

韩旭,唐思文,卢继,等.VC和Mo₂C对微波烧结WC-Ni₃Al基硬质合金组织及力学性能的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(2):102-108.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.013

HAN X, TANG S W, LU J, et al. Effects of VC and Mo₂C on the Microstructure and Mechanical Properties of WC-Ni₃Al Cemented Carbide by Microwave Sintering[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024,39(2):102-108.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.013

VC和Mo₂C对微波烧结WC-Ni₃Al基硬质合金组织及力学性能的影响

韩旭¹,唐思文^{1,2*},卢继¹,刘骞²,邱新义³,杨植富¹

(1.湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201;

2.湖南科技大学 深海深地矿产资源开发技术与装备教育部工程研究中心,湖南湘潭 411201;

3.湖南科技大学 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201)

摘要:采用微波烧结制备添加不同含量VC, Mo₂C的WC-Ni₃Al基硬质合金,研究添加VC和Mo₂C对其组织和力学性能的影响.添加VC和Mo₂C均可以抑制WC的溶解-析出过程,从而细化WC晶粒,同时也使黏结相Ni₃Al的分布变得均匀,其中VC细化晶粒的效果更明显.添加VC使WC-Ni₃Al基硬质合金的相对密度、弯曲强度和断裂韧性降低而硬度提高,当VC含量为0.6%时,WC-Ni₃Al基硬质合金的硬度最高为1413HV30.当Mo₂C含量为1.5%时,WC-Ni₃Al基硬质合金的相对密度、弯曲强度和硬度均有所提高但断裂韧性下降,Mo₂C含量继续增加时,其相对密度下降且Mo₂C会发生偏聚从而降低其力学性能.

关键词:WC-Ni₃Al硬质合金;碳化物添加剂;微波烧结;力学性能;微观组织

中图分类号:TG135+.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2024)02-0102-07

Effects of VC and Mo₂C on the Microstructure and Mechanical Properties of WC-Ni₃Al Cemented Carbide by Microwave Sintering

HAN Xu¹, TANG Siwen^{1,2*}, LU Ji¹, LIU Qian², QIU Xinyi³, YANG Zhifu¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Mechanical Equipment Health Maintenance, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Development Technology and Equipment of Deep Sea and Deep Ground Mineral Resources, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Materials, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Microwave sintering technology is used to prepare WC-Ni₃Al-based cemented carbides with different VC and Mo₂C additions, and the effects of adding VC and Mo₂C on its microstructure and mechanical properties are investigated. The addition of VC and Mo₂C can inhibit the dissolution-precipitation process of WC grains, thereby refining the WC grains, and at the same time make the distribution of the binder phase Ni₃Al uniform. It

收稿日期:2021-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305134);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4308);湖南省教育厅科学研究资助项目(22A0346)

*通信作者,E-mail: siw_tang@hnust.edu.cn

can also be found that VC has a more obvious grain refinement effect than Mo₂C. The addition of VC reduces the relative density, bending strength and fracture toughness of the WC-Ni₃Al-based cemented carbide and increases its hardness. When the VC content is 0.6%, its hardness is 1 413 HV. When the Mo₂C content is 1.5%, the relative density, bending strength and hardness of WC-Ni₃Al-based cemented carbide are increased but the fracture toughness is decreased. When the Mo₂C content continues to increase, its mechanical properties are reduced due to the decrease of its relative density and the occurrence of Mo₂C segregation.

Keywords: WC-Ni₃Al cemented carbide; carbide additives; microwave sintering; mechanical properties; microstructure

WC-Co基硬质合金具有高硬度、高强度和耐磨损等性能,在切削工具以及耐磨零件等领域得到广泛的应用^[1].WC-Co基硬质合金应用于刀具材料时,由于切削温度较高,对于其在高温下的硬度、强度以及抗氧化性能等也有更高的要求^[2].Ni₃Al具有高熔点、高硬度以及良好的高温蠕变抗力、抗氧化性和抗腐蚀性能等优点,在一定温度范围内,其屈服强度会随着温度的升高而升高,被认为是WC-Co基硬质合金黏结相的理想材料^[3-4].虽然Ni₃Al的室温脆性会影响其应用,但研究表明添加适量的B元素能够使其室温塑性和韧性显著提升^[5].ZHANG等^[6-7]通过放电等离子烧结制备性能优异的WC-Ni₃Al基硬质合金并研究其高温力学性能和变形机理,结果表明:相比WC-Co基硬质合金,WC-Ni₃Al基硬质合金具有良好的高温力学性能;LONG等^[8-9]采用低压烧结方法成功制备WC-Ni₃Al基硬质合金,并证明其具有良好的力学性能和抗氧化性能.以上研究表明:通过多种烧结方法都可以制备出致密性良好的WC-Ni₃Al基硬质合金,且其具有优异的力学性能和抗氧化性能.

