

成型方式对氮化硅轴承球性能的影响

姜小仪¹, 陈德庆¹, 李光¹, 丁俊杰², 李龙涛³, 银锐明³

¹江西氮化硅新材料有限公司, 江西 抚州

²深圳市信维通信股份有限公司中央研究院, 广东 深圳

³湖南氮化硅新材料有限责任公司, 湖南 株洲

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

氮化硅(Si_3N_4)陶瓷轴承球因其优异的力学性能和物理化学稳定性, 在高速精密轴承领域具有广阔的应用前景。成型工艺是影响陶瓷球微观结构与力学性能的关键环节。本文分别采用凝胶注模成型和干压成型两种工艺制备 Si_3N_4 陶瓷轴承球, 在相同烧结条件下进行致密化处理, 系统对比两种成型方式对烧结体物相组成、显微组织结构、维氏硬度、密度及抗压碎强度的影响规律。结果表明: 干压成型有利于促进 α - Si_3N_4 向 β - Si_3N_4 的相转变, 但易产生“雪花斑”缺陷及异常粗大的 β - Si_3N_4 晶粒; 凝胶注模成型坯体均匀性更佳, 烧结后晶粒以球状/点状 α - Si_3N_4 为主, 夹杂少量长柱状 β - Si_3N_4 , 形成自增强韧化结构。凝胶注模成型样品的维氏硬度(>1700 HV)和抗压碎强度均显著高于干压成型样品, 且性能数据均一性更好, 密度分布更为均匀。凝胶注模成型能够有效减少微观缺陷, 获得更均匀的微观结构, 显著提升 Si_3N_4 陶瓷轴承球的力学性能与可靠性, 是制备高性能陶瓷轴承球的优选成型工艺。

关键词

氮化硅, 陶瓷轴承球, 凝胶注模, 压制成型, 微观结构

The Influence of Molding Methods on the Performance of Silicon Nitride Bearing Balls

Xiaoyi Jiang¹, Deqing Chen¹, Guang Li¹, Junjie Ding², Longtao Li³, Ruiming Yin³

¹Jiangxi Silicon Nitride New Material Co., Ltd., Fuzhou Jiangxi

²Central Research Institute of Shenzhen Sunwave Communication Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

³Hunan Silicon Nitride New Material Co., Ltd., Zhuzhou Hunan

Received: April 6, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 15, 2026

文章引用: 姜小仪, 陈德庆, 李光, 丁俊杰, 李龙涛, 银锐明. 成型方式对氮化硅轴承球性能的影响[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 106-113. DOI: 10.12677/ms.2026.165104

Abstract

Silicon nitride (Si_3N_4) ceramic bearing balls have broad application prospects in the field of high-speed precision bearings due to their excellent mechanical properties and physicochemical stability. The forming process is a key factor affecting the microstructure and mechanical properties of ceramic balls. In this paper, Si_3N_4 ceramic bearing balls were prepared using two processes: gel-casting and dry pressing. Densification treatment was carried out under the same sintering conditions, and the effects of the two forming methods on the phase composition, microstructure, Vickers hardness, density, and crushing strength of the sintered bodies were systematically compared. The results showed that dry pressing is conducive to promoting the phase transformation from $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ to $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, but it tends to produce "snowflake" defects and abnormally coarse $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ grains. Gel-casting results in a more uniform green body, with the sintered grains mainly being spherical/point-like $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, interspersed with a small amount of long columnar $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, forming a self-reinforced and toughened structure. The Vickers hardness (>1700 HV) and crushing strength of the gel-casting samples are significantly higher than those of the dry-pressed samples, and the performance data are more uniform, with a more even density distribution. Gel-casting can effectively reduce microdefects, obtain a more uniform microstructure, and significantly enhance the mechanical properties and reliability of Si_3N_4 ceramic bearing balls, making it the preferred forming process for preparing high-performance ceramic bearing balls.

