

# CaF<sub>2</sub>掺杂对热压SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub>复合磁体磁性能和电阻率的影响

余节洋<sup>1,2</sup>, 赵树国<sup>3</sup>, 梁超<sup>1,2</sup>, 赵立新<sup>1,4</sup>, 岳林<sup>1,2</sup>, 方以坤<sup>5</sup>, 黄光伟<sup>1,2</sup>, 郑立允<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

<sup>2</sup>河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心, 河北 邯郸

<sup>3</sup>邯郸职业技术学院机电工程系, 河北 邯郸

<sup>4</sup>河北工程大学机械装备与工程学院, 河北 邯郸

<sup>5</sup>钢铁研究总院功能材料研究院, 北京

收稿日期: 2023年6月14日; 录用日期: 2023年7月14日; 发布日期: 2023年7月25日

## 摘要

为减小永磁电机中钕钴磁体的涡流损耗, 本文通过高能球磨制备了CaF<sub>2</sub>掺杂的SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub>复合粉体, 采用热压技术制备了SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub>复合磁体, 研究了掺杂对热压复合磁体的微观组织、磁性能和电阻率的影响。结果表明, 随着CaF<sub>2</sub>掺杂量的增加, CaF<sub>2</sub>逐渐呈现连续带状分布, 实现了对SmCo<sub>5</sub>的绝缘包覆, 使复合磁体的电阻率增大。当CaF<sub>2</sub>掺杂量为5 wt%时, 复合磁体的电阻率为245 μΩ·cm, 当CaF<sub>2</sub>掺杂量为20 wt%时, 复合磁体的电阻率高达680 μΩ·cm, 较未掺杂的SmCo<sub>5</sub>磁体电阻率75 μΩ·cm提升了900%; 但是, 随CaF<sub>2</sub>掺杂量的增加, 复合磁体的密度和磁性能呈现下降趋势, 当CaF<sub>2</sub>掺杂量为5 wt%时, 复合磁体的磁能积(BH)<sub>max</sub>由53.07 kJ/m<sup>3</sup>下降到42.83 kJ/m<sup>3</sup>, 较未掺杂时下降了19%。当CaF<sub>2</sub>掺杂量为5 wt%时, 随着CaF<sub>2</sub>预磨时间的延长, CaF<sub>2</sub>逐渐呈片状形貌, CaF<sub>2</sub>预磨5 h后所制备的SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub>复合磁体电阻率增大到283 μΩ·cm, 其磁能积(BH)<sub>max</sub>为42.82 kJ/m<sup>3</sup>。可见, 当CaF<sub>2</sub>掺杂量相同时, 延长预磨时间可以提高复合磁体的电阻率, 而对其磁性能没有影响。

## 关键词

SmCo<sub>5</sub>, CaF<sub>2</sub>, 磁性能, 电阻率, 掺杂

## Effect of CaF<sub>2</sub> Doping on Magnetic Properties and Resistivity of Hot-Pressed SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> Composite Magnet

Jieyang Yu<sup>1,2</sup>, Shuguo Zhao<sup>3</sup>, Chao Liang<sup>1,2</sup>, Lixin Zhao<sup>1,4</sup>, Lin Yue<sup>1,2</sup>, Yikun Fang<sup>5</sup>, Guangwei Huang<sup>1,2</sup>, Liyun Zheng<sup>1,2\*</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 余节洋, 赵树国, 梁超, 赵立新, 岳林, 方以坤, 黄光伟, 郑立允. CaF<sub>2</sub>掺杂对热压 SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> 复合磁体磁性能和电阻率的影响[J]. 材料科学, 2023, 13(7): 665-673. DOI: 10.12677/ms.2023.137071

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

<sup>2</sup>Hebei Research Center for Rare Earth Permanent Magnet Materials and Application Engineering, Handan Hebei

<sup>3</sup>Department of Mechanical and Electrical Engineering, Handan Polytechnic College, Handan Hebei

<sup>4</sup>School of Mechanical Equipment and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

<sup>5</sup>Division of Functional Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing

Received: Jun. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to reduce the eddy current loss of samarium cobalt magnets in permanent magnet motors, in this paper,  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  composite powders doped with  $\text{CaF}_2$  were prepared by high-energy ball grinding,  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  composite magnets were prepared by hot-pressed technology, and the effects of doping on the microstructure, magnetic properties and resistivity of hot-pressed composite magnets were studied. The results show that with the increase of  $\text{CaF}_2$  doping,  $\text{CaF}_2$  gradually presents a continuous zonal distribution, realizing the insulation coating of  $\text{SmCo}_5$ , and increasing the resistivity of the composite magnet. When the  $\text{CaF}_2$  doping amount is 5 wt%, the resistivity of the composite magnet is  $245 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ . When  $\text{CaF}_2$  is doped at 20 wt%, the resistivity of the composite magnet is up to  $680 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , which is 900% higher than that of the undoped  $\text{SmCo}_5$  magnet at  $75 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ . However, with the increase of  $\text{CaF}_2$  doping amount, the density and magnetic properties of the composite magnet show a decreasing trend. When the  $\text{CaF}_2$  doping amount is 5 wt%, the magnetic energy product  $(BH)_{\max}$  of the composite magnet decreases from  $53.07 \text{ kJ/m}^3$  to  $42.83 \text{ kJ/m}^3$ , which is 19% lower than that in the undoped condition. When the doping amount of  $\text{CaF}_2$  is 5 wt%,  $\text{CaF}_2$  gradually shows a flake morphology with the proflation of pregrinding time. The resistivity of  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  composite magnet prepared after 5 h pregrinding increases to  $283 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , and its magnetic energy product  $(BH)_{\max}$  is  $42.82 \text{ kJ/m}^3$ . It can be seen that when the doping amount of  $\text{CaF}_2$  is the same, extending the pregrinding time can improve the resistivity of the composite magnet, but has no effect on its magnetic properties.

## Keywords

$\text{SmCo}_5$ ,  $\text{CaF}_2$ , Magnetic Properties, Resistivity, Doping

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

稀土永磁材料在当今社会发展和国防科学技术中起着重大作用，被应用于各种各样的电力设备中，特别是在发电机和电动机中[1] [2]。但由于稀土永磁材料具有相当高的电导率，内部电流在稀土永磁材料中会形成闭合回路，在电机中工作时会由于涡流损耗产生过高的温升且散热较差，引起磁性能损失和工作效率下降[3]。减小磁体的涡流损耗通常有两种方法：一是从稀土永磁体工作的外部环境出发，进行磁体分割，优化槽口或改进绕组方式等，但这种方法往往需要通过改进电机结构来实现，并且效果不突出[4] [5] [6]；二是可以从材料本身出发，涡流损耗与电阻率呈反比，因此减小涡流损耗最有效的方法就是

提高稀土永磁材料的电阻率[7]。电机中常用的为钕钴和钕铁硼永磁材料，钕铁硼永磁材料的居里温度为 310℃~380℃，在服役时最高可以承受的温度能达到 180℃，但钕钴永磁材料的居里温度为 700℃~900℃，在工作温度高于 180℃时，其综合磁性能参数超过钕铁硼永磁材料，具有更好的热稳定性，因此钕钴永磁材料在大功率、高转矩和高速电机等领域具有更加广阔的应用前景[8] [9] [10]。所以实验以提高 SmCo<sub>5</sub> 电阻率为目的，进行微结构优化与性能调控。

为提高 SmCo<sub>5</sub> 电阻率，常采用掺杂一定含量的高电阻率无机物对磁粉进行包覆，实现对主相晶粒的绝缘隔离，减少磁体内电子的运输，从而减小涡流损耗[11]。掺杂的高电阻率无机物主要分为氟化物、氧化物、硫化物和氮化物等[12] [13] [14]。因此，本实验通过在 SmCo<sub>5</sub> 磁粉中添加 CaF<sub>2</sub>，并且利用球磨、热压工艺制备出复合磁体，研究掺杂不同含量的 CaF<sub>2</sub> 对复合磁体的微观组织、磁性能、电阻率的影响，及掺杂不同片厚比的 CaF<sub>2</sub> 对复合磁体磁性能和电阻率的影响。为减小钕钴磁体在工作过程中的涡流损耗，提高材料在服役时尤其在高温环境下的稳定性提供解决思路。

## 2. 实验材料与方法

实验原料采用纯度为 99.95% 的 Sm 和 Co 按原子比配料(Sm 补偿 5 wt%，弥补挥发损耗)，使用真空电弧炉在 Ar 气保护下进行熔炼。熔炼的合金锭先进行机械破碎，过 80 目筛子，得到平均粒径为 8~100 μm 的 SmCo<sub>5</sub> 原始粉末。称取 3~20 wt% 含量的 CaF<sub>2</sub> 粉末，进行 0.1 h 的预磨，使尺寸更加均匀，将预磨的 CaF<sub>2</sub> 粉末掺杂到 SmCo<sub>5</sub> 原始粉末中获得复合粉体，配料如表 1 所示；再称取 5 wt% 含量的 CaF<sub>2</sub> 粉，分别进行 1~5 h 的预磨，掺杂到 SmCo<sub>5</sub> 原始粉末中获得复合粉体。利用 SPEX-8000 高能球磨机对复合粉体进行高能球磨 3 h，球磨介质为正庚烷，球料比为 10:1。将球磨后的复合粉体放入热压模具，在温度 550℃、压力 350 MPa 条件下进行热压成型，获得直径 13 mm、高度 10 mm 左右的圆柱形 SmCo<sub>5</sub> 复合磁体。