在硬质合金中添加过渡族元素碳化物(如VC, Mo₂C等)可以改善硬质合金的组织结构,优化硬质合金的力学性能^[10].然而,碳化物添加剂的种类和添加量对硬质合金强化的效果不同,很多学者对碳化物添加剂强化硬质合金进行大量研究,并取得显著成果.ZHANG等^[11]通过微波反应烧结制备WC-Ni₃Al-VC-Al₂O₃硬质合金,结果表明VC可以降低硬质合金的孔隙率同时使WC晶粒变得细小均匀,从而提高其力学性能;STEWART等^[12]通过真空烧结制备TiC_{0.3}N_{0.7}-Ni₃Al-Mo₂C金属陶瓷,结果表明Mo₂C能改善烧结体的润湿性从而提高其致密度,同时Mo₂C的添加降低了TiCN在Ni₃Al中的溶解度,使其晶粒尺寸减小.然而,以上研究并未对VC和Mo₂C含量对WC-Ni₃Al硬质合金性能的影响进行系统研究,为了改善WC-Ni₃Al硬质合金的组织结构和性能,使其在切削工具领域得到进一步应用,本文采用微波烧结制备添加VC和Mo₂C的WC-Ni₃Al基硬质合金,研究VC, Mo₂C对微波烧结WC-Ni₃Al硬质合金的微观组织和力学性能的影响,以期对WC-Ni₃Al基硬质合金的制备和研究提供参考.

1 试验材料与方法

WC-Ni₃Al基硬质合金的组分如表1所示.所用粉末为商用WC粉末、Ni₃Al粉末、B粉末、VC粉末和Mo₂C粉末,其中WC粉末和B粉末的粒度约为1 μm, Ni₃Al粉末和VC粉末的粒度约为1~2 μm, Mo₂C粉末的粒度约为3 μm.按照表1称量原料后,加入2%(质量分数,下同)的石蜡作为成型剂,使用无水乙醇作为球磨介质.原料在行星式球磨机上球磨24 h,转速为304 r/min,球料质量比为5:1.球磨后的粉末干燥过筛后在300 MPa的压力下压制成型,成型后放入真空钼丝炉内在400 °C下保温1 h,再进行预烧结脱蜡.预烧后的材料在频率为2.45 GHz的真空微波炉中加热至1 450 °C并保温15 min,完成微波烧结后炉冷却至室温,在微波加热过程中加入一定压力的氮气来提高低温下的加热速率^[13].采用排水法测量密度;使用DWS-9000万能材料力学试验机和三点弯曲法测量弯曲强度,试样的尺寸为5 mm×7 mm×20 mm,试验时载荷的加载速度为0.1 mm/min;使用华银SHYCHVT-30Z型维氏硬度计测量硬度,加载力为298 N,加载时间为10 s;通过Palmqvist公式计算断裂韧性;使用Tescan MIRA4场发射扫描电子显微镜观察微观形貌,加速电压为30 kV;使用EDS能谱分析观察元素分布;通过划线法测量平均晶粒尺寸.

表1 WC-Ni₃Al 基硬质合金组分(质量分数)

