

导电填料对电子浆料性能影响的研究进展

冯清福, 孟宪伟, 李世鸿*, 梁 云, 李俊鹏

(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 导电填料是导电浆料的重要组成部分, 其决定了浆料的导电性能, 同时影响烧结固化膜的焊接强度、机械强度等物理性能。根据导电填料的分类, 从含量、粒径、形貌和表面性能等方面综述其对导电浆料性能影响的相关研究进展。介绍了新型石墨纳米填料, 并提出进行纳米填料、低成本环保浆料的开发, 丰富产品品种、提高产品质量的发展方向。

关键词: 金属材料; 电子浆料; 填料; 发展方向

中图分类号: TM241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)02-0079-06

Research Progress in the Influence of Conductive Fillers on the Properties of Electronic Pastes

FENG Qingfu, MENG Xianwei, LI Shihong*, LIANG Yun, LI Junpeng

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: As an ingredient of conductive pastes, the conductive filler plays a crucial role in determining the conductivity of the slurry, and it also affects the welding strength, mechanical strength and other physical properties of the sintered film. The effect of conductive fillers on the slurry performance is reviewed from every aspect of the content, particle size, morphology and surface properties of the fillers. The new graphite nano-packing is also introduced. The future trends for conductive pastes, the authors suggested, should be using nano-packing materials, developing low-cost and environmentally friendly process and expanding the product variety as well as to improving product quality.

Key words: metal materials; electronic paste; packing; development direction

导电浆料是一种集材料、化工、电子技术为一体的基础功能材料^[1], 由导电相(导电填料)、粘结相(玻璃粉)或有机载体中的 2 种或 2 种以上通过混合轧制成均匀的膏状物。导电浆料室温下通常不具有导电性, 烧结型浆料在烧结过程中有机载体挥发、燃烧, 导电微粒相互扩散联结形成导电通路, 从而具有导电性。

导电填料可以影响导电浆料的导电性、机械强度、焊接强度等物理性能。随着电子、信息、微电子技术的高速革新和发展, 环保化、精密化、微型化成为电子元器件的发展方向, 导电浆料的性能要求越来越高。开发新型具有高性能、低成本的环保型电子浆料, 替代传统材料成为热点研究方向之一。

近年来, 新体系开发、纳米导电填料对电子浆料性能影响及工艺研究成为国内外研究重点。本文对导电填料的相关研究进行综述。

1 导电填料分类

根据化学成分的不同, 导电填料可分为碳系、金属系、金属氧化物系 3 大类; 根据粒径不同, 可分为纳米粉、超细粉和细粉; 根据形貌的不同, 可分为球形、片状和纤维状。以下主要介绍不同化学成分的导电填料。

碳系导电填料(包括炭黑、石墨、碳纤维及其混合物)常用于导电油墨。近十几年来碳系导电油墨的

收稿日期: 2016-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51261008)、云南省科技计划项目(2016DC032)。

第一作者: 冯清福, 男, 硕士研究生, 研究方向: 贵金属电子浆料。E-mail: 785878474@qq.com

*通讯作者: 李世鸿, 男, 正高级工程师, 研究方向: 贵金属电子浆料。E-mail: lsh@ipm.com.cn

研究主要集中在通过导电填料的形貌、配比等因素对导电油墨性能的影响规律。马晓旭等^[2]以炭黑、石墨和银粉为导电填料,肖爽等^[3]以不同形貌和配比的碳粉为导电填料,得出了导电相的种类、形貌对碳浆粘度、电阻等性能的影响。新型的碳系导电填料包括碳纳米管(CNTs)和石墨烯,因具有大 π 键而具备优异的导电性,但在应用中存在稳定分离和分散问题。孙静等^[4]在砂磨条件下利用阳/非离子表面活性剂复配分散碳纳米管,与云母或二氧化钛复合,明显提高 CNTs 的分散性,较传统碳纳米管表面吸附带电荷离子或有机物等方法分散性更好。