**Table 1.** Mass ratio of SmCo<sub>5</sub> powder and CaF<sub>2</sub> powder for the high-energy ball milling

**表 1.** SmCo<sub>5</sub> 粉末和 CaF<sub>2</sub> 粉末高能球磨的质量配比

CaF <sub>2</sub> 含量(wt%)	0	3	5	10	15	20
SmCo <sub>5</sub> (g)	5	4.85	4.75	4.5	4.25	4
CaF <sub>2</sub> (g)	0	0.15	0.25	0.5	0.75	1

先将获得的热压样品进行打磨，使用 FT-300A1 导电材料电阻率测试仪，采用四端法进行电阻率测量，每个样品测量三次，求取平均值。采用阿基米德排水法对 SmCo<sub>5</sub> 复合磁体的密度进行测量。用线切割从磁体中切出直径为 6 mm、高度 9 mm 左右的小圆柱试样，打磨后，使用 PM-1 脉冲充磁机进行充磁，采用 NIM-6200C 永磁精密测试仪进行磁性能测试，获得退磁曲线。采用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)对热压磁体样品进行微观形貌和物相分析。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 热压 SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> 复合磁体的致密性

对不掺杂 CaF<sub>2</sub> 的纯钕钴磁粉球磨 3 h 后进行 550℃ 的热压，测得磁体密度为 7.4 g/cm<sup>3</sup>，SmCo<sub>5</sub> 磁体理论密度为 8.5 g/cm<sup>3</sup>，可达理论密度的 87.1%。这是由于湿磨 SmCo<sub>5</sub> 粉末颗粒在球的撞击下呈现出片体结构，并且随着球磨时间的延长，其片体越薄[15]。随着球磨时间的增加，片体长度和厚度的片厚比继续增大，湿磨热压出的合金密度则呈现相反的趋势，逐渐减小[16]。在球磨 3 h 后，片厚比已非常大，所以热压出的 SmCo<sub>5</sub> 磁体密度偏低。由表 2 可见，随着 CaF<sub>2</sub> 掺杂量的增加，复合磁体密度呈现下降趋势，由于 CaF<sub>2</sub> 粉末密度为 3.18 g/cm<sup>3</sup>，本身密度比 SmCo<sub>5</sub> 密度低，所以复合磁体密度随掺杂量增加而下降。当

CaF<sub>2</sub> 为 20 wt% 时, 磁体密度为 6.2 g/cm<sup>3</sup>, 较未掺杂时下降了 16%。但却达到了 20 wt% 掺杂量理论复合磁体密度的 96.9%, 随着 CaF<sub>2</sub> 掺杂量的增加,  $\rho/\rho_{\text{theor}}$  整体呈现增大的趋势, 因此 CaF<sub>2</sub> 可以对复合磁体的密度进行填充, 使其排列更加紧密。

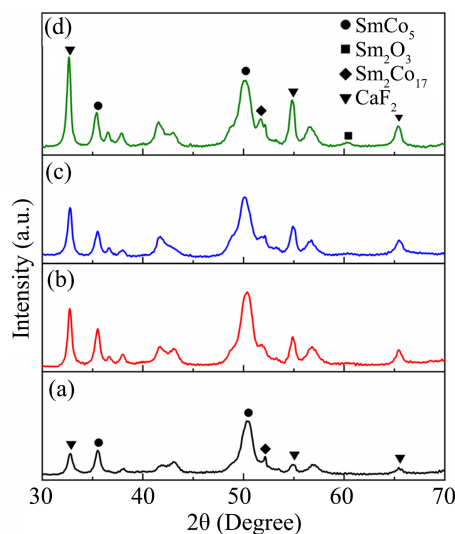
**Table 2.** Effect of CaF<sub>2</sub> doping on density and theoretical density of the hot-pressed SmCo<sub>5</sub> magnet

**表 2.** CaF<sub>2</sub> 掺杂对热压 SmCo<sub>5</sub> 磁体密度和理论密度的影响

CaF <sub>2</sub> 含量(wt%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{theor}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho/\rho_{\text{theor}}$ (%)
0	7.4	8.5	87.1
3	6.8	8.1	84.0
5	6.6	7.8	84.6
10	6.4	7.3	87.7
15	6.3	6.8	92.6
20	6.2	6.4	96.9