Keywords

Silicon Nitride, Ceramic Bearing Ball, Gel-Casting, Compression Molding, Microstructure

Copyright © 2026 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

氮化硅(Si_3N_4)陶瓷因其低密度、高硬度、耐高温、耐腐蚀及自润滑等优异特性,已成为高速、高精度轴承的理想滚动体材料,广泛应用于航空航天、精密机床、新能源汽车等高端装备领域[1]-[4]。轴承球的力学性能和服役可靠性在很大程度上取决于其制备工艺,特别是成型工艺对坯体均匀性和微观结构的影响[5]。在氮化硅陶瓷球的制备流程中,成型是关键环节之一,直接影响生坯的密度分布、缺陷结构和后续烧结工艺[6]。传统的压制成型(Dry Pressing)工艺简单、效率高,但在压制过程中易产生密度梯度,导致烧结后出现不均匀收缩、残余应力甚至微观裂纹,从而影响陶瓷球的力学性能和可靠性[7] [8]。

相比之下,凝胶注模成型是一种基于有机单体原位聚合反应的近净成形技术,具有坯体均匀性好、缺陷少、可成形复杂形状等优点[9] [10]。该工艺通过将陶瓷浆料注入模具,利用单体聚合形成高强度、低收缩的生坯,能够有效避免压制成型中的密度不均问题[11]。已有研究表明,凝胶注模成型的结构陶瓷在致密度、微观结构均匀性和力学性能方面往往优于传统压制成型[12] [13]。

目前,针对氮化硅陶瓷轴承球的研究多集中于烧结助剂配方[14] [15]、烧结工艺优化[16] [17]及摩擦学性能表征[18] [19],而关于成型方式(特别是凝胶注模与压制成型的对比)对氮化硅轴承球微观结构与力学性能的影响,尚缺乏系统性的研究。不同成型工艺导致的坯体结构差异如何影响烧结后的晶粒生长行为、晶界相分布以及最终导致的力学性能差异,这一科学问题亟待深入探讨。基于此,本文分别采用凝胶注模成型和压制成型两种工艺制备氮化硅陶瓷轴承球,在相同烧结条件下进行致密化处理。系统对比

两种成型方式对烧结体的显微组织结构(XRD、SEM)、维氏硬度等力学性能的影响规律,分析力学性能的差距与微观结构演变来评估成型方式对陶瓷球可靠性的影响。研究成果旨在为高性能氮化硅陶瓷轴承球的成型工艺优选提供理论依据和实验支撑。

2. 实验

2.1. 样品制备

本研究所用氮化硅原料粉为江西氮化硅新材料有限责任公司生产原料 α - Si_3N_4 粉末,其中 α 相含量 > 92%, 平均粒径小于 20 微米。烧结助剂选用 Al_2O_3 ($\omega > 99.90\%$)和 Y_2O_3 ($\omega > 99.90\%$), 其质量百分比分别为 3 wt.%和 2 wt.%。所有原料以无水乙醇为介质、 Si_3N_4 球为研磨体进行行星球磨混合 24 h, 混合浆料经旋转蒸发干燥后过 80 目筛备用。凝胶注模浆料制备: 将预混粉体加入预先配制好的预混液(含有机单体丙烯酰胺(AM)、交联剂 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBAM)、分散剂聚丙烯酸铵)中, 其体积比为 25:5:1, 固相含量控制在 50~55 vol.%, 后加入体积比为 3%的引发剂(过氧化苯甲酰, BPO)和和塑化剂(N,N-二甲基乙酰胺, DMA)后, 搅拌均匀后真空脱泡 15 min。最后倒入直径 11 mm 的球形模具内, 注模后 30℃干燥脱模, 再分阶段干燥直至室温。干压成型工艺: 取相同配比的混合粉体, 填入相同尺寸的球形模具中, 在 18 MPa 压力下单向模压成型, 保压时间 5 min, 提高生坯密度和均匀性。

烧结工艺为第一阶段为负压脱脂阶段, 90 min 从室温升温到 320℃随后 30 min 升温至 370℃再用 60 min 缓慢升温至 450℃并保温 30 min。第二阶段为微正压烧结: 82 min 升温至 1000℃同时调节炉内气压为 0.1 bar, 氮气流量为 5 L/m。第三阶段为加压烧结: 以 3℃/min 的升温速度升温至 1850℃并在途中进行炉膛加压至 50 ± 1 bar, 然后进行保温烧结 120 min。

