

# 熔体快淬法制备 $\text{CeCo}_5$ 纳米磁体的晶体织构及磁各向异性\*

查亮<sup>1)†</sup> 王芳贵<sup>2)</sup> 林中冲<sup>3)</sup> 杨文云<sup>5)</sup> 杜红林<sup>5)</sup> 王常生<sup>5)</sup> 车仁超<sup>1)</sup>

<sup>4)†</sup> 杨金波<sup>5)†</sup>

1) (东华大学物理学院, 上海 201620)

2) (稀土永磁材料全国重点实验室, 合肥 230041)

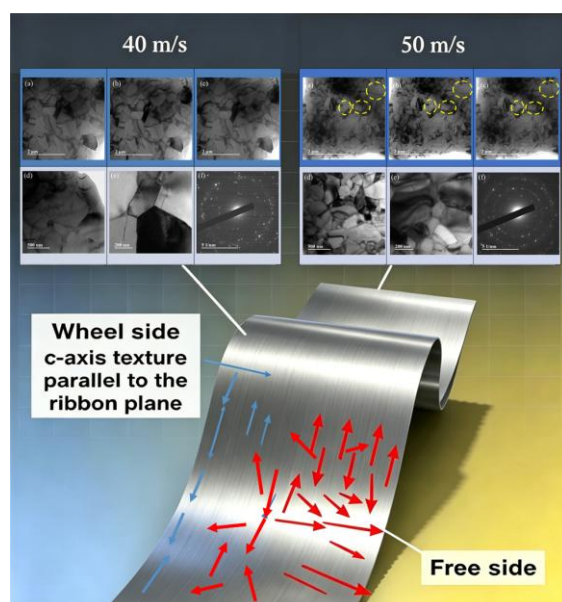
3) (福建师范大学物理与能源学院, 福州 350117)

4) (先进材料实验室, 复旦大学, 上海 200438, 中国)

5) (北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理全国重点实验室, 北京 100871)

## 摘要

中文摘要部分.  $\text{CeCo}_5$  结构化合物是一类重要的稀土永磁材料, 在减少关键稀土元素用量并提升其磁性能具有重要的应用价值. 为实现低稀土依赖型高性能永磁体的可控制备, 本工作通过高速熔体快淬工艺直接合成出具有显著晶体织构与本征功能梯度的单相  $\text{CeCo}_5$  纳米磁体. 利用多种表征手段系统研究了材料的晶体结构、微观形貌、织构特征与磁性能演化规律. X 射线衍射结果表明, 样品贴辊面存在平行于薄带平面的  $c$  轴择优取向, 而自由面则呈现近各向同性的晶粒取向分布, 这种非对称织构直接诱发了显著的磁各向异性. 在辊轮线速度为  $40\text{m/s}$  条件下制备的薄带, 其面内剩磁比明显高于面外数值. 洛伦兹透射电镜观测证实样品具有纳米尺度的晶粒尺寸与清晰的磁畴结构, 中子衍射精修结果确定其具有  $\text{CaCu}_5$  型晶体结构. 研究表明, 非对称冷却导致的定向凝固行为是形成贴辊面织构梯度的主要原因. 所制备的功能梯度薄带磁体展现出优良的磁各向异性, 在降低关键稀土元素依赖的新型永磁材料体系中具有良好的应用前景.



**图文摘要** 贴辊面和自由面表现不同的晶粒取向以及不同辊轮线速度下的微观形貌

**关键词：** 纳米晶材料；晶体取向；纳米磁体；稀土永磁

**PACS：** 75.50.Tt, 81.10.Aj, 75.50.Ww

**基金：** 新材料重大专项（批准号：2025ZD0618000）资助的课题。

# 同等贡献作者。

† 通信作者.E-mail: zhaliang@dhu.edu.cn

第一作者.E-mail: zhaliang@dhu.edu.cn

## 1 引言

稀土-钴金属间化合物  $\text{RECo}_5$  系列因具备优异的单轴磁晶各向异性与高居里温度，在永磁材料领域占据重要地位<sup>[1-10]</sup>。其中，钐钴合金（ $\text{SmCo}_5$ ）与镨钕合金（ $\text{PrCo}_5$ ）是最为典型的代表，其磁晶各向异性常数  $K_u$  分别可达  $11\text{-}20 \text{ MJ/m}^3$  与  $8.1 \text{ MJ/m}^3$ ，居里温度  $T_c$  则分别为  $727 \text{ }^\circ\text{C}$  与  $620 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[5,6]</sup>。作为轻稀土钴化合物的典型代表，铈钴合金（ $\text{CeCo}_5$ ）虽因铈元素价态的中间特性及微观结构难以精准调控，历史上其矫顽力表现相对不佳<sup>[5,6]</sup>，但凭借铈元素资源丰富、成本低廉的显著优势，且即便受  $4f$  电子部分离域效应导致晶格参数异常与居里温度略

