

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.05.004

NbC_p/ASP2030 高速钢复合材料的制备与性能

江海湖¹, 陈刚¹, 贾寓真^{2,3}, 刘国跃^{2,3}, 胡莎¹, 田茂森¹

- (1. 湖南大学材料科学与工程学院, 长沙 410082;
2. 湖南省高速高效双金属锯切工程技术研究中心, 长沙 410200;
3. 湖南泰嘉新材料科技股份有限公司, 长沙 410200)

摘要:通过粉末冶金真空烧结法,利用NbC粉末与气雾化ASP2030高速钢制备了NbC_p/ASP2030高速钢复合材料。采用SEM、XRD、EDS等检测手段,研究了不同NbC添加量对ASP2030高速钢的显微组织、物相组成及力学性能的影响。结果表明,当真空烧结温度达到1220℃,所制得的复合材料主要相有Martensite、M₇C₃碳化物、M₆C碳化物、MC碳化物以及γ-Fe;当NbC加入量逐渐增加,烧结态复合材料的抗弯强度与冲击韧性都出现一定程度下降,而硬度则逐渐上升。在NbC含量达到2%时,复合材料的冲击韧性为5.34 J/cm²,抗弯强度为1918.3 MPa,硬度为53.9 HRC。

关键词:高速钢;NbC;复合材料;粉末冶金

中图分类号:TB33

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2023)05-0023-08

Preparation and Properties of NbC_p/ASP2030 High Speed Steel Composites

JIANG Haihu¹, CHEN Gang¹, JIA Yuzhen^{2,3}, LIU Guoyue^{2,3}, HU Sha¹, TIAN Maosen¹

- (1. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Sawing Engineering Research Center of Hunan Province, Changsha 410200, China;
3. Bichamp Cutting Technology(Hunan) Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: In this study, NbC_p/ASP2030 HSS composites were prepared via vacuum sintering method of powder metallurgy with NbC powder and ASP2030 HSS. The effects of NbC contents on the phase composition, microstructure and mechanical properties of ASP2030 high speed steel were investigated by means of SEM, XRD and EDS. The results show that when the vacuum sintering temperature reaches 1220℃, the main phases of the composites are Martensite, M₇C₃ carbide, M₆C carbide, MC carbide and γ-Fe. When the amount of NbC increases gradually, the flexural strength and impact toughness of the sintered composites decrease to a certain extent, while the hardness increases gradually. When the NbC content reaches 2%, the impact toughness, bending strength and hardness of the composite are 5.34 J/cm², 1918.3 MPa and 53.9 HRC.

Key words: high speed steel; NbC; composite; powder metallurgy

高速钢因具有优良的力学性能和耐磨性能而被广泛用作切削工具、耐磨零件与高负荷模具^[1]。

它是专门为高速切削刀具应用而设计的,合金成分主要由Co、W、Mo、Cr和V组成^[2]。在当今切

收稿日期:2022-12-05

基金项目:湖南省研究生科研创新项目(QL20220099)

Fund: Supported by Postgraduate Research and Innovation Project in Hunan Province(QL20220099)

作者简介:江海湖(1997—),男,在读研究生,主要研究方向:金属基复合材料。

通信作者:陈刚(1956—),男,博士,教授,主要研究方向:快速凝固与喷射沉积、粉末冶金及金属注射成形、高熵合金及其涂层等。

引用格式:江海湖,陈刚,贾寓真,等. NbC_p/ASP2030 高速钢复合材料的制备与性能[J]. 有色金属工程,2023,13(5):23-30.

JIANG Haihu, CHEN Gang, JIA Yuzhen, et al. Preparation and Properties of NbC_p/ASP2030 High Speed Steel Composites[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5): 23-30.

削领域中,高速钢刀具与硬质合金所制刀具应用十分广泛^[3],以高速钢为齿尖的带锯条锯刃具有硬度高、耐磨性好、韧性优良等优点。然而,实际切削加工过程对带锯条齿尖性能要求较高,不仅需要具有较高的硬度,还要具备良好的抗弯强度和韧性^[4-5]。为满足切削加工对材料性能的这类特殊要求,在高速钢刀具中添加硬质增强相是一种运用较为广泛的方法^[6-7]。

