

提高 WC-Co 硬质合金高温性能的研究进展

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.5002

胡泽艺^{1,2,3} 肖银春¹
范才河¹ 林孝良²
卢益玲³

1. 湖南工业大学

材料科学与工程学院
湖南 株洲 412007

2. 株洲华锐精密工具

股份有限公司
湖南 株洲 412199

3. 英国德比大学

理工学院
英国 德比 DE22 3BB

摘要: WC-Co 硬质合金凭借其卓越的硬度、耐磨性和高温力学性能,被广泛应用于航空航天、矿山开采及装备制造等对材料要求极为苛刻的领域。然而,随着高端制造业的不断进步,对材料性能的要求日益提高,WC-Co 硬质合金在高温环境下的服役稳定性、抗氧化性及高温力学性能面临严峻挑战。本文系统综述了影响 WC-Co 硬质合金高温性能的诸多因素,涵盖合金成分、高温氧化行为及力学性能退化机制等方面,详细分析了这些因素对材料组织稳定性和性能的具体影响规律。同时,重点探讨了提升硬质合金高温性能的主要研究方法 with 最新进展,包括热处理与烧结工艺的优化、晶粒细化技术的应用、黏结相的优化替代,以及添加稀有金属碳化物等策略。此外,还简要介绍了分子动力学模拟技术在 WC-Co 硬质合金研究中的实际应用。

关键词: WC-Co 硬质合金; 氧化行为; 高温性能; 分子动力学

中图分类号: TG135⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)05-0011-13

引文格式: 胡泽艺,肖银春,范才河,等.提高 WC-Co 硬质合金高温性能的研究进展[J].包装学报,2025,17(5):11-23.

硬质合金通常通过粉末冶金工艺制备,是一类由高硬度难熔碳化物与金属黏结相构成的复合材料,归属于复合金属陶瓷材料范畴^[1-3]。其中,WC-Co 硬质合金因其卓越的硬度、耐磨性、抗压强度及弹性模量,被誉为“工业的牙齿”,是应用最为广泛的硬质合金体系。WC-Co 硬质合金的微观结构是由增强耐磨作用的 WC 硬质相和赋予材料韧性的 Co 黏结相协同构成的,Co 的质量分数通常在 25% 以下。凭借优异的综合力学性能,WC-Co 硬质合金在航空航天、资源开采、装备制造、轨道交通等关键领域中得到了广泛应用,尤其在高温、高负荷与强磨损等严苛环境中,展现出不可替代的性能优势^[4-6]。此外,WC-Co 硬质

合金在现代高速包装设备中也被用于制造切割刀具、模具冲头和耐磨组件,以提升设备运行的稳定性与使用寿命^[7-8]。

随着高端制造业的不断发展,对材料性能的要求日益提升。WC-Co 硬质合金在实际应用中,需长期承受接触载荷、循环载荷以及温度骤变所引发的机械疲劳与热疲劳,这使得其服役环境的恶劣程度大幅提升^[9-11]。在高温环境下,WC-Co 硬质合金会面临诸多组织与性能退化问题,如 WC 颗粒易出现粗化现象,Co 黏结相会软化并加剧氧化进程。这些变化最终导致合金硬度下降、强度变弱、抗氧化能力不足,影响其服役寿命与可靠性^[12-15]。此外,高温环境还会造

收稿日期:2025-04-12

基金项目:国家留学基金委地方合作项目(202308430176);国家自然科学基金面上项目(52271177);湖南省自然科学基金联合项目(2025JJ70063)

作者简介:胡泽艺,女,讲师,博士,主要从事新型高性能硬质合金研究,E-mail:z.hu@derby.ac.uk

通信作者:范才河,男,教授,博士,主要从事硬质合金的微观结构调控研究,E-mail:Fancaihe@hut.edu.cn

成相界面稳定性下降、组织演变加剧,进一步加剧了材料的失效过程^[16-17]。因此,提升 WC-Co 硬质合金的热稳定性、抗氧化性及高温力学性能,已成为该领域亟需解决的关键技术难题。

针对上述问题,研究者们围绕黏结相的优化与替代、稀有金属碳化物的引入、热处理与烧结工艺的优化、晶粒细化技术及表面涂层与改性等方面展开了深入研究。同时,随着计算材料科学的快速发展,分子动力学(molecular dynamics, MD)模拟等数值模拟手段被广泛应用于探究微观强化机制,为揭示高温性能演化规律提供了理论支撑。本文综述了提升 WC-Co 硬质合金高温性能的主要研究方法与最新进展,并对分子动力学模拟技术在该领域的应用进行了简要评述,旨在为 WC-Co 硬质合金的高温服役性能优化与工程化应用提供参考。

1 WC-Co 硬质合金高温性能影响因素

在高温环境下,WC-Co 硬质合金的组织结构容易发生变化,进而对合金的力学性能和抗氧化能力产生显著影响。通常来说,WC-Co 硬质合金的高温性能受多种因素的共同影响,包括合金成分、微观组织特征、高温氧化行为及材料本身的热稳定性等^[18-20]。这些因素相互作用,共同决定了 WC-Co 硬质合金在高温条件下的服役稳定性与性能表现。

1.1 合金成分

材料成分是决定其高温性能的基础。对于 WC-Co 硬质合金而言,WC 晶粒的尺寸分布状况、具体形貌,以及 Co 黏结相的含量与分布形态,直接

影响其在高温下的热稳定性、抗氧化性能及力学性能。

Liu K. 等^[21]研究了不同 Co 含量对超细晶 WC-Co 硬质合金的组织与力学性能的影响。研究结果表明,随着 Co 含量的增加,硬质合金的密度、断裂韧性和弯曲强度均有所提升,但硬度却呈现下降趋势。具体而言,当 Co 的质量分数低于 10% 时,每增加 2% 的 Co,硬度下降约 1.6 GPa。当 Co 的质量分数为 8% 时,合金展现出最为理想的综合力学性能。S. V. Emani 等^[22]研究了不同晶粒尺寸的 WC-6%Co 硬质合金在室温及高温(600 °C 和 800 °C)下的微观组织与力学性能。研究结果表明,WC 晶粒尺寸对合金的高温抗压强度和断裂应变具有显著影响(见图 1^[22])。具体而言,随着晶粒尺寸的减小,合金在 600 °C 和 800 °C 下的强度与韧性均得到显著提高。其中,晶粒尺寸最小(约 0.17 μm)的样品(S1、S2)在高温下呈现出最高的抗压强度,同时具备较大的断裂应变;而晶粒尺寸较大(约 0.27 μm)的样品(S3、S4)则更容易发生失稳断裂;中等尺寸(约 0.21 μm)样品(S5、S6)的性能介于两者之间。如图 1 所示,细晶样品在 800 °C 下仍保持较高的承载能力与塑性,这充分说明晶粒细化有助于提升 WC-Co 合金在高温下的综合力学性能。

综上所述,Co 含量和 WC 晶粒尺寸对 WC-Co 硬质合金的高温性能均有重要影响。尽管已有研究揭示了细化晶粒和优化 Co 含量能够显著提高材料的高温强度和韧性,但如何在实际工业生产中稳定且精准地控制合金微观结构,以达到理想的综合力学性能,仍是当前需要深入解决的问题。后续研究还需进一步明确材料性能与工艺条件之间的相互关系,探索更为