降，仍保持与钇钴合金（ $\text{YCo}_5$ ）相当的本征单轴磁各向异性<sup>[10, 11]</sup>，近年来重新成为永磁材料领域的研究热点。

随着快速凝固技术与微观结构调控手段的不断突破，轻稀土钴基永磁材料的性能优化迎来新的契机<sup>[1, 5, 9, 10, 11, 12, 13]</sup>。已有研究表明，采用熔体快淬工艺制备的 Y、Pr、Sm 等稀土元素掺杂的  $\text{RECo}_5$  系列合金薄带，其晶体结构呈现出  $c$  轴平行于薄带平面的择优取向特征<sup>[9, 10, 15, 18, 19]</sup>；而在氧化铝（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）基底上通过外延生长制备的  $\text{CeCo}_5$  薄膜，则表现出垂直各向异性<sup>[5]</sup>。然而，当前针对  $\text{CeCo}_5$  材料的研究仍存在明显不足：现有制备工艺难以同时实现单相结构、显著晶体织构与功能梯度的协同调控，关于织构梯度的形成机制及其对宏观磁各向异性的调控规律尚未明确，限制了其在低稀土依赖型永磁材料中的应用。

基于此，本研究以  $\text{CeCo}_5$  纳米磁体为研究对象，采用高速熔体快淬工艺实现单相  $\text{CeCo}_5$  纳米磁体的直接合成，系统研究其晶体织构、微观结构与磁性能的关联规律。通过 X 射线衍射、洛伦兹透射电镜、中子衍射精修等多种表征手段，揭示薄带辊面强  $c$  轴择优取向与自由面近各向同性取向的非对称织构特征，阐明非对称冷却诱导的定向凝固机制对织构梯度形成的调控作用，并验证功能梯度结构对宏观磁各向异性的增强效应。本研究为制备低稀土含量、高性能功能梯度永磁材料提供了简易可行的技术路径，对推动轻稀土永磁材料的工程化应用具有重要意义。

## 2 实验方法

采用电弧熔炼法制备多晶  $\text{CeCo}_5$  铸锭：以纯度 99.9% 的金属铈（Ce）与 99.9% 的金属钴（Co）为原料，在氩气（Ar）保护气氛下进行电弧熔炼，为补偿熔炼过程中铈的蒸发损失，原料中额外添加 5%（质量分数）的 Ce。为保证铸锭成分均匀性，将铸锭反复熔炼 4 次。

通过熔体快淬工艺制备纳米晶薄带：将均匀化后的铸锭置于氩气保护氛围中，采用铜辊熔体快淬设备，分别在 40 m/s 与 50 m/s 的辊面线速度下制备 CeCo<sub>5</sub> 纳米晶薄带（当辊速提升至 60 m/s 及以上时，薄带脆性显著增大，无法满足后续测试要求，故未采用该参数）。

材料表征测试采用以下手段：1）室温 X 射线衍射（XRD）分析：采用 Cu K $\alpha$  射线（波长  $\lambda = 1.54187 \text{ \AA}$ ），对薄带的辊面与自由面分别进行测试，表征晶体结构与织构特征；2）磁性能测试：利用物理性能测量系统（PPMS-9），在室温范围内，分别沿薄带面内与面外方向施加磁场，测试磁滞回线；3）晶体结构与磁结构精修：基于 293 K 下收集的中子粉末衍射数据，完成晶体结构与磁结构的精修分析；4）磁畴结构观测：将薄带样品经离子减薄处理后，采用洛伦兹透射电子显微镜（LTEM），分别在欠焦、正焦与过焦模式下观测磁畴形貌。

### 3 实验结果

图 1 (a) 为辊轮线速度 40 m/s 条件下制备的 CeCo<sub>5</sub> 薄带辊面与自由面的 X 射线衍射图谱。自由面衍射峰与无规取向多晶粉末谱形相近，CaCu<sub>5</sub> 型结构各主要衍射峰的相对强度符合各向同性晶粒取向特征。与之相比，辊面样品的 (00l) 晶面衍射峰强度显著被抑制，而 (110)、(200) 等 (hk0) 晶面衍射峰则明显增强，表明仅在薄带辊面形成平行于带面的 c 轴择优取向，即磁易轴沿面内分布。在辊速 50 m/s 条件下仍可观察到类似的贴辊面局域织构特征，说明较高辊速并未完全消除辊面附近由非对称冷却诱导的定向凝固；但该择优取向主要局域于贴辊面，自由面仍保持近各向同性，因此样品表现为沿厚度方向分布的织构梯度，而非整个薄带的均匀强织构。这与已有文献中 SmCo<sub>5</sub>、YCo<sub>5</sub>、PrCo<sub>5</sub> 快淬薄带的规律一致，即高的淬火速率有利于沿低能晶面实现定向凝固生长 [15,16,17,18]。该织

构的形成源于辊轮界面处高达约  $10^6$  K/s 的剧烈温度梯度，使得基面平行于热流方向的晶粒在形核与生长过程中占据优势。与  $\text{SmCo}_5$  织构在不同速率产生和消失的可能原因是因为几种金属在形成合金后的熔点不同，相比于  $\text{SmCo}_5$ ， $\text{CeCo}_5$  熔点更低，因而更高的速率下仍能产生贴辊面织构。

由谢乐公式估算并经透射电镜验证的晶粒尺寸随辊轮线速度提高而减小。经过 TEM 统计粒径分布，40 m/s 时对应平均晶粒尺寸在 400 nm 左右，大于 50 m/s 的 300 nm。这一现象可归因于辊轮线速度提升带来的冷却速率显著提高：随着线速度增大，合金熔体与辊轮的接触时间缩短，传热效率提升，体系获得更大的过冷度，使得形核速率显著提高而晶粒长大时间被大幅压缩，晶粒结晶过程更加迅速，最终形成更为细小的晶粒组织。

