

文章编号: 1004-0609(2003)06-1540-06

铝电解用 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷惰性阳极的制备^①

田忠良, 赖延清, 张 刚, 秦庆伟, 王剑锋, 李 强, 刘业翔

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 以高温固相合成法合成的 NiFe_2O_4 陶瓷粉体和金属 Cu 粉为原料, 采用冷压-烧结法制备了 Cu 含量在 5% ~ 20% 之间的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷惰性阳极, 研究了烧结气氛和烧结温度对其物相组成、微观形貌和基本物理性能的影响。结果表明: 通过控制烧结气氛中氧分压在 NiO 和 Cu_2O 的离解反应平衡氧分压之间, 可以制备出具有目标物相组成的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷; 烧结温度和保温时间对所得 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷的相对密度有较大影响; NiFe_2O_4 和 Cu 之间的不润湿性限制了 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷烧结温度的提高和保温时间的延长, 在保证金属相分布均匀且不溢出的前提下, 所制备的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷的相对密度较小; 金属相 Cu 含量越高, $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷最高烧结温度越低、最长保温时间越短, 从而相对密度越低、孔隙率越高; 除了尽量降低金属相含量外, 还可向 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷中添加其他金属如 Ni 和 Co 等, 以改善陶瓷相与金属相之间的润湿性, 以提高烧结温度, 进而提高其相对密度和耐腐蚀性能。

关键词: $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷; 惰性阳极; 制备工艺; 铝电解

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

现行 Hall-Heroult 铝电解槽采用消耗式碳素阳极, 不仅消耗大量优质碳素材料, 排放大量温室效应气体 CO_2 和致癌性碳氟化合物, 而且在铝电解过程中, 需要不断地补充阳极糊或更换阳极碳块, 导致电解生产不稳定, 并增加了劳动强度, 此外, 采用碳素阳极也是现行铝电解工艺的高能耗、高成本等问题的主要原因。惰性阳极因能解决上述问题而成为铝业界和材料界的研究热点^[1-3]。铝电解过程发生于 940~960 °C 的腐蚀性极强的 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体中, 作为惰性阳极材料应具备以下基本性能: 能耐受电解质的腐蚀, 溶解度小; 能耐受新生态氧的渗蚀作用; 有良好的导电性, 电阻率与现行碳素阳极具有可比性; 力学强度高, 抗热震性强, 不易脆裂; 容易加工成型, 易于与金属导体连接; 原料易得, 造价低廉^[2, 4]。

最近数十年来, 人们研究的惰性阳极主要有 SnO_2 等金属氧化物陶瓷阳极、尖晶石型复合氧化物基金属陶瓷阳极和以 Cu-Al 合金为代表的合金阳极。其中, 金属陶瓷材料兼顾陶瓷良好的耐腐蚀性、抗氧化性和合金的良好导电性, 改善了阳极的抗热震性及其与阳极导杆的连接性能, 而成为目前

铝电解惰性阳极的研究重点。

由对氧化物陶瓷在 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体中的饱和溶解度研究发现: NiFe_2O_4 的抗腐蚀性较强, 具有良好的热稳定性和化学稳定性, 是一种具有较大应用前景的惰性阳极陶瓷基体材料^[5, 6]。但 NiFe_2O_4 的导电性差, 无法满足惰性阳极材料必须有良好的导电性能的要求。因此, 需要添加具有良好导电性的金属组元, 制备出金属陶瓷材料, 以改变它的这一缺陷^[1, 7]。

本文作者采用高温固相合成法由 NiO 和 Fe_2O_3 合成 NiFe_2O_4 粉末, 并在此基础上研究了金属 Cu 含量在 5% ~ 20% 之间的几种金属陶瓷的制备工艺, 解决了烧结过程中的金属相被氧化和陶瓷相离解的问题, 建立了不同 Cu 含量金属陶瓷的最佳烧结温度制度, 从而制备出铜分布均匀、具有目标物相组成的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷电极, 为惰性阳极电解实验的进行提供了合格的试样。

