



再生 WC-Co 复合粉及高耐磨性 硬质合金涂层的制备

刘雪梅, 王海滨, 宋晓艳, 范金莲

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 以 WC-6Co 废旧硬质合金块体和 Co_3O_4 粉末为原料, 采用氧化-还原碳化法制备再生 WC-12Co 复合粉, 将复合粉经过造粒和热处理制备再生热喷涂喂料, 进而采用超音速火焰喷涂(HVOF)制备再生 WC-Co 硬质合金涂层, 比较再生硬质合金涂层和商业购买热喷涂喂料制备涂层的显微组织、耐磨性及其机制。结果表明: 当配碳量为 16.70%(质量分数)时, 再生复合粉的碳含量适中; 制备的再生热喷涂喂料由 WC 和 Co 相组成, 热喷涂喂料球形度好, 粒径分布均匀, 平均粒径为 23 μm ; 再生 WC-12Co 硬质合金涂层的结构致密, WC 晶粒尺寸分布均匀。与商业化热喷涂粉制备涂层显微组织和性能相比, 再生涂层的磨粒磨损性能明显优于商业喷涂粉制备涂层的, 其根本原因是两者的磨损机制不同。

关键词: 再生 WC-Co 复合粉; 硬质合金涂层; 磨损性能; 配碳量; 热喷涂粉末

中图分类号: TF124

文献标志码: A

Preparation of recycled WC-Co composite powder and high wear resistance cemented carbide coating

LIU Xue-mei, WANG Hai-bin, SONG Xiao-yan, FAN Jin-lian

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Using the cemented carbides WC-6Co scraps and Co_3O_4 powder as the raw materials, the recycled WC-12Co composite powder was prepared by a short-term recycling technique which contains the oxidation and reduction-carbonization procedures. The thermal spray feedstock powder was fabricated by the process consisting of spray drying and heat-treatment. The recycled WC-Co cemented carbide coating was fabricated by high velocity oxy fuel (HVOF) method. Moreover, the microstructure, wear resistance and its mechanism of the coating prepared by the recycled composite powder and the commercial feedstock powder were compared. The results show that when the carbon addition is 16.7% (mass fraction), the recycled WC-Co composite has the appropriate carbon content. The fabricated feedstock only contains WC and Co phases, with homogeneously distribution of spherical particles and average particle size of 23 μm . The recycled WC-12Co coating has a high density and a homogeneous WC grain distribution. Compared the microstructure and properties of the coating fabricated by commercial feedstock powder, the recycled coating has better wear resistance, which is caused by different wear mechanisms.

Key words: recycled WC-Co composite powder; cemented carbide coating; wear resistance; carbon addition; thermal spray feedstock

废旧硬质合金因含有大量的极为重要的战略元素钨和稀有金属钴已成为宝贵的二次资源, 其回收再利用与开采新矿石相比可减少约 75% 的能耗和 40% 二氧

化碳污染^[1], 尤其是可有效降低矿产开采造成自然生态环境的破坏^[2]。因此, 废旧硬质合金的回收再利用对促进钨产业的可持续健康发展具有非常重要的经济

基金项目: 国家高新技术研究发展计划主题项目(SQ2013AAJY3168); 国家自然科学基金资助项目(51174009); 北京市自然科学基金重点资助项目(2131001)

收稿日期: 2015-03-31; **修订日期:** 2015-09-28

通信作者: 宋晓艳, 教授, 博士; 电话: 010-67392311; E-mail: xysong@bjut.edu.cn

和社会意义。目前,硬质合金的回收再生受到相关企业的极大关注,已有多种再生工艺应用于硬质合金的回收,如锌熔法^[3]、机械破碎法^[4]、电化学法^[5]、高温处理法^[6]和氧化-还原碳化法^[7]等。其中,氧化-还原碳化法是将废旧 WC-Co 硬质合金在空气中加热氧化得到钨钴氧化物粉,与炭黑混合后,经原位还原碳化反应合成再生 WC-Co 复合粉的硬质合金再生技术。本文作者课题组采用氧化和还原碳化技术制备出钴含量与废旧硬质合金原料一致的再生 WC-Co 复合粉末,并通过烧结致密化获得高性能的再生硬质合金块体材料^[8]。因此,氧化-还原碳化技术可制备出适合高性能硬质合金块体制备的高品质再生 WC-Co 粉末。

热喷涂 WC-Co 类硬质合金涂层因其较高的硬度、良好的韧性以及优良的耐磨/耐蚀性而广泛应用于航空航天、钢铁冶金、汽车零件等工业领域^[9]。目前,关于原生喷涂粉的制备及喷涂工艺已进行了大量的研究^[10-13],并取得重要的研究进展,研究表明,原料粉末的碳含量、喷涂粉末的球形度及流动性、喷涂工艺等对涂层的性能有重要的影响。然而,目前针对再生喷涂粉及涂层制备方面的研究鲜见报道。因此,在现有涂层制备理论和经验的指导下,制备高耐磨性再生 WC-Co 类硬质合金涂层,将进一步拓展再生硬质合金复合粉的应用范围,具有非常广阔的应用前景。

