



FeNiCo 预合金粉末的烧结特性及其在金刚石绳锯中的应用

刘志环^{1,2}, 张绍和^{1,2}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 通过多金属电解法制备 FeNiCo 预合金粉末, 采用 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜对预合金粉末及其烧结体进行形貌观察和物相分析, 研究 FeNiCo 预合金粉不同温度烧结时烧结体的力学性能和磨损性能, 并探讨其在金刚石绳锯中应用的可行性。结果表明: 制备的 FeNiCo 预合金粉一定程度上实现合金化, 粉末呈不规则状, 粒度较细; FeNiCo 预合金粉在 800~840 °C 烧结时, 烧结体硬度最大值为 107.6 HRB, 三点抗弯强度最大值为 1638.3 MPa, 致密度最大值为 96.2%, 磨损质量损失为 0.498~0.555 g, 烧结温度适应性较好。采用 FeNiCo 预合金粉为主要胎体成分制作金刚石绳锯锯切硬质石材时, 切割效率为 8.6 m²/h, 工具寿命为 11.3 m²/m, 具有较好的综合使用性能。

关键词: FeNiCo 预合金粉; 金刚石绳锯; 微观结构; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2019)-06-1257-11

中图分类号: TG454

文献标志码: A

金刚石工具在石材、玻璃、陶瓷、硬质合金、光伏多晶硅、LED 衬底材料等硬脆性材料加工中已广泛使用, 其制造工艺大多采用粉末冶金法^[1-3]。金刚石绳锯是金刚石工具的重要分支, 使用时不受切割形状和尺寸的限制, 因此应用领域非常广泛^[4-5]。采用粉末冶金法制造金刚石绳锯, 要求胎体材料具有较好的包镶金刚石颗粒的能力外, 还需要具备与金刚石颗粒磨损相匹配的磨损性能, 以及一定的强度、与基体材料的连接性能等^[6-8]。金属钴(Co)是优质的金刚石绳锯胎体骨架材料, 它具有很好的对金刚石颗粒的润湿性, 而且烧结体抗弯强度高, 高 Co 含量金刚石绳锯往往具有较好的综合使用性能, 但 Co 价格昂贵, 而且属于国家战略性物资。因此, 研究可代 Co 的预合金粉末材料成为目前金刚石绳锯主要的研究方向之一^[9-12]。

高温高压压制人造金刚石一般采用 Fe、Ni、Co 的合金粉末触媒催化法, 开发 FeNiCo 预合金粉末作为包镶金刚石的金属胎体材料, 理论上对金刚石颗粒有好的浸润性和包镶性能; Fe、Ni 元素与 Co 元素原子结构相近, 而 Fe、Ni 粉末价格相对 Co 粉价格大大降低, 开发高 Fe、Ni 含量、低 Co 含量的 FeNiCo 预合金粉替代单质 Co 粉, 能显著降低工具成本, 是值得研究的方向, 而目前相关研究较少。本文作者采用

多金属电解沉积法制备了一种 FeNiCo 预合金粉末, 研究了粉末的形貌结构和基本特性, 并制作烧结体, 研究了不同烧结温度下预合金粉烧结体的物理和力学性能以及对金刚石颗粒的包镶性能, 同时采用 FeNiCo 预合金粉为骨架相制作金刚石绳锯, 研究了其切割效率和使用寿命, 与高 Co 结合剂金刚石绳锯进行了对比, 为 FeNiCo 预合金粉的在金刚石绳锯中的应用提供理论基础和依据。

1 实验

1.1 FeNiCo 预合金粉末的制备

电解沉积法制备 FeNiCo 预合金粉末, 采用高纯 Fe、高纯 Ni、高纯 Co 为原料, 按表 1 所列 FeNiCo 预合金粉末的元素名义成分要求, 调整原材料的比例

表 1 预合金粉末中各元素名义成分

Table 1 Composition of pre-alloyed powder (mass fraction, %)

Fe	Ni	Co
80	18	2

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41872186)

收稿日期: 2018-06-22; 修订日期: 2018-11-20

通信作者: 张绍和, 教授, 博士; 电话: 18008415363; E-mail: zhangshaohe@163.com

和电解液配方,采用大电流低浓度电解工艺,制得合金沉积物,然后经离心清洗、真空烘干、还原、气流磨分级等工艺过程制得所需预合金粉末。

1.2 粉末性能检测与表征

采用容量装粉法测定粉末堆积密度,采用 BT-9300S 激光粒度仪测定粉末粒度,采用 ON-330 氧氮分析仪测定氧含量,采用 3H-2000A 型氮吸附比表面仪测定比表面积。

采用日本 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜观察粉末形貌并测定晶粒尺寸,采用日本 D/max-rA10 型 X 射线衍射仪对预合金粉进行物相分析,确定粉末的相结构及组成,采用德国 STA-449C 型热分析仪对预合金粉进行差热分析检测(条件:采用空气气氛,升温速率 10 °C/min,升至 1000 °C 结束)。

1.3 预合金粉烧结体的制备

将 FeNiCo 预合金粉按质量要求装入石墨模腔,置于国产真空热压烧结炉内进行热压烧结,得到尺寸为 30 mm×12 mm×6 mm 的预合金粉烧结体试样。热压炉真空度为 0.1 Pa,压制压力为 25 MPa,热压烧结温度分别为 720、760、800、840、880 °C,烧结保温保压时间为 6 min。

在 FeNiCo 预合金粉中添加 7.5%(体积分数)粒度为 425~355 μm 的金刚石颗粒,并混合均匀,然后采用与上述 FeNiCo 预合金粉烧结体相同的工艺分别烧结含金刚石颗粒的复合材料烧结体,研究预合金粉对金刚石的包镶性能。

1.4 烧结体的性能测试与结构表征

采用排水法测量 FeNiCo 预合金粉烧结体试样的密度,并根据测定的密度与烧结体的理论密度求出相对密度。采用 TH300 型洛氏硬度计测量不含金刚石烧结体试样的硬度,采用 CMT4304 万能材料试验机分别测试无金刚石与有金刚石烧结体的断裂载荷,并由此计算各自的三点抗弯强度,并通过日本 JSM-6360LV 型扫描电镜观察试样断口形貌及试样抛光腐蚀(采用 4%(体积分数)的硝酸酒精溶液腐蚀 10 s)后的显微组织。

分别测定并计算出 FeNiCo 预合金粉末烧结体与含 7.5%(体积分数)金刚石颗粒的烧结体试样的三点抗弯强度,预合金粉末烧结体对金刚石颗粒的包镶强度用抗弯强度损失率 η 表示,计算公式如下:

$$\eta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: σ_1 为不含金刚石 FeNiCo 预合金粉末烧结体的三点抗弯强度; σ_2 为含 7.5%金刚石颗粒的烧结体的三点抗弯强度。

