

基于平台巴西劈裂试验下 WC-Co 硬质合金的动态响应与失效特性

张 健^{1,2}, 张清贵³, 辛红敏^{1,3}

- (1. 湖北文理学院 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441053)
(2. 西北工业大学 航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710072)
(3. 湖北超卓航空科技股份有限公司, 湖北 襄阳 441000)

摘 要: 为获取 WC-Co 硬质合金在动态拉伸加载下的力学性能和失效机制, 设计了动态平台巴西劈裂试验。结果发现, WC-Co 硬质合金具有典型的弹脆性特征, 且断裂应变随着加载应变率的增加而略有增加。在一维应力波加载下, WC-Co 硬质合金的动态抗拉强度随应变率的增加而增加, 表明其应变率效应具有明显的正相关性, 该效应的产生机制与典型陶瓷类材料是一致的, 即由 I 型裂纹的亚临界扩展决定。对回收破碎试样进行微观形貌观察, 发现平台圆盘中间位置处微观断裂模式主要为沿晶断裂, 且在拉应力作用下形成韧窝断裂形貌; 在靠近加载点位置区域, 受多向应力作用, 材料不仅存在韧窝断裂, 在单个晶粒的局部劈裂表面还存在河流花样的解理断裂。宏观角度上, WC-Co 硬质合金表现出明显的脆性特征, 但微观角度却发现局部塑性变形特征。

关键词: WC-Co 硬质合金; 平台巴西劈裂; 动态力学性能; 断裂机制

中图分类号: TG135⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)03-0259-06

引用格式: 张健, 张清贵, 辛红敏. 基于平台巴西劈裂试验下 WC-Co 硬质合金的动态响应与失效特性[J]. 中国材料进展, 2024, 43(3): 259-264.

ZHANG J, ZHANG Q G, XIN H M. Dynamic Response and Failure Characteristics of WC-Co Cemented Carbide Under Platform-Based Brazilian Splitting Test[J]. Materials China, 2024, 43(3): 259-264.

Dynamic Response and Failure Characteristics of WC-Co Cemented Carbide Under Platform-Based Brazilian Splitting Test

ZHANG Jian^{1,2}, ZHANG Qinggui³, XIN Hongmin^{1,3}

- (1. Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)
(2. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)
(3. Hubei Chaozhuo Aviation Technology Co., Ltd., Xiangyang 441000, China)

Abstract: The dynamic platform-based Brazilian splitting experiments were designed in order to obtain the mechanical property and failure mechanism of WC-Co cemented carbide under dynamic tensile loading. Results show that the WC-Co cemented carbide has the typical elastic-brittle characteristic, and its failure strain increases slightly with the strain rates.

The dynamic tensile strength of WC-Co cemented carbide increases with the strain rates under one-dimensional stress wave loading, which indicates that the strain rate sensitivity of the composite has obvious positive correlation. The mechanism is consistent with typical ceramic materials, which is decided by subcritical propagation of type-I cracks. The microstructure characterizing results of recycled specimen show that the fracture mode of middle position of platform-based disc is mainly intergranular fracture, and forms dimple fracture by tensile stress. At the location near loading point, the fracture microstructure not only has the

收稿日期: 2023-09-27 修回日期: 2023-11-16

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2021M701130); 襄阳市基础研究类科技计划项目(2022ABH006271); 新能源汽车与智慧交通湖北省高等学校优势特色学科群项目(XKTD062023)

第一作者: 张 健, 男, 1988 生, 博士, 讲师,
Email: 11688@hbuas.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202309029

dimple fracture, but also has river-patterned cleavage fracture for individual grains under multi-directional stress effect. From macroscopical view, the WC-Co cemented carbide shows obvious brittle characteristics, but from microscopic view, local plastic deformation characteristics exists.

