doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.014
引用格式：范道焱. 高电流密度下添加剂与有机物对铜电积过程及阴极铜质量的影响[J]. 矿冶，2026，35(1)：109-114.
FAN Dao yan. Effects of additives and organic matter on copper electrowinning process and cathode quality under high current density[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 109-114.

高电流密度下添加剂与有机物对铜电积过程及阴极铜质量的影响

范道焱[1,2]
（1. 紫金矿业集团股份有限公司，福建 上杭 364200；
2. 厦门紫金矿冶技术有限公司，福建 厦门 361000）

摘 要：为满足刚果（金）某铜钴矿湿法冶炼厂扩产及优化电积工艺的需求，本研究通过定制电积装置，在现场生产条件下系统开展了高电流密度铜电积试验。试验重点探究了电流密度、添加剂（古尔胶、硫脲）用量及电积液中有机物（油）含量对阴极铜形貌、质量及电积能耗的综合影响。结果表明，在电流密度320 A·m^{-2}、电积液铜离子浓度52.24 g·L^{-1}、硫酸浓度175 g·L^{-1}、有机物含量25 ppm（1 ppm=10^{-6}）的条件下，通过控制电积液温度40~42 ℃、流量75 L·m^{-2}·h^{-1}（铜离子浓度差4~4.5 g·L^{-1}），并优化添加剂用量（古尔胶150 g·t^{-1} Cu，硫脲50 g·t^{-1} Cu），可获得外观平整致密、化学成分符合A级铜标准的高品质阴极铜，此时电流效率达96.87%，吨铜电耗为1 940.99 kWh。本研究明确了高电流密度下获得优质阴极铜的工艺控制窗口，为工业化高效稳定生产提供了关键参数依据。

关键词：高电流密度铜电积；古尔胶；硫脲；有机物含量；阴极铜质量；电流效率；电积能耗
中图分类号：TF811 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0109-06

Effects of additives and organic matter on copper electrowinning process and cathode quality under high current density

FAN Daoyan[1,2]
(1. Zijin Mining Group Co. Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China;
2. Xiamen Zijin Mining and Metallurgy Technology Co. Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China)

Abstract: To meet the needs of production expansion and optimization of the electrowinning process at a copper-cobalt hydrometallurgical plant in the Democratic Republic of the Congo (DRC), this study systematically conducted high-current-density copper electrowinning experiments using customized equipment under on-site production conditions. The investigation focused on the comprehensive effects of current density, additive (guar gum and thiourea) dosage, and organic matter (oil) content in the electrolyte on cathode copper morphology, quality, and energy consumption. The results indicate that under the conditions of a current density of 320 A·m^{-2}, copper ion concentration of 52.24 g·L^{-1}, sulfuric acid concentration of 175 g·L^{-1}, and organic matter content of 25 ppm (1 ppm=10^{-6}) in the electrolyte, by controlling the electrolyte temperature at 40~42 ℃ and flow rate at 75 L·m^{-2}·h^{-1} (copper ion concentration difference of 4~4.5 g·L^{-1}), and optimizing additive dosages (guar gum 150 g·t^{-1} Cu, thiourea 50 g·t^{-1} Cu), high-quality cathode copper with a smooth, dense appearance and chemical composition meeting Grade A copper standards can be obtained. The corresponding current efficiency reached 96.87%, with a specific energy consumption of 1, 940.99 kWh per ton of copper. This study defines the process control window for

收稿日期：2024-09-20
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2904604)
作者简介：范道焱，学士，工程师，主要研究方向为湿法冶金。E-mail：daoyanfan@163.com

producing high-quality cathode copper under high current density, providing key parameter guidance for efficient and stable industrial production.