### 3.2. 热压 SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> 复合磁体的物相和形貌

通过 SmCo<sub>5</sub> 复合磁体物相组织的变化, 从微观上分析对磁体性能的影响。图 1 为掺杂量 5 wt% 到 20 wt% 的 CaF<sub>2</sub> 掺杂 SmCo<sub>5</sub> 热压磁体的 XRD 图谱。由图 1 可以看出, 当 CaF<sub>2</sub> 掺杂量为 5 wt% 时, SmCo<sub>5</sub> 复合磁体出现了较为明显的 CaF<sub>2</sub> 相的特征峰, 说明 CaF<sub>2</sub> 的掺杂对于 SmCo<sub>5</sub> 磁体物相组织有较为明显的影响, 并且随着 CaF<sub>2</sub> 含量的增加, 特征峰显著增强, 表明复合磁体中 CaF<sub>2</sub> 物相含量增加。除此之外, 并没有发现 SmCo<sub>5</sub> 主相和 CaF<sub>2</sub> 之间形成的化合物, 说明 CaF<sub>2</sub> 较为稳定, 不与 SmCo<sub>5</sub> 发生相互作用。同时, 随着 CaF<sub>2</sub> 掺杂量的增加发现 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 峰变得越来越明显, 这是由于随着 CaF<sub>2</sub> 的加入, 其带入的氧附在表面, 且随 CaF<sub>2</sub> 掺杂量的增加而增加。并且球磨后在晾干过程中也会有一小部分氧附着在粉末表面, 导致热压过程出现 Sm<sup>3+</sup> 氧化物, 属于不可避免的现象, 这导致后期磁体的磁性能下降。由图 1 还发现, 在热压过程中出现了相的转变, 有 Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> 相的伴随出现, 但含量很少, 并没有破坏磁体的主相。



**Figure 1.** XRD images of the hot-pressed SmCo<sub>5</sub> magnet doped with different CaF<sub>2</sub> contents: (a) 5 wt%; (b) 10 wt%; (c) 15 wt%; (d) 20 wt%

**图 1.** 掺杂不同含量 CaF<sub>2</sub> 的热压 SmCo<sub>5</sub> 磁体 XRD 图: (a) 5 wt%; (b) 10 wt%; (c) 15 wt%; (d) 20 wt%

图 2 为不同  $\text{CaF}_2$  掺杂量的热压  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体 SEM 图，所观察面为沿着压力方向的刨切面。由图 2 可知，灰色区域为  $\text{SmCo}_5$  主相，呈现出片状结构，暗灰色条纹为添加的  $\text{CaF}_2$ 。随着掺杂量的增加， $\text{CaF}_2$  对  $\text{SmCo}_5$  主相进行了全面包覆， $\text{CaF}_2$  分布相对较为均匀。可见，随掺杂量的增加， $\text{CaF}_2$  有趋于细条带状分布的趋势。黑色区域则为磁体的缺陷，为一些孔洞和间隙。根据图 3 的 mapping 图辅助分析，黑色区域还有 Ca 元素的存在，说明还存在少部分的  $\text{CaF}_2$  颗粒，因为  $\text{CaF}_2$  的脆性高、硬度大，导致 SEM 样品打磨抛光时在  $\text{CaF}_2$  颗粒存在的地方呈现出黑色缺陷，且随着掺杂量的增多，黑色区域呈现增加的趋势，属于正常现象。白色区域主要为  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ，出现 Sm 的氧化物。随着  $\text{CaF}_2$  掺杂量的增加，白色区域有呈现出增加的趋势，这是由于随  $\text{CaF}_2$  掺杂量的增加所带氧含量增加缘故，同时在球磨后晾干的过程中也会发生部分氧化所致。

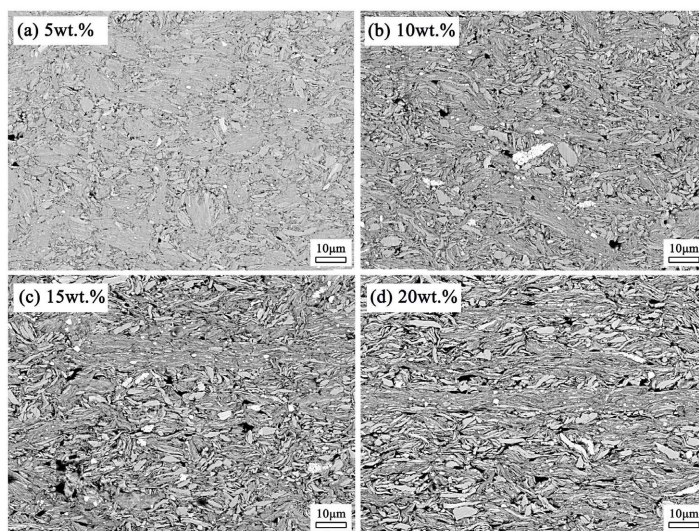


Figure 2. SEM images of the hot-pressed  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  composite magnet with different  $\text{CaF}_2$  doping quantities  
图 2. 不同  $\text{CaF}_2$  掺杂量的热压  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体 SEM 图