采用 DHM-1 型砂轮磨耗比测定仪检测无金刚石试样的磨损质量损失 m ,在相同实验条件下,试样的 m 值越小,则其耐磨损能力越强,反之则越弱。标准砂轮的硬度为 3.2,线速度为 20 m/s,试样加压压力为 49 N,测试时间 60 s,每种测定 5 个试样并取平均值。磨损质量损失 m 的计算公式如下:

$$m = m_1 - m_2 \quad (2)$$

式中: m 为磨损质量损失; m_1 为试样在对磨前的质量; m_2 为试样与砂轮对磨后的质量。

1.5 预合金粉制作成金刚石绳锯的切割性能检测

以预合金粉为主要胎体成份,配以一定含量的成型剂 Cu 和助熔成份 Sn,制作金刚石绳锯并用于石材切割,检测绳锯的切割效率(单位 m^2/h)和使用寿命(单位 m^2/m),并与相同比例的高 Co 结合剂制作的金刚石绳锯切割性能进行对比,金刚石粒度都选用 270~325 μm 和 325~380 μm,体积分数为 11.5%,金刚石颗粒 TI 值要求大于 85%。胎体材料具体成分比例见表 2 所列。

绳锯串珠采用真空热压烧结法,选用各自最佳烧结工艺。绳锯固定方式为橡胶固定,硫化采用平板硫化机,硫化温度 280 °C,压力为 200 t。绳锯切割采用自制 55 kW 全自动矿山绳锯机,切割石材为 G562,切割线速度为 28 m/s,加水量为 100 L/min。

表 2 金刚石绳锯胎体成份组成

Table 2 Composition of matrix material of diamond wire saw

Component	Mass fraction/%	
	Sample A	Sample B
FeNiCo	75	—
Co	—	75
Cu	20	20
Sn	5	5

2 结果与讨论

2.1 FeNiCo 预合金粉的物相

图 1 所示为电解沉积法制备的 FeNiCo 预合金粉的 XRD 谱。由图 1 可知,该预合金粉不仅含有 Fe 的单质相,还产生了一定含量的 Fe_{19}Ni 、 Co_3Fe_7 、 Fe_7Ni_3

等固溶体相,说明 Ni、Co 进入了 Fe 的晶胞中,在烧结体内能起到固溶强化作用,能提高烧结体的强度。由图 1 可知,预合金粉末中不存在 Co、Ni 的单质相,其原因是 Co 元素含量相对较少,且已与主要成分 Fe 元素形成固溶体,所以在 XRD 谱上很难发现相关的衍射峰^[13]。Ni 与 Fe 也属于同族元素,原子半径尺寸相近,在电解沉积过程中, Ni 与 Fe 易产生原子交换,形成置换固溶体,因此,在图谱上得到的是 Ni-Fe 合金相^[14]。

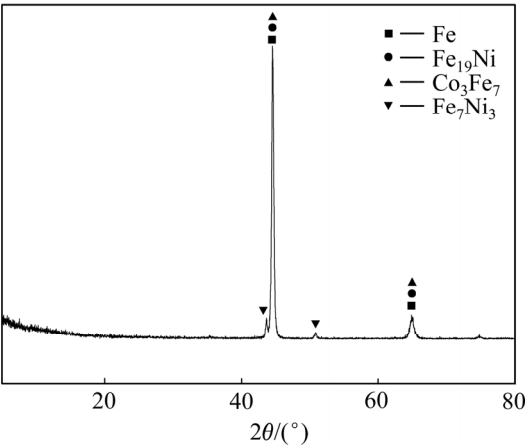


图 1 预合金粉的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of pre-alloyed powder

2.2 FeNiCo 预合金粉的特性

图 2 所示为 FeNiCo 预合金粉分别在 1000 倍数和 5000 倍数下的 SEM 像,表 3 所列预合金粉末物理性能检测结果。由图 2 和表 3 可知,多金属电解沉积法制备的 FeNiCo 预合金粉为类球状晶粒堆积的不规则的颗粒团聚体,团聚体形状不一,大多属块状、树枝状、蜂窝状等形状,这是与电解沉积法的生产工艺过程相关联的。粉末粒度较细,平均粒度为 14.59 μm,晶粒尺寸为 25.4 nm,比表面积为 0.45 m²/g。这种粉末成形性好,压坯强度高,并且粉末比表面积较大,故活性高,可降低烧结温度^[15]。

2.3 DTA 差热分析

图 3 所示为 FeNiCo 预合金粉的 DSC 曲线。由图 3 可知,预合金粉在 622.3 °C 时出现明显的吸热峰,吸热反应约终止于 1000 °C,该预合金粉相的转变主要发生在这两个温度区间内。从 Fe-Ni 相图可知,620 °C 时,发生 α-Fe(体心立方结构)向 γ-Fe(面心立方结构)转变,而 Ni 原子与 γ-Fe 能实现无限互溶,形成(γ-Fe, Ni)置换固溶体。从 Co-Fe 的合金相图可知,在 980 °C 时,存在 ε-Co 向高温相 α-Co 的转变过程,但由于预

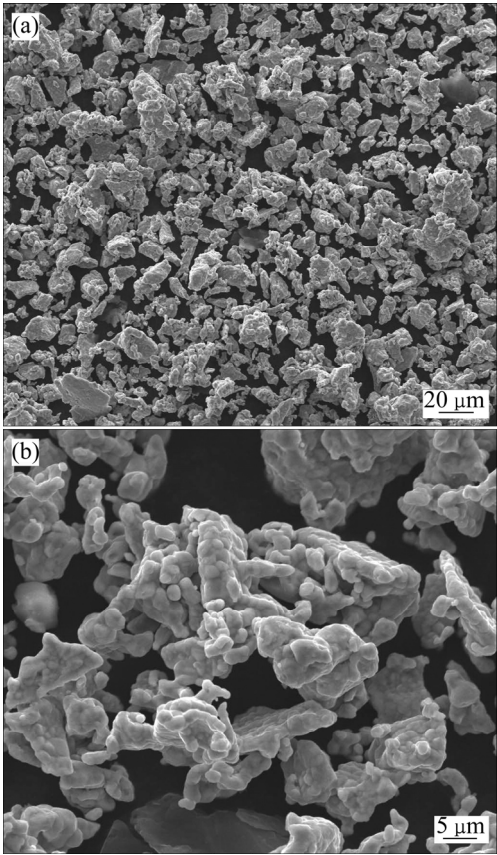


图 2 FeNiCo 预合金粉的 SEM 像

Fig. 2 SEM images of FeNiCo pre-alloyed powder

表 3 预合金粉末的物理性能

Table 3 Physical properties of pre-alloyed powder				
Tap density/ (g·mm ⁻³)	Average granularity/ μm	Grain size/ nm	Oxygen content/ %	Specific surface area/ (m ² ·g ⁻¹)
1.72	14.59	25.4	0.2	0.45