金属系导电填料应用比较多的是 Au、Ag、Pt、Pd、Cu、Ni、Al 等金属粉,其中性能最稳定的是 Au,但因成本较高而受到限制。Ag 是应用时间最长、最广的填料,但是存在电场下离子迁移现象。随着近年来贵金属的价格上升,贱金属填料及镀银类导电填料如银包铜等也成为研究热点之一。金属粉的制备分为物理法和化学法。其中液相化学法包括化学沉淀法、溶胶凝胶法、微波乳液法等^[5],可以通过控制 pH、温度、保护剂用量、还原剂种类等方法制备出球形、片状、纤维状等各种形貌的微米、纳米金属粉。梁焕珍等^[6]在乙二醇溶剂中以氯铂酸为催化剂,PVP 为保护剂,过氧化氢还原硝酸银制备出微米级片状银粉。然而,化学法制备非球形金属粉工艺较复杂,受制于实验室条件,所以工业生产中多采用化学沉淀法制备球形金属粉,片状粉的制备一般采用有机物分散下机械球磨。物理法制备的 Al 粉用于制造晶体硅太阳能电池背面电极浆料,用量较大。

金属氧化物系如 TiO_2 、 PdO 、 RuO_2 等导电性较差,应用范围较窄,此类填料主要用于电阻浆料。

2 金属导电相对浆料性能影响

导电相是决定导体浆料电学性能的主要因素,同时也可以影响浆料的烧结质量、流变特性等性能。

2.1 导电填料含量的影响

研究表明,导电填料体积分数与导电浆料电导率之间并不是线性关系,典型的电导率变化符合渗流理论,如图 1 所示。

单一导电填料体积分数存在一个最佳值。当填料浓度超过渗流阈值,体电阻率反而升高,其主要原因是由于载体过少,粘度升高,印刷中空隙率升高,同时烧结过程中,载体难以将填料粒子粘结拉近,减少导电网络的形成,导致电阻率升高。在实

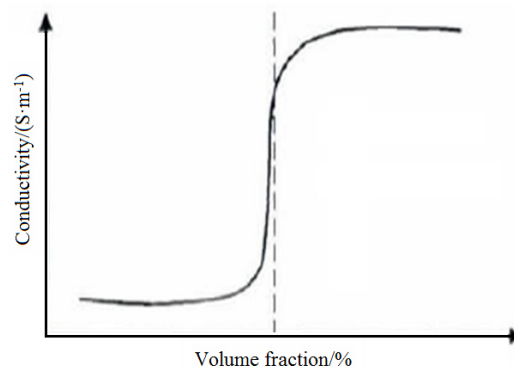


图 1 填料含量与电导率关系图^[7]

Fig.1 A relationship diagram between the filler contents and electrical conductivity^[7]

际生产中,通常采用不同形貌或粒径的混合填料方式以降低渗流阈值和提高导电性能。谢湘洲等^[7]采用平均粒径为 0.4 和 0.1 μm 的球形银粉混合作为导电填料,当 0.4 μm 的银粉占总填料 25%,得到最佳导电性能的浆料,在此最佳比例条件下添加 0.1 μm 球形银粉,当 0.1 μm 体积分数银粉达到总量的 20%,得到烧结膜层方阻最低,并通过 Dinger-Funk 粉体堆积方程^[8]计算出当混合银粉分布模数越接近 0.37,膜层方阻越低。

填料含量同时影响浆料流变性能。Faddoul 等^[9]利用 Casson 和 Bingham 模型计算导电浆料的屈服应力,符合不同填料含量对浆料的触变性和流变性能的影响结果。刘发等^[10]系统研究了银粉体积分数对浆料剪切黏度和回复性能的影响,发现随着银粉体积分数的增加,有机载体与银粉之间形成絮凝结构而提高低剪切黏度,同时剪切变稀现象明显。在较低填料体积分数下,银粉粒径对浆料剪切粘度影响不大,而在较高体积分数下,浆料的回复性能有所下降。随银粉粒径减小,浆料的剪切黏度、抗沉降性和回复性能都随之提升。其原因在于,随着填料粒径的减小,颗粒间距减小,比表面积增大,促进絮凝结构的形成从而表现更高的低剪切黏度,同时由于小微粒的布朗运动而表现出好的抗沉降性和回复能力。

2.2 导电填料形貌的影响

填料形貌可分为纤维状、球形、片状和混合型等。相对同一粒度范围的球形微米填料,纤维状和片形微米填料能提供更大的接触面积和接触概率,从而具有更低的渗流阈值,并促使形成更好的导电网络。浆料的电阻主要由填料内电阻、接触电阻和隧穿电阻组成,其中球形粉填料之间形成点接触,而片状粉填料之间的面接触和线接触具有更低的接

