

文章编号: 1004 - 0609(2004) 12 - 2035 - 08

## 再生高密度钨合金的性能<sup>①</sup>

高海燕, 王新平, 贺跃辉, 任 斌, 陈立宝, 黄伯云  
(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

**摘 要:** 采用氧化-还原法回收钨合金切削废料, 用回收粉末及镍、铁元素粉配制成 91W-6Ni-3Fe 系高密度合金的混合粉, 经压制、脱胶、烧结制得再生高密度钨合金。结果表明: 所得再生合金的性能同非回收粉末所制备的合金性能相当, 再生钨合金的密度随着烧结温度的升高而先升高后有所降低, 最大密度为  $17.12 \text{ g/cm}^3$ , 硬度随着烧结温度的升高而降低; 当烧结温度为  $1440 \text{ }^\circ\text{C}$  时再生合金的强度和塑性达到较好的配合, 抗拉强度为  $922.95 \text{ MPa}$ , 延伸率为  $20.18\%$ ; 经真空热处理后, 再生钨合金性能得到改善, 抗拉强度和延伸率得到不同程度的提高, 抗拉强度比热处理前提高了约  $6.44\%$ , 延伸率比热处理前提高了约  $43.42\%$ 。

**关键词:** 再生; 高密度; 钨合金

中图分类号: TF 125.241

文献标识码: A

## Properties of recycling tungsten heavy alloy

GAO Haiyan, WANG Xinping, HE Yuehui, REN Bin, CHEN Libao, HUANG Baoyun  
(State Key Laboratory of Powder Metallurgy,  
Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The recycling tungsten heavy metal alloy powder was obtained by oxidation-reduction process. The recycling powder was mixed homogeneously with appropriate amount pure nickel and iron powder. Then the mixed powder was pressed and sintered to get the recycling tungsten heavy metal alloy. The results show that the mechanical properties of recycling tungsten heavy alloys are nearly the same to that of the alloy produced by pure metal elements mixed powder. The density of recycling tungsten alloy increases first and then decreases with the increasing sintering temperature. The maximum density is  $17.12 \text{ g/cm}^3$ . Hardness decreases with the increasing sintering temperature. The tensile strength and elongation get the best match when the sintering temperature is  $1440 \text{ }^\circ\text{C}$ , the tensile strength is  $922.95 \text{ MPa}$ , and the elongation is  $20.18\%$ . After vacuum heat treatment, the mechanical properties of recycling tungsten alloy improve. The tensile strength increases about  $6.44\%$ , and the elongation increases about  $43.42\%$ .

**Key words:** recycling; high density; tungsten alloy

钨属于稀有金属, 其资源少、价格高、用量大, 目前各个国家都把废钨合金当成宝贵的第二资源, 将其作为解决资源缺乏、降低钨合金成本的重要手段, 因此, 钨合金回收技术的开发研究得到了普遍的重视<sup>[1]</sup>。

在我国, 钨的储量、产量、外贸出口量目前均

居世界第一, 但经过多年来的开采, 特别是 20 世纪 80 年代以来民间采钨的迅猛增长, 造成了钨资源的严重破坏, 可供开采的钨资源正在急剧减少, 当前我国钨的储量已经由占世界总储量的  $65\%$  锐减至  $40\%$ 。另外, 利用粉末冶金法生产的钨基重合金主要是合金坯料, 在生产使用过程中还需要约  $30\%$

① 基金项目: 国家自然科学基金专项基金资助项目(05323008)

收稿日期: 2004-06-18; 修订日期: 2004-09-21

作者简介: 高海燕(1975-), 女, 博士。

通讯作者: 高海燕, 博士; 电话: 0731-8876630; E-mail: ghycsu@sohu.com

~ 50% 的切削加工量, 这对钨资源造成了巨大的浪费。为了保护现有的钨资源, 提高其有效利用率, 再生利用钨合金切削废料十分必要<sup>[2, 3]</sup>, 而再生后钨合金性能的研究则尤为重要。

钨合金废料回收技术的研究主要集中在用钨量较大的硬质合金、钨材、高密度合金和电工合金等方面<sup>[4-7]</sup>。钨基重合金是采用粉末冶金液相烧结工艺制备的特殊钨合金。目前已形成了 W-Ni-Cu、W-Ni-Mo 和 W-Ni-Co 等系列合金, 较常用的有 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 2 大系列<sup>[8]</sup>。目前, 对于该合金的再生利用研究较少, 国内外回收钨基重合金的方法主要有熔浴回收法、湿法冶金法和氧化-还原法。熔浴回收法所需温度高(1 550~ 1 600 °C), 能耗大, 工艺复杂, 回收费用较高<sup>[9]</sup>; 湿法冶金法是采用与湿法冶金相似的工艺回收高密度合金, 该工艺复杂, 容易对环境造成严重的污染<sup>[10]</sup>; 氧化-还原法工艺简单、经济、可靠, 是一种很有前途的回收钨基高密度合金的方法。本文作者就氧化-还原法再生利用钨合金废料制备再生高密度钨合金的性能作了较为深入的研究。

## 1 实验

### 1.1 原料粉末的制备

将 91W-6Ni-3Fe 系钨合金切削废料用 5% 的 HCl 和 NaOH 溶液清洗以除去废屑表面的杂质及油污, 再用清水清洗 3 次。干燥后于井式马弗炉中经 900 °C 氧化 4 h, 得到的氧化物在滚动球磨机中球磨 4 h 得到氧化物粉末, 将该氧化物粉末过筛 (0.075 mm) 后在 H<sub>2</sub> 气氛中于 600 °C 及 750 °C 下各保温 1 h 进行二阶段还原, 制得再生钨合金粉末。