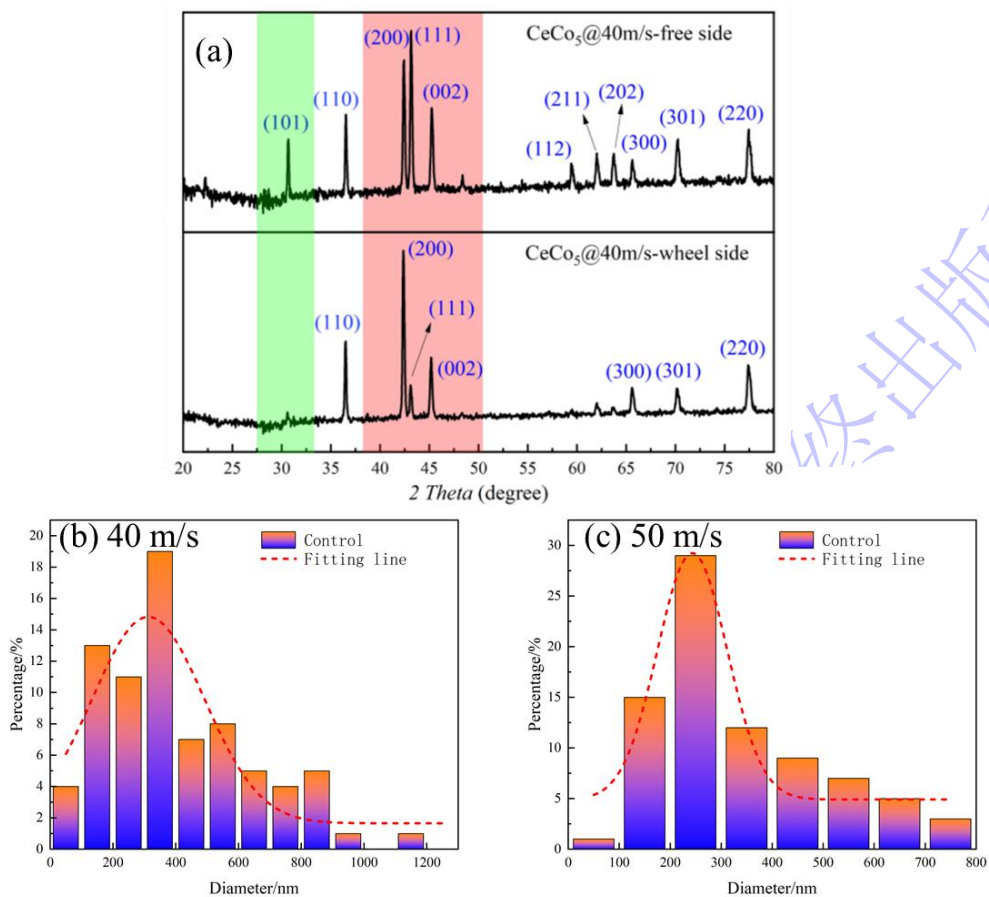


图 1 (a) 40 m/s 下  $\text{CeCo}_5$  薄带自由面和贴辊面的 XRD 图谱。(b) (c) 40 m/s 和 50 m/s 下  $\text{CeCo}_5$  对应的晶粒粒径分布图 (由 TEM 图统计得到)。

Fig. 1. (a) XRD patterns of the free side and wheel side for  $\text{CeCo}_5$  ribbons under 40 m/s. (b)

(c) Grain size distribution diagrams for CeCo<sub>5</sub> at 40 m/s and 50 m/s (derived from statistical analysis of TEM images).

图 2 给出了磁场分别平行于薄带平面与垂直于薄带平面时测得的磁滞回线。辊轮速率为 40 m/s 和 50 m/s 的薄带样品均表现出明显的磁各向异性。其中，40 m/s 条件下制备的样品面内剩磁比可达 0.60，退磁曲线平滑，而面外剩磁比仅为 0.38；对应的 50 m/s 条件下样品面内和面外剩磁比分别为 0.58、0.33。面内剩磁的显著提升，主要源于具有强织构的辊面区域中 *c* 轴易磁化方向平行于面内磁场取向，尽管该织构层仅占薄带厚度的一部分。矫顽力在面外方向略高，这一现象与晶界处的磁畴壁钉扎机制相符，该机制在纳米晶 RECo<sub>5</sub> 体系中已被广泛证实，即细小晶粒会有效阻碍磁畴壁的运动 [7,9]。

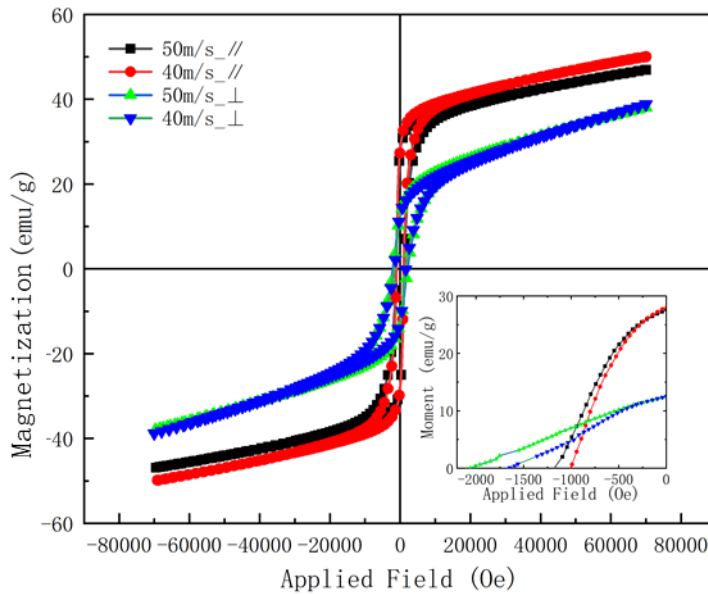


图 2 当外加磁场平行 ( $\parallel$ ) 与垂直 ( $\perp$ ) 于薄带平面时，40 m/s 和 50 m/s CeCo<sub>5</sub> 合金薄带的磁滞回线。

Fig. 2. Hysteresis loops for the CeCo<sub>5</sub> ribbons of 40 m/s and 50 m/s with applied field parallel ( $\parallel$ ) and vertical ( $\perp$ ) to the ribbon plane.

