

# Nd-Fe-B磁环反向热挤压成型工艺及性能调控

郑立允<sup>1\*</sup>, 杜峰<sup>1,2</sup>, 李雅婧<sup>1,2</sup>, 赵立新<sup>1,2</sup>, 左思源<sup>1</sup>, 赵树国<sup>3</sup>, 方以坤<sup>4</sup>, 左志军<sup>5</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学, 稀土永磁材料与应用河北省工程研究中心, 河北 邯郸

<sup>2</sup>河北工程大学, 机械与装备工程学院, 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>钢铁研究总院有限公司, 功能材料研究院, 北京

<sup>5</sup>廊坊京磁精密材料有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2024年10月25日; 录用日期: 2024年11月27日; 发布日期: 2024年12月4日

## 摘要

采用反向热挤压技术, 制备了外径39.5 mm、壁厚4.5 mm的Nd-Fe-B磁环, 研究了挤压速度、变形压力和模具结构对反向热挤压Nd-Fe-B磁环磁性能、微观组织和相结构的影响, 结果表明, 随着挤压速度、变形压力的提高, 磁环的磁性能先增大后减小, 挤压速度0.05 mm/s、变形压力164 MPa下制备的磁环磁性能最佳, 剩磁、矫顽力和最大磁能积分别为12.385 kGs、10.705 kOe、32.808 MGOe。采用具有凸台结构的反向热挤压模具制备的Nd-Fe-B永磁环比常规的反向热挤压模具制备的磁环的矫顽力更高且磁性能轴向均匀性更好。

## 关键词

反向热挤压, Nd-Fe-B磁环, 磁性能, 凸台结构, 轴向均匀性

# Tuning of Forming Process and Properties of Backward Hot-Extruded Nd-Fe-B Magnetic Ring

Liyun Zheng<sup>1\*</sup>, Feng Du<sup>1,2</sup>, Yajing Li<sup>1,2</sup>, Lixin Zhao<sup>1,2</sup>, Siyuan Zuo<sup>1</sup>, Shuguo Zhao<sup>3</sup>, Yikun Fang<sup>4</sup>, Zhijun Zuo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Hebei Engineering Research Centre for Rare Earth Permanent Magnetic Materials & Applications, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

<sup>2</sup>School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

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

<sup>4</sup>Department of Functional Materials Research, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing

<sup>5</sup>Langfang Jingci Precision Materials Co., Ltd., Langfang Hebei

\*通讯作者。

文章引用: 郑立允, 杜峰, 李雅婧, 赵立新, 左思源, 赵树国, 方以坤, 左志军. Nd-Fe-B 磁环反向热挤压成型工艺及性能调控[J]. 材料科学, 2024, 14(12): 1672-1680. DOI: 10.12677/ms.2024.1412181

## Abstract

Nd-Fe-B magnetic ring with outer diameter of 39.5 mm and wall thickness of 4.5 mm was prepared by backward hot-extrusion technology. The effects of extrusion speed, deformation pressure and mold structure on the magnetic properties, microstructure and phase structure of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic ring were studied. The results showed that, with the increase of extrusion speed and deformation stress, the magnetic properties of the magnetic ring increased first and then decreased. The magnetic properties of the magnetic ring prepared using an extrusion speed of 0.05 mm/s and a deformation pressure of 164 MPa were the best, and its remanence, coercivity and maximum magnetic energy product were 12.385 kGs, 10.705 kOe and 32.808 MGOe, respectively. The Nd-Fe-B permanent magnet prepared by the backward hot-extrusion mold with a boss structure has higher coercivity and better axial uniformity of magnetic properties than the magnetic ring prepared by the conventional backward hot-extrusion mold.

## Keywords

Backward Hot-Extrusion, Nd-Fe-B Magnetic Ring, Magnetic Properties, Boss Structure, Axial Uniformity

