

复杂高硅钴白合金碱焙烧脱硅预处理

徐志峰¹, 月日辉¹, 严 康¹, 王成彦²

(1. 江西理工大学 冶金与化学工程学院, 赣州 341000;

2. 北京矿冶研究总院, 北京 102206)

摘 要: 针对高硅钴白合金结构复杂、难以直接硫酸浸出问题, 开展碱焙烧脱硅预处理研究以破坏稳定致密的硅铁合金结构。结果表明: 经碱焙烧预处理后, 钴白合金形貌发生明显改变。碱焙烧条件如下: 温度 600 °C, NaOH 用量为硅、铁反应所需理论量 0.64 倍。在上述条件下焙烧 2 h 后, 所得渣经水洗, 硅的脱除率达到 66.57%; 再经常压硫酸浸出, 钴、铁浸出率均高达 99% 以上, 而铜则完全保留在浸出渣中, 实现了钴和铜分离, 渣中的铜经第二段氧化浸出得以回收。进一步基于工艺矿物学分析, 对碱焙烧脱硅预处理后钴白合金的常压浸出行为进行解析。

关键词: 钴白合金; 碱焙烧; 脱硅; 预处理; 常压浸出

中图分类号: TF811; TF816

文献标志码: A

Alkali-roasting and desilication pretreatment of refractory high-silicon cobalt white alloy

XU Zhi-feng¹, YUE Ri-hui¹, YAN Kang¹, WANG Cheng-yan²

(1. School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 102206, China)

Abstract: The refractory high-silicon cobalt white alloy is difficult to be leached directly by sulfuric acid because of its complex structure. The pretreatment of alkali-roasting and desilication was carried out to destroy the stable ferro-silicon alloy structure. The results show that the alloy structure is changed greatly after alkali-roasting and 66.57% of silicon can be removed by water-washing after the alkali-roasting at 600 °C for 2 h. The optimum dosage of NaOH for alkali-roasting is 0.64 times of the theoretical amount for the reactions of silicon and iron with NaOH. After the desilication, more than 99% of cobalt and iron can be leached from the pretreated alloy while all of copper is kept in the residue during the atmospheric leaching, by which the ideal separation of cobalt from copper is achieved easily. The copper in the residue can be recovered by the second stage oxidative leaching. Based on the mineralogical analysis, the leaching behavior of pretreated alloy was further discussed.

Key words: cobalt white alloy; alkali roasting; desilication; pretreatment; atmospheric leaching

钴是重要的战略金属, 我国钴资源多与黄铁矿和铜镍矿伴生, 品位低^[1]。就我国金属钴消费而言, 2000 年开始突破 4 000 t; 至 2004 年, 仅电池行业消费的钴

就已突破 4 500 t; 2010 年, 钴消费量更达到 9 800 t^[2]。我国铜消费量也迅速增长, 从 2000 年 194.2 万 t 增长到 2007 年 486.7 万 t, 年均递增 14.0%。由于我国资

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613505); 江西省第四批青年科学家培养对象项目(赣科发计字[2010]209 号文)

收稿日期: 2011-09-09; 修订日期: 2012-01-10

通信作者: 王成彦, 教授, 博士; 电话: 010-88399551; E-mail: wchy3207@sina.com

源短缺, 铜、钴金属供需缺口日趋增大。

非洲刚果(金)境内有着世界上最大的铜、钴资源富集区^[3]。其中, 加丹加铜矿带的铜储量达 5 500 万 t, 钴储量 360 万 t, 拥有大量地表及浅埋的品位高达 2%~9% 的氧化铜钴矿石, 目前有多家公司在当地采用电炉还原熔炼方法处理氧化铜钴精矿生产钴白合金。钴白合金将成为国内各大钴业公司外购主要原料之一。

合金的湿法浸出行为受合金还原熔炼工艺^[4]和成分及结构^[5]的明显影响。对于低硅合金湿法冶金而言, 除硫酸浸出^[6]外, 氨-铵盐体系^[5, 7-8]或硫酸-硫酸铜体系^[9-10]电化学溶解也是一种行之有效的办法。但对于高硅合金而言, 由于其结构致密稳定、抗酸蚀性强, 因此不仅浸出困难, 而且浸出矿浆固液分离困难, 导致有价值金属回收率低。

现有的高硅钴白合金浸出工艺主要有混酸多级浸出、盐酸体系强氧化浸出、氧压浸出等。在硫酸、硝酸混酸体系中, 高硅合金能有效浸出, 但该工艺存在流程长、硝酸用量大、浸出液脱硝困难等缺憾, 而硫酸、盐酸混酸氧化浸出体系^[11]则可以回避上述问题; 在盐酸体系中密闭条件下通氯气氧化浸出^[12]或者在其他氧化剂^[13-14]作用下, 也可以取得理想的铜、钴浸出效果, 但盐酸浸出工艺对设备防腐及环保提出较高要求; 国内金川公司于 20 世纪 80 年代后期, 将富钴合金加压浸出工艺成功实现工业化^[15], 2001 年赞比亚谦比希 COSAC 工厂 5 级高压釜连续浸出钴白合金的工艺也已投产^[16], 氧压浸出工艺对设备安全的要求比较苛刻。

