

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.04.015

福美钠同步脱除硫酸锌溶液中铜镉镍钴

程胜红¹ 刘三平² 刘雪飞¹ 郭纵² 郑朝振^{2,3}

(1. 刚果(布)黑角索瑞米股份有限公司, 黑角 999059, 刚果(布);

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

3. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 以含镉 30~60 mg/L、含钴 300~400 mg/L、含镍 60~100 mg/L 的高含杂硫酸锌溶液为研究对象, 针对传统锌粉置换除杂法锌粉消耗量大、成本偏高的问题, 使用福美钠实现了铜镉镍钴的同步脱除。优化除杂条件如下: 福美钠用量为理论量 1.5 倍, 亚硝酸钠用量为理论量 1 倍, 反应时间 1 h, 反应温度 75~85℃。渣量为 30 kg/m³-液, 渣含锌和含钴在 8% 左右, 渣含镉和含镍在 1.5% 左右, 锌损失率为 0.02%。铜脱除率为 99.11%, 镉脱除率为 99.98%, 钴脱除率为 99.99%, 镍脱除率为 98.94%, 可以实现铜镉镍钴的同步脱除。

关键词: 福美钠; 沉锌渣浸出液; 同步除杂; 铜镉镍钴

中图分类号: TQ 150.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2024)04-0587-07

Simultaneous removal of copper, cadmium, nickel and cobalt from zinc sulfate solution with sodium dimethyl dithiocarbamate

CHENG Shenghong¹ LIU Sanping² LIU Xuefei¹ GUO Zong² ZHENG Chaozhen^{2,3}

(1. SOREMI SA, Pointe-Noire 999059, Congo;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

3. School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of high consumption and cost of zinc powder in the conventional impurity removal method, the purification of copper, cadmium, nickel and cobalt from zinc sulfate solution (containing 30–60 mg/L cadmium, 300–400 mg/L cobalt, and 60–100 mg/L nickel) was achieved by using sodium dimethyl dithiocarbamate. The optimized impurity removal conditions are shown as follows: the dosage of sodium dimethyl dithiocarbamate was 1.5 times the theoretical amount, the dosage of sodium nitrite was 1 times the theoretical amount, the reaction time was 1 h, and the reaction temperature was 75–85 °C. The slag content was 30 kg/m³-liquid. The zinc and cobalt content in slag was about 8% and the cadmium and nickel content was about 1.5%, the loss percent of zinc was 0.02%. The removal efficiency was 99.11% for copper, 99.98% for cadmium, 99.99% for cobalt and 98.94% for nickel. The synchronous removal of copper, cobalt, nickel and cobalt can be achieved.

Key words: sodium dimethyl dithiocarbamate; leaching solution of zinc slag; impurity simultaneous removal; copper, cadmium, nickel and cobalt

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2904604)

第一作者: 程胜红, 硕士, 高级工程师, 主要从事工作企业管理和选冶技术研究。E-mail: csh8093@163.com

通信作者: 郑朝振, 博士研究生, 高级工程师; E-mail: zhengchaozhen123@163.com

刚果(布)黑角索瑞米公司铜铅锌多金属矿的湿法冶炼工艺包括浓密—浸出—浓密洗涤—萃取—反萃—电积, 锌萃余液中剩余一定浓度的锌, 可以采用中和沉锌—酸溶—净化—电积的方式回收。由于经过富集, 沉锌渣酸溶液中的镉、镍和钴等浓度较

传统硫酸锌溶液高，分别达到 30~60、300~400、60~100 mg/L，采用传统锌粉置换的方法很难高效脱除杂质，锌粉用量极大，亟需开发新型除杂工艺。

福美钠是一种重金属螯合剂，化学名称为二甲基二硫代氨基甲酸钠，分子式为 $C_2H_6NS_2Na \cdot 2H_2O$ ，化学结构如图 1 所示。福美钠易与重金属离子螯合，生成水溶性差的螯合盐，进而脱除溶液中的重金属。与其他除杂药剂如黄药和 β -萘酚相比，福美钠使用方法简单、价格更便宜，分子量更小，一般来说产生的渣量更少^[1]。福美钠能够在多种重金属离子共存的情况下一次性完成凝聚，形成的金属沉淀物在 200~250 °C 高温下稳定不分解，沉淀物在稀酸溶液中不渗出，无二次污染，处置时安全。鉴于以上优点，新型除杂药剂福美钠得到了广泛关注^[2-5]。