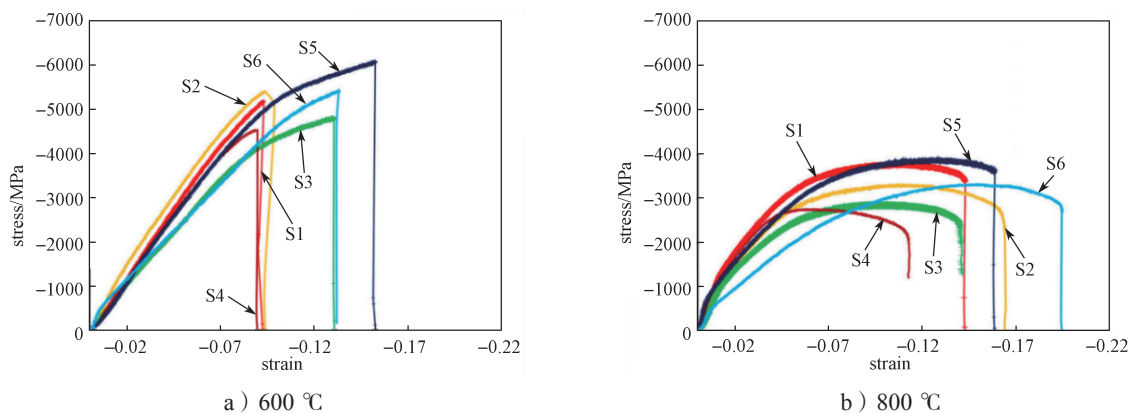


图 1 样品 S1~S6 的典型应力 - 应变曲线

Fig. 1 Typical stress-strain curves of samples S1~S6

经济、稳定的制备工艺。

1.2 高温氧化行为

在高温环境下, 氧化作用是影响 WC-Co 硬质合金服役性能的关键因素之一。Co 黏结相具有较高的氧化活性, 易在高温条件下率先发生氧化反应, 生成氧化物层, 从而破坏材料的组织结构^[23-26]。Co 黏结相的选择性氧化在很大程度上削弱了合金整体的抗氧化性能。Chen L. Y. 等^[27-28]系统研究了 WC-Co 硬质合金在 300~700 °C 范围内的氧化行为, 并将其氧化进程划分为 3 个典型阶段 (见图 2^[28]): 1) 轻微氧化阶段, 此时 Co 黏结相和 WC 相仅发生轻微氧化; 2) Co 黏结相选择性氧化阶段, 此时试样表面的 Co 黏结相完全氧化, 而 WC 相仅部分发生氧化; 3) Co 黏结相与 WC 相同时氧化阶段, 该阶段生成的氧化膜主要由 WO_3 和少量 $CoWO_4$ 组成。研究指出, 氧化初期氧化膜首先在 Co 黏结相表面形成, 随后逐步向 WC/Co 界面蔓延扩展。此外, 对该合金在 500 °C 下的氧化行为进行深入研究发现, 该温度区间内存在显著的 Co 黏结相选择性氧化现象。

与 Co 黏结相的优先氧化不同, WC 相的氧化进程往往在温度更高的环境中发生, 其生成的氧化物仍会对材料的热稳定性产生显著影响^[29-33]。Shi X. L. 等^[34]对以纳米晶 WC-10Co 复合粉末制备的超细晶硬质合金进行了系统研究, 考察了其在 450~700 °C 空气气氛下的氧化行为。研究发现, 该材料约在 425 °C 开始出现氧化现象, 当温度超过 700 °C 时, 进入剧烈氧化阶段, 此时生成的氧化物主要包括 WO_3 、 Co_3O_4 和 $CoWO_4$ 。随着温度的升高, 材料表层组织变得疏松, WC 晶粒粗化现象明显, 颗粒尺寸可达 10 μm 以上, 这导致材料的硬度和抗弯强度显著下降。此外, 氧化过程伴随着一定程度的脱碳, 同时有 η 相析出, 这些变化进一步加速了性能劣化。研究结果表明, 该类材料在空气中的服役温度应控制在 550 °C 以下, 以避免组织和性能的严重退化。

尽管现有研究对 WC-Co 硬质合金的氧化行为及氧化产物特征进行了较为深入的探讨, 且在不同温度区间 Co 黏结相与 WC 相的氧化机制方面取得了显著进展, 但对于氧化过程中微观缺陷的形成、扩展及其对氧扩散路径的影响仍缺乏系统研究。未来应结合先进原位表征手段与多尺度分析方法, 深入揭示氧化过程中结构演化与性能劣化之间的关联机制, 为构建更具针对性的抗氧化设计方案提供理论支撑。

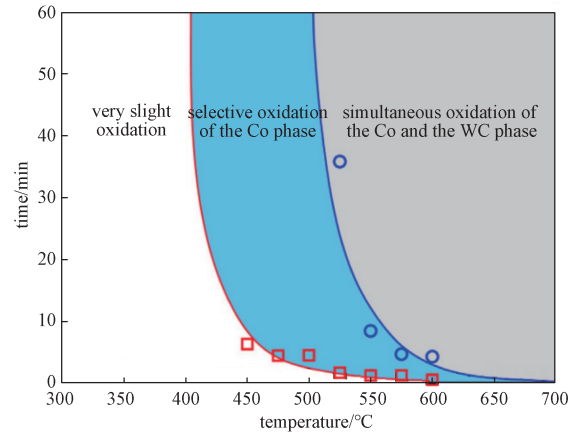


图 2 WC-Co 硬质合金在不同温度下的氧化阶段示意图

Fig. 2 Schematic illustration of oxidation stage of WC-Co cemented carbides at different temperatures

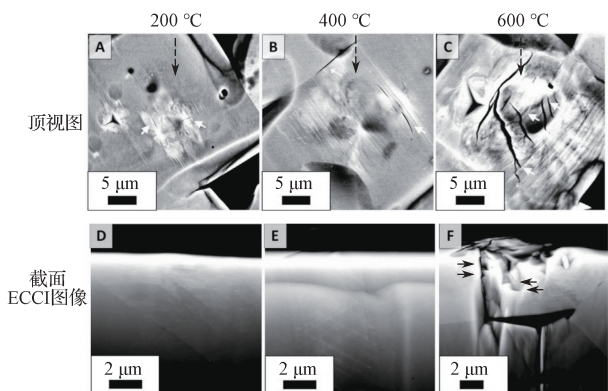
1.3 高温下的力学性能退化机制

高温环境下, WC-Co 硬质合金面临的状况颇为复杂。一方面, 氧化作用致使其组织结构发生改变; 另一方面, 热激活会引发多种机制, 导致其力学性能出现显著退化。研究表明, 高温条件下 Co 黏结相易发生软化、再结晶与组织失稳, 导致材料塑性增强, 但强度与硬度降低; 与此同时, WC 晶粒之间的界面结合力减弱, 使得裂纹扩展趋势加剧^[35]。此外, 高温还可能引发晶粒粗化、孔隙形成及内部应力释放等结构变化, 进一步削弱合金的热稳定性^[36-37]。这些因素相互协同, 对 WC-Co 硬质合金在高温工况下的综合力学性能产生了显著影响。

F. de Luca 等^[38]采用高温纳米压痕与电子显微技术, 系统研究了 WC 相与 Co 黏结相在室温至 700 °C 范围内的纳米力学行为。结果表明, WC 晶粒的硬度随温度升高而显著下降, 至 700 °C 时降幅在 70%~75% 之间。同时, WC 晶粒展现出明显的各向异性力学响应特性, 其中基面 (0001) 方向的硬度始终高于棱柱面 (0110)、(1210) 方向, 且在不同温度区间呈现出差异化的塑性演化特征。进一步结合电子通道衬度扫描成像 (electron channeling contrast imaging, ECCI) 分析发现, 在高温下, WC 晶粒内部发生大量滑移与位错积累, 塑性区逐步扩展并伴随裂纹萌生, 最终导致局部组织失稳与贯通裂纹的形成, 如图 3^[38] 所示。与室温下 WC 晶粒仅发生局部滑移的行为不同, 高温条件下的热激活机制极大地促进了滑移系统的活化, 同时削弱了晶界结合力, 增强了 WC 晶粒的塑性变形趋势并加剧脆性断裂风险。

T. Teppernegg 等^[39]针对不同 Co 含量和 WC 晶粒尺寸的 WC-Co 硬质合金,研究了其在室温至 900 °C 范围内力学性能的变化情况。结果表明,弹性模量和屈服强度随温度升高显著下降,当温度达到 900 °C 时,屈服强度的降幅超过 80%。与此相反,高温下部分合金的断裂韧性反而有所提升,尤其是在高 Co 含量和细晶组织条件下。这种现象被认为与裂纹尖端塑性区扩展和延性断裂机制的增强有关。可见,在高温条件下,该材料表现出强度衰退而韧性增强的特征。