触电阻。随着粉体制备技术的发展,微米片状粉体厚度可达到纳米级,从而具有微米和纳米粉体的双重优点,采用片状填料的浆料因粉体特殊的二维结构,具有优良的浆料稳定性、屏蔽效应和附着强度。不同形貌粉体与浆料导电性能的关系,如图2所示。

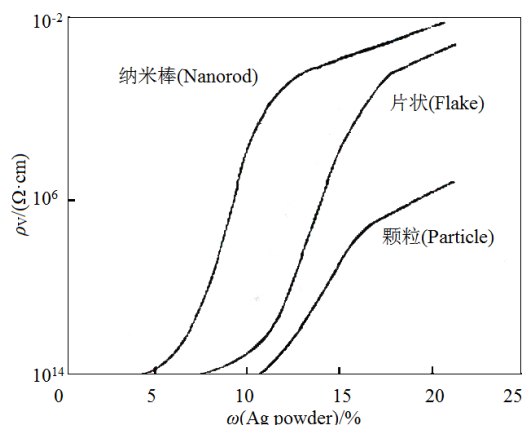


图2 银粉形貌与电阻率关系图^[11]

Fig.2 A relationship diagram between the silver powder morphology and resistivity

Ho 等^[11]分别采用不规则块状、棒状和球形铜粉作为导电填料制备导电胶,发现不规则块状和棒状铜粉在导电胶中能形成更好导电通路,导电胶具有更低的电阻率。杨桂生等^[12]采用粒径接近的球形和片状银粉制备导电浆料,球形粉浆料烧结膜层方阻为 2.318 mΩ/sq,片状粉浆料方阻为 1.671 mΩ/sq。低松装比的片状银粉因具有更高的比表面而提高粉体的覆盖率,进而降低接触电阻,形成更好的导电通路。Durairaj 等^[13]采用微米片状以及其他形貌银粉配制导电胶,得出相似导电性能结论。280℃烧结 10 min,所得片状粉与浆料导电性能之间的关系,如图3所示。

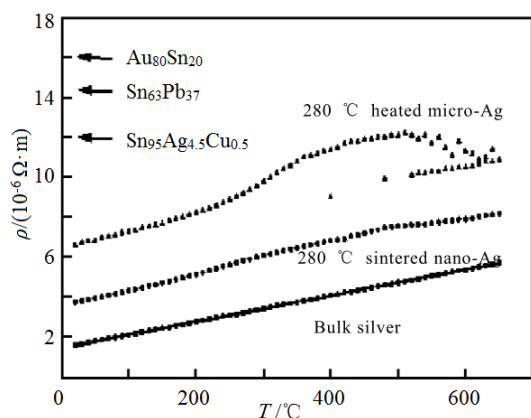


图3 块状、微米和纳米银粉浆料烧结与电阻率关系图^[11]

Fig.3 A relationship diagram between the silver pastes after sintering and resistivity

陈迎龙等^[14]在制备太阳能电池正面银浆中发现,树枝状银粉浆料在烧结中容易出现烧结收缩,分散性良好的光滑球形粉浆料烧结膜层最致密,附着强度和导电性最强,分别为 4.2 N 和 0.15 mΩ·cm。较早的研究^[15]表明,相同粒径范围的单一形貌粉体比混合型粉体作为填料具有更优异的性能,然而单一类别的填料难以同时对导电性能和成本做到控制。近年来,研究学者采用微米片状粉中适当添加小粒径的球形粉、纳米球粉,得到更佳的导电性能,同时降低成本。谢湘洲等^[7]采用微米片状银粉混合不同粒径的球形银粉作为导电填料,发现当片形银粉质量分数达到填料总量 85%时,得到最低烧结膜层方阻 3.78 mΩ/sq,附着力为 40 N/mm²,而不同粒径最佳配比的球形银粉浆料的膜层方阻为 4.00 mΩ/sq。代凯等^[16]将微米银粉和纳米银粉混合作为导电填料,发现在最佳比例(银粉添加总量 60%,纳米粉:微米粉=1:5)时可使导电胶达到最低体电阻 1.997×10⁻⁴ Ω·cm,同时填料用量减少了 10%。