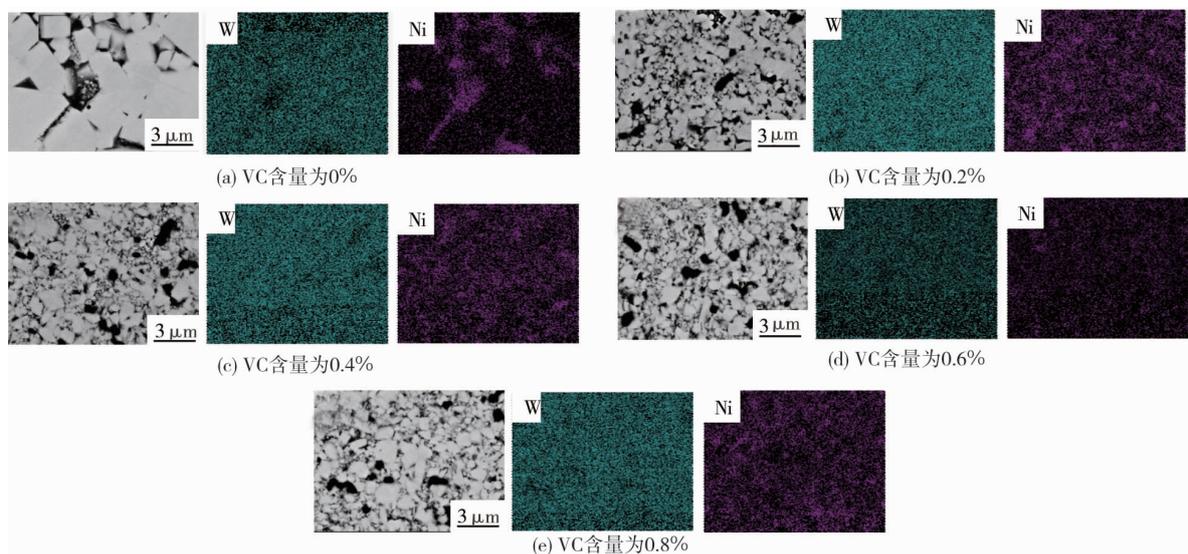
材料	WC	组分(质量分数)/%				相对密度/%	平均晶粒尺寸/ μm
		Ni ₃ Al	B	VC	Mo ₂ C		
WC-Ni ₃ Al	Balance	10	0.03	0	0	97.4	1.90
WC-Ni ₃ Al-0.2VC	Balance	10	0.03	0.2	0	96.8	0.75
WC-Ni ₃ Al-0.4VC	Balance	10	0.03	0.4	0	96.4	0.68
WC-Ni ₃ Al-0.6VC	Balance	10	0.03	0.6	0	96.2	0.62
WC-Ni ₃ Al-0.8VC	Balance	10	0.03	0.8	0	95.4	0.60
WC-Ni ₃ Al-1.5Mo ₂ C	Balance	10	0.03	0	1.5	97.6	0.91
WC-Ni ₃ Al-3.0Mo ₂ C	Balance	10	0.03	0	3.0	96.0	0.78
WC-Ni ₃ Al-4.5Mo ₂ C	Balance	10	0.03	0	4.5	95.9	0.75
WC-Ni ₃ Al-6.0Mo ₂ C	Balance	10	0.03	0	6.0	95.1	0.70

2 结果与讨论

2.1 VC 对微波烧结 WC-Ni₃Al 基硬质合金的影响

不同 VC 含量的 WC-Ni₃Al 基硬质合金的相对密度和平均晶粒尺寸如表 1 所示.由表 1 可知:随着 VC 含量的增加,其相对密度下降但下降幅度较小,同时还可以看出 VC 的添加使 WC 晶粒的尺寸明显减小,当 VC 含量从 0% 增加到 0.2% 时,WC 晶粒的平均尺寸从 1.90 μm 下降到 0.75 μm ,当 VC 含量继续增加时,WC 晶粒的平均尺寸不断减小但变化幅度较小.不同 VC 含量的 WC-Ni₃Al 基硬质合金的背散射电子图像和元素分布如图 1 所示,用 W 元素分布表示 WC 硬质相的分布情况,用 Ni 元素分布表示 Ni₃Al 黏结相的分布情况,由于 VC 含量较少,EDS 能谱分析中没有观察到 V 元素.由图 1 可知:添加 VC 使得 WC 晶粒明显细化,促使 W 元素和 Ni 元素的分布变得均匀,即 VC 的添加不仅能够细化 WC 晶粒,还能使黏结相 Ni₃Al 的分布变得更加均匀.VC 含量的增加使 WC-Ni₃Al 基硬质合金的相对密度下降,从背散射电子图像中可以观察到,添加 VC 后,材料的微观形貌中出现一些微小孔隙.

硬质合金中 WC 晶粒的长大机制为 Oswald 长大机制^[14],即小颗粒 WC 优先溶解于液相中,WC 溶解饱和后会在大颗粒 WC 表面析出,引起 WC 晶粒的长大.研究表明:VC 会吸附在 WC 晶粒表面,降低 WC 晶粒的界面自由能,抑制 WC 晶粒的溶解-析出过程,使 WC 晶粒的尺寸减小^[15].同时,VC 在液相中会优先于 WC 溶解,从而降低 WC 在液相中的溶解度,减缓 WC 晶粒通过溶解-析出长大的过程^[16].当 VC 含量仅为 0.2% 时就可以表现出对 WC 晶粒良好的细化效果.由于 VC 降低了 WC 在液相中的溶解度,当 VC 含量过多时还会聚集在晶界处形成脆性相^[17],使黏结相 Ni₃Al 对 WC 的润湿性降低,导致烧结过程中烧结体内的孔隙无法较好地填充,因此 VC 的添加降低了 WC-Ni₃Al 基硬质合金的相对密度.