Copyright © 2024 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

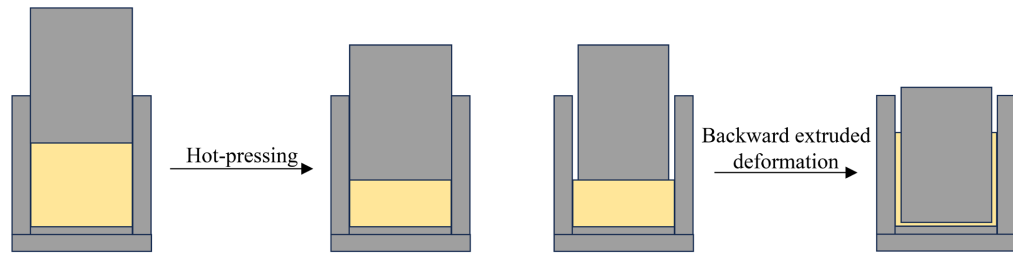
## 1. 引言

随着科学技术的飞速发展和人民生活水平的不断提高, 新型永磁电机被广泛应用于各行各业[1]-[3]。永磁环是永磁电机中的核心部件, 磁环性能的好坏决定着电机的工作效率及稳定性。目前, 永磁环的制备方法主要有粘结永磁环、粉末烧结永磁环。但粘结法制备的磁环虽然具有良好的成型性, 但磁性偏低, 并且由于受到粘接剂的制约其使用温度受到了很大限制。采用粉末冶金方法制备的辐射取向烧结永磁环, 由于取向磁场的限制, 磁环的尺寸受到极大限制, 难以实现高壁、薄壁磁环的制备, 同时由于粉末冶金烧结过程中大量收缩, 磁环易开裂, 难以制备辐射取向均匀一致的磁环[4] [5]。近年来, 新开发了一种热挤压制备高性能辐射取向永磁环的方法, 热挤压成型工艺制备出的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环具有优异的磁性能、耐高温、耐腐蚀性, 最重要的是热挤压制备出的 Nd-Fe-B 磁环不需要外磁场进行取向, 具有近终成型的特点[6]-[9]。本文采用反向热挤压成型工艺制备辐射取向的 Nd-Fe-B 磁环, 探究了挤压速度、变形压力及模具中的垫片结构对反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环晶体结构、磁性能、均匀性的影响。

## 2. 实验方案

实验使用的原料是名义成分为  $\text{Nd}_{29.1}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{63.66}\text{Co}_{5.5}\text{Ga}_{0.5}\text{Dy}_{0.01}\text{B}_{0.87}$  的商用 MQU-F1 快淬磁粉, 在温度 550℃、压力 98 MPa、压速 0.4 mm/s 条件下同时加热加压获得磁体毛坯, 在 800℃、压力 128 MPa~164 MPa、挤压速度 0.3 mm/s~0.07 mm/s 进行反向热挤压制备 Nd-Fe-B 永磁环。工艺流程如图 1 所示。为了更好地分析 Nd-Fe-B 磁环的显微组织和磁性能, 在磁环壁上不同高度处取样, 采用振动样品磁强计(VSM)沿样品径向测试其径向方向的磁性能, 采用 X 射线衍射仪(XRD)和扫描电镜(SEM)分别对样品垂直于和