Key words: WC-Co cemented carbide; platform-based Brazil splitting; dynamic mechanical property; fracture mechanism

1 前言

碳化钨 (tungsten carbide, WC) 属于高致密度硬质合金, 具有高强度、硬度、熔点、耐磨性等优越的物理力学性能, 常用于刀具、防护装甲、穿甲弹芯等军事防护构件^[1-4]。常将金属 Co 加入 WC 材料中来提高材料的韧性, 制备成 WC-Co 硬质合金。

何伟锋等^[1]认为目前硬质合金的研究仍主要集中在制备工艺和性能方面, 而针对实际工程中的应用研究较少。陈开远等^[5]采用高温高压烧结法制备了 WC-6Co 硬质合金, 并通过 X 射线衍射仪、光学显微镜和显微硬度计研究了该硬质合金的晶体结构、显微组织和力学性能。严维等^[6]在 WC-6Co 硬质合金中加入 Mo 晶粒, 发现 Mo 元素能够有效抑制 WC 晶粒的长大, 有利于合金硬度的提升。周夏凉等^[7]将 WC-10Co4Cr 用于涂层的力学性能和断裂机理进行了研究, 发现该材料在拉伸作用下主要是脆性断裂, 没有明显的塑性变形, 涂层中颗粒间的孔隙和微裂纹在外应力的作用下形成裂纹, 裂纹沿颗粒与颗粒间的界面扩展并伴随扩展方向的偏转, 最终导致涂层的断裂。Ettmayer^[8]发现 WC-Co 硬质合金的断裂韧性随晶粒尺寸的减小而增加, 而材料硬度则呈相反趋势。Okamoto 等^[9]发现晶粒尺寸在 20~30 μm 的 WC 材料主要以塑性变形为主, 而当晶粒尺寸在 3~6 μm 时, 材料主要表现为脆性。通过对晶粒尺寸为 20 μm 的 WC 材料研究发现, 随着 Co 含量的增加, 材料弹性模量和抗压强度均逐渐降低。由此可知, WC-Co 硬质合金的力学性能和断裂机理主要由晶粒尺寸、Co 含量以及制备工艺决定。

WC-Co 硬质合金在动态加载下的失效主要表现为脆性特性, 但其拉伸力学性能和失效机制尚不明确, 尤其是加载应变率对材料强度的影响^[10]。此外, 还有研究表明, 对于脆性陶瓷而言, 材料动态强度随应变率的增加呈指数函数形式增加, 包括 Al_2O_3 ^[11]、 SiC ^[12]、 Si_3N_4 ^[13]、 AlN ^[14]等。同时, 高应变率下陶瓷材料的断裂主要与裂纹惯性效应密切相关: 陶瓷内裂纹传播始于内部大量微观缺陷, 在低应变率载荷下, 形核和裂纹扩展的时间相对充足; 当应力波加载速率大于裂纹扩展速率时, 由于裂纹需要一定的成核时间, 惯性效应对微裂纹的产生和扩展的影响逐渐增大^[11]。随着应力波加载速率的增大, 惯性效应越明显, 最终导致材料强度的应变率敏感性增大。本文所研究 WC-Co 硬质合金的 WC 晶粒尺寸在 3~6 μm , 材料在动态加载下的变形机理仍有待开展深入研究, 尤其材料的应变率敏感性以及断裂机理是否会出现与陶瓷材料相似的规律仍不明确。

本文采用霍普金森压杆实验装置完成对 WC-Co 硬质合金的间接拉伸测试—动态平台巴西劈裂试验, 获得材料的应力应变关系和动态拉伸强度, 分析应变率对材料强度的影响机制。对回收圆盘试样通过扫描电镜进行组织观察, 获得 WC-Co 硬质合金的动态拉伸载荷下的断裂机制。

2 实验设置

WC-Co 硬质合金准静态加载时表现出了明显的脆性失效特征, 故本工作采用一种间接拉伸方法——平台巴西劈裂试验, 对材料开展动态拉伸性能测试, 实验装置如图 1 所示。

