粉末冶金技术
Powder Metallurgy Technology
双月刊 1982年创刊
中文核心期刊; 中国科技核心期刊; 中国科学引文数据库来源期刊

NiMgO核壳纳米粉体的制备

郭　顺，郑金凤，李军义，程越伟，梁宏源

Preparation of Ni–MgO core-shell nano powders

GUO Shun, ZHENG Jinfeng, LI Junyi, CHENG Yuewei, and LIANG Hongyuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021020005

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

包覆-热分解碳酸银前驱体制备球形银粉的研究

Study on spherical silver powders prepared by silver carbonate precursor modified by cladding–thermal decomposition

粉末冶金技术. 2018, 36(6): 438–444

碳包覆CdS纳米颗粒的光学性能研究

Investigation on optical properties of carbon–encapsulated CdS nanoparticles

粉末冶金技术. 2021, 39(1): 54–61

低温固相反应法制备铈酸镧粉体及其烧结性能研究

Preparation and sintering properties of lanthanum cerium powders by low temperature solid state reaction

粉末冶金技术. 2021, 39(2): 159–164

静电纺丝法制备氧化钴纳米纤维

Preparation of cobalt oxide nanofibers by electrospinning

粉末冶金技术. 2019, 37(5): 361–366

搅拌球磨磨制片状银粉工艺研究

Research on the process of grinding flake silver powder by ball–stirring mill

粉末冶金技术. 2019, 37(2): 134–139

溶胶-凝胶法制备核级ZrB_2粉体

Preparation of nuclear–grade ZrB_2 powders by sol–gel method

粉末冶金技术. 2018, 36(5): 377–381

关注微信公众号，获得更多资讯信息

Ni–MgO 核–壳纳米粉体的制备

郭　顺[1)✉]，郑金凤[1)]，李军义[2)]，程越伟[1)]，梁宏源[1)]

1) 宁夏东方钽业股份有限公司国家钽铌特种金属材料工程技术研究中心, 石嘴山 753000

2) 西北稀有金属材料研究院稀有金属特种材料国家重点实验室, 石嘴山 753000

✉通信作者, E-mail: gshun2006@163.com

摘　要　采用包覆热分解烧结法，制备了多层陶瓷电容器内部电极用 MgO 包覆 Ni 纳米粉体，讨论了反应物浓度和分散剂含量对包覆纳米镍盐前驱体颗粒大小和均匀性的影响，分析了还原烧结温度对包覆纳米 Ni 粉球形度和分散性的影响，并利用 X 射线衍射仪、扫描电镜、透射电镜、热机械分析仪对 MgO 包覆纳米 Ni 粉进行了表征分析。结果表明：反应物浓度达到足以引起反应爆炸成核时，能够获得纳米镍盐颗粒；添加适量的分散剂，可以得到分散良好的纳米镍盐前驱体颗粒；还原烧结温度 700 ℃时，可以获得球形度和分散性良好的 MgO 包覆纳米 Ni 粉；MgO 包覆在纳米 Ni 粉表面，形成了核壳结构，该纳米 Ni 粉具有良好的收缩延迟效果。

关键词　多层陶瓷电容器；前驱体；纳米镍粉；氧化镁；核壳结构；热分解

分类号　TF123；TB383

Preparation of Ni–MgO core-shell nano powders

GUO Shun[1)✉], *ZHENG Jinfeng*[1)], *LI Junyi*[2)], *CHENG Yuewei*[1)], *LIANG Hongyuan*[1)]

1) National Engineering Research Center for Special Metal Materials of Tantalum and Niobium, Ningxia Orient Tantalum Industry CO., Ltd., Shizuishan 753000, China

2) Northwest Rare Metal Materials Research Institute, State Key Laboratory for Special Rare Metal Materials, Shizuishan 753000, China

✉Corresponding author, E-mail: gshun2006@163.com

ABSTRACT　Nickel nanopowders coated by magnesium oxide used for inner electrode of multilayer ceramic capacitor (MLCC) were prepared by coating thermal decomposition sintering method. The effects of reactant concentration and dispersant content on the particle size and homogeneity of the nano-coated nickel salt precursors were investigated, and the influences of reduction sintering temperature on the sphericity and dispersion of the coated nano-nickel powders were discussed. The nickel nanopowders coated by MgO were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and thermomechanical analyzer (TMA). The results show that the nano-nickel salt particles can be obtained when the reactant concentration reaches enough to cause the reaction explosion nucleation. The well-dispersed nano-nickel salt precursor particles can be obtained by adding the proper dosage of dispersant. The nickel nanopowders coated by MgO with good sphericity and dispersion can be obtained at the reduced sintering temperature of 700 ℃. The core-shell structure of the nickel nanopowders coated by MgO is formed, which show the good shrinkage delay effect.