为破坏致密的合金结构以利于后续酸性浸出, 有研究提出对高硅钴白合金进行“造渣熔炼”^[17]预处理, 即在 1 300 ℃ 左右添加 CaCO₃ 熔剂进行熔炼, 使合金中的硅以硅酸盐渣形式脱除。本文作者则在相对温和的条件下, 通过碱焙烧破坏硅铁合金结构, 使合金中的硅转型为水溶性硅酸钠, 进而水洗脱硅, 最终实现合金在常压条件硫酸介质中顺利浸出, 并实现钴、铜比较理想的分离。

1 实验

试验原料为某难处理钴白合金(简称白合金, 下同), 其中钴、铜、铁、硅的含量较高(见表 1)。白合金的 X 射线衍射(XRD)谱见图 1。图 1 中 1.9876 Å 处的最强衍射线与 Cu-Fe 合金(Fe₄Cu₃)、Co-Si 合金(CoSi、Co₂Si、CoSi₂、Co₂Si₃)以及 Cu-Si 合金(Cu₅Si、Cu₄Si)等特征线均不尽相同, 只与 Fe₃Si 特征线接近。此外,

图 1 中仅存在明显的金属铜相特征线, 而未见金属钴或其他钴物相的特征线。因此, 尽管目前尚无标准的 Fe-Co-Si 合金衍射数据可供比照, 但可以认为铁、钴元素主要是以 Fe-Si、Co-Si 合金相形式存在。图 1 中 1.9876 Å 处的最强衍射线暂标识为(Fe,Co)-Si 合金。

白合金中各物相的形貌见图 2。图 2 中 A 点颗粒为白色的合金相集合体, 该集合体内部有两种合金相和细粒金属铜。由图 2 可见, 金属铜除以弥散态存于合金相中外, 还有部分金属铜包裹了合金相, 结构复杂。

表 1 钴白合金主要化学成分
Table 1 Chemical composition of cobalt white alloy (mass fraction, %)

Co	Cu	Fe	Si	Others
42.54	17.33	27.20	9.99	2.94

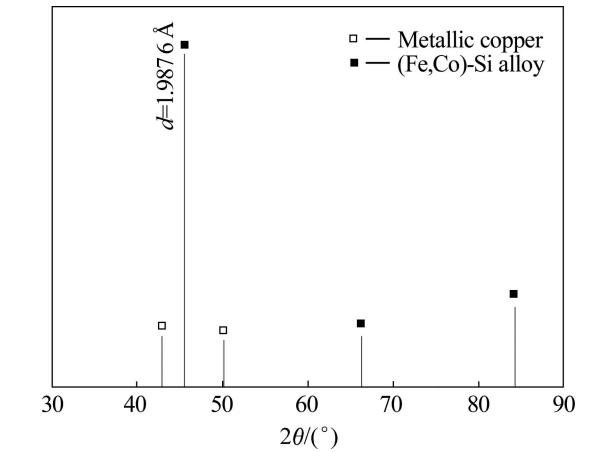


图 1 钴白合金的 XRD 谱
Fig. 1 XRD pattern of cobalt white alloy

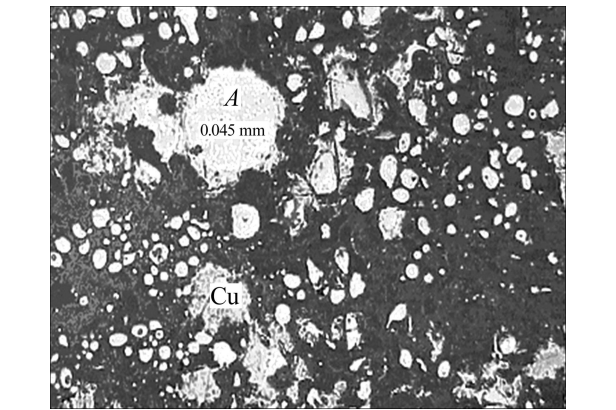


图 2 钴白合金的显微结构
Fig.2 Microstructure of cobalt white alloy

白合金焙烧预处理在实验室用马弗炉中完成,之后采用热水洗涤以脱除硅,进而送常压浸出。鉴于白合金密度较大,为便于搅拌,浸出过程采用一较大液固比值(15 mL/1 g),搅拌转速为 600 r/min。浸出过程中连续鼓入空气。浸出结束后,液固分离并分别送分析。铜、钴、铁、硅等元素浸出率及硅脱除率计算均按渣计。

2 结果与讨论

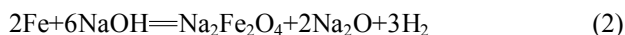
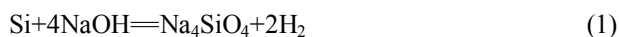
2.1 对比试验