粉末冶金高速钢避免了熔炼高速钢存在的成分偏析与碳化物粗大等缺陷,具有晶粒细小、夹杂物少、组织均匀无偏析的特点,其综合性能相比传统铸造高速钢有明显提高^[8-9]。而选择硬质相来增强高速钢,是其最近几年来来的一个重要研究方向^[3,10]。目前常用于高速钢的硬质颗粒主要有 WC、TiC、VN 及 VC 等。GARCÍA 等^[11]利用聚光太阳能(CSE)技术,通过粉末冶金法制备了 VC/AISI M2 高速钢复合材料,并与传统粉末冶金法烧结样品对比发现,聚光太阳能烧结样品的耐磨性最好,同时也有最高的显微硬度,微细组织及碳氮化物的形成是该材料表现出最佳磨损性能的原因。陈泽民等^[12]研究了热旋锻变形量对 TiCN 颗粒增强 ASP30 粉末高速钢力学性能与显微组织的影响,并研究其摩擦磨损行为。结果表明加入 5% TiCN 可以显著提高 ASP30 的耐磨性,旋锻变形量为 56% 的 ASP30+5%TiCN 合金棒料经热处理后,抗弯强度达到 4 084.99 N/mm²,冲击韧性 14.55 J/cm²。CHEN 等^[10]采用高能球磨配合真空烧结的方法制备了 VN/M2 高速钢复合材料,在 1 160 ℃ 的烧结温度下,复合材料几乎完全致密化,同时,VN 颗粒有效地抑制了晶粒长大,使复合材料的硬度和弯曲强度分别达到 62.2 HRC、3 000 MPa。LIU 等^[13]采用球磨法及激光粉末床熔合工艺,获得了 TiC/M2 增强复合材料,该材料的硬度和摩擦磨损性能随着 TiC 含量的增加逐渐下降,与纯 M2 HSS 相比,TiC 含量为 1% 的复合材料表面显微硬度达到最大值,磨损量减少约 39%。XU 等^[14]分别制备了三种含 VC、M₆C 和 M₂C 型碳化物的铸造高速钢,研究了不同磨料粒度和载荷下碳化物类型对磨损行为的影响,结果显示含 VC/HSS 试样具有最优异的耐磨性,其耐磨性是 M₂C/HSS 的 3 倍,这主要归功于 VC 特性,如高硬度和良好的形貌,能够有效地抵抗磨粒的微切削。

关于硬质颗粒增强高速钢基复合材料的研究有很多,也取得了一些成果,但这些研究存在着综合性能不佳、制备成本较大、难以实现产业化生产等问

题,对于在生产中常用的 ASP2030 高速钢的研究也很少。本研究通过产学研合作,将工业生产用真空烧结脱蜡一体炉应用在 NbC_p/ASP2030 高速钢基复合材料研究中,从而制备得到有望工业化研究利用的齿尖复合材料。

1 实验材料及方法

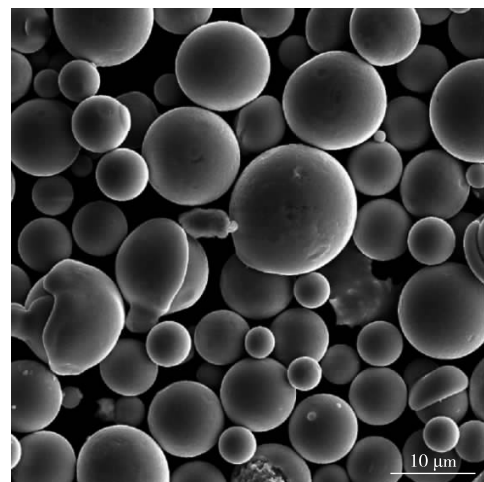
1.1 原材料

本实验中所使用的原材料气雾化 ASP2030 高速钢粉末由天工国际公司提供,氧含量为 0.025%,表 1 是该粉末的基本化学成分;NbC 粉末由上海中冶新材料有限公司提供。图 1 为 ASP2030 高速钢

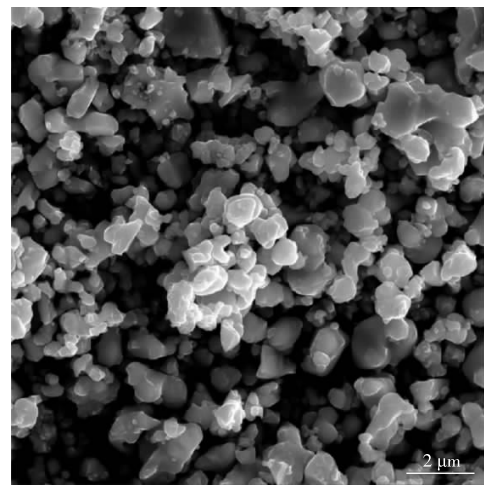
表 1 ASP2030 高速钢元素含量

Table 1 Content of elements in ASP2030 high speed steel

Elements	C	W	Co	Mo	Cr	V	Fe
Contents	1.24	5.01	8.28	5.36	4.12	3.13	Bal.



(a)ASP2030



(b)NbC

图 1 粉末形貌

Fig. 1 Morphologies of powders

粉末和 NbC 粉末的 SEM 形貌图。从图 1 中可以看出,气雾化 ASP2030 高速钢粉末呈球形状态,NbC 颗粒则为粒径较小的不规则状态,表现出聚集分布的状态。利用 Winner2000ZDE 型激光粒度分布仪测量得到粉末粒径,其中 ASP2030 粉末 D_{50} 为 $18.12\ \mu\text{m}$,NbC 粉末 D_{50} 为 $1.67\ \mu\text{m}$ 。

1.2 实验流程及工艺

图 2 为本实验的工艺流程图^[15]。选取 NbC 的质量分数分别为 0%、1%、2% 和 3%,将一定量的 NbC 粉末和 ASP2030 高速钢粉末混合,按照球料比为 4:1 的比例倒入球磨罐中,以 260 r/min 的速度在行星式球磨机中进行球磨,球磨时间为 12 h,并于 80 °C 真空干燥 10 h 后过筛;粉末成型剂选择溶液丁苯橡胶(SBS),添加量 1%,并加入相同量的白电油。最后在液压机上单向模压成型,压制力约 350 MPa,长方体模具的长度、宽度与高度分别为 80、17 与 13 mm。

