

振荡压力振幅对碳化钨微观结构和摩擦磨损性能的影响

钟卫民¹, 赵 科², 王珂玮³, 刘佃光⁴, 刘金铃¹, 安立楠³

(1. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 成都 611756; 2. 四川轻化工大学 材料科学与工程学院, 自贡 643002;
3. 东莞理工学院 机械工程学院, 东莞 523808; 4. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 611756)

摘 要: 如何在实现超细晶碳化钨(WC)完全致密化的同时而不引起晶粒长大, 一直是其工业应用面临的难题。动态烧结锻造工艺可通过施加振荡压力对不致密材料坯体进行锻造, 促进致密化并抑制晶粒生长。本研究探索了动态烧结锻造中压力振幅对 WC 微观结构和摩擦磨损性能的影响。结果表明, 提高压力振幅能够提高 WC 的相对密度, 减小其晶粒尺寸并提高小角晶界和特殊晶界 $\Sigma 2$ 的占比, 同时提高其晶粒内的位错密度。当压力振幅为 20 MPa 时, WC 的相对密度、平均晶粒尺寸和位错密度分别达到 99.6%、203 nm 和 $1.68 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 。随着压力振幅的提高, WC 的摩擦系数和磨损率均逐渐减小, 磨损机制以黏着磨损和犁削为主。磨损率减小主要是由于 WC 几近致密的特性、细小的晶粒及较高的位错密度。晶粒细化和高密度位错有助于提高其在摩擦磨损过程中的塑性变形能力和变形抗力, 从而增大磨痕表面硬度, 同时抑制裂纹萌生和扩展。特殊晶界 $\Sigma 2$ 也能够有效阻碍位错运动而提高应变硬化能力, 有助于提高磨痕表面硬度, 进一步抑制磨损。

关 键 词: 碳化钨; 振荡压力; 微观结构; 磨损行为

中图分类号: TB321 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2025)09-0964-07

Effect of Oscillatory Pressure Amplitude on Microstructures and Wear Resistance of Tungsten Carbide

ZHONG Weimin¹, ZHAO Ke², WANG Kewei³, LIU Dianguang⁴, LIU Jinling¹, AN Linan³

(1. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643002, China; 3. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Achieving complete densification of ultrafine-grained tungsten carbide (WC) without inducing grain growth has long been a challenge, which limits industrial applications of WC. The dynamic sinter forging process, which involves forging of incompletely dense materials under oscillatory pressure, facilitates densification while suppressing grain growth. This study explores effects of oscillatory pressure amplitude during dynamic sinter forging on microstructure and tribological properties of WC. The results show that increasing pressure amplitude leads to higher relative density of WC, accompanied by a reduction in grain size, an increase in proportion of low angle grain boundaries and special grain boundaries $\Sigma 2$, as well as an enhancement of dislocation density. At a pressure amplitude

收稿日期: 2025-02-11; 收到修改稿日期: 2025-04-01; 网络出版日期: 2025-04-09

基金项目: 河南省航空材料与应用技术重点实验室开放基金(ZHKF-230114)

Henan Key Laboratory of Aeronautical Materials and Applied Technologies (ZHKF-230114)

作者简介: 钟卫民(2000–), 男, 硕士研究生. E-mail: 2772759347@qq.com

ZHONG Weimin (2000–), male, Master candidate. E-mail: 2772759347@qq.com

通信作者: 刘金铃, 教授. E-mail: liujinling@swjtu.edu.cn

LIU Jinling, professor. E-mail: liujinling@swjtu.edu.cn

of 20 MPa, the relative density, average grain size and dislocation density of WC reach 99.6%, 203 nm and $1.68 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$, respectively. With an increase in pressure amplitude, both the friction coefficient and the wear rate gradually decrease. Under this condition, the adhesive wear and ploughing were identified as the dominant wear mechanisms. The reduction in wear rate is attributed to complete densification, finer grains and higher dislocation density, which result from the increased pressure amplitude. Grain refinement and high dislocation density enhance plastic deformation capacity and hardening ability during the wear, thereby increasing hardness of worn surface while mitigating crack initiation and propagation. Furthermore, special grain boundaries $\Sigma 2$ also effectively impede motion of dislocation, thereby improving strain hardening capability and enhancing hardness of worn surface.

Key words: tungsten carbide; oscillatory pressure; microstructure; wear behavior

WC 陶瓷因其高熔点、高硬度、优异的耐磨性和耐热性, 广泛用于制作钻头、光学模具和水刀喷嘴等^[1-2]。然而, 由于其高熔点和低自扩散系数, 通过传统烧结工艺难以实现完全致密化^[3-4]。尤其是在高硬、高韧的应用需求下, WC 晶粒往往需要被细化至超细甚至纳米级^[5-6]。纳米/超细晶 WC 陶瓷在烧结过程中易出现晶粒长大现象^[7], 并且通常要等到烧结后期晶粒长大时才能排除团聚体间的大气孔, 如何实现其完全致密化是一个难题。

采用传统烧结工艺(无压烧结和热压烧结等)制备 WC 陶瓷往往需要极高的烧结温度。如 Gubernat 等^[4]采用热压工艺在 2150 °C、25 MPa 条件下制得的 WC 陶瓷的相对密度仅为 97.5%, 且局部晶粒出现异常长大(约 5 μm)。放电等离子体烧结、脉冲电流辅助烧结和闪烧等工艺可降低 WC 陶瓷的烧结温度^[8-10]。例如, 利用放电等离子体烧结可在 1400~1500 °C 制备相对密度达 99% 的纳米/超细晶纯 WC 陶瓷^[11], 但通常情况下仍需要在 1700 °C 以上才能接近致密^[12-14], 且高温会导致晶粒长大并伴随脱碳现象^[12-13]。提高烧结时施加的压力至上百兆帕甚至吉帕级可促进颗粒重排、滑动、变形和破碎^[15-16], 从而进一步降低烧结温度。例如, Ma 等^[15]利用将压力提高至吉帕级的高温高压工艺, 在 1500 °C 制得了相对密度达 99.2%、晶粒尺寸为 150~250 nm 的 WC 陶瓷。但是, 过高的压力对装备要求较高, 不利于大尺寸样品的制备。