收稿日期：2021−10−19
基金项目：宁夏回族自治区自然科学基金资助项目（NZ12357）
DOI：10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021020005；https://pmt.ustb.edu.cn

KEY WORDS multilayer ceramic capacitor; precursor; nano-nickel powders; MgO; core-shell structure; thermal decomposition

多层陶瓷电容器（multi-layer ceramic capacitors，MLCC）是电子整机中运用最广泛的被动贴片元件之一，主要用于各类军民用电子整机中的滤波、耦合、振荡旁路电路中，目前应用领域已经渗透到智能手机、手提电脑、新能源电动汽车、自动控制仪表、音频视频设备等领域[1−3]。多层陶瓷电容器的贱金属化（用常用金属 Ni、Cu 电极替代贵金属 Pd、Ag 电极）技术已经成熟[4−5]。

随着电子元器件生产工艺和水平的发展以及下游应用领域的驱动，市场对小型化、高电容车用等高端多层陶瓷电容器产品的需求越来越大，超小型、高容多层陶瓷电容器愈来愈受到未来消费电子市场的青睐[6]。近年来，在电子消费市场，国际大厂对多层陶瓷电容器的扩产规划都在向小尺寸转移，日韩等大厂更是将产能逐步转向微小型化尺寸多层陶瓷电容器，村田已经在全球首先量产 008004（0.2 mm×0.1 mm）尺寸的多层陶瓷电容器。为满足多层陶瓷电容器高容量、小型化发展，需要电容器电极层薄而平整，电极层的厚度甚至需要小于 1 μm，这样必须要求球形镍粉具有粒径小（甚至小于 100 nm）、粒度分布范围窄甚至单一粒径的性能[7−9]。同时，在多层陶瓷电容器的制作过程中，Ni 内电极层需要与陶瓷介质层（如 $BaTiO_3$）在还原气氛中共烧，当 Ni 内电极层和陶瓷介质层在同一温度下烧结时，由于两者的烧结收缩特性差异很大，这种烧结收缩的不匹配将直接导致电极层和陶瓷介电层之间产生明显的分离裂痕，容易造成多层陶瓷电容器分层结构缺陷[10−11]。为了改善收缩不匹配的问题，学者们尝试了多种改善途径，发现在 Ni 粉表面包覆一定厚度的氧化物包覆层是一种比较有效的方法。刘波和郝俊杰[12] 采用凝胶–溶胶法制备了 $BaTiO_3$ 包覆 Ni 复合粉体，该粉体具有良好的抗氧化性能和烧结性能。李晓波等[13] 采用化学沉淀法制备了氧化性能优良的 Ni/$CaZrO_3$ 复合粉体。本文采用包覆热分解烧结法[14]，以草酸镁包覆纳米草酸镍为前驱体，通过高温还原烧结制备了粒度均匀、分散良好、收缩延迟效果优秀的 MgO 包覆纳米 Ni 粉，为高容量多层陶瓷电容器内电极材料的国产化提供了新方法。

1 实验材料及方法

1.1 仪器与试剂

实验原料有氯化镍（$NiCl_2·6H_2O$）、氯化镁（$MgCl_2$）、草酸（$H_2C_2O_4$）、聚乙二醇 6000（PEG6000），均为分析纯。沉淀、包覆反应所用的设备为带有搅拌桨的常压反应釜，还原煅烧所用的设备为气氛烧结炉。