图1 不同 VC 含量的 WC-Ni₃Al 基硬质合金的背散射电子图像和元素分布

不同 VC 含量的 WC-Ni₃Al 基硬质合金的力学性能和断口形貌分别如图 2 和图 3 所示.由图 2 可知:随着 VC 含量的增加,WC-Ni₃Al 基硬质合金的弯曲强度呈下降的趋势.虽然 VC 的添加细化了 WC 晶粒,使黏结相 Ni₃Al 的分布变得均匀,有利于 WC-Ni₃Al 基硬质合金弯曲强度的提高,但由图 3 可以看出,随着 VC 含量的增加,断口形貌中可以观察到一些微小孔隙,VC 的添加降低了其致密度,增加了材料内部的组织缺陷和应力集中,使材料断裂源增加.所以当 WC-Ni₃Al 基硬质合金中的 VC 含量从 0% 增加到 0.6% 时,受 WC 晶粒细化和相对密度降低的影响,其弯曲强度有一定的下降,但下降幅度较小.当 VC 含量增加到 0.8% 时,其相对密度的降低幅度较大而 WC 晶粒尺寸的变化较小,因此,其弯曲强度的下降幅度较大.同时,由图 2 可以看出:WC-Ni₃Al 基硬质合金的硬度随着 VC 含量的增加先升高后降低,当 VC 含量为 0.6% 时其硬度最高.硬质合金孔隙率的降低有利于其硬度的提升^[18],同时由 Hall-Petch 关系可知,硬质合金中 WC 晶粒尺寸与其硬度成反比例关系^[19].VC 细化 WC 晶粒尺寸的同时提高了 WC-Ni₃Al 基硬质合金的硬度,但 VC 含量的增加引起材料的相对密度下降,使 WC-Ni₃Al 基硬质合金的硬度降低.当 WC-Ni₃Al 基硬质合金中的 VC 含量从 0% 提升到 0.6% 时,WC 晶粒尺寸明显减小,相对密度的降低幅度较小,此时 WC 晶粒尺寸的降低对 WC-Ni₃Al 基硬质合金硬度的影响大于相对密度降低对其硬度的影响,WC-Ni₃Al 基硬质合金的硬度提高.当 VC 含量从 0.6% 提升到 0.8% 时,VC 含量的增加对 WC 晶粒尺寸的影响较小,此时 WC 晶粒尺寸的降低对 WC-Ni₃Al 基硬质合金硬度的影响小于相对密度降低对其硬度的影响,WC-Ni₃Al 基硬质合金的硬度降低,但其硬度还是高于未添加 VC 时的硬度.当 VC 含量从 0% 增加到 0.2% 时,其断裂韧性的下降幅度较大,当 VC 含量继续增加到 0.8% 时,断裂韧性继续下降但幅度较小.在硬质合金中,断裂韧性与黏结相平均自由程成正比,而黏结相平均自由程与 WC 晶粒尺寸成正比^[20],VC 含量的增加使 WC-Ni₃Al 基硬质合金的 WC 晶粒细化,降低了黏结相平均自由程,导致断裂韧性下降,同时其相对密度的降低也会使断裂韧性下降^[21].因此,随着 VC 含量的增加,WC-Ni₃Al 基硬质合金的断裂韧性不断下降.

