



低温波荡器定向织构Dy薄片的磁性能

何永周 王杰

Magnetic properties of directional textured dysprosium foils for cryogenic undulator

He Yong-Zhou Wang Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 247502 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210952

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210952>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低温波荡器定向织构 Dy 薄片的磁性能*

何永周^{1)†} 王杰²⁾

1) (中国科学院上海高等研究院, 上海 201204)

2) (中国电子科技集团有限公司, 绵阳西磁磁电有限公司, 绵阳 621000)

(2021 年 5 月 19 日收到; 2021 年 11 月 15 日收到修改稿)

用速凝和连续冷轧方法制备了定向织构 Dy 薄片, 研究了薄片厚度和磁结构等对其磁性能的影响. 结果表明, 速凝 Dy 薄片的磁性能比冷轧 Dy 薄片差, 冷轧 Dy 薄片的磁化强度和磁导率与厚度、温度等密切相关. 在 Dy 的居里温度以下, 冷轧 Dy 薄片具有明显的软磁特征, 从 77 K 下降到 4.2 K, 冷轧 Dy 薄片的饱和磁化强度增大了 5%—8%; 当温度为 4.2 K 时, 0.15 mm 冷轧 Dy 薄片饱和磁化强度达到 2880 kA/m, 0.10 mm 冷轧 Dy 薄片最大磁导率接近 30. 当温度低于 85 K 时, 较大磁场强度下冷轧 Dy 薄片的低温磁化强度大于常规钴钕铁. 定向织构 Dy 薄片的低温磁性能和氧含量及 (0001) 晶面的取向程度密切相关. 本研究为制备低温波荡器大块定向织构 Dy 软磁体奠定了技术工艺及方法原理基础.

关键词: 低温波荡器, 织构 Dy, 冷轧法, 磁性能**PACS:** 75.50.-y, 75.70.-i, 41.85.Lc, 07.20.Mc**DOI:** 10.7498/aps.70.20210952

1 引言

波荡器是同步辐射光源及自由电子激光装置中的关键设备^[1]. 设计研制强磁场短周期波荡器是先进波荡器技术发展的重要趋势, 永磁体 (或超导磁铁) 和软磁体交替排列的低温波荡器在提高磁感应强度的同时能缩短波荡器的周期. 相对常温波荡器, 低温永磁波荡器 (cryogenic permanent magnet undulator, CPMU) 利用钕 (钐) 铁硼在 135 K 及以下深冷低温下剩磁 B_r 大幅度增大的特点, 提高了波荡器的磁感应场强度^[2]. 相对于 CPMU, 超导波荡器 (superconductor undulator, SCU) 利用液氮温度超导线能产生强电流的技术原理, 可获得更强的磁感应强度^[3,4]. 低温波荡器 CPMU 和 SCU 一般都利用饱和磁化强度 M_s 达到 1880 kA/m 的钴钕铁如 1J22 等作为软磁极头, 但钴钕铁在深冷

低温环境下磁性能没有明显的变化, 这使得钕 (钐) 铁硼永磁体深冷低温剩磁 B_r 有较大幅度的增大, 但 CPMU 磁感应强度的增大幅度并没有达到预期的目标; 同理, 即便 SCU 超导线通更强的电流, 由于钴钕铁软磁极头低温磁性能的饱和效应, 使得 SCU 的磁感应强度提升受到明显制约.

综上所述, 设计研制强磁场短周期 CPMU 和 SCU 遇到的一个难点问题是: 作为磁场源的永磁体^[5,6]或超导磁铁和作为聚磁元件的软磁极头在深冷低温环境下磁性能无法同时获得较大幅度的提升. 作为聚磁元件的软磁极头有电工纯铁 DTC4 或钴钕铁 1J22 等^[7], 它们属于典型的软磁材料, $H = 10$ kA/m 数量级磁场强度下的 M_s 分别约 1680 kA/m 和 1880 kA/m, 已对其制备方法、磁性能等进行了大量研究.

低磁场强度下多晶 Dy 的初始磁导率 μ_r 与 M_s 不高, 这使多晶 Dy 仅能应用于较大磁场强度 SCU

* 上海市自然科学基金 (批准号: 19ZR1463700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: heyongzhou@zjlab.org.cn

等设备 [8–10], 但要达到钴钕铁 1J22 的聚磁能力, SCU 需要通更强的电流, 这将大幅度增大热负载、失超等风险; 低磁场强度如 CPMU, 较小初始磁导率使多晶 Dy 的聚磁能力更加弱小. Dy 显著特点是居里点 T_c 约为 85 K, 85 K 以上其磁矩排列为反铁磁性状态; 77 K 以下单晶 Dy 具有极高的 M_s 及较高的 μ_r , 如 4.2 K 温度, M_s 接近 3040 kA/m, 且具有强大的聚磁能力.