### 1.2 再生钨合金的制备

由于钨合金废屑用酸碱清洗后成分会有所改变, 且制备所需成分的高密度合金可能与再生粉末的成分不同, 所以再生钨合金需要进行成分调配。经测试, 再生粉末的成分为: W92.75, Ni 4.80, Fe2.40, Co0.02(质量分数, %), 本实验将适量的 Ni、Fe 元素粉末混入再生合金粉中使再生合金的成分调配为: W91、Ni6、Fe3、Co0.02。

以 1% 硬脂酸作为成形剂加入钨合金混合粉中进行压制, 所得压坯在 H<sub>2</sub> 气氛中于 800 °C 脱胶。由于原料粉末中有大量的预合金粉末存在, 所以再生合金的烧结温度选择要比一般元素混合粉末低 40 °C 左右。因此, 本实验选择的再生合金烧结温度

分别为: 1 380、1 400、1 420、1 440 和 1 460 °C 5 个温度点, 烧结气氛为氢气, 烧结时间为 45 min。将得到的再生合金于 1 200 °C 真空热处理 120 min 以提高其力学性能。另外, 还以相同的工艺制备了以纯净元素混合粉末为原料的 91W-6Ni-3Fe-0.02Co 高密度钨合金以对照再生合金的性能。

### 1.3 性能测试

用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜观察再生粉末形貌及再生合金拉伸试样断口形貌; 用 D/MAX-RA 型 X 射线衍射仪分析再生粉末相组成; 在 A-200 型硬度仪上测试再生合金的洛氏硬度; 用 AEL-200 型电子天平测试合金密度; 在 LJ-3000A 型机械式力学实验机上对拉伸试样进行抗拉强度和延伸率的测试; 用 XJL-02 型立式金相显微镜观察合金的金相组成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 再生钨合金粉末的特性

高密度钨合金切削废料氧化后的 X 射线衍射谱和还原后得到的再生粉末的 X 射线衍射谱分别如图 1 和图 2 所示。

钨合金切屑经 900 °C, 4 h 氧化后, 致密的重合金转变成疏松易碎鳞片状的黄色氧化物。由图 1 可以看出, 氧化物主要由 WO<sub>3</sub> 和 NiWO<sub>4</sub> 组成。Fe、Co 元素经氧化煅烧后生成了 FeWO<sub>4</sub> 和 CoWO<sub>4</sub><sup>[11]</sup>, 由于 FeWO<sub>4</sub> 和 CoWO<sub>4</sub> 固溶于 NiWO<sub>4</sub> 中, 因此, 钨合金废屑经过氧化煅烧后主要以 WO<sub>3</sub>、(Ni、Fe)WO<sub>4</sub> 两

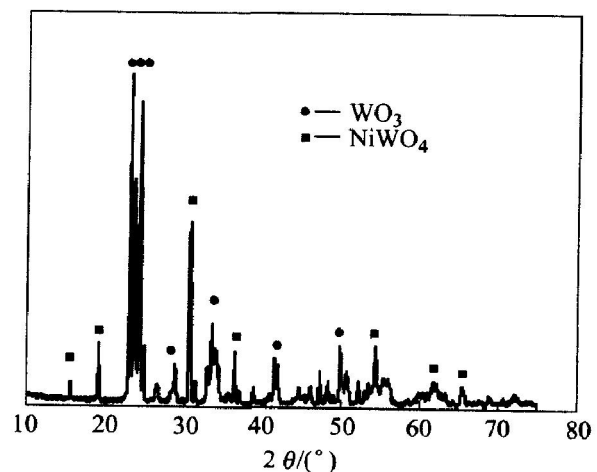


图 1 钨合金切屑经 900 °C, 4 h 氧化后形成的氧化物的 X 射线衍射谱

Fig. 1 XRD pattern of oxide of tungsten heavy metal alloy formed at 900 °C for 4 h

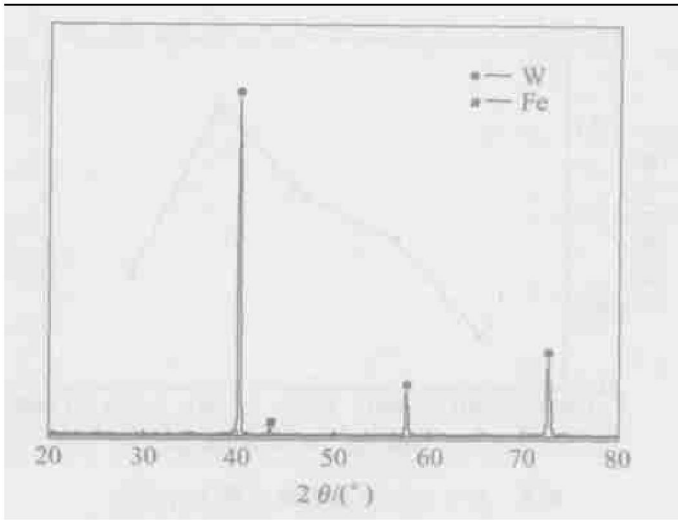


图 2 再生粉末的 X 射线衍射谱  
Fig. 2 XRD pattern of recycling powder

种物质形态存在<sup>[12]</sup>。实验中没有发现 Fe 或 Ni 的其它氧化物相。

图 2 所示为还原后得到的再生粉末的 X 射线衍射谱, 由图可知, 再生粉末主要以 W、Fe 两相存在, Ni 则在还原过程中与 Fe 形成了 Fe-Ni 固溶体, 并均匀分布于钨晶间<sup>[13]</sup>。因此, 再生粉末是一种预合金粉末。