首先,在硫酸体系中,对白合金进行直接浸出(常压-加压联合浸出)的对比试验。常压预浸条件为:液固比为 15 mL/g,初始硫酸浓度 $[H_2SO_4]_{ini}=145$ g/L, 90 °C 保温 6 h。常压预浸矿浆进而送高压釜进行加压浸出,浸出条件为:氧分压 0.5 MPa, 150 °C 保温 4 h,搅拌转速 600 r/min。在上述条件下,钴、铜浸出率分别为 74.82%和 5.40%,铁、硅浸出率分别为 42.65%和 9.19%,浸出渣中不溶性钴、铜的含量分别高达 14.28%和 21.86%,浸出矿浆过滤困难。由上述可见,在硫酸体系中难以取得理想的白合金直接浸出效果。

进一步进行了白合金直接焙烧预处理进而常压浸出的对比实验。焙烧时间恒定 2 h,常压浸出条件为 $[H_2SO_4]_{ini}=109.48$ g/L, 90 °C 保温 4 h。焙烧温度对后续常压浸出结果的影响见图 3。由图 3 可见,白合金经直接焙烧预处理后,浸出性能得以一定程度改善,在焙烧温度 600 °C 条件下,铜浸出率达到 93.29%,渣含铜量降至 1.74%,但钴浸出率偏低(仅 34.24%),渣

含钴量高达 42.50%,而铁浸出率亦高达 45.59%。因此,即使设置多段浸出或进一步提高焙烧温度,也难以同时兼顾有价金属浸出率及金属分离效果。

鉴于此,提出白合金碱焙烧预处理工艺思想,即通过碱焙烧有效破坏硅铁合金结构,使合金中硅转型成可溶性钠盐进而水洗脱除。在熔融碱中,单质硅、铁将发生如下反应,分别生成硅酸钠及铁酸钠:



2.2 焙烧碱用量

考察了碱用量分别为硅、铁反应所需 NaOH 理论量的 0.52、0.64、0.71、0.77 和 0.97 倍时对白合金焙烧渣水洗脱硅及进一步常压酸浸的影响。碱焙烧温度暂定 700 °C,保温 2 h。常压浸出条件为: $[H_2SO_4]_{ini}=96.02$ g/L, 90 °C 保温 4 h。实验结果见图 4 和 5。

由图 4 可见,当碱用量由理论量的 0.52 倍增至 0.71 倍时,白合金焙烧渣水洗脱硅率由 64.18%明显升高至 79.95%,随碱用量进一步提高至理论量的 0.97 倍,脱硅率略增至 83.93%,增幅不明显。

由图 5 可见,随焙烧碱用量由理论量的 0.52 倍增大至 0.64 倍,后续常压浸出中钴浸出率由 84.44%增大至 98.47%,铁浸出率也由 86.40%增大至 97.95%,渣含钴、铁分别降至 2.10%和 2.09%,而铜则完全保留在渣中。随碱用量进一步增大至理论量的 0.71 倍,铜开始明显浸出。由此可见,在 700 °C 焙烧 2 h 条件下,碱用量选择理论量的 0.64 倍是适宜的,有利于后续常压浸出中钴、铜的分离。

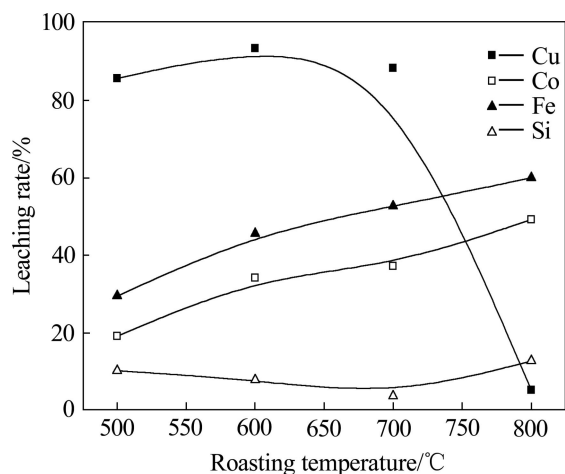


图 3 焙烧温度对预处理后钴白合金常压浸出的影响

Fig. 3 Effect of roasting temperature on atmospheric leaching of pretreated cobalt white alloy

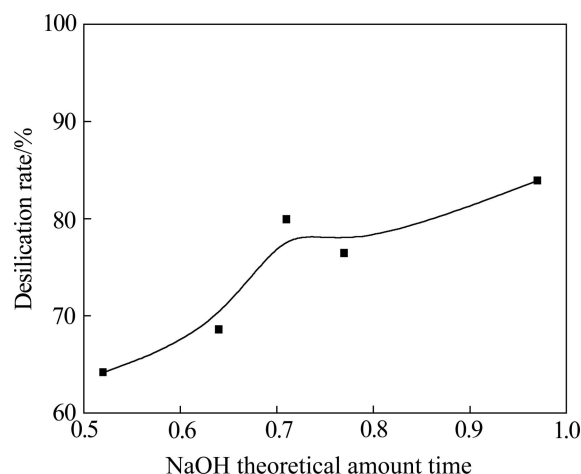


图 4 焙烧碱用量对钴白合金焙烧渣水洗脱硅的影响

Fig. 4 Effect of alkali dosage in roasting on water-washing desilication of roasted cobalt white alloy