平行于径向方向的面进行测试，分析磁环的相结构和微观组织结构。

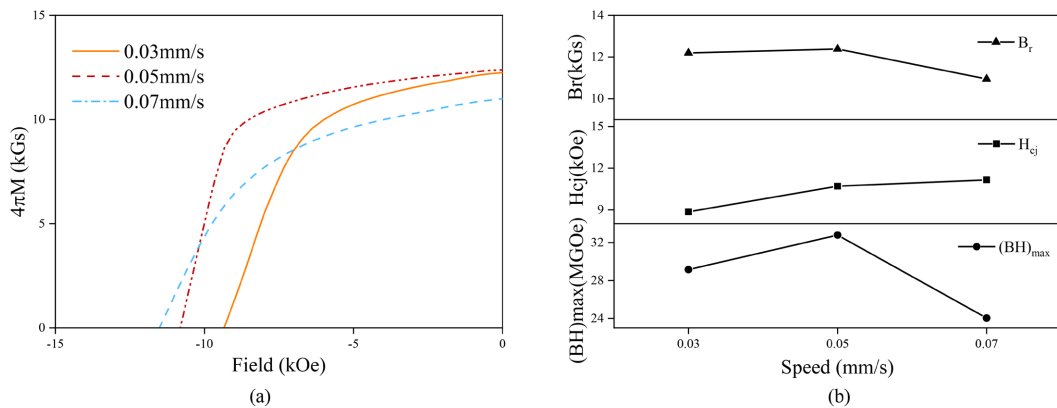


**Figure 1.** Backward hot-extruded Nd-Fe-B permanent magnet ring process flow  
**图 1.** 反向热挤压 Nd-Fe-B 永磁环工艺流程

### 3. 实验结果与讨论

#### 3.1. 挤压速度对反挤压 Nd-Fe-B 磁环组织及性能的影响

图 2 所示为挤压速度分别为 0.03 mm/s、0.05 mm/s、0.07 mm/s 的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环中部位置试样的退磁曲线和磁性能图，由图 2(a)可以看出，挤压速度为 0.05 mm/s 的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环样品的剩磁最高，挤压速度为 0.03 mm/s 的磁环样品次之，挤压速度为 0.07 mm/s 的磁环样品的剩磁最低。而矫顽力变化正好相反，挤压速度为 0.07 mm/s 的磁环样品矫顽力最佳，0.03 mm/s 的磁环样品矫顽力最低。由图 2(b)可以看出，随着挤压速度的增加，磁环样品的剩磁  $B_r$  呈先升高后降低的趋势，挤压速度为 0.05 mm/s 的剩磁  $B_r$  最高， $B_r = 12.385$  kGs，与挤压速度 0.03 mm/s 的磁环样品剩磁  $B_r$  相差较小，而挤压速度为 0.07 mm/s 的磁环样品的剩磁  $B_r$  明显低于前两者，这可能是由于相对较慢的挤压速度可以消除磁环在挤压过程中产生的部分内应力，形变更加均匀，因此具有更高的剩磁  $B_r$ 。磁环样品的矫顽力  $H_{cj}$  的变化趋势与剩磁  $B_r$  相反，矫顽力  $H_{cj}$  的大小与磁环的挤压速度成反比，挤压速度为 0.07 mm/s 的磁环样品矫顽力  $H_{cj}$  最高， $H_{cj} = 11.158$  kOe，通过分析实验过程发现，挤压速度的不同，导致磁环在热挤压过程中的变形时间不同。挤压速度越慢，变形时间越长，磁环在高温下变形时间过长会导致晶粒的粗大，从而造成矫顽力  $H_{cj}$  的降低。最大磁能积  $(BH)_{max}$  的变化趋势与剩磁  $B_r$  相同，都是先增加后降低，挤压速度为 0.05 mm/s 磁环样品的最大磁能积  $(BH)_{max}$  最高， $(BH)_{max} = 32.808$  MGOe (如表 1 所示)，通过综合对比发现，挤压速度为 0.05 mm/s 所制备的 Nd-Fe-B 磁环磁性能最佳。

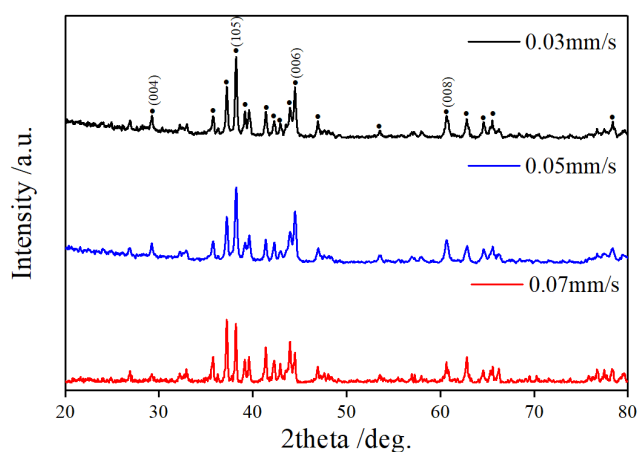


**Figure 2.** Demagnetization curves and magnetic properties of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different extrusion speeds ((a): demagnetization curves; (b): magnetic properties)  
**图 2.** 不同挤压速度的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环退磁曲线和磁性能((a): 退磁曲线; (b): 磁性能)

**Table 1.** Radial magnetic properties of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different extrusion speeds  
**表 1.** 不同挤压速度的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环径向磁性能

挤压速度/mm/s	$B_r$ /kGs	$H_{cj}$ /kOe	$(BH)_{max}$ /MGOe
0.03	12.195	8.856	29.153
0.05	12.385	10.705	32.808
0.07	10.95	11.158	24.041

图 3 所示为挤压速度分别为 0.03 mm/s、0.05 mm/s、0.07 mm/s 的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环中部位置试样的 XRD 图谱。由图可以明显看出，不同挤压速度的 Nd-Fe-B 磁环样品都形成了(004)、(105)、(006)以及(008)衍射峰，这些衍射峰反映出磁环的内部形成了织构。通过测量反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环中的  $Nd_2Fe_{14}B$  主相(006)衍射峰和(105)衍射峰强度的比值  $I_{(006)}/I_{(105)}$ 来衡量织构的强度。通过分析，挤压速度为 0.03 mm/s、0.05 mm/s、0.07 mm/s 的峰强比  $I_{(006)}/I_{(105)}$ 分别为 0.6667、0.7364、0.5208，通过对比可以发现挤压速度为 0.05 mm/s 磁环样品的峰强比高于 0.03 mm/s 和 0.07 mm/s，说明挤压速度为 0.05 mm/s 磁环样品的织构强度高于 0.03 mm/s 和 0.07 mm/s，与剩磁的变化一致，由此可以解释挤压速度为 0.05 mm/s 磁环样品的剩磁  $B_r$  最佳的原因。