图 3 所示为再生粉末的 SEM 形貌, 由图可知, 再生粉末的表面十分圆滑, 因为废钨合金切削经氧化后生成了钨酸铁、钨酸镍等钨酸盐, 钨晶粒的生长、聚集与纯  $WO_3$  或蓝钨的还原不同, 钨晶粒会失去晶棱而使表面变得十分圆滑, 并通过粘结相的作用使钨晶粒连接在一起<sup>[14]</sup>。

## 2.2 再生钨合金的性能

表 1 所示为再生钨合金与元素混合粉所制得的钨合金的力学性能测试结果(该结果为 3 个相同试样测试结果的平均值)。

表 1 烧结态再生高密度钨合金的性能

Table 1 Properties of recycling tungsten heavy metal alloy after sintering

Number	Sintering temperature/ °C	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Hardness(HRC)	Density/( $g \cdot cm^{-3}$ )	Porosity/ %
R1	1 380	791.59	3.19	30.5	16.86	3.32
R2	1 400	836.61	14.42	27.5	16.97	2.19
R3	1 420	888.94	17.65	25.0	17.09	1.79
R4	1 440	922.95	20.18	23.5	17.12	1.34
R5	1 460	879.26	19.11	21.0	16.93	1.82
E1	1 420	770.77	2.92	27.5	17.11	2.11
E2	1 440	870.93	14.42	26.0	17.20	1.68
E3	1 460	896.61	15.06	24.5	17.23	1.21

R—Recycling alloy; E—Elements mixed alloy

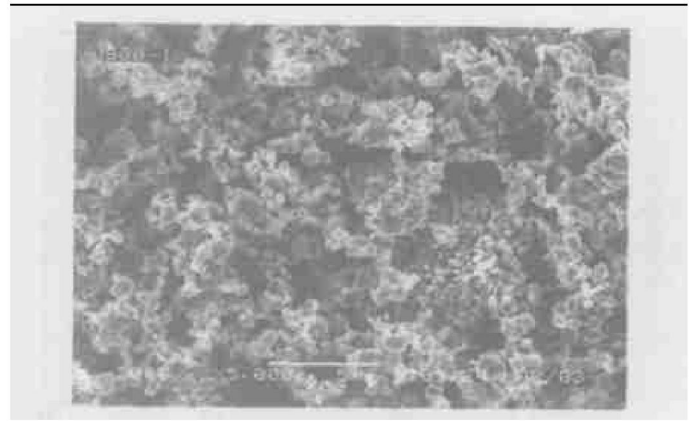


图 3 再生粉末的 SEM 形貌  
Fig. 3 SEM micrograph of recycling powder

由表 1 可以看出, 在同一烧结温度下再生合金的抗拉强度和延伸率优于元素混合粉所制合金。制备相近性能的合金, 再生粉末烧结温度比元素混合粉的烧结温度约低 40 °C。再生钨合金密度普遍低于元素混合粉所制合金, 这可能是由于再生粉末中含有一些轻金属杂质所致。

### 2.2.1 烧结温度对再生钨合金密度及硬度的影响

图 4 和 5 所示分别为再生钨合金孔隙率和密度随烧结温度的变化曲线。可以看出, 随着烧结温度的提高, 再生钨合金的孔隙率先降低而后升高, 而密度则先升高后降低, 在 1 440 °C 烧结时, 孔隙率最低为 1.34%, 密度则出现峰值, 达到 17.12  $g/cm^3$ 。

因为当烧结温度较低时, 再生的预合金粉末粘结相和调配成分时混入的镍、铁粘结相刚开始形成液相, 由于液相量很少, 因此液相流动和颗粒重排进行不充分。从图 6(a) 的微观组织可以看出, 合金组织中有许多孔隙未被填充, 孔隙率较高为 3.32%, 所以合金的密度较低, 只有 16.86  $g/cm^3$ 。如图 6(b)、(c) 所示, 当烧结温度升高至 1 400、1 420 °C 时, 较多预合金粉末中的粘结相和镍、铁元素

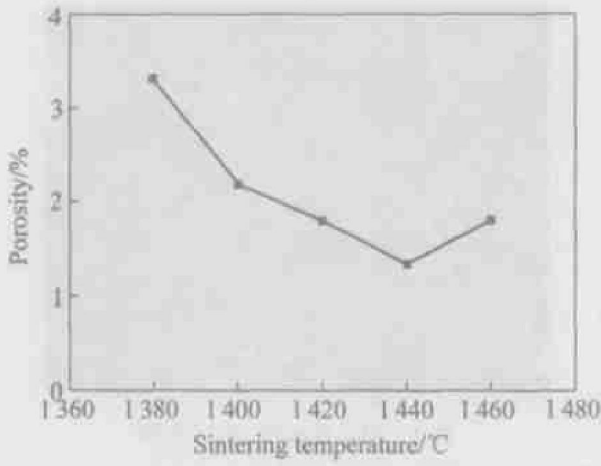


图4 再生合金孔隙率随烧结温度的变化

Fig. 4 Relationship between porosity of recycling alloy and sintering temperature