目前单晶 Dy 尺寸小且成本昂贵, 限制了其应用价值. 再结晶制备定向织构 fcc 晶格金属或合金 (如 Ni, Fe-Si 等) 已在国内外获得广泛的应用 [11,12], 定向织构是指金属或合金的微晶取向大体指向一个方向, 它的性能和单晶接近. 2014 年前后, 美国布鲁克海文国家实验室等单位 [13], 采用冷轧法制备了定向织构 Dy 薄片软磁, 厚度仅有 0.025–0.06 mm, 因厚度太小使其容易氧化, 需要大功率冷轧机和高真空特殊防氧化退火炉等设备, 批量生产过程中磁性能的一致性受到制约. 要稳定制备高性能大块定向织构 Dy 低温软磁体, 主要工序如下: 1) 制备合格的定向织构 Dy 薄片; 2) 把定向织构 Dy 薄片叠加并利用模具进行压制成型; 3) 对压制成型后相对松散的低密度定向织构 Dy 生毛坯再进行高真空热处理, 形成高密度熟毛坯; 4) 对定向织构 Dy 熟毛坯进行机加工形成应用软磁元件. Dy 在高温及遇到水时的化学性质非常活泼, 易形成 Dy_2O_3 , 难点是在定向织构 Dy 软磁体制备过程中将 Dy_2O_3 含量控制在一个较低值. Dy 薄片和外界环境接触面积大, 绝大多数 Dy_2O_3 都是在第一个工序即定向织构 Dy 薄片制备中产生的, 因此合格的低氧定向织构 Dy 薄片制备是关键技术. 本文探索采用速凝和冷轧法制备 Dy 薄片, 分析了制备方法、薄片厚度、磁结构等对其磁性能变化机制的影响, 为进

一步研究并制备高性能定向织构 Dy 软磁体积累初步的经验.

2 实验方法

实验中采用纯度达到 99.9% 且厚度不超过 1.5 mm 的 Dy 轧制片作为制备实验样品的基材, 见图 1(a). 在氩气浓度达到 99.0% 保护箱中采用特制微型冷轧机对厚度为 1.5 mm 的 Dy 轧制片进行多道冷轧, 0.20–1.5 mm 厚度每次轧制率 5.0%, 0.05–0.20 mm 厚度每次轧制率 10.0%. 常温冷轧法制备的 Dy 薄片实验样品厚度分别为 0.35, 0.15, 0.10, 0.075, 0.05 mm, 见图 1(b). 在真空度达到 10^{-5} Torr ($1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$) 的 XC-500 真空甩带机中, 对厚度 1.5 mm 的 Dy 轧制片在 1500 °C 下进行熔炼, 产生的 Dy 液体喷流到转速为 32 m/s 的铜辊表面急速冷却形成平均厚度约 0.05 mm 的 Dy 速凝薄片. 速凝甩带法制备的 Dy 实验样品薄片厚度为 0.05 mm, 见图 1(c). 然后把几种 Dy 薄片一起放入经过高温本底烘烤的真空热处理炉中进行退火: 1) 把 Dy 薄片放置在特殊设计吸氧钼坩埚里使常温真空度达到 10^{-8} Torr 并保持 1 h; 2) 从 20 °C 加热到 120 °C 并保温 0.5 h 抽水气并使加热真空度也达到 10^{-8} Torr; 3) 从 120 °C 开始, 在 0.5 h 内升温到 1100 °C 并保温 10–15 min, 其中速凝 0.05 mm、冷轧 0.15 mm、冷轧 0.35 mm 三种 Dy 薄片经过 1100 °C/15 min 退火; 冷轧 0.05 mm、冷轧 0.075 mm、冷轧 0.10 mm 三种 Dy 薄片经过 1100 °C/10 min 退火; 4) 从 1100 °C 通过快速冷却至常温, 样品取出后放入真空带中密封用于后续测试分析.

采用日本理学电机株式会社 Rigaku D/max 2200PC 系统测试 Dy 薄片的 XRD 物相; 采用美国

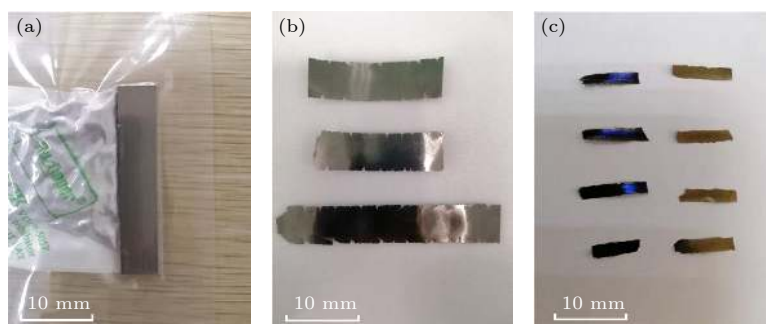


图 1 实验 Dy 样品 (a) Dy 轧制片; (b) 冷轧 Dy 薄片; (c) 速凝 Dy 薄片

Fig. 1. Experiment Dy sample: (a) Dy rolled sheet; (b) cold-rolled Dy foils; (c) strip cooling Dy foils.