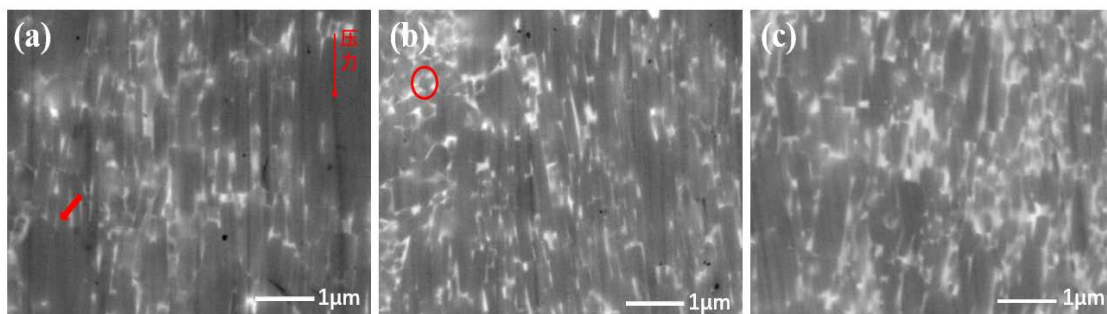


**Figure 3.** XRD patterns of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different extrusion speeds

**图 3.** 不同挤压速度的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环 XRD 图谱

图 4 所示为挤压速度分别为 0.03 mm/s、0.05 mm/s、0.07 mm/s 的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环中部位置试样的 SEM 图。图 4(a)中垂直的箭头方向是挤压力方向，从图中可以看出，不同挤压速度的磁环试样均形成了一定程度的织构，挤压速度为 0.03 mm/s 和 0.05 mm/s 的磁环试样的晶粒排列更加规则，易磁化 c 轴方向基本垂直于挤压力方向(如图 4(a)和图 4(b))，而 0.07 mm/s 的磁环试样的晶粒排列较为混乱且 c 轴方向在垂直于挤压力方向产生了一定角度的偏移(如图 4(c))。图 4(b)红色圆圈所示为未发生变形呈各向同性的等轴晶粒，挤压速度为 0.05 mm/s 和 0.07 mm/s 的磁环试样均产生了数量不等的等轴晶粒，这可能是由于挤压速度的提高，毛坯变形不充分导致部分晶粒未形变成各向异性的片状晶。通过 nano measurer 软件对晶粒尺寸的测量统计，挤压速度为 0.03 mm/s、0.05 mm/s、0.07 mm/s 磁环的晶粒尺寸范围分别为 110 nm~630 nm、60 nm~490 nm、70 nm~390 nm。图 4(a)中红色粗箭头所指为粗大晶粒，三种挤压速度均产生了粗大晶粒，图 4(a)~(c)中磁环的粗大晶粒尺寸分别高达 0.63  $\mu\text{m}$ 、0.49  $\mu\text{m}$ 、0.39  $\mu\text{m}$ ，挤压速度为 0.03 mm/s 的磁环内部产生的粗大晶粒数量更多，尺寸更大，而挤压速度为 0.05 mm/s 和 0.07 mm/s 的粗大晶

粒数量较少且尺寸较小，这可能是由于挤压速度越慢，磁环在高温下挤压的时间越长，导致了晶粒的粗化，从而影响磁环的矫顽力。

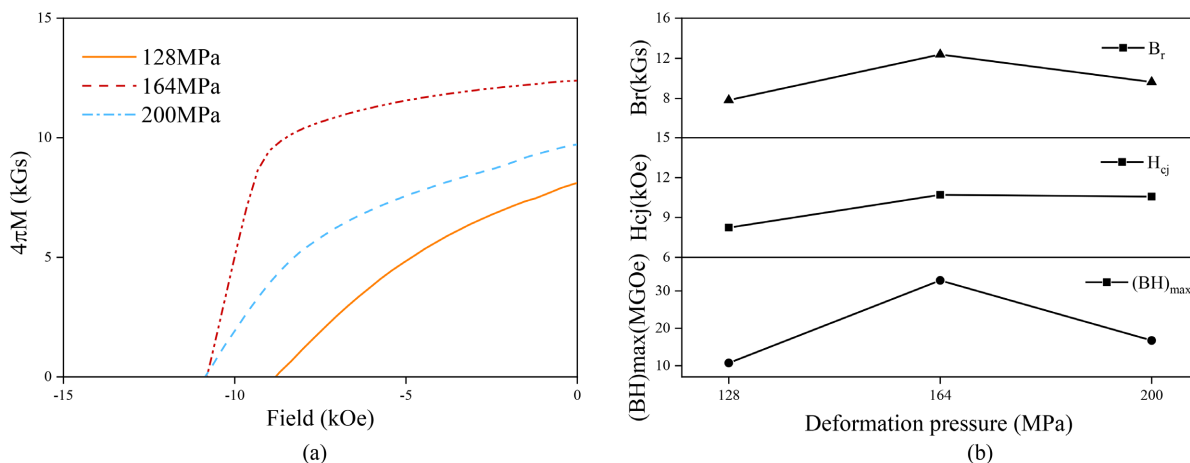


**Figure 4.** SEM images of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different extrusion speeds ((a): 0.03 mm/s; (b): 0.05 mm/s; (c): 0.07 mm/s)

**图 4.** 不同挤压速度的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环 SEM 图((a): 0.03 mm/s; (b): 0.05 mm/s; (c): 0.07 mm/s)