1 实验

1.1 实验原料

① 基金项目: 国家自然科学基金项目(50204014); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064903); 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA335013)

收稿日期: 2002-12-15; 修订日期: 2003-02-21 作者简介: 田忠良(1973-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 田忠良, 博士研究生; 电话: 0731-8830474; E-mail: tianzhongliang@qgx06.com

实验所用原料 NiO 为甘肃金昌镍钴研究设计院生产, 纯度大于 99.0%, 平均粒度 $1.5\ \mu\text{m}$; Fe_2O_3 为分析纯, 纯度大于 99.0%; Cu 为纯度达 99.99% 的电解铜粉。

1.2 实验设备

SGQ 管式高温气氛炉; CPM-BP 行星磨; WE-300C 液压式万能试验机; 日本理学 Rigaku 3014 型 X 射线衍射仪; XJP-6A 实验金相显微镜和 ZA-4 金相摄影仪。

1.3 NiFe_2O_4 基金属陶瓷电极材料的制备

1.3.1 NiFe_2O_4 陶瓷粉体的制备

陶瓷粉末的制备是制取性能优良的金属陶瓷材料的先决条件, 在制备金属陶瓷前, 首先采用高温固相合成法^[8]制备了 NiFe_2O_4 陶瓷基体粉末。

将 NiO 和 Fe_2O_3 按一定配比在球磨机上进行球磨, 烘干后置于高温电阻炉中在一定温度下煅烧数小时, 得到黑色的 NiFe_2O_4 粉末, 对所得粉末进行物相成分分析。煅烧过程中主要发生如下反应^[9]:



NiFe_2O_4 粉末的 X 射线衍射谱表明 (见图 1): 合成产物中无其它杂质相的存在, 可用作金属陶瓷的陶瓷基料。

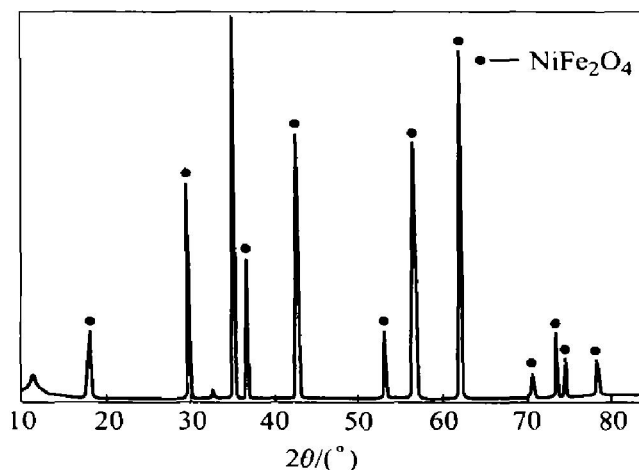


图 1 NiFe_2O_4 粉末 X 射线衍射谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of NiFe_2O_4 powder

1.3.2 NiFe_2O_4 基金属陶瓷材料的制备

向 NiFe_2O_4 陶瓷中添加具有良好导电性的金属铜粉形成金属陶瓷, 不仅可以提高陶瓷的导电性能, 还可以改善其力学和抗热震性能, 以满足作为惰性阳极材料的要求。其制备工艺流程如图 2 所

示。在对 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷进行烧结时, 必需严格控制相关工艺参数, 包括烧结温度、烧结气氛、高温下的保温时间以及升温速度等。

