

Ti 对 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 合金组织及性能影响

黄丽容¹ 黄必华¹ 谢俊杰² 王 云¹
(1.江西理工大学机电工程学院; 2.崇义章源钨业股份有限公司)

摘 要 采用机械合金化法制备 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金粉末,通过真空烧结制备 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金,研究高熵合金粘结相中不同 Ti 含量对合金微观组织及力学性能的影响。结果表明,随着 Ti 含量增加,高熵合金粘结相的 XRD 特征峰向左偏移,WC 平均晶粒尺寸减小,合金的强度和硬度增大,硬度(HV₃₀)峰值可达 2 020,而断裂韧度则表现出先降后升再降的趋势;合金中存在部分 Al 和 Ti 的氧化物“黑洞”;Ti 含量增加使粘结相硬化,降低其塑性,不利于压制从而导致合金的相对密度下降。

关键词 硬质合金;高熵合金粘结相;Ti;微观组织;力学性能

中图分类号 TG139;TB331 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.011 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ti on Microstructure and Mechanical Properties of WC-10AlCoCrFeNiTi_x Cemented Carbide

Huang Lirong¹, Huang Bihua¹, Xie Junjie², Wang Yun¹
(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology;
2.Chongyi Zhangyuan Tungsten Co.,Ltd.)

Abstract: AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloy powders were prepared by mechanical alloying method, and WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide was fabricated by vacuum sintering. Effects of Ti content in the bonding phase on microstructure and mechanical properties of the cemented carbide were investigated. The results indicate that with the Ti content increasing, the XRD characteristic peaks of the high entropy alloy bonding phase shift to the left, where the average grain size of WC is decreased, the strength and hardness are increased, and peak hardness reaches 2 020 HV, while the fracture toughness is decreased firstly, then increased and finally decreased. “Black holes” of Al and Ti oxides in the cemented carbide were observed. The bonding phase is hardened with Ti content increasing, reducing the plasticity, which is adverse to pressing, leading to the decrease of relative density.

Key Words: Cemented Carbide, High Entropy Alloy Bonding Phase, Ti, Microstructure, Mechanical Properties

硬质合金具有硬度高、韧性好、热硬性好和耐磨性好等优良性能,被广泛应用于模具、刀具、矿山和凿岩采矿工具等领域^[1]。由于 Co 对 WC 具有优异的润湿性(润湿角为 0°),使得 WC-Co 硬质合金得到广泛应用,但近年来随着新能源汽车项目发展,加剧了市场对 Co 资源的需求,导致 Co 资源供给紧张^[2]。此外,由于 Co 的耐腐蚀性和耐高温性较差^[3],且对环境对人体亦会产生严重危害,欧洲国家已出台相关的法规限制 Co 的使用^[4]。因此,Co 粘结相难以满足硬质合金行业的持续发展,急需寻找一种可部分或完全替代 Co 的新型粘结相。研究者对 Ni、Ni₃Al 和纯 WC 等进行研究并取得一定成果,制备出耐腐蚀、抗氧化和高硬度的硬质合金。但以 Ni 替代 Co,在增强合金的耐腐蚀性时也会降低合金的强度和韧性^[5],而 Ni₃Al 作为一种金属间化合物,具有明显的晶间脆性,使其应用受到限制^[6]。此外,以纯 WC 为主的无粘结相硬质合金因其致密化温度高,制备困难,制约了其发展与应用^[7]。

近年来,高熵合金因其独特的多主元设计而具有明显的高熵效应、缓慢扩散效应和晶格畸变效应等^[8],表现出优异的耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳性和高硬度等特点,有望成为 Co 粘结相的替代物^[9]。研究发现,用 WC-20CoCrFeNi 硬质合金制备的切削刀具,与 WC-

收稿日期:2022-04-10;修改稿收到日期:2022-06-20
基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20171BAB206030);赣州市重点研发计划工业领域,创新领军人才计划资助项目(赣市科发[2020]60号)
第一作者简介:黄丽容,女,1974年出生,副教授,江西赣州(341000),E-mail:huanglirong@sina.com
通信作者:谢俊杰,男,1975年出生,工程师,江西赣州(341300),E-mail:2282936277@qq.com
引用格式:黄丽容,黄必华,谢俊杰,等. Ti 对 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 合金组织及性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):50-55.
HUANG L R, HUANG B H, XIE J J, et al. Effects of tion microstructure and mechanical properties of WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):50-55.