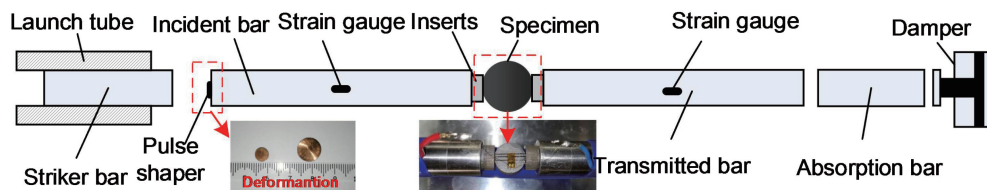


图 1 动态平台巴西劈裂试验装置示意图

Fig. 1 Facility schematic of dynamic platform-based Brazilian splitting experiments

为保证试验结果的准确性, 试样端面经过仔细抛光, 并保证具有良好的垂直度和平行度。为了减少试样、垫块和压杆之间的界面摩擦影响, 使用 MoS_2 作为润滑剂。压杆直径均为 14.5 mm, 入射杆和透射杆长 1300 mm,

撞击杆长为 250 mm。压杆材质为高强钢, 弹性模量 200 GPa, 密度 7850 kg/m^3 , 泊松比为 0.3, 屈服强度为 1500 MPa, 体积声速为 5200 m/s。由于 WC-Co 硬质合金的强度较高, 故在压杆和试样之间增加同材质垫块, 垫

块直径选取 10.3 mm, 厚度为 5 mm。由于垫块与压杆满足波阻抗匹配, 在一维应力波假设下, 垫块对应力波的传播影响可忽略。为保证常应变率加载, 使试样处于应力均匀状态, 在入射杆端使用波形整形器, 材质为紫铜, 直径为 6 mm, 厚度为 2 mm。圆盘试样的直径为 12.5 mm, 厚度为 5 mm, 平行度和平面度分别为 0.001 和 0.01 mm。为了准确直接地测量 WC-Co 硬质合金在动态加载过程中的应变历程, 在圆盘试样两个平面中心位置对称粘贴应变片, 其中, 应变片尺寸为 4.7 mm×2.6 mm, 小于圆盘试样。

3 动态力学性能

3.1 应力应变关系

由于平台巴西劈裂试验没有解析解, 根据 Griffith 强度理论, 可得圆盘试样抗拉强度 σ_t 的数值解为^[15]:

$$\sigma_t = k \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

式中, P 为临界受拉载荷, D 、 t 分别为圆盘的直径和厚度, k 为平台圆盘的尺寸相关系数, 可用式(2)近似描述:

$$k = \frac{(2\cos^3\alpha + \cos\alpha + \sin\alpha/\alpha)^2}{8(\cos\alpha + \sin\alpha/\alpha)} \quad (2)$$

当 $2\alpha = 0^\circ$ 时, $k = 1$, 对应于传统的巴西圆盘的解; 本文加载角采用 20° , 此时 $k = 0.9644$ 。

基于一维应力波理论, 试件中心位置的拉伸应力达到转折点时对应的临界载荷 P 可通过入射、反射和透射波的应变获得:

$$P = \frac{EA_0}{2} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

其中, A_0 为压杆的横截面面积; $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为入射波、反射波和透射杆加载对应的应变。

试件的加载应变率由试件中心位置应变历程 $\varepsilon_s(t)$ 直接求导获得:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} \quad (4)$$

图2为动态拉伸试验的典型信号。由图可知, 由于采用了紫铜作为波形整形器, 入射波为典型三角形波, 加载时间约为 180 μs 。由于 WC-Co 硬质合金的断裂应变较小, 一维应力波的加载时间对试件的应力平衡有很大影响。矩形入射应力伴随着波的分散, 会导致严重的应力集中和试件的局部断裂, 从而难以获得材料真实的强度。Chen 等^[16]认为脆性材料应采用三角形波进行加载。由图2可知, 反射波存在一个明显的平台阶段, 说明此时试样处于恒应变率加载过程。然后, 反射波出现了一个明显的拐点和陡升信号, 对应圆盘试样中心位置的拉