1.2 合成步骤

首先配制 1 L 摩尔浓度为 1 mol·L^{-1} 的 $NiCl_2·6H_2O$ 溶液，加入质量分数 1% 的分散剂 PEG6000，持续搅拌使分散剂充分混合，再加入等摩尔量的沉淀剂 $H_2C_2O_4$ 溶液，两者发生沉淀反应，生成单一的草酸镍前驱体溶液；然后将 2 L 摩尔浓度为 1 mol·L^{-1} 的 $MgCl_2$ 溶液和等摩尔量的 $H_2C_2O_4$ 溶液，按一定速度同时加入到草酸镍前驱体溶液中，生成包覆盐前驱体溶液；最后，将包覆盐前驱体进行洗涤、干燥脱水，在真空气氛炉中加热到 600～900 ℃烧结，得到 MgO 包覆的纳米 Ni 粉。分别研究分散剂 PEG6000 质量分数不变（1%）时，$NiCl_2·6H_2O$ 溶液的摩尔浓度（0.3 mol·L^{-1}、0.4 mol·L^{-1}、0.5 mol·L^{-1}）对颗粒形貌的影响，$NiCl_2·6H_2O$ 溶液摩尔浓度不变（0.4 mol·L^{-1}）时，分散剂 PEG6000 质量分数（0.5%、0.7%、1.0%、1.5%）对颗粒形貌的影响，$NiCl_2·6H_2O$ 溶液摩尔浓度和分散剂 PEG6000 质量分数分别为 0.4 mol·L^{-1} 和 1.0% 时，包覆盐前驱体还原烧结温度（650 ℃、700 ℃、750 ℃、800 ℃）对颗粒形貌的影响。

1.3 产物的表征

利用日本理学 D /max2550VB+18K 型转靶 X 射线衍射仪（X-ray diffraction，XRD）分析粉末物相，使用 JEOL-6360LV 型扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）和 HT7800 型透射电子显微镜（transmission electron microscope，TEM）分析样品表面形貌，通过 TMA8311 热机械分析仪（thermomechanical analysis，TMA）分析检测样品高温收缩性能。

2 结果和讨论

2.1 MgO 包覆纳米 Ni 粉的形貌和物相分析

将干燥脱水后的包覆盐放置于氢气气氛炉中，

温度升至 700 ℃ 保温 1 h 后冷却出炉，获得纳米包覆镍粉，其透射电子显微镜形貌如图 1 所示。在低倍率下（图 1（a））和高倍率下（图 1（b）），发现颗粒能够分散存在，而且粒径非常均匀，复合粉体结构是以近球形 Ni 粉为核心、MgO 为壳的核–壳结构。这是由于以草酸镁包覆草酸镍的前驱体颗粒在氢气还原气氛进行热处理，草酸镍分解成 NiO，再被还原成 Ni 粉，并逐渐球化形成近球形 Ni 粉，而草酸镁则分解成无定形 MgO，包裹在球形 Ni 粉表面，从而形成 Ni–MgO 核–壳结构。

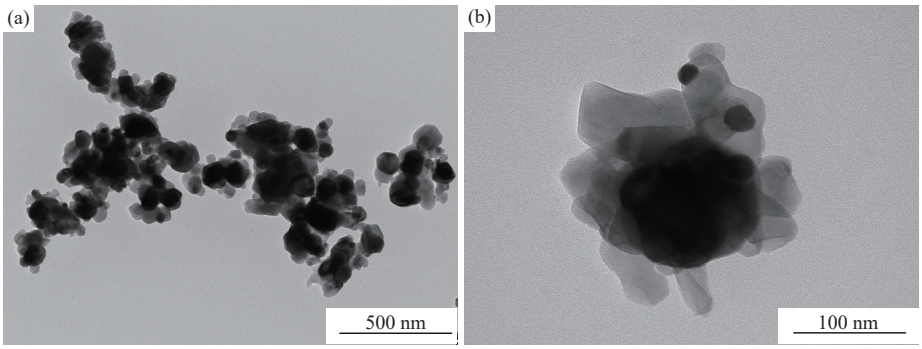

图 1　MgO 包覆纳米 Ni 粉透射电镜形貌：（a）低倍率；（b）高倍率

Fig.1　TEM images of the nickel powders coated by MgO: (a) low magnification; (b) high magnification

所得样品的 X 射线衍射图谱如图 2 所示。图谱在 44.35°(111)、51.91°(200) 和 76.42°(220) 处出现的特征衍射峰与 FCC-Ni（JCPDS 04-0850，a=0.353 nm）上的标准衍射峰数据相吻合，由谢乐公式 $D_c=0.89\lambda/(B\cos\theta)$（$D_c$ 为晶粒尺寸，λ 为 X 射线波长，B 为衍射峰半高宽，θ 为衍射角）计算出纳米 Ni 颗粒的平均粒径约为 17.2 nm。另外，Ni 粉图谱上叠加了 MgO 的特征峰，说明该样品中只有 Ni 和 MgO 两相构成。