目前的研究已较为系统地揭示了 WC-Co 硬质合金在高温环境下的性能退化及其相关机制,然而对于晶界滑移、位错演化及晶粒取向所导致的各向异性效应等关键微观过程仍缺乏深入探讨。未来应围绕上述机制开展更细致的研究,以进一步推动 WC-Co 硬质合金在高温服役条件下的结构优化与性能提升。



注:白色箭头标示压痕内的裂纹位置;黑色箭头“→”指出晶粒沿棱柱面方向产生的裂纹特征。

图3 不同温度下 WC 棱柱晶粒的塑性变形行为
Fig. 3 Plastic deformation behavior of prismatic WC grains at different temperatures

2 提高 WC-Co 硬质合金高温性能的方法

为了提升 WC-Co 硬质合金在高温环境下的力学性能,研究人员从微观结构与组织调控的角度出发,探索了多种优化策略,旨在增强其耐热性、抗氧化能力及力学稳定性^[40-41]。目前,通过热处理与烧结工艺的优化、晶粒细化以及黏结相改性等手段提高 WC-Co 硬质合金性能已取得显著进展^[42-44]。其中,添加稀有金属碳化物被认为是最为有效且应用广泛的策略之一,其在抑制晶粒生长、增强组织稳定性和提升高温综合性能方面均展现出优良的成效^[45-46]。

2.1 热处理与烧结工艺的优化

热处理与烧结工艺在 WC-Co 硬质合金的制备过程中起着至关重要的作用。通过优化工艺参数,可以有效改善合金的微观组织、增强其高温力学性能和抗氧化能力^[47-48]。在高温条件下,WC-Co 硬质合金的性能极易遭受诸如晶粒粗化、Co 相软化以及氧化等因素的影响。鉴于此,灵活调控热处理温度、时间、气氛,以及烧结过程中温度的变化,有助于提升材料的致密性、降低孔隙率以及优化晶粒尺寸等^[49-50]。此外,通过合理选择烧结工艺,能够进一步提高合金的综合力学性能。

如图 4^[51]所示, Micro-FAST 烧结工艺采用高电流、低电压的脉冲电流直接作用于模具与样品,实现快速升温与致密化,有效缩短烧结时间并提高组织均匀性。Fei H. L. 等^[51]采用 Micro-FAST 烧结法,对 WC-6Co 硬质合金的烧结工艺进行了研究,并评估了不同烧结温度和加热速率对合金致密化、微观结构和力学性能的影响。研究表明,随着烧结温度从 900 °C 升高至 1200 °C,样品的致密度得到了大幅提升,相对密度可达 97.71%。同时,加热速率对致密化过程也有重要影响。50 °C /s 的加热速率能够获得致密的微观结构;加热速率过高(如 100 °C /s)则会导致孔隙的产生,影响合金的致密度。通过优化烧结工艺,在 1200 °C、50 °C /s 和保温 12 min 的条件下,样品的硬度可达到 21.7 GPa,且相比传统烧结工艺, Micro-FAST 烧结法能够在更短的时间内让样品具备更好的切削性能。F. Ghadami 等^[52]研究了大气环境下热处理对等离子喷涂 WC-12%Co 涂层结构与性能的影响。结果表明,在 500 °C 热处理后,涂层硬度有

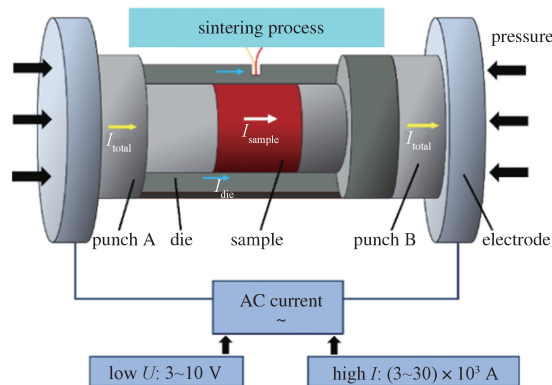


图4 Micro-FAST 烧结工艺示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the Micro-FAST sintering process

所提升,这主要是由于非晶相部分重结晶为 h-碳化物(如 W_3Co_3C 和 W_6Co_6C);然而,当热处理温度升高至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上时,氧化反应加剧,逐渐生成 WO_3 和 $CoWO_4$ 等氧化物相,导致涂层硬度下降,涂层与基体之间还出现了分层和界面脱落现象。因此,热处理温度对 WC-Co 涂层的组织稳定性和高温性能具有显著影响。合理控制热处理温度是提升高温服役性能的关键。

合理优化烧结速率和保温时间等工艺参数,能够显著提高 WC-Co 硬质合金的高温性能。然而,现阶段对工艺参数间相互作用机制的理解仍不够深入。未来应进一步厘清其耦合关系,以实现性能与生产效率的协同提升。

2.2 晶粒细化技术

晶粒细化是提升 WC-Co 硬质合金高温性能的重要手段之一。细化 WC 晶粒不仅能提高材料在常温下的硬度与强度,同时也能有效抑制高温条件下 WC 晶粒粗化、延缓组织退化过程,从而增强合金的热稳定性和抗氧化性能^[53-54]。细晶结构通常具有更高的晶界密度,这有助于阻碍裂纹扩展和位错滑移,在高温载荷作用下保持更稳定的力学响应^[55-56]。此外,晶粒尺寸的控制对于高温下的塑性行为、氧化反应路径和相界面稳定性也具有重要影响^[57-58]。因此,采用适当的方法来实现 WC 晶粒的有效细化,是提升 WC-Co 硬质合金高温性能的关键发展方向之一。

Fang G. K. 等^[59]通过放电等离子烧结法,制备

了不同晶粒尺寸的 WC-6%Co 硬质合金,并对其在 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的抗氧化性能进行了研究。结果表明,细晶合金在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下表现出更优异的抗氧化性。当温度达到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,超细晶材料具有更好的抗氧化性,这主要是由于致密稳定的氧化膜形成。如图 5^[59]所示,细晶与超细晶合金在氧化过程中的结构演化存在明显差异,后者在高温下更有利于形成连续、稳定的氧化膜层。张洪等^[60]制备了不同 WC 粒径 ($1.0, 2.5, 3.5\text{ }\mu\text{m}$) 的 WC-8%Co 硬质合金,研究其在室温至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的耐磨性能。结果表明,随着 WC 晶粒增大,合金硬度下降,韧性上升,高温下的耐磨性能明显降低。磨损实验显示,在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,大粒径试样 ($3.5\text{ }\mu\text{m}$) 的磨损率约为小粒径试样的 2.5 倍。可见,细化晶粒有助于提升 WC-Co 合金在高温条件下的硬度和耐磨性,且合理控制粒径有助于兼顾强度与热稳定性。

通过晶粒细化可显著提升 WC-Co 硬质合金的高温性能与抗氧化能力,但晶粒过度细化导致材料脆性增加等负面效应仍然值得关注。未来研究需进一步探讨晶粒尺寸与性能之间的最佳平衡,以推动细化技术的实际应用。

2.3 黏结相改性与替代技术

黏结相作为 WC-Co 硬质合金中连接和支撑硬质颗粒的核心组成部分,其类型、含量与分布状态对合金在高温下的性能具有重要影响。传统 Co 黏结相虽能赋予材料良好的韧性和一定程度的高温强度,但在高温环境中易发生软化、氧化甚至迁移现象,这成