20Co 相比,在加工过程可承受更高的切削速度^[10]; WC-Al_{0.5}CoCrCuFeNi 硬质合金,在室温和高温下具有比传统 WC-Co 硬质合金更高的硬度^[11],而 WC-Al_{0.5}CrFeCoNi 硬质合金相比 WC-Co 合金,具有更高的硬度和韧性^[12],由此可见高熵合金可能替代 Co 成为硬质合金的粘接相。本课题采用机械合金化法制备 AlCoCrFeNiTi_x 系高熵合金粉末替代 Co 作为粘接相,通过真空烧结制备 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金,并研究粘接相中不同 Ti 含量对合金微观组织及力学性能的影响,以期获得性能优异的硬质合金,减少或替代 Co 的使用,旨在应用于切削刀具、凿岩钻头和耐磨零部件等领域,为新型 WC 基硬质合金材料的制备和研究提供参考。

1 试验方法和材料

选择质量分数大于 99.5%,粉末的粒度小于 10 μm 的 Al、Co、Cr、Fe、Ni、Ti 纯金属粉末为原料,采用机械合金化制备不同 Ti 含量的 AlCoCrFeNiTi_x ($x=0,0.5,0.8,1,x$ 为摩尔比)高熵合金粉末,其成分见表 1。以酒精作为过程控制剂,在行星球磨机上球磨,球粉质量比为 10:1,球磨转速为 300 r/min,球磨时间为 60 h。球磨后,取出 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金粉末在 100 ℃ 下干燥 2 h。干燥后,将 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金粉末和粒度为 1.3 μm 的 WC 粉末按 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 称量,加入合金球磨罐中,采用行星球磨机进行混料,球料比为 5:1,转速为 250 r/min,球磨 24 h,酒精为过程控制剂。球磨后,将所得到的浆料在 100 ℃ 鼓风干燥箱中,干燥 2 h。干燥后,对所得到的粉末用 100 目的筛网筛分造粒,随后将筛分后的 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 复合粉末装入模具中,在 120 MPa 压力下进行压制。压制后,采用真空烧结,烧结温度为 1 450 ℃,真空度保持在 1.33 Pa 以下。

表 1 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金的成分

合金	x _B					
	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti
AlCoCrFeNi	20	20	20	20	20	0
AlCoCrFeNiTi _{0.5}	18.18	18.18	18.18	18.18	18.18	9.10
AlCoCrFeNiTi _{0.8}	17.24	17.24	17.24	17.24	17.24	13.80
AlCoCrFeNiTi ₁	16.66	16.66	16.66	16.66	16.66	16.70

采用 Rigaku, D/max255 型 X 射线衍射仪进行物相分析,扫描范围为 5°~90°,扫描速度为 5°/min,利用检索软件 Jade 进行物相分析。用附带能谱仪(EDS)的 JSM-6701F 型扫描电镜(SEM)对合金的显微结构进行观察。采用阿基米德原理测量抛光干燥后烧结试样的密度,测量介质为水。利用 HVS-50Z 维氏硬度计测量

试样的维氏硬度,加载压力为 294 N,保压时间为 10 s,测量 3 次计算平均值。断裂韧性(K_{IC})计算如下^[13]:

$$K_{IC} = 0.15 \sqrt{H_{300} / \sum L} \tag{1}$$

式中, H_{300} 是载荷为 300 N 时的维氏硬度(HV₃₀); L 是总裂纹长度,mm。为了测试的准确性,试样被抛光到接近镜面的光洁度,并在测试前检查面平行度。