采用超固相线液相烧结法(SLPS),在复合材料基体 ASP2030 高速钢的液固两相区进行液相烧结,并制定具体烧结工艺路线如下:样品先在较低的温度下保温一段时间,以除去成型剂;然后升温至 1 050 °C 保温 30 min;再以 2 °C/min 的速率升温至最终烧结温度并保温 90 min,最后随炉冷却。所使用烧结设备为真空烧结脱蜡一体炉,整个烧结过程中真空度基本控制在 1 Pa 以下。

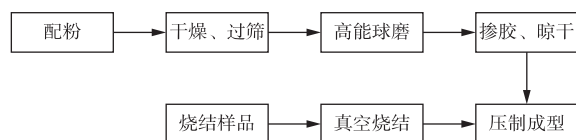


图 2 工艺流程图

Fig. 2 Craft flowchart

1.3 材料表征及测试

利用阿基米德原理测试并计算得到样品密度。样品硬度通过 200HRS-150 型洛氏硬度测试仪测得。表征样品经金相处理(镶样→粗磨→细磨→抛光)后,使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,再通过 TESCAN MIRA3 LMU 场发射扫描电子显微镜观察粉末颗粒形貌和烧结样品的显微结构,并使用该设备的能谱仪(EDS)表征特定元素的分布状态,通过 D8-advance 型 X 射线衍射仪(扫描角度为 20°~90°, $\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$)来研究烧结态制品的物相组成。利用 Instron3382 型电子万能试验机测定试样的抗弯强度,利用 XJ-40A 型冲击试验机获得材料的冲击韧性,抗弯实验和冲击实验所使用样品的尺寸分别为 5 mm×5 mm×35 mm 和 5 mm×5 mm×

50 mm,样品表面均经 80 目、1000 目的金刚石盘打磨平整后再进行测试。

2 结果与讨论

2.1 NbC_p/ASP2030 复合材料烧结致密化行为

图 3 为随着烧结温度的改变,NbC_p/ASP2030 复合材料密度的变化曲线。图 4 为在 1 220、1 250 和 1 260 °C 下制备得到的含 1% NbC 的复合材料。从图 3 可见,随着真空烧结温度的逐渐提高,NbC_p/ASP2030 样品的密度也相应提高,在 1 220~1 260 °C 时变化较小,趋于稳定。前文已提到,该高速钢样品是采用超固相线液相烧结,而这样的密度转变曲线是与 SLPS 机制相契合的^[16]。当复合材料达到了某个烧结温度范围时,压坯内部产生足够的液相,它们的充分流动可以填充颗粒间隙,使合金达到致密化的效果。不过,若真空烧结温度太高,烧结过程中产生的液相应也较多,而由于受到重力的影响,容易导致样品产生变形甚至会形成“塌样”,如图 4 中 1 260 °C 的这类压制样在真空烧结后不能维持它原本的形状,也不能用于工业生产^[15]。

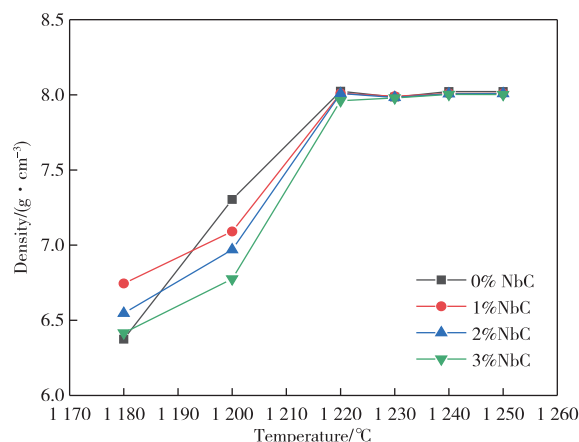


图 3 NbC_p/ASP2030 复合材料样品的密度随温度变化曲线

Fig. 3 Density curves of NbC_p/ASP2030 composite samples with temperature

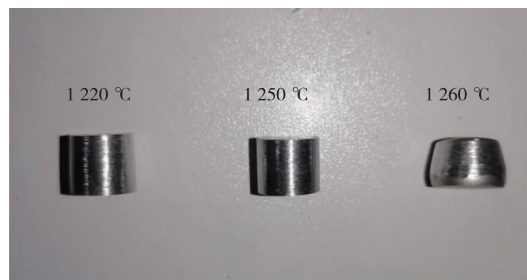


图 4 1 220、1 250 和 1 260 °C 烧结的 1%NbC_p/ASP2030 样品

Fig. 4 1%NbC_p/ASP2030 samples sintered at 1 220 °C , 1 250 °C and 1 260 °C

真空烧结温度在 1 220 ℃ 时,复合材料 NbC_p/ASP2030 的相对密度如表 2 所示。在这里,NbC 与 ASP2030 的理论密度分别是 7.78 与 8.1 g/cm³,不同 NbC 含量的复合材料相对密度的计算公式如式(1)^[17]所示。

$$\rho = \frac{1}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}} \quad (1)$$