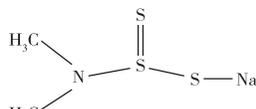


图 1 福美钠分子结构图

Fig. 1 Structure of sodium dimethyl dithiocarbamate

彭情亮等^[1]对以福美钠代替锌粉作为净化剂去除 $ZnSO_4$ 溶液中的 Co^{2+} 进行了研究，发现在福美钠用量 400 mg/L、 $NaNO_2$ 加入量 23 mg/L、初始 pH 值 4.0、反应温度 75 °C、反应时间 1.5 h 条件下，可以将 $ZnSO_4$ 溶液中的 Co^{2+} 脱除至 0.2 mg/L 以下。福美钠除钴后 $ZnSO_4$ 溶液连续电积 10 个周期，平均电流效率为 93.33%，锌片质量达到国标 0# 锌标准。蔚龙凤等^[6]探究了福美钠从稀土冶炼废水中去除铅、锌、镉等重金属的主要因素及最佳工艺条件。结果表明福美钠用量对重金属去除率的影响最大，搅拌速度次之，反应时间和废水 pH 值的影响较小。在 pH 值为 9.5、反应时间 15 min、福美钠加入量 30 mg/L、搅拌速度 180 r/min 条件下，处理液后液中总 Pb < 0.2 mg/L、总 Zn < 1.0 mg/L、总 Cd < 0.05 mg/L，符合排放标准要求。西北铅锌冶炼厂^[7]原采用三段逆锑盐净化法，但该法锌粉单耗较大、处理温度高，除杂效果不彻底，成本较高，净化渣中杂质金属分散后续处理流程复杂，可能导致 Co、Ni 等杂质在系统中闭路循环，回收难度大。生产实践表明，在去除 Cu、Cd、As、Sb 后，通过使用除钴剂福美钠和氧化剂亚硝酸钠可以去除 Co、Ni 及残余 Cu、Cd 等杂质，三段净化后

产出的溶液达到电解新液的质量要求。福美钠用量 = $(Co + Cd \text{ 含量}) \times (17 \sim 20) \times \text{流量} / 200$ ；亚硝酸钠用量 = $(Co + Cd \text{ 含量}) \times 2.5 \times \text{流量} / 40$ 。其生产工艺流程如图 2 所示。

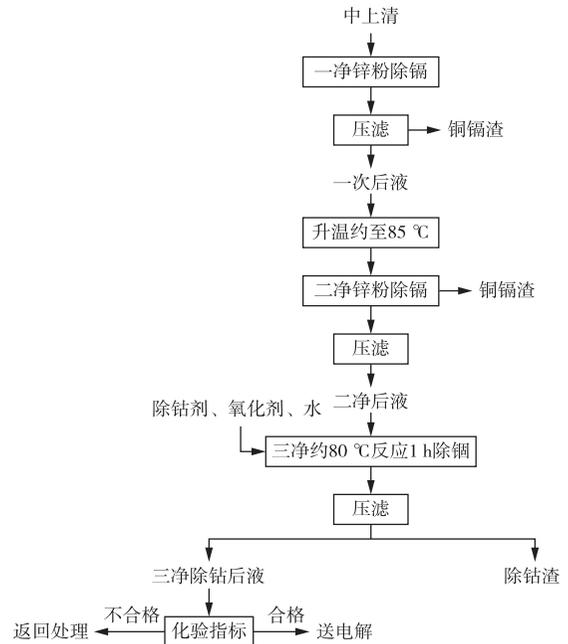


图 2 西北铅锌冶炼厂新型除钴剂净化工艺流程

Fig. 2 New type of cobalt removal agent purification process of Northwest Lead and Zinc Smelter