Key words: high-current-density copper electrowinning; guar gum; thiourea; organic matter content; cathode copper quality; current efficiency; electrowinning energy consumption

刚果(金)拥有全球重要的铜钴矿产资源，其铜与钴的储量分别约占全球总量的8%与50%以上[1]。该国某典型铜钴矿采用“浸出—萃取—电积”湿法冶金工艺，已实现年产阴极铜约65 kt、粗制氢氧化钴约10 kt(折合钴金属约3.5 kt)的生产规模。为适应工艺升级、产能扩张及投资效益优化等需求，该厂拟将铜电积工序的电流密度从原有280~300 A·m^{-2}提升至320~330 A·m^{-2}的高电流密度区间。然而，电流密度的提高往往伴随一系列技术挑战：一方面，槽电压相应上升，导致吨铜电耗增加、电流效率下降；另一方面，过高的电流密度易引起阴极铜结晶粗化，影响板面平整度与整体质量，进而降低阴极铜产出率[2,3]。此外，电积过程中添加剂的配比以及电富液中有机物(主要为油类)的含量，也是影响阴极铜形貌与纯度的重要因素[4]。因此，系统研究高电流密度条件下添加剂用量与电积液有机物含量对阴极铜质量的协同影响机制，对优化工艺参数、稳定提升A级铜合格率具有重要的工程指导意义。本文基于该铜钴矿实际生产条件，通过开展高电流密度铜电积试验，重点探究古尔胶、硫脲等添加剂的适宜投加量以及电富液中有机物含量的控制范围，以期为高电流密度铜电积工艺的提质增效提供理论依据与实践参考。

1 试验

以铜电积车间产出的电富液为原料，其主要化学成分如表1所示。试验在280 A·m^{-2}与320 A·m^{-2}两种电流密度条件下进行，通过系统调节添加剂(古尔胶、硫脲)用量、电积液中有机物(油)含量、电积液流速及进液方式等关键工艺参数，重点考察其对阴极铜表面形貌与产品质量的影响。试验采用定制电积装置(图1)，其最大阴极铜产能为2.4 kg·d^{-1}。具体试验条件列于表2。过程中，控制电积前后铜离子浓度差为4~4.5 g·L^{-1}，电积液温度恒定为40~42 ℃，单次电积持续时间约为5 d。

表1 电富液检测结果

Table 1 Detection results of electrowinning rich solution /(g·L^{-1})

成分	Cu	Co	Mn	Fe	H_2SO_4
含量	52.24	0.32	0.27	0.62	175



图1 电积试验电解槽照片

Fig. 1 Photograph of the electrowinning test electrolytic cell

表2 电积试验工艺参数条件

Table 2 Electrowinning test process parameter conditions

试验编号	电流密度/(A·m^{-2})	古尔胶添加量/(g·t^{-1})	硫脲添加量/(g·t^{-1})	电富液油含量/(×10^{-6})	电积液流速/(L·m^{-2}·h^{-1})
1	280	80	50	25	50
2	320	80	50	25	60
3	320	150	50	25	60
4	320	150	50	126	60
5	320	300	80	126	60

2 结果与讨论

2.1 电积能耗分析

电积试验的能耗数据汇总于表3。由表3可知，当电流密度为280 A·m^{-2}时，槽电压为2.11 V，对应的吨铜电耗为1 872.25 kWh，电流效率达到97.36%。在电流密度提高至320 A·m^{-2}的条件下，槽电压范围升高至2.21~2.24 V，吨铜电耗相应增加至1 934.81~1 971.86 kWh，电流效率则介于95.78%~96.87%。值得注意的是，试验5的槽电压异

表3 电积试验能耗分析数据

Table 3 Energy consumption analysis datas for electrowinning tests

试验编号	电积时间/h	槽电压/V	电流强度/A	理论产铜量/g	实际产铜量/g	吨铜电耗/kWh	电流效率/%
1	118.50	2.11	48	6 745.97	6 568.16	1 827.25	97.36
2	114.66	2.21	55	7 479.27	7 203.25	1 934.81	96.31
3	116.25	2.23	55	7 582.99	7 345.76	1 940.99	96.87
4	112.00	2.24	55	7 305.76	6 997.65	1 971.86	95.78
5	24.52	2.48	55	1 599.44	1 515.5	2 206.88	94.75

注：试验5电积24 h后出现海绵铜，终止试验。

常升高至2.48 V，其主要原因可归结为两方面：一是古尔胶添加量较高，导致电积液电阻率增大；二是试验过程中电富液的有机物（油）含量偏高，部分有机物附着于阴极表面，进一步增加了界面电阻。