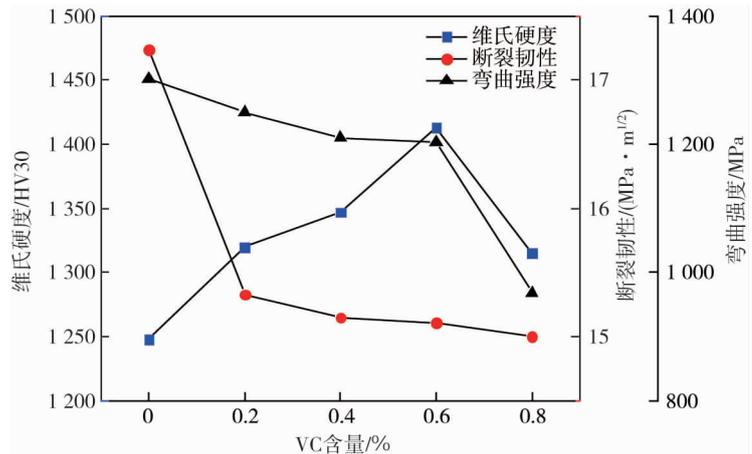


图 2 不同 VC 含量对 WC-Ni₃Al 基硬质合金的硬度、断裂韧性和弯曲强度的影响

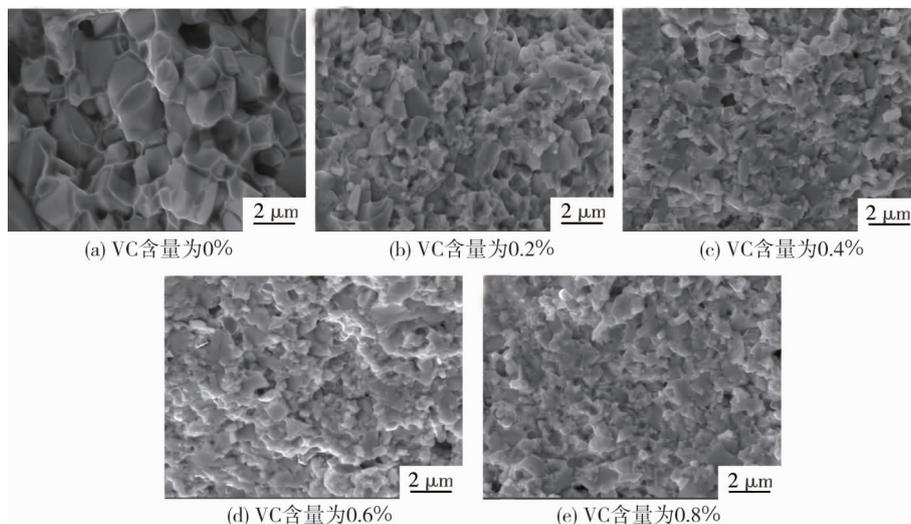


图 3 不同 VC 含量的 WC-Ni₃Al 基硬质合金的断口形貌

2.2 Mo₂C 对微波烧结 WC-Ni₃Al 基硬质合金的影响

由表 1 可知:当 Mo₂C 的含量从 0% 增加到 1.5% 时,WC 晶粒的平均尺寸从 1.90 μm 下降到 0.91 μm,

当 Mo_2C 含量超过 3% 后, WC 晶粒的尺寸不断减小但变化幅度较小, Mo_2C 也可以抑制 WC 晶粒长大, 但抑制效果相比 VC 较差. Mo_2C 作为过渡族元素碳化物添加剂, 与 VC 对 WC 晶粒长大的抑制机理相同, 都能够抑制 WC 晶粒的溶解-析出长大过程, 使 WC 晶粒的尺寸减小. 研究表明: Mo_2C 与其他金属之间具有较低的润湿角, 加入 Mo_2C 可以提高硬质合金体系的润湿性, 从而提高材料的相对密度^[12], 然而液相中含 Mo 时其黏度会增加, 液相填充孔隙变得困难, 当 Mo 含量过多时会引起硬质合金的相对密度降低^[22]. 当 Mo_2C 的含量从 0% 增加到 1.5% 时, WC- Ni_3Al 基硬质合金的相对密度有一定的提高, 当 Mo_2C 的含量继续提高至 6% 时, 由于 Mo_2C 含量过高, 液相黏度增加导致 WC- Ni_3Al 基硬质合金的相对密度呈现下降的趋势.

不同 Mo_2C 含量的 WC- Ni_3Al 基硬质合金的背散射电子图像和元素分布如图 4 所示, 用 W 元素分布表示 WC 硬质相的分布情况, 用 Ni 元素分布表示 Ni_3Al 黏结相的分布情况, 用 Mo 元素分布表示添加剂 Mo_2C 的分布情况. 由图 4 中的背散射电子图像可以观察到: 添加 Mo_2C 使 WC 晶粒明显细化, 材料内部出现一些微小孔隙. 由图 4 中的元素分布情况可以看出: Mo_2C 的添加使 W 元素和 Ni 元素的分布变得更加均匀, 即 Mo_2C 的添加能够细化 WC 晶粒, 提高 WC 晶粒分布的均匀性, 同时促使黏结相 Ni_3Al 的分布变得更加均匀. 当 Mo_2C 含量低于 3% 时, Mo 元素均匀分布在 WC- Ni_3Al 基硬质合金中, 当 Mo_2C 含量超过 4.5% 时, Mo_2C 在材料中发生偏聚现象.