### 3.2. 变形压力对反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环组织及性能的影响

图 5 和表 2 为不同变形压力下制备的反挤压 Nd-Fe-B 磁环的退磁曲线和磁性能，由图 5(a)可知，在变形压力为 164 MPa 时制备的磁环的剩磁最高。由图 5(b)可知，变形压力 164 MPa 的磁环样品的磁性能明显优于其它两种压力下制备的磁环样品。挤压速度相同时，变形压力越小，越不利于坯料的流动，导致变形时间越长。在高温下过长的变形时间会导致晶粒的粗化，因此变形压力为 128 MPa 时矫顽力最低。



**Figure 5.** Demagnetization curves and magnetic properties of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different deformation pressure((a): demagnetization curves; (b): magnetic properties)

**图 5.** 不同变形压力的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环退磁曲线和磁性能((a): 退磁曲线; (b): 磁性能)

**Table 2.** Radial magnetic properties of the backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different deformation pressure  
**表 2.** 不同变形压力的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环径向磁性能

变形压力/MPa	$B_r$ /kGs	$H_{cj}$ /kOe	$(BH)_{max}$ /MGOe
128	7.844	8.236	10.706
164	12.385	10.705	32.808
200	9.645	10.569	16.738

图 6 所示为不同变形压力制备的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环的 XRD 图谱, 由 XRD 图谱可以看到, 变形压力 128 MPa 和 200 MPa 的磁环样品的 XRD 图谱中(105)和(006)两个衍射峰明显低于变形压力 164 MPa 的磁环样品。通过对比发现, 变形压力 128 MPa、164 MPa、200 MPa 磁环的峰强比  $I_{(006)}/I_{(105)}$  分别为 0.58、0.71、0.62, 这就说明在变形压力 164 MPa 下进行变形的磁环的组织强度优于 128 MPa 和 200 MPa 的磁环, 在剩磁  $B_r$  上表现出变形压力 164 MPa 的磁环剩磁更高。

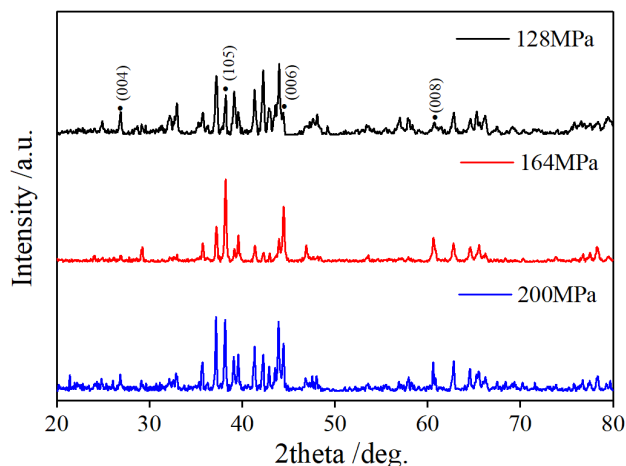


Figure 6. XRD patterns of the backward-extruded Nd-Fe-B magnetic rings prepared at different deformation pressure

图 6. 不同变形压力的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环 XRD 图谱

图 7 所示是变形压力 128 MPa、164 MPa、200 MPa 的反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环的微观形貌。由图 7(a)可以看出, 压力 128 MPa 的磁环样品中片状晶粒排列混乱, 而图 7(b)、图 7(c)中的片状晶粒排列及晶粒取向更加规则。不同变形压力制备的磁环中晶粒的取向并不完全按照径向取向, 并且存在若干红色箭头所示数量不等的粗大晶粒, 这些粗大的颗粒会阻碍晶粒的取向, 这可能是导致压力 128 MPa 的磁环样品晶粒排列混乱剩磁  $B_r$  低的原因。此外, 我们发现压力 128 MPa、164 MPa、200 MPa 的磁环中晶粒尺寸范围分别为 300 nm~510 nm、150 nm~300 nm、200 nm~500 nm, 压力 164 MPa 的磁环样品晶粒相对更加细小。因此磁性能上的差异是由于反向热挤压变形时坯料在高温下停留的时间过长引起的晶粒粗化造成的。