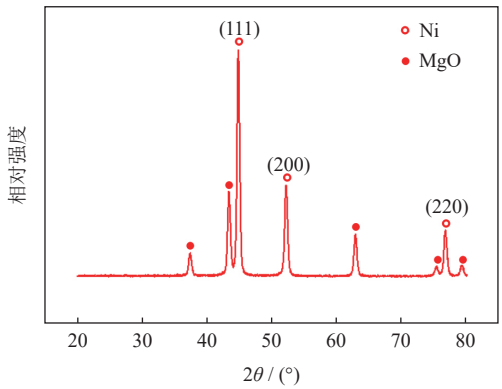

图 2　MgO 包覆纳米 Ni 粉 X 射线衍射图谱

Fig.2　XRD patterns of the nickel powders coated by MgO

2.2　反应物浓度对纳米镍盐前驱体颗粒形貌的影响

不同浓度（摩尔浓度）反应物溶液制备的镍盐前驱体颗粒扫描电镜形貌如图 3 所示。由图 3 所示，随着反应物浓度的增大，镍盐前驱体颗粒的粒径逐渐变小，当反应物浓度增加到 0.5 mol·L^{-1} 时，包覆镍盐的前驱体颗粒粒径趋近纳米级别。

制取纳米包覆镍盐前驱体颗粒是获得包覆纳米镍粉的前提。在镍盐前驱体颗粒的制备过程中，沉淀颗粒的大小跟溶液的过饱和度有关，溶液过饱和度小，晶体的生长依照自身的晶体结构自由发育、生长，最终沿着晶体学最优长大方向优先生长为长柱状的的晶粒；当过饱和度超过某一值，将会导致爆发式的均相成核，瞬间产生大量细小的纳米尺寸的晶体，同时大量溶质的存在抑制了二次成核以及晶粒的扩散式生长，而且溶液中过高的离子强度，大大压缩了粒子表面的双电层厚度，屏蔽了细小晶粒间的静电斥力，使得这些细小晶粒间的凝聚方式按快速聚集长大机制来完成。这时，高过饱和度这一外在因素抑制了晶体颗粒固有的生长习性，细小晶粒之间的随机碰撞导致各个空间方向的生长速度几乎一致，最终形成了趋近于等轴的球形或者近球形颗粒[15]。

2.3　分散剂含量对纳米镍盐前驱体颗粒形貌的影响

不同 PEG6000 分散剂含量（质量分数）条件下的包覆纳米镍盐前驱体颗粒电镜形貌如图 4 所示。由图 4（a）所示，当反应过程中加入的分散剂含量较低时，得到的纳米镍盐包覆前驱体团聚比较严重；随着分散剂含量的增加，纳米镍盐包覆前驱体的分散性逐渐变好，如图 4（b）和图 4（c）所示，纳米包覆镍盐前驱体的颗粒形貌规整，颗粒分散良好；但是，当分散剂的含量继续增加，纳米包覆镍

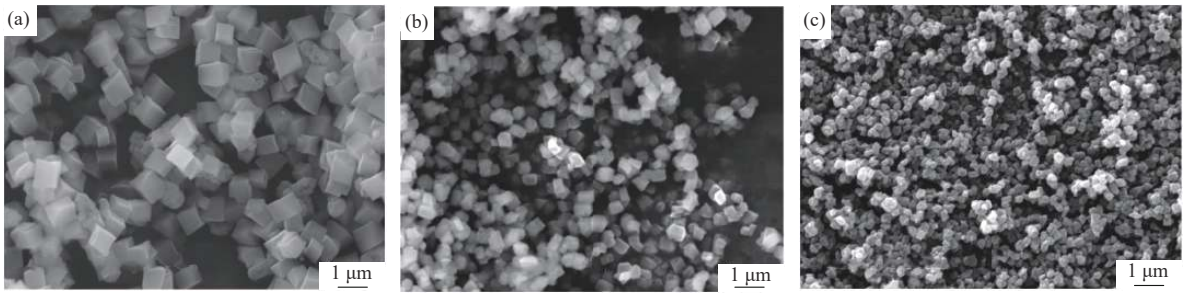

图 3　不同反应物浓度条件下镍盐前驱体的扫描电子显微形貌：（a）0.3 mol·L^{-1}；（b）0.4 mol·L^{-1}；（c）0.5 mol·L^{-1}

Fig.3　SEM images of the nickel salt precursors in the different concentrations: (a) 0.3 mol·L^{-1}; (b) 0.4 mol·L^{-1}; (c) 0.5 mol·L^{-1}