表 2 NbC_p/ASP2030 在 1 220 ℃ 真空烧结时的相对密度

Table 2 Relative density of NbC_p/ASP2030 composites sintered by vacuum at 1 220 ℃

NbC content/%	0	1	2	3
Sintering density/(g · cm ⁻³)	8.020	8.010	8.008	7.961
Theoretical density/(g · cm ⁻³)	8.1	8.097	8.093	8.090
Relative density/%	99.0	98.9	98.9	98.4

2.2 NbC_p/ASP2030 复合材料物相组成与显微组织

NbC 添加量为 0~3% 时 NbC_p/ASP2030 复合材料的 XRD 如图 5 所示。由图 5 可见,不同成分的样品其基体相组成基本都为 Martensite、残余奥氏体,渗碳体和 M₇C₃、M₆C、MC 等碳化物。其中马氏体的形成是因为对于高碳高合金元素高速钢,临界冷却速度较低,因此在真空液相烧结后续冷却过程中,冷却速度有可能超过临界冷速而生成马氏体相。随着 NbC 添加量的增加,M₆C 与 MC 的衍射峰有所增强,因此认为 NbC 的加入促使这两种碳化物的形成。同时还可以注意到,复合材料的 M₇C₃ 型碳化物峰位显著降低,MC 碳化物的峰位移向较低的衍射角,峰宽增加,这是因为

该公式中的 ρ_1 与 m_1 是分别 NbC 的理论密度及其质量分数,而 ρ_2 与 m_2 分别是 ASP2030 高速钢的理论密度及其质量分数。根据表 2 可以看出,复合材料在 1 220 ℃ 下真空烧结时,相对密度均可以达到 98% 以上。根据以上关于复合材料致密度的研究,为继续研究其组织与性能,以下不同成分的复合材料的真空烧结温度均为 1 220 ℃。

相比 VC,Nb 元素的原子半径较大,NbC 的晶格参数也更大,且 Nb 通常会富集在 MC 相中,从而使得相晶格参数增加,MC 碳化物颗粒的晶粒尺寸减小^[18]。另外,随着 NbC 含量的增加,44°、65° 与 82.5° 左右的峰尖锐度有所增加,峰位也有所显著增强,因此认为增加复合材料中 NbC 的质量分数有利于生成 Martensite,从而可以使 NbC_p/ASP2030 样品的硬度增加。

NbC 质量分数为 0~3% 的 NbC_p/ASP2030 样品 SEM 图像如图 6 所示。可见 NbC_p/ASP2030 复合材料的基体组织主要是 Martensite 组织,以及在晶界晶粒中均有分布的白色碳化物与主要分布在晶界处的灰色碳化物组织。结合 XRD 分析认为,白色相主要是 M₆C 碳化物,MC 碳化物则主要对应灰色相,这些相组织颜色较深,故认为其 W 元素含量很少。没有添加 NbC 的 ASP2030 显微组织中碳化物多数团聚在一起,以较大块不规则状的形式存在于晶界处,晶粒上则分布着一些细小状碳化物;而在 ASP2030 高速钢中加入 NbC 后,随着 NbC 添加量的增多,灰色 MC 相分布更加广泛,数量也显著增加,且形状尺寸变得更加细小,基本印证了上文关于 Nb 促进 MC 相形成的分析。另外还可以看出,原本偏聚在晶界上的大块不规则状碳化物数量逐渐减少,而基体中弥散分布的小块碳化物数量明显增加,且铁基体组织的晶粒尺寸也逐渐减小,分析后认为,这可能是由于 NbC 的加入导致碳化物及基体晶粒变得细小化,体现了 Nb 细化晶粒的作用^[19-20]。

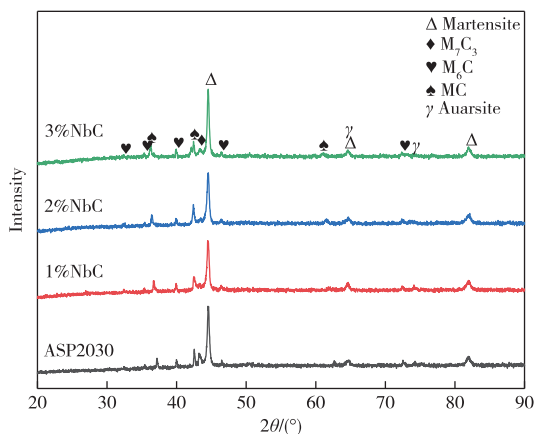


图 5 不同 NbC 含量的 NbC_p/ASP2030

复合材料的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of NbC_p/ASP2030 composites with different NbC contents