如图 3 (a) 所示，中子粉末衍射精修结果证实，样品在 293 K 下为 CaCu<sub>5</sub> 型六方结构，空间群为 P6/mmm，精修得到的晶格常数为  $a = 4.952(1) \text{ \AA}$ ， $c = 3.979(1)$

Å, 与已有文献报道的  $\text{CeCo}_5$  晶格参数高度吻合<sup>[20]</sup>。图 3 (b) 为  $\text{CeCo}_5$  的铁磁结构示意图, 其传播矢量  $k = (0,0,0)$ 。精修结果表明, 占据  $2c$  和  $3g$  两个高对称性晶位的钴原子, 磁矩分别为  $0.767(22) \mu_B$  和  $1.255(19) \mu_B$ , 二者对每个化学式单元的总磁矩贡献约为  $6.5\text{—}7.1 \mu_B$ 。在该类金属间化合物中, 铈离子通常以三价与四价共存的混合价态存在, 使其平均有效磁矩较小甚至趋近于零<sup>[19]</sup>。尽管如此, 近期对相关铈基化合物的密度泛函理论结合动力学平均场理论计算表明, 铈的存在对体系产生强磁晶各向异性具有不可或缺的作用。

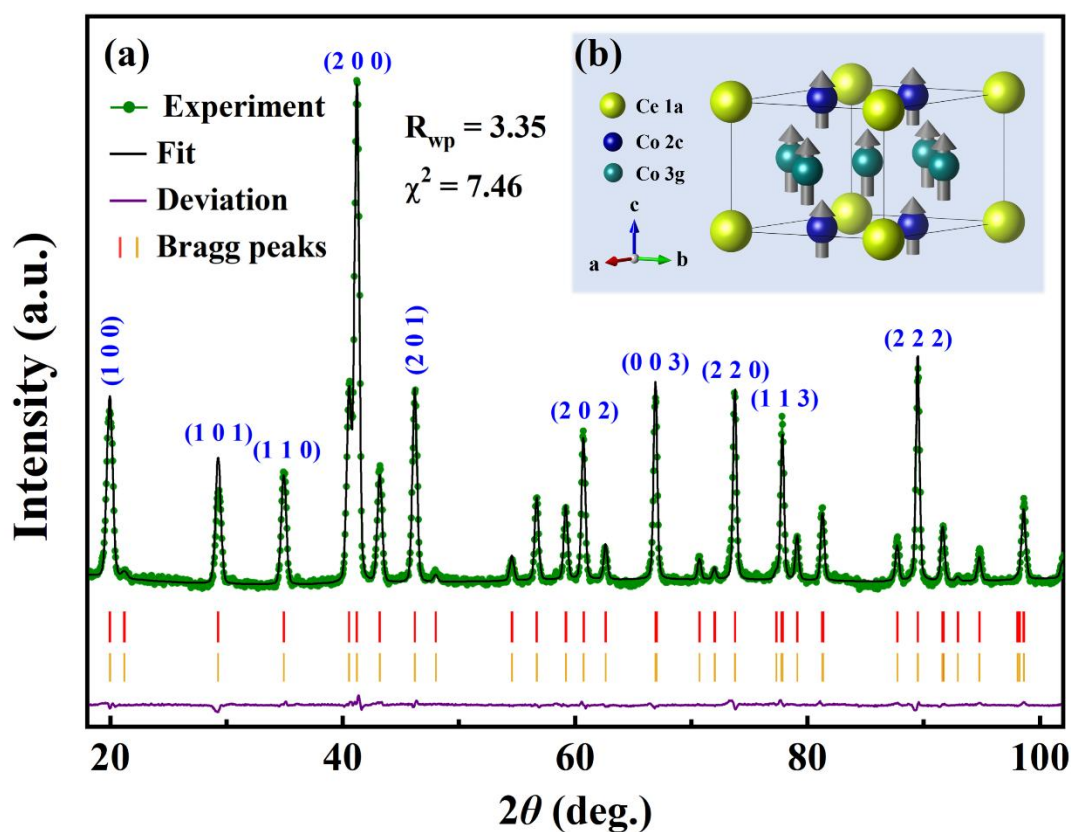


图 3 (a) 293 K 下 40 m/s 制备  $\text{CeCo}_5$  样品的中子衍射精修图谱; (b)  $P6/mmm$  晶体结构及其传播矢量  $k = (0,0,0)$  磁结构示意图。

Fig. 3. (a) Refined neutron diffraction pattern of 40 m/s  $\text{CeCo}_5$  sample at 293 K. (b) Scheme of  $P6/mmm$  crystal structure and its magnetic structure with propagation vector  $k = (0, 0, 0)$ .