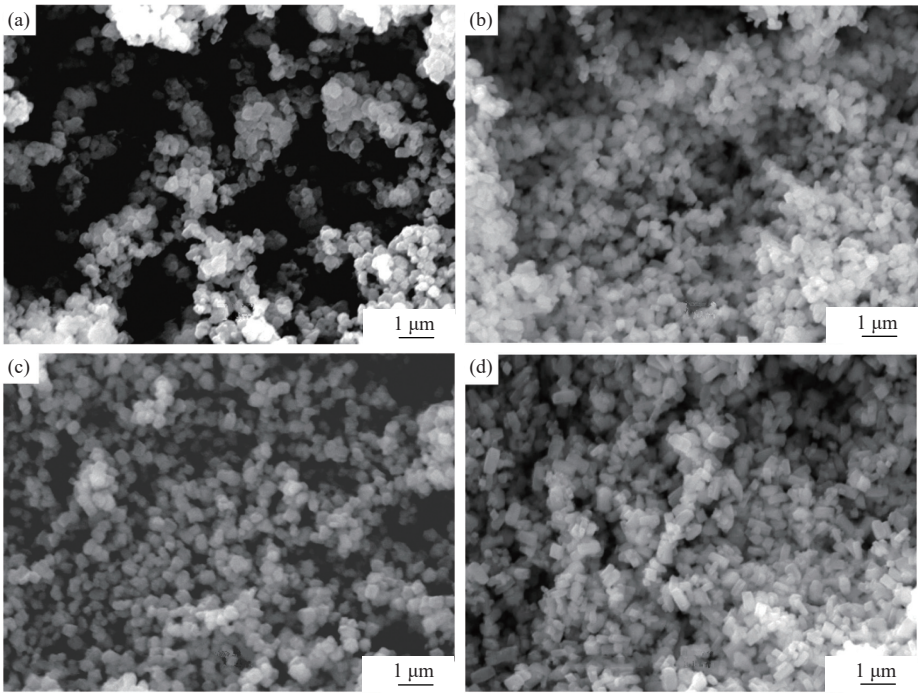

图 4　不同分散剂含量（质量分数）镍盐前驱体扫描电子显微形貌：（a）0.5%；（b）0.7%；（c）1.0%；（d）1.5%

Fig.4　SEM images of the Ni salt precursor in different dispersant content (mass fraction): (a) 0.5%; (b) 0.7%; (c) 1.0%; (d) 1.5%

盐前驱体颗粒的分散性能变差，又会出现一定团聚现象，如图 4（d）所示。

纳米粉体颗粒由于粒径细小，比表面积大，表面能高，处于能量极其不稳定的状态，从热力学角度来说，颗粒有自发凝聚的倾向。通过在反应过程中添加一定量分散剂的方法，改善其分散性，实现纳米颗粒的单分散。当加入的分散剂含量不足时，吸附在纳米颗粒表面的分散剂不足以覆盖全部的颗粒，形不成有效的有机保护膜，达不到分散效果；当加入的分散剂含量过量时，由于分散剂在颗粒表面达到饱和吸附后，多余未吸附的分散剂会通过桥梁作用，使原本分散的颗粒再次团聚。

2.4　烧结温度对包覆纳米镍粉形貌的影响

不同还原烧结温度下的包覆纳米粉体扫描电子显微形貌如图 5 所示。从结晶学角度来说，纳米包覆 Ni 盐前驱体热分解后的产物对前驱体的形貌具有“继承性”的特点，分解产物的颗粒形貌和粒度主要取决于 Ni 盐前驱体颗粒的形貌和粒度。由于纳米 Ni 粉表面包覆有一定厚度的 MgO，而 MgO 和 Ni 之间既不共熔也不发生互扩散，所以在高温烧结条件下获得的纳米 Ni 粉保持有良好的分散性能。当还原烧结温度较低时，Ni 粉在烧结过程中收缩不足，球化效果差，得到的纳米 Ni 粉的球形度较差，如图 5（a）所示；随着还原烧结温度的增加，Ni 粉的球形度逐渐变好，由于收缩能力的增强，粒径均匀，表现为单颗粒分散，如图 5（b）所示；当继续升高还原烧结温度时，Ni 粉与包覆层 MgO 之间会发生粘连，导致颗粒之间产生团聚现象，如图 5（c）所示；当还原烧结温度过高时，Ni 粉扩散性能的增强，会导致 Ni 粉之间发生烧结