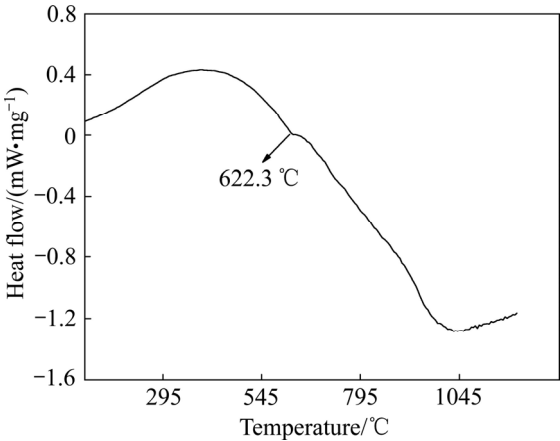


图 3 FeNiCo 预合金粉的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curve of FeNiCo pre-alloy powder

合金粉中 Co 元素含量很少,所以在 DSC 曲线中没有出现明显吸热峰。结合图 1 中的 XRD 分析结果,预合金粉中形成了金属间化合物,但是单质相也占有一定比例,单质相及合金组织的占比对预合金粉的烧结性能具有重要影响。

2.4 FeNiCo 烧结体的物理力学性能分析

表 4 所列为 FeNiCo 预合金粉分别在 720、760、800、840 和 880 °C 温度下真空热压烧结后的力学性能,包括硬度、相对密度、三点抗弯强度、强度损失率等。

表 4 不同温度下 FeNiCo 预合金粉烧结体的力学性能

Table 4 Mechanical properties of pre-alloyed powders sintered at different temperatures

Thermal press temperature/ °C	Hardness, HRB	Relative density/%	Bending strength/ MPa	Strength loss ratio/ %
720	99.8	94.2	1208.2	41.68
760	101.8	95.3	1376.8	41.88
800	107.6	95.7	1638.3	28.87
840	106.3	96.2	1558.0	18.26
880	104.3	95.7	1525.5	16.74

图 4 所示为预合金粉末不同烧结温度下的力学性能折线图。从表 4 和图 4 可以看出,烧结体的硬度和致密度随着烧结温度的提升总体上呈先升高后降低的趋势,在 800 °C 时,硬度达到最大值 107.6 HRB;在 840 °C 时,致密度达到最大值 96.2%,800 °C 与 840 °C 时烧结体的硬度和相对密度值相差不大。根据粉末冶金烧结理论,烧结过程是粉末颗粒黏结、烧结颈长大、闭孔隙球化与缩小的过程,整个过程可能存在的物质迁移方式包括黏性流动、晶格扩散、空位扩散等。烧结温度对物质迁移的速度影响最大,随着温度的提升,物质迁移的速度明显提高,烧结过程进行的更加充分,孔隙数量和孔隙尺寸逐渐减少,所以烧结体的硬度和致密度也逐渐增加。当孔隙球化与缩小过程达到一定阶段,由于烧结体内空气、杂质等因素影响,烧结体相对密度趋向于一个平衡状态而变化不大。而当进一步增加烧结温度,烧结体的硬度呈现逐步减小的趋势,这是由于致密化达到一定程度后,随着烧结温度的提高,烧结体内剩余孔隙相对于晶粒尺寸是很小的,易发生孔隙与晶界的脱离,晶界不受孔隙的阻碍而易发生晶粒尺寸的长大,从而导致试样硬度的降低。

三点抗弯强度呈现类似的变化趋势,随着温度的提升,抗弯强度先增加后降低。这也是和烧结体的致

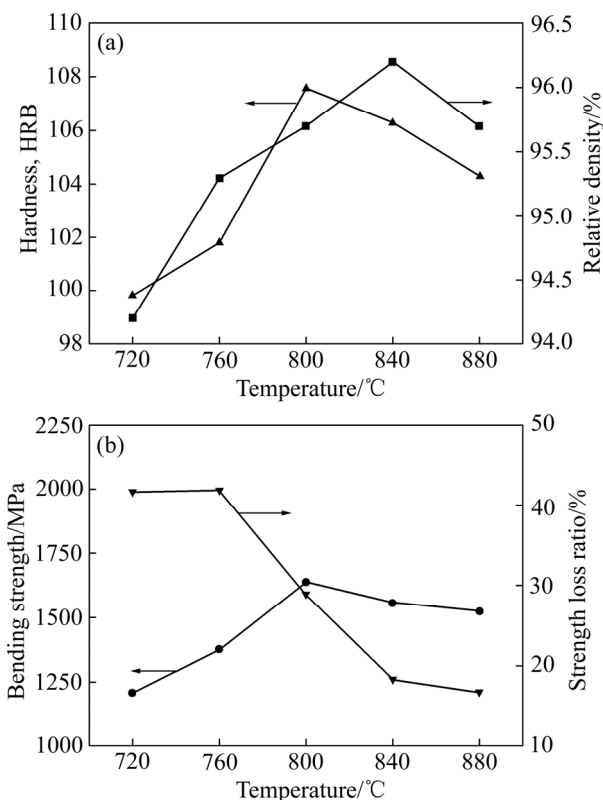


图 4 不同温度下烧结体试样力学性能折线图

Fig. 4 Mechanical property curves of different samples sintered at different temperatures

密化程度、晶界结合状态、晶粒尺寸等因素相关联的。低温时,烧结体致密化程度提升,抗弯强度逐渐增加。高温时,致密化达到平衡,但原子扩散速度加快,晶界结合能增加,抗弯强度提升;再进一步提升烧结温度,晶粒尺寸快速长大。根据 Hall-Petch 公式可知:

$$\sigma_y = \sigma_i + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: σ_y 为试样的强度; d 为晶粒的尺寸; σ_i 、 k 为常数。晶界结合能达到临界值后,烧结体试样的强度与晶粒尺寸呈反比关系,晶粒尺寸越大,试样强度越低。FeNiCo 预合金粉烧结体在 800 °C 时,致密化过程接近完成,晶界结合状态最佳,晶粒还未明显长大,因此试样强度最高,达到 1638.3 MPa,进一步提高烧结温度,晶粒尺寸长大,抗弯强度反而降低。

强度损失率 σ 的大小决定了预合金粉烧结体对金刚石颗粒的包镶强度, σ 值越小,烧结体对金刚石的包镶强度越高,反之则越低。由表 4 和图 4 可知,烧结温度在 760 °C 以内,强度损失率变化不大,为 41.68%~41.88%;烧结温度在 800 °C 时,强度损失率为 28.87%,这是由于烧结体致密化程度提升,且烧结体强度及硬度增加,对金刚石的机械包镶能力增强,因此,强度损失率有明显降低;当烧结温度达到 840 °C

以上时, 强度损失率进一步降低, 预合金粉烧结体对金刚石颗粒的包镶强度进一步提高, 这是由于温度较低时, FeNiCo 未与金刚石界面产生反应, 属于胎体收缩产生的机械包裹力。而随着温度的提升, FeNiCo 合金与金刚石界面产生化学反应, 属于冶金结合, 提高了包镶力^[16]。