2.2 阴极铜产品质量

不同试验条件下所得阴极铜的化学成分分析结果列于表4。数据显示，试验1与试验3所得样品中的各元素含量均满足国家A级铜标准。相比之下，试验2与试验4所得样品的主要不合格项为硫（S）元素含量超标。

表4 电积试验所得阴极铜化学成分

Table 4 Chemical compositions of cathode copper from electrowinning tests /($\times10^{-6}$)

元素	A级铜标准	试验1	试验2	试验3	试验4
Cu①	≥99.99	99.997	99.994	99.998	99.985
S	≯15.0	12.3	39	9.7	72.1
Zn	≯20.0	0.4	0.6	3.3	0.9
Ni		0.1	0.2	0.4	0.3
Co		0.5	1.7	1.1	3.6
P	≯15.0	0.2	0.6	0.4	0.9
Mn		0.1	0.5	0.3	2
Cd		0.2	0.2	0.2	0.3
Cr		0.3	0.5	0.5	3.3
Sb		0.3	0.9	0.6	0.2
Fe	≯10.0	2.8	8.3	8.3	7.79
As	≯5.0	0	0.5	0	0
Pb		1.7	4.2	1.8	3.2
Bi	≯4.0	0.2	0.3	0.1	0.1
Sn	≯2.0	0.4	0.7	0.4	0.5
Se	≯3.0	0.3	0	0.1	0.1
Te		1.2	1.8	0.7	1.9
Ag	≯25.0	0.1	0.4	0	0.1

注：①单位为%。

2.3 电流密度的影响

对比试验1与试验2试验结果可知，当电流密度从280 A·m^{-2}提升至320 A·m^{-2}时，槽电压由2.11 V上升至2.21 V。根据酸性溶液中铜电积的能耗计算公式[5]：

$$W=U\times1000/1.186\mu \quad (1)$$

式中：W为吨铜电耗，kWh·t^{-1}；U为槽电压，V；μ为电流效率，%。由公式（1）可知，可以明确，在电流效率相近的情况下，电流密度越高，吨铜电耗越大。

图2展示了在古尔胶与硫脲添加量均为80 g·t^{-1}（Cu）和50 g·t^{-1}（Cu）的条件下，分别于280 A·m^{-2}电积118.5 h和320 A·m^{-2}电积114.66 h所产阴极铜的表面形貌。从图2可以看出，在280 A·m^{-2}下，所得阴极铜板面整体光滑、结构致密，仅边缘存在少量微小粒子。经冷水冲洗及70 ℃热水浸泡1 min后，其化学成分达到A级铜标准。而在320 A·m^{-2}下，阴极铜表面则布满尖锐粒子与气孔，板面粗糙，且硫含量超标。此现象归因于高电流密度下古尔胶添加量（80 g·t^{-1} Cu）相对不足：一方面，阴极极化程度偏低，导致Cu^{2+}还原时晶核形成速率慢于晶核生长速率，易于形成针状或柱状粗大结晶[6]；另一方面，添加剂不足导致电积液表面张力增大、润湿性变差，促进了气孔的形成（图3）。此外，粗大结晶内部及其间隙易包裹硫酸盐夹杂物，在后续浸泡清洗过程中难以彻底溶出，最终造成硫含量超标。

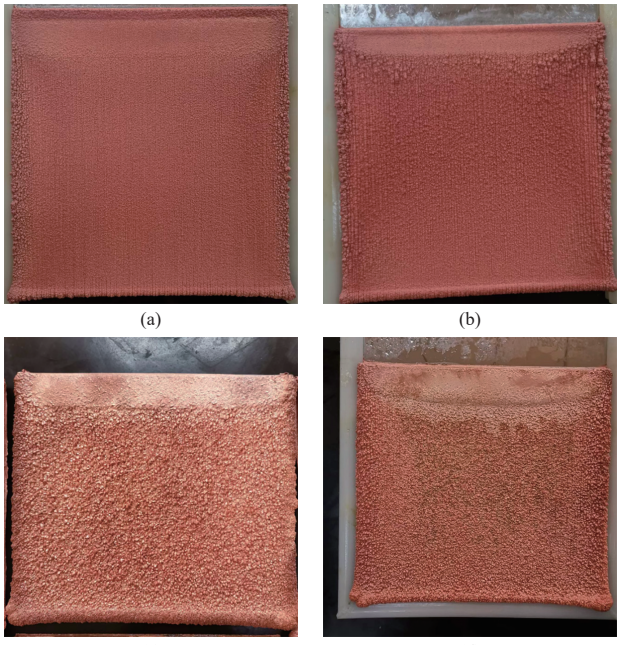


图2 (a)、(b)试验1所得阴极铜；(c)、(d)试验2所得阴极铜

Fig. 2 (a), (b) Cathode copper obtained from Test 1; (c), (d) cathode copper obtained from Test 2