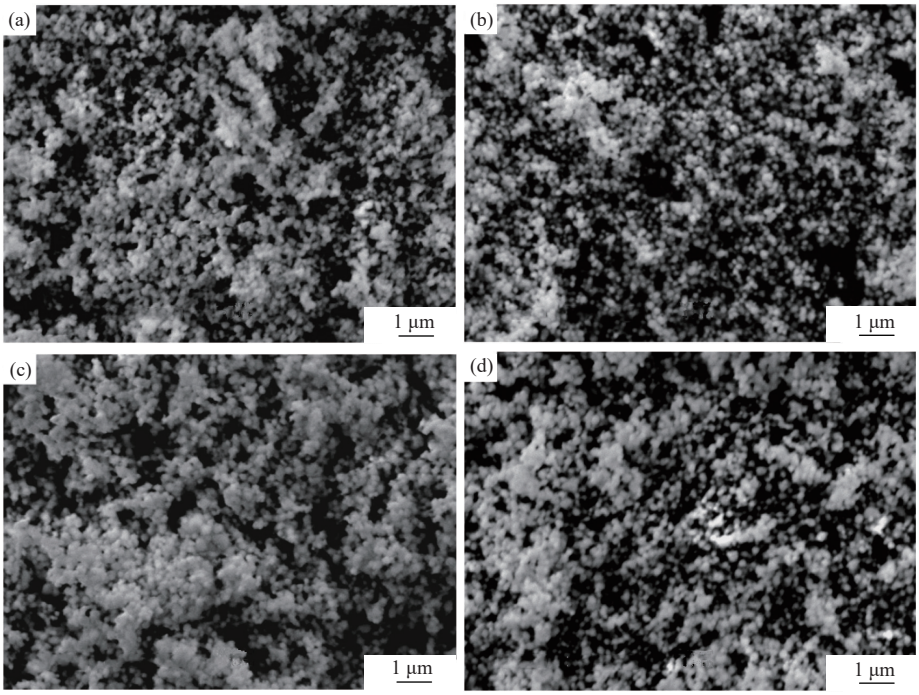

图 5　不同烧结温度下 MgO 包覆纳米 Ni 粉扫描电子显微形貌：（a）650 ℃；（b）700 ℃；（c）750 ℃；（d）800 ℃

Fig.5　SEM images of the nickel powders coated by MgO at different sintering temperatures: (a) 650 ℃; (b) 700 ℃; (c) 750 ℃; (d) 800 ℃

行为，产生 Ni 粉颗粒长大现象，导致 Ni 粉颗粒的大小不均，分散较差，如图 5（d）所示。

2.5　包覆纳米镍粉的抗收缩性能

为了比较说明氧化镁包覆纳米镍粉优秀的抗收缩性能，我们选用样品 1 和样品 2 与其进行对比分析，结果如图 6 所示，其中样品 1 为液相合成法制备的纯纳米镍粉，样品 2 为化学气相沉积法制备的纯纳米镍粉。由图可知，随着温度逐渐升高，样品 2 和样品 1 的颗粒直径在 300 ℃ 时开始发生变化，当温度达到 550 ℃ 和 820 ℃ 时，其颗粒直径变化率分别达到−20%；而氧化镁包覆纳米镍粉样品的颗粒直径在温度达到 600 ℃ 时才开始发生变化，温度达到 950 ℃ 时，其颗粒直径变化率仅有−5%。由此表明，MgO 包覆纳米 Ni 粉的收缩延迟效果非常好，主要原因是均匀包覆在纳米 Ni 粉表面的 MgO 阻止了 Ni 粉氧化的同时阻碍了 Ni 粉颗粒之间的接触和在低温下发生烧结的几率，从而引起 MgO 包覆纳米 Ni 粉发生收缩延迟。在制作多层陶瓷电容器过程中，良好的收缩延迟性能可避免金属 Ni 电极和陶瓷电极在高温烧结时由于收缩率不一致导致的元器件分层、开裂、失效等问题[16]。

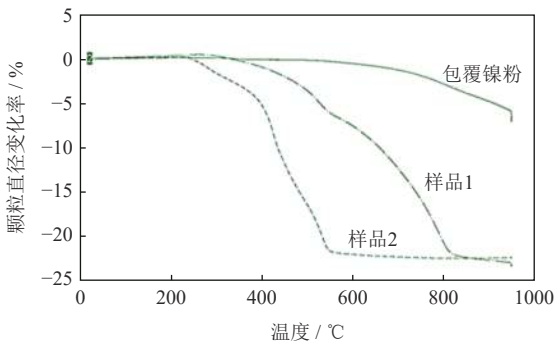

图 6　MgO 包覆纳米镍粉热机械分析曲线

Fig.6　TMA curves of the nickel powders coated by MgO

3　结论

（1）在纳米 Ni 盐包覆前驱体的制备过程中，随着反应物浓度（摩尔浓度）的增大，前驱体颗粒的粒径逐渐变小，当反应物浓度达到 0.5 $mol·L^{-1}$ 时，可导致爆发成核，获得纳米镍盐前驱体颗粒。