本文作者以废旧 WC-6Co 硬质合金块体为原料进行氧化制备钨钴氧化物粉末,根据热喷涂 WC-Co 硬质合金涂层的钴含量和碳含量的要求,在钨钴氧化物粉末中加入适量钴的氧化物和炭黑,采用还原碳化方法制备再生 WC-12Co 复合粉,进而制备热喷涂喂料,采用目前喷涂 WC-Co 类硬质合金涂层最常用的工艺方法超音速火焰喷涂^[14-15]制备再生硬质合金涂层。并在此基础上,进行涂层磨损性能的测试和及其磨损机制的分析。

1 实验

以 WC-6Co 硬质合金为原料,在空气中加热至 900 ℃氧化 8 h 制备钨钴氧化物粉末;对氧化得到的钨钴氧化物粉末的元素含量进行测定,根据涂层粉末钴含量和碳含量的要求计算出 Co_3O_4 和炭黑的需求量,按照配比混合后,在 1000 ℃、3 h 的条件下进行原位还原碳化反应,制备出再生 WC-12Co 复合粉;在再生复合粉中加入聚乙烯醇(PVA)、聚乙二醇(PEG)和离子水,经充分搅拌制成料浆,采用高速离心喷雾干燥机进行喷雾造粒,进而对喷雾干燥粉末在氩气保护下进行 1200 ℃、1 h 的热处理,得到再生 WC-12Co

热喷涂粉末。随后,利用 JP-5000 超音速火焰喷涂设备在的 40Cr 钢基体表面制备再生 WC-12Co 涂层,具体的喷涂工艺参数为:煤油流量 22.0 L/h,氧气流量 940 L/min,喷涂距离 380 mm。作为对比实验,以商业购买的喷涂粉在相同基体和喷涂工艺条件下制备 WC-12Co 涂层。

采用 X 射线衍射仪(XRD)对氧化粉末和再生 WC-Co 复合粉、热喷涂喂料和硬质合金涂层进行物相分析;通过扫描电镜(SEM)观察粉末和涂层的显微组织;根据 GB/T 5124.1 和 GB/T 5124.2 采用燃烧-气体容量法和溶解法分别测定粉末中总碳量和游离碳量,根据相关国家标准进行 W、Co 和 O 等元素含量的测定;采用线性截距法测定试样的晶粒尺寸;在 MLG-130 型干砂橡胶轮式磨损试验机进行涂层磨损性能的评价,满足 JBT_7705-1995(松散磨粒磨料磨损试验方法-橡胶轮法)标准的要求,磨粒磨损试样尺寸为 56 mm×25 mm×5 mm,磨料为 106 μm 刚玉,橡胶轮转速为 200 r/min,加载载荷为 45 N。

2 结果与分析

2.1 废旧 WC-6Co 合金的氧化

图 1 所示为废旧 WC-6Co 合金在空气中进行 900 ℃、8 h 氧化制备的氧化物粉末的 XRD 谱。由图 1 可以看出,氧化物粉末仅由 WO_3 和 CoWO_4 两相组成。表 1 所列为氧化物粉末中 W 和 Co 元素含量的实验测定结果及相组成的计算结果。根据 Co 元素含量可计

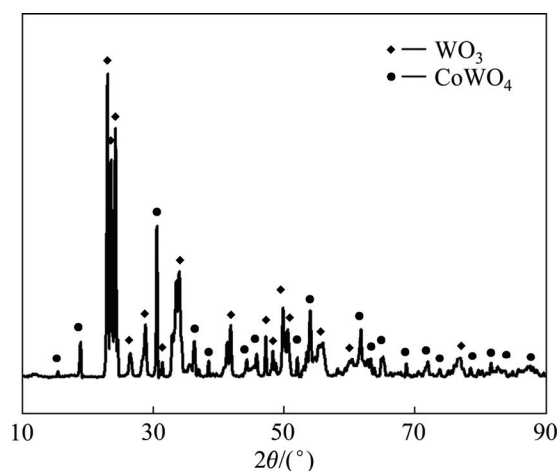


图 1 废旧 WC-6Co 合金在空气中进行 900 ℃、8 h 氧化制备的氧化物粉末的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of oxide powder obtained by oxidation of WC-6Co cemented carbides scraps heated at 900 ℃ for 8 h in

air

表 1 氧化物粉末中 W、Co 元素含量的测定结果及相组成的计算结果

Table 1 Detected element contents of W and Co and calculated phase contents for oxidation powder (mass fraction, %)

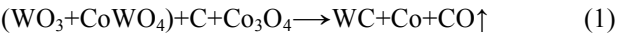
W ¹⁾	Co ¹⁾	WO ₃ ²⁾	CoWO ₄ ²⁾
74.45	5.08	73.64	26.36

1) Experimental results; 2) Calculated results.

