜填料的光学性能随球磨时间的变化测试数据,Z-X 与纯铝颜填料的发射率和光泽度随球磨时间的变化基本一致。其中球磨时间越长,两颜填料的发射率和光泽度下降趋势越明显,结合图 6 和图 7 可以发现,这是由于时间越长,颗粒之间越能充分发生冷焊、挤压等过程,从而形成片化的程度越高,同时由于径厚比的提升赋予了颜填料一定的漂浮率。研究表明采用片状化和漂浮态的颜填料制备的涂层,其红外兼容可见光性能要比类球状颜填料性能更好,在涂层中,颜填料漂浮率越高,片状化颗粒越容易分布于涂层最上层,片与片之间以最密堆积形式叠放,增强了功能涂层对红外线的反射并减少了对可见光波段的反射,从而降低了发射率和光泽度。球磨时间过长,如达到 20 h 时,两颜填料的发射率和光泽度有所上升,这是由于颗粒之间发生团聚,减少了片状化所致。

从图 8 中可知,相比于未球磨状态,球磨 5 h 后的颜填料其发射率略有升高。结合图 6 或 7(b)可知,球磨时间太短,导致粉末整体的形态介于片状与类球状之间,杂乱分布,增强了球磨后颜填料对红外线的散射吸收能力,因此发射率略有提升。且由图 8 可知,Z-X 与纯铝颜填料具有相当的红外发射率性能,但前者相比于后者具有更低的光泽度。当球磨时间为 15 h 时,Z-X 表现出最佳的红外低发射率兼低光泽性能,发射率低至 0.123,光泽度低至 3.8。

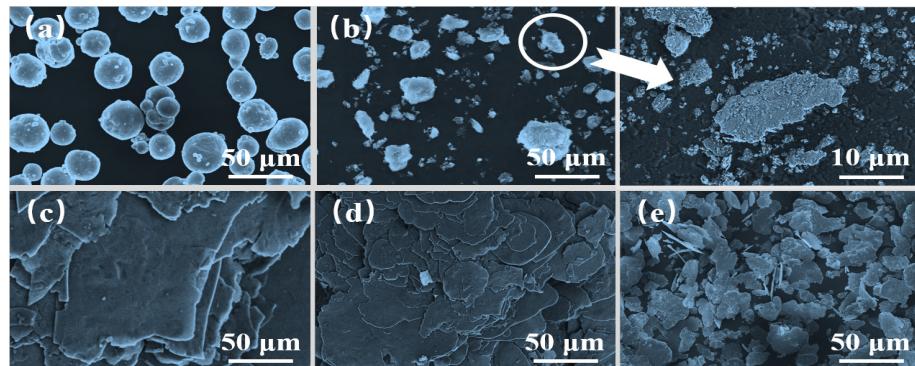


图6 不同球磨时间下的Z-X样品SEM测试: (a) 0 h; (b) 5 h; (c) 10 h; (d) 15 h; (e) 20 h
Fig.6 SEM of Z-X under different ball milling time: (a) 0 h; (b) 5 h; (c) 10 h; (d) 15 h; (e) 20 h

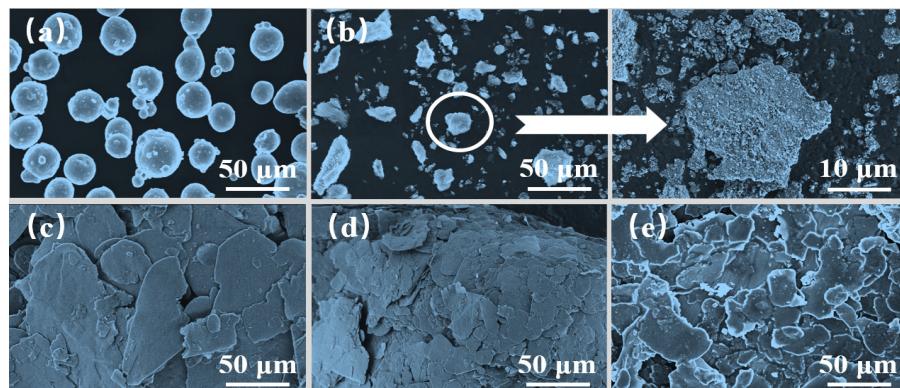


图7 不同球磨时间下的纯铝样品SEM测试: (a) 0 h; (b) 5 h; (c) 10 h; (d) 15 h; (e) 20 h
Fig.7 SEM of Al under different ball milling time: (a) 0 h; (b) 5 h; (c) 10 h; (d) 15 h; (e) 20 h