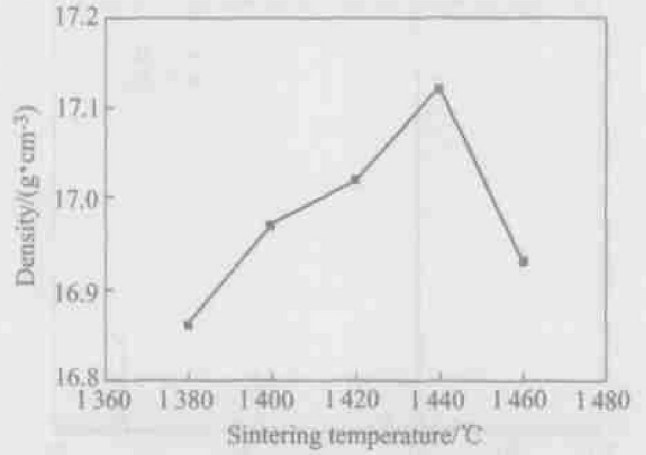


图5 再生合金密度随烧结温度的变化

Fig. 5 Relationship between density of recycling alloy and sintering temperature

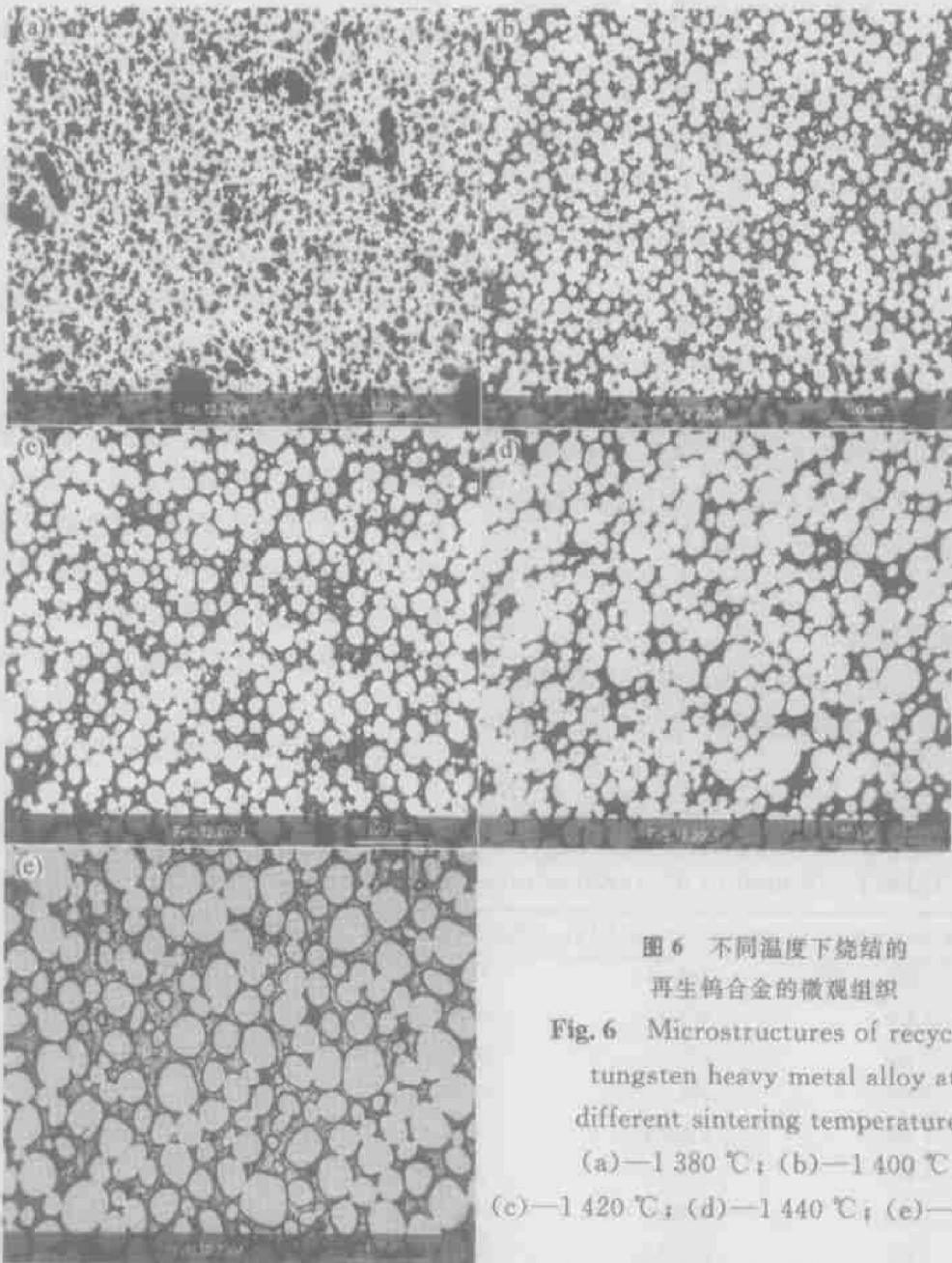


图6 不同温度下烧结的再生钨合金的微观组织

Fig. 6 Microstructures of recycling tungsten heavy metal alloy at different sintering temperatures (a)—1380 °C; (b)—1400 °C; (c)—1420 °C; (d)—1440 °C; (e)—1460 °C