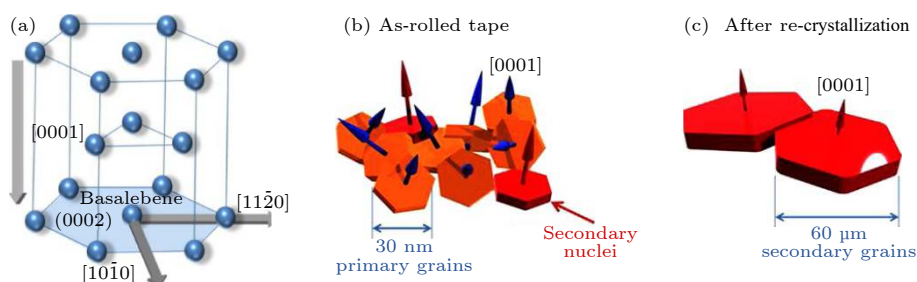


图 2 (a) 单晶 Dy 结构; (b) 冷轧态 Dy; (c) 退火态 Dy

Fig. 2. (a) Three-dimensional structure of single crystal Dy; (b) cold-rolled Dy; (c) annealed Dy.

FEI 公司 Quanta200FEG 观察 Dy 薄片的背散射微观晶粒结构; 采用美国 Quantum Design 综合物性测量系统 PPMS-9T (EC-II) 测量 Dy 薄片的低温磁性能; 采用湖南永逸科技有限公司 FE-2100SD 系统测量常规纯铁及钴钕铁的低温磁性能.

3 结果分析

单晶 Dy 为 hcp 型结构^[14], 见图 2(a), 这种晶体结构具有明显的磁性能各向异性特征. Dy 单晶 [0001] 方向为难磁化方向, 垂直 [0001] 方向有 2 个易磁化方向 $[10\bar{1}0]$, $[11\bar{2}0]$, 其中 $[11\bar{2}0]$ 为最易磁化方向, $[10\bar{1}0]$ 次之. 多晶 Dy 的易磁化方向 $[11\bar{2}0]$ 呈现随机无序状态分布, 低磁场强度下难以被饱和磁化. 为在 CPMU 等设备中能获得应用, 并使 SCU 通同等电流产生的磁场大幅度高于钴钕铁 1J22, 使 Dy 具有强大的低温聚磁能力, 需要外磁场尽量沿 Dy 的易磁化方向 $[11\bar{2}0]$.

Dy 轧制片、速凝 Dy 薄片、冷轧 Dy 薄片未退火前的晶粒尺寸一般小于 100 nm, 这中间少数晶粒已具有良好的定向特征, 称之为一次取向晶粒, 见图 2(b)^[15]. 高真空热处理后, 具有良好的定向特征, 一次取向晶粒相对其他混乱取向晶粒获得了较小能量优势, 以一次取向晶粒为核心, Dy 薄片其他具有较差取向特征的晶粒在退火过程中逐步被合并长大, 使得垂直薄片厚度方向即 [0001] 定向特征大幅度增大, 见图 2(c)^[15]. 退火再结晶后, Dy 薄片中只剩下几十微米且具有良好的定向织构特征二次长大晶粒, 易磁化方向 $[10\bar{1}0]$, $[11\bar{2}0]$ 则基本平行薄片方向.

图 3 为 1.5 mm 轧制 Dy 片、0.05 mm 退火速凝 Dy 薄片、0.05 mm 退火冷轧 Dy 薄片 [0001] 方向的 XRD 图谱. 从 (222) 晶面的衍射强度可看到, 相对轧制 Dy 片与退火冷轧 Dy 薄片, 退火速凝 Dy

薄片有较多氧化物 Dy_2O_3 , 这是磁性能恶化的重要原因之一, 退火速凝 Dy 的 $(10\bar{1}0)$ 晶面有较强衍射峰, 也显示其定向特征不明显. 相对轧制 Dy 片与退火速凝 Dy 薄片, 退火冷轧 Dy 薄片 (0002) 晶面衍射明显增强, $(10\bar{1}2)$, $(10\bar{1}3)$, (0004) 晶面也稍有增强, $(10\bar{1}1)$ 晶面受到明显压制. 因没有多晶 Dy 特有的且明显的 $(11\bar{2}2)$, $(10\bar{1}4)$ 等晶面^[13], 可初步判定作为制备 Dy 薄片基材的 Dy 轧制片, 已具有较好的定向特征. 更直观显示冷轧 Dy 薄片定向程度的是 (0004) 晶面, 相比 Dy 轧制片与退火速凝 Dy 薄片, 冷轧 Dy 薄片的 (0004) 衍射峰强度明显增强, 显示获得了较好的定向织构特征. $(10\bar{1}3)$ 和 (0001) 晶面之间的夹角是 15° , $(10\bar{1}3)$ 可部分反映定向织构 Dy 取向程度, 冷轧 Dy 薄片 $(10\bar{1}3)$ 衍射峰有一定强度, 这说明退火工艺还没有达到最优化的状态.