2 试验结果与分析

2.1 物相结构

图 1 为 AlCoCrFeNiTi_x 系高熵合金粉末的 XRD 图谱。可以看出,球磨后 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金粉末主要由体心立方(BCC)固溶体结构组成,此外存在少量金属 Ni 和 Ti 的特征峰,未形成单相高熵合金。从热力学角度看,这可能是由于球磨效率不够,使粉末颗粒内部储存能量不足以引发持续的能量爆炸反应而生成单相固溶体^[14]。研究表明,采用机械合金化制取 AlCoCrFeNiTi 及 AlCoCrCuFeNi 高熵合金粉末,均未形成单相高熵合金^[15,16]。可见关于使用机械合金化法来制备单相高熵合金可能还有待进一步完善。随着 Ti 含量增加,BCC 结构相的衍射峰呈现左移的趋势(见图 1b),这是因为机械合金化过程中 Ti 的原子半径比较大,溶入晶格后,会引起较大程度的晶格畸变,从而出现晶格膨胀现象^[17]。

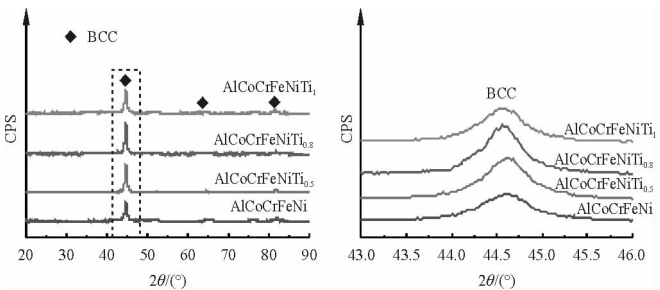


图 1 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金的 XRD 图和局部放大图
Fig.1 XRD patterns and partial enlarged diagram of AlCoCrFeNiTi_x high entropy alloy powders

图 2 为 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 混合粉末的 XRD

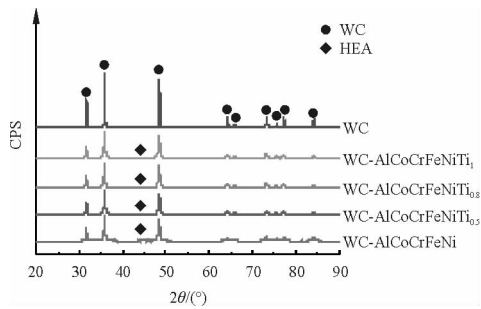


图 2 球磨 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 混合粉末 XRD 物相
Fig.2 XRD patterns of ball milling WC-10AlCoCrFeNiTi_x mixture

图谱。可以看出,球磨后 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金粘结剂的相保持不变,WC 对应的 XRD 特征峰的形状与起始 WC 粉末相比,峰的强度减弱,而峰的宽度变宽,这可能是由于球磨过程中 WC 晶粒尺寸的细化和微应变的不断增加导致的。

图 3 为 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 XRD 图谱。可以看出,烧结后合金的物相主要由 WC 相和 BCC 相组成,并未检测到 η 相,这有利于复合材料的力

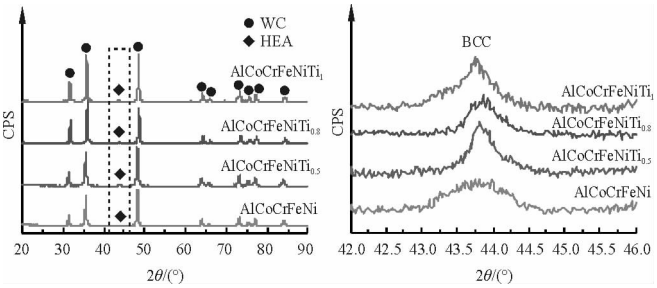


图 3 烧结 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 XRD 图和局部放大图

Fig.3 XRD patterns and partial enlarged diagram of sintered WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide

学性能改善。与球磨 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金混合粉末相比,烧结过后的 WC 特征峰由于微晶尺寸的增加和微应变的释放,导致峰宽变窄,最高峰强度有所提高。由图 3b 看出,烧结后,BCC 结构相的衍射峰随 Ti 含量的增加依旧呈现向左偏移的趋势,这与高熵合金粘结相中出现的物相变化相一致。