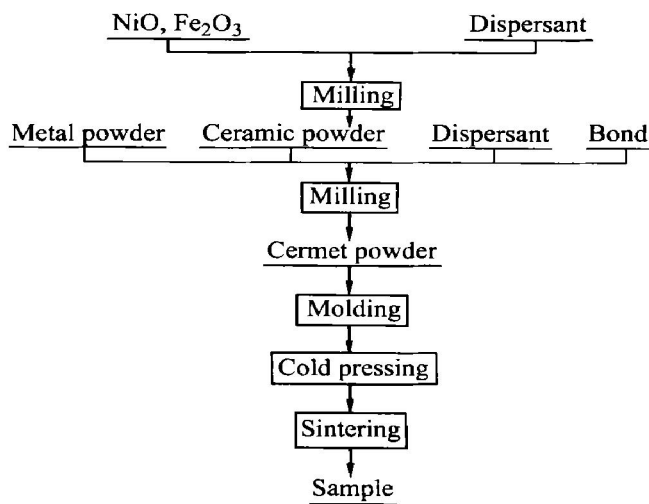


图 2 NiFe_2O_4 基金属陶瓷的制备工艺流程

Fig. 2 Preparation flow-sheet of NiFe_2O_4 based cermet

2 结果与讨论

2.1 烧结气氛对金属陶瓷性能的影响与控制

在金属陶瓷惰性阳极的烧结过程中, 要防止样品表面氧化物的离解或被还原^[7]。烧结气氛的作用是控制压坯与环境之间的化学反应和清除润滑剂、粘结剂和分散剂的分解产物, 以防止其对产品烧结过程的有害反应, 维持烧结材料的有用组分^[10]。

烧结气氛对金属陶瓷材料性能的影响主要表现在两个方面: 当烧结气氛中的氧分压过高时, 金属相 Cu 会被氧化, 影响阳极试样的导电性; 氧分压过低或者在惰性气氛下进行, 氧化物陶瓷相会发生离解并与金属相反应生成合金, 金属陶瓷成分发生改变, 影响其耐腐蚀性能。通过对发生离解后的金属陶瓷试样进行相成分分析 (见图 3) 发现, 其主要成分为 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 和 $\text{Ni}(\text{Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ 。

金属陶瓷的烧结过程中, 如果烧结气氛控制不好, 可能发生下列反应^[9]:



反应 (2) 和 (4) 分别是控制金属相氧化和陶瓷相离解的主要反应, 热力学计算所得反应 (2) 和 (4) 的平衡氧分压 $p(\text{O}_2)$ 如表 1 所示。

当烧结气氛中的氧分压高于反应 (2) 的平衡氧

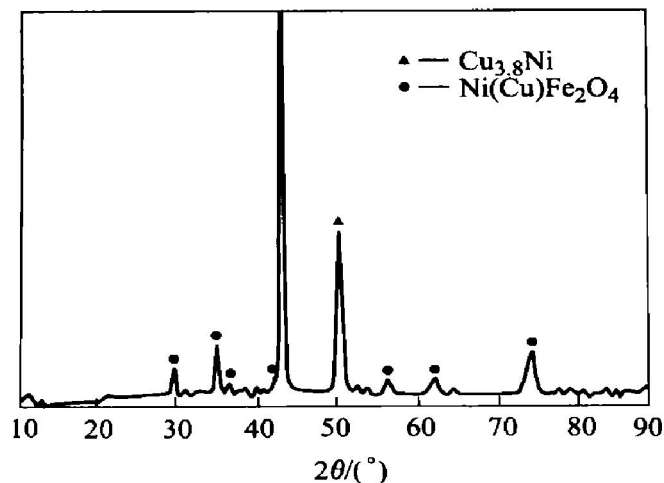


图 3 金属陶瓷离解部分的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of decomposed part of cermet

表 1 不同温度下反应式(2)和(4)的氧分压

Table 1 Partial pressures of oxygen at different temperatures

Temperature/ °C	$p_{(2)}/10^{-1}$ Pa	$p_{(4)}/10^{-5}$ Pa
1 050	2.06	2.43
1 075	3.65	5.31
1 100	6.71	11.3
1 125	12.4	23.4
1 150	22.3	47.3

$p_{(2)}$ is oxygen pressure of reaction(2);

$p_{(4)}$ is oxygen pressure of reaction(4).