诸多研究表明^[17-23], 将烧结过程中的静压力替换为振荡压力(具备可调振幅和频率)能够更加有效促进致密化, 抑制晶粒生长, 并优化微观结构(如位错密度和晶界特征等), 从而提高材料性能。目前已发展出多种基于振荡压力的制备技术, 如振荡烧结^[17]、振荡热锻^[20]和动态烧结锻造^[21]。其中, 动态烧结锻造是一种将不受模具套筒约束的材料坯体在一定温度和振荡压力下

期结果表明^[21], 该工艺可有效促进超细晶 WC 陶瓷的致密化过程, 并引入高密度位错, 显著提高材料的硬度和断裂韧性。但是该工艺制备 WC 陶瓷的工艺-结构-性能关系还缺乏系统研究。本研究旨在探讨振荡压力振幅对 WC 陶瓷微观结构特征的影响, 考察其摩擦磨损性能, 并研究相应的磨损机制。

1 实验方法

1.1 材料制备

采用动态烧结锻造工艺(如图 1 所示)制备 WC 样品。首先, 将 WC 粉(粉体纯度>99.9%, 标称粒径为 190 nm, 厦门金鹭硬质合金有限公司)装入石墨模具中进行冷压成型。然后, 将其置于振荡烧结炉(OPS 2020, 成都易飞得材料科技有限公司)中, 在 1300 °C@50 MPa 下热压烧结 30 min, 得到相对密度为 62% 的预烧结坯体。最后, 将预烧结坯体再次置于振荡烧结炉中进行动态烧结锻造, 具体工艺参数如图 2 所示。不同振幅压力分别为 80、(70±10) 和 (60±20) MPa, 以频率 2 Hz 和保温时间 2 h 进行处理。

1.2 材料表征与性能测试

采用阿基米德排水法测量样品的相对密度。采用 X 射线衍射仪(XRD, RigakuD/max-2400)分析样

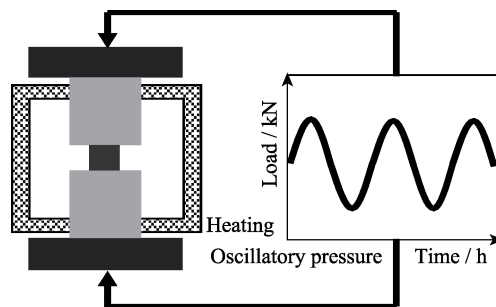


图 1 动态烧结锻造工艺示意图

Fig. 1 Schematic of dynamic sinter forging

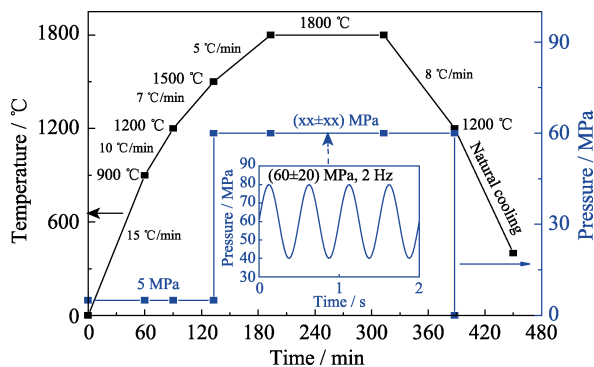


图 2 WC 陶瓷的动态烧结锻造制备工艺参数

Fig. 2 Processing parameters of WC fabricated by dynamic sinter forging

品的物相组成和含量。采用场发射扫描电镜(SEM, Sigma 500, ZEISS)表征样品断口及磨痕形貌, 并采用电子背散射衍射系统(EBSD, Clarity plus, EDAX)表征样品的晶粒尺寸、晶界和位错密度等微观结构特征。同时, 采用能谱仪(EDS, Elect, EDAX)对摩擦磨损后的试样进行元素分析。通过机械磨抛-机械抛光-振动抛光的工艺制备 EBSD 样品。首先, 利用平面磨床将样品表面打磨平整, 然后将样品冷镶后, 依次使用粒径为 45、15、9、3 和 1 μm 的金刚石抛光纸在金相磨抛机(YMP-1, 上海金相机械设备有限公司)上进行磨抛和抛光, 最后在振动抛光机(Vibro Met, BUEHLER)上以 50% 振动幅度抛光 5 h, 从镶嵌料中取出样品并超声清洗干净。采用多功能微动腐蚀试验机(MFC-01, 西南交通大学)测试样品的摩擦磨损性能。摩擦副为直径 10 mm 的 100Cr6 球, 法向载荷为 40 N, 对磨时间为 90 min, 滑动速度为 72 mm/min。最后, 采用共聚焦 3D 显微镜(VK-X1000, Keyence)测量磨痕的磨损量和三维形貌。