洛伦兹透射电子显微表征可直观揭示磁畴结构随晶粒尺寸的演化规律。本次洛伦兹透射电镜表征的样品, 是通过离子减薄法制备的。该方法会从两侧对薄带

进行整体减薄，因此表征区域更接近薄带的中心位置。对于辊速 40 m/s 制备的薄带（图 4），欠焦与过焦模式下整体衬度较弱，正焦图像中仅可见少量稀疏的磁畴壁。局部放大区域与选区电子衍射结果证实，样品晶粒尺寸较粗大（约 100–200 nm），磁畴衬度微弱，表现出  $\text{RECo}_5$  体系中大尺寸晶粒典型的单畴或准单畴行为<sup>[15]</sup>。与之形成对比，50 m/s 薄带（图 5）在离焦模式下呈现清晰的波纹状与迷宫状磁畴；正焦图像可清晰分辨贯穿多个晶粒的穿晶畴壁（黄色虚线圆圈标注），表明在更细小的微观结构中存在更强的交换耦合作用与畴壁钉扎效应。随着晶粒尺寸减小，磁畴由无明显畴结构向多畴状态转变，这一规律与熔体快淬  $\text{YCo}_5$ 、 $\text{PrCo}_5$  薄带中的观测结果高度一致，即晶粒细化可提升钉扎中心密度并进而提高矫顽力<sup>[15,19]</sup>。

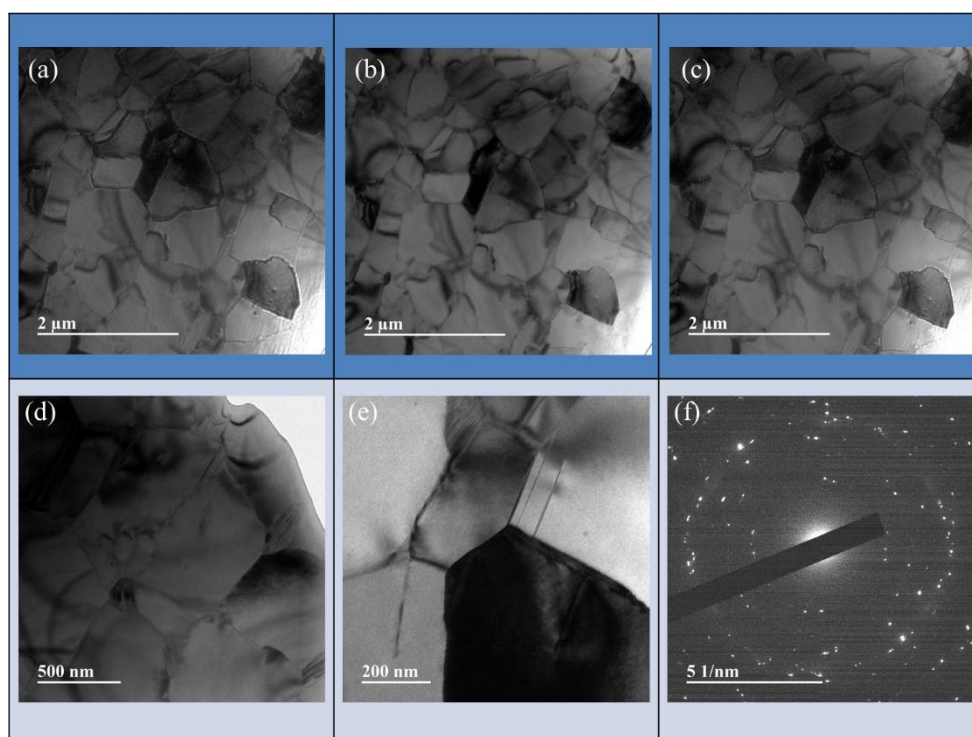


图 4. 40 m/s 下  $\text{CeCo}_5$  薄带的洛伦兹透射电子显微镜（LTEM）图像：(a) 欠焦，(b) 正焦，(c) 过焦；(d-e) 正焦 LTEM 放大图像；(f) 选区电子衍射（SAED）图谱。

Fig. 4. LTEM images of 40 m/s in  $\text{CeCo}_5$  ribbons. (a) Under-focus, (b) in-focus, and (c) over-focus. (d-e) Enlarged in-focus LTEM image. (f) SAED pattern.