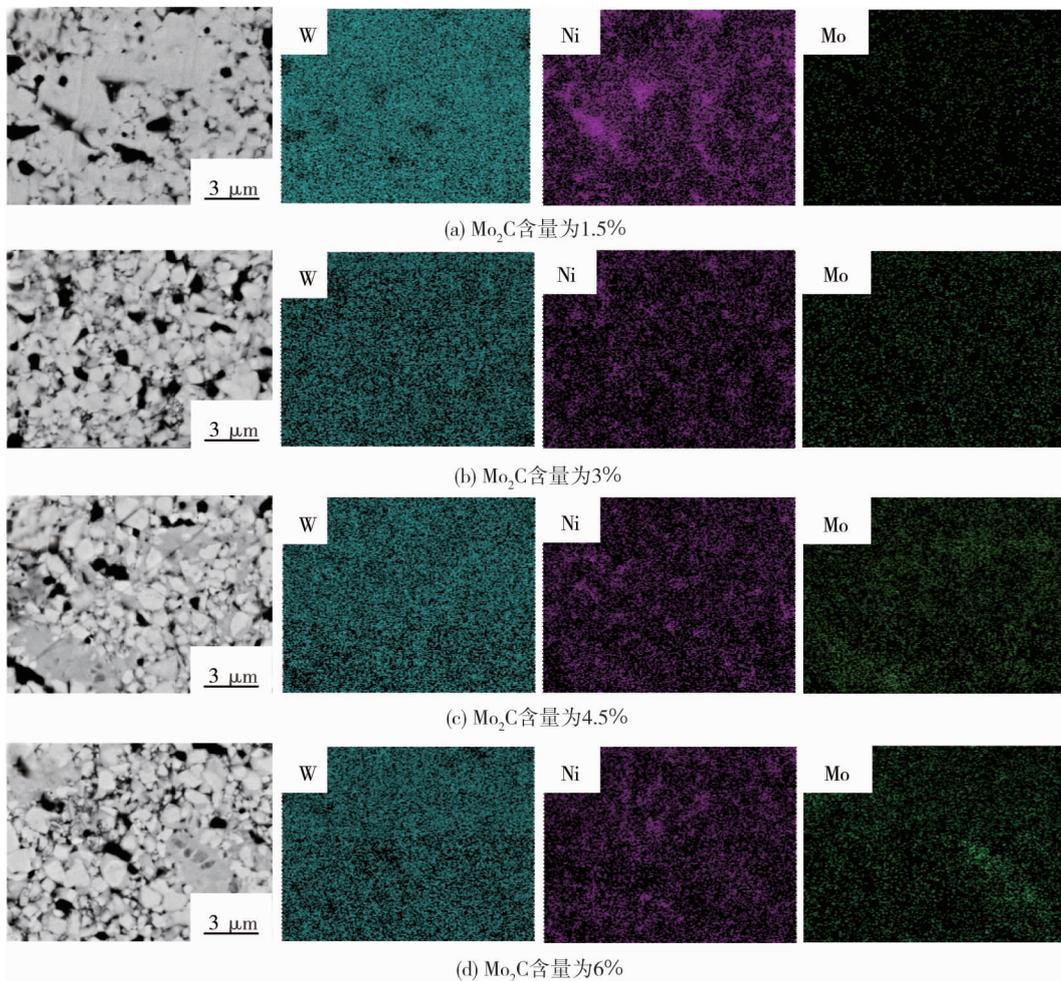


图 4 不同 Mo_2C 的含量 WC- Ni_3Al 基硬质合金的背散射电子图像和元素分布

不同 Mo_2C 含量的 WC- Ni_3Al 基硬质合金的力学性能和断口形貌分别如图 5 和图 6 所示. 由图 5 可知: 当 Mo_2C 含量为 1.5% 时, Mo_2C 的添加能在细化 WC 晶粒的同时提高其相对密度, 使 WC- Ni_3Al 基硬质合金的弯曲强度有一定提高. 当 Mo_2C 含量超过 3% 时, 其弯曲强度随着相对密度的下降也呈现下降的趋势. 由图 6 可知: 当 Mo_2C 含量超过 3% 时, 断口中可以观察到一些微小孔隙, 孔隙的存在增加了材料的组织缺陷和应力集中, 使 WC- Ni_3Al 基硬质合金的弯曲强度降低. 同时, 由图 4 的 Mo 元素分布可以看出: 当