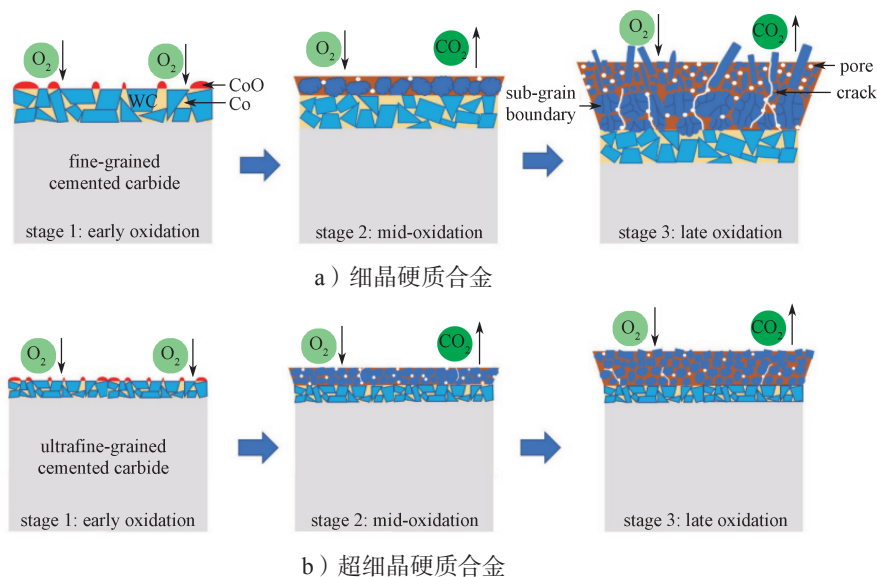


图 5 试样的氧化过程示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the samples in the oxidation process

为阻碍 WC-Co 硬质合金高温性能提升的主要因素之一^[61-63]。为了增强 WC-Co 硬质合金的高温稳定性和抗氧化能力, 研究者们一方面尝试优化 Co 的含量与组织均匀性, 另一方面也积极探寻如 Ni、Fe 等金属或 Ni/Co、Fe/Co 复合黏结相, 以及高熵合金、陶瓷相等新型替代材料^[64-65]。

Chang F. 等^[66]采用 FeCoCrNiAl 高熵合金 (HEAs) 替代 Co 黏结相, 制备了不同 HEAs 含量的 WC 基硬质合金, 并研究其高温抗氧化性能。结果表明, HEAs 的加入可细化 WC 晶粒、提高组织致密性, 并在 900~1000 °C 下显著降低氧化增重。如图 6^[66] 所示, 随着 HEAs 含量的增加, 合金组织愈发致密, 晶粒尺寸明显减小。此外, 氧化膜中富含 Al₂O₃ 和复合钨酸盐等致密氧化物, 这些物质有助于抑制氧的扩散, 从而提升了氧化膜的完整性。I. Konyashin 等^[67]研究了以 Co-Re 固溶体为黏结相的 WC 基硬质合金在高温环境下的组织与性能演化行为。研究表明, Re 元素在 Co 相中形成稳定的 Co-Re 固溶体, 有效抑制了 WC 晶粒的生长, 并提高了组织的均匀性与热稳定性。

WC-Co-Re 合金在 300~800 °C 范围内, 展现出更为出色的热硬度保持率和蠕变抗力, 因而适用于高温切削等极端工况。Zhu S. G. 等^[68]制备了含 CoCrFeNiAl 高熵黏结相的 WC 硬质合金, 并对其在 600~800 °C 下的氧化行为进行了研究。结果表明, 高熵合金显著降低了氧化增重, HEAs 质量分数为 20% 的合金氧化增重仅是 HEAs 质量分数为 5% 的 14%。氧化膜中形成了 Al₂O₃、Cr₂O₃ 和 MWO₄ 等致密氧化物, 这些氧化物有效抑制了氧的扩散, 从而提升了合金的抗氧化性能。

目前, 黏结相的优化与替代已在实验研究中展现出良好前景, 尤其是采用高熵合金等新型材料来提升合金的高温性能。然而, 这些新型黏结相的长期使用稳定性、成本控制以及真正应用到工业生产, 还有待解决。后续研究还需要从材料本身的特性和实际应用的可行性两个方面进行深入探索。

2.4 添加稀有金属碳化物技术

在当前提升 WC-Co 硬质合金高温性能的众多方法中, 添加稀有金属碳化物 (如 TaC、TiC、VC、

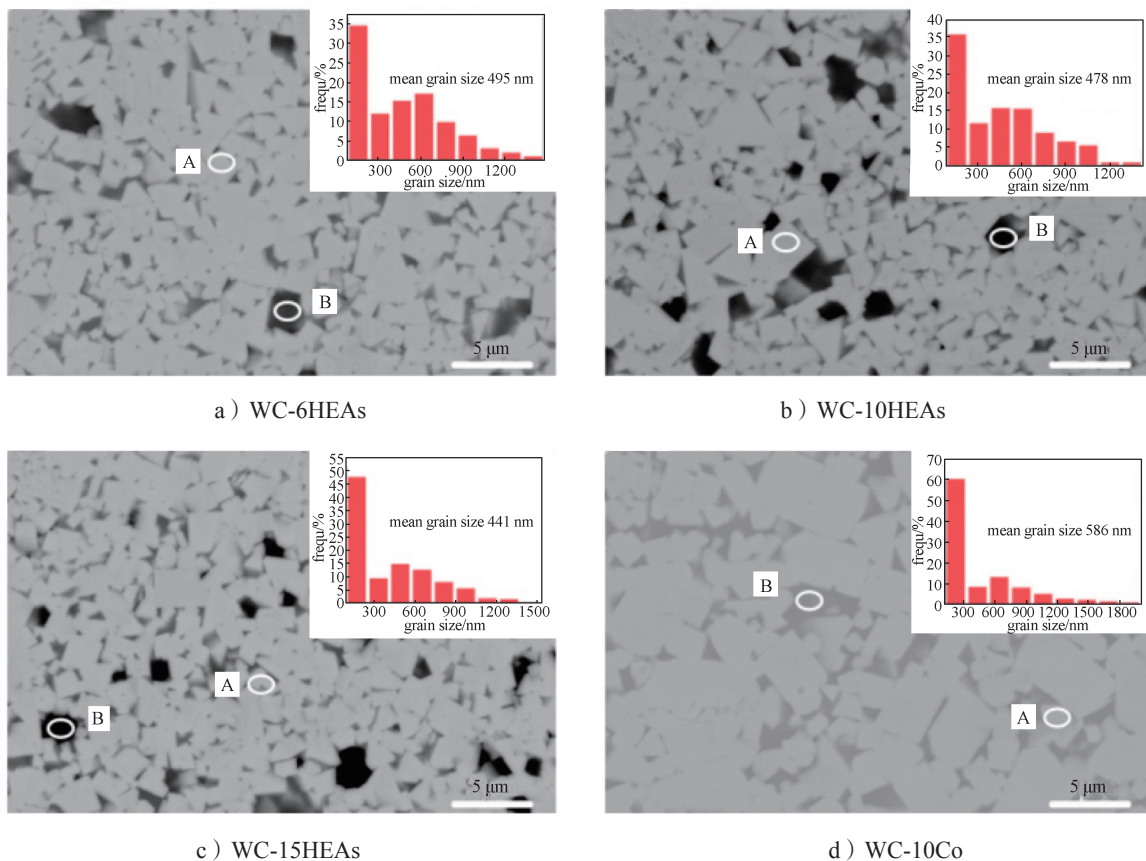


图 6 烧结样品的 SEM 图像
Fig. 6 The SEM images of the sintered samples

Cr₃C₂ 等) 是应用最为广泛且成效显著的方法之一。这些稀有金属碳化物不仅能够有效抑制 WC 晶粒生长、稳定合金组织结构, 还能显著增强材料的高温硬度、抗氧化性与耐磨损能力^[69-70]。部分碳化物在高温下可与氧反应生成致密稳定的氧化膜, 减缓氧扩散, 从而延缓组织劣化和性能退化^[71]。此外, 稀有金属碳化物作为第二相被引入合金, 还能够改善 Co 相的分布状态, 从而提升合金的整体热稳定性^[72-73]。综上所述, 稀有金属碳化物的添加已然成为提升 WC-Co 硬质合金高温性能的关键研究方向之一。