2.2 微观组织特征

图 4 为 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 SEM 形貌。白色为 WC 硬质相,WC 晶粒周围的灰色点状物为高熵合金粘结相,其中 WC 晶粒多呈现不规则的多边形。此外,合金中发现“黑色孔洞”的存在。通过 EDS 点扫描分析“黑洞”区域,结果见表 2。由表 2 可知,这些“黑洞”区域都存在着大量的 O,其中 A 区域中 O 和 Al 的摩尔比接近 3 : 2。此外,随着粘结相中 Ti 含量的增加,区域 B~D 中也逐渐出现 Ti 元素且含量呈现上升的趋势,而 Al 元素的含量逐渐降低。根据选择性氧化原则,相对于 Fe、Co、Ni 和 Cr 元素,Al 和 Ti 元素与氧的亲合力更高,这些“黑洞”区域可能是由 Al 和 Ti 的氧化物所构成。氧化物的存在将增大合金的孔

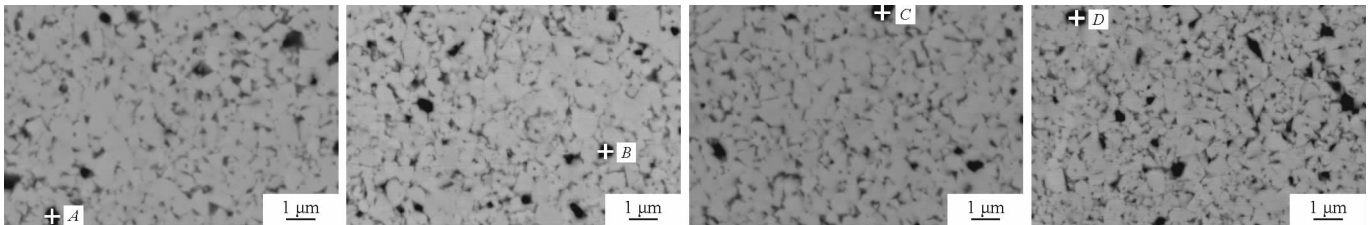


图 4 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 SEM 形貌图

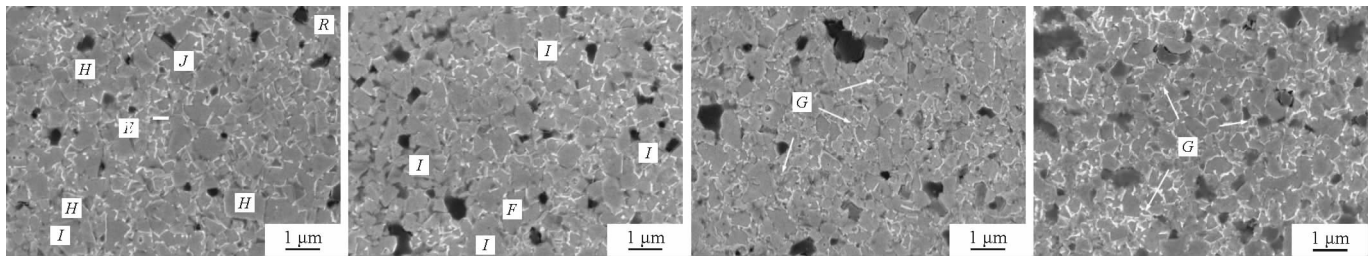
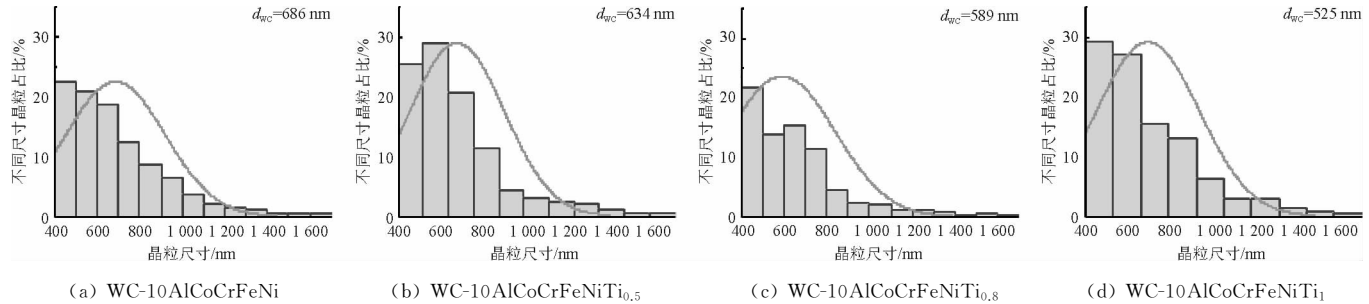
Fig.4 SEM morphologies of WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide

表 2 “黑洞”区域 A、B、C 和 D 的元素含量									
Tab.2 Element contents of point A , B , C and D									
in “black hole” region									%
	x_B								
	W	C	O	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti
区域 A	12.16	—	48.71	32.03	0.44	5.60	0.63	0.43	—
区域 B	18.56	0.44	43.49	24.92	1.41	0.60	1.37	0.52	8.69
区域 C	19.84	1.09	43.18	20.43	0.51	0.73	0.60	0.23	13.48
区域 D	13.41	2.29	39.24	17.56	0.10	3.30	0.14	—	23.96

隙度,使合金的密度下降,从而影响合金的烧结性能。

图 5 为经过 20% 的 NaOH 和 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液腐蚀的 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 SEM 形貌。可以看出,经过腐蚀后 WC 晶粒形貌更加清晰,4 个试样中 WC 晶粒形状有所不同,如三角形(记为 I)、正方形(记为 E)、不规则多边形(记为 J、K)、矩形(记为 H)或长条状(记为 F),以及不规则碎片状(记为 G)。随着 Ti 含量的增加,WC 晶粒逐渐细化,形状由矩形、不规则多边形等向三角形和细小碎片状等转变。

根据 SEM 形貌,采用相关图像分析软件计算得到 WC 的平均晶粒尺寸,结果见图 6。可以看出,随着 Ti 含量增加,WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 WC 平均晶粒尺寸逐渐减小,此外还发现试样中都存在 WC 晶粒异常长大的现象,最大晶粒尺寸超过 1.6 μm。这主要是两方面所致,一是由于烧结过程中,WC 与粘结相之间存在界面反应,C 原子和 W 原子会在粘结相中达到溶解-析出的动态平衡,这会使晶粒较小的 WC 周围更早地出现局部液相,从而导致小晶粒溶解并在大块晶粒上析出,发生晶粒溶解-析出长大现象^[18];随着粘结相中 Ti 含量增加,粘结相的混乱度增大,从而减少 C 原子和 W 原子的溶解数量,进而降低 WC 的溶解-析出速率,最终达到抑制 WC 晶粒长大的效果;二是高熵合金具有特殊的晶格畸变效应和缓慢扩散效应,它可以阻碍 WC 在液相高熵合金中的溶解和扩散,从而减少 WC 晶粒的析出长大,实现细化晶粒的效果。高熵合金的缓慢扩散效应和晶格畸变效应主要由元素的原子尺寸差

图 5 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金腐蚀表面的 SEM 形貌Fig.5 SEM morphologies of etched surface of WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide图 6 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的 WC 晶粒尺寸Fig.6 WC grain size of WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide

所决定。AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金的原子尺寸差(δ)计算如下^[19]:

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (1 - r_i / \bar{r})^2} \quad (2)$$

式中, C_i 为第 i 个元素的摩尔比; r_i 为第 i 个元素的原子半径; $\bar{r} = \sum_{i=1}^n C_i r_i$ 为平均原子半径。根据各元素的原子半径和原子摩尔比, 最终计算得出 AlCoCrFeNiTi_x ($x=0, 0.5, 0.8, 1$) 高熵合金的原子尺寸差分别为 5.36、6.24、6.55 和 6.71。可以发现, 随着 Ti 含量增加, 高熵合金粘结相的原子尺寸差逐渐增大, 而更大的原子尺寸差, 会产生更加严重的晶格畸变, 进而影响原子的扩散速率, 使其对 WC 晶粒生长的抑制作用更加强烈。因此, WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的晶粒尺寸随 Ti 含量的增加, 逐渐减小。

2.3 力学性能

图 7 为 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的力学性能。可以看出, 随着 Ti 含量增加, 合金的抗弯强度逐渐上升。FANG Z Z^[20] 基于粘结相的形变强化理论, 建立了硬质合金的抗弯强度的函数方程为:

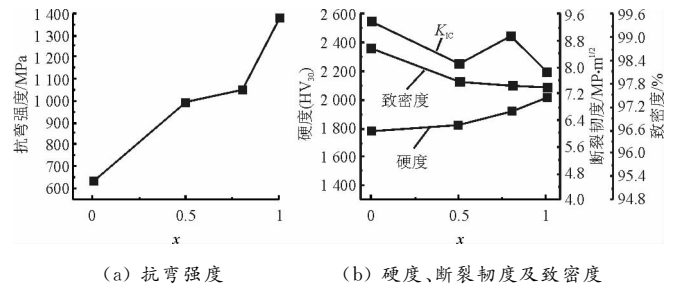
$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_{\text{eff},b} - \sigma_b)(1 - CV_w) \quad (3)$$

式中, σ_y 为 WC-Co 硬质合金的原位屈服强度, 其表达式为:

$$\sigma_y = \sigma_b(1 - CV_w) + \sigma_w CV_w \quad (4)$$

式中, σ_w 为 WC 相的原位屈服强度; σ_b 为 Co 相的原位屈服强度; $\sigma_{\text{eff},b}$ 为粘结相形变强化屈服强度; C 为 WC

晶粒的邻接度; V_w 为 WC 相的体积。可以看出, 强化粘结相将使材料的强度提高, 而随 Ti 含量增加, AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金粘结相产生固溶强化, 从而使 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的抗弯强度随着 Ti 含量的增加而呈上升的趋势。

图 7 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的力学性能Fig.7 Mechanical properties of WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide

从图 7b 可以看出, 随着粘结相中 Ti 含量的增加, WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的致密度逐渐降低, 由 98.7% 降至 97.7%, 这主要与 HEA 粘结相的性能有关。首先 Ti 较大的原子半径使其固溶于粘结相时会产生更大的晶格畸变效应, 增大位错运动的阻力, 使滑移难以进行, 从而达到固溶强化的效果, 但也将导致粘结相硬化使其塑性降低^[21]。塑性较差的粘结相, 在压制时不利于颗粒产生变形, 从而阻碍颗粒重排, 导致颗粒之间的桥接现象增加, 最终使合金的密度下降。LUO W Y 等^[22] 发现在 1 550 °C 下, CoCrCuFeNiAl_x 高熵合金随着 Al 含量的增加, 合金对 WC 的润湿性降低。由

表 2 可知,随着合金中 Ti 含量增加,氧化物(黑洞)成分中 Al 含量逐渐降低,则相对地增加了合金中 Al 的含量,从而降低了 HEA 粘结相对 WC 的润湿性,使得合金的致密度降低。

另外,随着 Ti 含量增加,硬度呈现上升趋势,而断裂韧度则呈现先降后升再降的趋势,WC-10AlCoCrFeNiTi₁ 硬质合金的硬度(HV)最高达到 2 020,断裂韧度最好,为 9.4 MPa·m^{1/2},其中 WC-10AlCoCrFeNiTi_{0.8} 具有相对优异的硬度(HV)和断裂韧度,分别为 1 920、8.93 MPa·m^{1/2}。硬质合金的力学性能与微观组织结构和粘结相性能密切相关。根据 Hall-Petch 公式,硬度和晶粒尺寸之间关系如下^[23]:

$$H = H_0 + kd^{-1/2} \quad (5)$$

式中, H 为材料的硬度; d 为晶粒的尺寸; H_0 和 k 为常

数。可以看出,硬度与晶粒尺寸成反比,即硬度随着晶粒尺寸的减小而增大。随着 Ti 含量的增加,WC 晶粒尺寸逐渐减小,因而 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的硬度呈现上升趋势。此外,Ti 能够使高熵合金粘结相产生固溶强化,亦能提高其硬度。断裂韧度与粘结相对 WC 的润湿性和粘结相烧结性能有关。随 Ti 含量增加,粘结相对 WC 的润湿性以及合金的密度均降低,使合金的韧性下降。因而,合金断裂韧度总体呈下降趋势,至于 WC-10AlCoCrFeNiTi_{0.8} 硬质合金的韧度上升,这是因为断裂韧度也受到裂纹扩展阻力的影响。图 8 为 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金维氏硬度压痕裂纹的 SEM 形貌。可以看出,合金中出现了裂纹偏转、WC 晶粒拔出和裂纹桥接等现象^[24],可能正是这些现象导致其表现出不同的韧度值。