伸应变有一个明显的转折点, 此时试样波阻抗急剧降低, 说明 WC-Co 硬质合金为脆性开裂失效, 随后残余应力波完全返回到入射杆中。

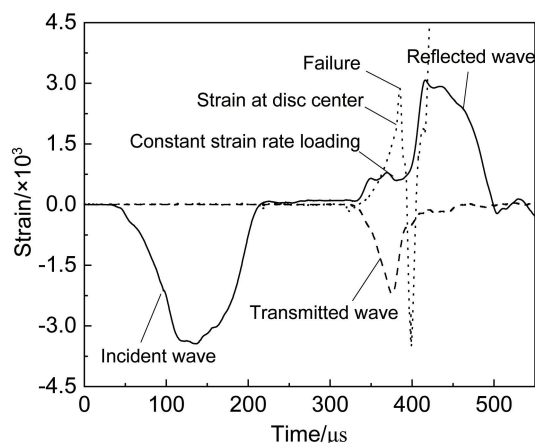


图2 动态拉伸试验典型信号

Fig. 2 Typical signal of dynamic tensile experiment

由图3可知, 在一维应力波加载下, WC-Co 硬质合金的应力应变曲线表现出了典型的弹脆性特征, 即材料在断裂前的变形停留在弹性阶段。材料的断裂应变在 0.098%~0.11%, 且随着加载应变率的增加而略有增加, 可见材料极易发生拉伸断裂。材料直线段的弹性模量随应变速率的增加保持在 627~633 GPa。

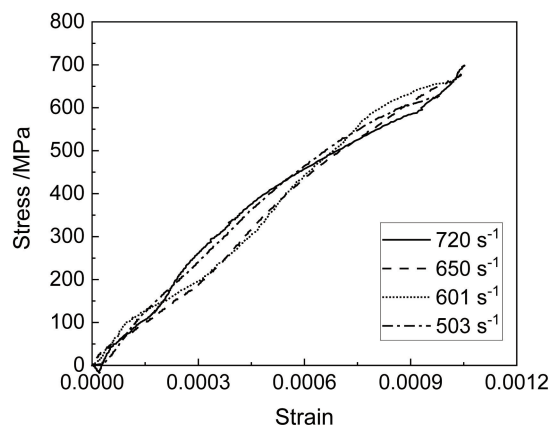


图3 WC-Co 硬质合金动态拉伸加载下应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of WC-Co cemented carbide at dynamic tensile loading

3.2 应变率效应

由于动态巴西劈裂试验属于间接拉伸测试, 所获得的应变率范围相对有限。为了获得测量数据的不确定度, 对实验数据引入误差分析, 在每种应变率条件下试验 3 次有效工况, 共有 4 种预期应变率加载。设某预期应变率下的实际应变率或抗拉强度为 x_i , 平均值为 μ , 工况数量为 N , 则此应变率条件下的实验数据标准差为:

$$\text{Std.}(\sigma_j, \dot{\varepsilon}_j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (5)$$

其中, j 为预期应变率工况。图 4 为不同应变率下 WC-Co 硬质合金的拉伸强度及其标准偏差。由图可知, 在一维应力波加载下, 硬质合金的动态抗拉强度随应变率的增加而增加, 表明应变率效应应具有明显的正相关性。

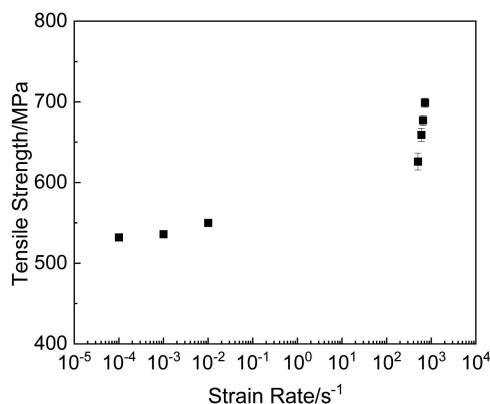


图 4 WC-Co 硬质合金的动态拉伸强度的应变率效应

Fig. 4 Strain rate effect of dynamic tensile strength of WC-Co cemented carbide

研究发现, 一些陶瓷材料强度和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 之间满足如下关系^[10]:

$$\sigma \propto \dot{\varepsilon}^N \quad (6)$$

式中, N 为应变率敏感系数, 定义 N_{static} 和 N_{dynamic} 分别为静态和动态加载下的应变率敏感系数。整理图 4 中试验数据, 通过最小二乘法拟合可获得 $N_{\text{static}} = 0.0073$ 和 $N_{\text{dynamic}} = 0.3034$ 。