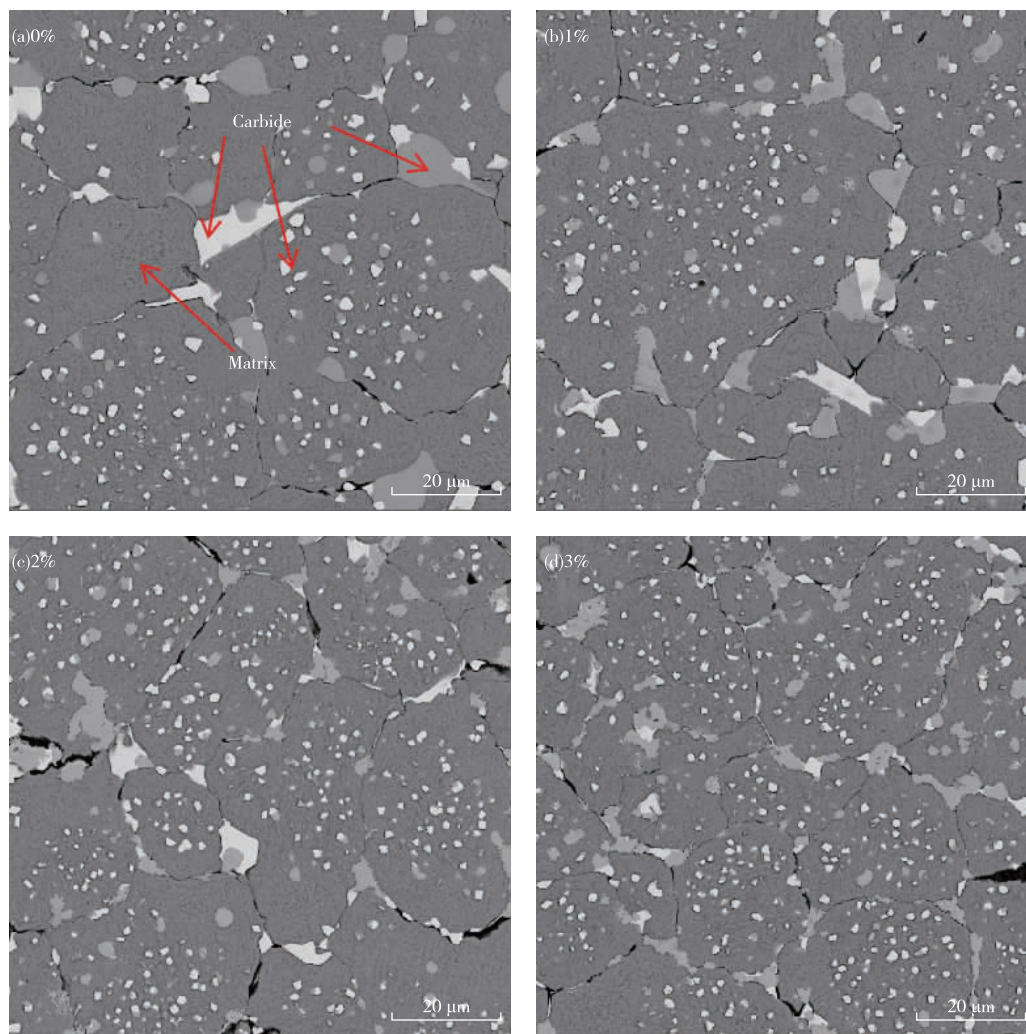
图6 不同 NbC 含量的 NbC_p/ASP2030 复合材料 SEM 图像Fig. 6 SEM images of NbC_p/ASP2030 composites with different NbC contents

图7为NbC含量分别为0和2%的NbC_p/ASP2030复合材料的EDS面扫描图。由图7可见,碳元素均匀分布于基体中,复合材料中的碳化物主要是富Mo碳化物,其中固溶了一定量的Cr、W与V,从图7(b)可以看出V与Nb分布位置大致重叠在一起。根据图5以及表1可以看出,Fe元素所在的位置对应Martensite相与 γ -Fe,基体中明显增多的白色小尺寸碳化物及大块不规则状碳化物主要对应Mo元素,主要是M₆C碳化物中的(Fe,Mo)₆C,而浅灰色碳化物主要含V与Nb元素,对应MC相。因此,印证了XRD与组织图中关于碳化物相的分布以及变化推测。

2.3 NbC_p/ASP2030 复合材料力学性能

图8为NbC含量不同时NbC_p/ASP2030复合

材料烧结态的硬度变化。由图8可见,随着NbC添加量的增多,复合材料的硬度逐渐提高,在3%NbC时达到最大值54.3HRC,此时复合材料的硬度相比未添加NbC的ASP2030高速钢提高了约1.2HRC。由于烧结态复合材料的致密度相差无几,故认为样品硬度主要是因为碳化物形貌、尺寸和分布不同而发生改变,在NbC_p/ASP2030复合材料中,MC与M₆C相的存在可以阻止位错运动,从而提高材料的硬度^[3,20-21]。NbC是一种硬度很高的碳化物,即便是仅添加了1%~3%的NbC,也同样使得复合材料的硬度明显高于未添加的ASP2030粉末高速钢,硬度提高规律与前述的显微组织演变规律相符合。