2.5 摩擦磨损性能分析

表 5 所列为 FeNiCo 预合金粉在不同温度下真空热压烧结后的磨损质量损失数据。

表 5 不同温度下热压烧结 FeNiCo 合金磨损质量损失

Table 5 Wear mass loss of pre-alloyed powders sintered at different temperatures

Temperature/°C	Mass loss/g
720	1.130
760	0.765
800	0.555
840	0.498
880	0.489

由表 5 可知, 随着烧结温度的升高, 试样的磨损质量损失值呈降低趋势, 因此, 试样的耐磨损能力在逐步提高。当烧结温度低于 800 °C 时, 试样的磨损量较大, 这是由于在较低温度下, 烧结体致密化过程不充分, 未闭合孔隙数量较多, 烧结体试样抵抗标准砂轮的 SiC 磨粒的压入与“犁削”作用的能力较弱, 被“犁削”材料的质量更高, 耐磨损性能更低。当烧结温度在 800 °C 及以上时, 合金烧结体的磨损质量损失值 m 相差不大, 基本处于一个平衡值。这是由于 FeNiCo 预合金粉在 800 °C 以上烧结时, 烧结体致密化过程基本完成, 抵抗外部磨粒压入与“犁削”的能力得到增强, 耐磨损能力相对提高。由以上分析可知, 进一步提高烧结温度, 只是产生晶粒尺寸的长大, 对于抵抗 SiC 磨粒的压入与“犁削”作用影响不大, 所以 m 值变化不大。而且随着晶粒的长大, SiC 磨粒的“犁削”作用更多的发生在晶粒内部而非晶界边缘, 因此抵抗“犁削”的能力更强, 耐磨损能力反而有所增加。由此可知, 烧结体的硬度总体趋势上与耐磨损能力有相关性, 但并非硬度越高, 耐磨损能力就越强。

2.6 烧结体断口及微观形貌分析

图 5 和 6 所示分别为不同温度烧结的 FeNiCo 预合金粉烧结体试样断口 SEM 像及显微组织。从图 5 和 6 中可以看出, 不同热压温度下, 晶粒尺寸比较均

匀, 均无异常长大现象; 随着烧结温度升高, 晶粒尺寸逐渐增大; 试样断口形貌主要表现为沿晶断裂和韧窝断裂两种断裂特征。当烧结温度为 720 °C 和 760 °C 时, 如图 5(a)、图 5(b)、图 6(a)、图 6(b)所示, 两种试样的平均晶粒尺寸相差不大, 分别为 2.35 μm 和 2.49 μm , 由于烧结温度较低, 烧结试样致密度低, 存在较多微孔隙, 且物质迁移与扩散不充分, 晶粒间结合强度较低, 裂纹易在孔隙处沿晶界扩展, 所以主要表现为沿晶脆性断裂的特征; 随着烧结温度进一步提升, 物质迁移与扩散更加充分, 晶界结合强度得到提高, 烧结体组织内部孔隙与缺陷数量减少, 材料断裂时裂纹不易沿晶界界面扩展, 断裂过程中, 晶粒发生明显塑性变形, 当外加应力超过晶界结合强度时, 断裂面产生因晶粒变形而形成的韧窝, 图 5(c)、图 5(d)、图 5(e)为沿晶断裂和韧窝断裂的混合特征。另外, 当烧结温度为 800 °C 时, 如图 6(c)所示, 平均晶粒尺寸为 3.37 μm ; 当烧结温度为 840 °C 时, 如图 6(d)所示, 平均晶粒尺寸达到 6.74 μm , 晶粒尺寸显著增大; 当烧结温度达到 880 °C 时, 如图 5(e)、图 6(e)所示, 平均晶粒尺寸达到 13.88 μm , 晶粒明显长大, 孔隙数量减少, 但孔隙尺寸明显增加, 根据粉末冶金原理, 烧结颈长大、孔隙闭合到一定程度后, 进一步增加烧结温度, 晶界发生位移, 晶粒长大, 通过空位扩散机能, 大于一定临界尺寸的孔隙长大并合并, 烧结温度越高, 上述过程进行得越快; 由于晶粒的长大, 单位面积韧窝数量减少, 弯曲断裂强度反而降低, 这与力学性能数据相吻合。

2.7 烧结体与金刚石的界面形貌分析

图 7 所示为不同温度下热压烧结的含 7.5% 金刚石颗粒的 FeNiCo 预合金粉烧结体断口的 SEM 像。由图 7(a)和(b)可知, 800 °C 以下烧结时, FeNiCo 胎体与金刚石颗粒之间存在一定间隙, 且金刚石颗粒表面光滑, 因此, FeNiCo 胎体在低温时与金刚石颗粒不发生反应, 胎体对金刚石的包覆完全依靠热胀冷缩效应产生的机械作用力, 因此, 胎体对金刚石的包镶强度较低, 含金刚石烧结体的抗弯强度损失率较大, 这与表 4 所得数据相符。当烧结温度超过 840 °C 以后, 如图 7(c)所示, FeNiCo 胎体与金刚石颗粒界面结合紧密无缝隙, 且试样断裂后, 仍然有一部分胎体材料与金刚石颗粒露出部分的界面黏合, 这是由于 FeNiCo 胎体在较高温度下, Fe 元素能与金刚石表面发生化学反应, 形成 Fe_3C 等化合物, 且实验所用 FeNiCo 预合金粉末与制造人造金刚石颗粒所用 FeNi 或 FeNiCo 粉末触媒的各元素含量比例接近, 能促进胎体对金刚石颗粒的