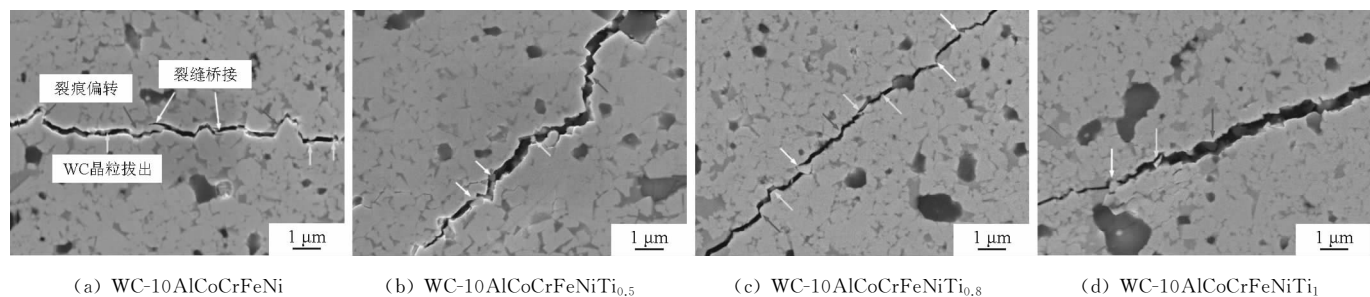


图 8 WC-10%AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金维氏硬度压痕裂纹的 SEM 形貌

Fig.8 SEM images of Vickers hardness indentation crack of WC-10AlCoCrFeNiTi_x cemented carbide

从图 8b~图 8d 可以看出,WC-10AlCoCrFeNiTi_{0.8} 硬质合金的裂纹路径表现得更加狭小,具有更多的 WC 晶粒拔出、裂纹桥接以及裂纹偏转等增韧现象,而 WC-10AlCoCrFeNiTi_{0.5} 和 WC-10AlCoCrFeNiTi₁ 硬质合金的裂纹路径则表现得更加宽泛,裂纹挠度相对较小,并未出现较多增韧现象,因此 WC-10AlCoCrFeNiTi_{0.8} 硬质合金的断裂韧度相对提高较为明显。因此,WC-HEA 硬质合金的断裂韧度由 HEA 粘结相对 WC 的润湿性和 HEA 粘结相的烧结性能以及裂纹扩展阻力共同决定,随 Ti 含量增加呈现出先降后升再降的趋势。

3 结 论

(1)WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金烧结前后的物相主要由 WC 相和 BCC 体心立方相组成。随着 Ti 含量增加,合金的物相组成并未发生变化,但由于 Ti 原子溶入晶格后产生晶格膨胀现象,使得 HEA 粘结相的衍射峰呈现向左偏移的趋势。

(2)WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金中存在着“黑洞”区域,经 EDS 分析发现这是 Al 和 Ti 在烧结过程中被氧化而形成的氧化物。氧化物的存在将增大合金的孔隙度,影响合金的烧结性能。

(3)Ti 含量增加后,增加了 HEA 粘结相的混乱度以及扩大了其晶格畸变效应,进而影响原子的扩散速率,使其对 WC 晶粒生长的抑制作用更加强烈,从而使得 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的平均晶粒尺寸逐渐变小。

(4)由于 Ti 含量增加使粘结相产生固溶强化,WC 晶粒尺寸变小,从而使 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的强度和硬度呈上升趋势,硬度(HV)最高达 2 020。同时也导致粘结相的硬化,降低其塑性,不利于压制而使得 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的致密度下降。

(5)WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的断裂韧度由 AlCoCrFeNiTi 粘结相对 WC 的润湿性和 AlCoCrFeNiTi 粘结相的烧结性能以及裂纹扩展阻力共同决定,使得 WC-10AlCoCrFeNiTi_x 硬质合金的断裂韧度随 Ti 含量增加呈现出先降后升再降的趋势。

参 考 文 献

- [1] FANG Z Z, WANG H, KUMAR V. Coarsening, densification, and grain growth during sintering of nanosized powders—A perspective [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 62: 110-117.
- [2] 高运胜,金添阳.新形势下中国新能源汽车国际竞争力分析[J].国际经济合作, 2021(4): 65-76.