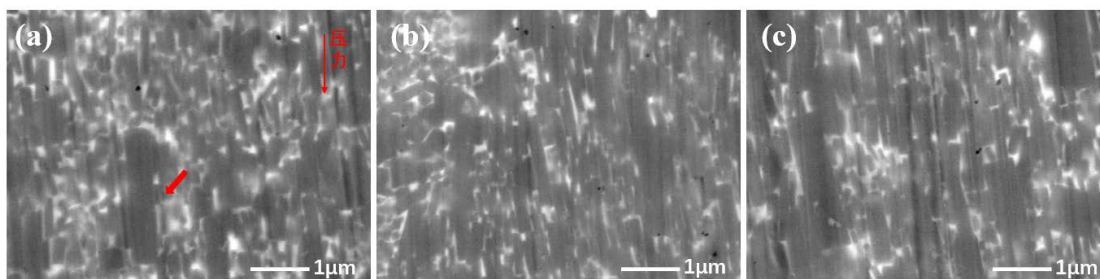


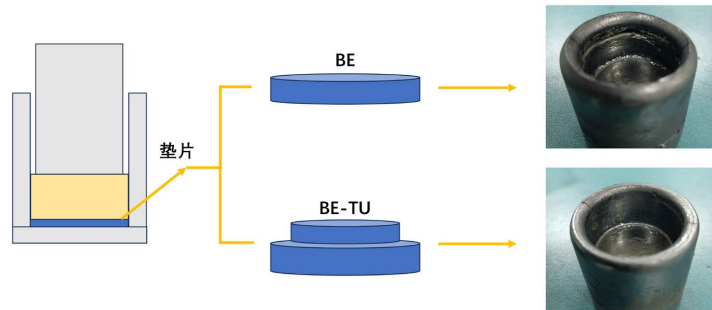
Figure 7. SEM images of the backward-extruded Nd-Fe-B magnetic ring with deformation pressure ((a): 128 MPa; (b): 164 MPa; (c): 200 MPa)

图 7. 变形压力的反挤压 Nd-Fe-B 磁环 SEM 图((a): 128 MPa; (b): 164 MPa; (c): 200 MPa)

### 3.3. 垫片结构对反挤压 Nd-Fe-B 磁环组织及性能的影响

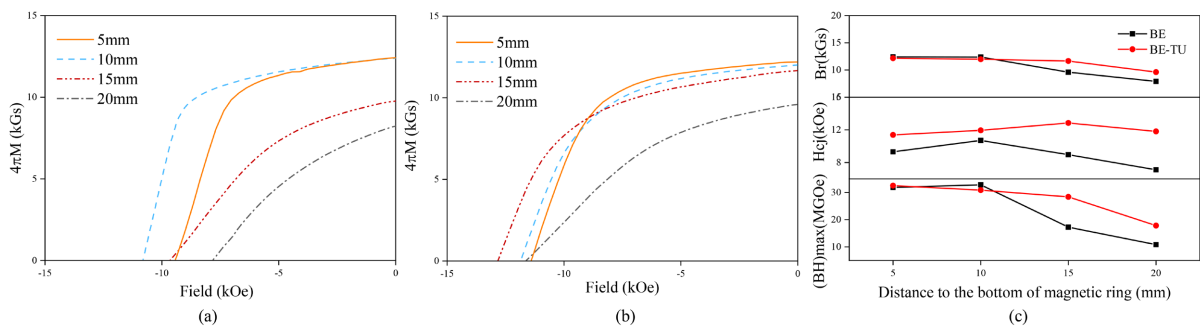
通过实验, 发现反向热挤压模具(BE)在热挤压过程中, 磁环内壁产生的裂纹明显, 为改善这一现象,

设计一种垫片上端面带有一个向上凸起的凸台(如图 8 所示), 称之为凸台型反向热挤压(BE-TU), 与模套内壁形成环形凹槽, 挤压过程中可以促进坯料的正向流动, 增加死区材料的应变, 从而改善坯料内壁裂纹的问题。



**Figure 8.** Two kinds of the backward hot-extruded mold and the prepared corresponding magnetic rings  
**图 8.** 两种反向热挤压模具及制备的相应磁环