分压时,金属铜就会发生氧化,其他各反应不会发生;当烧结气氛中氧分压很低(低于反应(4)的平衡氧分压)时,反应(4)就会发生,并有金属 Ni 生成。由于 Cu 和 Ni 可以任意混溶而生成 Cu_xNi_y 合金(见反应(5)),生成的 Ni 不断被消耗,破坏了反应(4)的平衡,反应(4)的平衡移动导致反应(3)不断向右进行,直到建立一种新的平衡为止。这样,就出现了金属陶瓷在烧结过程中的离解现象的发生。因此,在 $NiFe_2O_4-Cu$ 金属陶瓷的烧结过程中,为避免金属相 Cu 被氧化和陶瓷相 $NiFe_2O_4$ 发生离解,就必须根据烧结温度的变化,调整烧结气氛的氧分压,将炉膛内氧分压保持在反应(2)和(4)的平衡氧分压之间。图 4 所示的 X 射线衍射图谱表明:通过控制烧结气氛氧分压,可以制备出具有目标物相组成的金属陶瓷电极材料。

2.2 烧结温度制度对金属陶瓷性能的影响

烧结是决定金属陶瓷制品显微组织和综合性能的关键工序,在这个过程中发生一系列物理化学变化,使得烧结坯的粉末颗粒之间发生粘接,强度增

加,密度提高,孔隙率降低。提高烧结温度或延长烧结时间,有利于提高烧结制品的相对密度;但是烧结温度过高或烧结时间过长,将使得陶瓷相过分烧结收缩或金属相持久以液态形式存在,最终导致金属相的溢出^[10]。作为惰性阳极材料,不仅需要高的致密度来增强它的抗熔盐腐蚀能力,同时也要使其材料具有目标物相组成,以免影响材料的导电性和力学性能。本文作者在保证无金属相溢出的基础上,研究了烧结温度和保温时间对不同成分 $NiFe_2O_4-Cu$ 金属陶瓷相对密度的影响,结果如表 2 和表 3 所示。

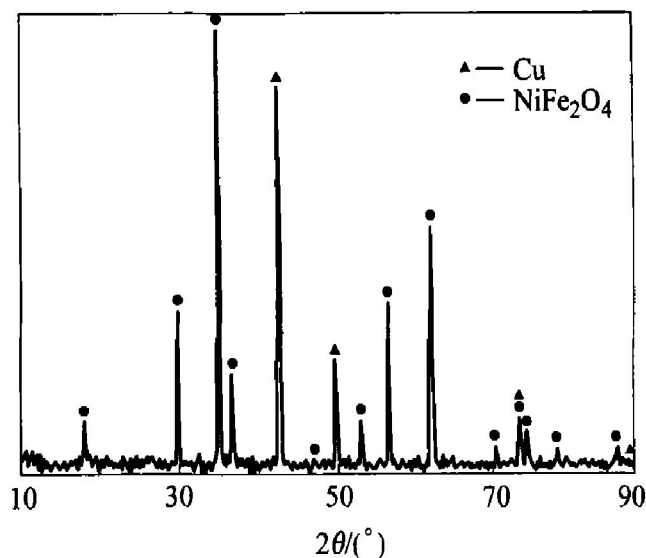


图 4 $NiFe_2O_4-Cu$ 金属陶瓷的 X 射线衍射图谱

Fig. 4 X-ray diffraction pattern of $NiFe_2O_4-Cu$ cermet

表 2 表明:对于 Cu 含量为 10% 的金属陶瓷来说,当烧结温度从 1 050 °C 升至 1 125 °C 时,试样相对密度由 76.13% 提高到 90.37%。表 3 表明:对于 Cu 含量为 5% 的 $NiFe_2O_4-Cu$ 金属陶瓷,烧结时间从 240 min 延长到 720 min,其相对密度从 78.76% 提高到 94.28%。因此,对于 $NiFe_2O_4-Cu$ 金属陶瓷,可以用提高烧结温度或延长保温时间来提高

表 2 烧结温度对 $NiFe_2O_4-Cu$ 金属陶瓷相对密度的影响

Table 2 Effect of sintering temperature on relative density of $NiFe_2O_4-Cu$ cermet