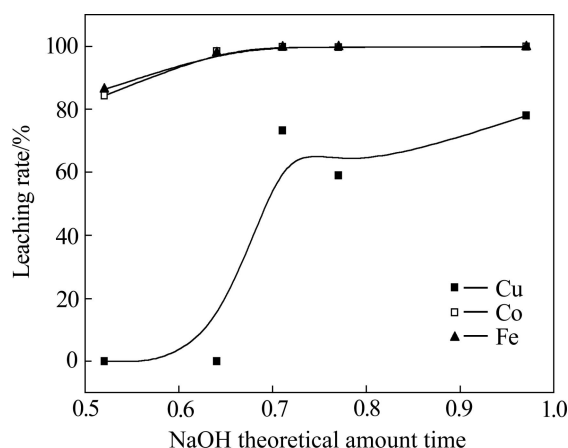


图 5 焙烧碱用量对预处理后钴白合金常压酸浸的影响

Fig. 5 Effect of alkali dosage in roasting on atmospheric leaching of pretreated cobalt white alloy

2.3 碱焙烧温度

在焙烧碱用量为理论量的 0.64 倍条件下, 分别考察了焙烧温度对白合金焙烧渣水洗脱硅及进一步常压酸浸的影响。碱焙烧时间固定为 2 h, 常压浸出条件为 $[H_2SO_4]_{ini}=96.02\text{ g/L}$, $90\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 4 h。实验结果见图 6 和 7。

由图 6 可见, 随焙烧温度由 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $600\text{ }^\circ\text{C}$, 白合金焙烧渣水洗脱硅率由 57.75% 升高至 66.57% , 渣含硅降至 2.87% 。随焙烧温度进一步升高, 硅脱除情况未见改善。

由图 7 可见, 白合金在焙烧温度 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内经预处理后, 在常压浸出中钴、铁浸出比较完全, 而铜则完全保留在浸出渣中, 钴、铜分离效果理想。

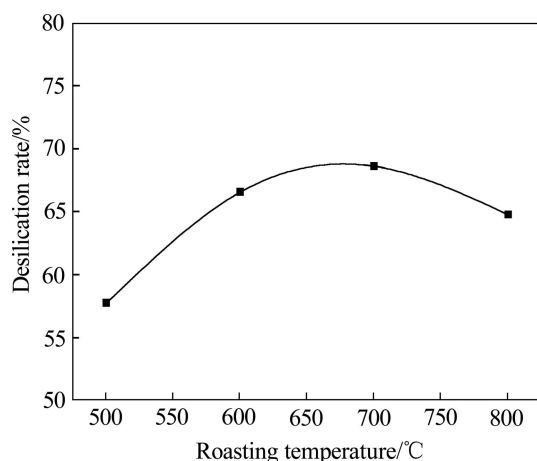


图 6 碱焙烧温度对钴白合金焙烧渣水洗脱硅的影响

Fig. 6 Effect of roasting temperature on water-washing desilication of roasted cobalt white alloy

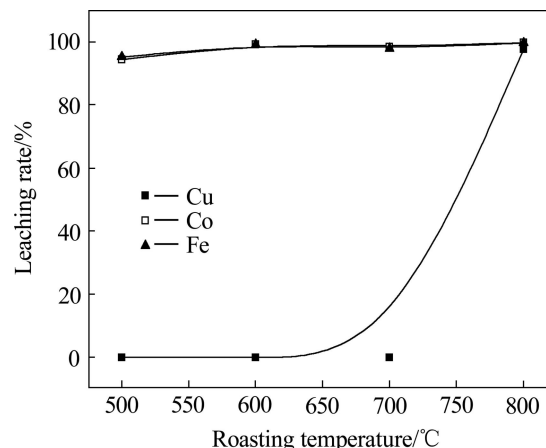


图 7 碱焙烧温度对预处理后钴白合金常压酸浸的影响

Fig. 7 Effect of roasting temperature on atmospheric leaching of pretreated cobalt white alloy

虽然当碱焙烧温度升高至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 金属铜也将大量溶出, 但此时浸出渣含铜仍高达 4.11% , 有待二次浸出才能保证铜回收率。且浸出液中铜、钴、铁浓度均较高, 不利于金属分离, 影响有价金属铜、钴的回收率。

因此, 综合考虑, 碱焙烧温度选择 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 为宜, 可使白合金在后续常压浸出中钴、铁浸出比较完全, 浸出率分别高达 99.24% 和 99.18% , 渣含钴、铁分别降至 1.2% 和 0.93% 。浸出液经黄钠铁矾法除铁后, 溶液含铁低于 1 mg/L , 可送钴回收工序。浸出渣中铜富集至 65.40% , 可送第二段氧化浸出以回收铜。

实验证明, 第二段采用 $\text{CuSO}_4+\text{H}_2\text{SO}_4$ 体系(初始铜离子浓度 $[\text{Cu}^{2+}]_{ini}=24\text{ g/L}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{ini}=137\text{ g/L}$), 经三级逆流浸出, 在浸出温度 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、各级保温 3 h 及液固比为 5 mL/g 等条件下, Cu 浸出率达 99.12% , 渣中含 Cu 低至 3.37% , 浸出效果良好。为保证铜、钴的回收率, 第二段残余浸出渣可以返回铜浸出, 而脱铜后液则可以返回钴浸出系统。