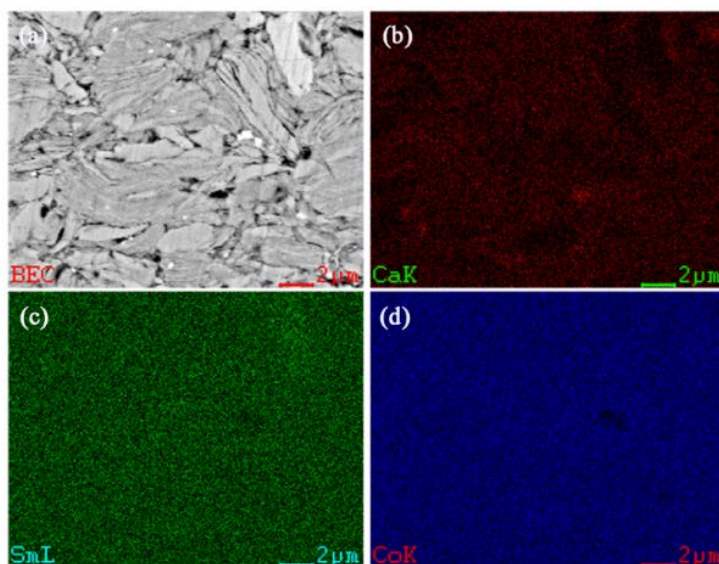
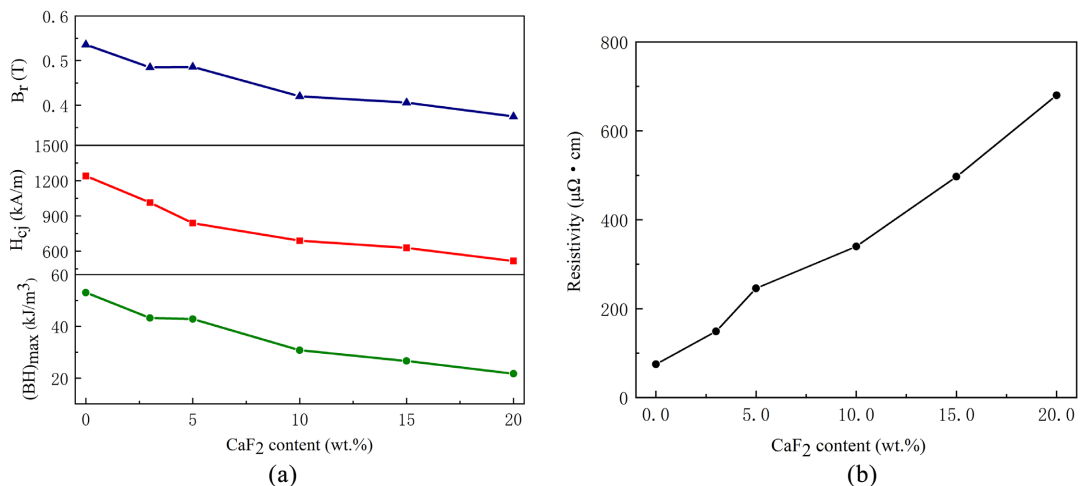


Figure 3. EDS mapping images of the hot-pressed  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  composite magnet doped with 5 wt%  $\text{CaF}_2$   
图 3. 掺杂量 5 wt%  $\text{CaF}_2$  的热压  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体 EDS mapping 图

### 3.3. CaF<sub>2</sub> 掺杂量对热压 SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> 复合磁体磁性能和电阻率的影响

通过在 SmCo<sub>5</sub> 磁粉中掺杂不同含量的 CaF<sub>2</sub>, 研究对热压 SmCo<sub>5</sub> 磁体磁性能的影响。图 4(a) 为 3 wt%、5 wt%、10 wt%、15 wt% 和 20 wt% 掺杂量的 CaF<sub>2</sub> 对磁体剩磁  $B_r$ 、矫顽力  $H_{cj}$  和磁能积  $(BH)_{max}$  的影响。当 CaF<sub>2</sub> 含量 0 wt% 时,  $B_r = 0.536$  T,  $H_{cj} = 1240$  kA/m,  $(BH)_{max} = 53.07$  kJ/m<sup>3</sup>。由图 4(a) 可知, 随着 CaF<sub>2</sub> 含量的增加, 复合磁体的剩磁  $B_r$ 、矫顽力  $H_{cj}$ 、和磁能积  $(BH)_{max}$  都逐渐减小, 磁性能下降越严重。当 CaF<sub>2</sub> 含量 20 wt% 时,  $B_r = 0.375$  T,  $H_{cj} = 515.9$  kA/m,  $(BH)_{max} = 21.70$  kJ/m<sup>3</sup>。相比较而言, 掺杂 20 wt% 的 CaF<sub>2</sub> 较未掺杂的 SmCo<sub>5</sub> 磁体的磁能积  $(BH)_{max}$  下降了 59.1%, 说明高掺杂量的 CaF<sub>2</sub> 对磁体性能损耗很大, 达不到复合磁体的使用要求, 而掺杂 5 wt% 的 CaF<sub>2</sub> 磁能积  $(BH)_{max}$  仅下降了 19%, 并且发现在掺杂量 3 wt% 到 5 wt% 时减小趋势平缓, 对磁性能损耗较小, 具有很大的研究价值。