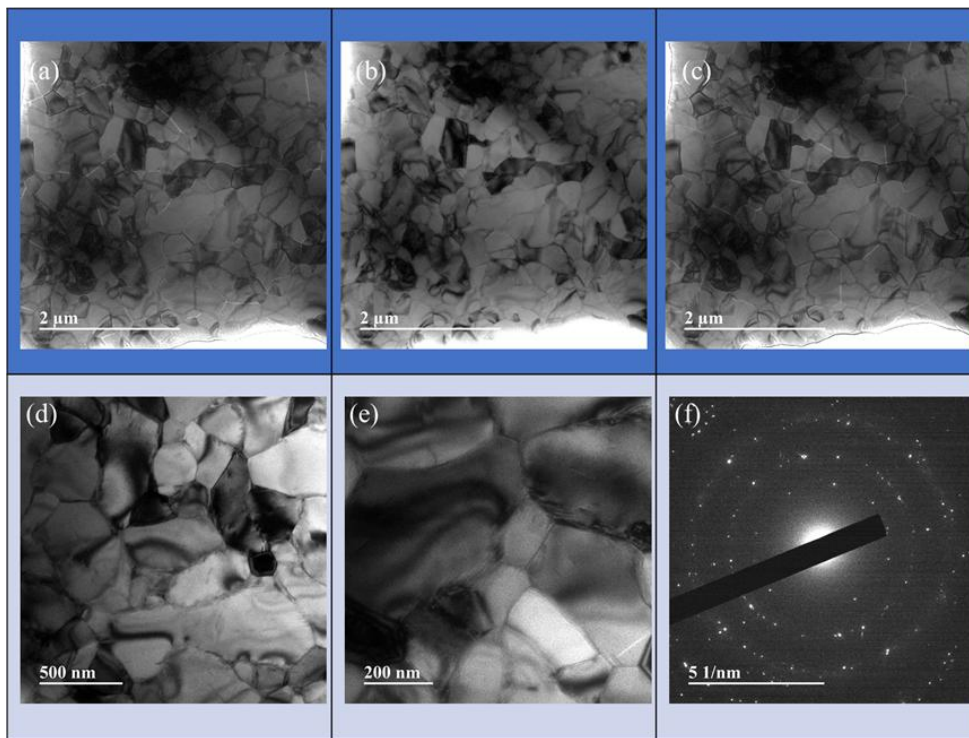


图 5. 50 m/s 下  $\text{CeCo}_5$  薄带的洛伦兹透射电子显微镜 (LTEM) 图像: (a) 欠焦, (b) 正焦, (c) 过焦; (d-e) 正焦 LTEM 放大图像; (f) 选区电子衍射 (SAED) 图谱。

Fig. 5. LTEM images of 50 m/s in  $\text{CeCo}_5$  ribbons. (a) Under-focus, (b) in-focus, and (c) over-focus. (d-e) Enlarged in-focus LTEM image. (f) SAED pattern.

实验观测到的功能梯度特征, 即辊面一侧具有较强织构, 自由面一侧为各向同性的晶粒, 源于凝固过程中的非对称冷却效应。辊轮界面处的快速热抽取促使合金发生定向凝固并形成择优晶面生长, 而自由面一侧冷却速率较慢, 晶粒呈随机形核。这种自组织形成的本征功能梯度, 使本工作制备的  $\text{CeCo}_5$  薄带区别于传统各向同性或均匀织构磁体, 对需要沿厚度方向实现性能梯度分布的粘结磁体与复合磁体具有独特的内在优势。

采用简易高速熔体快淬工艺成功制备出辊面具有显著  $c$  轴面内织构的单相  $\text{CeCo}_5$  纳米磁体。薄带自由面晶粒呈随机取向分布, 使得样品在厚度方向上形成本征的结构梯度与磁性能梯度。该非对称结构特征赋予材料明显的宏观磁各向异性, 辊速 40 m/s 条件下面内剩磁比可达 0.60。中子衍射结果证实样品为  $\text{CaCu}_5$  型晶体结构, 洛伦兹透射电镜观测表明, 随着晶粒尺寸减小, 磁畴由

近单畴状态逐步转变为特征清晰的多畴结构。上述功能梯度源于快淬过程中的温度场分布，表明熔体快淬  $\text{CeCo}_5$  是一种极具应用潜力的低成本功能梯度永磁材料，能够显著降低对关键稀土元素的依赖。

## 4 讨论部分

$\text{CeCo}_5$  作为典型  $\text{CaCu}_5$  型六方结构 1:5 稀土钴化合物，其磁学性能与晶体结构高度耦合，Ce 元素固有的三价/四价混合价态致使 4f 电子局域化减弱、本征原子磁矩趋近于零，体系总磁矩与磁晶各向异性主要由 2c、3g 不等价晶位的 Co 亚晶格贡献，这一电子结构与磁矩分布特征已通过早期中子衍射与能带理论研究得到明确阐释<sup>[21]</sup>。相关高压物理研究表明，同构  $\text{RECo}_5$  体系存在显著磁弹性耦合效应，晶格畸变可诱发磁矩与各向异性协同演化，为通过应变调控优化  $\text{CeCo}_5$  磁性能提供了理论依据<sup>[22]</sup>。近年来熔体快淬与微观改性研究进一步证实，快淬制备可在  $\text{CeCo}_5$  薄带内部形成辊面细晶织构与自由面粗晶无序的原生梯度结构，晶粒尺寸差异化直接驱动磁畴由单畴向多畴组态转变，有效强化畴壁钉扎与宏观磁各向异性<sup>[23-25]</sup>。

本研究围绕“实现  $\text{CeCo}_5$  纳米磁体的结构与磁性能协同调控、开发低稀土依赖型功能梯度永磁材料”的研究目的，采用高速熔体快淬工艺开展制备与表征研究，结合 XRD、中子衍射、PPMS、LTEM 等多种表征手段，系统分析了工艺参数、微观结构与磁性能的内在关联，得出以下重要结论，各结论均有明确实验证据支撑：

1. 高速熔体快淬工艺可高效制备单相  $\text{CeCo}_5$  纳米磁体，且能实现晶体织构的梯度调控。实验证据表明，在 40~50 m/s 辊速下均可获得单相  $\text{CaCu}_5$  型六方结构（空间群  $\text{P6}/\text{mmm}$ ），中子衍射精修得到的晶格参数  $a = 4.952(1) \text{ \AA}$ 、 $c =$

3.979(1) Å 与已有文献报道高度吻合<sup>[20]</sup>；薄带辊面因辊轮界面处高达  $10^6$  K/s 的温度梯度，发生定向凝固并形成显著的  $c$  轴面内择优取向，而自由面冷却速率较慢，晶粒呈随机取向，最终在厚度方向形成本征的微观结构梯度，这一特征区别于传统熔体快淬 RECo<sub>5</sub> 磁体的均匀织构或各向同性结构。