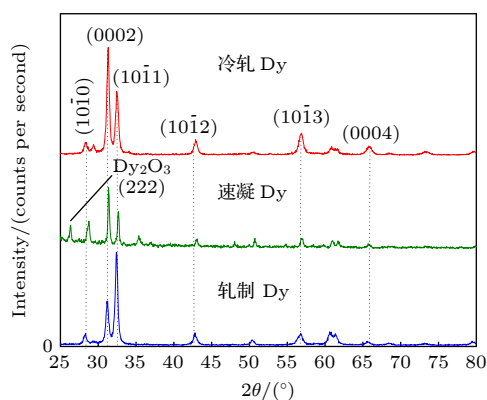


图 3 X 射线衍射图

Fig. 3. X-ray diffraction 2θ scans.

图 4 是冷轧 Dy 薄片退火前后背散射照片, 氧化物 Dy_2O_3 在 Dy 薄片中有广泛的存在, 多数照片中未明显显示, 但在 X 射线衍射图中有明显的 Dy_2O_3 相, 图 4 中一些断断续续且明显可见的斑点状深黑色物质为相对严重且形成较大面积的氧化

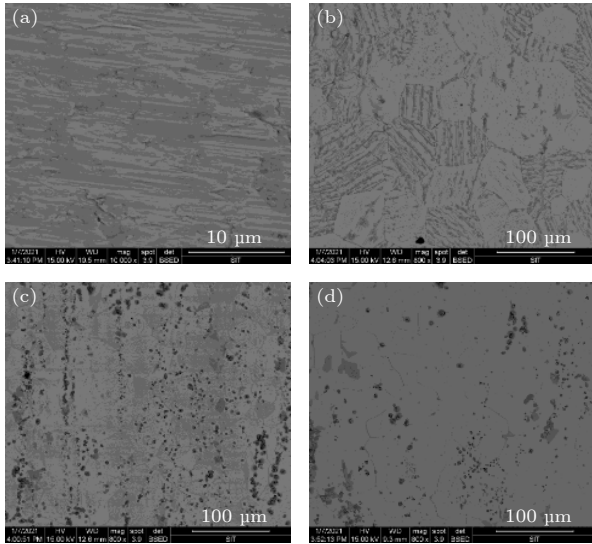
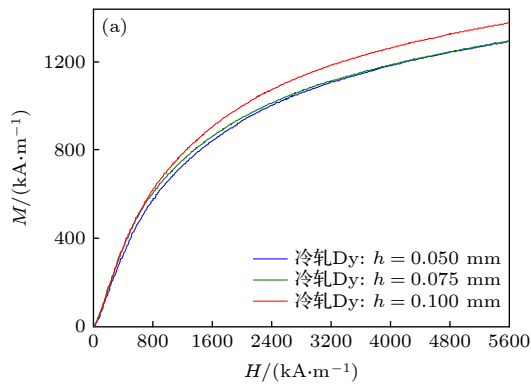


图4 冷轧Dy薄片退火前后的背散射照片 (a) 轧制态Dy; (b) 0.05 mm 退火态Dy; (c) 0.075 mm 退火态Dy; (d) 0.10 mm 退火态Dy

Fig. 4. Backscatter photographs of cold-rolled Dy foils before and after annealing: (a) Rolled Dy; (b) 0.05 mm annealed Dy; (c) 0.075 mm annealed Dy; (d) 0.10 mm annealed Dy.



物 Dy_2O_3 . 从图4(a)可看到, 未退火冷轧Dy薄片的纳米级尺寸晶粒太小, 使得晶界结构几乎没有显示, 但可看到明显的轧制痕迹. 经过高真空退火后, 厚度分别为0.05, 0.075, 0.10 mm冷轧Dy薄片均出现明显的晶粒长大现象, 3种厚度平均晶粒尺寸分别为50, 37.5, 25 μm , 每种厚度冷轧Dy薄片均出现不同程度氧化, 其中厚度0.075 mm的Dy薄片表面 Dy_2O_3 较多. 需要说明的是, 同样是冷轧Dy薄片, 3种厚度Dy薄片的氧化物 Dy_2O_3 含量有明显差异, Dy_2O_3 的形成及体积占比与冷轧制备及高温退火过程中的氧气和水含量控制等密切相关.