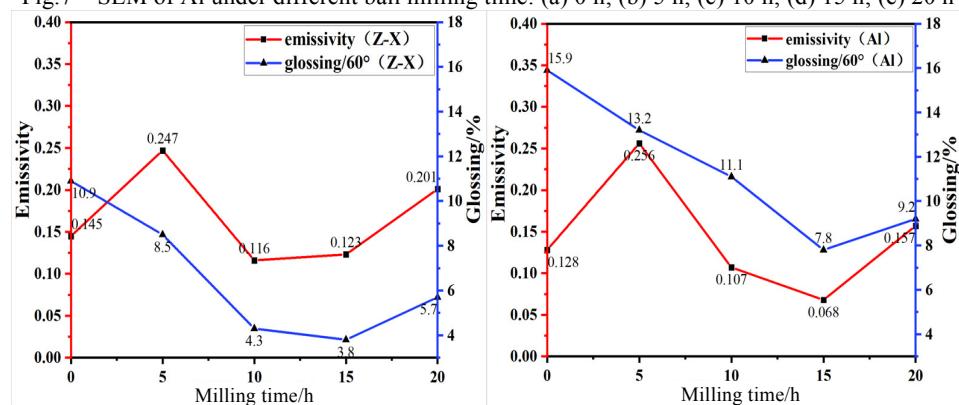


图8 Z-X和纯铝颜填料的发射率及光泽度随球磨时间的变化
Fig.8 Variation of emissivity and glossiness with ball milling time for Z-X and Al fillers

3 结论

1) Al-Sr10相较于纯铝具有相当的发射率和更低的光泽度,其消光机理为:材料表面易氧化形成灰黑色氧化锶,以及固溶体中的锶元素产生等离子效应共同作用导致材料发生消光作用,其光泽度远低于纯铝。

2) Al-Sr10的物相不会随着球磨时间的变化而变化,但会由于硬脂酸的加入导致发生化学反应生成新的成分硬脂酸铝和硬脂酸锶。

3) Al-Sr10与纯铝颜填料的形态随球磨时间的变化过程基本一致,其他参数不变的情况下,在0~15 h内,随着时间的延长,片状化程度越高,径厚

比越大,且粒径得到充分细化,集中在10~60 μm,球磨效果越好;15 h后球磨效果有所下降。其中以15 h的球磨效果最好,颜填料的片状化程度最高。

4) Al-Sr10的光学性能随球磨时间的变化较为明显,在0~5 h内由于球磨不充分,发射率和光泽度有所上升;5~15 h内由于颜填料的片状化程度越来越高,发射率和光泽度迅速下降;15 h后发射率和光泽度开始上升。其中球磨15 h后的颜填料其光学性能最佳,发射率低至0.123,光泽度低至3.8。

参考文献:

- [1] 周亮,许卫东,张月,等.低发射率材料红外隐身效果研究[J].电子技术,2021,50(7): 46-47.