2. 微观结构梯度赋予 CeCo<sub>5</sub> 纳米磁体明确的宏观磁各向异性，且晶粒尺寸调控可实现磁畴结构的可控演化。实验结果显示，40 m/s 辊速下制备的样品面内剩磁比达 0.60，远高于面外的 0.38，这一增强效应源于辊面织构层中  $c$  轴易磁化方向与面内磁场的平行排列，即便织构层仅占薄带厚度的一部分；LTEM 观测证实，随着辊速提高（晶粒尺寸减小），磁畴结构从 40 m/s 时的近单畴（准单畴）逐步转变为 50 m/s 时的波纹状、迷宫状多畴，且出现贯穿多晶粒的穿晶畴壁，表明晶粒细化可增强交换耦合作用与畴壁钉扎效应，这与 YCo<sub>5</sub>、PrCo<sub>5</sub> 快淬薄带的磁畴演化规律一致<sup>[15,20]</sup>，但本研究首次在 CeCo<sub>5</sub> 体系中实现了磁畴结构与功能梯度的协同调控。

3. 熔体快淬 CeCo<sub>5</sub> 纳米磁体具备低成本、低稀土依赖的显著优势，为轻稀土永磁材料的工程化应用提供了新路径。与 SmCo<sub>5</sub>、PrCo<sub>5</sub> 等传统稀土永磁材料相比，Ce 元素资源丰富、成本低廉，且本研究制备的 CeCo<sub>5</sub> 磁体虽因 Ce 混合价态导致 Ce 离子磁矩微弱，但凭借 Co 原子的磁矩贡献（ $2c$  与  $3g$  晶位 Co 磁矩分别为  $0.767(22) \mu_B$  和  $1.255(19) \mu_B$ ），仍保持良好的磁性能；同时，自组织形成的功能梯度结构无需额外复杂工艺，解决了传统 CeCo<sub>5</sub> 磁体矫顽力低、结构均一性差的难题，弥补了现有研究中难以同时实现单相结构、织构调控与梯度特性的不足。

## 5 结 论

综上，本研究通过简易的高速熔体快淬工艺，成功制备出具有结构与磁性能

梯度的单相 CeCo<sub>5</sub> 纳米磁体，明确了温度场分布对织构梯度的调控机制，揭示了微观结构与磁性能、磁畴结构的关联规律，证实了 CeCo<sub>5</sub> 作为低稀土依赖型功能梯度永磁材料的应用潜力，达成了本研究预设的“优化 CeCo<sub>5</sub> 制备工艺、调控其微观结构与磁性能”的研究目的，为轻稀土永磁材料的高性能化、低成本化发展提供了实验依据与技术参考。

## 参考文献

- [1] Polin N, Shen S, Maccari F, Aubert A, Adabifiroozjaei E, Smoliarova T, Yang Y, Chen X, Skourski Y, Saxena A, Kovács A, Dunin-Borkowski R E, Farle M, Xu B X, Molina-Luna L, Gutfleisch O, Gault B, Skokov K 2026 *Acta Mater.* **307** 121906
- [2] Wang H, Zhang D, Li Y, Yang J, Song W, Liu W, Yue M 2023 *J. Alloys Compd.* **934** 168071
- [3] Yang Z, Wang Y, Xu H, Wu Q, Zhang H, Liu W, Yue M 2024 *ACS Appl. Nano Mater.* **7** 4252
- [4] Zhang H, Aubert A, Maccari F, Dietz C, Yue M, Gutfleisch O, Skokov K 2024 *J. Alloys Compd.* **993** 174570
- [5] Sharma S, Hildebrandt E, Major M, Komissinskiy P, Radulov I, Alff L 2018 *J. Magn. Magn. Mater.* **452** 80
- [6] Fartushna I, Mardani M, Khvan A, Cheverikin V, Ivanov D, Kondratiev A, Dinsdale A 2018 *J. Alloys Compd.* **765** 644
- [7] Lamichhane T N, Onyszczak M T, Palasyuk O, Sharikadze S, Kim T H, Lin Q, Kramer M J, McCallum R W, Wysocki A L, Nguyen M C, Antropov V P, Pandey T, Parker D, Bud'ko S L, Canfield P C, Palasyuk A 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11**
- [8] Klein H P, Menth A, Perkins R S 1975 *Physica B+C* **80** 153
- [9] Zhang J J, Gao H M, Yan Y, Bai X, Su F, Wang W Q, Du X B 2012 *J. Magn. Magn. Mater.* **324** 3272
- [10] Lu L, Yan Y, Du X B, Wang W Q, Zhang B, Su F, Zhang Z S, Li S F, Wang F, Jin H M, Xia H 2009 *J. Magn. Magn. Mater.* **321** 2382