呼伦贝尔驰宏矿业有限公司使用福美钠进行了生产实践研究^[8]。首先，将含硫酸锌的净化前液经过一段低温锌粉净化，将铜镉控制到非常低的范围内，二段净化使用福美钠和亚硝酸钠将 Co 除到 1.0 mg/L，三段净化使用活性炭和硫酸铜吸附并除去残余的有机试剂。合格的净化三段后液 Cu 浓度低于 0.2 mg/L，Cd 低于 1.0 mg/L，Co 低于 1.0 mg/L。驰宏矿业的试验研究及生产实践结果表明，采用福美钠净化方法不但能降低生产过程中能耗、减少锌粉单耗、降低锌片加工成本，而且能够有效提高锌冶炼过程中锌的回收率。相较于传统锑盐除钴方法，净化控制温度低(75~80 °C)、处理时间短(1.5 h)，净化后的二段溶液含 $Co \leq 1 \text{ mg/L}$ ，净化渣量仅是传统净化方法渣量的 1/6，渣含锌少，渣中含钴高达 4% 以上。

巴紫锌业锌冶炼采用的原料特点为铁高、钴高、硫高、锌低，产出的中浸上清液含钴高达 50~100 mg/L，为控制成本，巴紫锌业^[9]对锑盐、 β -萘酚、福美钠除钴几种方法进行了对比。结果表明：1) 锑盐除钴净化方法在生产实际过程中除钴效果不稳定，现场操作难度大，适合于 Co 含量较低

的硫酸锌净化。2) 萘酚除钴法除 Co 效果较好, 系统稳定且现场操作简单, 但该方法仅对除 Co 有效, 对其他杂质元素无效, 当硫酸锌溶液中 Fe、Ni、As、Ge 等杂质元素含量较高时, 仍需采取其他措施进行去除。3) 福美钠除钴净化方法除杂广泛, 不仅除 Co 效果较好, 对硫酸锌中 Fe、Ni、Cd、Cu 等其他杂质元素去除效果也较好, 且此工艺现场操作简单, 生产连续稳定。三种除钴净化方法中, 福美钠除钴净化方法锌粉单耗最低, 生产吨阴极锌消耗锌粉 40~50 kg, 接近铈盐除钴净化法消耗量的一半; 该方法加工成本也最低, 生产吨阴极锌消耗新型药剂的成本为 134.31 元, 比另外两种除钴净化方法低 100 元以上。以上研究基础表明, 福美钠在去除锌冶炼净化系统中铜镉镍钴等杂质方面具有优势。

本文以含镉 30~60 mg/L、含钴 300~400 mg/L、含镍 60~100 mg/L 的高含杂硫酸锌溶

液为研究对象, 采用福美钠进行铜镉镍钴的净化。重点探究了福美钠用量、亚硝酸钠用量、反应时间、反应温度对铜镉镍钴的脱除效率以及锌损失率的影响。

1 试验方法

1.1 试剂与仪器

福美钠为工业纯, 其余药品皆为分析纯。无特殊说明情况下使用的试剂皆未进行进一步纯化。主要设备包括 pH 计、IKA RW 200 数显搅拌机。除杂后矿浆采用真空抽滤, 使用直径 187 mm 的漏斗和 SHB-III G 型台式循环水式多用真空泵进行过滤, 真空度: $-0.025 \sim -0.035$ MPa。

1.2 试验方法

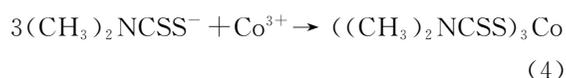
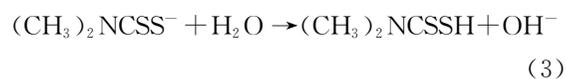
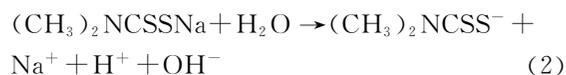
福美钠净化试验采用的沉锌渣酸溶液含量见表 1。

表 1 酸溶后液组成

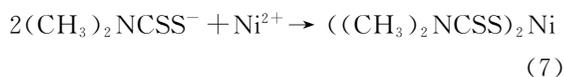
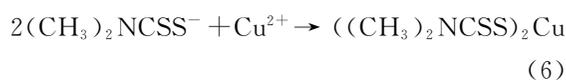
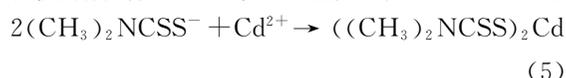
元素	Cu	Zn	Cd	Co	Ni
含量	1.24	98.56	32.07	336.88	77.51