图5(a)为4.2 K时垂直薄片[0001]方向3种厚度冷轧Dy薄片低温 M 的变化规律, 可看到Dy薄片难磁化方向在不同磁场 H 条件下的 M 均比较小. 3种厚度冷轧Dy薄片的最大磁导率 μ_m 最大不到2.

图6是77与4.2 K不同状态Dy低温磁化强度 M 的变化趋势. 当温度为77 K时, 从图6(a)可看到, 多晶Dy随 H 增大, 最大 M 接近1200 kA/m,

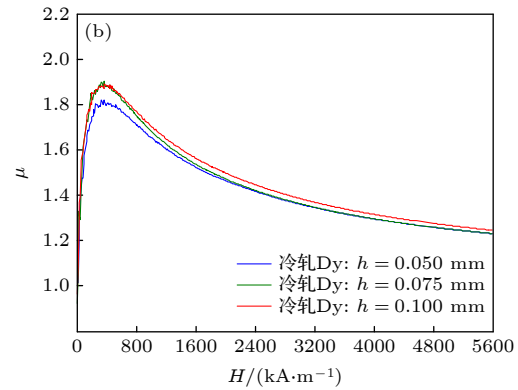


图5 4.2 K时冷轧Dy薄片[0001]方向磁性能 (a) 磁化曲线; (b) 磁导率

Fig. 5. Magnetic properties of [0001] direction for cold-rolled Dy foils at 4.2 K: (a) Magnetization curve; (b) permeability.

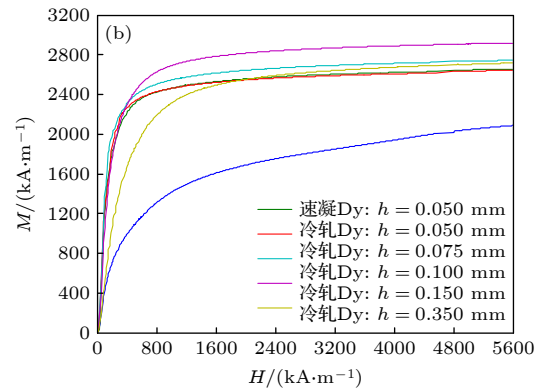
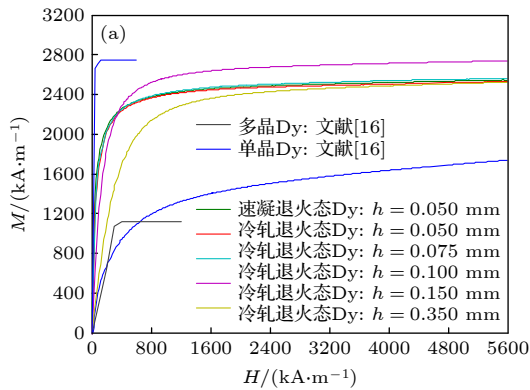


图6 Dy薄片磁化曲线 (a) 77 K; (b) 4.2 K

Fig. 6. Magnetization curves of Dy foils: (a) 77 K; (b) 4.2 K.

单晶 Dy 接近 2800 kA/m; 0.05 mm 退火速凝 Dy 薄片随 H 增大, M 逐步而缓慢的上升, 但在 $H = 5600$ kA/m 情况下最大 M 也仅有 1760 kA/m; 退火冷轧 Dy 薄片随 H 增大, M 均获得大幅度增大, 0.10 及 0.15 mm 冷轧 Dy 薄片 M_s 分别接近 2560 及 2720 kA/m, 和单晶 Dy 几乎接近. 当温度为 4.2 K 时, 从图 6(b) 可看到, 0.05 mm 退火速凝 Dy 薄片随 H 增大, M 逐步上升, 但在 $H = 5600$ kA/m 最大 M 仅有 2080 kA/m; 退火冷轧 Dy 薄片随 H 增大, M 同样获得大幅度增大, 0.10 及 0.15 mm 冷轧 Dy 薄片 M_s 分别接近 2720 及 2880 kA/m. 从 77 K 降低到 4.2 K, 不同厚度冷轧 Dy 薄片在相同 H 的 M 增大幅度为 5%—8%. Dy 高温下易和水及空气反应形成 Dy_2O_3 , 冷轧 Dy 薄片如 0.05, 0.075 mm 的低温磁性能比 0.10, 0.15 mm 冷轧 Dy 薄片差, 可能是因为厚度较小使得氧化形成的 Dy_2O_3 含量相对较高. 0.35 mm 冷轧薄片低温磁性能也欠佳, 可能是未经充分的多道冷轧, 使该厚度冷轧 Dy 薄片具有初始良好定向特征的纳米级尺寸一次取向晶粒比例较少, 退火后冷轧 Dy 薄片以一次取向晶粒为核心形成良好定向织构特征微米级二次长大晶粒的体积占比小, 从而也造成低温磁性能的恶化.