2.4 碱焙烧脱硅预处理对白合金物相的影响

白合金经碱焙烧脱硅预处理后 XRD 谱见图 8。经与图 1 比较可见, 经预处理, 白合金原有的 $(\text{Fe},\text{Co})\text{-Si}$ 合金结构遭到破坏, 出现 Co-Fe 合金相, 但由于 Si 只是部分脱除, 因此, 残余 Si 主要还是以 Fe_3Si 合金相形式存在。

于元素铁而言, 除主要物相 Fe_3Si 合金以及一定量 Co-Fe 合金相外, 另有部分铁以 Fe_2O_3 相形式存在, Fe_2O_3 应是碱焙烧产物铁酸钠在水洗脱硅过程中进一步发生水解反应的产物, 反应式如下:

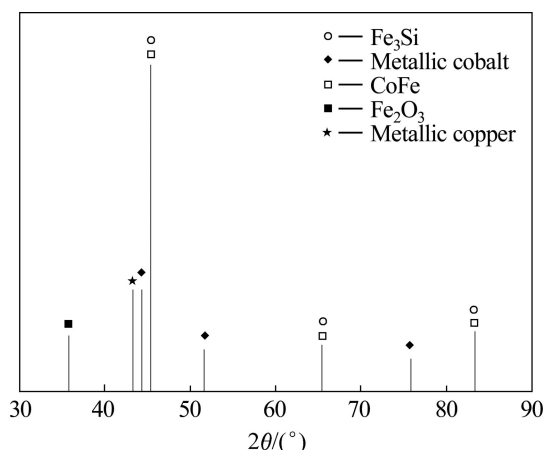
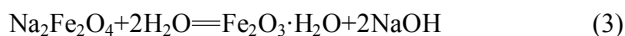


图 8 碱焙烧脱硅预处理后钴白合金 XRD 谱

Fig. 8 XRD pattern of cobalt white alloy after alkali-roasting and desilication pretreatment



进一步比较图 8 和图 1 可知, 经预处理后, 白合金中钴除以 Co-Fe 合金相形式存在外, 还有相当数量以金属钴相形式存在。

经碱焙烧脱硅预处理后, 白合金的形貌见图 9。由图 9 可见, 经预处理后, 细小合金颗粒受蚀严重并形成疏松蜂窝状聚合物, 即使有大颗粒合金尚未完全分解, 其外层也已形成了结构疏松的边缘层, 经 X 射线能谱分析可知, 该边缘层含有大量氧。由上述可见, 经碱焙烧预处理后, 白合金形貌发生明显改变, 原有的致密结构被明显破坏。

对由细小合金颗粒形成的聚合物进行 X 射线能谱分析, 其结果如图 10 所示。由图 10 可见, 聚合物 A 点处含有大量氧。据图 8 分析结果可知, 该处铁应该是以氧化态形式存在; 聚合物 B 点处几乎不含氧, 该

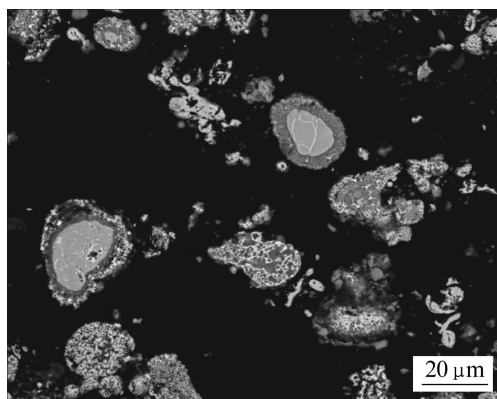


图 9 碱焙烧脱硅预处理后钴白合金的 SEM 像

Fig. 9 SEM image of cobalt white alloy after alkali-roasting and desilication pretreatment

处钴、铁应该是以金属态存在, 这与图 8 分析结果一致。

进一步对聚合物和大合金颗粒分别进行背散射电子像及元素面分布分析, 结果见图 11 和 12 所示。由图 11 中见, 聚合物中主要含铁、钴, 而硅分布量很低。对于大合金颗粒而言, 如图 12 所示, 虽然碱向合金颗粒内部渗透, 合金基体不断氧化并分解, 但颗粒内核仍保持原有形貌, 这说明碱焙烧脱硅预处理的效果受