Mo₂C含量超过4.5%时,Mo₂C在材料中发生偏聚现象,Mo₂C的偏聚降低了WC-Ni₃Al基硬质合金组织分布的均匀性,从而进一步降低其弯曲强度.当WC-Ni₃Al基硬质合金中的Mo₂C含量为1.5%时,WC晶粒细化和相对密度的提高都可以提高其硬度,当Mo₂C的含量从3%提高至6%时,WC晶粒尺寸的变化较小,此时相对密度的降低使其硬度下降.当Mo₂C含量为1.5%时,虽然其相对密度的提高有利于提高断裂韧性,但WC晶粒尺寸的减小却使其断裂韧性下降,当Mo₂C的含量继续增加时,WC晶粒尺寸不断减小且相对密度下降,其断裂韧性继续下降,因此,随着Mo₂C含量的增加,WC-Ni₃Al基硬质合金的断裂韧性不断下降.

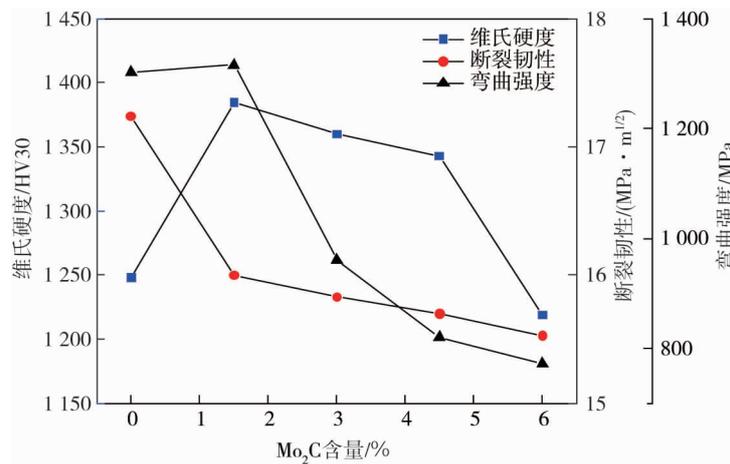


图5 不同Mo₂C含量对WC-Ni₃Al基硬质合金的硬度、断裂韧性和弯曲强度的影响

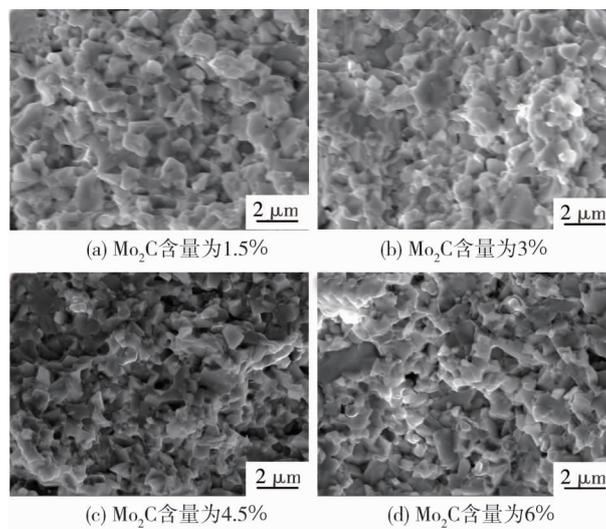


图6 不同Mo₂C含量的WC-Ni₃Al基硬质合金的断口形貌

对比VC和Mo₂C对WC-Ni₃Al基硬质合金微观组织和力学性能的影响可以看出:添加VC和Mo₂C均可以抑制WC晶粒长大,使黏结相Ni₃Al的分布变得均匀,其中VC对细化WC晶粒的效果更明显.VC的添加在细化WC晶粒的同时大幅度提高了WC-Ni₃Al基硬质合金的硬度,但添加VC会降低黏结相Ni₃Al对WC的润湿性,使得硬质合金的相对密度和弯曲强度降低.而添加适量的Mo₂C可以提高硬质合金体系的润湿性,使WC-Ni₃Al基硬质合金的相对密度和弯曲强度提高,但Mo₂C细化WC晶粒的效果较差,对于WC-Ni₃Al基硬质合金硬度的提高作用相对较小.