取一定体积酸溶液加入烧杯, 将烧杯放入设定好温度的恒温水浴锅, 达到设定温度后, 启动 IKA RW 200 数显搅拌机搅拌, 按试验设定量准确加入福美钠和亚硝酸钠溶液, 开始计时, 在烧杯开口覆盖塑料膜以减少蒸发。试验结束后, 过滤洗涤, 滤液和滤渣分别进行化学成分分析。

福美钠与钴生成螯合盐时, 三价钴盐的溶度积是二价钴盐的十万分之一。因此, 为了将 Co 脱除至较低浓度, 应加入氧化剂将 Co²⁺ 氧化成 Co³⁺。采用 NaNO₂ 作为氧化剂, 福美钠除钴的反应如式(1)~(4)所示。



福美钠除铜、镉、镍的反应如式(5)~(7)所示。



福美钠(含 2 个结晶水)和亚硝酸钠理论量计算公式如式(8)和式(9)所示。

$$\text{福美钠}(\text{mg/L}) = \sum([\text{Me}] / M_{\text{Me}} \times M_{\text{福美钠}} \times f) \quad (8)$$

$$\text{亚硝酸钠}(\text{mg/L}) = [\text{Co}] / M_{\text{Co}} \times M_{\text{NaNO}_2} \quad (9)$$

式中, [Me] 为杂质离子浓度, mg/L; M_{Me} 为杂质元素摩尔质量, g/mol; $M_{\text{福美钠}}$ 为福美钠摩尔质量, 179.2 g/mol; f 为福美根阴离子与杂质离子的配位系数, Ni²⁺ 对于 Co³⁺, 配位系数为 3。[Co] 为钴离子浓度, mg/L; M_{Co} 为钴摩尔质量, g/mol; M_{NaNO_2} 为亚硝酸钠摩尔质量, 69.0 g/mol。

在无特殊说明时, 福美钠净化试验采用的条件为温度 85 °C、反应时间 1 h、亚硝酸钠用量为理论量的 1 倍, 福美钠用量为理论用量的 1.5 倍。

2 结果与讨论

2.1 福美钠用量的影响

福美钠用量是锌渣酸溶后液除杂效果的重要影响因素。首先测试了不同福美钠用量条件下, 铜镉

钴镍的去除效率。结果表明，随着福美钠用量的增加，杂质脱除效率提高。当福美钠用量为理论量的1倍时，镉、钴、镍脱除完全；进一步提高福美钠用量时，福美钠将与锌结合，渣含锌由8%左右增长至17.5%，渣中杂质镉、钴、镍含量下降(图3和图4)。因此，推荐福美钠用量为理论量的1倍。

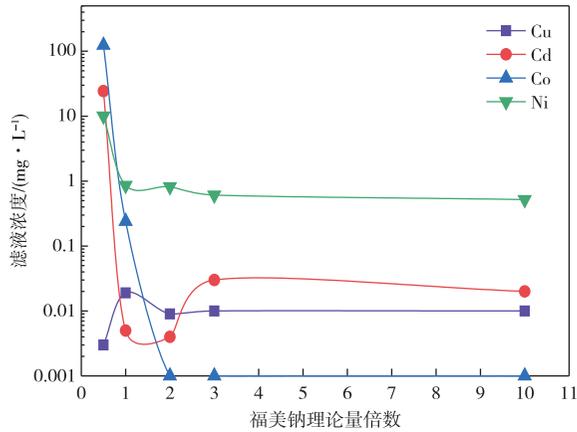


图3 福美钠理论量倍数与滤液杂质金属含量的关系 (温度 85 ℃; 反应时间 1 h; 亚硝酸钠用量为理论量的 3 倍)
Fig. 3 Relationships between the theoretical multiple of sodium dimethyl dithiocarbamate and the concentration of impurities in filtrate (Temperature: 85 ℃; Time: 1 h; Sodium nitrite dosage: 3 times the theoretical amount)