2.2. 样品性能表征

本研究采用 X 射线衍射仪(Ultima-IV, Rigaku)对所制备的样品进行物相分析, 设备管电压为 40 kV, 管电流为 35 mA, 采用 Cu 靶 $K\alpha$ 射线, 以 0.02°的扫描步长、5°/min 的扫描速度对试样 15°~85°范围进行扫描。用导电胶粘住样品并喷金后通过使用 ZEISS SUPRA55 扫描电镜进行观察和分析晶粒形貌和大小。依据 GB/T 16534-2009《精细陶瓷室温硬度试验方法》, 采用维氏硬度计测试, 通过在 30 千克力载荷下测得的各个样品的硬度值。依据 GB/T 25995-2010《精细陶瓷密度和显气孔率试验方法》采用阿基米德排水法测量烧结样品的体积密度。抗压碎强度测试参照 GB/T 31703-2025《陶瓷球轴承 氮化硅球》进行。

3. 结果与讨论

3.1. 物相组成分析

Si_3N_4 陶瓷球在气压烧结下经过 1680℃保温 3 h 烧结后, 分别取注凝成型和干压成型陶瓷球进行微观结构检测。图 1 为不同成型方式的陶瓷球的 X 衍射图谱: 如图所示, 不同的成型方式对 Si_3N_4 陶瓷球的成分的影响略有不同, 注凝成型陶瓷球的 α 相 Si_3N_4 峰强度更高而 β 相的 Si_3N_4 峰值明显低于干压成型的陶瓷球。因此可以看出, 这表明在相同的烧结工艺条件下, 干压成型更有利于促进 α - Si_3N_4 向 β - Si_3N_4 的相转变。这可能是由于干压成型生坯中粉体堆积密度更高、颗粒间接触更充分, 在烧结过程中有利于物质扩散和晶型转变的进行。做完相检测之后开始探究其成分转变对微观形貌的影响。

3.2. 微观结构分析

图 2 为不同成型方式的陶瓷球的截面图与 SEM 图, 其中(a)、(b)分别为注凝成型和干压成型的截面

图, 由图可以看出(a) 注凝成型整体较为平整无明显缺陷, 而(b) 干压成型出现较多的白斑, 此白斑又称“雪花斑”是一种典型的微观结构缺陷, 是材料内部出现成分不均或微孔洞引起缺陷。通常由于氧化钇和氧化铝分布不均, 导致局域液相不足氮化硅晶粒未能完全结合所导致的孔隙, 对于陶瓷球而言, 白斑是材料内部结构的薄弱点和应力集中区, 是导致陶瓷球早期失效的主要因素。(c)、(d)分别为注凝成型和干压成型的 SEM 图谱, 由图可知(c) 注凝成型的陶瓷球晶粒主要为球状或点状的 α - Si_3N_4 晶粒夹杂着长柱状的 β - Si_3N_4 , 而(d) 干压成型的陶瓷球晶粒更多的是 β - Si_3N_4 晶粒的形貌且异常粗壮, 这与前面的 X 衍射图相互对应。由于细小的 α - Si_3N_4 晶粒含量越多其材料的强度尤其是硬度会更好, 而少量长柱状的 β - Si_3N_4 会使得晶粒之间发生相互交织互锁, 形成自增强韧性的结构, 但过于粗壮的 β - Si_3N_4 的晶粒反而会导致材料强度下降。同时(d) 干压成型的 SEM 图出现少量“雪花斑”缺陷。

为深入探讨统一烧结制度对不同初始状态坯体的影响, 从烧结动力学角度进行了分析。在相同的 1850°C 保温 2 h 烧结制度下, 两种坯体经历了相同的热历史。对于干压坯体, 其局部密度梯度导致传质路径不均, 在高温阶段, 高密度区优先致密化并发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变, 产生的长柱状 β 晶粒由于缺乏均匀的空间约束, 在液相辅助下容易通过 Ostwald 熟化机制快速吞噬周围小晶粒, 从而形成异常粗大的 β - Si_3N_4 晶粒。此外, 由于压坯中储存的残余应力在高温下释放, 进一步促进了晶界的迁移与各向异性生长。相比之下, 注凝成型坯体具有均一的颗粒堆积结构, 气孔分布窄而弥散, 在烧结中后期, 均匀的液相分布对晶粒生长起到了良好的“钉扎”与约束作用, 抑制了 β 晶粒的过度长大, 从而保留了较多的细小 α 晶粒与适量长径比适中的 β 晶粒构成的自增强结构。