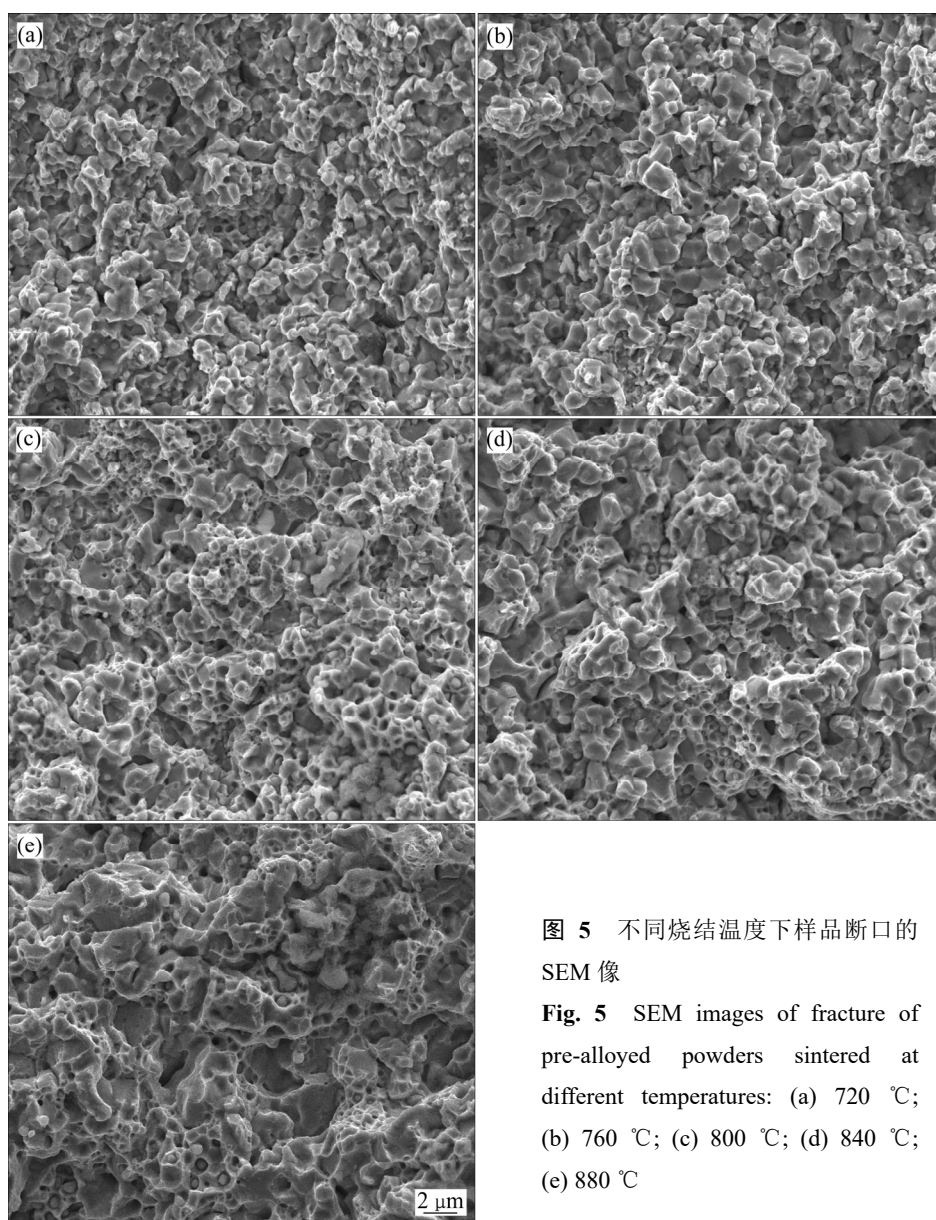


图 5 不同烧结温度下样品断口的 SEM 像

Fig. 5 SEM images of fracture of pre-alloyed powders sintered at different temperatures: (a) 720 °C; (b) 760 °C; (c) 800 °C; (d) 840 °C; (e) 880 °C

“刻蚀”过程，因而，高温烧结时，胎体与金刚石颗粒形成了一定的冶金结合，含金刚石颗粒的烧结体试样抗弯强度提升，抗弯强度损失率降低，这也与表 3 所得数据相符。

2.8 预合金粉制作金刚石绳锯的切割性能

图 8 所示为以 FeNiCo 预合金粉和单质 Co 粉为骨架成分制作的金刚石绳锯切割石材的锯切性能曲线图，图 8(a)所示为两种胎体成分金刚石绳锯每切割 36 m² 后的切割效率对比图，共切割 360 m²；图 8(b) 所示为工具理论寿命计算结果对比图。根据 FeNiCo 预合金粉的烧结特性，FeNiCo 基胎体烧结温度设定为 840 °C，烧结时间 5 min；Co 基胎体烧结温度为 870 °C，烧结时间 5 min。由图 8(a)可知，FeNiCo 基胎体和常

用的 Co 基胎体制作的金刚石绳锯在切割到 108 m² 以前，锯切效率逐步上升，之后锯切效率趋于平稳，这是由于新开刃的绳锯串珠表面金刚石磨粒未达到最佳出刃高度，切削刃数量也未形成最佳“匹配”，切割一定面积之后，胎体磨损量快于金刚石磨损量，出刃高度过高的金刚石磨粒提前脱落，形成脱落坑，串珠表面有效参与切削的金刚石数量基本维持在一定范围内，切割效率逐步保持稳定^[17]。从图 8(a)同时可知，两种胎体制作的金刚石绳锯锯切效率基本接近，但 Co 基胎体绳锯锯切效率稍高于 FeNiCo 基胎体绳锯，锯切至 360 m² 后，Co 基胎体绳锯锯切效率平均值达到 8.9 m²/h，而 FeNiCo 基胎体绳锯平均锯切效率为 8.6 m²/h，两者相差 3.37%。由图 8(b)可知，FeNiCo 基胎体和 Co 基胎体金刚石绳锯每切割 36 m² 所计算的理论