Hu H. X. 等^[74]研究了在超粗晶 WC-8Co 硬质合金中添加质量分数为 0.8% 的 TaC 对其高温力学性能的影响。结果表明, TaC 的引入能够有效抑制晶粒生长, 同时改善 WC/Co 界面状况, 并显著提升合金在高温下的抗压强度与抗裂纹能力。如图 7^[74]所示, Ta 原子固溶进入 WC 晶格后, 引发了局部的晶格畸变, 改变了位错的滑移路径, 并在棱柱面与基面间形成交织的位错网络。该位错网络能够有效钉扎位错运动, 从而提高材料在高温下的塑性抗力与结构稳定性。Li X. K. 等^[75]探究了不同 VC 含量对 WC-10Co-0.8Cr₃C₂ 硬质合金显微组织及高温力学性能的影响。研究发现, 当添加质量分数为 0.2% 的 VC 时, 合金在 800 °C 下表现出优异的综合力学性能: 横向断裂强度 (TRS) 高达 2170 MPa, 硬度达到 1370 HV5,

断裂韧性为 17.78 MPa·m^{1/2}。A. Basyir 等^[76]研究了 CrSi₂ 对 WC-12Co 硬质合金高温抗氧化性能的影响。结果表明, CrSi₂ 的加入有效降低了合金的孔隙率, 提高了致密度和硬度。此外, 在 800~1000 °C 的氧化环境中, CrSi₂ 的存在促进了 SiO₂ 和 Cr₂O₃ 保护膜的形成, 显著提升了抗氧化能力, 减少了氧化增重。Wang B. X. 等^[77]研究了在超细晶 WC-Co 硬质合金中引入 (Ti, W)C 对高温氧化行为的影响。结果表明, (Ti, W)C 的添加能显著减缓氧化过程, 提高材料的抗氧化能力与高温力学性能。如图 8^[77]所示, 未添加 (Ti, W)C 的样品在高温下形成的氧化膜较厚, 且存在大量孔隙和缺陷, 加速氧气向内部扩散; 而添加 (Ti, W)C 后, 氧化产物结构更致密, 这有效抑制了氧化膜的生长并提升抗氧化膜的完整性。Huang S. W. 等^[78]研究了 WC-TiC-TaC-Co 硬质材料在低温下的氧化情况。结果表明, 相比 WC 相与 Co 相, (W, Ti, Ta)C 混合物相在氧化过程中生成的致密层具有更好的抗氧化性能。

添加 TaC、NbC、VC、Cr₃C₂ 等稀有金属碳化物能够有效提升 WC-Co 硬质合金的高温硬度、抗氧化性能和耐磨性。然而, 对于不同碳化物间的协同作用、合理添加比例及其长期服役稳定性, 尚缺乏系统地认识。未来研究应聚焦于上述关键问题, 进一步推动该方法在提升 WC-Co 硬质合金高温性能方面的高效应用。

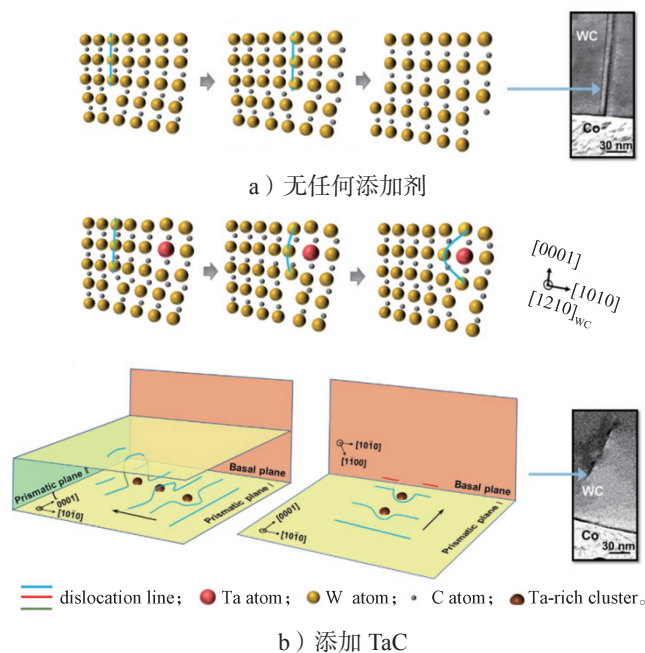


图 7 WC 位错形态的形成示意图

Fig. 7 Schematic diagrams for the formation of WC dislocation patterns

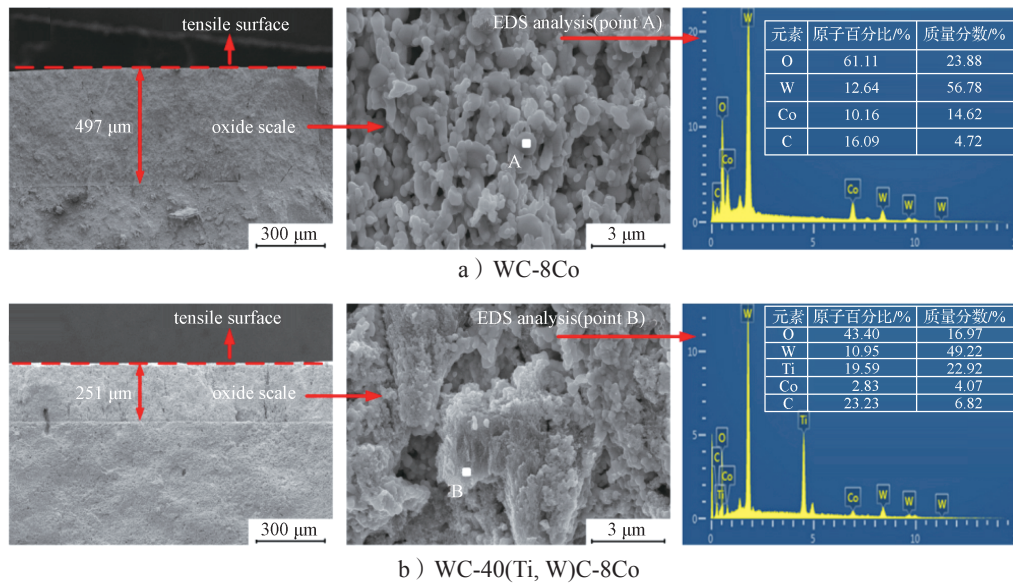


图 8 在 900 °C 下 WC-8Co 和 WC-40(Ti, W)C-8Co 的断裂表面 SEM 图

Fig. 8 SEM micrographs showing fracture surfaces of WC-8Co and WC-40(Ti, W)C-8Co tested at 900 °C

3 分子动力学模拟在 WC-Co 硬质合金中的应用

作为一种在原子尺度上开展研究的数值分析方法，分子动力学模拟被广泛应用于研究材料在外场作用下的微观响应过程。该方法能够动态跟踪原子在特定热力学和力学条件下的演化轨迹，从而揭示微结构演变、缺陷行为、断裂机制等关键物理过程^[79-81]。对于 WC-Co 硬质合金这种具有复杂多相界面的材料体系而言，分子动力学模拟在揭示其微观结构演化、相界行为、应力分布及位错运动机制等方面展现出显著优势^[82-84]。近年来，研究人员广泛应用分子动力学模拟对 WC-Co 体系在应力加载、组织演化以及界面行为等条件下的微观响应过程进行了系统研究。

娄鹤子等^[85]利用分子动力学方法，模拟了 WC-Co 硬质合金在不同滑动速度下的摩擦磨损行为。研究表明，随着滑动速度的增加，体系的摩擦因子与温度显著升高，界面处原子迁移与塑性变形增强，Co 相中形成明显的局部熔融区，导致界面结构破坏与磨损加剧。此外，在高滑动速度下，接触界面上形成的非晶层与脱层现象更为显著。该研究揭示了载荷与速度相互耦合作用下的失效机制。M. V. G. Petisme 等^[86]基于分子动力学模拟，对不同取向 WC/WC 晶界的高温滑移行为进行了研究。结果表明，晶粒取向、剪切方向及温度对晶界滑移阻力具有显著影响，滑移方向与晶界错配程度越大，晶界的滑移阻力越