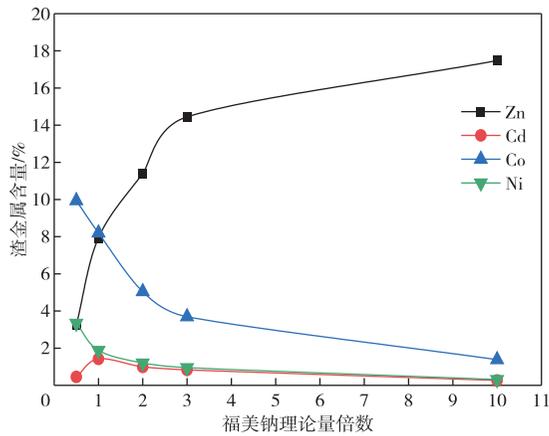


图4 福美钠理论量倍数与渣金属含量的关系 (温度 85 ℃; 反应时间 1 h; 亚硝酸钠用量为理论量的 3 倍)
Fig. 4 Relationships between the theoretical multiple of sodium dimethyl dithiocarbamate and the concentration of impurities in slag (Temperature: 85 ℃; Time: 1 h; Sodium nitrite dosage: 3 times the theoretical amount)

2.2 亚硝酸盐的影响

亚硝酸钠的主要作用是氧化与活化，通过将二价钴氧化为三价钴，可以达到深度除钴的目的。在福美钠用量为理论量 3 倍的条件下，随着亚硝酸钠理论量倍数的增加，杂质脱除效果变好(图 5)。试

验结果表明净化渣金属含量与亚硝酸钠用量没有明显关系(图 6)，主要与福美钠用量有关。当亚硝酸钠用量为理论量的 1 倍时，镉钴镍脱除完全，推荐亚硝酸钠用量为理论用量的 1 倍。

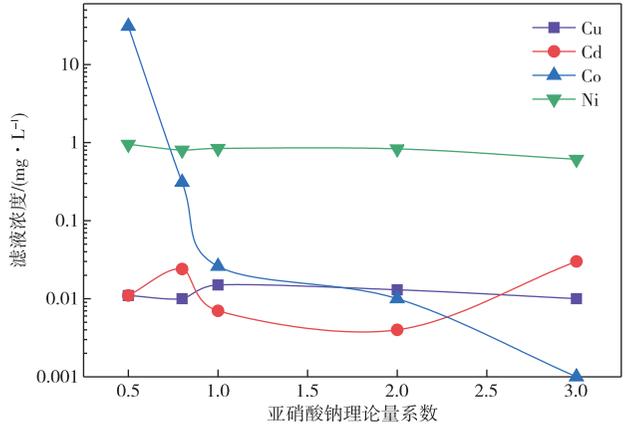


图5 亚硝酸钠理论量倍数与滤液杂质金属含量的关系 (温度 85 ℃; 反应时间 1 h; 福美钠用量为理论量的 3 倍)
Fig. 5 Relationships between the theoretical multiple of sodium nitrite and the concentration of impurities in filtrate (Temperature: 85 ℃; Time: 1 h; Sodium dimethyl dithiocarbamate dosage: 3 times the theoretical amount)

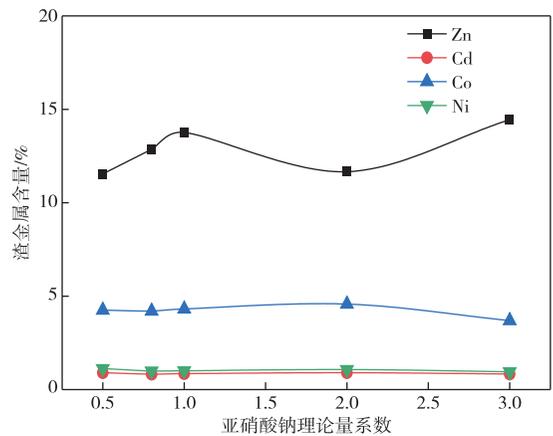


图6 亚硝酸钠理论量倍数与渣金属含量的关系 (温度 85 ℃; 反应时间 1 h; 福美钠用量为理论量的 3 倍)
Fig. 6 Relationships between the theoretical multiple of sodium nitrite and the concentration of impurities in slag (Temperature: 85 ℃; Time: 1 h; Sodium dimethyl dithiocarbamate dosage: 3 times the theoretical amount)