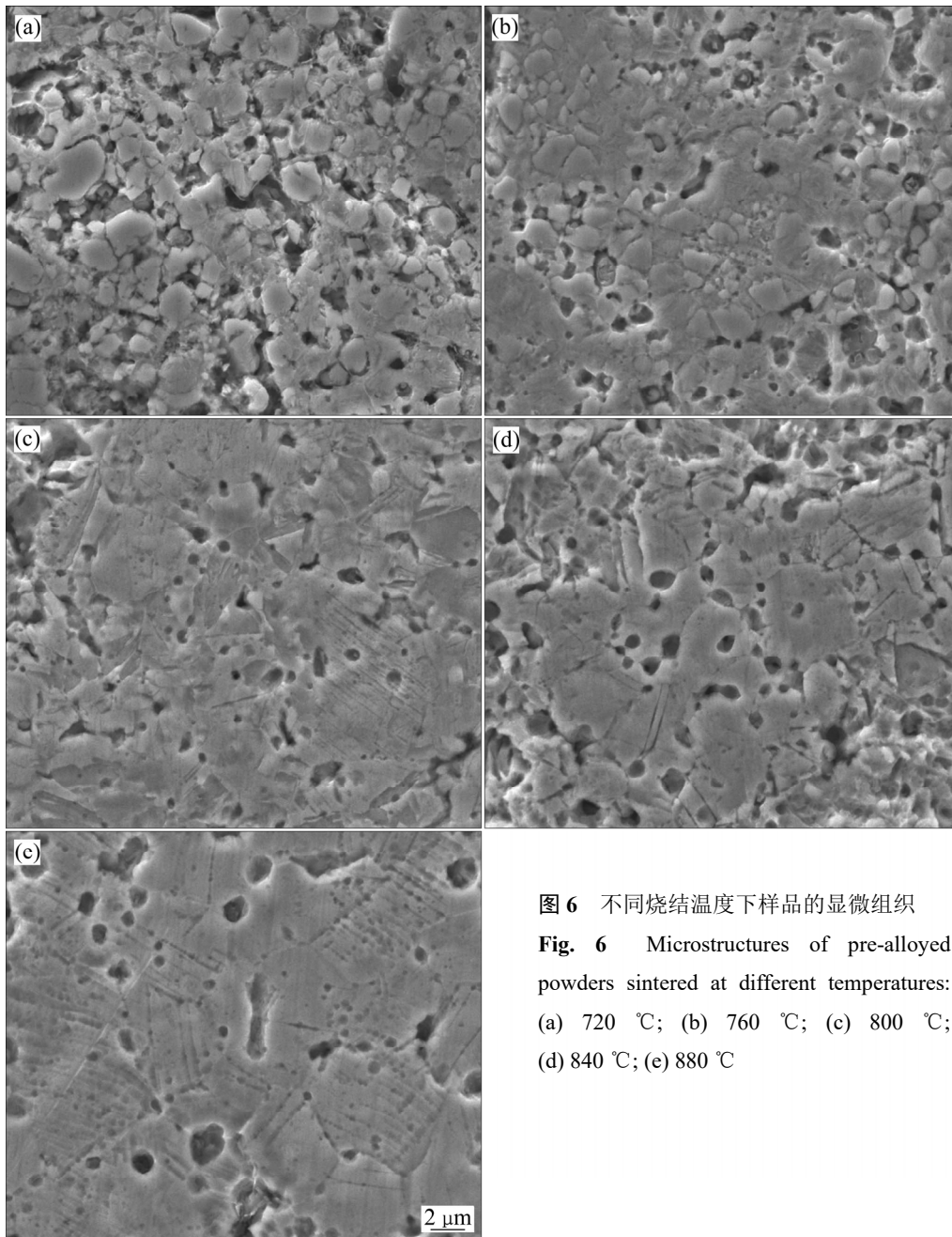


图 6 不同烧结温度下样品的显微组织

Fig. 6 Microstructures of pre-alloyed powders sintered at different temperatures: (a) 720 °C; (b) 760 °C; (c) 800 °C; (d) 840 °C; (e) 880 °C

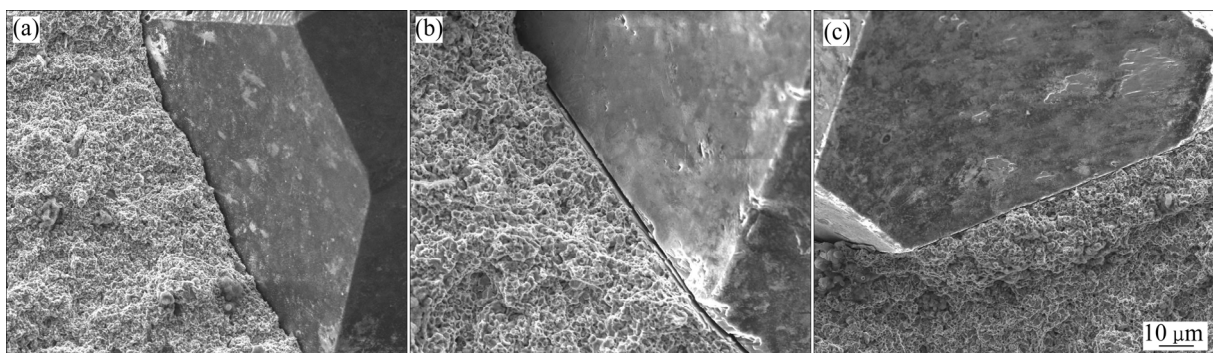


图 7 不同烧结温度下含金刚石试样的 SEM 像

Fig. 7 SEM images of diamond contained samples sintered at different temperatures: (a) 720 °C; (b) 800 °C; (c) 880 °C

寿命呈总体下降趋势,切割 108 m^2 之前下降趋势较明显,这是与绳锯锯切效率相对应的,锯切效率越高,单颗金刚石切削岩石的厚度越大,胎体磨损量越大,工具寿命越低,之后至切削完 360 m^2 ,工具理论寿命下降幅度减缓。FeNiCo 基胎体金刚石绳锯理论寿命平均值为 $11.3 \text{ m}^2/\text{m}$,而 Co 基胎体金刚石绳锯理论寿命平均值为 $10.8 \text{ m}^2/\text{m}$,寿命相对增加 4.63%。由此可知,以 FeNiCo 预合金粉为骨架成分制作的金刚石绳锯相

对于传统的 Co 基结合剂绳锯用于石材切割时,锯切效率有所降低,但差距很小,而工具寿命反而有所提升,考虑到 FeNiCo 预合金粉中 Co 成分含量只有 2%,因此,工具原材料成本大大减少,产品性价比优势更加明显。

图 9 所示为锯切 180 m^2 后不同胎体成分金刚石绳锯串珠工作面形貌,其中图 9(a)所示为 FeNiCo 基胎体绳锯工作面形貌,图 9(b)所示为图 9(a)圆环区域放大

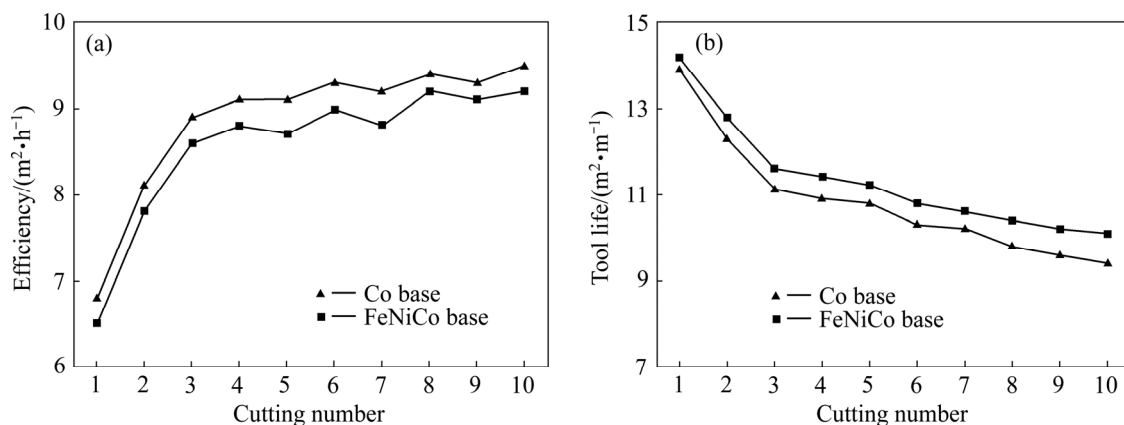


图 8 FeNiCo 基与 Co 基金刚石绳锯的锯切性能对比

Fig. 8 Comparison of cutting properties of FeNiCo base and Co base diamond wire saw: (a) Efficiency; (b) Tool life