2.3 导电填料尺寸的影响

随着烧结技术和多层布线等的发展进步,传统微米、亚微米粉已难以满足要求。国内外正在进行导电浆料填料纳米化的研究。由于纳米粒子的表面效应、小尺寸效应等,以纳米填料作为导电填料可有效降低渗流阈值和烧结固化温度,并提高导电、导热性能,改善浆料剪切强度等,但同时存在纳米粒子在浆料中分散及稳定性较差的问题。因此纳米粒子作为填料对浆料性能影响好坏尚无统一结论。Bai 等^[17]对比 280℃烧结 10 min 的 2 种银浆,发现纳米银浆的室温电阻率远低于微米银浆,且更稳定。研究发现,在以纳米粒子作为单一填料的导电浆料中,电阻率的变化符合渗流理论^[18]。在微米/纳米填料体系中,当微米填料含量接近渗流阈值时,少量添加纳米填料可有效改善浆料的电阻率;微米填料含量在渗流阈值以上时,添加纳米粒子反而提高了电阻率。微米填料浆料中适当添加纳米粒子,使其分布在微米填料间隙,增强了隧穿效应,促进和完善了导电网络;另一方面,纳米粒子也会破坏微米填料之间良好接触,微米粒子-微米粒子的导电通路转变为微米粒子-纳米粒子-微米粒子,增大了接触电阻。同时,纳米粒子含量升高表现出自增稠效应,影响浆料分散均匀性,电阻率随之升高。Chee 等^[19]在微米银片上附着纳米银颗粒制备导电胶中,发现纳米银占填料总质量 1%和 4%时,分别表现出增强电导率和降低电导率的不同现象。Mach 等^[20]在对

不同粒径纳米银对微米导电胶接头电阻的影响研究中发现,添加 3.8% 的 80~100 nm 的银有助于降低电阻,而添加 6~8 nm 的银反而提高了电阻。

相较纳米颗粒,一维纳米线之间形成线-线贴合,接触面积更大,导电网络更加稳定,同时纳米线制备过程中存在的少量纳米粒子填充于纳米线形成的导电通路之间,通过小尺寸效应形成的隧穿效应完善导电网络,因此纳米线和纳米棒比纳米颗粒更能提高导电胶的电学和力学性能。陶宇等^[21]采用不同长径比的银纳米块和纳米线作为填料制备出各向异性的导电胶,发现随着纳米填料的长径比增加,渗流阈值随之降低。纳米线填充浆料比纳米颗粒填充浆料具有更高的剪切强度。Yang 等^[22]以纳米银颗粒和纳米银线混合填料制备导电胶,纳米银线直径 100 nm,长度为 5 μm , 160 $^{\circ}\text{C}$ 固化 20 min,电阻率稳定在 $(3\sim4)\times 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$,同时提高了抗弯强度。

纳米填料的烧结同样对浆料性能有较大的影响。这是因为纳米材料的小尺寸效应,使浆料具有更低的烧结温度,小粒径的高表面能促使孔洞收缩和空位团湮灭,能有效提高连接强度、降低电阻率,若纳米颗粒均匀分散,可提高剪切强度和接头强度。然而,纳米粒子在烧结前容易形成团聚^[23-24],使浆料难以烧结,并形成分散块状。Kotthaus 等较早在此惰性气氛中制备出纳米银团聚体用于导电胶,烧结过程中,树脂基体进入团聚体孔洞,导电胶剪切强度提高了 2 倍,但电阻率也较高。金勿毁等^[25]制备出金铂钯合金纳米和微米球形颗粒用于低温导电浆料,微米粉浆料烧结膜方阻仅为纳米粉浆料的三分之一,纳米粉浆料烧结膜表面出现大量裂痕,可焊性和耐焊性都较微米粉浆料差。Zhang 等^[26-27]在无铅 Sn/Ag/Cu 焊料流变性能研究过程中发现,填料质量分数一定时,焊料粘度随尺寸分布变宽而降低。

2.4 导电填料表面性质的影响

赵彬等^[15]对比了不同表面剂处理的片状银粉制备所得浆体的电阻率,得出软脂酸在烧结中挥发较慢,影响固化速率和固化膜的导电率的结论。黄富春等^[28]分别以乙醇、乙醇-硝酸、乙醇-盐酸洗涤片状银粉,配制出导电银浆表现出不同的导电性能。现有理论认为,粉体表面保护剂的适量清除有助于提高导电性能,浆料配制过程中粉体表面保护剂与有机树脂形成新的平衡体系,影响粉体与树脂之间的接触电阻。针对纳米粉体易团聚现象,表面处理可保证浆料中纳米粒子的均匀分散和稳定,从而改善浆料的电学性能和剪切强度等力学性能。Li Y 等