雪花组织在自然光下明显可见, 但在 SEM 下很难找到。雪花组织在空间的三维分布, 使得抛光面只能截取雪花组织的一小部分区域, 同时, SEM 观察局限于极表面, 所以要在 SEM 下找到、观察雪花组织十分困难。通过硬度计打点定位的方法可以确定在光镜下发现的雪花组织位置, 然后再在 SEM 观察该位置。如图 3 所示为干压成型的陶瓷球雪花斑的 EDS 能谱, 孔隙边缘的成分中 Al 和 Y 元素浓度明显低于旁边的点位, 这说明干压成型密度分布不均导致玻璃液相未能完全浸润氮化硅晶粒导致后续降温收缩过程中形成孔隙。

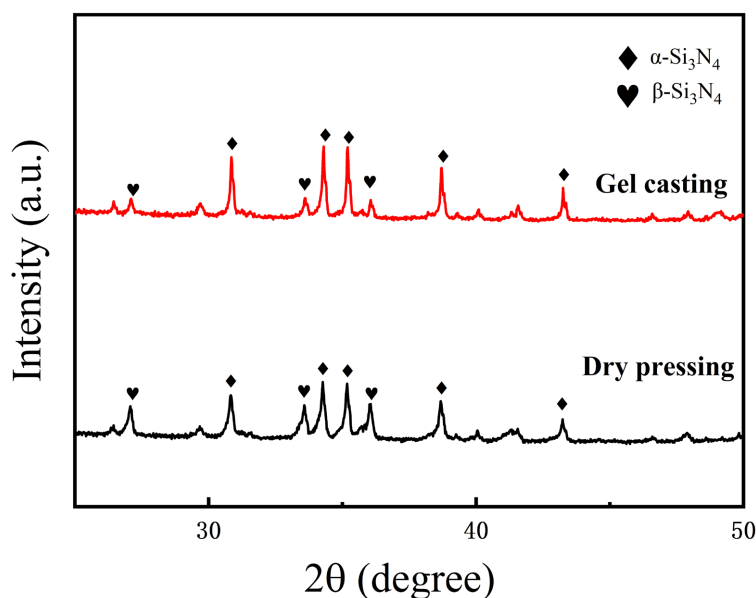


Figure 1. X-ray diffraction patterns of ceramic balls with different forming methods
图 1. 不同成型方式的陶瓷球的 X 衍射图谱

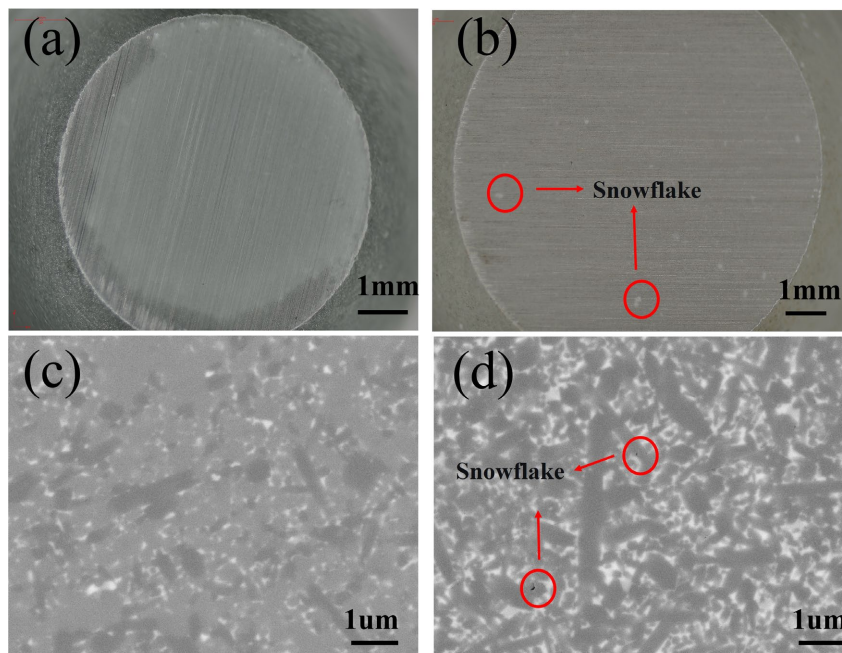


Figure 2. Cross-sectional views and SEM images of ceramic balls with different forming methods: (a) (c) Gel-casting; (b) (d) Dry pressing