算得到氧化物粉末中 CoWO₄ 的含量为 26.36%(质量分数), 其余为 WO₃(含量为 73.64%(质量分数)). 相含量的确定为后期配碳量的计算奠定了基础。

2.2 再生 WC-12Co 复合粉的制备

将制备的钨钴氧化物粉末(WO₃+CoWO₄)、炭黑(C)和四氧化三钴(Co₃O₄)粉末进行原位还原碳化, 发生如下反应:



根据再生 WC-12Co 粉中 Co 含量的要求, 计算出原料中需要添加 Co₃O₄ 粉与钨钴氧化物粉末的质量比为 7.46:100。并在此基础上, 根据上述反应过程确定原料粉中所需的理论配碳量, 即理论配碳量是原料总质量的 16.85%。由于配碳量对再生 WC-Co 复合粉的相组成和化学成分具有重要的影响, 在理论计算结果的指导下, 本文作者对 4 种配碳量(16.50%、16.70%、16.90%、17.00%(质量分数))条件下制备的再生粉末的相组成和化学成分进行研究, 其 XRD 谱和化学成分测定结果分别如图 2 和表 2 所示。由图 2 可知, 在实验的范围内, 制备的再生复合粉中除了 WC、Co 相外, 还可能出现缺碳相(Co₆W₆C)。随着配碳量的增加, 缺碳相含量明显减少; 当配碳量增加为 16.90%和 17.00%时, 复合粉中缺碳相消失, 即制备出了只有 WC 和 Co 相的再生 WC-Co 复合粉末。

表 2 所列为再生复合粉末中不同元素含量的测定结果。由表 2 可以看出, 再生复合粉末中的 Co 含量均在 11.90%~12.10%之间, 其 O 含量均小于 0.30%, 符合原生 WC-12Co 粉中 Co 含量和 O 含量的要求; 总碳量和游离碳含量随着配碳量的增加呈增加的趋势。

综合分析复合粉的 XRD 谱以及总碳量和游离碳含量可知, 当配碳量为 16.50%时, 复合粉的总碳量只有 4.80%, 低于 WC-12Co 粉含碳量的要求, 且含有大量的缺碳相, 不利于后期制备出相纯净的 WC-Co 热喷涂喂料; 当配碳量为 16.90%和 17.00%时, 复合粉

中只含有 WC 和 Co 相, 其总碳量和游离碳含量高, 以此制备的热喷涂喂料碳含量偏高, 不利于高性能 WC-Co 涂层的制备; 当配碳量为 16.70%时, 复合粉中的总碳量适中, 虽然含有少量的缺碳相, 但也含有少量的游离碳, 缺碳相和游离碳在后期热喷涂喂料的制备过程中可继续反应, 生成 WC 和 Co 相, 有利于相纯净、流动性好的 WC-Co 热喷涂喂料和高性能涂层的制备^[17]。因此, 本文作者采用配碳量 16.70%时制备的再生 WC-12Co 复合粉为制备再生热喷涂喂料和硬质合金涂层的原料。

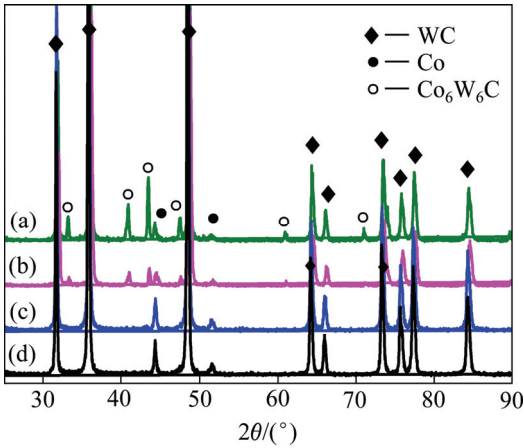


图 2 不同配碳量下制备再生 WC-12Co 复合粉的 XRD 谱
Fig. 2 XRD patterns of recycled WC-12Co composite powders prepared with different carbon additions: (a) 16.50%; (b) 16.70%; (c) 16.90%; (d) 17.10%

表 2 再生 WC-12Co 复合粉中的元素含量

Table 2 Element contents of regenerated WC-12Co composite powders

Sample No.	Mass fraction/%					
	C	W	Co	C _t ¹⁾	C _f ¹⁾	O
1	16.50	83.09	11.90	4.80	0.06	0.20
2	16.70	82.88	12.10	5.09	0.05	0.21
3	16.90	82.38	12.00	5.62	0.12	0.27
4	17.00	82.03	12.10	5.70	0.11	0.28

1) C_t is total carbon content; C_f is free carbon content.

图 3 所示为配碳量为 16.70%时制备的再生 WC-12Co 复合粉的 SEM 像及其颗粒尺寸分布图。由图 3 可以看出, 粉末颗粒尺寸较为均匀, 且大多数颗粒大小为 0.2~0.8 μm, 平均颗粒尺寸为 0.5 μm。