Sintering temperature/ °C	Bulk density / ($g \cdot cm^{-3}$)	Relative density/ %	Vertical shrinking ratio/ %
1 050	4.26	76.13	9.52
1 100	4.78	85.46	12.37
1 125	5.05	90.37	17.55

Content of Cu: 10%; Heat preservation time: 240 min

表 3 保温时间对 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷相对密度的影响

Table 3 Effect of heat preservation time on relative density of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet

Heat preservation time/ min	Bulk density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Relative density/ %	Vertical shrinking ratio/ %
240	4. 32	78. 76	9. 89
360	4. 58	83. 56	11. 73
480	4. 70	85. 83	12. 66
720	5. 17	94. 28	18. 65

Content of Cu: 5%; sintering temperature: 1 100 $^{\circ}\text{C}$

其相对密度,降低孔隙率,从而提高其耐腐蚀性能和导电性能。但是,应当注意到,提高温度比延长时间可更快地达到要求:温度从 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 1 125 $^{\circ}\text{C}$ 时,可以将相对密度提高约 5%,而在温度不变时要获得同样的提高,则要将烧结时间延长 120 min。

金属 Cu 与 NiFe_2O_4 的润湿性较差^[7]。在烧结过程中,液态 Cu 不能浸入固体颗粒之间,烧结主要发生于固体颗粒间的接触点处,通过固相中的物质传递而发生,与固相烧结没有什么区别^[11, 12]。因此,对于 $\text{Cu-NiFe}_2\text{O}_4$ 金属陶瓷的烧结,不管是否有液相的存在,均可以看成是固相烧结过程。等温烧结过程可根据时间大致分为粘结阶段、烧结颈长大阶段和闭孔隙球化与缩小阶段。较低温度下进行烧结时,可能只有第一阶段出现,即颗粒内的晶粒不发生变化,外形也基本不变,整个烧结体不发生收缩,密度增加极微;当升高温度时,就会出现第二和第三阶段,颗粒间距离缩小,晶粒长大,孔隙大量消失,烧结体收缩,从而其密度和强度得到大大的增加;温度愈高,后两个阶段就出现愈早。保温时间的延长,可以延长第二和第三阶段发生的时间。因此提高烧结温度和延长保温时间都有利于提高制品的致密度。按扩散烧结机理进行烧结的坯体,尽管在加热初期,收缩率急剧增大,但随着时间的延长,收缩率会逐渐降低,如继续延长时间,其效应将会减少。

由于在烧结过程中液相的金属 Cu 与固相的 NiFe_2O_4 颗粒润湿性不好,大量颗粒不被液相所包裹(见图 5),在烧结时,陶瓷颗粒互相接触、粘结并形成连续骨架。当烧结温度过高或时间过长时,固体颗粒之间会粘结得越来越紧密而使其相互间原来形成的毛细管越来越细,排挤分布于其中的液相 Cu,从而导致 Cu 的溢出。

因此,在选择烧结工艺时,为防止 Cu 的溢出或分布不均,不能一味地提高烧结温度和延长时间。在此原则下,为尽可能提高金属陶瓷试样的致密度,本文作者通过大量的实验,已摸索出对于各种不同金属 Cu 含量的金属陶瓷的最佳烧结温度制度(见表 4)。

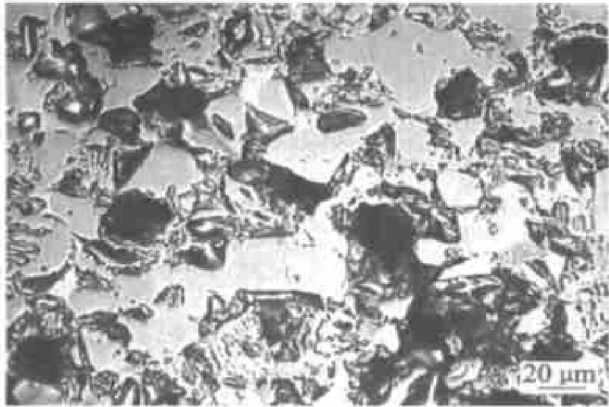


图 5 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷显微组织
Fig. 5 Microstructure of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet

表 4 各种 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷的最佳烧结工艺

Table 4 Optimal sintering technics for $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet containing various content of Cu

$w(\text{Cu})/\%$	Sintering temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Heat preservation time/ min	Relative density/ %
5	1 125	360	94. 28
10	1 125	240	92. 33
15	1100	360	85. 15
20	1 100	240	82. 69
25	1 100	180	79. 85

从表 4 可知,对于各种不同金属 Cu 含量的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷,在经过烧结后所能达到的致密度不同,而且,随着金属含量的增加,所获得试样的相对密度下降。这是由于金属 Cu 和陶瓷之间的不润湿性,过高的金属含量使得烧结过程中金属相更容易析出,致使不能在较高的温度和较长的时间下进行烧结,因此不能达到较高的相对密度,从而影响烧结制品的相关性能。

图 6 所示是在所确定的最佳烧结温度制度下并控制烧结气氛中氧分压的条件下,制备的金属含量为 10% 的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷试样的金相照片。由图 6 可见:金属相 Cu 在陶瓷相 NiFe_2O_4 的内部分布均匀,没有出现金属溢出或偏析的现象,只是

由于金属和陶瓷相互间的不润湿性,样品的致密度不高,其相对密度大约在 92% 左右。因此,为了提高电极的相对密度,除了尽可能降低金属相 Cu 的含量外,还需要加入其他的金属组元(如 Ni 和 Co 等),以提高金属相液相线温度,并改善陶瓷相与金属相之间的润湿性,提高烧结温度,最终提高烧结制品的致密度,从而提高所得金属陶瓷惰性阳极的耐腐蚀性和导电性。

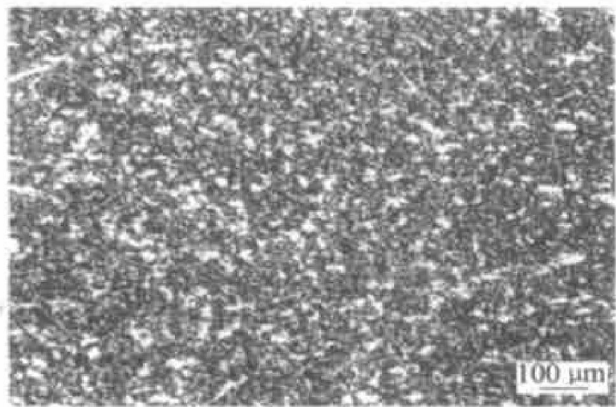


图 6 含 10% Cu 的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$
金属陶瓷显微组织

Fig. 6 Microstructure of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$
cermet containing 10% Cu

3 结论

1) 在 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷的烧结过程中,为避免金属相 Cu 被氧化及陶瓷相 NiFe_2O_4 发生离解,制备出具有目标物相组成的金属陶瓷电极材料,必须根据烧结温度的变化,调整烧结气氛的氧分压,将炉膛内氧分压保持在 NiO 和 Cu_2O 离解反应的平衡氧分压之间。

2) 在烧结过程中,液相金属 Cu 与固相 NiFe_2O_4 陶瓷颗粒润湿性不好,当烧结温度过高或保温时间过长时,陶瓷固体颗粒之间过分烧结将导致液相 Cu 的溢出或分布不均。

3) 受烧结温度和保温时间的限制,所制备的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷惰性阳极的相对密度不高,孔隙率较大;在保证金属相分布均匀且不溢出的前提下,金属相含量越高,其最高烧结温度越低、最长保温时间越短,从而相对密度越低、空隙率越高;除了尽量降低金属相含量外,还可向 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ 金属陶瓷中添加其他金属如 Ni 和 Co 等,以提高金属相液相线温度,并改善陶瓷相与金属相之间的润湿性,以提高烧结温度,进而提高其相对密度和耐腐蚀性能。