2 结果与讨论

2.1 不同压力振幅下 WC 陶瓷的微观结构

如图 3 所示, 不同压力振幅下制备的样品均以 WC 相为主, 并含有一定量的 W_2C 相, 未发现其它杂质相。当压力振幅为 0、10 和 20 MPa 时, W_2C 相的质量分数分别为 7.02%、5.31% 和 5.39%。 W_2C 相的形成主要源于高温下 WC 粉体的脱碳^[24]。如图 4(a)所示, 样品的相对密度随着压力振幅的增大而增大, 当压力振幅为 20 MPa 时, 相对密度达到 99.6%, 样品几乎完全致密。进一步观察样品断口可以发现, 压力振幅为 0 MPa 制备的样品中含有一定量的气孔, 随着压力振幅提高至 20 MPa, 样品中气孔减少, 如图 4(b~d)箭头所示。这与相对密度测试

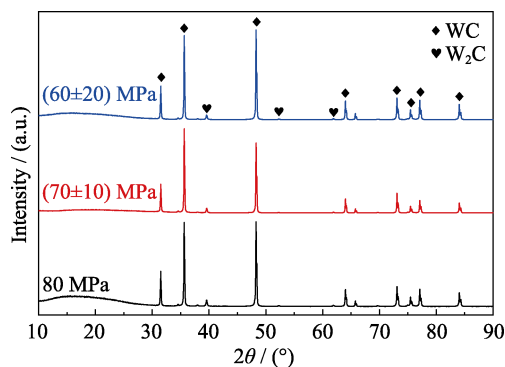


图 3 不同压力振幅下制备的 WC 样品的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of WC samples prepared under different pressure amplitudes

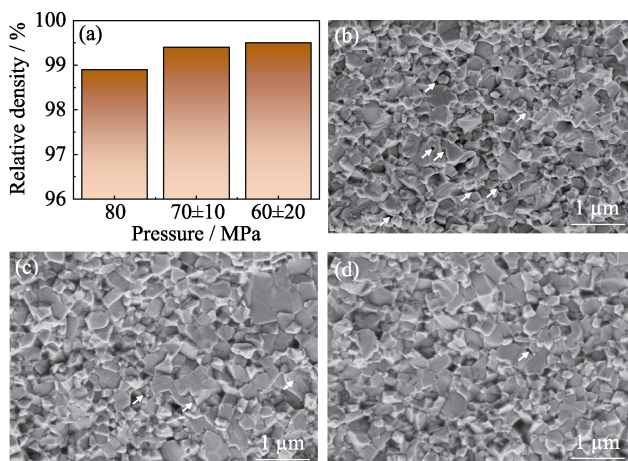


图 4 不同压力振幅下 WC 样品的相对密度和断口形貌

Fig. 4 Relative densities and fracture morphologies of WC samples prepared under different pressure amplitudes

(a) Histogram of relative density against pressure for WC samples; (b-d) Fracture morphologies of WC samples prepared under (b) 80, (c) (70±10), and (d) (60±20) MPa

结果一致, 说明提高压力振幅可有效促进 WC 陶瓷在动态烧结锻造过程中的气孔闭合和排出。另外, 对压力振幅为 20 MPa 时烧结的 WC 样品的不同位置进行表征发现, 样品具有良好的微观结构均匀性(图 S1), 即气孔和晶粒尺寸分布均匀。

如图 5 所示, 样品的晶粒尺寸随着压力振幅的增大而减小, 在 20 MPa 压力振幅下, 晶粒尺寸达到 203 nm, 与 WC 原料粉体的标称粒径相当。这说明, 提高压力振幅能够显著抑制 WC 陶瓷在高温 (1800 $^{\circ}\text{C}$) 下的晶粒生长, 而传统工艺制备的 WC 陶瓷晶粒在 1600 $^{\circ}\text{C}$ 以上就明显生长^[25]。此外, 提高压力振幅还可以增加样品中小角晶界和特殊晶界 $\Sigma 2$ 的占比(图 6)。

如图 7(a~c)所示, 烧结样品中的微应变随着压力振幅增大而增大, 表明提高压力振幅能够在样品中预置更高密度的位错。当压力振幅为 20 MPa 时, 位错密度达到 $1.68 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ (图 7(d))。另外, 提高压