2.3 热喷涂喂料的制备和再生 WC-12Co 涂层的制备

为制备具有高致密度和良好流动性的热喷涂喂

料, 采用喷雾干燥和热处理相结合的工艺路线对再生

大于热处理后制备的热喷涂喂料的颗粒尺寸(平均颗

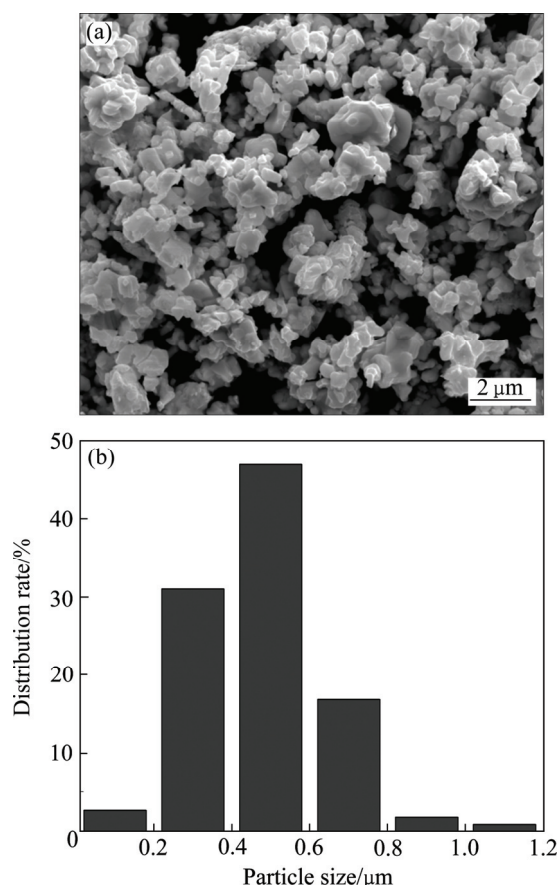


图 3 配碳量为 16.70% 时制备的再生 WC-12Co 复合粉的 SEM 像及其颗粒尺寸分布

Fig. 3 SEM image(a) and particle size distribution(b) of regenerated WC-12Co composite powder with carbon addition of 16.70% in raw powders

WC-12Co 复合粉进行团聚造粒。

图 4(a)和(b)所示为再生 WC-12Co 复合粉喷雾干燥后和进行热处理后制备的造粒粉和热喷涂喂料的 XRD 谱。由图 4(a)和(b)可以看出, 造粒粉与再生复合粉的相组成一致, 均由 WC、Co 和一定量的缺碳相组成, 而造粒粉经过热处理后制备的热喷涂喂料仅由 WC 和 Co 相组成。

图 4(c)和 4(d)分别是以再生 WC-12Co 热喷涂喂料和商业购买热喷涂粉末为原料, 经超音速火焰喷涂方法制备的 WC-12Co 涂层的 XRD 谱。由图 4(c)和(d)可以看出, 两者在相组成上基本一致, 均由 WC、Co 相和少量 W_2C 相组成。不同于热喷涂粉的物相, 即仅由 WC 和 Co 相组成(见图 4(b))。究其原因, WC-Co 粉末在喷涂过程中, WC 颗粒直接与空气中的氧气接触, 发生脱碳反应, 生成 W_2C 相所致^[16]。

由造粒粉和热喷涂喂料的 SEM 像(见图 5)可以看出, 两种粉的颗粒基本呈球形, 造粒粉的颗粒尺寸略

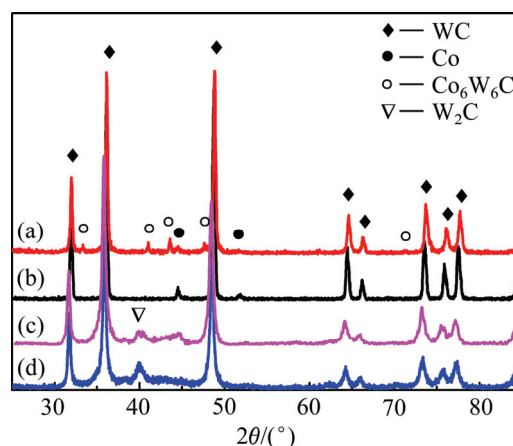


图 4 不同粉末和涂层的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of different powders and coatings: (a) Spray-dried powder, prepared by using recycled WC-12Co composite powder; (b) Recycled thermal spray feedstock powder; (c) Recycled coating; (d) WC-12Co coating, prepared by commercial feedstock powder

粒尺寸为 $23\ \mu\text{m}$)。但造粒粉颗粒上孔洞较多, 结合松散, 其 WC 晶粒尺寸细小(见图 5(b)); 与造粒粉相比, 图 5(d)所示热喷涂喂料的颗粒内部则结合紧密, 孔隙少, 且由棱角分明的 WC 晶粒组成, 且尺寸明显增大。分析可知, 在热处理过程中粉末颗粒发生了如下变化: 造粒过程中掺入的有机粘结剂(PVA)的分解、挥发; 粉末的致密化及局部烧结和 WC 晶粒的长大; 粉末中的游离碳与未反应完全的缺碳相发生化合反应, 生成 WC 和 Co 相, 即消除缺碳相。

综上所述, 再生 WC-12Co 复合粉末经过喷雾干燥和热处理相结合的工艺可制备出仅由 WC 和 Co 相组成的、颗粒结构致密的热喷涂喂料。

图 6 所示为再生和商业购买 WC-12Co 粉末制备涂层的断面形貌。由图 6 可以看出, 制备的再生硬质合金涂层与基体结合紧密、组织致密、空隙细小, 但存在个别较大的孔洞。可以推断, 喂料中的颗粒在喷涂过程中充分熔融、变形, 具有良好的填充孔隙的能力且颗粒之间相互咬合作用强, 使得涂层致密, 层与层间结合能力增强所致^[17]。涂层中的 WC 晶粒和 Co 相分布均匀, 其晶粒尺寸大部分为 $0.3\sim0.9\ \mu\text{m}$, 平均尺寸为 $0.5\ \mu\text{m}$, 硬度为 $1310\text{HV}_{0.3}$; 而商业购买喷涂粉制备涂层中晶粒平均尺寸为 $0.6\ \mu\text{m}$, 并含有较多较小的孔洞, 晶粒尺寸的增大和孔洞的存在会降低涂层的耐磨性^[18]。