由表 1 可知, 本文 WC-Co 硬质合金和典型陶瓷材料 (Al_2O_3 、 SiC 、 AlN) 的应变率效应系数一致, 高应变率下 WC-Co 硬质合金的拉伸强度随应变率的变化趋势也满足公式 (6), 说明 WC-Co 硬质合金的应变率效应产生机制与典型陶瓷类材料是一致的。

表 1 WC-Co 硬质合金和陶瓷材料的应变率效应对比

Table 1 Comparison of strain rate effect among WC-Co cemented carbide and ceramic materials

Material	N_{static}	N_{dynamic}
WC-Co cemented carbide	0.0073	0.3034
Al_2O_3 ^[17] (Lankford 1981)	0.0192	0.27
SiC ^[12] (Wang 2004)	~0	0.263
AlN ^[14] (Subhash 1998)	—	0.287

研究表明, 陶瓷材料力学性能与微观失效机制密切相关, 如致密度、晶粒尺寸及分布等。其中, 关于材料强度的应变率效应广泛认为是由微裂纹的扩展速度与加

载速率之间的关系所决定的^[18]。一般地, 对于典型陶瓷材料, 应变率系数 N 由裂纹扩展系数 n 决定, 系数 n 由裂纹扩展速度 c 和应力强度因子 K_I 决定^[10]:

$$N = \frac{1}{1+n} \quad (7)$$

$$c_{\text{crack}} = AK_I^n \quad (8)$$

因此, 材料的应变率敏感系数 N 受 I 型裂纹的亚临界扩展决定。在低应变率下 ($\dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_1$), 裂纹生长速率受应变率的影响较小, 材料失效由主裂纹生长、扩展导致, 对应应变率敏感系数 N 介于 0.005~0.02。当加载超过某一临界应变率时 ($\dot{\varepsilon}_1 < \dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_2$), 裂纹生长和扩展将受惯性效应影响, 惯性效应将阻碍亚临界裂纹的扩展, 使材料主要沿主裂纹尖端方向扩展。惯性效应随着加载应变率的增加表现越发明显, 从而造成了材料强度的应变率效应。此时, 典型陶瓷材料的应变率敏感系数 N 接近 0.3。在图 5 中, 在准静态加载下, 材料强度增量变化缓慢; 在动态加载下, 材料强度的变化逐渐剧烈, WC-Co 硬质合金表现出了类似陶瓷强度的应变率变化趋势。

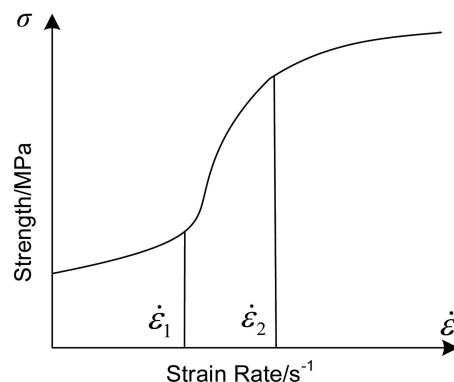


图 5 WC-Co 硬质合金强度随应变率变化关系

Fig. 5 Relationship between strength and strain rate of WC-Co cemented carbide

4 失效机制

回收动态拉伸试验试样, 并采用扫描电子显微镜进行断面观察, 分析 WC-Co 硬质合金在不同加载方式下的微观断裂模式。由图 6 可知, 动态巴西劈裂试验中试样被破碎成两个不完整的半圆和许多小颗粒。裂纹由中心起裂, 主要沿加载直径向两个加载点扩展, 表明圆盘的中心处于纯拉应力状态。由于材料的韧性较差, 在两处加载点位置处于复杂应力状态, 且存在应力集中现象, 因此在圆盘的两个加载点附近形成了颗粒状破碎区。