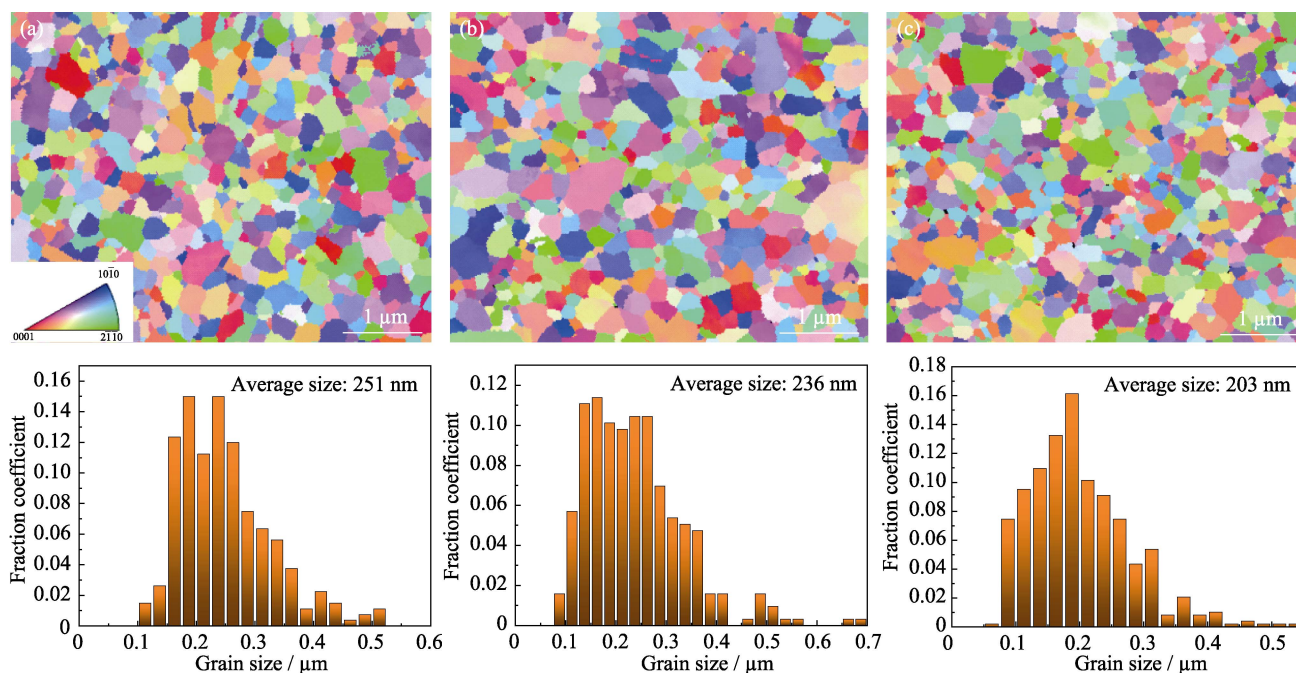


图5 不同压力振幅下制备的 WC 样品的晶粒取向分布图(上)和晶粒尺寸统计图(下)

Fig. 5 Diagrams of grain orientations (up) and grain size distributions (down) for WC samples prepared under different pressure amplitudes

(a) 80 MPa; (b) (70±10) MPa; (c) (60±20) MPa. Colorful figures are available on website

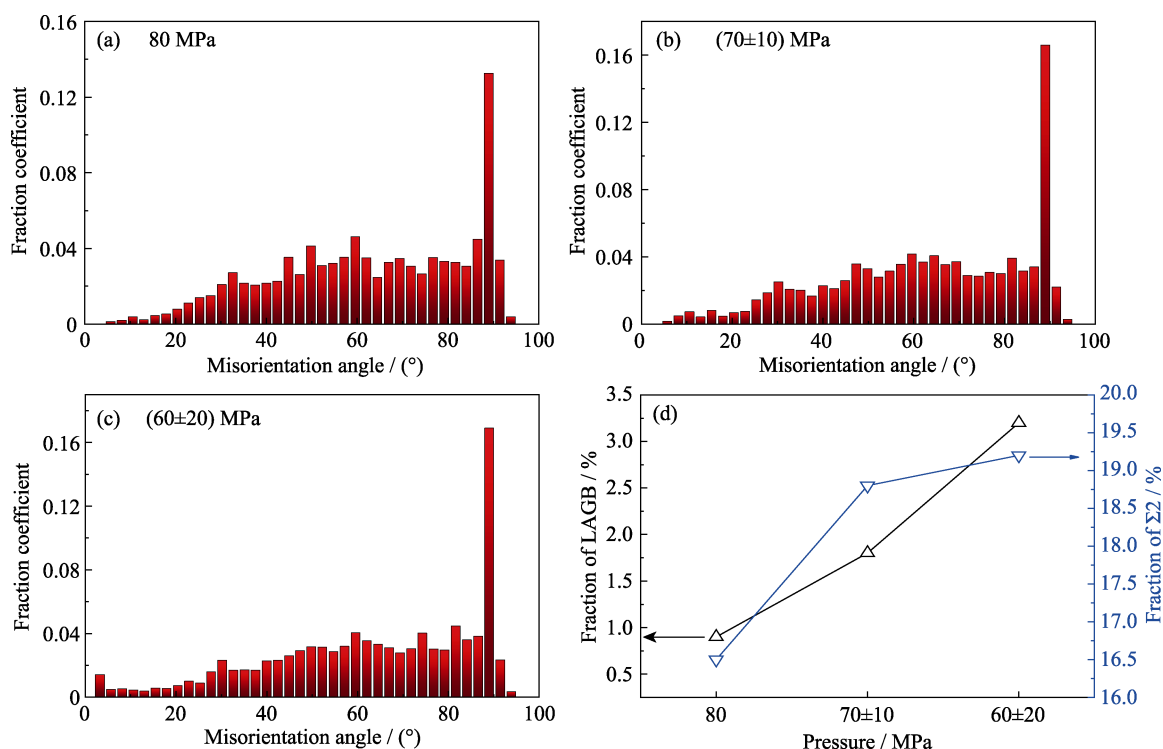


图6 不同压力振幅下 WC 样品的(a~c)晶粒取向差统计图及(d)小角晶界和 $\Sigma 2$ 晶界占比

Fig. 6 (a-c) Statistical diagrams of grain misorientation angle and (d) variation in fraction of low angle grain boundary (LAGB) and $\Sigma 2$ grain boundary for WC samples prepared under different pressure amplitudes

力振幅可降低 KAM(Kernal Average Misorientation) 角的分布宽度(图 7(e)), 意味着在 20 MPa 压力振幅下, 样品内的位错分布更加均匀。对于 WC 这样的

强共价键陶瓷而言, 位错在其制备和变形过程中难以形核和运动, 传统烧结方法引入的位错密度较低($\sim 10^9 \text{ m}^{-2}$)^[26]。高压烧结工艺可在块体 WC