逐步形成液相, 钨颗粒发生重排。随着液相量的增加, 钨颗粒进一步溶入 Fe-Ni 固溶体中直至饱和后开始析出并长大。这时液相流动增多, 孔隙被逐渐填充, 孔隙率降低, 密度则相应升高。烧结温度继续升高到 1 440 °C 时(图 6(d)), 已形成了接近致密的钨合金组织, 孔隙率降低至 1.34%。因此, 再生合金密度在此时达到最高, 为 17.12 g/cm<sup>3</sup>。当烧结温度为 1 460 °C 时, 由图 6(e) 可知, 钨颗粒迅速长大, 组织粗化。由于相界的减少, 在钨颗粒之间出现了孔隙, 合金孔隙率升高至 1.83%, 导致合金密度降低。

图 7 所示为由再生合金的微观组织测量钨颗粒尺寸得到再生合金钨颗粒的随烧结温度的变化规律。由图可知, 钨颗粒尺寸随着烧结温度的升高逐渐增大, 由 1 380 °C 时的 6.3 μm 增大至 1 460 °C 时的 36.5 μm。

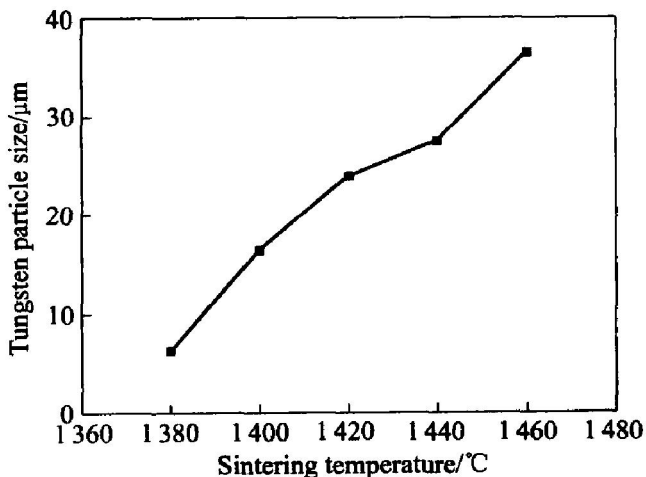


图 7 钨颗粒尺寸随烧结温度的变化

Fig. 7 Relationship between tungsten particle size and sintering temperature

在烧结过程中, 钨颗粒相的形成机制为重排—溶解—析出—长大。随着烧结温度的升高, 液相量即粘结相不断增加, 钨颗粒逐步发生重排并溶解到粘结相中, 在粘结相中达到饱和后开始析出并长大。当烧结温度由 1 440 °C 升高到 1 460 °C 时, 钨颗粒长大异常迅速, 由 27.6 μm 长到 36.5 μm, 导致再生合金组织粗化, 力学性能降低。

图 8 所示为再生合金硬度随烧结温度的变化曲线。由图可以看出, 再生合金的硬度随着烧结温度的升高而降低。因为当烧结温度较低时液相量出现较少, 钨颗粒没有发生充分的颗粒重排和溶解析出, 由于有大量的相对较硬的钨颗粒存在, 所以此时再生合金的硬度较高。随着烧结温度的升高, 钨

颗粒逐渐溶入液态相中, 达到饱和后开始析出, 形成了新的再生钨合金组织, 所以因钨颗粒的减少再生合金硬度下降。虽然在一定烧结温度范围内合金中孔隙随着烧结温度的升高而减少, 即合金密度随着烧结温度的升高而提高, 但这并没有使合金硬度有所提高, 因为钨合金是高密度合金, 相对密度很高, 密度对硬度的影响相对较小。

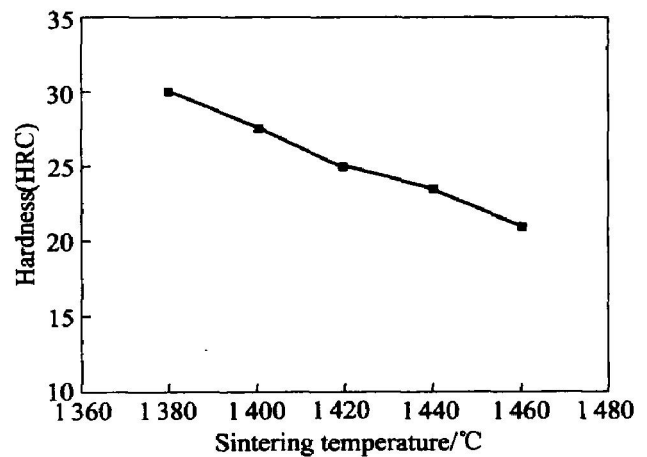


图 8 再生合金硬度随烧结温度的变化

Fig. 8 Relationship between hardness of recycling alloy and sintering temperature

### 2.2.2 烧结温度对再生合金抗拉强度和延伸率的影响

图 9 和 10 所示为再生合金抗拉强度与延伸率随烧结温度的变化曲线。由图可以看出, 随着烧结温度的升高, 抗拉强度及延伸率都是先升高而后降低, 当烧结温度为 1 440 °C 时再生合金的抗拉强度和延伸率达到最高值, 分别为 922.95 MPa 和 20.18%。