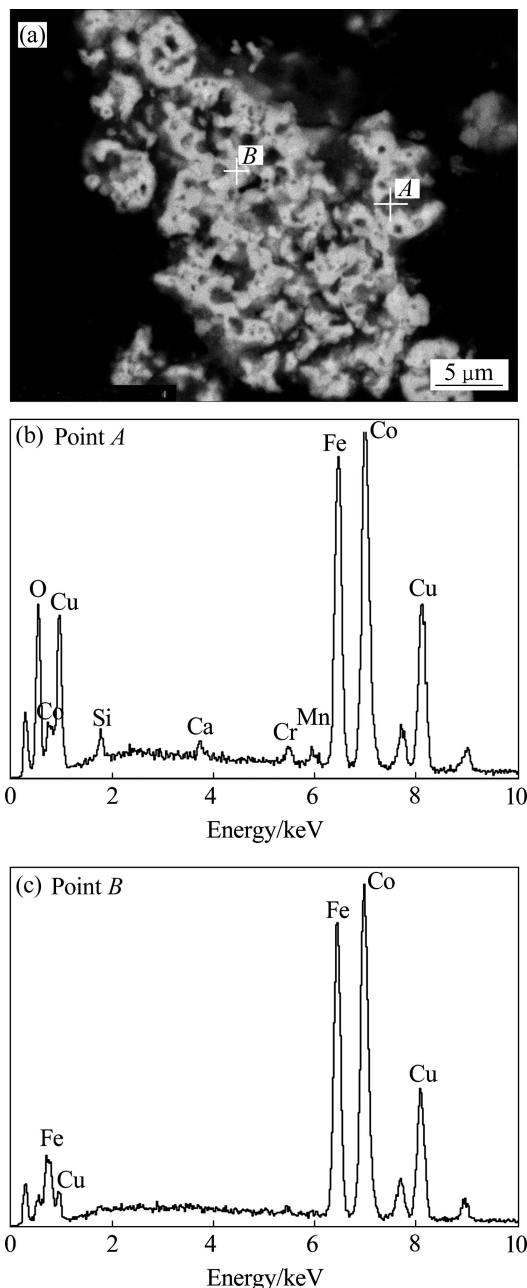


图 10 碱焙烧脱硅预处理后钴白合金颗粒聚合体的 SEM 像及能谱分析结果

Fig. 10 SEM image(a) and energy spectra((b), (c)) of particles aggregate in cobalt white alloy after alkali-roasting and desilication pretreatment

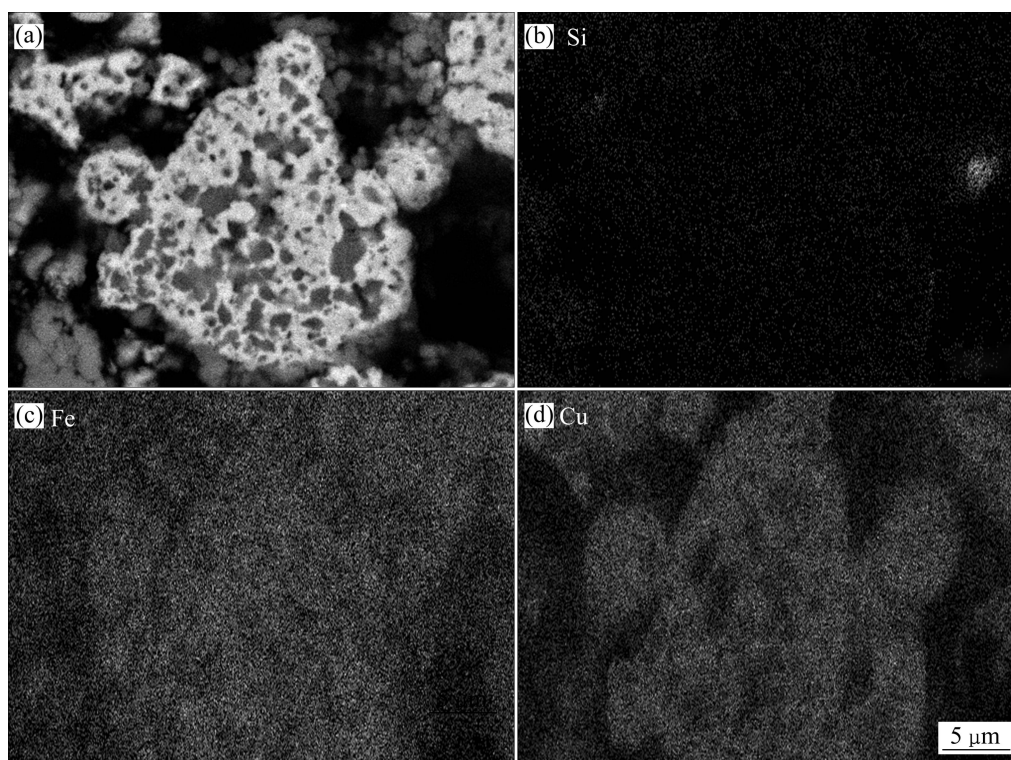


图 11 碱焙烧脱硅预处理后钴白合金颗粒聚合体背散射电子像及相关元素面分布图

Fig. 11 Backscattered electron image(a) and element surface distributions((b)–(d)) of particles aggregate in cobalt white alloy after alkali-roasting and desilication pretreatment