2.3 温度的影响

如图 7 和图 8 所示，随着温度的提高，除杂效果变好；当温度提升至 75 ℃ 以上时，可以起到理想的除杂效果，钴、镉、镍可脱除至电积液要求。此外，渣含锌和钴呈负相关，即随着温度的提高，渣含锌降低，渣含钴升高。推测原因可能是，在福美钠净化过程中，发生福美锌向福美钴转化的过

程，由于溶液含锌较高，福美根较易与锌结合优先生成福美锌，但由于福美钴的溶度积更小，生成的福美锌将向福美钴转变，温度由低转高的过程，更有利于这个转化。以上推测与试验现象吻合，试验中发现在刚加入福美钠时有白色渣(福美锌)产生，随着反应的进行白色渣逐渐转化为绿色(福美钴)。根据试验结果，推荐福美钠净化温度在 75~85 ℃。

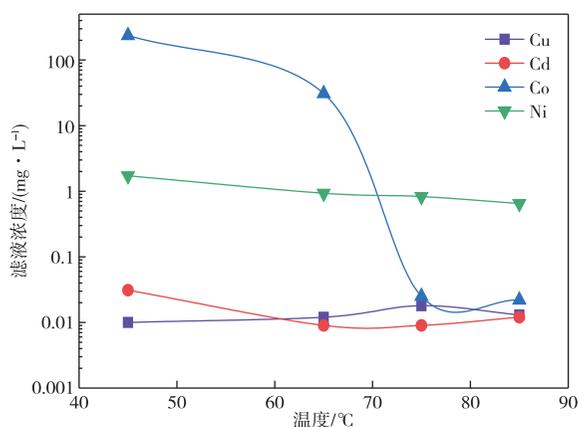


图 7 温度与与滤液杂质金属含量的关系
(反应时间 1 h; 亚硝酸钠用量为理论量的 1 倍;
福美钠用量为理论量的 1.5 倍)

Fig. 7 Relationships between temperature and the concentration of impurities in filtrate (Time: 1 h; Sodium nitrite dosage: 1 times the theoretical amount; Sodium dimethyl dithiocarbamate dosage: 1.5 times the theoretical amount)

表 2 福美钠净化反应时间条件试验结果(反应温度 85 ℃; 亚硝酸钠用量为理论量的 1 倍;
福美钠用量为理论量的 1.5 倍)

Table 2 Experimental results under different reaction time (Temperature: 85 ℃; Sodium nitrite dosage: 1 times the theoretical amount; Sodium dimethyl dithiocarbamate dosage: 1.5 times the theoretical amount)

项目	元素	反应时间/min		
		20	40	60
滤液/(mg · L ⁻¹)	Cu	0.013	0.012	0.013
	Cd	0.021	0.006	0.012
	Co	1.29	0.080	0.022
	Ni	0.65	0.56	0.65
渣/%	Zn	7.23	7.15	7.96
	Cd	1.35	1.39	1.47
	Co	7.94	8.00	8.08
	Ni	1.64	1.64	1.66
脱除率/%	Cu	98.95	99.03	98.95
	Cd	99.93	99.98	99.96
	Co	99.62	99.98	99.99
	Ni	99.16	99.28	99.16

2.5 溶液 pH 值的影响

如表 3 所示，溶液 pH 值对除杂效果影响不

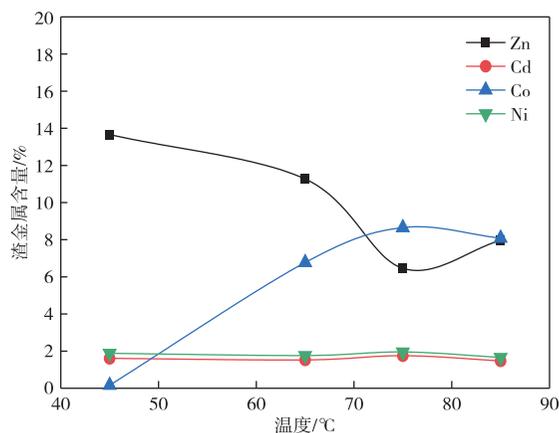


图 8 温度与与渣金属含量的关系(反应时间 1 h; 亚硝酸钠用量为理论量的 1 倍; 福美钠用量为理论量的 1.5 倍)

Fig. 8 Relationships between temperature and the concentration of impurities in slag (Time: 1 h; Sodium nitrite dosage: 1 times the theoretical amount; Sodium dimethyl dithiocarbamate dosage: 1.5 times the theoretical amount)