图 7 所示为采用磨粒磨损测试得到的再生与商业购买喷涂粉末制备涂层的磨损量随磨损次数(转数)的

变化曲线。由图 7 可知, 随磨损次数的增加, 涂层的

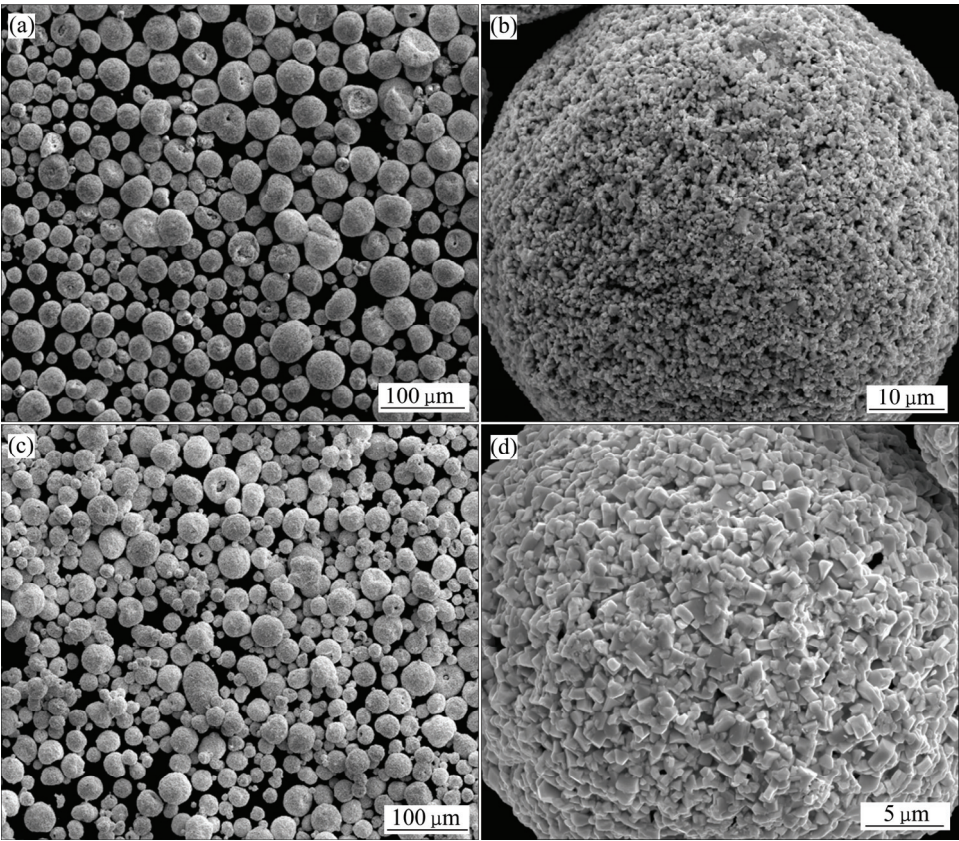


图 5 再生 WC-12Co 复合粉造粒后粉末和喷涂喂料的 SEM 像

Fig. 5 SEM images of different powders prepared by regenerated WC-12Co composite powder: (a), (b) Spray-dried powder; (c), (d) Feedstock powder