**Figure 4.** Effect of different doping amounts of CaF<sub>2</sub> on magnetic properties and resistivity of the hot-pressed SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> composite magnet

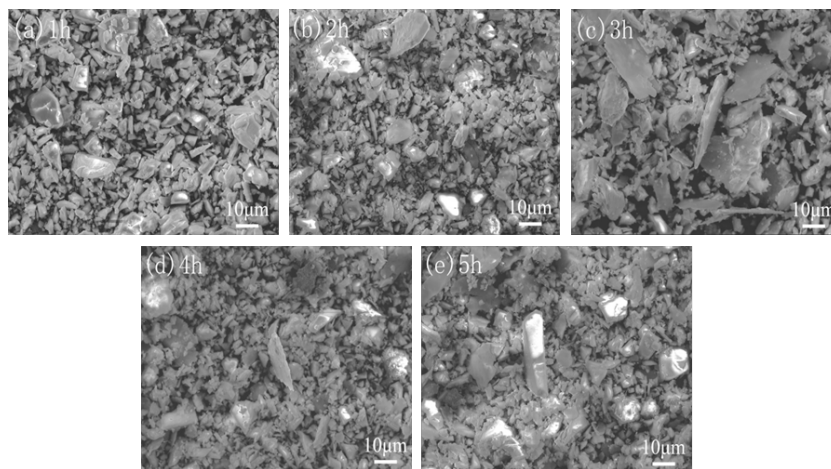
**图 4.** 不同掺杂量的 CaF<sub>2</sub> 对热压 SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> 复合磁体磁性能和电阻率的影响

图 4(b) 给出了 SmCo<sub>5</sub> 复合磁体电阻率与 CaF<sub>2</sub> 掺杂量的关系曲线。由图 4(b) 可见, 随着掺杂量的提高, 电阻率整体提升明显, 呈现上升的趋势。未掺杂的磁体电阻率为 75  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 掺杂 3 wt% 时, 电阻率提高到 149  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 相比较提升了将近一倍。这是因为 CaF<sub>2</sub> 是一种高电阻率无机物, 介电性能优异。当与 SmCo<sub>5</sub> 粉混合进行高能球磨时, 会破坏 SmCo<sub>5</sub> 原有的晶格周期排列顺序, 增加了自由电子的散射几率, 越来越多的自由电子使内部电子在运动时形成了阻碍作用[17]。同时, 进行球磨时也相当对粉体进行了绝缘包覆, 提高了晶界处的电阻率, 从而使 SmCo<sub>5</sub> 复合磁体的电阻率显著提高。当掺杂量为 20 wt% 时, 电阻率较未掺杂时提升了 900%, 随着掺杂量的增加, 电阻率还会继续增加, 但磁性能会严重恶化。尽管电阻率提升较大, 却是以牺牲磁性能为代价, 无法满足稀土永磁材料在电机中的应用。