人^[29]采用单羧酸和双羧酸分别对制备的纳米银颗粒进行表面处理形成自组装单层膜,发现双羧酸处理的纳米银具有更优的分散性和稳定性,导电胶封装接头在 500 V 电压下没有出现银迁移现象。纳米粒子进行表面处理同时一定程度减少金属导电填料烧结过程中的氧化。Li Y 等^[30]采用丙二酸对纳米银颗粒进行表面处理,金属和金属聚合物之间形成导电通路,导电胶的接头电阻可达 $10^{-5} \Omega$,同时提高接头的载流额度。Li X 等^[31]通过 KH-560 改性粒径 20 nm 左右的纳米银颗粒,可明显提高导电胶导电性,填料质量分数为 55% 的导电胶 180 $^{\circ}\text{C}$ 固化 10 min 达到最低电阻值 $2.5\times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ 。纳米粒子的原位生成有效控制了纳米颗粒的填量和分散。Chee 等^[32]在微米片状银粉表面用乙醇还原银溶液,原位生成纳米银颗粒,有效减少分散剂用量,纳米银颗粒含量的升高提高了导电胶的电导率。

3 新型导电填料

常见的导电填料有聚苯胺、炭黑、金属粉末、石墨、石墨烯等。其中,石墨填料具有导电性好,性能稳定,来源丰富,价格低廉等优点。但是,天然石墨通常以微米级鳞片粉末形式存在,直接把它作为导电填料,填充量较大,制品的密度高,力学性能差,因此,许多研究小组将目光转为石墨填料的研究上。将石墨以纳米级尺寸分散于聚合物中,制备聚合物/石墨纳米复合材料,可以大幅度降低石墨的用量,降低导电渗滤阈值。

直接采用膨胀石墨在聚合物中分散,过程复杂,不易分散均匀,难于推广。通过超声波粉碎获得的纳米石墨微片,则可以独立作为导电填料^[33]。将其与聚合物复合则能方便制备聚合物/石墨纳米复合材料。采用超声液相分散法制备出的浓度较高、分散性能很好的超细低熔点合金粒子,可作为导电填料制备导电涂料。

4 展望

微米片状粉性能远优于微米球形粉,但目前化学法制备高质量的片状粉仍效率较低,难于工业生产。近年来纳米填料成为导电浆料研究热点,纳米粒子可以有效降低渗流阈值,纳米/微米填料系浆料中纳米粒子一方面能够完善导电网络,另一方面又会增大接触电阻,可以破坏已有通路,需进一步开展纳米填料对浆料性能影响的研究。降低生产成

本, 提高分散稳定性, 对开发新型环保低成本的导电浆料、完善喷墨印刷等新技术具有重要意义。

电子组装业已经开始向绿色环保方向迈进, 因此环保型导电浆料(不含铅、汞、镉、聚溴二苯等有害物质)成为新世纪开发和研究的重点。在高端产品方面, 目前电子浆料品种数量和质量的需求仍依靠国外进口满足。因此, 国内电子浆料水平需要进一步提升, 从而提高我国电子产业在国际的整体水平。

参考文献:

- [1] 徐磊, 张宏亮, 刘显杰. 电子浆料研究进展[J]. 船电技术, 2012, 32(z2): 141-143.
XU L, ZHANG H L, LIU X J. Reviews on electronic paste[J]. Marine electric & electronic engineering, 2012, 32(z2): 141-143.
- [2] 马晓旭, 魏先福, 黄蓓青, 等. 导电性填料对电热膜用导电油墨性能的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2011, 19(2): 16-18.
MA X X, WEI X F, HUANG B Q, et al. The effect of conductive fillers on the performance of electric conductive ink used in electric radiant heating film[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2011, 19(2): 16-18.
- [3] 肖爽, 堵永国, 刘其城, 等. 碳系导电油墨中功能相对油墨性能的影响[J]. 电工材料, 2013(1): 27-31.
XIAO S, DU Y G, LIU Q C, et al. Effect of functional phase in carbon conductive ink on the ink properties[J]. Electrical engineering materials, 2013(1): 27-31.
- [4] 孙静, 刘佳鸿, 熊高虎, 等. 碳纳米管填料的静电自组装制备及在导电涂料中的应用[J]. 涂料工业, 2011, 41(10): 25-29.
SUN J, LIU J L, XIONG G H, et al. Carbon nanotubes conductive filler prepared by electrostatic self-assembly process and its application in conductive coatings[J]. Paint & coatings industry, 2011, 41(10): 25-29.
- [5] 曹艳丽, 丁孝龙, 李红臣, 等. 形貌可控贵金属纳米颗粒的合成、光学性质及生长机制[J]. 物理化学学报, 2011, 27(6): 1273-1286.
CAO Y L, DING X L, LI H C, et al. Morphology-controllable noble metal nanoparticles: synthesis, optical property and growth mechanism[J]. Acta physico-chimica sinica, 2011, 27(6): 1273-1286(14).
- [6] 梁焕珍, DONG J, CHUNG H S, 等. 乙二醇中化学还原合成片状银粉[J]. 物理化学学报, 2003, 19(2): 150-153.
LIANG H Z, DONG J, CHUNG H S, et al. Mechanism for the formation of flake silver powder synthesized by chemical reduction in ethylene glycol[J]. Acta physico-chimica sinica, 2003, 19(2): 150-153.
- [7] 谢湘洲, 刘心宇, 袁昌来. 银粉粒径及形貌搭配对无铅导体浆料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015(12): 3113-3118.
XIE X Z, LIU X Y, YUAN C L. Effect of silver particle size and morphology distribution on the performance of lead-free silver paste[J]. Rare metal materials and engineering, 2015(12): 3113-3118.
- [8] SZALAPAK J, GADOS A, KIELBASINSKI K, et al. Nanosilver sintered joints on elastic substrates[C]// ISSE: International spring seminar in electronics technology, 2014: 104-108.
- [9] FADDOUL R, REVERDYBRUAS N, BOUREL J. Silver content effect on rheological and electrical properties of silver pastes[J]. Journal of materials science materials in electronics, 2012, 23(7): 1415-1426.
- [10] 刘发, 刘卓峰, 张为军, 等. 银粉含量及几何特征对银浆流变性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2015(8): 65.
LIU F, LIU Z F, ZHANG W J, et al. Influence of Ag content and geometrical characteristic on rheological properties of silver paste[J]. Electronic components & materials, 2015(8): 65.
- [11] HO L N, NISHIKAWA H, TAKEMOTO T. Effect of different copper fillers on the electrical resistivity of conductive adhesives[J]. Journal of materials science materials in electronics, 2010, 22(5): 538-544.
- [12] 杨桂生, 陈步明, 郭忠诚. 低松比片状银粉低温聚合物导体浆料的研究[C]//2011 中国西南四省市表面工程技术交流会论文集. 成都, 2011.
YANG G S, CHEN B M, GUO Z C. The research of conductive paste made by low-temperature polymer with low loose specific weight flake silver powder[C]// Surface engineering technology exchange meeting of four provinces and cities in southwest China. Chengdu: 2011.
- [13] DURAIRAJ R, LEONG K C. Effect of silver flakes and particle shape on the steady shear viscosity of isotropic conductive adhesives[J]. Journal of testing & evaluation, 2015, 43(6): 1288-1295.
- [14] 陈迎龙, 甘卫平, 林涛, 等. 正面银浆银粉特性和烧结工艺对太阳能电池性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2012, 22(6): 17-24.
CHEN Y L, GAN W P, LIN T, et al. Effect of silver powders characteristics and firing process of front silver paste on property of solar cell[J]. Powder metallurgy