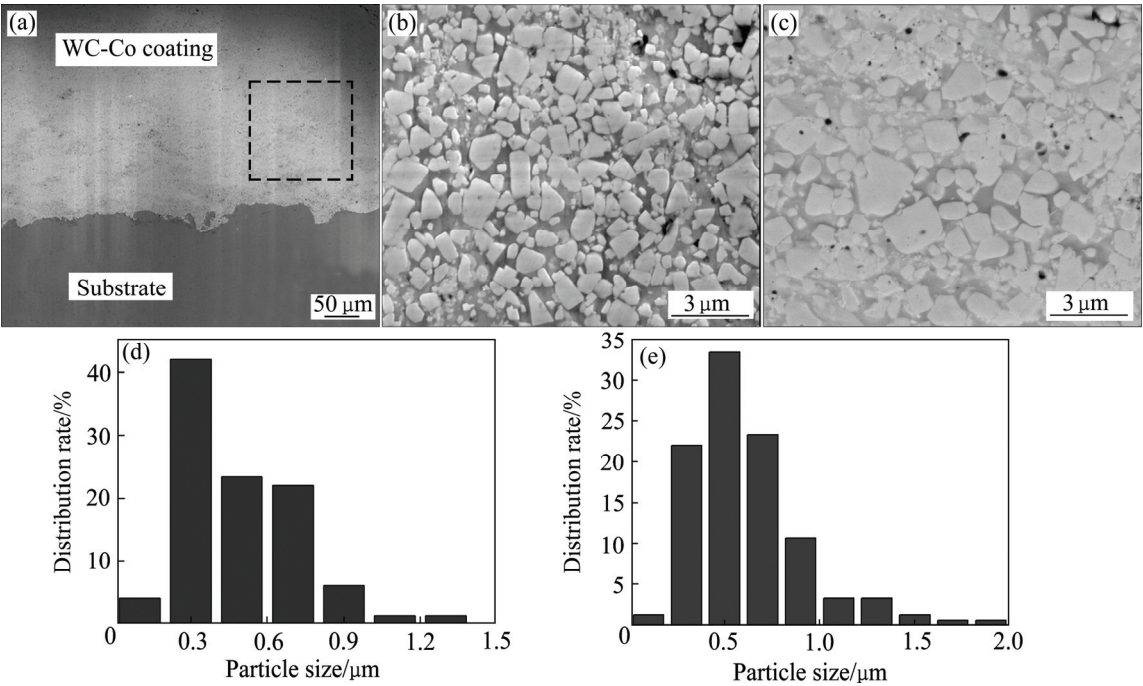


图 6 不同热喷涂粉制备 WC-12Co 涂层的断面形貌及粒径分布率

Fig. 6 Cross section morphologies((a)–(c)) and particle size distributions((d), (e)) of WC-12Co coatings sprayed by different feedstocks: (a), (b), (d) Recycled feedstock; (c), (e) Commercial feedstock

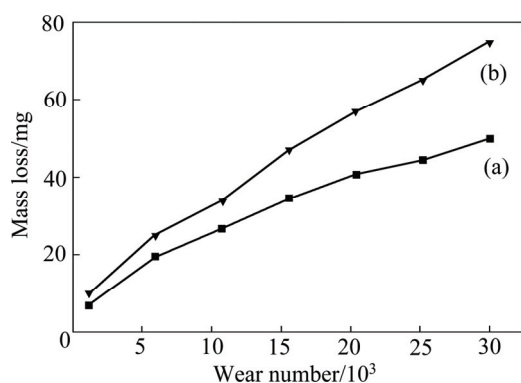


图 7 不同喷涂粉制备 WC-12Co 涂层的磨损量与磨损次数的关系

Fig. 7 Relationship between wear resistance and wear number of WC-12Co coatings sprayed by different feedstocks: (a) Recycled WC-12Co coating; (b) Coating prepared by commercial feedstock

磨损量均逐渐增加。相比于商业购买涂层粉制备的硬质合金涂层,再生 WC-12Co 涂层具有更好的耐磨性,随着磨损次数的增加,这种优势更加明显。当磨损次数达到 30000 次时,再生涂层的磨损量为 50 mg,与商业涂层粉制备涂层的磨损量下降了 33.3%。由此可见,采用再生 WC-12Co 复合粉为原料,采用喷雾干燥和热处理工艺制备的喂料粉,经超音速火焰喷涂可制备出与基体结合良好、涂层组织致密、耐磨性优良的硬质合金涂层。

为了分析再生 WC-12Co 涂层的耐磨性优于商业购买喷涂粉制备涂层的原因,对两种涂层的相组成和涂层磨损后的形貌进行了观察。图 8 所示为涂层经 30000 r 磨损后试样的表面形貌。