图 11 所示为不同烧结温度下样品的拉伸断口 SEM 形貌。由图 11(a) 可以看出, 当烧结温度为

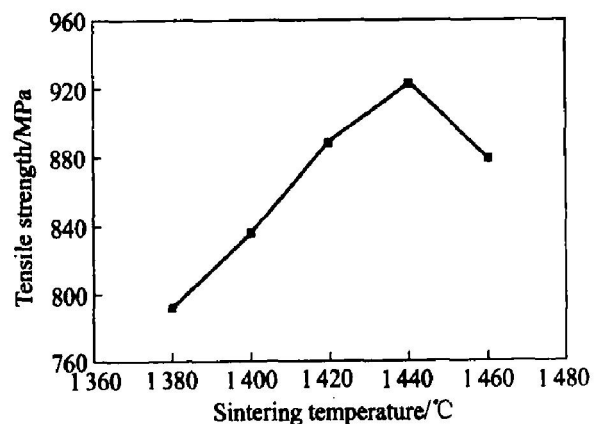


图 9 再生合金抗拉强度随烧结温度的变化

Fig. 9 Relationship between tensile strength of recycling alloy and sintering temperature

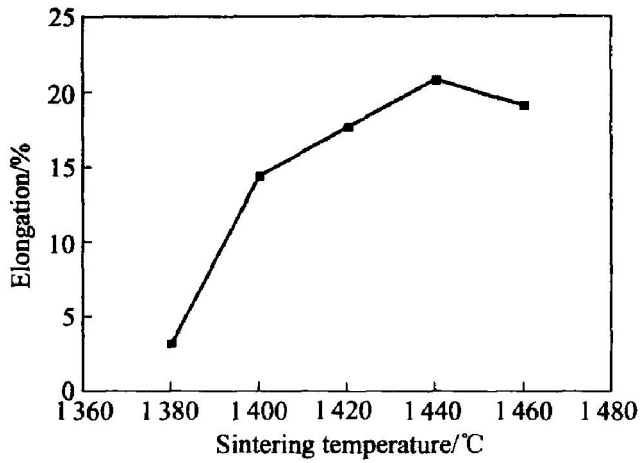


图 10 再生合金延伸率随烧结温度的变化

Fig. 10 Relationship between elongation of recycling alloy and sintering temperature

1 380 °C时, 断口呈冰糖状, 是典型的沿晶断裂特征。这说明当烧结温度低时, 液相烧结进行得不完全,

钨颗粒的溶解析出过程进行得不够充分, 钨颗粒只有 6.3 μm, 钨颗粒之间也没有形成结合牢固的粘结相, 且合金中还有许多孔隙存在, 这些都使合金材料内部界面结合强度远低于钨颗粒的断裂强度。当合金受到拉应力时, 裂纹由结合力较弱的界面出现并沿着晶粒界面发生断裂, 表现出较低的断裂强度。沿晶断裂属于脆性断裂, 所以合金的延伸率也较低。

经 1 400 °C 烧结后, 样品的拉伸断口形貌如图 11(b) 所示。由图可以看出, 钨颗粒发生了明显的长大, 达到 16.4 μm, 断裂方式表现为基体相断裂、钨颗粒与基体相分离、钨颗粒与钨颗粒界面断裂 3 种, 没有发生钨颗粒的解理断裂, 说明此时基体相与钨颗粒界面的结合强度仍小于钨颗粒本身的断裂强度, 表现为合金性能不高。经 1 420 °C 烧结后的断口形貌如图 11(c) 所示, 钨颗粒继续长大, 部分钨颗粒上出现了“河流状”花样, 这是解理断裂的基本特征, 还有一些钨颗粒发生了准解理断裂。另外, 基体相上出