（2）在纳米 Ni 盐包覆前驱体的制备过程中，分散剂含量（质量分数）过低，达不到分散效果，分散剂含量过高，会引起分散颗粒再次凝聚，只有分散剂含量合适时，才能获得分散良好的纳米镍盐前驱体颗粒。

（3）在 Ni 盐前驱体高温还原烧结获得包覆纳米 Ni 粉的过程中，还原烧结温度较低时，纳米 Ni 粉的球化效果差，还原烧结温度过高时，会导致纳

米 Ni 粉活性增强，扩散速度加快，发生纳米颗粒之间的烧结行为，使得包覆纳米 Ni 粉的粒径均匀性和分散变差。

（4）MgO 包覆在 Ni 粉表面形成的核–壳结构的纳米镍粉，具有优秀的收缩延迟效果，非常有利于多层陶瓷电容器内部电极的制作。

参 考 文 献

[1] Ye K, Liang F, Yao Y C, et al. Development trend of preparation and application of nickel nano-powder. *Chem Ind Eng Prog*, 2019, 38(5): 2252
(叶凯, 梁风, 姚耀春, 等. 纳米镍粉的制备与应用的发展趋势. 化工进展, 2019, 38(5): 2252)

[2] Huang C R, Tang H, Song Z F, et al. Development tendency and applications of MLCCs in 5G field. *Electron Compon Mater*, 2018, 37(9): 1
(黄昌蓉, 唐浩, 宋子峰, 等. MLCC 在 5G 领域的应用及发展趋势. 电子元器件与材料, 2018, 37(9): 1)

[3] Zhang Y C, Wang X H, Kim J Y, et al. High performance $BaTiO_3$-based BME-MLCC nanopowder prepared by aqueous chemical coating method. *J Am Ceram Soc*, 2012, 95(5): 1628

[4] Kishi H, Mizuno Y, Chazono H. Base-metal electrode-multilayer ceramic capacitors: past, present and future perspectives. *Jpn J Appl Phys*, 2003, 42(1R): 1

[5] Li X C, Cheng H C, Fan J L. Research progress in preparation of nickel nanopowder. *Powder Metall Technol*, 2009, 27(2): 142
(李新春, 成会朝, 范景莲. 纳米镍粉制备技术研究进展. 粉末冶金技术, 2009, 27(2): 142)

[6] Hao X G. Current situation and development prospect of nickel inner electrode paste used in MLCC. *Electron Compon Mater*, 2017, 36(2): 1
(郝晓光. 多层陶瓷电容器用镍内电极浆料的现状与展望. 电子元件与材料, 2017, 36(2): 1)

[7] Zhuo J L, An K R, Lu H. Study on key processes of 01005-format MLCCs. *Electron Process Technol*, 2018, 39(1): 46
(卓金丽, 安可荣, 陆亨. 01005 型 M LCC 关键制备工艺研究. 电子工艺技术, 2018, 39(1): 46)

[8] Cheng Q J, Huang L D, Xu H, et al. The influence of particle size of slurry on life on BME-MLCC. *Int J Appl Ceram Technol*, 2019, 16(4): 1632

[9] Si J J, Su X L. Preparation of ultrafine spherical nickel powders. *Powder Metall Technol*, 2021, 39(2): 177
(司佳佳, 苏晓磊. 超细球形镍粉的制备. 粉末冶金技术, 2021, 39(2): 177)

[10] Kim H T, Adair J H, Lanagan M T. Thermo-mechanical behavior of BME capacitors during binder burnout. *Am Ceram Soc Bull*, 2001, 80(10): 34

[11] Cheng Q J, Yi F J, Xu H, et al. Study on sintering process of BME-MLCC. *Electron Compon Mater*, 2019, 38(3): 71
(程淇俊, 易凤举, 徐豪, 等. 镍电极多层瓷介电容器烧结工艺的研究. 电子元件与材料, 2019, 38(3): 71)

[12] Liu B, Hao J J. Preparation and measure properties of $BaTi0_3$-coated Ni particles. *Powder Metall Ind*, 2009, 19(4): 1
(刘波, 郝俊杰. 钛酸钡包覆镍粉的制备与性能表征. 粉末冶金工业, 2009, 19(4): 1)