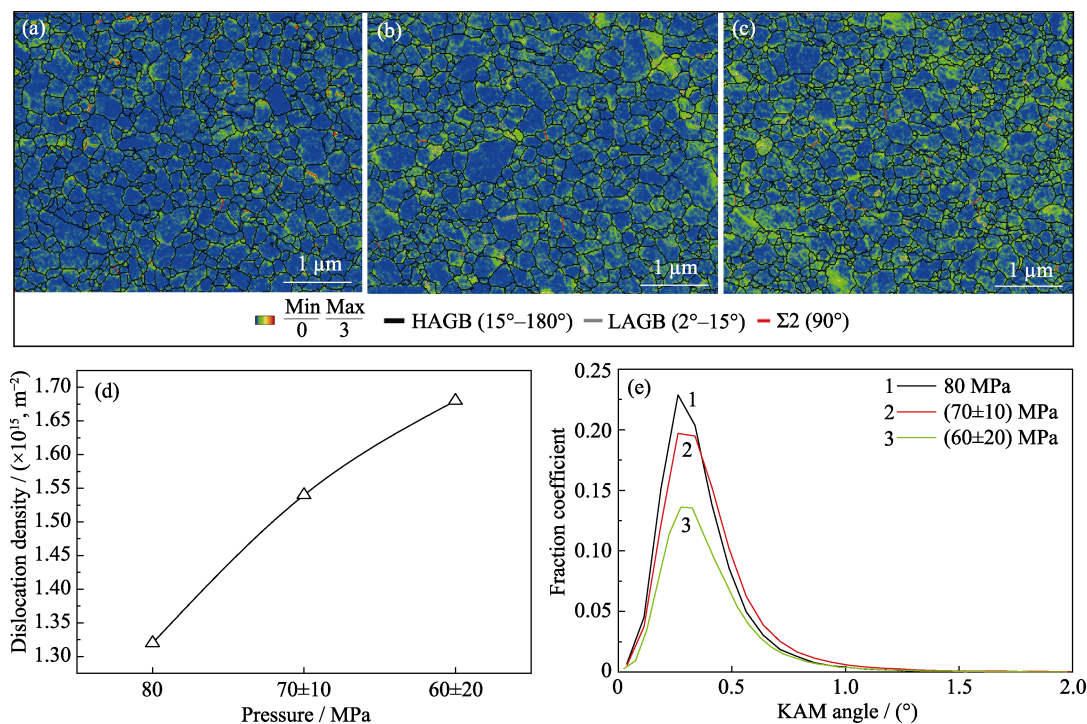


图 7 不同压力振幅下 WC 样品的(a~c)KAM 图、(d)位错密度和(e)KAM 角分布统计图

Fig. 7 (a-c) KAM maps, (d) dislocation densities, and (e) statistical diagrams of KAM angle for WC samples prepared under different pressure amplitudes

(a) 80 MPa; (b) (70±10) MPa; (c) (60±20) MPa. HAGB: high angle grain boundary. Colorful figures are available on website

陶瓷中预置高密度位错^[27-28],但在制备大尺寸样品方面还存在困难。采用动态烧结锻造工艺并提高压力振幅,能够在 WC 陶瓷中预置高密度位错,并且该方法不受模具限制,有望制备大尺寸样品。

2.2 不同压力振幅下 WC 陶瓷的摩擦磨损性能

如图 8(a)所示,不同压力振幅下制备样品的摩擦系数均随着摩擦时间的延长而增大,随后趋于稳定。平均摩擦系数随着压力振幅的增大而减小,当压力振幅提高至 20 MPa 时,平均摩擦系数降至 0.249(图 8(b))。此外,各样品的磨损深度变化均呈现 W 型(图 8(c)),摩擦区一侧的磨损最为严重(图 S2)。磨损率随着压力振幅的增大而降低,

当压力振幅提高至 20 MPa 时,平均磨损率降至 $2.74 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (图 8(b)),表明提高压力振幅可以提高 WC 陶瓷的耐磨能力。如图 9 所示,不同压力振幅下制备的样品呈现相似的磨痕形貌:摩擦区外沿含有大量的黏着物(图 9(b, e, h)白箭头所示);而摩擦区内部含有大量的划痕和犁沟(图 9(b, e, h)黑箭头所示),并伴随着板状黏着物(图 9(c, f, i)白箭头所示),未观察到明显的表层剥离和裂纹。黏着物的成分表征显示其主要为 Fe 和 O 元素,Fe/O 原子比接近 2/3(图 10)。结合摩擦区呈现红褐色的现象,可以推测该黏着物为 Fe_2O_3 相。黏着物的形成与摩擦磨损过程中产生的热量密切相关。在摩擦初始阶段,

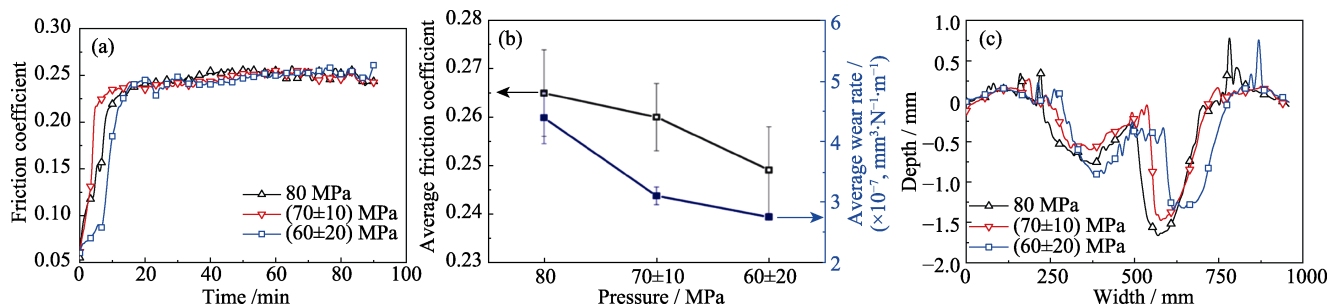


图 8 不同压力振幅下制备的 WC 样品的摩擦磨损性能

Fig. 8 Tribological properties of WC samples prepared under different pressure amplitudes

(a) Friction coefficient as a function of time; (b) Average friction coefficient and wear rate vs. pressure; (c) Wear scar depth vs. width