图 2. 不同成型方式的陶瓷球的截面图与 SEM 图：(a) (c) 注凝成型；(b) (d) 干压成型

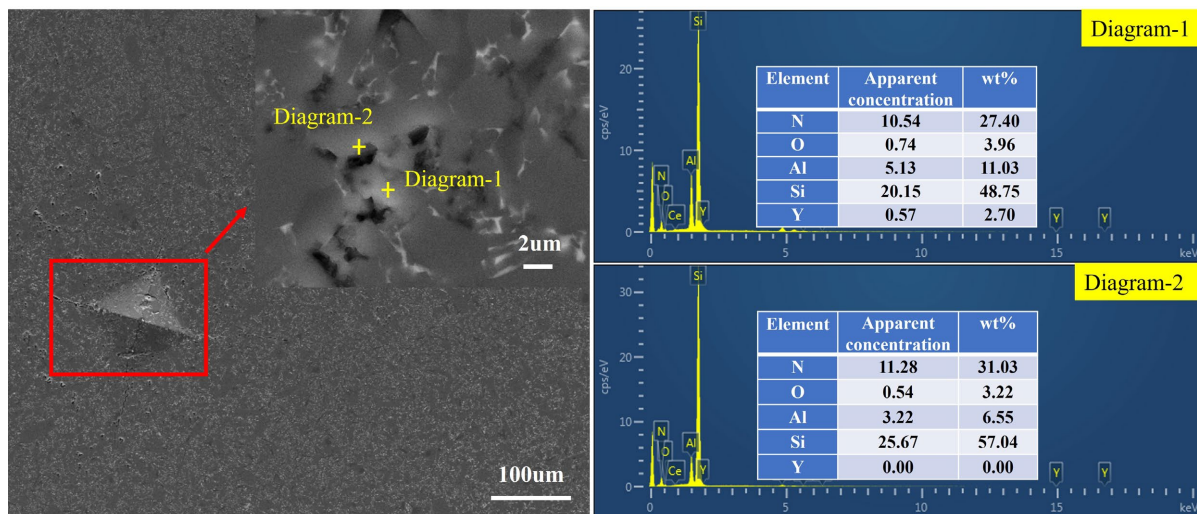


Figure 3. EDS energy spectrum of snowflake-like spots on dry-pressed ceramic balls

图 3. 干压成型的陶瓷球雪花斑的 EDS 能谱

3.3. 硬度与密度分析

Si_3N_4 陶瓷球凭借高硬度特性使其耐磨性远胜于钢球，能显著延长轴承在高速、润滑不良工况下的使用寿命。现在对不同成型方式的氮化硅陶瓷球各取五个进行物理性能测试，图 4 是不同成型方式的 5 个 Si_3N_4 陶瓷球的硬度图。如图所示，注凝成型的样品测得的硬度均高于 1700 HV，其中最高点的硬度为 1729 HV，最低硬度为 1708 HV，相差 21 HV，平均为 1722 HV，五个样品的硬度分布较为均匀。干压成型的硬度曲线显示整体为 1600 HV 以上，硬度最高为 1650 HV，最低为 1608 HV，平均为 1633.4 HV 且最高

与最低相差 42HV 且硬度分布较为波动。从整体来看, 注凝成型制备的陶瓷球的硬度均高于干压成型的陶瓷球。

密度是反映陶瓷综合性能的重要指标, 较高的密度往往代表性能的优越性, 图 5 为不同成型方式的五组 Si_3N_4 陶瓷球的密度图: 如图所示, 注凝成型陶瓷球密度最高为 3.286 g/cm^3 , 密度最低为 3.277 g/cm^3 , 平均为 3.2822 g/cm^3 , 密度分布基本为一条直线, 而干压成型的陶瓷球的密度最高为 3.321 g/cm^3 , 最低为 3.226 g/cm^3 , 平均为 3.2784 g/cm^3 , 其中最高密度高于注凝成型陶瓷球而最低密度更低, 整体密度呈现波动。