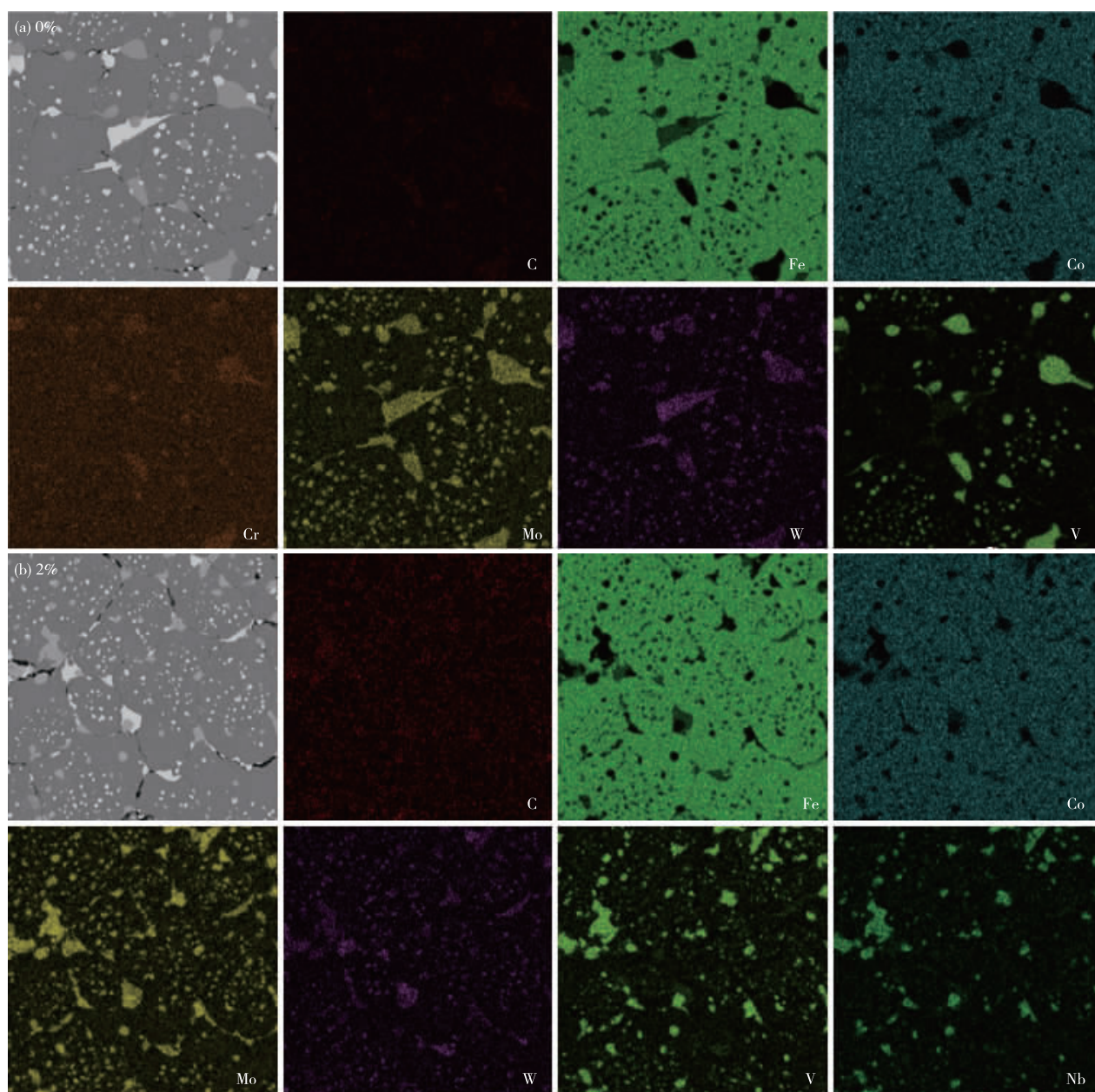


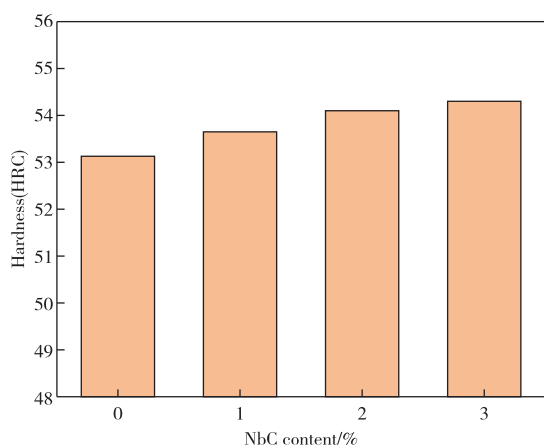
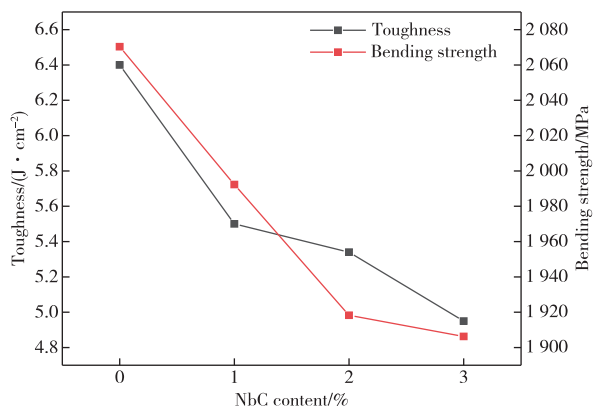
图 7 不同 NbC 含量的 NbC_p/ASP2030 复合材料 EDS 图