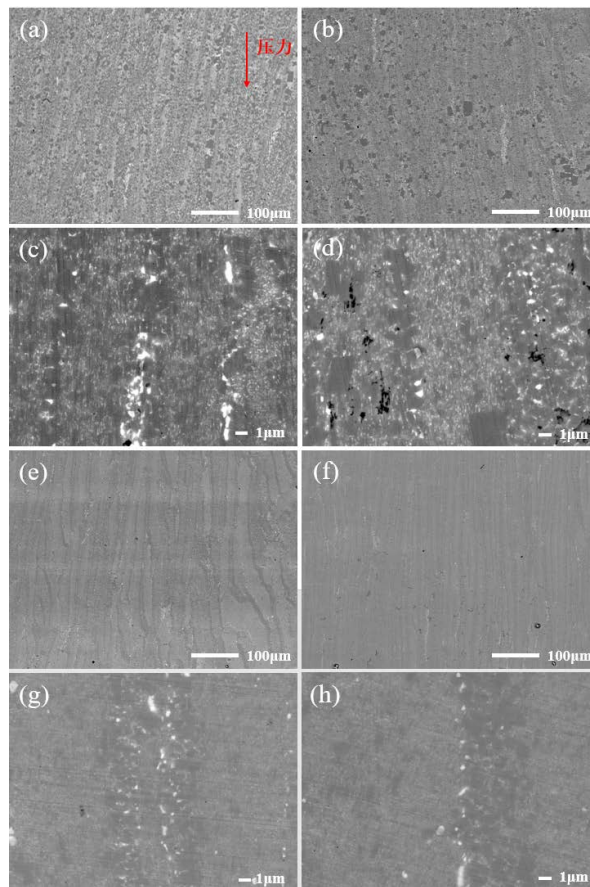
BE 和 BE-TU 两种反向热挤压在工艺参数为挤压温度 800℃, 挤压速度 0.05 mm/s 制备出了高度分别为 33 mm 和 32 mm 的 Nd-Fe-B 永磁环, 由图 8 可以看出, BE 磁环内壁裂纹较明显, 底部裂纹较深, 而 BE-TU 磁环底部裂纹有了明显改善。由表 3 可知, 其中 BE 磁环样品最大磁能积在 25 MGOe 以上的高度为 5 mm, 占磁环高度 15%, BE-TU 磁环样品最大磁能积在 25 MGOe 以上的高度为 10 mm, 占磁环高度 31%。图 9 所示为磁环距底部不同位置试样的退磁曲线和磁性能图, 从图 9(a)中可以看出, 常规型反向热挤压 BE 制备的磁环距底部 5 mm 和 10 mm 位置的剩磁最高, 距底部 20 mm 位置的剩磁最低, 而距磁环底部 10 mm 位置的矫顽力最高, 距底部 20 mm 位置的矫顽力最低。如图 9(b)所示, 凸台型反向热挤压 BE-TU 制备的磁环距底部 5 mm 位置的剩磁最高, 距磁环底部 20 mm 位置的剩磁最低, 而距磁环底部 15 mm 位置的矫顽力最高, 距磁环底部 5 mm 位置的矫顽力最低。图 9(c)所示为两种反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环距底部不同位置试样的磁性能变化图, 经过对比发现, BE 和 BE-TU 制备的磁环试样剩磁  $B_r$  从磁环底部到环口位置都是呈单调降低趋势, 但 BE-TU 下降得更加平缓, 说明 BE-TU 磁环内部的晶粒排列更加规则有序且分布更加均匀, 最大磁能积  $(BH)_{max}$  变化与剩磁  $B_r$  相同。然而 BE 和 BE-TU 制备的磁环试样的矫顽力  $H_{cj}$  变化却不相同, BE 磁环试样的矫顽力  $H_{cj}$  先增加后减小, 而 BE-TU 磁环试样的矫顽力  $H_{cj}$  整体呈上升趋势, 且矫顽力均大于 BE 磁环试样, 推测由于 BE-TU 同时正向反向流动, 流速更快, 所需时间更短, 这就避免了坯料在高温下时间过长导致晶粒的过渡长大, 从而获得较高的矫顽力。



**Figure 9.** Demagnetization curves and magnetic properties of two kinds of backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different positions from the bottom ((a): BE; (b): BE-TU; (c): magnetic properties)  
**图 9.** 两种反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环距底部不同位置的退磁曲线和磁性能((a): BE; (b): BE-TU; (c): 磁性能)

**Table 3.** Radial magnetic properties of two backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different positions  
**表 3.** 两种反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环不同位置的径向磁性能

	距磁环底部距离/mm	$B_r$ /kGs	$H_{cj}$ /kOe	$(BH)_{max}$ /MGOe
BE	5	12.413	9.312	31.837
	10	12.385	10.705	32.808
	15	9.604	8.963	17.238
	20	7.914	7.112	10.807
BE-TU	5	12.174	11.386	32.525
	10	11.992	11.943	30.856
	15	11.657	12.852	28.375
	20	9.613	11.809	17.812



**Figure 10.** SEM high-magnification and low-magnification images of the two kinds of backward hot-extruded Nd-Fe-B magnetic rings at different positions from the bottom ((a), (b), (c), (d): BE; (e), (f), (g), (h): BE-TU)

**图 10.** 两种反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环距底部不同位置的 SEM 低倍图和高倍图((a), (b), (c), (d): BE; (e), (f), (g), (h): BE-TU)

图 10 所示为两种反向热挤压 Nd-Fe-B 磁环距底部不同位置试样的 SEM 低倍图和高倍图,从图 10(a)和图 10(b)和图 10(e)和图 10(f)可以看出,磁环的微观形貌呈粗晶区和细晶区的交替排列,粗晶粒区的形成可能与相邻快淬薄带的不完全接触有关[10]。图 10(c)所示的 BE 磁环靠近底部的试样晶粒排列更加规则有序,而图 10(d)所示的 BE 磁环靠近环口位置的试样晶粒的取向沿径向有一些偏离,所以靠近磁环底