- [3] NORGREN S, GARCIA J, BLOMQVIST A, et al. Trends in the P/M hard metal industry[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 48: 31-45.
- [4] KWAK B W, SONG J H, KIM B S, et al. Mechanical properties and rapid sintering of nanostructured WC and WC-TiAl₃ hard materials by the pulsed current activated heating[J]. Hard Mater., 2016, 54: 244-250.
- [5] KAI H, SHI K C, ZHOU Z Y, et al. Microstructure and formation process of Ni-pool defect in WC-8Ni cemented carbides[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3): 873-878.
- [6] LI X, CHEN J, ZHENG D, et al. Preparation and mechanical properties of WC-10Ni₃Al cemented carbides with plate-like triangular prismatic WC grains[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 544(24): 134-140.
- [7] 邹芹,李爽,李艳国.无粘结相 WC 硬质合金的研究进展[J].硬质合金, 2021, 38(4): 297-305.
- [8] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.
- [9] YE Y F, WANG Q, LU J, et al. High-entropy alloy: Challenges and prospects[J]. Materials Today, 2016, 19(6): 349-362.
- [10] HOLMSTROM E, LIZARRAGA R, LINDER D, et al. High entropy alloys: substituting for cobalt in cutting edge technology[J]. Applied Materials Today, 2018(12): 322-329.
- [11] CHEN C S, YANG C C, CHAI H Y, et al. Novel cermet material of WC/multi-element alloy[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 43: 200-204.
- [12] ZHOU P L, XIAO D H, ZHOU P F, et al. Microstructure and properties of ultrafine grained AlCrFeCoNi/WC cemented carbides[J]. Ceramics International, 2018, 44: 17 160-17 166.
- [13] SCHUBERT W D, NEUMEISTER H, KINGER G, et al. Hardness to toughness relationship of fine-grained WC-Co hardmetals[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 1998, 16(2): 133-142.
- [14] 帅歌旺,郭正华,黄惠珍,等.机械合金化制备过饱和固溶体的研究进展[J].材料导报, 2008, 22(S2): 201-203.
- [15] ZHANG K B, FU Z Y, ZHANG J Y. Characterization of nanocrystalline CoCrFeNiTiAl high-entropy solid solution processed by mechanical alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495(1): 33-38.
- [16] ANDREA M G, PATRICIA A. The manufacture and characterization of WC-(Al)CoCrCuFeNi cemented carbides with nominally high entropy alloy binders[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 84, 105 032.
- [17] ZHOU Y J, ZHANG Y, WANG Y L, et al. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi, with excellent room-temperature mechanical properties[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(18): 181 904.
- [18] ROEBUCK B. Terminology, testing, properties, imaging and models for fine grained hardmetals[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 1995, 13(5): 265-279.
- [19] DEVESH K, ORNOV M, SAURAV K, et al. Phase and thermal study of equiatomic AlCuCrFeMnW high entropy alloy processed via spark plasma sintering[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 210: 71-77.
- [20] FANG Z Z. Correlation of transverse rupture strength of WC-Co with hardness[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2005, 23(2): 119-127.
- [21] WANG Y F, MA S G, CHEN X H, et al. Optimizing mechanical properties of AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloys by tailoring microstructures[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(3): 277-284.
- [22] LUO W Y, LIU Y Z, SHEN J J. Effects of binders on the microstructures and mechanical properties of ultrafine WC-10% Al_x-CoCrCuFeNi composites by spark plasma sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 540-549.
- [23] SHATOV A V, PONOMAREV S S, FIRSTOV S A, et al. The contiguity of carbide crystals of different shapes in cemented carbides[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2006, 24(1-2): 61-74.
- [24] SIGLL S, MATAGA P A, DALGLEISH B J, et al. On the toughness of brittle materials reinforced with a ductile phase[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(4): 945-953.

(编辑:刘卫)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