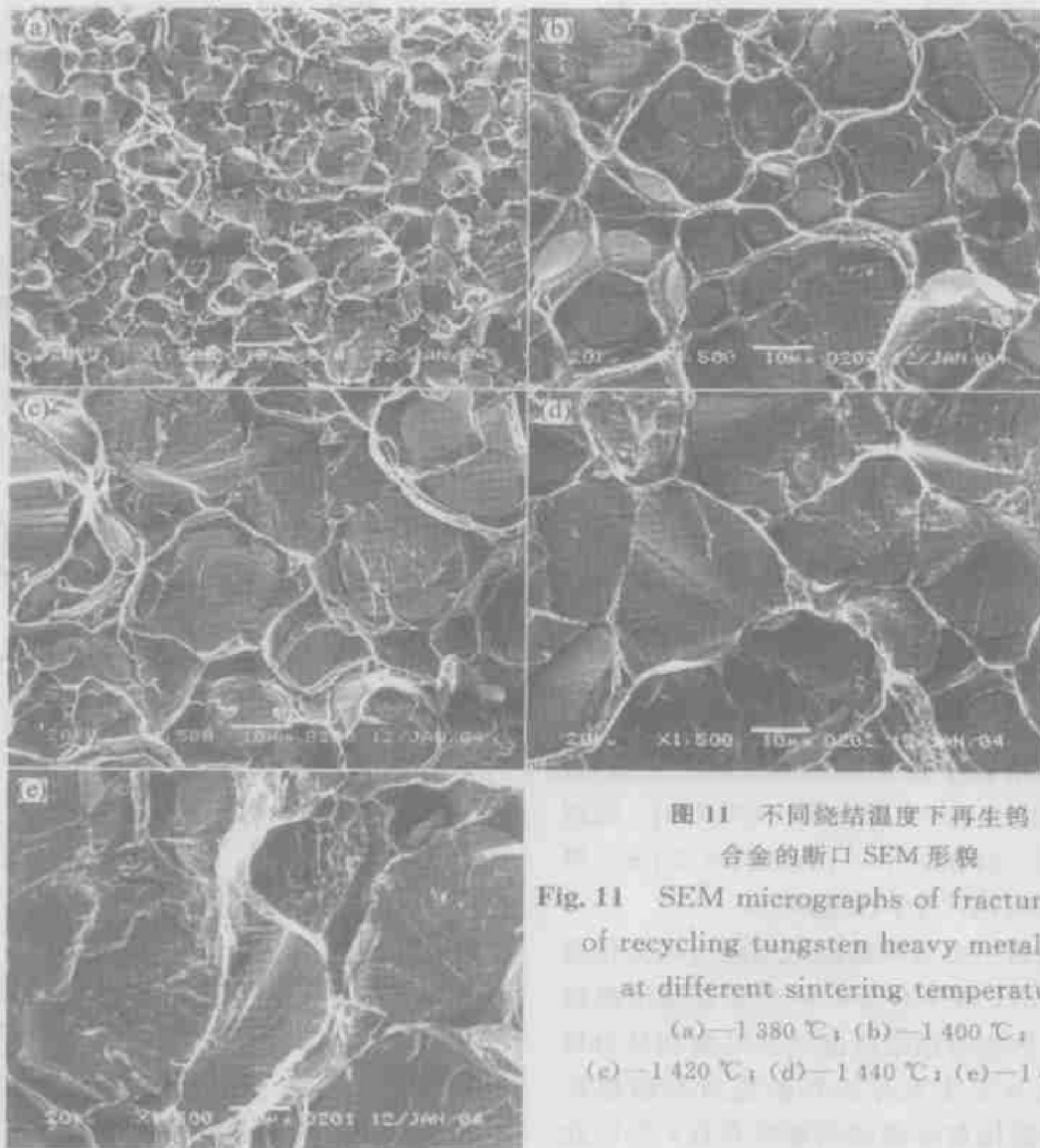


图 11 不同烧结温度下再生钨合金的断口 SEM 形貌

Fig. 11 SEM micrographs of fracture surface of recycling tungsten heavy metal alloy at different sintering temperature

(a)—1 380 °C; (b)—1 400 °C; (c)—1 420 °C; (d)—1 440 °C; (e)—1 460 °C

表 2 热处理后再生高密度钨合金的性能

Table 2 Properties of recycling tungsten heavy metal alloy after heat-treatment

Number	Sintering temperature/ °C	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Hardness(HRC)	Density/( g·cm <sup>-3</sup> )
R1	1 380	845.6	7.14	31.0	16.96
R2	1 400	890.8	23.13	27.0	16.98
R3	1 420	940.9	24.64	26.5	16.99
R4	1 440	992.1	26.07	23.5	17.19
R5	1 460	928.7	23.97	22.0	17.04

R—Recycling tungsten heavy metal alloy

现了许多“韧窝”，所以此时的抗拉强度和延伸率均提高。图 11(d) 所示为经 1 440 °C 烧结后样品的断口形貌，可以看出，粘结相均匀分布在钨颗粒周围，且粘结相上有大量的“韧窝”，延性断裂的特征明显，合金表现出较高的延伸率。大部分钨颗粒上有明显的“河流状”及“舌”花样，还有明显的解理台阶存在，说明此时的断裂主要以钨颗粒的解理断裂为主，合金表现出最高的抗拉强度。在此烧结温度下，由于粘结相分布均匀，钨颗粒间的结合力增强，在拉应力作用下钨颗粒的协调变形能力增强，得到了较好的强度和塑性的配合。烧结温度提高到 1 460 °C 时的样品断口形貌如图 11(e) 所示，由于钨颗粒长大严重，达到了 36.5 μm，粘结相的分散度降低，使钨颗粒的协调变形能力降低，又由于相界面减少，使钨颗粒之间有孔隙出现，这些都导致了再生合金性能的降低<sup>[13]</sup>。

### 2.2.3 热处理对再生合金性能的影响

由于实验中采用钨合金废屑为原料，且钨合金粉末的再生采用的是氧化-还原工艺，而再生钨合金烧结又采用 H<sub>2</sub> 作为保护气氛，因此，实验过程中，难免会存在 H、O、P、S、N 等杂质，这些杂质的富集和偏析会严重影响钨合金的韧性<sup>[15-17]</sup>。H 主要富集在 W 粘结相界面处，导致合金氢脆<sup>[18]</sup>。O 的主要作用取决于其存在形式，当烧结过程中钨粒子表面的氧化物没有被彻底还原时，会严重降低钨晶粒对粘结相的润湿性。P 易偏析到钨晶粒与粘结相的界面处而使合金变脆，S 与 P 的作用类似。

将烧结态的高密度钨合金进行真空热处理以改善杂质元素偏聚状况，消除合金氢脆，从而提高合金性能。热处理后再生钨合金性能列于表 2。

经热处理后，再生合金的硬度和密度变化不大，抗拉强度和延伸率有不同程度的提高。由表 2 可见，热处理后，再生合金的抗拉强度比热处理前约提高了 6.44%，延伸率得到了大幅度提高，比热处理前约提高了 43.42%，说明真空热处理对再生