REFERENCES

- [1] Pawlek R P. Inert anodes: an update[A]. Light Metals 2002[C]. Warreudale PA, USA: TMS, 2002. 449 - 456.
- [2] Sadoway D R. Inert anodes for the Hall-Héroult cell: the ultimate materials challenge[J]. JOM, 2001, 53(5): 34 - 35.
- [3] 刘业翔. 铝电解惰性阳极与可湿润性阴极的研究与开发进展[J]. 轻金属, 2001(5): 26 - 29.
LIU Ye-xiang. Progress of investigation and development on inert anodes and wettable cathodes in aluminum electrolysis[J]. Light Metals, 2001(5): 26 - 29.
- [4] Pawlek R P. Inert anodes for the primary aluminium industry: an update[A]. Light Metals 1996[C]. Warreudale PA, USA: TMS, 1996. 243 - 248.
- [5] Jentoftsen T E, Lorentsen O A, Haarberg G M, et al. Solubility of iron and nickel oxides in cryolite-alumina melts[A]. Light Metals 2001[C]. Warreudale PA, USA: TMS, 2001. 455 - 461.
- [6] Deyoung D H. Solubilities of oxides for inert anodes in cryolite-based melts [A]. Light Metals 1986[C]. Warreudale PA, USA: TMS, 1986. 299 - 307.
- [7] 杨建红, 王化章, 刘业翔, 等. 铝电解用 NiO- NiFe_2O_4 基金属陶瓷的制备与性能研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1993, 24(3): 326 - 331.
YANG Jian-hong, WANG Hua-zhang, LIU Ye-xiang, et al. The behavior and development of NiO- NiFe_2O_4 based cermets in aluminium reduction[J]. J Cent South Inst Min Metall, 1993, 24(3): 326 - 331.
- [8] 刘祖武. 现代无机合成[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999. 218 - 220.
LIU Zu-wu. Modern Inorganic Synthesis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999. 218 - 220.
- [9] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang. Thermodynamics Handbook for Minerals[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993.
- [10] 黄培云. 粉末冶金原理(第 2 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 265 - 331.
HUANG Pei-yun. Powder Metallurgical Principle (2nd ed)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997. 265 - 331.
- [11] 王零森. 特种陶瓷[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000. 5.
WANG Ling-sen. Special Ceramics[M]. Changsha: Central South University Press, 2000. 5.

[12] 段继光. 工程陶瓷技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1994. 33 - 47.

Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1994. 33 - 47.

DUAN Ji-guang. Engineering Ceramics Technique[M].

Preparation of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ based cermet inert anodes in aluminium electrolysis

TIAN Zhong-liang, LAI Yan-qing, ZHANG Gang, QIN Qing-wei,

WANG Jian-feng, LI Jie, LIU Ye-xiang

(School of Metallurgy Science and Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China)

Abstract: $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet inert anodes containing 5% - 20% Cu were prepared by cold pressing-sintering NiFe_2O_4 ceramic powder synthesized by solid state reaction and Cu metal powder. The effects of sintering atmosphere and temperature on the phase compositions, microstructure and morphology, physical properties of the cermet products were studied. The results show that the $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet with the desired phase composition can be obtained by controlling the partial oxygen pressure between the decomposition oxygen pressures of NiO and Cu_2O ; sintering temperature and holding time are vital for the relative density of the $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermets; the improvement of sintering temperature and prolonging of holding time are limited due to the low melting point and poor wetting characteristics of copper towards the NiFe_2O_4 phases, thus the relative density of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermets obtained is less to assure its compositions uniformity and without metallic protrusion on the surface; the more the metal content of $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet, the lower the maximum sintering temperature and the shorter the longest holding time, so its relative density is lower and its apparent porosity is higher. Besides decreasing the metal content, other metals with better wetting characteristics and higher melting point, such as nickel and cobalt, may be added to the $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermets to increase its sintering temperature, relative density and resistance.

Key words: $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ cermet; inert anode; preparation technics; aluminium electrolysis

(编辑 何学锋)