对 WC-Co 硬质合金巴西劈裂实验中破碎试样进行回收, 并对不完整半圆的断裂表面不同位置处进行微观结

构分析, 包括中间位置(图6的②号点)及靠近加载点位置(图6的①号点)附近(图7和图8)。由图7可知, WC-Co 硬质合金试样在断裂表面中间位置处微观断裂模式主要为沿晶断裂, 并且在拉伸应力作用下发生剧烈滑移, 形成韧窝断裂(图7中D区域), 说明在此处的微观断裂带有一定韧性。

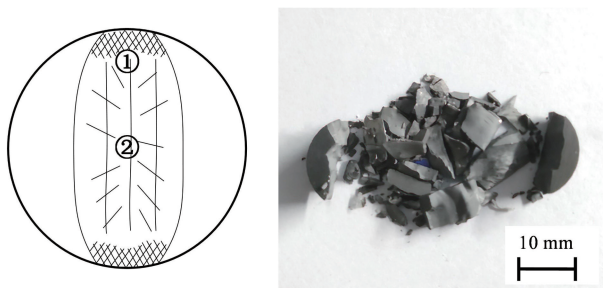


图6 动态巴西劈裂加载下 WC-Co 硬质合金试样的失效模式

Fig. 6 Failure mode of WC-Co cemented carbide under dynamic Brazilian splitting loading

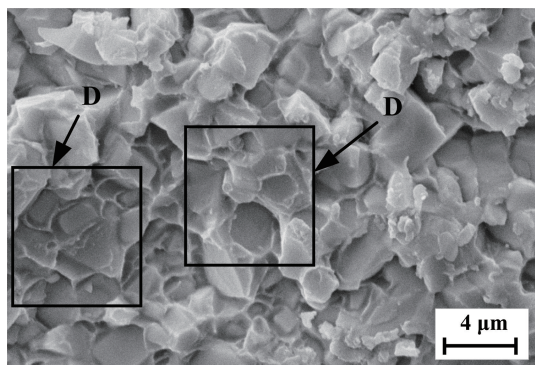


图7 巴西劈裂加载后 WC-Co 硬质合金试样破碎半圆的中间位置 SEM 照片

Fig. 7 SEM image of WC-Co cemented carbide on the middle fractured semicircle of specimen under Brazilian splitting loading

如图8所示, 在试件靠近加载点位置断裂区域, 碎片的微观断裂形貌不仅存在韧窝断裂, 在单个晶粒的劈裂表面还存在河流花样的解理断裂。同时, 在断裂核心区域的周围晶粒存在局部微观塑性变形(图8中箭头H标注处), 单个晶粒上出现了穿晶微裂纹(图8中箭头T标注处), 在多个晶粒的大范围区域内出现了台阶状微观解理断裂(图8中S区域)。

5 结论

针对 WC-Co 硬质合金在动态加载下的力学性能和失效机制尚不明确的问题, 尤其是加载应变率对材料强度的影响, 本文采用霍普金森杆实验装置完成了对 WC-Co 硬质合金的动态巴西劈裂试验, 重点分析了材料的动态

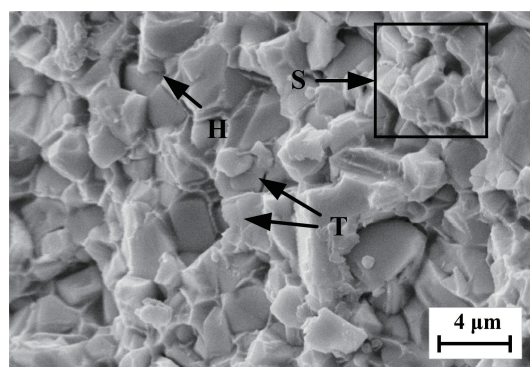


图8 巴西劈裂加载后 WC-Co 硬质合金试样破碎半圆靠近加载点位置 SEM 照片

Fig. 8 SEM image of WC-Co cemented carbide near loading point fractured semicircle of specimen under Brazilian splitting loading