Fig. 7 EDS images of of NbC_p/ASP2030 composites with different NbC contents

与本课题组之前关于 WC 增强 M42 高速钢的实验相比^[3],即使在 M42 中加入多达 10% 的 WC,其硬度也不足 49HRC,而本研究在使用相同的烧结方法下,仅加入 2% 的 NbC,即可得到硬度达到 54.1HRC 的复合材料,硬度提升了约 11%,因而获得了硬度更高更耐磨的高速钢复合材料,更加适用于实际生产。

图 9 为抗弯强度与冲击韧性随 NbC 添加量的变化曲线。总体来看,不同 NbC 质量分数的 NbC_p/ASP2030,其抗弯强度与冲击韧性有所不同,且两者的变化规律稍有差异。当加入 1% NbC 时,冲击韧

性与抗弯强度均快速下降,而当加入 2% NbC 时,复合材料抗弯强度为 1 992.3 MPa,继续下降 74 MPa,下降幅度约 8%,而冲击韧性为 5.5 J/cm²,下降幅度较小,仅 0.16 J/cm²,这说明在 1%~2% 添加量内,抗弯强度因 NbC 含量的改变、界面及缺陷的增加和网状碳化物的形成更为敏感;当加入量进一步提高至 3% 后,抗弯强度下降趋势变缓,而冲击韧性下降较快,结合复合材料显微组织,分析是在此含量下,冲击韧性对网状结构的形成比较敏感。结合 XRD 图谱分析,随着 NbC 含量的增加,复合材料中 Martensite、M₆C 与 MC 相的峰均得到增强,因此在

图8 不同NbC添加量下NbC_p/ASP2030样品的硬度变化Fig. 8 Hardness of NbC_p/ASP2030 samples at different NbC contents图9 NbC含量对NbC_p/ASP2030复合材料强韧性的影响Fig. 9 Effects of NbC content on strong toughness of NbC_p/ASP2030 composites

复合材料中添加的NbC可以使Martensite、M₆C与MC生成,而这三者均属于硬而脆的相,因此它们的增加会使复合材料的硬度得到明显提升,同时又会致韧性明显下降。相比WC_p/M42高速钢复合材料,无论是弯曲强度,还是冲击韧性,本高速钢都更加优异,综合性能更佳,更具有研究价值。总体来看,当NbC添加量为2%时,复合材料的综合力学性能最佳。通过在ASP2030高速钢中加入适量的NbC,有效提高了复合材料的硬度,从而获得一种具有发展潜力的新型高硬耐磨切削材料。

3 结论

1)采用真空烧结技术成功制备了NbC_p/ASP2030复合材料,其致密度超过98%,且随着烧结温度的上升,密度逐渐稳定。复合材料的物相组成为Martensite、碳化物M₇C₃、M₆C、MC以及γ-Fe。

2)随着复合材料中NbC质量分数的提高,

Martensite、M₆C与MC碳化物的含量也逐渐提高;偏聚在晶界上的大块不规则状碳化物数量逐渐减少,而基体中弥散分布的小块碳化物数量明显增加,其尺寸也逐渐减小;同时,碳化物逐渐连在一起,从而使样品的硬度相应增加,而冲击韧性与抗弯强度则有一定的降低。

3)加入质量分数2%的NbC时,NbC_p/ASP2030复合材料的主要力学性能指标为:硬度54.1 HRC,抗弯强度1992.3 MPa,冲击韧性为5.5 J/cm²,综合性能较好。

参考文献:

- [1] LEE E S, BAIK K H, AHN S. Different carbide types and their effect on bend properties of a spray-formed high speed steel[J]. Scripta Materialia, 1998, 39(8): 1133-1138.
- [2] HADIAN A, ZAMANI C, GORJAN L, et al. Thermoplastic processing and debinding behavior of NbC-M2 high speed steel cemented carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 91-100.
- [3] 陈刚,邓人钦,贾寓真,等. WC_p/M42高速钢复合材料的制备与性能[J]. 有色金属工程, 2022, 12(8): 30-38. CHEN Gang, DENG Renqin, JIA Yuzhen, et al. Preparation and properties of WC_p/M42 high speed steel composites[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(8): 30-38.
- [4] 游航,王贤瑞,梁翠,等. 放电等离子烧结制备M42/45钢双金属复合材料及界面形成机理[J]. 机械工程材料, 2012, 36(3): 56-59. YOU Hang, WANG Xianrui, LIANG Cui, et al. M42/45 steel bimetal composite prepared by spark plasma sintering and interface forming mechanism [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(3): 56-59.
- [5] 陈刚,唐啸天,刘国跃,等. 焊接电流对M51/RM80异种钢电阻点焊接头力学性能和断裂行为的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(5): 18-22. CHEN Gang, TANG Xiaotian, LIU Guoyue, et al. Effect of welding current on mechanical properties and fracture behavior of M51/RM80 dissimilar steel resistance spot welded joints [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(5): 18-22.
- [6] 李小峰,肖志瑜,罗飞,等. TiC含量对TiC_p/M2高速钢复合材料性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2013, 23(4): 39-44. LI Xiaofeng, XIAO Zhiyu, LUO Fei, et al. Effects of