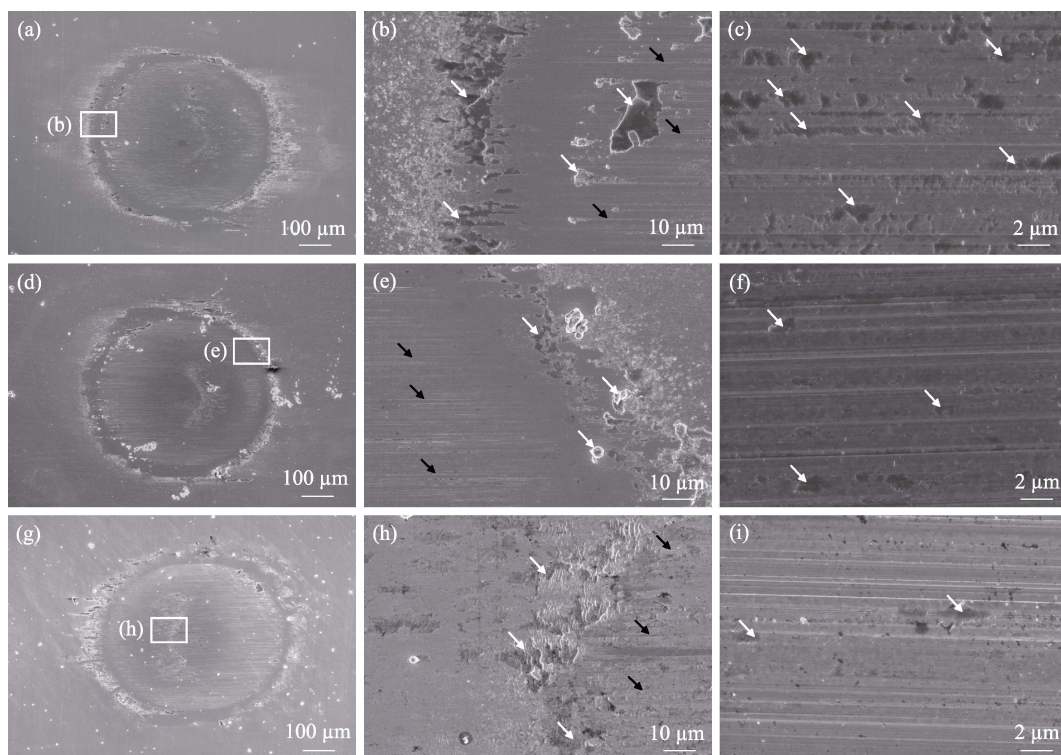


图 9 不同压力振幅下制备的 WC 样品的磨痕形貌

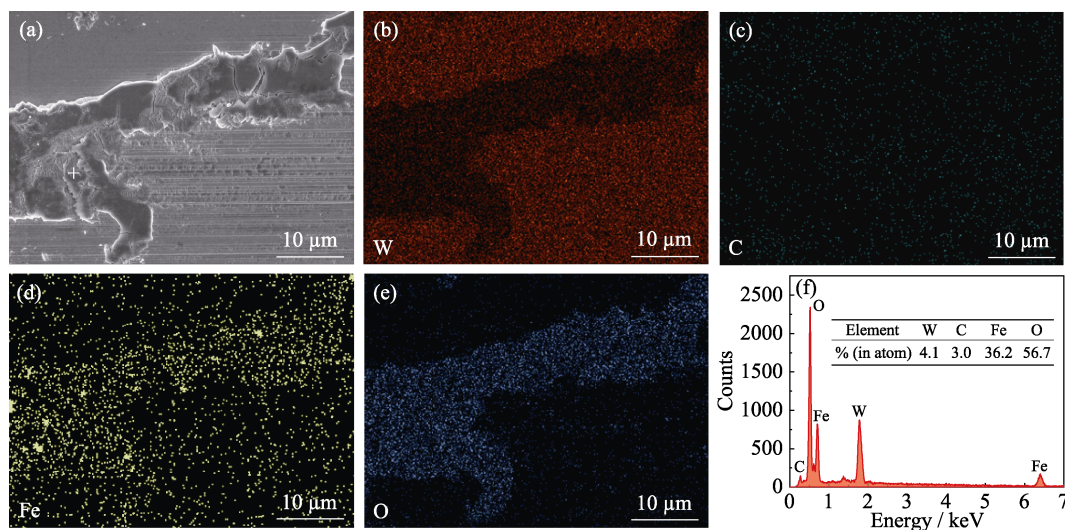
Fig. 9 Wear scar morphologies of WC samples prepared under different pressure amplitudes
(a-c) 80 MPa; (d-f) (70±10) MPa; (g-i) (60±20) MPa

图 10 压力振幅为 10 MPa 时 WC 样品磨痕表面黏着物的形貌和成分分析

Fig. 10 Morphology and element characterization of adhesive phase of WC sample prepared under pressure amplitude of 10 MPa

(a) SEM image; (b-e) EDS mappings corresponding to (a); (f) EDS spectrum corresponding to point in (a) marked with + symbol

WC 陶瓷和摩擦副的接触点上会产生极高的压强和瞬时升温, 导致摩擦副接触点发生塑性形变甚至融化, 从而与 WC 陶瓷焊接在一起。与此同时, 摩擦副中的 Fe 元素发生氧化生成 Fe_2O_3 , 黏附在磨损表面。这表明 WC 陶瓷的主要磨损机理为黏着磨损和犁削。