- industry, 2012, 22(6): 17-24.
- [15] 赵彬, 殷有亮. 银粉的形状对低温固化导电银浆导电性能的影响[J]. 印制电路信息, 2013(9): 27-29.
ZHAO B, YIN Y L. Effect of silver powder on low temperature curing conductive silver paste[J]. Paint & coatings industry, 2013(9): 27-29.
- [16] 代凯, 张志浩, 方建慧, 等. 添加短棒状纳米银粉的导电胶及其制备方法: CN101215450 B[P]. 2008-01-08.
DAI K, ZHANG Z H, FANG J H, et al. Add a short clavite conductive adhesive and the preparation methods of nanometer silver powder: CN101215450B[P]. 2008-01-08.
- [17] BAI J G, ZHANG Z Z, CALATA J N, et al. Low-temperature sintered nanoscale silver as a novel semiconductor device-metallized substrate interconnect material[J]. IEEE transactions on components & packaging technologies, 2006, 29(3): 589-593.
- [18] AMOLI B M, GUMFEKAR S, HU A, et al. Thiocarbonylate functionalization of silver nanoparticles: effect of chain length on the electrical conductivity of nanoparticles and their polymer composites[J]. Journal of materials chemistry, 2012, 22(37): 20048-20056.
- [19] CHEE S S, LEE J H. Reduction synthesis of silver nanoparticles anchored on silver micro-flakes and electrical resistivity of isotropic conductive adhesives at percolation threshold[J]. Electronic materials letters, 2012, 8(3): 315-320.
- [20] MACH P, RADEV R, PIETRIKOVA A. Electrically conductive adhesive filled with mixture of silver nano and microparticles[C]. Electronics system-integration technology conference, ESTC, 2008: 1141-1146.
- [21] 陶宇, 夏艳平, 张国庆, 等. 填料长径比对导电胶渗流阈值的影响[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 213-217.
TAO Y, XIA Y P, ZHANG G Q, et al. Influence of slenderness ratio on the percolation threshold of conductive adhesives[J]. Acta materiae compositae sinica, 2010, 27(6): 213-217.
- [22] YANG X, HE W, WANG S, et al. Preparation and properties of a novel electrically conductive adhesive using a composite of silver nanorods, silver nanoparticles, and modified epoxy resin[J]. Journal of materials science materials in electronics, 2012, 23(1): 108-114.
- [23] CHEN S L, LIU K H, LUO Y F, et al. In situ preparation and sintering of silver nanoparticles for low-cost and highly reliable conductive adhesive[J]. International journal of adhesion & adhesives, 2013, 45(9): 138-143.
- [24] MEI Y, GANG C, LU G Q, et al. Effect of joint sizes of low-temperature sintered nano-silver on thermal residual curvature of sandwiched assembly[J]. International journal of adhesion & adhesives, 2012, 35(6): 88-93.
- [25] 金勿毁, 陈立桥, 李世鸿, 等. 金铂钯合金粉末的特性对低温共烧电子浆料性能的影响[J]. 贵金属, 2015, 36(1): 1-5.
JIN W H, CHEN L Q, LI S H, et al. The influence of AuPtPd alloy powder properties on electronic paste for LTCC[J]. Precious metals, 2015, 36(1): 1-5.
- [26] ZHANG S S, ZHANG Y J, WANG H W. Effect of particle size distributions on the rheology of Sn/Ag/Cu lead-free solder pastes[J]. Materials & design, 2010, 31(1): 594-598.
- [27] ZHANG Y, QI S, WU X, et al. Electrically conductive adhesive based on acrylate resin filled with silver plating graphite nanosheet[J]. Synthetic metals, 2011, 161(5): 516-522.
- [28] 黄富春, 李晓龙, 李文琳, 等. 低温固化银浆导电性能的研究[J]. 贵金属, 2011, 32(2): 52-57.
HUANG F C, LI X L, LI W L, et al. The conductivity of silver paste cured at low temperature[J]. Precious metals, 2011, 32(2): 52-57.
- [29] LI Y, WONG C P. A novel non-migration nano-Ag conductive adhesive with enhanced electrical and thermal properties via self-assembled monolayers modification[C] //Electronic components and technology conference 2006 proceedings. IEEE, 2006: 8.
- [30] LI Y, MOON K S, WONG C P. Monolayer-protected silver nano-particle-based anisotropic conductive adhesives: Enhancement of electrical and thermal properties[J]. Journal of electronic materials, 2005, 34(12): 1573-1578.
- [31] LI X, ZHENG B, XU L, et al. Study on properties of conductive adhesive prepared with silver nanoparticles modified by silane coupling agent[J]. Rare metal materials & engineering, 2012, 41(1): 24-27.
- [32] CHEE S S, LEE J H. Reduction synthesis of silver nanoparticles anchored on silver micro-flakes and electrical resistivity of isotropic conductive adhesives at percolation threshold[J]. Electronic materials letters, 2012, 8(3): 315-320.
- [33] 张洪艳, 王海泉, 陈国华. 新型导电填料-纳米石墨微片[J]. 塑料, 2006, 35(4): 42-45
ZHANG H Y, WANG H Q, CHEN G H. A new kind of conducting filler-graphite nanosheets[J]. Plastics, 2006, 35(4): 42-45.