3 结论

1) VC的添加能够明显减小WC晶粒的平均尺寸,使WC晶粒和黏结相Ni₃Al的分布变得更加均匀.VC的添加能降低WC-Ni₃Al基硬质合金的相对密度,使其弯曲强度降低,同时,随着VC含量的增加,

WC-Ni₃Al基硬质合金的硬度先升高后降低而断裂韧性不断降低。

2) Mo₂C 的添加也能使 WC 晶粒的平均尺寸减小,但细化晶粒的效果相对 VC 较弱。当 Mo₂C 含量为 1.5%时,WC-Ni₃Al 基硬质合金的相对密度和弯曲强度提高而断裂韧性下降,当 Mo₂C 含量超过 3%时,其相对密度降低导致力学性能呈下降的趋势,当 Mo₂C 含量继续增加时,Mo₂C 会在合金中发生偏聚现象,进一步降低 WC-Ni₃Al 基硬质合金的力学性能。

参考文献:

- [1] 潘锋,刘家义,杜占,等.超细碳化钨制备过程及机理研究进展[J].化工学报,2021,72(11):5455-5467.
- [2] 邹芹,张萌蕾,李艳国,等.WC 硬质合金强韧化的研究进展与展望[J].机械工程学报,2021,57(14):195-204,212.
- [3] LI X Q, ZHANG M N, ZHENG D H, et al. The oxidation behavior of the WC-10wt.% Ni₃Al composite fabricated by spark plasma sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 629: 148-154.
- [4] SUN J L, ZHAO J, GONG F, et al. Development and application of WC-based alloys bonded with alternative binder phase[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2019, 44(3): 211-238.
- [5] 郭建亭,周兰章,李谷松.高温结构金属间化合物及其强韧化机理[J].中国有色金属学报,2011,21(1):1-34.
- [6] ZHANG M N, DUPUY A D, LI J M, et al. High temperature compressive properties and microstructure of WC-Ni₃Al cermets prepared by spark plasma sintering[J]. Vacuum, 2020, 175: 109281.
- [7] ZHANG M N, DUPUY A D, LI J M, et al. Study on high temperature deformation behavior of WC-10wt %Ni₃Al cemented carbide[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 820: 153156.
- [8] LONG J Z, ZHANG Z J, XU T, et al. Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of WC-40vol.% Ni₃Al composites with various carbon contents[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 40: 2-7.
- [9] 龙坚战,徐涛,彭文,等.粉末冶金法制备 WC-Ni₃Al 复合材料的组织与性能[J].粉末冶金材料科学与工程,2012,17(1):63-68.
- [10] 董凯林,时凯华,顾金宝,等.抑制剂在硬质合金中的应用及研究现状[J].稀有金属与硬质合金,2019,47(4):76-82.
- [11] ZHANG J J, WEI X L, YANG X J, et al. Microstructures, properties and in situ preparation of novel VC and Al₂O₃ Co-doped WC-Ni₃Al-composites by reactive microwave sintering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 815: 141273.
- [12] STEWART T L, PLUCKNETT K P. The effects of Mo₂C additions on the microstructure and sliding wear of TiC_{0.3}N_{0.7}-Ni₃Al cermets[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 50: 227-239.
- [13] TANG S W, LIU D S, LI P N, et al. Microstructure and mechanical properties of functionally gradient cemented carbides fabricated by microwave heating nitriding sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 58: 137-142.
- [14] SUN L, JIA C C, XIAN M. A research on the grain growth of WC-Co cemented carbide[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2007, 25(2): 121-124.
- [15] XIAO D H, HE Y H, LUO W H, et al. Effect of VC and NbC additions on microstructure and properties of ultrafine WC-10Co cemented carbides[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(6): 1520-1525.
- [16] 刘雪梅,王海滨,宋晓艳,等.VC 添加量对纳米晶硬质合金的制备及性能影响[J].稀有金属材料与工程,2016,45(2): 477-481.
- [17] 吴恩熙,雷贻文.超细硬质合金中晶粒生长抑制剂的作用[J].硬质合金,2002,19(3):136-139.
- [18] LIU G H, LI R D, YUAN T C, et al. Spark plasma sintering of pure TiCN: Densification mechanism, grain growth and mechanical properties[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 66: 68-75.
- [19] 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: 100713.
- [20] 邹芹,张萌蕾,李艳国.添加剂改性 WC 硬质合金的性能与应用研究[J].制造技术与机床,2021(7):9-15.
- [21] CAI H, JING W W, GUO S D, et al. Effects of micro/nano CeO₂ on the microstructure and properties of WC-10Co cemented carbides[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 95: 105432.
- [22] CHEN J, LIU W, DENG X, et al. Effects of Mo and VC on the microstructure and properties of nano-cemented carbides[J]. Science of Sintering, 2016, 48(1): 41-50.