由图 8(a)可知,再生硬质合金涂层磨后出现了明

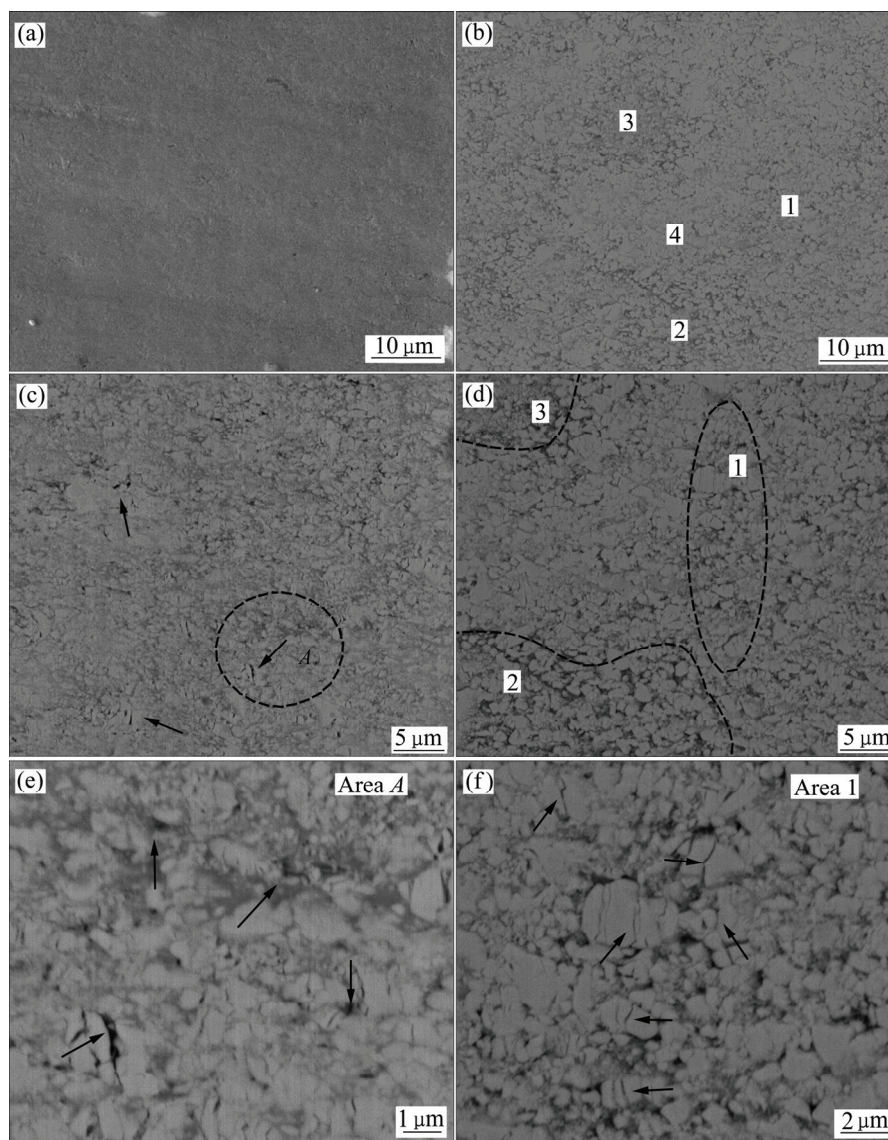


图 8 制备的 WC-12Co 涂层磨损后的表面形貌和商业购买粉末制备涂层的表面形貌

Fig. 8 Worn surface morphologies of WC-Co coatings prepared with recycling WC-12Co powder((a), (c), (e)) and commercial feedstock powder((b), (d), (f))

显的划痕沟、塑性变形沟和少量的剥落坑,由放大后可知(见图 8(c)和(e)),涂层中少量的 WC 颗粒与周边颗粒间形成的裂纹与孔洞(如图 8(e)中实线箭头所示)。由此可见,涂层的磨损主要以塑性变形和微切削为主,伴有少量的 WC 颗粒剥落。由商业购买的涂层粉制备的涂层磨损后,磨损表面存在明显的剥落现象(如图 8(b)和 8(d)中所示的已剥落区域 3、正在剥落的区域 1、2 和未剥落区域 4),WC 颗粒和基体间存在明显裂纹,说明涂层颗粒间的结合强度较低。由图 8(f)可知,正在剥落区域涂层中存在大量的 WC 颗粒及与周边颗粒间形成的裂纹与孔洞(图 8(f)中虚线箭头所示),WC 颗粒的破碎会加剧 WC 颗粒的脱落,致使磨损加剧。因此,商业购买喷涂粉制备涂层的磨损方式主要是 WC 颗粒的破碎和剥落。究其原因,刚玉磨粒硬度大,可对涂层内的 WC 和 Co 相同时进行切削^[19],在切削的过程中,WC 晶粒可能被切削成小块和更小的碎屑,晶粒尺寸大和有孔隙的试样更容易在切削过程中产生应力集中而破碎,造成磨损加剧。

综上所述,相比于商业购买喷涂粉制备的涂层,再生 WC-Co 热喷涂涂层具有更为优异的耐磨性能,其主要原因是再生涂层的磨损机制主要为塑性变形和少量的 WC 颗粒剥落,不同商业购买喷涂粉制备的涂层以颗粒剥落为主的磨损方式。

采用氧化和还原碳化方法回收制备再生 WC-Co 粉末,进而采用造粒和热处理工艺获得热喷涂喂料粉末,并进行超音速火焰喷涂的技术路线可制备出硬度高、耐磨性好的再生 WC-Co 涂层,表明该回收路线可制备出合格的再生热喷涂粉末,并可应用于高耐磨性涂层的制备。

3 结论

1) 采用氧化和还原碳化技术,通过对原料中钴和碳含量的调控,制备出平均颗粒尺寸为 $0.5\mu\text{m}$,化学成分适合制备热喷涂涂层的再生 WC-12Co 复合粉。

2) 由再生 WC-Co 复合粉经造粒和 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1 h 氩气气氛中热处理,制备出仅由 WC 和 Co 相组成、平均颗粒尺寸 $23\mu\text{m}$ 、颗粒结构致密的再生 WC-12Co 热喷涂喂料。

3) 以再生 WC-12Co 热喷涂喂料为原料经超音速火焰喷涂制备出与基体结合紧密、组织致密、WC 平均晶粒尺寸约为 $0.5\mu\text{m}$ 、硬度达到 $1310\text{HV}_{0.3}$ 的再生硬质合金涂层。