为进一步评价本研究制备的陶瓷球性能水平, 将核心数据与近年文献报道的高性能氮化硅陶瓷进行了横向对比。本研究中凝胶注模成型样品获得的最高硬度为 1729 HV30, 密度为 3.286 g/cm^3 。这一性能指标优于采用传统干压成型制备的轴承球(硬度约 1580~1650 HV) [11], 与采用气压烧结并优化助剂配方的研究结果(硬度 1700~1750 HV, 密度 $3.27\sim 3.30 \text{ g/cm}^3$) [19] [20]处于同一水平。特别值得注意的是, 凝胶注模工艺在保证高致密度的同时, 保证了数据性能的均一稳定性, 这对于作为精密滚动体的轴承球而言, 意味着服役可靠性。

3.4. 抗压碎强度分析

陶瓷材料属于脆性材料, 其断裂强度取决于内部存在的缺陷分布(如孔隙、成分偏析、微裂纹等)。这些缺陷的大小、位置和数量随机分布, 因此即使同一批制备的样品, 强度也会有所不同, 现采用三球压缩法测试了两种成型工艺制备的氮化硅陶瓷球的抗压碎强度, 结果如图 6 所示: 凝胶注模成型陶瓷球的破碎值显著高于干压成型样品, 且强度分布更加均匀集中。这一结果表明, 凝胶注模成型工艺能够获得更加均匀的微观组织, 有效减少缺陷尺寸的离散分布, 从而显著提高陶瓷球的力学性能和可靠性。综合以上分析, 凝胶注模成型相较于传统干压成型的优势在于: 通过浆料流动充型实现均匀堆积, 避免了干压成型中的密度梯度问题; 原位聚合固化形成高强度、低缺陷生坯, 为后续烧结提供了理想的前驱体; 最终获得晶粒尺寸均匀、缺陷少、微观结构致密的烧结体, 在硬度、密度、抗压碎强度及性能可靠性方面均表现出显著优势。