### 3.4. CaF<sub>2</sub> 片厚比对热压 SmCo<sub>5</sub> 复合磁体磁性能和电阻率的影响

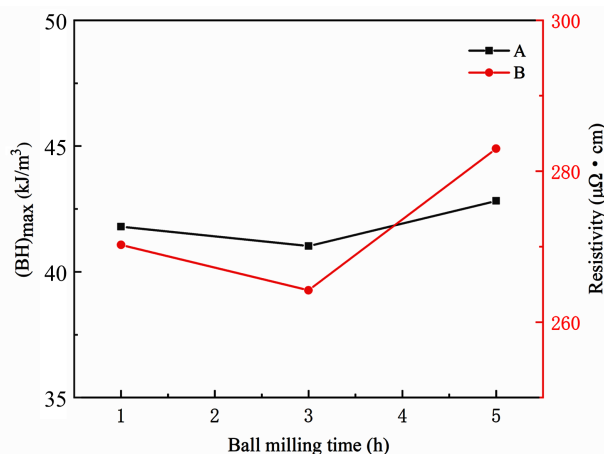
图 5 为 CaF<sub>2</sub> 经过高能球磨 1~5 h 的 SEM 图。从图中可以看出, 随着球磨时间的增加, CaF<sub>2</sub> 逐渐趋于片状结构, 并且在球磨的过程中会伴随冷焊结块现象的发生, CaF<sub>2</sub> 会团聚在一起。图 5(a) 球磨 1 h 后形成片体的片厚比为 5.949, 随后逐渐减小到图 5(c) 球磨 3 h 的片厚比为 4.025, 然后继续增大到图 5(e) 球磨 5 h 的片厚比为 6.042。在 1~5 h 球磨的过程中, 会伴随着 CaF<sub>2</sub> 团聚现象造成的尺寸增大和被研磨球重新撞击成片体的尺寸减小过程。根据 0~20 wt% 不同掺杂量 CaF<sub>2</sub> 对热压 SmCo<sub>5</sub> 磁体磁性能和电阻率的影响

影响, 当  $\text{CaF}_2$  掺杂量为 5 wt% 时, 其磁性能和电阻率可以达到最佳效果。故选取高能球磨 1 h、3 h、5 h 片厚比最大和最小的三个粒度, 在  $\text{SmCo}_5$  磁粉中掺杂 5 wt% 的  $\text{CaF}_2$  进行高能球磨, 获得  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合粉体, 再进行热压获得复合磁体。



**Figure 5.** SEM images of  $\text{CaF}_2$  powder under different milling times  
**图 5.** 不同球磨时间下的  $\text{CaF}_2$  粉体的 SEM 图

图 6 曲线 A 为  $\text{CaF}_2$  经过 1 h、3 h、5 h 的预磨后, 在  $\text{SmCo}_5$  磁粉中掺杂 5 wt% 含量的  $\text{CaF}_2$  获得的热压磁体磁性能变化。由曲线 A 可见, 磁能积  $(BH)_{max}$  变化总体很小, 而掺杂预磨 3 h 的  $\text{CaF}_2$  磁性能  $(BH)_{max}$  最小, 因为预磨 3 h 的片体较厚, 团聚现象严重, 故对热压后的复合磁体磁性能会造成微弱影响。图 6 曲线 B 为  $\text{CaF}_2$  经过 1 h、3 h、5 h 的预磨后, 在  $\text{SmCo}_5$  磁粉中掺杂 5 wt% 的  $\text{CaF}_2$  的热压磁体电阻率变化曲线。由曲线 B 可以看出, 片厚比越大, 复合磁体的电阻率越高, 越易形成对  $\text{SmCo}_5$  主相的绝缘包覆, 其带状  $\text{CaF}_2$  层也相对更加连续, 使电阻率增大。因此, 在  $\text{CaF}_2$  经过 5 h 的预磨后, 再进行 5 wt% 掺杂实验, 热压磁体电阻率可以达到最大值  $283 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 电阻率较未掺杂时提升了 377%, 与  $\text{CaF}_2$  预磨 0.1 h 后掺杂的热压复合磁体电阻率  $245 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 电阻率提升了 13.4%。由此可见, 在  $\text{CaF}_2$  预磨 5 h 后, 所制备的  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体磁性能和电阻率可以取得最佳效果。



**Figure 6.** Effect of 5 wt%  $\text{CaF}_2$  doping at different pregrinding times on  $(BH)_{max}$  and resistivity of the hot-pressed  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  composite magnet

**图 6.** 不同预磨时间的 5 wt%  $\text{CaF}_2$  掺杂对热压  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体  $(BH)_{max}$  和电阻率的影响

## 4. 结论

本文采用高能球磨和热压技术制备了  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体, 研究了掺杂不同含量  $\text{CaF}_2$  及其片厚比对  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体微观组织、磁性能和电阻率的影响, 主要结论如下:

1) 随着  $\text{CaF}_2$  掺杂量的增加,  $\text{CaF}_2$  的特征峰会逐渐增强, 并且逐渐呈现连续的带状分布对  $\text{SmCo}_5$  主相进行绝缘包覆, 提高了电阻率。

2) 随着  $\text{CaF}_2$  掺杂量的增加, 磁性能呈现下降的趋势, 当  $\text{CaF}_2$  掺杂量为 5 wt% 时, 复合磁体的磁能积  $(BH)_{max}$  下降了 19%, 因此, 需要控制无机物掺杂量, 使其保持在适当范围, 以满足磁体对性能的需求。

3)  $\text{CaF}_2$  的掺杂可以大幅度提高  $\text{SmCo}_5$  磁体的电阻率, 当  $\text{CaF}_2$  掺杂量为 5 wt% 时, 由原来的  $75 \mu\Omega\cdot\text{cm}$  提高到  $245 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 在  $\text{CaF}_2$  掺杂量为 20 wt% 时, 电阻率可以提高 900%, 但磁性能损耗过大。