在奈耳温度 $T_N = 178.5$ K 附近, Dy 从顺磁性转变到 Helix 磁有序相, 进一步降温到居里点 $T_c = 85$ K 附近转变为铁磁态^[16], 文献^[13]报道的居里点为 90 K. 图 7(a) 为厚度 0.05 mm 退火冷轧 Dy 薄片在不同磁场 H 条件下低温 M - T 的变化趋势, 外加磁场 H 平行薄片方向. 由图 7(a) 可知, 在 $H = 400, 1600$ kA/m 场强值条件下, 175—200 K 之间冷轧 Dy 薄片 M 均呈现逐步增大的趋势, 显示从

顺磁性转变到 Helix 磁有序相, 这和文献^[16]报道的奈耳温度 T_N 基本一致. 进一步降温到 75—125 K 之间, $H = 400, 1600$ kA/m 场强值时, M 均出现更明显的增大, 逐步呈现铁磁性状态, 预计 Dy 薄片居里点 T_c 在 80—90 K 之间. 从图 7(a) 也可看到, Dy 铁磁性状态和外加磁场强度 H 有明显的关联, 较高 $H = 1600$ kA/m 软磁特征明显强于较低的 $H = 400$ kA/m. 文献^[16]报道, 当足够大的外加磁场强度 H 施加在基平面内的某一方向, Helix 磁有序相将转变到铁磁相, 临界场粗略正比于温度:

$$H_{\text{临界}} = \frac{12\text{kOe} \times (T - 85)}{93.5}. \quad (1)$$

按 (1) 式计算, 温度越高临界场越大, 奈耳温度 $T_N = 178.5$ K 附近, $H_{\text{临界}} = 964.8$ kA/m. 由此可见, 此温度下, $H = 400$ kA/m 尚不足以使冷轧 Dy 薄片从 Helix 磁有序相转变到铁磁相, $H = 1600$ kA/m 远大于 $H_{\text{临界}}$, 从而使冷轧 Dy 薄片从 Helix 磁有序相转变到铁磁相. M - T 曲线的特征表明: 定向织构 Dy 在居里点 T_c 以上温度且低外加磁场强度 H (如 CPMU) 条件下, 软磁特征不是特别的明显. 居里点以下聚磁能力明显的增强, 最大 M 达到 2160 kA/m; 奈耳温度 $T_N = 178.5$ K 附近且高外加磁场强度 H 条件下 (如 SCU), 具有明显软磁特征但优势不是特别显著, 居里点 85 K 以下 M 有明显的增大, 最大 M 可达 2560 kA/m.

图 7(b) 是 77 K 时不同状态单金属 Dy 磁导率变化, 可以看出: 1) 多晶 Dy 与 0.05 mm 退火速凝 Dy 薄片的磁导率均不理想; 2) 单晶 Dy 初始磁导率达到 65 以上; 3) 冷轧退火 Dy 薄片的磁导率均获明显改善, 0.05 与 0.10 mm 冷退火轧 Dy 薄片

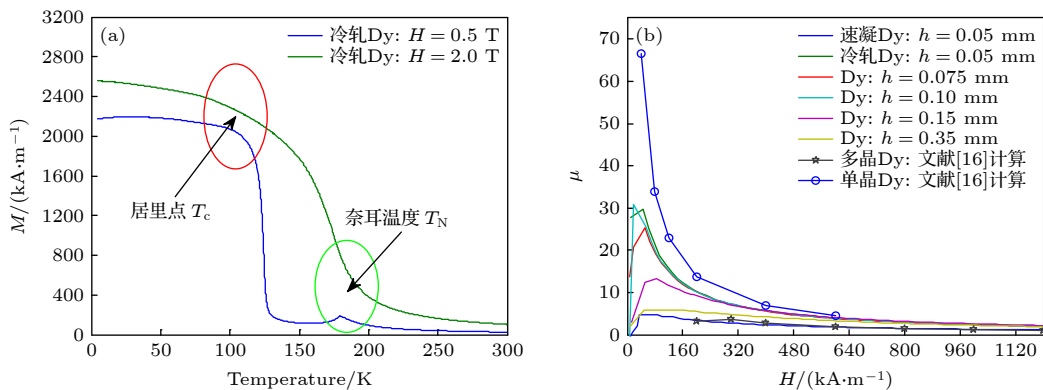


图 7 冷轧 Dy 薄片的磁性能 (a) M - T ; (b) 磁导率@77 K

Fig. 7. Magnetic properties of cold-rolled Dy foils: (a) M - T ; (b) permeability @ 77 K.

初始磁导率接近 30, 0.075 mm 退火冷轧 Dy 薄片磁导率相对较差预计和其氧化有密切关联. 对于 CPMU, 软磁体的磁导率一般要达到 10 以上才有较大的应用价值^[13], 而 0.10 与 0.05 mm 冷轧 Dy 薄片初始磁导率已经接近 30, 这为制备具有实用价值的大块定向织构 Dy 软磁体奠定了基础.