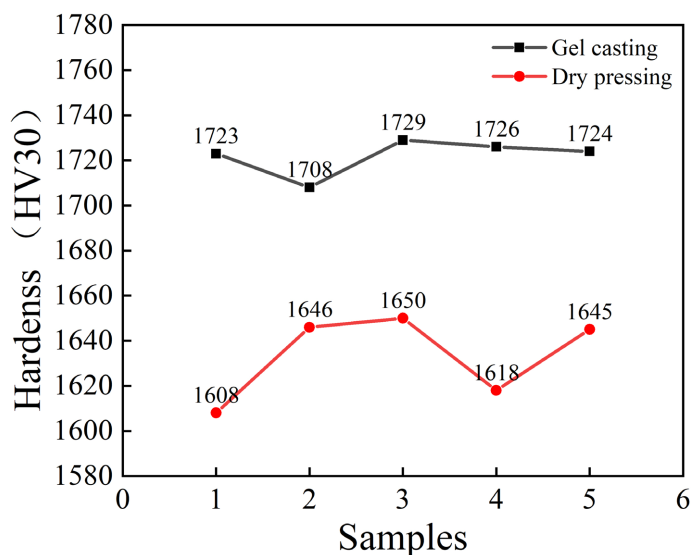


Figure 4. The influence of molding methods on sample hardness

图 4. 成型方式对样品硬度的影响

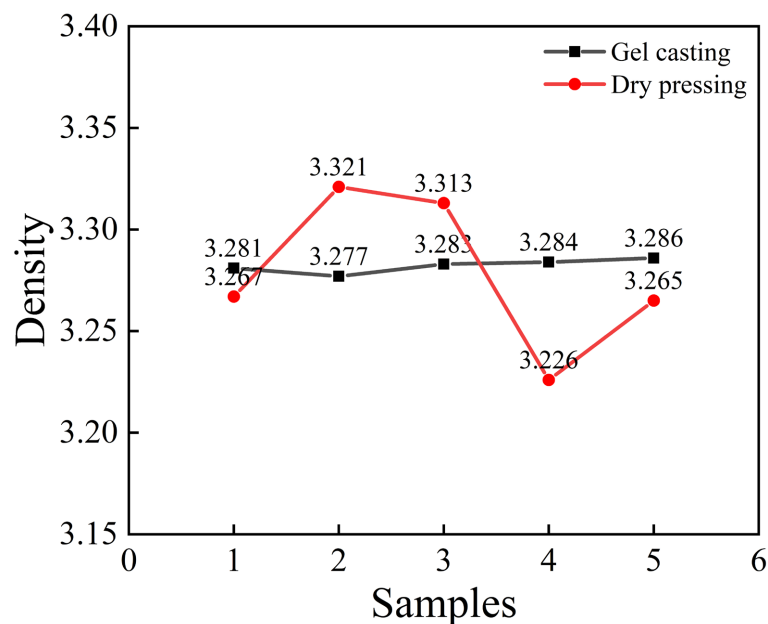


Figure 5. The influence of molding methods on sample density

图 5. 成型方式对样品密度的影响

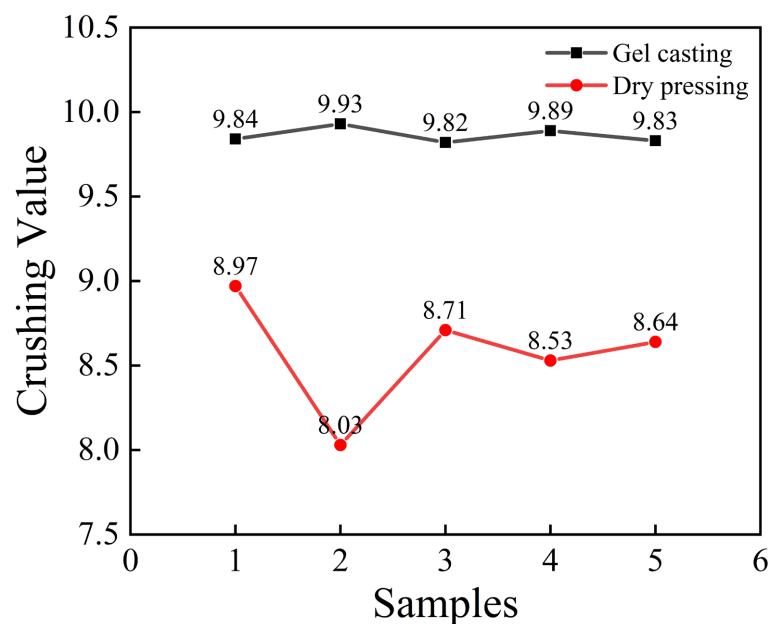


Figure 6. The influence of molding methods on the crushing value of the sample

图 6. 成型方式对样品破碎值的影响

4. 结论

1) 干压成型有利于促进 α - Si_3N_4 向 β - Si_3N_4 的相转变, 但易产生“雪花斑”缺陷和异常粗大的 β - Si_3N_4 晶粒, 导致力学性能下降且数据均一性差。

2) 注凝成型坯体均匀性更佳, 烧结后以细小球状 α - Si_3N_4 晶粒为主, 夹杂少量长柱状 β - Si_3N_4 形成自增强结构, 有效提高强度的同时, 避免了缺陷的产生。