4) 不同片厚比的  $\text{CaF}_2$  对  $\text{SmCo}_5$  磁体的磁性能影响较小, 但在  $\text{CaF}_2$  含量相同时, 片厚比越大,  $\text{SmCo}_5/\text{CaF}_2$  复合磁体的电阻率越大。

## 基金项目

感谢国家重点研发计划项目(2022YFB3505600)对本研究工作的支持。

## 参考文献

- [1] Habib, A., Mohd Zainuri, M.A.A., Che, H.S., *et al.* (2022) A Systematic Review on Current Research and Developments on Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Machines. *IET Electric Power Applications*, **16**, 1095-1116. <https://doi.org/10.1049/elp2.12218>
- [2] Qu, R., Zhou, Y. and Li, D. (2022) Milestones, Hotspots and Trends in the Development of Electric Machines. *iEnergy*, **1**, 82-99. <https://doi.org/10.23919/IEN.2022.0002>
- [3] 邱洪波. 高速永磁发电机转子涡流损耗优化及对温度分布影响的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [4] Egorov, D., Petrov, I., Pyrhönen, J.J., *et al.* (2021) Hysteresis Loss in NdFeB Permanent Magnets in a Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **69**, 121-129. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3050358>
- [5] Ji, W., Ni, F., Gao, D., *et al.* (2021) Electromagnetic Design of High-Power and High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Loss Characteristics. *Energies*, **14**, Article 3622. <https://doi.org/10.3390/en14123622>
- [6] Oh, S.Y., Cho, S.Y., Han, J.H., *et al.* Design of IPMSM Rotor Shape for Magnet Eddy-Current Loss Reduction. *IEEE Transactions on Magnetics*, **50**, 841-844. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2282473>
- [7] Chinnasamy, C., Jasinski, M.M., Patches, D. and Liu, J.F. (2012) High Electrical Resistivity Sm (Co, Fe, Cu, Zr)<sub>2</sub>/Sm<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Permanent Magnets with Layered Structure for Advanced Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, **48**, 3166-3169. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2198633>
- [8] 林棠华. 钕铁硼材料在小功率永磁同步电动机的应用研究[J]. 中小型电机, 1989(1): 11-15.
- [9] Kohlmann, H., Hansen, T.C. and Nassif, V. (2018) Magnetic Structure of  $\text{SmCo}_5$  from 5K to the Curie Temperature. *Inorganic Chemistry*, **57**, 1702-1704. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b02981>
- [10] Kronmüller, H. and Goll, D. (2003) Analysis of the Temperature Dependence of the Coercive Field of  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  Based Magnets. *Scripta Materialia*, **48**, 833-838. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00619-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00619-X)
- [11] 郑立允, 房刊, 李卫. 高电阻率稀土永磁材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(9): 645-652.
- [12] Zheng, L.Y., Li, W., Zhu, M.G., Ye, L.P. and Bi, W.C. (2013) Microstructure, Magnetic and Electrical Properties of the Composite Magnets of Nd-Fe-B Powders Coated with Silica Layer. *Journal of Alloys and Compounds*, **560**, 80-83. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.107>
- [13] Kang, M.S., Kim, K.M., Kwon, H.W., *et al.* (2019) Electrical Resistivity and Demagnetization Characteristics of Salt-Added Nd-Fe-B-Type Magnet. *Journal of Magnetics*, **24**, 477-484. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2019.24.3.477>
- [14] 白杨, 王梓良, 李雅婧, 等. 利用氮化铝掺杂对热变形钕铁硼磁体电阻率及磁性能的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(18): 30-33.
- [15] Zheng, L.Y., Cui, B.Z., Zhao, L.X., Li, W.F. and Hadjipanayis, G.C. (2013) A Novel Route for the Synthesis of



---

CaF<sub>2</sub>-Coated SmCo<sub>5</sub> Flakes. *Journal of Alloys and Compounds*, **549**, 22-25.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.057>

- [16] Gabay, A.M., Marinescu-Jasinski, M., Chinnasamy, C.N., Liu, J.F. and Hadjipanayis, G.C. (2012) Eddy-Current-Resistant SmCo<sub>5</sub>/CaF<sub>2</sub> Magnets Produced via High-Energy Milling in Polar and Non-Polar Liquids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **324**, 2879-2884. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.04.033>
- [17] Yang, Q.Q., Liu, Z., Zhang, C.Y., *et al.* (2021) Magnetic Properties and Resistivity of a 2:17-Type SmCo Magnet Doped with ZrO<sub>2</sub>. *Chinese Physics B*, **30**, Article ID: 077504. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abf7a9>