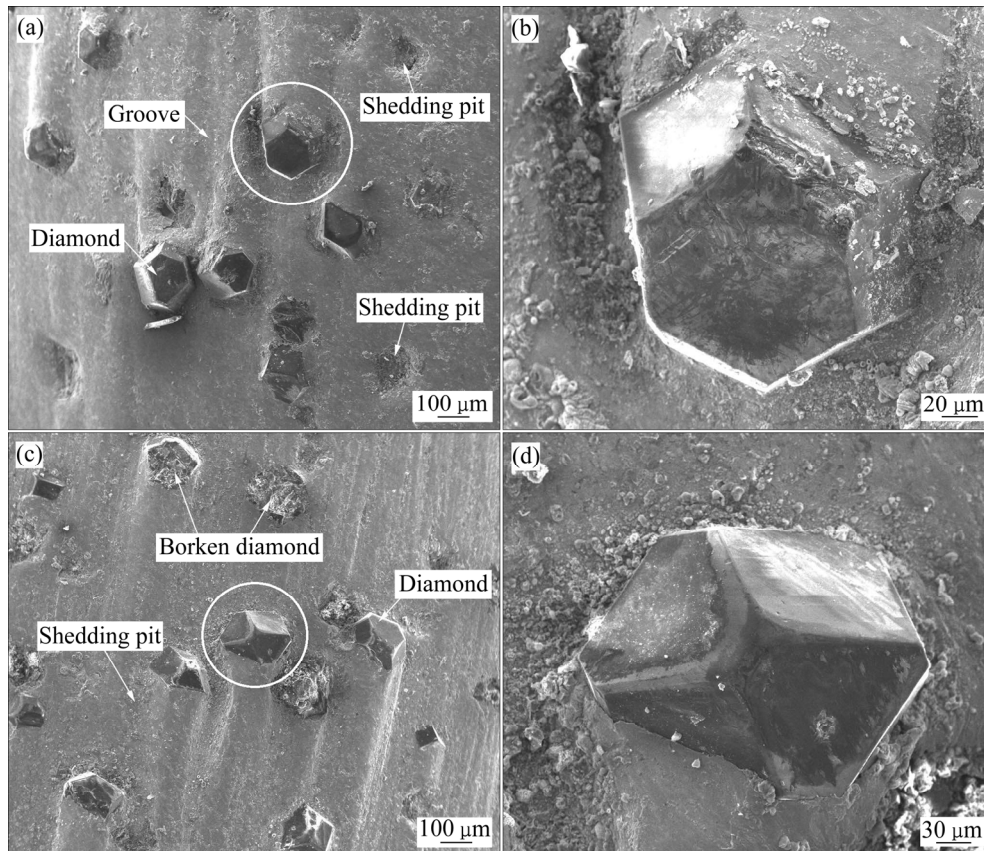


图 9 不同组成成分金刚石绳锯工作面的形貌

Fig. 9 Surface morphologies of different matrix with different components: (a) FeNiCo base; (b) Enlarged rounded boxes area in Fig. (a); (c) Co base; (d) Enlarged rounded boxes area in Fig. (c)

后的照片;图9(c)所示为Co基胎体绳锯工作面形貌,图9(d)所示为图9(c)圆环区域放大后的照片。结合图9(a)和(b)可以看出,FeNiCo基胎体中,金刚石磨粒沿切削方向,其两侧出现了“犁沟”式的沟槽,金刚石磨粒的后端“蝌蚪状”支撑较为明显,胎体对金刚石磨粒的包镶很完整无明显缝隙,胎体表面有一定数量脱落坑,但脱落坑尺寸明显小于金刚石粒径,说明其属于前期金刚石正常代谢并经岩屑磨损后形成的形貌。另外,绳锯串珠表面金刚石完整无破碎,说明胎体磨损与金刚石磨损十分匹配。FeNiCo基胎体中FeNiCo是骨架相,对胎体性能影响最为显著,根据FeNiCo预合金粉烧结体的相关特性可知,FeNiCo预合金粉在840℃烧结时,烧结致密度较高,硬度适中,磨损质量损失为0.498 g,在金刚石工具中属于中等偏高的耐磨损性能^[18],且胎体与金刚石能产生冶金结合,对金刚石磨粒具有较好的包镶强度,因此,FeNiCo基胎体绳锯不但具有较好的锯切效率,而且由于金刚石磨粒得到充分利用,其工具寿命也较高。而从图9(c)和(d)可以看出,Co基胎体中,金刚石包镶同样完整无缝隙,“蝌蚪状”支撑也较为明显,金刚石出刃高度较高,但绳锯串珠表面有一定数量破碎金刚石存在,这是由于Co基胎体锯切硬质石材时,其胎体磨损相对较快,超过了金刚石刻取岩石产生的损耗,导致金刚石出刃过高而未脱落,金刚石颗粒受到的冲击力矩超过了其自身的断裂强度而产生破碎,金刚石磨粒利用率降低,工具寿命因而降低。

3 结论

1) 采用多金属电解沉积法制备的FeNiCo预合金粉一定程度上实现了合金化,XRD表明预合金粉形成了 Fe_{19}Ni 、 Co_3Fe_7 、 Fe_7Ni_3 等中间相。SEM结果表明FeNiCo预合金粉为的不规则状颗粒团聚体,粉末粒度较细,平均粒度为14.59 μm ,粉末比表面积为0.45 m^2/g ,成形性好,烧结温度较低。

2) DTA差热分析表明,预合金粉在622.3℃时存在明显吸热峰,发生 $\alpha\text{-Fe}$ 向 $\gamma\text{-Fe}$ 的转变,并与Ni原子实现无限互溶,形成($\gamma\text{-Fe}$,Ni)置换固溶体。

3) FeNiCo预合金粉在800~840℃烧结时,具有较好的物理和力学性能,烧结体硬度最大值为107.6 HRB,三点抗弯强度最大值为1638.3 MPa,致密度最大值为96.2%,磨损质量损失为0.498~0.555 g,烧结温度区间较大。

4) 烧结体结果表明:720~760℃时,烧结体断口以沿晶断裂为主;800~880℃时,为沿晶断裂和韧窝断裂的混合断裂特征;800℃以下烧结时,FeNiCo合金胎体与金刚石颗粒之间存在一定间隙,且金刚石颗粒表面光滑;840℃以上烧结时,FeNiCo合金中Fe元素易与金刚石表面发生化学反应,提高了对金刚石的包镶强度。

5) FeNiCo预合金粉为骨架相制作的金刚石绳锯用于切割硬质石材,与传统Co基结合剂金刚石绳锯相对比,切割效率只下降3.37%,而工具寿命提升4.63%,且原材料成本大大降低,具有更好的综合性能。

REFERENCES

- [1] 邹庆化,汤凤林,杨凯华,段隆卧,胡国荣,孙立鹏.热压金刚石工具材料及其致密化[J].中国有色金属学报,2001,11(2):119-125.
ZOU Qing-hua, TANG Feng-lin, YANG Kai-hua, DUAN Long-chen, HU Guo-rong, SUN Li-peng. Hot pressed sintered matrix composites for diamond tools and its densification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 119-125.
- [2] 谢志刚,刘心宇,秦海青,王进保,蒋剑锋.金刚石制品用FeCoCu胎体的烧结与力学性能研究[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(6):2178-2182.
XIE Zhi-gang, LIU Xin-yu, QIN Hai-qing, WANG Jin-bao, JIANG Jian-feng. Sintering and mechanical properties of FeCoCu fetal body applied for diamond tools[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(6): 2178-2182.
- [3] 谢志刚,贺跃辉,王智慧,向波,黄艳华.金刚石制品金属胎体的研究现状[J].金刚石与磨料磨具工程,2006,26(3):71-75.
XIE Zhi-gang, HE Yue-hui, WANG Zhi-hui, XIANG Bo, HUANG Yan-hua. Research progress of metal bond of diamond tools[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2006(3): 71-75.
- [4] 王飞,张进生,王志.金刚石串珠绳锯锯切技术研究现状与发展[J].金刚石与磨料磨具工程,2013,33(1):36-41.
WANG Fei, ZHANG Jin-sheng, WANG Zhi. Current situation and development of diamond wire saw cutting technology[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2013, 33(1): 36-41.