2.4 反应时间的影响

福美钠净化反应速度较快，反应 20 min 时，镉钴镍杂质脱除相对完全；反应 40 min 时，镉钴镍杂质脱除完全，结果详见表 2。试验中观察到白色渣(福美锌)，在 2~3 min 内即可完全转化为绿色渣(福美钴)。根据试验结果，推荐福美钠净化时间为 1 h。

大，在溶液 pH 值分别为 2.0 和 5.0 时，都可以取得较好的除杂效果，镍镉钴脱除率均高于 99%。

表 3 福美钠净化溶液 pH 值条件试验结果(反应温度 85 ℃; 反应时间 1 h; 亚硝酸钠用量为理论量的 1 倍; 福美钠用量为理论量的 1.5 倍)

Table 3 Experimental results under different pH values (Temperature: 85℃; Time: 1 h; Sodium nitrite dosage: 1 times the theoretical amount; Sodium dimethyl dithiocarbamate dosage: 1.5 times the theoretical amount)

项目	元素	pH 值	
		2.0	5.0
滤液/(mg · L ⁻¹)	Cu	0.007	0.013
	Cd	0.002	0.012
	Co	0.001	0.022
	Ni	0.22	0.65
渣/%	Zn	10.52	7.96
	Cd	2.04	1.47
	Co	5.49	8.08
	Ni	1.32	1.66
脱除率/%	Cu	99.44	98.95
	Cd	99.99	99.96
	Co	100.0	99.99
	Ni	99.72	99.16

2.6 综合条件试验

根据以上条件试验优化结果, 得出最优除杂条件为: 福美钠和亚硝酸钠用量为理论量 1 倍、温度控制在 75~85 ℃、反应时间 1 h。采用该工艺参数条件进行综合条件试验, 结果表明当福美钠和亚硝酸钠用量均为理论量的 1 倍时, 钴和镍无法完全脱

除, 需其中 1 种试剂过量, 才可起到较好的除杂效果。在反应温度 85 ℃、反应时间 1 h 条件下, 通过改变福美钠和亚硝酸钠的理论量系数, 对比进行了 5 组综合条件试验, 试验结果见表 4。得到的福美渣全元素分析结果见表 5。

表 4 福美钠净化综合条件试验结果

Table 4 Results of comprehensive condition test for purification

项目	试验编号					
	1 (福美钠理论量倍数 1; 亚硝酸钠理论量倍数 1)	2 (福美钠理论量倍数 1.5; 亚硝酸钠理论量倍数 1)	3 (福美钠理论量倍数 2; 亚硝酸钠理论量倍数 1)	4 (福美钠理论量倍数 1.5; 亚硝酸钠理论量倍数 1)	5 (福美钠理论量倍数 1; 亚硝酸钠理论量倍数 2)	
滤液/ (mg · L ⁻¹)	Cu	0.009	0.011	0.010	0.013	0.017
	Cd	0.033	0.008	0.012	0.012	0.007
	Co	157.23	0.03	0.03	0.022	0.005
	Ni	1.43	0.82	0.80	0.65	0.75
	As	/	/	0.014	/	/
	Sb	/	/	—	/	/
	Fe	/	/	0.058	/	/
	Al	/	/	—	/	/
渣/%	Zn	10.78	7.64	12.50	7.96	/
	Cd	1.80	1.44	1.10	1.47	/
	Co	4.18	/	5.33	8.08	/
	Ni	2.10	1.79	1.19	1.66	/
脱除率/%	Cu	99.27	99.11	99.19	98.95	98.63
	Cd	99.90	99.98	99.96	99.96	99.98
	Co	53.33	99.99	99.99	99.99	100.0
	Ni	98.16	98.94	98.97	99.16	99.03
损失率/%	Zn	/	0.02	0.04	/	/

表5 福美渣全元素分析

Table5 Element analysis of slag

/%

元素	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	
含量	0.28	0.42	0.41	0.03	2.42	—	0.92	0.23	0.00	0.01	
元素	As	Ba	Cl	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	V	Zn
含量	—	—	—	8.08	0.011 8	1.22	1.66	0.096	0.018	0.001 1	7.96