部位置的剩磁更高。同时图 10(c)和图 10(d)中还存在着尺寸范围在  $0.32\ \mu\text{m}$ ~ $2.2\ \mu\text{m}$  数量不等的粗大晶粒, 可以清楚看出, 图 10(d)中细晶区的粗大晶粒更大, 高达  $1\ \mu\text{m}$  的粗大晶粒更多, 且晶粒间有很多孔隙, 这可能是由于在挤压初期, 坯料的变形抗力较小, 流速较快导致磁环不致密促使了晶粒的长大从而影响晶粒的取向度, 所以靠近磁环环口位置的剩磁和矫顽力更低。图 10(g)和图 10(h)所示分别为 BE-TU 磁环靠近底部位置和靠近环口位置的 SEM 高倍图, 从图中可以看出靠近磁环底部位置试样(如图 10(g))的晶粒取向度高于靠近磁环环口位置的试样(如图 10(h)), 这与 BE 的磁环试样的变化相同, 同时图中也存在着一些晶粒尺寸为  $0.29\ \mu\text{m}$ ~ $1.18\ \mu\text{m}$  的粗大晶粒, 但相比于 BE 磁环, 晶粒尺寸较小且数量较少。通过对比发现, BE 的磁环试样粗晶区和细晶区中均存在大量粗大晶粒, 且 BE 磁环裂纹较深, 导致部分变形不充分, 这会影响晶粒取向, 从而影响磁环的磁性能。

#### 4. 结论

采用不同挤压速度和不同变形压力制备了反向热挤压 Nd-Fe-B 永磁环, 结果表明, 挤压速度过慢会导致晶粒的过渡增长, 从而造成矫顽力的降低。较快的挤压速度可以获得更好的矫顽力, 但晶粒取向不充分, 导致剩磁的降低。当挤压速度相同、变形压力较小时, 制备的磁环矫顽力和磁性能都较低。经过对比发现, 挤压速度  $0.05\ \text{mm/s}$ 、变形压力  $164\ \text{MPa}$  下制备的磁环磁性能最佳。通过改进模具垫片结构, 增加凸台可以提高磁环的矫顽力和轴向均匀性, 磁环相同位置试样的矫顽力均比没有凸台模具制备的磁环相应位置试样的高, 并且磁环最大磁能积  $25\ \text{MGOe}$  以上部分的占比由没有凸台模具制备的磁环的 15% 提高到了 31%。

#### 基金项目

国家重点研发计划(2022YFB3505600)。

#### 参考文献

- [1] Song, T., Tang, X., Yin, W., Ju, J., Wang, Z., Liu, Q., *et al.* (2019) Magnetic Properties Improvement of Hot-Deformed Nd-Fe-B Permanent Magnets by Pr-Cu Eutectic Pre-Diffusion Process. *Acta Materialia*, **174**, 332-341. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.05.065>
- [2] Shao, B., Cai, W. and Yang, C. (2024) Electromagnetic-Thermal-Mechanical Performance of Novel Interior Permanent Magnet Motor. *Case Studies in Thermal Engineering*, **63**, Article ID: 105259. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105259>
- [3] Tang, M., Bao, X., Zhou, Y., Lu, K., Li, J. and Gao, X. (2020) Microstructure and Annealing Effects of NdFeB Sintered Magnets with Pr-Cu Boundary Addition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **505**, Article ID: 166749. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166749>
- [4] 陈红升, 董创辉, 董生智. 烧结辐向整体稀土永磁环的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(5): 129-139.
- [5] 王誉, 辛博, 朱明刚, 等. 辐射取向整体 Nd-Fe-B 永磁环的研究现状及发展[J]. 稀土, 2022, 43(5): 124-141.
- [6] Zhu, M. and Li, W. (2017) Texture Formation Mechanism and Constitutive Equation for Anisotropic Thermorheological Rare-Earth Permanent Magnets. *AIP Advances*, **7**, Article ID: 056236. <https://doi.org/10.1063/1.4978700>
- [7] Yoshikawa, N., Iriyama, T., Yamada, H., Kasai, Y. and Panchanathan, V. (1999) Radially Oriented High Energy Product Nd-Fe-B Ring Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, **35**, 3268-3270. <https://doi.org/10.1109/20.800494>
- [8] 胡新建, 郭朝晖, 潘伟, 等. 内禀矫顽力  $H_{cj}$  对 Nd-Fe-B 磁体温度稳定性的影响[J]. 金属功能材料, 2004, 11(2): 1-4.
- [9] Li, A.H., Li, W., Lai, B., Wang, H.J., Zhu, M.G. and Pan, W. (2010) Investigation on Microstructure, Texture, and Magnetic Properties of Hot Deformed Nd-Fe-B Ring Magnets. *Journal of Applied Physics*, **107**, 09A725. <https://doi.org/10.1063/1.3339817>
- [10] Lai, B., Li, Y., Wang, H., Li, A., Zhu, M. and Li, W. (2013) Quasi-Periodic Layer Structure of Die-Upset NdFeB Magnets. *Journal of Rare Earths*, **31**, 679-684. [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(12\)60342-1](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(12)60342-1)