高。在高温条件下，体系会出现热软化现象，滑移机制从局部重构逐渐转变为晶格滑移与断裂行为的协同作用。Wang C. 等^[87]基于分子动力学模拟，深入探讨了残余应力对 WC-Co 硬质合金中位错演化与微裂纹形成的影响。结果表明，较大的残余压应力可抑制位错扩展和微裂纹萌生，从而提升合金的微观结构稳定性；而拉应力则会促进晶界裂纹的形成与扩展。模拟结果进一步显示，在残余应力的影响下，WC/Co 界面的应力集中程度是决定裂纹传播路径和断裂方式的关键因素。Wang H. B. 等^[88]通过分子动力学模拟，深入研究了 WC-Co 硬质合金磨损行为的原子机制。研究表明，材料在剪切载荷下的主要磨损机制源于黏结相材料的迁移及表面非晶化现象。如图 9^[88]所示，在载荷的作用下，接触区域内部的应力集中现象显著，Co 相局部发生软化甚至原子迁移，进而形成非晶区，同时伴随着表层材料的脱落与切屑的生成；剪切应变分布图进一步揭示了滑移和位错积累的路径。可见，在整个磨损过程中，硬质相和黏结相的协同演化，是导致磨损失效的关键机制之一。

分子动力学模拟作为揭示 WC-Co 硬质合金微观结构演化与性能退化机制的重要手段，在相关研究中展现出良好应用前景。然而，受限于计算尺度与模型简化，其模拟结果与实际工况之间仍存在一定差距。未来应在提升模拟精度与规模的基础上，加强其与实际服役条件的对应关系，以更准确地预测材料在复杂环境下的服役行为。

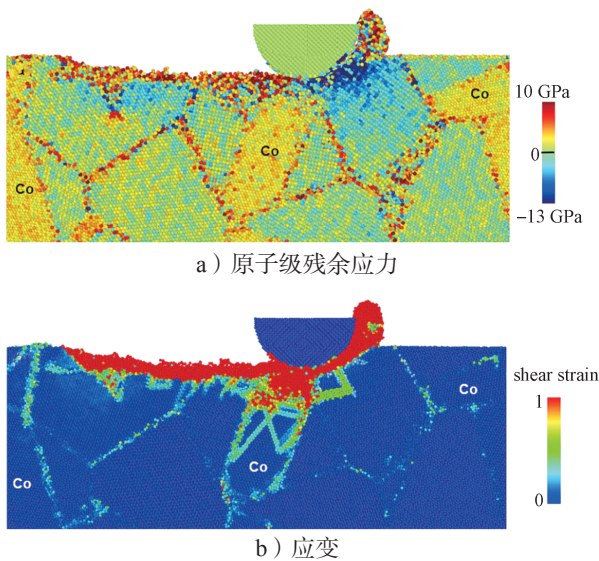


图9 WC-Co 硬质合金摩擦过程结束时原子级残余应力和应变的深度分布

Fig. 9 Depth profiles of the atomic-scale residual stress and strain at the end of the friction process of the WC-Co cemented carbide

4 结论与展望

1) 尽管当前针对 WC-Co 硬质合金高温性能的研究较为广泛, 但晶粒粗化、Co 相氧化软化与界面失稳等因素的协同作用机制尚不明确, 特别是缺乏对晶粒尺寸、Co 含量及其分布状态等微观因素与高温性能之间协同关系的深入探讨。

2) 热处理与烧结工艺的优化、晶粒细化、稀有金属碳化物的添加以及新型黏结相的替代, 已被证实能够显著提升 WC-Co 合金的高温性能。然而, 不同优化措施之间的协同作用机制尚不明确, 各自的长期高温稳定性和作用效果仍需进一步研究进行明确。

3) 分子动力学模拟在揭示 WC-Co 硬质合金高温性能方面的应用仍处于起步阶段。目前, 大部分研究工作主要集中在常温或简单加载条件下, 而对合金在复杂高温工况下的微观结构演变机制及界面行为的研究亟需进一步深入探讨。

总之, 未来应围绕微观结构精准调控、新型黏结相开发与多尺度模拟技术的深入应用, 进一步提升 WC-Co 硬质合金在极端环境下的性能, 并推动其工程化应用。

参考文献:

[1] KRESSE T, MEINHARD D, BERNTHALER T,

et al. Hardness of WC-Co Hard Metals: Preparation, Quantitative Microstructure Analysis, Structure-Property Relationship and Modelling[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 75: 287-293.

[2] WANG H B, SONG X Y, LIU X M, et al. Effect of Carbon Content of WC-Co Composite Powder on Properties of Cermet Coating[J]. Powder Technology, 2013, 246: 492-498.

[3] SUN J F, ZHANG F M, SHEN J. Characterizations of Ball-Milled Nanocrystalline WC-Co Composite Powders and Subsequently Rapid Hot Pressing Sintered Cermets[J]. Materials Letters, 2003, 57(21): 3140-3148.

[4] CHEN C, HUANG B Y, LIU Z M, et al. Additive Manufacturing of WC-Co Cemented Carbides: Process, Microstructure, and Mechanical Properties[J]. Additive Manufacturing, 2023, 63: 103410.

[5] FANG Z Z, WANG X, RYU T, et al. Synthesis, Sintering, and Mechanical Properties of Nanocrystalline Cemented Tungsten Carbide: A Review[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(2): 288-299.

[6] GARCÍA J, COLLADO CIPRÉS V, BLOMQUIST A, et al. Cemented Carbide Microstructures: A Review[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 80: 40-68.

[7] 李银芝, 刘 钢, 陈信锺, 等. 烧结温度和保温时间对 Ti(C, N) 基金属陶瓷微观组织结构和性能的影响 [J]. 包装学报, 2023, 15(3): 37-45.

[8] 高凌燕, 周书助, 伍小波, 等. 碳含量对超细 Ti(C, N) 基金属陶瓷的结构及性能的影响 [J]. 包装学报, 2013, 5(3): 10-15.

[9] QIAO Y F, FISCHER T E, DENT A. The Effects of Fuel Chemistry and Feedstock Powder Structure on the Mechanical and Tribological Properties of HVOF Thermal-Sprayed WC-Co Coatings with Very Fine Structures[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172(1): 24-41.

[10] PHIRI R, OLADIJO O P, AKINLABI E T. Effect of Deposition Temperature on the Wear Behavior of WC-Co Coated Mild Steel Substrate[J]. BIUST Research and Innovation Symposium, 2019, 1(1): 42-45.

[11] MI P B, YE F X. Influence of the Cu Addition on the Tribological Properties of HVOF Sprayed Bimodal WC-Co Coating[J]. Materials Research Express, 2019, 6(3): 036408.