- ZHOU L, XU W D, ZHANG Y, et al. Research on the infrared stealth effect of low emissivity materials[J]. *Electronics*, 2021, **50**(7): 46-47.
- [2] 冯利利, 刘一曼, 姚琳, 等. 基于红外隐身及多波段兼容隐身材料[J]. 化学进展, 2021, **33**(6): 1044-1058.
- FENG L L, LIU Y M, YAO L, et al. Based on infrared stealth and multi-band compatible stealth materials[J]. *Advances in Chemistry*, 2021, **33**(6): 1044-1058.
- [3] 董海龙, 汪家春, 曾宇润, 等. 红外低发射率隐身涂层对太赫兹波的反射光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, **39**(10): 3007-3012.
- DONG H L, WANG J C, ZENG Y R, et al. Study on the reflection spectra of terahertz waves by infrared low-emissivity stealth coatings[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, **39**(10): 3007-3012.
- [4] Kim J Y, Park C G, Hahn J W. Metal-semiconductor-metal metasurface for multiband infrared stealth technology using camouflage color pattern in visible range[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, **10**(6): 507-509.
- [5] ZHAO H L, GUO D B, SHENG T Y, et al. Infrared emissivity properties of infrared stealth coatings prepared by water-based technologies[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(12): 99-101.
- [6] HU R, WANG X Y. Analysis of several key parameters in the design of infrared stealth coating[C]//*MATEC Web of Conferences*, 2016, **61**(3): 13-15.
- [7] JUAN Z, JIANG Y, LIANG Y J, Pei L. Analysis of the composition of infrared stealth coating and the influence factors of its emissivity[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, **31**(8): 926-930.
- [8] LI E B, YU B, DONG H Y. Infrared radiation and thermal properties of Al-doped SrZrO₃ perovskites for potential infrared stealth coating materials in the high-temperature environment[J]. *Ceramics International*, 2021, **47**(16): 42-49.
- [9] 徐飞凤, 徐国跃, 谭淑娟, 等. 8~14 μm 波段低红外发射率与低光泽度兼容涂层的制备方法初探[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, **34**(4): 5-9.
- XU F F, XU G Y, TAN S J, et al. A preliminary study on the preparation method of 8~14 μm band compatible coatings with low infrared emissivity and low gloss[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2011, **34**(4): 5-9.
- [10] 李静, 徐国跃, 郭腾超, 等. 铝粉的漂浮态对红外低发射率涂层耐腐蚀性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, **42**(6): 54-58.
- LI J, XU G Y, GUO T C, et al. Effect of the floating state of aluminum powder on the corrosion resistance of infrared low emissivity coatings[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2019, **42**(6): 54-58.
- [11] LIU Y, YAO G Z, ZHAO L L. Visible light stealth based on 2D holographic antireflection coatings[J]. *Academy of Armored Forces Engineering (China)*, 2014, **9**(2): 73-77.
- [12] SUN G, LIU S, WANG W. Real-time target detection technology of large view-field infrared image based on multicore DSP parallel processing[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, **89**(7): 8-9.
- [13] YAN X, WANG L, QIAN X Y. Preparation and characterization of low infrared emissive aluminum/waterborne acrylic coatings[J]. *Coatings*, 2020, **10**(1): 13-21.
- [14] YAN X, WANG L. Preparation and performance of a waterborne UV/Al low infrared emissivity coating[J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(18): 14-23.
- [15] YAN X, CHANG Y, QIAN X. The properties of an aluminum/UV-curable, infrared, low-emissivity coating modified by nano-silica slurry[J]. *Coatings*, 2020, **10**(4): 38-42.
- [16] YAN X. Effect of different color paste on properties of fluorine resin/aluminum infrared low emissivity coating[J]. *Coatings*, 2020, **10**(1): 66-70.
- [17] Farooq M, Hutchins M. Optical properties of higher and lower refractive index composites in solar selective coatings[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2002, **71**(1): 73-83.
- [18] 张铎, 晋琦, 李维鸽, 等. 球磨分散和超声分散碳纳米管强化天然橡胶性能对比[J]. 应用化工, 2022, **51**(4): 971-975.
- ZHANG D, JIN Q, LI W G, et al. Comparison of the properties of ball-milled dispersed and ultrasonically dispersed carbon nanotubes to enhance natural rubber[J]. *Applied Chemicals*, 2022, **51**(4): 971-975.
- [19] 匡鹏, 李益文, 魏小龙, 等. 失效红外低发射率涂层发射率测量及分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, **21**(6): 26-32.
- KUANG P, LI Y W, WEI X L, et al. Emissivity measurement and analysis of failed infrared low emissivity coatings[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2020, **21**(6): 26-32.
- [20] HU C, XU G Y, SHEN X M. Preparation and characteristics of thermal resistance polysiloxane/Al composite coatings with low infrared emissivity[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **486**(1): 371-375.
- [21] 何云飞, 徐晨, 徐国跃, 等. 低发射率涂层与超材料吸波体兼容性能的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, **42**(2): 56-59.
- HE Y F, XU C, XU G Y, et al. Study on the compatibility of low emissivity coatings with metamaterial absorbers[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2019, **42**(2): 56-59.
- [22] 谷清杨, 冯丽. 无机化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 10-12.
- GU Q Y, FENG L. *Inorganic Chemistry*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 10-12.
- [23] YU T T, CHENG X L, ZHANG X F, et al. Highly sensitive H₂S detection sensors at low temperature based on hierarchically structured NiO porous nanowall arrays[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, **3**(22): 11991-11999.
- [24] GAO S S, AN Q D, XIAO Z Y, et al. Significant promotion of porous architecture and magnetic Fe₃O₄ NPs inside honeycomb-like carbonaceous composites for enhanced microwave absorption[J]. *Rsc. Advances*, 2018, **8**(34): 19011-19023.
- [25] 张川, 夏书标, 舒波, 等. 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 C, XIA S B, SHU B, et al. Study on the mechanism of action of additives in the preparation of aluminum-silver paste[J]. *Metal functional materials*, 2006, **13**(3): 38-40.
- [26] TAN X X, CHEN J, LI J X. A thin and optically transparent infrared-radar compatible stealth structure with low emissivity and broadband absorption[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, **55**(7): 897-905.