- [11] Zhang C, Qian H D, Yang W Y, Han J Z, Chen X G, Yang J B 2025 *Chin. Phys. B* **34** 077501
- [12] Zhang X F, Liu L B, Li Y Q, Zhang D T, Liu W Q, Yue M 2024 *Chin. Phys. B* **33** 097503
- [13] Shi Z H, Hu X Z, Zhou H B, Tian Z Y, Hu F X, Chen Y Z, Sun Z G, Shen B G 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 027501 (in Chinese) [史镇华, 胡新哲, 周厚博, 田正营, 胡凤霞, 陈允忠, 孙志刚, 沈保根 2025 *物理学报* **74** 027501]
- [14] Galindo J T E, Aquino J A M, Davies H A, Liu Z 2005 *J. Magn. Magn. Mater.* **294** e137
- [15] Santana Gil A, Sanchez Ll J L, Valenzuela R, Hernando B, Pérez M J, Santos J D 2007 *J. Magn. Magn. Mater.* **316** e312
- [16] Onyszczyk M T, Lamichhane T N, Bud'ko S L, Canfield P C, Palasyuk A 2019 *J. Magn. Magn. Mater.* **482** 192
- [17] Yan A R, Zhang W Y, Zhang H W, Shen B G 2000 *J. Magn. Magn. Mater.* **210** 10
- [18] Hilleke K P, Fredrickson R T, Vinokur A I, Fredrickson D C 2017 *Cryst. Growth Des.* **17** 1610
- [19] Moze O, Pareti L, Paoluzi A, Buschow K H J 1996 *Phys. Rev. B* **53**, 11550
- [20] Daalderop G H O, Kelly P J, Schuurmans M F H 1996 *Phys. Rev. B* **53** 14415
- [21] Nordström L, Eriksson O, Brooks M S S, Johansson B 1990 *Phys. Rev. B* **41** 9111
- [22] Rosner H, Koudela D, Schwarz U, Handstein A, Hanfland M, Opahle I, Koepf K, Kuz'min M, Müller K H, Mydosh J, Richter M 2006 *Nat. Phys.* **2** 469
- [23] Asali A, Fidler J, Suess D 2019 *J. Magn. Magn. Mater.* **485** 61
- [24] Chang H W, Guo Y M, Liao S H, Chang W C, Shaw C C 2020 *J. Alloys Compd.* **821** 153271
- [25] Chang H W, Ou W C, Lee Y I, Shih C W, Chang W C, Yang C C, Shaw C C 2018 *J. Alloys Compd.* **747** 236

# Crystallographic Texture and Magnetic Anisotropy of CeCo<sub>5</sub> Nanomagnets with Functional Gradient Prepared via a Simple Melt-Spinning Route\*

ZHA Liang<sup>1)†</sup> WANG Fanggui<sup>2)</sup> LIN Zhongchong<sup>3)</sup> YANG Wenyun<sup>5)</sup> DU Honglin<sup>5)</sup> WANG

Changsheng<sup>5)</sup> CHE Renchao<sup>1)4)†</sup> YANG Jinbo<sup>5)†</sup>

1) (College of Physics, Donghua University, Shanghai, 201620, China)

2) (Division of Functional Materials, Central Iron & Steel Research Institute, Hefei 100081, China)

3) (College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou, China)

4) (Laboratory of Advanced Materials, Fudan University, Shanghai, 200438, China)

5) (State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and School of Physics, Peking University,

Beijing 100871, China)

## Abstract

CeCo<sub>5</sub> is an attractive light-rare-earth 1:5 permanent-magnet compound because Ce is abundant and cost-effective, yet its practical development has been hindered by the difficulty of simultaneously controlling phase purity, crystallographic texture, microstructure, and magnetic anisotropy. In this work, single-phase CeCo<sub>5</sub> nanomagnets with a self-organized functional gradient were prepared directly by a simple high-speed melt-spinning route. The precursor ingots were fabricated by arc melting high-purity Ce and Co, followed by melt spinning at wheel speeds of 40 and 50 m/s. Surface-resolved X-ray diffraction reveals that the wheel-side surface develops a pronounced *c*-axis texture with the magnetic easy axis preferentially aligned parallel to the ribbon plane, whereas the free side retains a nearly random grain orientation. This asymmetric crystallographic texture gives rise to clear macroscopic magnetic anisotropy. For the ribbon prepared at 40 m/s, the in-plane remanence ratio reaches  $M_r/M_s = 0.60$ , markedly higher than the out-of-plane value of 0.38; the corresponding values for the 50 m/s ribbon are 0.58 and 0.33, respectively. Neutron diffraction refinement at 293 K confirms the CaCu<sub>5</sub>-type hexagonal structure with space group P6/mmm, lattice parameters  $a = 4.952(1)$  Å and  $c = 3.979(1)$  Å, and a ferromagnetic structure with propagation vector  $k = (0, 0, 0)$ . TEM-based grain-size statistics show that increasing the wheel speed refines the grains from approximately 400 nm at 40 m/s to approximately 300 nm at 50 m/s. Lorentz transmission electron microscopy further reveals the evolution of magnetic domains from weakly contrasted quasi-single-domain features to clear ripple-like and labyrinthine multidomain structures, indicating enhanced exchange coupling and domain-wall pinning in the finer-grained ribbons. The intrinsic functional gradient is attributed to directional solidification induced by rapid heat extraction at the wheel interface and slower cooling near the free surface. These results demonstrate that melt spinning can integrate phase formation, texture engineering, and functional-gradient design in CeCo<sub>5</sub>, providing a scalable route toward low-cost, rare-earth-lean permanent magnets with reduced dependence on critical rare-earth

elements.

**Keywords:** Nanocrystalline Material; Crystallographic orientation; nanoscale magnets;

rare-earth permanent magnets

---

\* Project supported by the Advanced Materials-National Science and Technology Major Project (Grant No. 2025ZD0618000).

† Corresponding author.E-mail: [zhaliang@dhu.edu.cn](mailto:zhaliang@dhu.edu.cn)  
The first author.E-mail: zhaliang@dhu.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