- [5] 黄国钦, 徐西鹏. 金刚石串珠绳锯技术的研究[J]. 工具技术, 2005, 39(8): 7-10.
HUANG Guo-qin, XU Xi-peng. Technology of sawing with diamond wire[J]. Tool Engineering, 2005, 39(8): 7-10.
- [6] 黄 辉, 黄国钦, 郭 桦, 徐西鹏. 锯切花岗石过程中金刚石串珠的磨损特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 112-117.
HUANG Hui, HUANG Guo-qin, GUO Hua, XU Xi-peng. Wear characteristics of diamond beads in wire sawing granite[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 112-117.
- [7] 翁霏霏, 黄国钦, 黄 辉, 徐西鹏. 烧结金刚石串珠绳锯锯切花岗石的锯切力研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007, 157(1): 22-24.
WENG Fei-fei, HUANG Guo-qin, HUANG Hui, XU Xi-peng. Study on sawing forces of sintered diamond wire saw in granite cutting[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2007, 157(1): 22-24.
- [8] 戴秋莲, 徐西鹏, 王永初. 金属结合剂对金刚石把持力的增强措施及增强机制评述[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(3): 465-468.
DAI Qiu-lian, XU Xi-peng, WANG Yong-chu. Measures used to improve bonding of diamond to matrix and bonding mechanisms[J]. Materials Science & Engineering, 2002, 20(3): 465-468.
- [9] 郭 桦, 苏 钰, 陈剑章, 张延军, 陈 锋, 徐西鹏. Co基金刚石串珠胎体中 W 添加剂的作用[J]. 中国机械工程学报, 2007, 5(1): 108-112.
GUO Hua, SU Yu, CHEN Jian-zhang, ZHANG Yan-jun, CHEN Feng, XU Xi-peng. Effect of W in Co-based matrix of diamond beads[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007, 5(1): 108-112.
- [10] XIE De-long, WAN Long, SONG Dong-dong, QIN Hai-qing, PAN Xiao-yi, LIN Feng, FANG Xiao-hu. Low-temperature sintering of FeCuCo based pre-alloyed powder for diamond bits[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2016: 805-809.
- [11] 谢德龙, 万 隆, 刘志环, 方啸虎, 吕 智, 林 峰, 潘晓毅. 共沉淀法制备 Fe-Cu 基预合金粉的低温热压烧结[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(1): 93-97.
XIE De-long, WAN Long, LIU Zhi-huan, FANG Xiao-hu, LÜ Zhi, LIN Feng, PAN Xiao-yi. Low-temperature hot press sintering of Fe-Cu based pre-alloyed powder manufactured by co-precipitation method[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2015, 20(1): 93-97.
- [12] 谢志刚, 秦海青, 刘心宇, 王进保, 蒋剑锋. 金刚石制品用 FeCoCu 预合金粉末的制备及应用研究[J]. 材料工程, 2011(3): 1-5.
XIE Zhi-gang, QIN Hai-qing, LIU Xin-yu, WANG Jin-bao, JIANG Jian-feng. Study on the preparation of the prealloyed powder and its application for diamond tools[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(3): 1-5.
- [13] PALUMBO M, CURIOTTO S, BATTEZZATI L A. Thermodynamic analysis of the stable and metastable Co-Cu and Co-Cu-Fe phase diagrams[J]. Calphad, 2006, 30: 171-178.
- [14] 李 超. 金属学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 66-67.
LI Chao. Principles of metallography[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1989: 66-67.
- [15] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 288-289.
HUANG Pei-yun. Powder metallurgy principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 288-289.
- [16] 汤东华, 洪跃生. 钴基结合剂对金刚石把持力的研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1994, 15(3): 353-357.
TANG Dong-hua, HONG Yue-sheng. A study on the retention of cobalt base bonding agent to diamond[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 1994, 15(3): 353-357.
- [17] 张绍和, 刘志环, 肖尊群. 金刚石锯片锋利性试验研究[J]. 粉末冶金技术, 2006, 24(2): 110-113.
ZHANG Shao-he, LIU Zhi-huan, XIAO Zun-qun. Experimental study on sharpness of diamond sawblades[J]. Powder Metallurgy Technology, 2006, 24(2): 110-113.
- [18] 谢德龙, 万 隆, 宋冬冬, 等. 金刚石工具用 FeCoCu 预合金粉组成对烧结特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 577-583.
XIE De-long, WAN Long, SONG Dong-dong, et al. Effect of composition of FeCoCu pre-alloyed powders on sintering characters used for diamond tools[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3): 577-583.

Sintering properties of FeNiCo pre-alloyed powder and its application in diamond wire saw

LIU Zhi-huan^{1,2}, ZHANG Shao-he^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The FeNiCo pre-alloyed powder was prepared by polymetallic electrolytic method. The phase composition and morphology of pre-alloyed powder and sintered body were characterized by XRD and SEM. The mechanical properties and wear loss of metal body sintered at different temperatures were tested, and the application of FeNiCo pre-alloyed powder in the diamond wire was researched. The results show that alloying is realized in the FeNiCo pre-alloyed powder to some extent, and the size of the powder is finer with irregular shape. When sintered at 800 °C to 840 °C, the largest hardness of the metal body is 107.6 HRB, the largest bend strength is 1638.3 MPa, the largest relative density is 96.2%, and the wear mass loss is 0.498–0.555 g, thus with a good adaptability of sintering temperature. Using FeNiCo pre-alloyed powder as the main component of the matrix to produce diamond wire saw, it has a good comprehensive performance when cutting hard stone, the cutting efficiency is 8.6 m²/h and the tool life is 11.3 m²/m.

Key words: FeNiCo pre-alloyed powder; diamond wire saw; microstructure; mechanical property

Foundation item: Project(41872186) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2018-06-22; **Accepted date:** 2018-11-20

Corresponding author: ZHANG Shao-he; Tel: +86-18008415363; E-mail: zhangshaohe@163.com

(编辑 李艳红)