综合以上条件优化试验结果以及综合试验结果，在后续工业生产中，建议控制福美钠用量为理论量的1.5倍，亚硝酸钠用量为理论量的1倍，稍微过量添加福美钠可确保杂质完全脱除。此时，沉锌渣酸溶液经福美钠净化后的渣量为30 kg/m³，渣含锌和含钴在8%左右，渣含镉和含镍在1.5%左右，锌损失率为0.02%。

3 结论

采用新型药剂福美钠对沉锌渣酸溶液进行深度除杂除杂，最佳除杂条件为：控制福美钠用量为理论量的1.5倍、亚硝酸钠用量为理论量的1倍、反应时间1 h、反应温度75~85℃。在该最佳条件下，每m³沉锌渣酸溶液渣量为30 kg，渣含锌和含钴在8%左右，渣含镉和含镍在1.5%左右，锌损失率为0.02%。铜脱除率为99.11%，镉脱除率为99.98%，钴脱除率为99.99%，镍脱除率为98.94%，可以实现铜钴镍钴的同步脱除。除杂后液对后续电积无不良影响，可保证生产的连续稳定运行。

参考文献

- [1] 彭情亮, 黄文浩, 张旭泳. 福美钠应用于硫酸锌溶液除钴的试验研究[J]. 铜业工程, 2023, 181(3): 152-158.
PENG Q L, HUANG W H, ZHANG X Y. Removal of cobalt from zinc sulfate solution by sodium dimethyl dithiocarbamate [J]. Copper Engineering, 2023, 181(3): 152-158.
- [2] 刘宝臻, 李美蓉, 李欣颖. 福美钠净化硫酸锌溶液的探讨[J]. 云南化工, 2021, 48(6): 65-67.
LIU B Z, LI M R, LI X Y. Study on the purification of zinc sulfate solution with fume sodium[J]. Yunnan Chemical Technology, 2021, 48(6): 65-67.
- [3] 马晓磊. 福美钠对硫酸锰溶液净化的影响研究[J]. 新疆有色金属, 2020, 43(5): 90-96.
MA X L. Study on the effect of sodium dimethyl dithiocarbamate on the purification of manganese

sulfate solution[J]. XinJiang Youse Jinshu, 2020, 43(5): 90-96.

- [4] 梁焕龙, 谢营邦, 罗思强, 等. 福美钠在锌浸出液中除钴的作用[J]. 矿冶, 2015, 24(6): 49-51.
LIANG H L, XIE Y B, LUO S Q, et al. The function of cobalt removal from zinc sulfate solution with ziram [J]. Mining and Metallurgy, 2015, 24(6): 49-51.
- [5] 王国栋, 伍贺东, 徐学鸥, 等. 新型除钴有机试剂对锌电解影响的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(4): 28-31.
WANG G D, WU H D, XU X O, et al. Study on effects of new organic reagents on cobalt removal in zinc electrolytic [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(4): 28-31.
- [6] 蔚龙凤, 王海珍. 螯合沉淀法去除稀土冶炼废水中的重金属试验研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(6): 644-649.
WEI L F, WANG H Z. Removal of heavy metals from rare earth hydrometallurgical waste water by chelating precipitation method[J]. Hydrometallurgy of China, 2023, 42(6): 633-649.
- [7] 黄建强, 张建萍, 张建峰. 湿法炼锌新型除钴剂对电解工序的影响及生产控制[J]. 甘肃冶金, 2022, 44(4): 74-76.
HUANG J Q, ZHANG J P, ZHANG J F. Influence of new cobalt remover on electrolysis process and production control of zinc hydrometallurgy [J]. Gansu Metallurgy, 2022, 44(4): 74-76.
- [8] 梁艳辉, 王国栋. 新型有机剂净化除钴方法在生产实践中研究与应用[J]. 矿冶, 2018, 27(3): 75-78.
LIANG Y H, WANG G D. Study and application of new method of removing cobalt by organic reagent in production practice [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(3): 75-78.
- [9] 邬飞. 湿法炼锌几种除钴净化工艺生产实践[J]. 中国有色冶金, 2021(4): 53-59.
WU F. Production practice of several cobalt removal and purification processes of zinc hydrometallurgy. China Nonferrous Metallurgy, 2021(4): 53-59.