[12] GUIMARÃES B, FERNANDES C M, FIGUEIREDO

- D, et al. A Novel Approach to Reduce In-Service Temperature in WC-Co Cutting Tools[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(3): 3002–3008.
- [13] HE J H, AJDELSZTAJN L, LAVERNIA E J. Thermal Stability of Nanocrystalline WC-Co Powder Synthesized by Using Mechanical Milling at Low Temperature[J]. *Journal of Materials Research*, 2001, 16(2): 478–488.
- [14] UEDA F, DOI H, FUJIWARA F, et al. Bend Deformation and Fracture of WC-Co Alloys at Elevated Temperatures[J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1977, 18(3): 247–256.
- [15] PITTARI J J, SWAB J J, WRIGHT J, et al. Mechanical Evaluation of WC-Co Materials with Varying Microstructures[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, 104: 105809.
- [16] 刘育林, 朱圣宇, 于源, 等. 铝掺杂 WC-Co 基硬质合金的高温摩擦学性能、磨损机理及抗氧化性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(5): 565–576.
- [17] VOITOVICH V B, SVERDEL V V, VOITOVICH R F, et al. Oxidation of WC-Co, WC-Ni and WC-Co-Ni Hard Metals in the Temperature Range 500–800 °C [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1996, 14(4): 289–295.
- [18] SHI K H, ZHOU K C, LI Z Y, et al. Microstructure and Properties of Ultrafine WC-Co-VC Cemented Carbides with Different Co Contents[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(6): 1955–1960.
- [19] MILMAN Y V, LUYCKX S, NORTHROP I. Influence of Temperature, Grain Size and Cobalt Content on the Hardness of WC-Co Alloys[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1999, 17(1/2/3): 39–44.
- [20] OKAMOTO S, NAKAZONO Y, OTSUKA K, et al. Mechanical Properties of WC/Co Cemented Carbide with Larger WC Grain Size[J]. *Materials Characterization*, 2005, 55(4/5): 281–287.
- [21] LIU K, WANG Z H, YIN Z B, et al. Effect of Co Content on Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine Grained WC-Co Cemented Carbide Sintered by Spark Plasma Sintering[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(15): 18711–18718.
- [22] EMANI S V, DOS SANTOS A F C R, SHAW L L, et al. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties at Low and High Temperatures of WC-6wt% Co[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 58: 172–181.
- [23] BASU S N, SARIN V K. Oxidation Behavior of WC-Co[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 209 (1/2): 206–21.
- [24] LOFAJ F, KAGANOVSKII Y S. Kinetics of WC-Co Oxidation Accompanied by Swelling[J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 30(7): 1811–1817.
- [25] 刘雪梅, 范金莲, 冯浩, 等. WC-Co 硬质合金的高温氧化过程研究[J]. *中国体视学与图像分析*, 2018, 23(4): 343–350.
- [26] GU W H, JEONG Y S, KIM K, et al. Thermal Oxidation Behavior of WC-Co Hard Metal Machining Tool Tip Scraps[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1250–1256.
- [27] CHEN L Y, YI D Q, WANG B, et al. The Selective Oxidation Behaviour of WC-Co Cemented Carbides During the Early Oxidation Stage[J]. *Corrosion Science*, 2015, 94: 1–5.
- [28] CHEN L Y, YI D Q, WANG B, et al. Mechanism of the Early Stages of Oxidation of WC-Co Cemented Carbides[J]. *Corrosion Science*, 2016, 103: 75–87.
- [29] WU X, SHEN J Y, JIANG F, et al. Study on the Oxidation of WC-Co Cemented Carbide Under Different Conditions[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, 94: 105381.
- [30] LIU S F. Oxidation Behavior of WC-Co Cemented Carbide in Elevated Temperature[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(9): 095801.
- [31] LEE G, KWON H, HA G. Oxidation Behavior of WC-Co Hardmetal[J]. *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, 2004, 11(2): 111–117.
- [32] CASAS B, RAMIS X, ANGLADA M, et al. Oxidation-Induced Strength Degradation of WC-Co Hardmetals[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2001, 19(4/5/6): 303–309.
- [33] 任鑫, 杜学芸, 谷永旭, 等. 硬质合金高温氧化行为研究[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(10): 78–79, 14.
- [34] SHI X L, YANG H, SHAO G Q, et al. Oxidation of Ultrafine-Cemented Carbide Prepared from Nanocrystalline WC-10Co Composite Powder[J]. *Ceramics International*, 2008, 34(8): 2043–2049.
- [35] LAY S, VICENS J, OSTERSTOCK F. High Temperature Creep of WC-Co Alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1987, 22(4): 1310–1322.
- [36] MI P B, WANG T, YE F X. Influences of the Compositions and Mechanical Properties of HVOF Sprayed Bimodal WC-Co Coating on Its High Temperature Wear Performance[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, 69: 158–163.
- [37] DENG J X, ZHANG H, WU Z, et al. Friction and

- Wear Behaviors of WC/Co Cemented Carbide Tool Materials with Different WC Grain Sizes at Temperatures up to 600 °C [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 31: 196–204.
- [38] DE LUCA F, ZHANG H, MINGARD K, et al. Nanomechanical Behaviour of Individual Phases in WC-Co Cemented Carbides, from Ambient to High Temperature[J]. *Materialia*, 2020, 12: 10071.
- [39] TEPPERNEGG T, KLÜNSNER T, KREMSNER C, et al. High Temperature Mechanical Properties of WC-Co Hard Metals[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 56: 139–144.
- [40] ARISTIZABAL M, SANCHEZ J M, RODRIGUEZ N, et al. Comparison of the Oxidation Behaviour of WC-Co and WC-Ni-Co-Cr Cemented Carbides[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(9): 2754–2760.
- [41] ERFANMANESH M, ABDOLLAH-POUR H, MOHAMMADIAN-SEMNANI H, et al. Kinetics and Oxidation Behavior of Laser Clad WC-Co and Ni/WC-Co Coatings[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12805–12814.
- [42] PADMAKUMAR M, DINAKARAN D. A Review on Cryogenic Treatment of Tungsten Carbide (WC-Co) Tool Material[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, 36(6): 637–659.
- [43] RUMMAN R, CHUAN L, QUINTON J S, et al. Understanding the Potential of Microwave Sintering on WC-Co[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 81: 7–14.
- [44] PANOV V S. The Role of Binding Phase in Hard Alloys (Analytical Review)[J]. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, 12(1): 30–33.
- [45] YAN X F, WANG H B, LIU X M, et al. High-Temperature Oxidation and Wear Resistance of WC-Co Based Coatings with WB Addition[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(10): 3023–3034.
- [46] ZHANG H, XIONG J, GUO Z X, et al. Microstructure, Mechanical Properties, and Cutting Performances of WC-Co Cemented Carbides with Ru Additions[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(18): 26050–26062.
- [47] MASHHADIKARIMI M, GOMES U U, OLIVEIRA M P, et al. Study HTHP Sintered WC/Co Hardmetal[J]. *Materials Research*, 2017, 20: 138–143.
- [48] SIWAK P, GARBIEC D. Microstructure and Mechanical Properties of WC-Co, WC-Co-Cr₃C₂ and WC-Co-TaC Cermets Fabricated by Spark Plasma Sintering[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(10): 2641–2646.
- [49] VASHISHTHA N, SAPATE S G, BAGDE P, et al. Effect of Heat Treatment on Friction and Abrasive Wear Behaviour of WC-12Co and Cr₃C₂-25NiCr Coatings[J]. *Tribology International*, 2018, 118: 381–399.
- [50] XIANG Z N, LI Z J, CHANG F, et al. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of Ultrafine WC-Co Cemented Carbide[J]. *Metals*, 2019, 9(12): 1302.
- [51] FEI H L, WU H Y, YANG X D, et al. Sintering of the WC-6%Co Cemented Carbides for Improved Mechanical and Cutting Performance Using Micro-FAST[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, 98: 105545.
- [52] GHADAMI F, GHADAMI S, ABDOLLAH-POUR H. Structural and Oxidation Behavior of Atmospheric Heat Treated Plasma Sprayed WC-Co Coatings[J]. *Vacuum*, 2013, 94: 64–68.
- [53] YE Y Q, XIA H Y, LIN Y J, et al. Refined WC Grain Size and Improved Mechanical Properties in a Hardmetal WC-8Co Processed via Short-Time Semi-Solid Hot Pressing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 889: 161560.
- [54] LI D, LIU Y, YE J W, et al. The Enhancement of the Microstructure and Mechanical Performances of Ultrafine WC-Co Cemented Carbides by Optimizing Cr₂(C, N) Addition and WC Particle Sizes[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, 97: 105518.
- [55] JIANG H L, SU F Y, YANG Y T, et al. Coprecipitation of Co and La₂O₃ Coprecipitation on WC for Tailoring the Grain Distribution and Boundary of High-Performance Coarse-Grained WC-10Co Cemented Carbide[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, 115: 106303.
- [56] ZAITSEV A A, KOROTITSKIY A V, LEVASHOV E A, et al. Compressive Creep of Coarse-Grain WC-Co and WC-TaC-Co Hardmetals with Uniform Microstructure Comprising Rounded WC Grains[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 795: 139998.
- [57] SUN Y X, SU W, YANG H L, et al. Effects of WC Particle Size on Sintering Behavior and Mechanical Properties of Coarse Grained WC-8Co Cemented Carbides Fabricated by Unmilled Composite Powders[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(10): 14482–14491.
- [58] NASSER A, KASSEM M A, ELSAYED A, et al. Influence of Grain Refinement on Microstructure and Mechanical Properties of Tungsten Carbide/Zirconia Nanocomposites[J]. *Journal of Materials Engineering and*