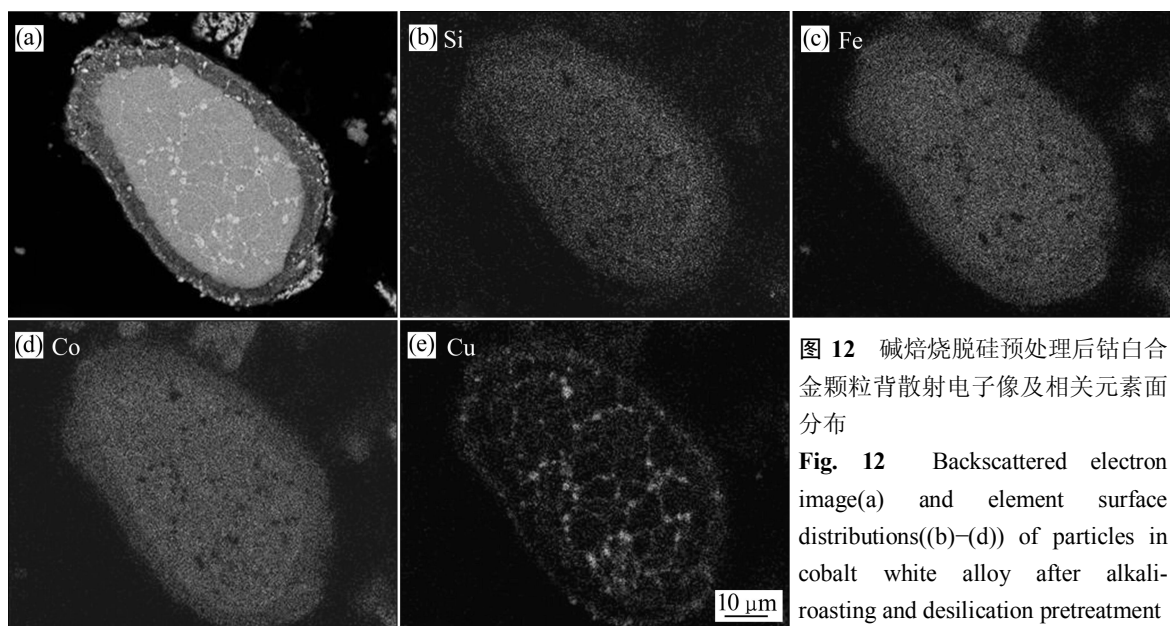


图 12 碱焙烧脱硅预处理后钴白合金颗粒背散射电子像及相关元素面分布

Fig. 12 Backscattered electron image(a) and element surface distributions((b)–(d)) of particles in cobalt white alloy after alkali-roasting and desilication pretreatment

合金颗粒大小明显影响。

无论图 11 还是图 12 中, 元素铜都是保持金属态并分散于基体物中, 这与图 8 分析结果也是一致的。

综上所述, 白合金经碱焙烧脱硅预处理后, 不仅结构去稳定化, 而且元素铁和钴均出现了易与酸反应

的物相(如 Co-Fe 合金、 Fe_2O_3 和金属钴), 因此, 较预处理前, 元素钴、铁浸出将变得容易得多。由于金属铜溶出需强氧化氛围, 其浸出要远比钴、铁难得多, 因此, 在常压浸出环节是易于控制并实现钴、铜分离的, 这与浸出实验结果也是相吻合的。

3 结论

1) 高硅钴白合金结构复杂, 难以直接硫酸浸出。在 600 °C 及 NaOH 用量为硅、铁反应所需 NaOH 理论量的 0.64 倍等条件下焙烧 2 h 后, 经水洗硅脱除率达到 66.57%, 再经常压硫酸浸出, 可使钴、铁浸出分别高达 99.24% 和 99.18%, 而铜则完全保留在浸出渣中, 渣中铜富集至 65.40%, 实现了钴、铜的较理想分离。

2) 经碱焙烧脱硅预处理后, 钴白合金形貌发生明显改变, 铁主要以 Fe_3Si 合金相形式存在, 此外还以 Co-Fe 合金相形式存在, 另有部分铁以 Fe_2O_3 形式存在; 元素钴除以 Co-Fe 合金相形式存在外, 还有相当数量以金属钴相存在; 元素铜则保持相对独立的金属相态。

3) 复杂钴白合金经碱焙烧脱硅预处理后, 可以采用两段常压酸浸工艺分段回收有价金属钴、铜, 即钴、铁在第一段高效浸出, 浸出液经黄钠铁矾除铁后可回收钴; 富铜渣经第二段氧化浸出以回收铜。

致谢:

在复杂钴白合金工艺矿物学分析过程中, 得到了北京矿冶研究总院矿产资源所汤集刚教授、隋娟玲高工的帮助, 在此深表谢意!