在摩擦磨损过程中, WC 陶瓷通常会发生晶粒断裂和破碎, 从而导致晶粒被拔出^[29]。烧结锻造工艺制备的 WC 陶瓷未出现显著的表面破碎和剥离,

这与其塑性变形能力有关。由于 WC 晶粒内预置了高密度的位错(图 7), 微应力有助于位错的形核, 同时降低位错在变形过程中的滑移阻力, 从而激发位错运动^[30-31], 提高塑性变形能力; 均匀的位错分布有助于缓解应力集中, 抑制裂纹萌生乃至晶粒破碎。若预置位错密度相对较低, 位错的移动能力会降低, 导致纳米陶瓷在变形过程中可能发生晶界滑移或应力集中^[32], 进而加剧裂纹萌生和扩展。WC

陶瓷的磨损率随着压力振幅增大而降低,其主要原因如下。1) WC 晶粒尺寸减小,根据 Hall-Petch 关系,其抵抗变形能力增强^[5],因此在摩擦磨损过程中磨损速度减缓;另外,Σ2 晶界的增多对位错的阻碍作用增强^[27],也可提高应变硬化能力。2) WC 陶瓷中位错密度增大及均匀分布,提高了位错运动主导的塑性变形能力和变形抗力^[33],使得变形更加均匀,从而抑制局部的剧烈变形及由此萌生的裂纹,降低磨损速度。

3 结论

本研究探讨了振荡压力振幅对 WC 陶瓷微观结构和摩擦磨损性能的影响。结果表明,提高压力振幅能够有效促进 WC 陶瓷在动态烧结锻造过程中的致密化,接近于完全致密,并抑制晶粒生长,同时提高小角晶界和特殊晶界 Σ2 占比,形成密度更高且分布更加均匀的位错。高密度位错促进 WC 陶瓷在变形过程中的位错运动,提高塑性变形能力,缓解应力集中,抑制裂纹萌生;此外,更小的晶粒尺寸及位错密度和特殊晶界 Σ2 占比的提高将阻碍位错运动,增大塑性变形抗力,导致随着压力振幅增大,WC 陶瓷的磨损率降低。

补充材料

本文相关补充材料请登录 <https://doi.org/10.15541/jim20250051> 查阅。

参考文献:

- [1] SUN J L, ZHAO J, HUANG Z F, *et al.* A review on binderless tungsten carbide: development and application. *Nano-Micro Letters*, 2020, **12**: 162.
- [2] REN X Y, MIAO H Z, PENG Z J. A review of cemented carbides for rock drilling: an old but still tough challenge in geo-engineering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, **39**: 61.
- [3] KORNAUS K, RACZKA M, GUBERNAT A, *et al.* Pressureless sintering of binderless tungsten carbide. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, **37**(15): 4567.
- [4] GUBERNAT A, RUTKOWSKI P, GRABOWSKI G, *et al.* Hot pressing of tungsten carbide with and without sintering additives. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, **43**: 193.
- [5] ANDERSON K P, WOLLMERSHAUSER J A, RYOU H, *et al.* Nanostructural effects beyond Hall-Petch: towards superhard tungsten carbide. *Acta Materialia*, 2024, **275**: 120004.
- [6] SHON I J, KIM B R, DOH J M, *et al.* Properties and rapid consolidation of ultra-hard tungsten carbide. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, **489**(1): L4.
- [7] KUMAR A K N, WATABE M, KUROKAWA K. The sintering kinetics of ultrafine tungsten carbide powders. *Ceramics International*, 2011, **37**(7): 2643.
- [8] 邹芹, 李爽, 李艳国. 无粘结相 WC 硬质合金的研究进展. *硬质合金*, 2021, **38**(4): 297.
- [9] MAZO I, MOLINARI A, SGLAVO V M. Electrical resistance flash