拉伸力学性能与失效机制。主要结论如下:

(1) 对动态拉伸加载下的典型信号和应力应变曲线分析发现, WC-Co 硬质合金具有典型的弹脆性特征, 即材料在断裂前的变形停留在弹性阶段。材料的断裂应变在 0.098% ~ 0.11%, 且随着加载应变率的增加而略有增加。

(2) 在一维应力波加载下, WC-Co 硬质合金的动态抗拉强度随应变率的增加而增加, 表明应变率效应具有明显的正相关性。而且, WC-Co 硬质合金和典型陶瓷材料(Al_2O_3 、SiC、AlN)的应变率效应系数一致, 说明其应变率效应产生机制与典型陶瓷类材料是一致的, 即由 I 型裂纹的亚临界扩展决定。

(3) 对回收的破碎试样进行微观组织观察, 发现试样中间位置处微观断裂模式主要为沿晶断裂, 并且在拉伸应力作用下微观结构发生剧烈滑移, 形成韧窝断裂; 在靠近加载点位置区域, 不仅存在韧窝断裂, 在单个晶粒的劈裂表面还存在河流花样的解理断裂。

参考文献 References

- [1] 何伟锋, 杨宇辉, 王珂玮, 等. 热加工工艺[J], 2023(22): 72-77. HE W F, YANG Y H, WANG K W, *et al.* Hot Working Technology [J], 2023(22): 72-77.
- [2] SIWAK P, GARBIEC D. Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2016, 26(10): 2641-2646.
- [3] SON S J, PARK J M, PARK S H, *et al.* Materials Letters[J], 2021, 293: 129683.
- [4] 李萌, 弓满锋, 程赞鄰, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(7): 2653-2657. LI M, GONG M F, CHENG Z L, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(7): 2653-2657.
- [5] 陈开远, 全利铭, 何颖晗, 等. 稀有金属与硬质合金[J], 2021, 49(3): 80-86.

- CHEN K Y, QUAN L M, HE Y H, *et al.* Rare Metals and Cemented Carbides[J], 2021, 49(3): 80–86.
- [6] 严维, 王水龙, 郭圣达, 等. 稀有金属与硬质合金[J], 2020, 48(4): 73–78.
- YAN W, WANG S L, GUO S D, *et al.* Rare Metals and Cemented Carbides[J], 2020, 48(4): 73–78.
- [7] 周夏凉, 陈小明, 吴燕明, 等. 机械工程材料[J], 2015, 39(10): 52–55.
- ZHOU X L, CHEN X M, WU Y M, *et al.* Materials for Mechanical Engineering[J], 2015, 39(10): 52–55.
- [8] EITTMAYER P. Annual Review of Materials Research[J], 1989, 19(1): 145–164.
- [9] OKAMOTO S, NAKAZONO Y, OTSUKA K, *et al.* Materials Characterization[J], 2005, 55(4/5): 281–287.
- [10] MANDEL K, RADAJEWSKI M, KRÜGER L. Materials Science and Engineering: A[J], 2014, 612: 115–122.
- [11] GAO Y B, GE Y X, XU P, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2021, 826: 141976.
- [12] WANG H, RAMESH K T. Acta Materialia[J], 2004, 52(2): 355–367.
- [13] LANKFORD J. Journal of the American Ceramic Society[J], 1982, 65(8): C122.
- [14] SUBHASH G, RAVICHANDRAN G. Journal of Materials Science[J], 1998, 33(7): 1933–1939.
- [15] GAO Y B, LI D C, ZHANG W, *et al.* International Journal of Impact Engineering[J], 2019, 132: 103310.
- [16] CHEN W N, RAJENDRAN A M, SONG B, *et al.* Journal of the American Ceramic Society[J], 2007, 90(4): 1005–1018.
- [17] LANKFORD J. Journal of the American Ceramic Society[J], 1981, 64(2): C33–C34.
- [18] GAO Y B, TANG T G, YI C H, *et al.* Materials & Design[J], 2016, 92: 814–822.

(编辑 费蒙飞)