REFERENCES

- [1] 王永利, 徐国栋. 钴资源的开发和利用[J]. 河北北方学院学报: 自然科学版, 2005, 21(3): 19-21.
WANG Yong-li, XU Guo-dong. The development and use of cobalt resource[J]. Journal of Hebei North University: Natural Science Edition, 2005, 21(3): 19-21.
- [2] 王海北, 刘三平, 蒋开喜, 林江顺, 王玉芳. 我国钴生产和消费现状[J]. 矿冶, 2004, 13(3): 54-64, 55.
WANG Hai-bei, LIU San-ping, JIANG Kai-xi, LIN Jiang-shun, WANG Yu-fang. Present situation of cobalt's production and consumption in China[J]. Mining & Metallurgy, 2004, 13(3): 54-64, 55.
- [3] 焦翠燕, 郭学益. 钴白合金处理工艺进展及研究方向[J]. 金属材料与冶金工程, 2011, 39(2): 58-62.
JIAO Cui-yan, GUO Xue-yi. Progress and research direction of treatment technique for cobalt white alloy[J]. Metal Materials and Metal Metallurgy Engineering, 2011, 39(2): 58-62.
- [4] ACMA E. The effect of sulfur and reduction temperature on cobalt dissolution during sulfuric acid leaching of metallic matte[J]. Can Metall Q, 1997, 36(1): 25-29.
- [5] BURZYNSKA L, GUMOWSKA W, RUDNIK E. Influence of the composition of Cu-Co-Fe alloys on their dissolution in ammoniacal solutions[J]. Hydrometallurgy, 2004, 71(3/4): 447-455.
- [6] WHYTE R M, ORJANS J R, HARRIS G B, THOMAS J A. Development of a process for the recovery of electrolytic copper and cobalt from Rokana converter Slag[C]// SONES M S. Advances in Extractive Metallurgy. Montreal, Quebec: IMM, 1977: 57-68.
- [7] RUDNIK E, BURZYNSKA L, GUMOWSKA W. Hydrometallurgical recovery of copper and cobalt from reduction-roasted copper converter slag[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(1): 88-95.
- [8] WLODYKA J. Electrochemical dissolution of Co-Ni-Fe-Cu alloy[J]. Rudy Met Niezel, 2001, 46(8): 369-372.
- [9] 洪 侃, 杨幼明. 铜钴合金单膜电化学溶解造液试验研究[J]. 江西有色金属, 2008, 22(2): 19-22.
HONH Kan, YANG You-ming. On the electrochemistry dissolution of single membrane copper-cobalt alloy[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2008, 22(2): 19-22.
- [10] 洪 侃, 范进军, 卢 博, 杨幼明, 徐仕华, 费文根. 铜钴合金双膜电化学溶解造液造碱研究[J]. 江西理工大学学报, 2010, 31(2): 17-20.
HONH Kan, FAN Jin-jun, LU Bo, YANG You-ming, XU Shi-hua, FEI Wen-gen. Electrochemistry dissolution of copper-cobalt alloy in double membrane cell[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2010, 31(2): 17-20.
- [11] 王多冬, 赵中伟, 陈爱良, 陈星宇, 霍广生, 李洪桂. 难处理铜钴合金的氧化酸浸出[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(5): 1188-1193.
WANG Duo-dong, ZHAO Zhong-wei, CHEN Ai-liang, CHEN Xing-yu, HUO Guang-sheng, LI Hong-gui. Oxidative leaching of refractory Cu-Co white alloy in acid solution[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(5): 1188-1193.
- [12] 王含渊, 江培海, 张寅生, 黄忠森. 钴白合金湿法冶金工艺研究[J]. 矿冶, 1997, 6(1): 68-69, 77.
WANG Han-yuan, JIANG Pei-hai, ZHANG Yin-sheng, HUANG Zhong-miao. Research on hydrometallurgical process for cobalt white alloy[J]. Mining & Metallurgy, 1997, 6(1): 68-69, 77.
- [13] 夏文堂, 史海燕. 采用无污染氧化剂浸出钴白合金中钴铜的试验研究[J]. 矿冶, 2006, 15(3): 26, 27-29.
XIA Wen-tang, SHI Hai-yan. A novel process for extracting Co and Cu from cobalt white alloy in hydrochloric acid solution with pollution-free oxidant[J]. Mining & Metallurgy, 2006, 15(3): 26, 27-29.
- [14] 王振文, 徐晓辉, 阮书锋, 江培海. 钴白合金浸出工艺研究[J]. 矿冶, 2009, 18(4): 41-43, 60.

- WANG Zhen-wen, XU Xiao-hui, RUAN Shu-feng, JIANG Pei-hai. Study on leaching process of cobalt white alloy[J]. Mining & Metallurgy, 2009, 18(4): 41-43, 60.
- [15] 刘大星. 国内外钴的生产消费与技术进展[J]. 有色冶炼, 2000, 29(5): 4-9, 20.
- LIU Da-xing. Cobalt production, consumption and technical development at home and abroad[J]. Nonferrous Metallurgy, 2000, 29(5): 4-9, 20.
- [16] MUNNIK E, SINGH H, UYS T, BELLINO M, du PLESSIS J, FRASER K. Development and implementation of a novel pressure leach process for the recovery of cobalt and copper at Chambishi, Zambia[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(1): 1-10.
- [17] 彭忠东, 万文治, 胡国荣. 造渣熔炼-浸出方法处理 Cu-Co-Fe 合金的研究[J]. 有色矿冶, 2007, 23(1): 30-33.
- PENG Zhong-dong, WAN Wen-zhi, HU Guo-rong. Study of pre-process slag roasting during leaching Cu-Co-Fe alloy for cobalt[J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2007, 23(1): 30-33.
- (编辑 李艳红)