图 8 为本实验获得的两种典型厚度冷轧 Dy 薄片 77 K 磁化曲线 $M-H$, 并和文献^[13]、钴钕铁 1J22 及纯铁 DTC4 比较. 从图 8 可看到, 在较低磁场强度 H 下, 冷轧 Dy 薄片的磁化强度 M 优势不明显, 在较高磁场强度如 $H = 200$ kA/m 以上, 几乎所有冷轧 Dy 薄片的磁化强度 M 均大幅度领先常规钴钕铁 1J22 和纯铁 DTC4, 磁场越高则优势越明显; 在典型磁场强度 $H = 400, 800$ kA/m, 本实验获得的 0.15 mm 冷轧 Dy 薄片的平均 M 比钴钕铁 1J22 对应的 M 分别高约 22.7%, 37.7%. 同为冷轧法制备的 Dy 薄片, 本实验 0.15 mm 薄片和文献^[16]的 0.06 mm 薄片的 M_s 几乎一样, 但初始磁导率有所差异; 本实验 0.10 mm 厚度 Dy 薄片和文献^[13]给与的 0.06 和 0.025 mm 的 Dy 薄片 M 有所差异, 但初始磁导率几乎一致. CPMU 磁场源的磁场强度 H 约为 800 kA/m, SCU 磁场源的磁场强度 H 远大于 800 kA/m, 由图 8 可看到, 冷轧 Dy 薄片预计在这两种低温波荡器中将有良好的应用前景.

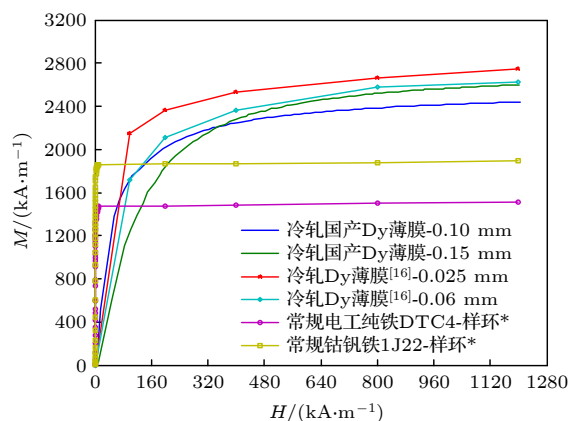


图 8 77 K 冷轧 Dy 薄片与常规软磁的磁化曲线. *1J22 与 DTC4 磁化曲线测试样环: $\Phi 28$ mm \times $\Phi 20$ mm \times 5 mm, $H \leq 0.0125$ T 为实测数据, $H \geq 0.0125$ T 为推测数据

Fig. 8. $M-H$ curves of cold-rolled Dy foils and conventional soft magnet at 77 K. * ring for $M-H$ curve of conventional 1J22 and DTC4: $\Phi 28$ mm \times $\Phi 20$ mm \times 5 mm, $M-H$ curves with $H \leq 0.0125$ T are measured data, and the $M-H$ curves with $H \geq 0.0125$ T are calculated data.

4 总 结

本文用冷轧法和速凝法制备了 Dy 薄片, 经过高真空退火得到具有不同程度软磁特征的定向织构 Dy 薄片. 速凝 Dy 薄片因严重氧化且制备方法缺陷未形成具有明显定向晶粒使其低温磁性欠佳, 冷轧 Dy 薄片经过高真空退火后晶粒具有更加明显的定向织构特征, 低温磁性能相对较好. 从 77 K 下降到 4.2 K, 不同厚度冷轧 Dy 薄片的 M_s 增大了 5%—8%. 相对其他厚度, 厚度分别为 0.10, 0.15 mm 的冷轧 Dy 薄片 M_s 较高, 厚度 0.15 mm 的冷轧 Dy 薄片 4.2 K 时最大 M_s 达到 2880 kA/m, 接近 Dy 单晶的 3040 kA/m. 77 K 温度时, 不同厚度冷轧 Dy 薄片的磁导率差异较大, 厚度 0.10 mm 冷轧 Dy 薄片的磁导率相对较好, 最大磁导率接近 30; 外加磁场强度 H 大于 200 kA/m 条件下, 本实验获得的两种典型厚度 0.10 和 0.15 mm 冷轧 Dy 薄片的磁化强度 M 均大幅度领先常规钴钕铁 1J22.