- TiC content on sintered properties of $\text{TiC}_p/\text{M2}$ high speed steel composites [J]. Powder Metallurgy Industry, 2013, 23(4): 39-44.
- [7] TORRALBA J M, CAMBRONERO L E G, RUIZ-PRIETO J M, et al. Sinterability study of PM M2 and T15 high speed steels reinforced with tungsten and titanium carbides [J]. Powder Metallurgy, 1993, 36(1): 55-66.
- [8] 杨军浩, 刘如铁, 熊翔, 等. 球磨时间对 M2 粉末冶金高速钢组织与力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2020, 25(4): 296-303.
- YANG Junhao, LIU Rutie, XIONG Xiang, et al. Effect of milling time on the microstructure and mechanical properties of M2 powder metallurgy high speed steel[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2020, 25(4): 296-303.
- [9] 胡必必, 贾成厂, 曲选辉, 等. M3 与 T15 高速钢的 SPS 烧结与热处理[J]. 粉末冶金技术, 2010, 28(3): 204-209.
- HU Mimi, JIA Chengchang, QU Xuanhui, et al. Spark plasma sintering and heat treatment on the high-speed steel powder of M3 and T15[J]. Powder Metallurgy Technology, 2010, 28(3): 204-209.
- [10] CHEN N, LUO R, XIONG H W, et al. Dense M2 high speed steel containing core-shell MC carbonitrides using high-energy ball milled M2/VN composite powders[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 771: 138628. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138628>.
- [11] GARCÍA C, ROMERO A, HERRANZ G, et al. Effect of vanadium carbide on dry sliding wear behavior of powdermetallurgy AISI M2 high speed steel processed by concentrated solar energy[J]. Materials Characterization, 2016, 121: 175-186.
- [12] 陈泽民, 张乾坤, 肖逸锋, 等. 热旋锻变形对 TiCN 强化 ASP30 粉末冶金高速钢的组织及性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2020, 40(4): 376-382.
- CHEN Zemin, ZHANG Qiankun, XIAO Yifeng, et al. Effect of hot rotary swaging deformation on microstructure and properties of ASP30 grade powder metallurgical high speed steels strengthened by TiCN[J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 40(4): 376-382.
- [13] LIU Y, ZHAO D G, LI Y, et al. Effects of nano TiC on the microhardness and friction properties of laser powder bed fusing printed M2 high speed steel[J]. Coatings, 2022, 12(6): 825. <https://doi.org/10.3390/coatings12060825>.
- [14] XU L J, WEI S Z, XIAO F N, et al. Effects of carbides on abrasive wear properties and failure behaviours of high speed steels with different alloy element content[J]. Wear, 2017, 376-377: 968-974.
- [15] 吕蓉, 肖平安, 顾景洪, 等. $\text{TiC}_p/\text{Cr15}$ 高铬铸铁复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2956-2964.
- LYU Rong, Xiao Ping'an, GU Jinghong, et al. Preparation and properties of $\text{TiC}_p/\text{Cr15}$ high chromium cast iron composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 2956-2964.
- [16] WRIGHT C S, WRONSKI A S, ITURRIZA I. Development of robust processing routes for powder metallurgy high speed steels[J]. Materials science and technology, 2000, 16(9): 945-957.
- [17] 王志. TiC-CrMo 钢结硬质合金的制备与性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- WANG Zhi. Study on the preparation and properties of CrMo steel bonded titanium carbide [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [18] WANG H B, HOU L G, OU P, et al. Enhanced microstructures and properties of spray-formed M3:2 high-speed steels by niobium addition and thermal-mechanical treatment [J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(6): 1043-1053.
- [19] 雷若姗, 陈广润, 汪明朴. Nb 含量对机械合金化 Cu-Nb 合金晶粒细化和力学性能的影响(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(9): 2607-2614.
- LEI Ruoshan, CHEN Guangrun, WANG Mingpu. Effect of Nb solute concentration on crystallite size refinement and strength enhancement in mechanically alloyed Cu-Nb alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(9): 2607-2614.
- [20] ZHANG Q K, LI S W, XIAO Y F, et al. Effects of niobium addition on microstructure and properties of CPM121 powder metallurgy high-speed steel [J]. Journal of Central South University. 2021, 28(4): 1206-1218.
- [21] 张鹏杰, 王春旭, 厉勇, 等. 淬火温度对 2 200 MPa 级超高强度钢力学性能与微观组织的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 70-74.
- ZHANG Pengjie, WANG Chunxu, LI Yong, et al. Effect of quenching temperature on mechanical properties and microstructure of 2 200 MPa ultra-high strength steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(1): 70-74.