合金塑性的提高起到了显著的作用。

## 3 结论

1) 经成分调配的钨合金切削回收粉末可制备出与元素混合粉末制备的钨合金性能相当的再生高密度钨合金。

2) 由于回收粉末为预合金粉，所以再生合金的烧结温度较一般元素混合粉所制合金的烧结温度约低 40 °C，在 1 380 °C 烧结 45 min 即可得到有一定抗拉强度和延伸率的再生合金。

3) 再生合金的密度随着烧结温度的升高先升高而后有所降低，经 1 440 °C 烧结得到的再生合金的密度最高为 17.12 g/cm<sup>3</sup>，硬度随着烧结温度的升高而降低。

4) 随着烧结温度的升高，再生钨合金的抗拉强度及延伸率都是先升高而后降低，当烧结温度为 1 440 °C 时再生合金的强度和塑性达到较好的配合，抗拉强度为 922.95 MPa，延伸率为 20.18%。

5) 经真空热处理后，再生钨合金性能得到改善，其硬度和密度变化不大，抗拉强度比热处理前提高了约 6.44%，延伸率比热处理前提高了约 43.42%。

## REFERENCES

- [1] 陈立宝, 贺跃辉. 钨合金废料的资源再生利用技术[J]. 粉末冶金技术, 2003, 21(3): 169-174.  
CHEN Lǐbao, HE Yuèhui. Technology of recycling scrap of tungsten heavy metal alloy[J]. Powder Metallurgy Technology, 2003, 21(3): 169-174.
- [2] 高再荣. 从第 9 次国际钨讨论会看世界钨矿山现状以及中国所面临的严峻挑战[J]. 中国钨业, 2003, 18(1): 8-12.  
GAO Zaìrong. The tungsten resource condition of the world and the severe challenge faced of China studied af-

- ter No. 9 international tungsten symposium [J]. China Tungsten Industry, 2003, 18(1): 8-12.
- [3] ZHAO Wuzhang. China upgrades its tungsten industry [J]. Metal Powder Report, 1994, 49(4): 14-16.
- [4] 傅政. 钨合金废料回收及其意义[J]. 世界有色金属, 1990, 93(7): 13-15.  
FU Zheng. Recycling and significance of tungsten alloy waste [J]. World Nonferrous Metals, 1990, 93(7): 13-15.
- [5] 张超凡, 虞星波. 废硬质合金的回收[J]. 硬质合金, 1981(3): 1-10.  
ZHANG Chaofan, YU Xingbo. Recycling of cemented carbide waste [J]. Cemented Carbide, 1981, (3): 1-10.
- [6] 李洪桂. 稀有金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 76-78.  
LI Honggui. Rare Metal Metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990. 76-78.
- [7] 季永康. 中国钨消费量的研究[J]. 世界有色金属, 1999(9): 4-10.  
JI Yongkang. Study on the consuming of tungsten in china [J]. World Nonferrous Metals, 1999(9): 4-10.
- [8] 朱桂森. 高密度钨合金[J]. 稀有金属材料与工程, 1988(2): 34-41.  
ZHU Guisen. Tungsten heavy metal alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1988(2): 34-41.
- [9] Sankaran V, Wolf-dieter S, Behno L. W-scrap recycling by the melt bath technique [J]. Int J of Refractory & Hard Materials, 1996, 14: 263-270.
- [10] Vadasdi K. Effluent F. Manufacture of ammonium paratungstate (APT) by recycling the byproducts [J]. Int J of Refractory Metals & Hard Materials, 1995, 13: 45-59.
- [11] ZHANG Zhaosen, CHEN Libao, HE Yuehui, et al. Recycling high density tungsten alloy powder by oxidation-reduction process [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(3): 450-453.
- [12] Haubner R, Danninger H, Lu X B. Recycling of heavy metal [J]. Rei Hard Metals, 1988, 7(12): 195-200.
- [13] 马国刚. 烧结时间对 W-Ni-Fe 重合金的组织结构及性能影响的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(5): 31-34.  
MA Guogang. Effect of sintering time on the microstructure and mechanical properties of W-Ni-Fe heavy alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(5): 31-34.
- [14] 李家杰, 骆丽安. 高密度钨合金残料的再生 [J]. 稀有金属, 1988, 67(12): 266-270.  
LI Jiajie, LUO Lian. Recycling of tungsten heavy alloy [J]. Rare Metal, 1988, 67(12): 266-270.
- [15] Churn K S, German R M. Fracture behavior of W-Ni-Fe heavy alloy [J]. Metal Trans, 1984, 15A(2): 331-338.
- [16] Danninger H. Influence of some trace impurities on properties and porosity of tungsten heavy metals [J]. International Journal of Refractory Metal & Hard Materials, 1986, 5(3): 144-152.
- [17] Lea C. Segregation to inter-phase boundaries in liquid phase sintered tungsten alloys [J]. Metal Trans, 1983, 14A(4): 667-677.
- [18] 齐芸馨, 赵彤, 王改莲, 等. 液相烧结钨合金氧富集脆化机理及韧化工艺的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 1999, 22(1): 4-9.  
QI Yunxin, ZHAO Tong, WANG Garlian, et al. Oxygen coalescence embrittling mechanism and toughening technique of liquid phase sintered tungsten alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1999, 22(1): 4-9.

(编辑 李向群)