不同厚度冷轧 Dy 薄片磁性能差异的重要原因是: 厚度太小, 经过更多次充分冷轧后 Dy 薄片中的一次取向晶粒形核多, 使退火后形成的二次长大取向晶粒较多, 但氧化物 Dy_2O_3 占 Dy 薄片的总体积比较大, 造成整体磁性能下降. 厚度过大, 氧化物 Dy_2O_3 占 Dy 薄片的总体积比虽少一点, 但有较大比例的 Dy 由于未经过充分冷轧, Dy 薄片中的一次取向晶粒形核不多, 造成退火后形成的二次长大取向晶粒较少, 使得 Dy 薄片整体磁性能也有所下降. 如何控制 Dy 薄片中的氧化物 Dy_2O_3 和取向良好二次长大晶粒占退火后 Dy 薄片的体积比例, 是后续需要深入研究的问题.

参考文献

- [1] Mai Z H 2013 *Synchrotron Radiation and its Applications* (Beijing: Science Press) p90 (in Chinese) [麦振洪 2013 同步辐射光源及其应用 (北京: 科学出版社) 第 90 页]
- [2] He Y Z 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [何永周 2015 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [3] Grau A, Casalbuoni S, Gerstl S, Glamann N, Holubek T, Saez de Jauregui D, Voutta R, Boffo C, Gerhard T, Turenne M, Walter W 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 4100804
- [4] Bahrdt J, Gluskin E 2018 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **907** 149
- [5] Zhou S H, Dong Q F 1999 *Super Power Permanent Magnet* (Beijing: Metallurgical Industry Press) p283 (in Chinese) [周寿增, 董清飞 1999 超强永磁体 (北京: 冶金工业出版社) 第 283 页]

- [6] Zhong W D 2008 *Technical Magnetism*. (Beijing: Science Press) p2 (in Chinese) [钟文定 2008 技术磁学 (北京: 科学出版社) 第2页]
- [7] Chen C W 1961 *J. Appl. Phys.* **32** S348
- [8] Barlow D B, Kraus R H, Lobb C T, Menzel M T, Walstrom P L 1992 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **313** 311
- [9] Bird M D, Bole S, Dixon I, Eyssa Y M, Gao B J, Schneider-Muntau H J 2001 *Phys. B: Condens. Matter.* **294** 639
- [10] Gottschalk S C, Pindroh A L, Quimby D C, Robinson K E, Slater J M 1991 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **304** 732
- [11] Larbalestier D, Gurevich A, Feldmann D M, Polyanskii A 2001 *Nature* **414** 368
- [12] Mishra S, Därmann C, Lütke K 1984 *Acta. Metall.* **32** 2185
- [13] Murokn A, Solovyov V, Agustsson R, O'Shea F H, Chubar O, Chen Y, Grandsaert T 2014 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **735** 521
- [14] Rhyne J J, Clark A E 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 1379
- [15] Swift W, Mathur M 1974 *IEEE Trans. Magn.* **10** 308
- [16] Dai W 1995 *J. Hebei Normal Univ.: Nat. Sci. Ed.* **19** 51 (in Chinese) [戴闻 1995 河北师范大学学报 (自然科学版) **19** 51]

Magnetic properties of directional textured dysprosium foils for cryogenic undulator*

He Yong-Zhou^{1)†} Wang Jie²⁾

1) (Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

2) (Mianyang Westmag Magnetism & Electricity Co., Ltd, China Electronics Technology Group, Mianyang 621000, China)

(Received 19 May 2021; revised manuscript received 15 November 2021)

Abstract

Directional textured dysprosium foils are fabricated by rapid solidification and sequential cold rolling, and the influences of their thickness values and magnetic structures on magnetic properties are analyzed and studied. The results show that magnetic properties of cold-rolled dysprosium foils are better than those of rapid solidification dysprosium foils, and the magnetization and permeability for each of the cold-rolled dysprosium foils are related to the thickness and temperature. Below Curie temperature, the cold-rolled dysprosium foils have obvious soft magnetic properties in a temperature range from 77 K to 4.2 K, the saturation magnetization for each of cold-rolled dysprosium foils increases by 5%—8%, and the saturation magnetization of 0.15-mm-thick cold-rolled dysprosium foil arrives at 2880 kA/m at 4.2 K, and the maximum permeability of cold-rolled 0.10-mm-thick dysprosium foil approaches to 30. The cryogenic magnetization of cold-rolled dysprosium foil with a strong external magnetic field is higher than that of conventional Co-V-Fe below 85 K. The cryogenic magnetic properties of textured dysprosium foils are related to the oxygen content and the orientation degree of (0001) crystal plane. The present study lays the foundation of technology and principle for preparing the chunky directional textured dysprosium soft magnet for cryogenic undulator.

Keywords: cryogenic undulator, texture Dy, cold rolling, magnetic properties.

PACS: 75.50.-y, 75.70.-i, 41.85.Lc, 07.20.Mc

DOI: 10.7498/aps.70.20210952

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 19ZR1463700).

† Corresponding author. E-mail: heyongzhou@zjlab.org.cn