- Performance, 2016, 25(11): 5065–5075.
- [59] FANG G K, TANG H G, REN Z K, et al. Effect of Grain Size on Oxidation Resistance of WC-6wt%Co Cemented Carbide Sintered by Spark Plasma Sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 111: 106108.
- [60] 张洪, 熊计, 郭智兴, 等. WC粒径对WC-Co硬质合金高温耐磨性的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(2): 21–24, 30.
- [61] HNATENKO I O, ANDREIEV I V, LYSOVENKO S O, et al. Change of Microstructure and Properties of WC-Co Cemented Carbides as a Result of High Pressure and Temperature[J]. Materials Science, 2024, 59(5): 630–637.
- [62] ZHANG L, WANG C G, HUANG X, et al. Improvement of High-Temperature Oxidation Resistance of WC-Co-Ni Alloy by Cr_3C_2 - CeO_2 - WS_2 Mixed Additives and Its Mechanism[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 115: 106309.
- [63] 黄公治, 彭英彪, 颜练武, 等. 多组元硬质合金的热力学研究及其在微观组织控制中的应用[J]. 包装学报, 2020, 12(6): 25–33.
- [64] CHANG S H, CHANG P Y. Investigation into the Sintered Behavior and Properties of Nanostructured WC-Co-Ni-Fe Hard Metal Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 606: 150–156.
- [65] CHANG S H, CHANG M H, HUANG K T. Study on the Sintered Characteristics and Properties of Nanostructured WC-15wt% (Fe-Ni-Co) and WC-15wt% Co Hard Metal Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 649: 89–95.
- [66] CHANG F, ZHANG J G, LU S J, et al. The Microstructure and High-Temperature Oxidation Resistance of Tungsten Carbide with High Entropy Alloys as Binder[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2022, 130(7): 477–486.
- [67] KONYASHIN I, FARAG S, RIES B, et al. WC-Co-Re Cemented Carbides: Structure, Properties and Potential Applications[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 78: 247–253.
- [68] ZHU S G, HUI J Q, QIN J Y, et al. High Temperature Oxidation Behavior of Spark Plasma Sintered WC-CoCrFeNiAl Hard Alloys[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 113: 106157.
- [69] WANG B X, WANG Z H, YUAN J T, et al. Effects of (Ti, W)C Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine WC-Co Tool Materials Prepared by Spark Plasma Sintering[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33(6): 892–902.
- [70] WANG B X, WANG Z H, YIN Z B, et al. Preparation and Properties of the VC/ Cr_3C_2 /TaC Doped Ultrafine WC-Co Tool Material by Spark Plasma Sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152598.
- [71] WANG B X, WANG Z H, YUAN J T, et al. Effect of (Ti, W)C/TaC Addition on the Early Oxidation Behavior of Surface Layer of WC-Co Cemented Carbides[J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108857.
- [72] ZHU B S, ZHANG S F, ZHENG L Y, et al. Influence of TaC on Structure, Mechanical, Corrosion and Wear Performances of WC-5Co Cemented Carbide[J]. Ceramics International, 2025, 51(16): 21621–21631.
- [73] YIN C, RUAN J M, DU Y, et al. Effects of Cr_3C_2 , VC, and TaC on Microstructure, WC Morphology and Mechanical Properties of Ultrafine WC-10wt.% Co Cemented Carbides[J]. Metals, 2020, 10(9): 1211.
- [74] HU H X, LIU X M, CHEN J H, et al. High-Temperature Mechanical Behavior of Ultra-Coarse Cemented Carbide with Grain Strengthening[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 104: 8–18.
- [75] LI X K, WANG L, LIU Y, et al. Enhanced High Temperature Mechanical Properties of WC-Co Cemented Carbides by VC Addition[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 116: 106355.
- [76] BASYIR A, IZZUDDIN H, HERMANTO B, et al. Remarkable Improvement in High Temperature Oxidation Resistance of WC-12Co by the Addition of CrSi_2 [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 96: 105497.
- [77] WANG B X, WANG Z H, YUAN J T, et al. High Temperature Fracture Mechanism of Ultrafine WC-Co Cemented Carbides Containing (Ti, W)C[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 95: 105428.
- [78] HUANG S W, XIONG J, GUO Z X, et al. Oxidation of WC-TiC-TaC-Co Hard Materials at Relatively Low Temperature[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 48: 134–140.
- [79] FENG Q, SONG X Y, XIE H X, et al. Deformation and Plastic Coordination in WC-Co Composite: Molecular Dynamics Simulation of Nanoindentation[J]. Materials & Design, 2017, 120: 193–203.
- [80] DING Y Z, LI D S, XU F, et al. The Microstructure Evolution of Graphene in Nanoindentation G/WC-Co Based on Molecular Dynamics Simulation[J]. Diamond

- and Related Materials, 2024, 141: 110729.
- [81] FANG J, LIU X M, LU H, et al. Crystal Defects Responsible for Mechanical Behaviors of a WC-Co Composite at Room and High Temperatures: A Simulation Study[J]. Acta Crystallographica Section B, 2019, 75(2): 134–14.
- [82] SINGH R, SHARMA V. Nano Tungsten Carbide Interactions and Mechanical Behaviour during Sintering: A Molecular Dynamics Study[J]. Computational Materials Science, 2021, 197: 11065.
- [83] XIE H X, SONG X Y, YIN F X, et al. Effect of WC/Co Coherency Phase Boundaries on Fracture Toughness of the Nanocrystalline Cemented Carbides[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31047.
- [84] GREN M A, FRANSSON E, WAHNSTRÖM G. A Computational Study of the Temperature Dependence of Interface and Surface Energies in WC-Co Cemented Carbides[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 87: 105114.
- [85] 姜鹤子, 王海滨, 刘雪梅, 等. WC-Co 硬质合金摩擦磨损行为的分子动力学模拟 [J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(5): 471–478.
- [86] PETISME M V G, GREN M A, WAHNSTRÖM G. Molecular Dynamics Simulation of WC/WC Grain Boundary Sliding Resistance in WC-Co Cemented Carbides at High Temperature[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 49: 75–80.
- [87] WANG C, LU H, LIU X M, et al. Effects of Residual Stress on Dislocations and Microcracks Evolution in WC-Co Cemented Carbides: A Simulation Study[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 121: 106690.
- [88] WANG H B, LOU H Z, XING M, et al. Exploring the Origin of Wear in Cemented Carbides via Molecular Dynamics Simulations[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 118: 106476.
- (责任编辑: 邓 彬)

Research Progress in Enhancing the High-Temperature Performance of WC-Co Cemented Carbides

HU Zeyi^{1,2,3}, XIAO Yinchun¹, FAN Caihe¹, LIN Xiaoliang², LU Yiling³

(1. School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Huareal Precision Tools Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412199, China;

3. College of Science and Engineering, University of Derby, Derby, DE22 3BB, UK)

Abstract: WC-Co cemented carbides are extensively employed in aerospace, mining, and equipment manufacturing due to their outstanding hardness, wear resistance, and high-temperature mechanical performance, making them ideal for applying in demanding environments. However, with the continuous development in advanced manufacturing, these materials are increasingly challenged by the need for improved thermal stability, oxidation resistance, and thermo-mechanical reliability at elevated temperatures. A comprehensive overview of the factors affecting the high-temperature performance of WC-Co cemented carbides is provided, including alloy composition, high-temperature oxidation behavior, and mechanical degradation mechanisms. The influences of these factors on microstructural stability and performance are systematically analyzed. Meanwhile, recent advances and major strategies for enhancing high-temperature properties are discussed, including the optimization of heat treatment and sintering processes, grain refinement techniques, binder phase modification or replacement, and the incorporation of rare metal carbides. The application of molecular dynamics simulations in the study of WC-Co alloys is also briefly introduced.

Keywords: WC-Co cemented carbide; oxidation behavior; high-temperature performance; molecular dynamics