3) 注凝成型样品的维氏硬度(>1700 HV30)和抗压碎强度均显著高于干压成型样品, 且性能数据离散性小, 密度分布均匀, 表现出更高的可靠性。

参考文献

- [1] Wang, L., Snidle, R.W. and Gu, L. (2000) Rolling Contact Silicon Nitride Bearing Technology: A Review of Recent Research. *Wear*, **246**, 159-173. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(00\)00504-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(00)00504-4)
- [2] Brizmer, V., Gabelli, A., Vieillard, C. and Morales-Espejel, G.E. (2015) An Experimental and Theoretical Study of Hybrid Bearing Micropitting Performance under Reduced Lubrication. *Tribology Transactions*, **58**, 829-835. <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1021944>
- [3] 徐学敏. 陶瓷轴承球的应用和生产加工[J]. 陶瓷, 2016(7): 32-35.
- [4] Hager, C.H., Doll, G.L., Evans, R.D. and Shiller, P.J. (2011) Minimum Quantity Lubrication of M50/M50 and M50/Si₃N₄ Tribological Interfaces. *Wear*, **271**, 1761-1771. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.094>
- [5] Zhao, X.Z., Liu, J.J., Zhu, B.L., Miao, H.Z. and Luo, Z.B. (1997) Friction and Wear of Si₃N₄ Ceramic/Stainless Steel Sliding Contacts in Dry and Lubricated Conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **6**, 203-208. <https://doi.org/10.1007/s11665-997-0015-2>
- [6] Dempsey, P.J., Certo, J.M. and Morales, W. (2005) Current Status of Hybrid Bearing Damage Detection. *Tribology Transactions*, **48**, 370-376. <https://doi.org/10.1080/05698190591008568>
- [7] Mosleh, M., Bradshaw, K., Belk, J.H. and Waldrop, J.C. (2011) Fatigue Failure of All-Steel and Steel-Silicon Nitride Rolling Ball Combinations. *Wear*, **271**, 2471-2476. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.051>
- [8] Farfan-Cabrera, L.I. (2019) Tribology of Electric Vehicles: A Review of Critical Components, Current State and Future Improvement Trends. *Tribology International*, **138**, 473-486. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.06.029>
- [9] Bocanegra-Bernal, M.H. and Matovic, B. (2009) Dense and Near-Net-Shape Fabrication of Si₃N₄ Ceramics. *Materials Science and Engineering: A*, **500**, 130-149. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.015>
- [10] Riley, F.L. (2000) Silicon Nitride and Related Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, **83**, 245-265. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01182.x>
- [11] Zhang, J., Wang, W., Sun, F., Zhang, W., Li, B. and Zhang, M. (2021) Effect of Particle Size of Y₂O₃-Al₂O₃ Additives on Microstructure and Mechanical Properties of Si₃N₄ Ceramic Balls for Bearing Applications. *Processing and Application of Ceramics*, **15**, 297-305. <https://doi.org/10.2298/pac2103297z>
- [12] 魏万鑫, 苏云峰, 樊恒中, 等. 氮化硅陶瓷轴承球的滚动摩擦磨损特性与损伤行为[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(9): 1256-1265.
- [13] Xia, Z., Wu, Y., Ma, T., Bao, Z., Tian, J., Gao, L., et al. (2022) Experimental Study on Adaptability of Full Ceramic Ball Bearings under Extreme Conditions of Cryogenics and Heavy Loads. *Tribology International*, **175**, Article 107849. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107849>
- [14] Niihara, K., Morena, R. and Hasselman, D.P.H. (1982) Evaluation OFK IC of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Crack-to-Indent Ratios. *Journal of Materials Science Letters*, **1**, 13-16. <https://doi.org/10.1007/bf00724706>
- [15] Supancic, P., Danzer, R., Harrer, W., Wang, Z.H., Witschnig, S. and Schöppl, O. (2009) Strength Tests on Silicon Nitride Balls. *Key Engineering Materials*, **409**, 193-200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.409.193>
- [16] 黄敦新, 白越, 黎海文, 等. 姿控飞轮用陶瓷球轴承失效特性分析[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(3): 254-259.
- [17] 吕冰海, 袁巨龙, 戴勇. 氮化硅陶瓷球研磨过程中磨损形式的研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(5): 416-421.
- [18] Muthunilavan, N., Rajaram, G., Joshi, D. and Vigneshwaminathan, A. (2019) Self-Repairing Effect of Few Si₃N₄ Balls Used as Rolling Elements to Enhance the Performance of Bearings Operating under Contaminated Lubrication Conditions. *Tribology International*, **134**, 281-295. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.011>
- [19] Wu, C., Liu, Z., Zhao, H., Yang, H., Li, X. and Ni, J. (2023) Effect of the Grease Thickener on Tribological Properties of Si₃N₄/GCR15 Contact Interface and the Performance in Hybrid Ceramic Ball Bearing. *Ceramics International*, **49**, 16857-16867. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.047>
- [20] Li, C., Wang, W., Xu, J., Zhang, Q., Ma, Z., Sun, F., et al. (2026) Overcoming the Hardness-Toughness Trade-Off in Silicon Nitride via Grain Boundary Engineering with *in Situ* Nanowire Growth and Glass Crystallization. *Ceramics International*, **52**, 12932-12948. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.01.433>