- sintering of tungsten carbide. *Materials & Design*, 2022, **213**: 110330.
- [10] LIU J L, LIU D G, REN K, *et al.* Research progress on the flash sintering mechanism of oxide ceramics and its application. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, **37**(5): 473.
- [11] HUANG B, CHEN L D, BAI S Q. Bulk ultrafine binderless WC prepared by spark plasma sintering. *Scripta Materialia*, 2006, **54**(3): 441.
- [12] ZHAO J F, HOLLAND T, UNUVAR C, *et al.* Sparking plasma sintering of nanometric tungsten carbide. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, **27**(1): 130.
- [13] CHA S I, HONG S H. Microstructures of binderless tungsten carbides sintered by spark plasma sintering process. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **356**(1/2): 381.
- [14] LANTSEV E, MALEKHONOVA N, NOKHRIN A, *et al.* Influence of oxygen on densification kinetics of WC nanopowders during SPS. *Ceramics International*, 2021, **47**(3): 4294.
- [15] MA D J, KOU Z L, LIU Y J, *et al.* Sub-micro binderless tungsten carbide sintering behavior under high pressure and high temperature. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2016, **54**: 427.
- [16] GRASSO S, POETSCHKE J, RICHTER V, *et al.* Low-temperature spark plasma sintering of pure nano WC powder. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, **96**(6): 1702.
- [17] XIE Z P, LI S, AN L N. A novel oscillatory pressure-assisted hot pressing for preparation of high-performance ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, **97**(4): 1012.
- [18] ZHAO K, ZHONG W M, SUN M Y, *et al.* Sintering mechanism of pure B₄C ceramic prepared by hot oscillating pressing and with excellent mechanical properties. *Advanced Engineering Materials*, 2024, **26**(16): 2400695.
- [19] WANG K W, ZHAO K, LIU J L, *et al.* Interplay of microstructure and mechanical properties of WC-6Co cemented carbides by hot oscillating pressing method. *Ceramics International*, 2021, **47**(14): 20731.
- [20] LIU D G, FAN J Y, ZHAO K, *et al.* Preparation of super-strong ZrO₂ ceramics using dynamic hot forging. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, **43**(2): 733.
- [21] ZHAO K, FENG P Z, TAN J, *et al.* A new route to fabricate high-performance binderless tungsten carbide: dynamic sinter forging. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, **106**(6): 3343.
- [22] HE Z B, CHEN F, LIU D G, *et al.* Sintering behavior of simulating core FCM fuel via hot oscillatory pressing. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39**(5): 501.
- [23] 张渤海, 姚曙, 范建业, 等. 电场辅助动态热锻制备超高韧 3YSZ 陶瓷. *粉末冶金材料科学与工程*, 2024, **29**(4): 290.
- [24] FOX R T, NILSSON R. Binderless tungsten carbide carbon control with pressureless sintering. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2018, **76**: 82.
- [25] POETSCHKE J, RICHTER V, MICHAELIS A. Fundamentals of sintering nanoscaled binderless hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, **49**: 124.
- [26] PORZ L. 60 years of dislocations in ceramics: a conceptual framework for dislocation mechanics in ceramics. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 2022, **4**(4): 214.
- [27] ZHAO M J, ZHU Q Q, ZOU J, *et al.* Binderless nanocrystalline tungsten carbide with enhanced hardness induced by high-pressure sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44**(8): 4875.
- [28] DONG H F, LI B Z, LIU B B, *et al.* Extraordinary high-temperature mechanical properties in binder-free nanopolycrystalline WC ceramic. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, **97**: 169.
- [29] WANG H B, LOU H Z, XING M, *et al.* Exploring the origin of wear in cemented carbides via molecular dynamics simulations. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, **118**: 106476.
- [30] SALEM M N, DING K, RÖDEL J, *et al.* Thermally enhanced dislocation density improves both hardness and fracture toughness in single-crystal SrTiO₃. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, **106**: 1344.
- [31] XU H Y, JI W, GUO W M, *et al.* Enhanced mechanical properties and oxidation resistance of zirconium diboride ceramics via grain-refining and dislocation regulation. *Advanced Science*, 2022, **9**(6): 2104532.
- [32] MISHRA M, TANGPATJAROEN C, SZLUFARSKA I. Plasticity-controlled friction and wear in nanocrystalline SiC. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, **97**(4): 1194.
- [33] FU L C, ZHOU L P. Effect of applied magnetic field on wear behavior of martensitic steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, **8**(3): 2880.

补充材料:

振荡压力振幅对碳化钨微观结构和摩擦磨损性能的影响

钟卫民¹, 赵 科², 王珂玮³, 刘佃光⁴, 刘金铃¹, 安立楠³

(1. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 成都 611756; 2. 四川轻化工大学 材料科学与工程学院, 自贡 643002; 3. 东莞理工学院 机械工程学院, 东莞 523808; 4. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 611756)

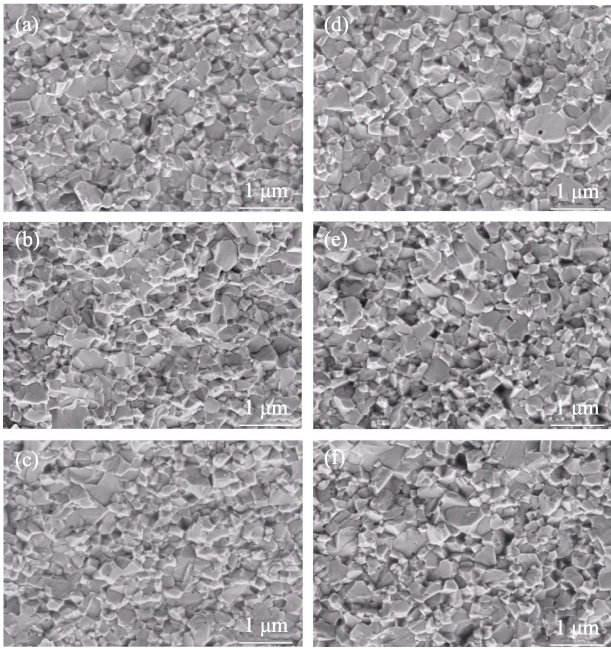


图 S1 压力振幅为 20 MPa 时 WC 样品截面不同位置的 SEM 照片

Fig. S1 SEM images of different locations on cross-section of WC sample prepared under pressure amplitude of 20 MPa

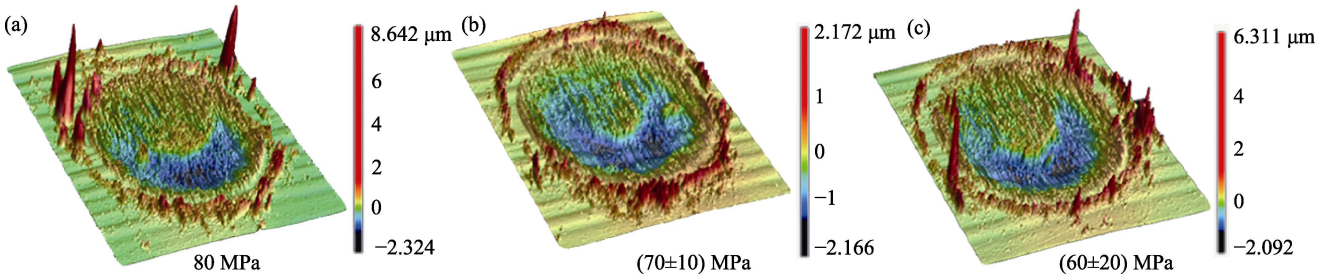


图 S2 不同压力振幅下 WC 样品的三维磨痕形貌

Fig. S2 Three-dimensional surface topographies of WC samples prepared under different pressure amplitudes (a) 80 MPa; (b) (70±10) MPa; (c) (60±20) MPa