[13] Li X B, Zhou K G, Cheng Y H. Preparation and oxidation resistance behavior of $CaZrO_3$-coated superfine nickel powder. *J Mater Sci Eng*, 2006, 24(6): 900
(李晓波, 周康根, 陈一恒. $CaZrO_3$ 包覆 Ni 超细复合粉体的制备及其抗氧化性研究. 材料科学与工程学报, 2006, 24(6): 900)

[14] Zhong X, Ha M, Dong N L, et al. Study on spherical silver powders prepared by silver carbonate precursor modified by cladding-thermal decomposition. *Powder Metall Technol*, 2018, 36(6): 438
(钟翔, 哈敏, 董宁利, 等. 包覆-热分解碳酸银前驱体制备球形银粉的研究. 粉末冶金技术, 2018, 36(6): 438)

[15] Tong C D, Li Q H, Lai F X, et al. Preparation of ultrafine nickle oxalate and control of the particle shape and size. *Hydrometall China*, 2003(1): 22
(童长钿, 李启厚, 赖复兴, 等. 超细草酸镍粒子的制备及其形状和粒度控制. 湿法冶金, 2003(1): 22)

[16] Deng L Y, Xue Z R. Improvement of life performance of small size and high capacitance MLCC. *Electron Process Technol*, 2019, 40(3): 175
(邓丽云, 薛赵茹. 小尺寸高容量 MLCC 寿命性能改善. 电子工艺技术, 2019, 40(3): 175)

（上接第 158 页）

[10] Tang Q. *Study on the Influence of Density to the Performance of Modified PTFE Kill Elements* [Dissertation]. Taiyuan: North of China University, 2017
(唐琦. 材料密度对改性 PTFE 毁伤元性能影响研究 [学位论文]. 太原: 中北大学, 2017)

[11] Borkowski J, Wilk Z, Koslik P, et al. Application of sintered liners for explosively formed projectile charges. *Int J Impact Eng*, 2018, 118: 91

[12] Liu Y L, Zeng Y. Mechanical behavior analysis on the compression molding process of NdFeB by different molding technology. *Powder Metall Technol*, 2020, 38(4): 262
(刘义伦, 曾洋. 不同成型工艺下钕铁硼模压成型过程的力学行为分析. 粉末冶金技术, 2020, 38(4): 262)

[13] Tang X Z, Wang Z J, Yin J P, et al. Effect of the fabrication technique on compressive properties of Cu-PTFE composites. *Adv Mater Sci Eng*, 2021, 2021: 5518172

[14] Brown Eric N, Dattelbaum Dana M. The role of crystalline phase on fracture and microstructure evolution of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Polymer*, 2005, 46(9): 3056

[15] Feng B, Fang X, Wang H X, et al. The effect of crystallinity on compressive properties of Al-PTFE. *Polymers*, 2016, 8(10): 356

[16] Jordan Jennifer L, Siviour Clive R, Foley Jason R. Compressive properties of extruded polytetrafluoroethylene. *Polymer*, 2007, 48(14): 4184

[17] Zhang C G, Fan J L, Cheng H C. Effects of W content by mass on the microstructure and mechanical properties of Mo–W alloy. *Powder Metall Technol*, 2020, 38(1): 18
(张成功, 范景莲, 成会朝. W 质量分数对 Mo−W 合金组织结构与力学性能的影响. 粉末冶金技术, 2020, 38(1): 18)

[18] Li C, Li N, Liu X Q, et al. Effect of WC mass fraction on the microstructure and properties of $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$-based cermets. *Powder Metall Technol*, 2018, 36(2): 100
(李朝, 李楠, 柳学全, 等. WC 质量分数对 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ 基金属陶瓷组织和性能的影响. 粉末冶金技术, 2018, 36(2): 100)

[19] Luo X L, Liu J, Hu X P. Analysis on dynamic mechanics performance of metal powders by impact loading. *Powder Metall Technol*, 2018, 36(2): 111
(罗晓龙, 刘军, 胡仙平. 冲击加载条件下金属粉末的动态力学性能分析. 粉末冶金技术, 2018, 36(2): 111)

[20] Xiao Y W, Xu F Y, Zheng Y F, et al. Quasi-static compression properties of cold isostatically pressed reactive materials. *Trans Beijing Inst Technol*, 2017, 37(4): 337
(肖艳文, 徐峰悦, 郑元枫, 等. 冷压成型活性材料准静态压缩特性. 北京理工大学学报, 2017, 37(4): 337)