4) 与商业购买热喷涂粉为原料制备涂层相比,再

生硬质合金热喷涂涂层具有更好的耐磨损性,在 80 N 的载荷下其磨损量可降低 33.3%,磨损机制的不同是再生硬质合金涂层具备优异耐磨性的根本原因。

REFERENCES

- [1] LIN L, LIU K, ATSUSHI S, WANTAI Y, TOYOHISA F, OSAMU S, AKIRA K. Recovery of tungsten and vanadium from tungsten alloy scrap[J]. Hydrometallurgy, 2004, 72(1/2): 1-8.
- [2] 左铁镛, 宋晓艳. 我国高端钨制品发展有关问题的思考与探讨[J]. 硬质合金, 2012, 29(6): 337-343.
ZUO Tie-yong, SONG Xiao-yan. Discussions concerning development of high-grade tungsten products in China[J]. Cemented Carbide, 2012, 29(6): 337-343.
- [3] FREEMANTLE C S, SACKS N, TOPIC M, PINEDA-VARGAS C A. Impurity characterization of zinc-recycled WC-6wt.% Co cemented carbides[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 44: 94-102.
- [4] 吴子军, 梁小华. “新型破碎法”回收料生产硬质合金的工艺探索[J]. 硬质合金, 2004, 12(4): 241-243.
WU Zi-jun, LIANG Xiao-hua. The techniques discussion of producing cemented carbide with recycling materials by the new type crashing method[J]. Cemented Carbide, 2004, 12(4): 241-243.
- [5] 张立, 陈述, 熊湘君, 黄伯云, 张传福. 电化学回收 WC 粉末质量控制问题的探讨[J]. 硬质合金, 2006, 23(2): 103-106.
ZHANG Li, CHEN Shu, XIONG Xiang-jun, HUANG Bai-yun, ZHANG Chuan-fu. Study on the quality control of tungsten carbide powder reclaimed by electrochemical method[J]. Cemented Carbide, 2006, 23(2): 103-106.
- [6] 陈芑, 李海坤. 硬质合金高温处理回收工艺研究[J]. 硬质合金, 2001, 18(4): 201-204.
CHEN Peng, LI Hai-kun. Study on the technique of reclaiming cemented carbide by high-temperature treatment[J]. Cemented Carbide, 2001, 18(4): 201-204.
- [7] JUNG W G. Recovery of tungsten carbide from hard material sludge by oxidation and carbothermal reduction process[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20: 2384-2388.
- [8] 王瑶, 刘雪梅, 宋晓艳, 魏崇斌, 王海滨, 王西龙. 高性能再生硬质合金的短流程回收制备[J]. 金属学报, 2014, 50(5): 633-640.
WANG Yao, LIU Xue-mei, SONG Xiao-yan, WEI Chong-bin, WANG Hai-bin, WANG Xi-long. Short-term process of recycling cemented carbide scraps and preparation of high performance hard metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(5): 633-640.
- [9] 李学伟, 孟银, 王鹏, 程浩然. 热喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的研究现状[J]. 中国钨业, 2014, 29(2): 28-31.

- LI Xue-wei, MENG Yin, WANG Peng, CHENG Hao-ran. Research status of WC-10Co4Cr coatings prepared by thermal spraying[J]. China Tungsten Industry, 2014, 29(2): 28–31.
- [10] ZHAN Q, YU L, YE F, XUE Q, LI H. Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC-Co during plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(19/20): 4068–4074.
- [11] GHADAMI F, HEYDARZADEH S M, GHADAMI S. Effect of bond coat and post-heat treatment on the adhesion of air plasma sprayed WC-Co coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 261: 289–294.
- [12] WANG T, ZHAO S, HUA W, LI J, GONG J, SUN C. Estimation of residual stress and its effects on the mechanical properties of detonation gun sprayed WC-Co coatings[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(3): 454–461.
- [13] DU H, HUA W, LIU J, GONG J, SUN C, WEN L. Influence of process variables on the qualities of detonation gun sprayed WC-Co coatings[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 408(1/2): 202–210.
- [14] WANG H B, SONG X Y, LIU X M, WEI C B, GAO Y, FU J. Effect of heat-treatment of spray-dried powder on properties of ultrafine-structured WC-Co coating[J]. Surface Coating Technology, 2012, 207: 117–122.
- [15] LÓPEZ A J, RAMS J. Protection of carbon steel against molten aluminum attack and high temperature corrosion using high velocity oxygen-fuel WC-Co coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 262: 123–133.
- [16] DING Z X, CHEN W, WANG Q. Resistance of cavitation erosion of multimodal WC-12Co coatings sprayed by HVOF[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(10): 2231–2236.
- [17] 李松林, 向锦涛, 周伍喜, 李玉玺, 陈 文. 超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的耐滑动磨损行为[J], 中国有色金属学报, 2012, 22(5): 1371–1376.
- LI Song-lin, XIANG Jin-tao, ZHOU Wu-xi, LI Yu-xi, CHEN Wen. Sliding wear behavior of high-velocity oxy-fuel sprayed WC-10Co4Cr coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5): 1371–1376.
- [18] YANG Q Q, SENDA T, OHMORI A. Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behavior of HVOF sprayed WC-12%Co coating[J]. Wear, 2003, 254: 23–34.
- [19] 王 群, 屈帮荣, 唐墨盼, 熊浩奇. 超音速火焰喷涂碳化钨-钴涂层磨粒磨损行为[J], 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 1920–1928.
- WANG Qun, QU Bang-rong, TANG Zhao-xi, XIONG Hao-qi. Abrasive wear behavior of WC-Co coating deposited by high velocity oxygen flame process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7): 1920–1928.

(编辑 李艳红)