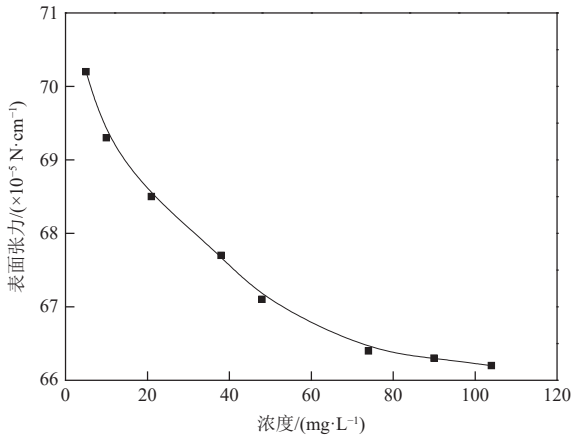


图3 电解液表面张力与古尔胶浓度的关系

Fig. 3 Relationship between electrolyte surface tension and guar gum concentration

2.4 添加剂用量的影响

阴极铜的析出与结晶过程受阴极极化强度的调控。工业生产中常通过添加表面活性物质(添加剂)来改变极化行为,从而优化阴极铜的物理化学性质。常用添加剂主要包括胶类(如古尔胶)、硫脲及硫酸钴等。古尔胶的主要作用是提高阴极极化电位,从而加速晶核形成、抑制晶粒生长,最终获得晶粒细化、表面平整的阴极铜[7,8]。硫脲则有助于使阴极铜表面更平滑并提高其致密度[9]。

对比试验2与试验3的试验结果(电流密度均为320 A·m^{-2},硫脲添加量固定为50 g·t^{-1} Cu),当古尔胶添加量从80 g·t^{-1} Cu提高至150 g·t^{-1} Cu时,阴极铜表面形貌得到显著改善。如图4所示,在优化后的添加剂条件下电积116.25 h,所得阴极铜板面光滑、结构致密,基本无突出粒子,且化学成分符合A级铜标准。这表明增加古尔胶用量有效增强了阴极极化,抑制了晶粒过度生长,是获得高质量阴极铜的关键。

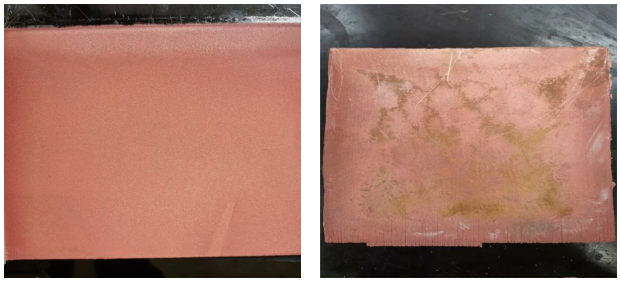


图4 试验3所得阴极铜

Fig. 4 The cathode copper obtained from Test 3

2.5 电积液中有机物(油)的影响

萃取工艺夹带至电积液中的有机物(油)会对铜电积过程产生诸多不利影响,主要包括:导致阴极沉积物变色(形成有机烧斑)、恶化其物理性能(如产生麻点、结构疏松)以及改变其化学成分,进而引起电流效率下降、电耗增加及阴极铜质量不合格等问题[10-12]。

对比试验3与试验4(电流密度均为320 A·m^{-2},古尔胶与硫脲添加量分别为150 g·t^{-1} Cu和50 g·t^{-1} Cu),在添加剂用量相同的条件下,电积液有机物含量的影响十分显著。如图5所示,当有机物(油)含量高达126 ppm(1 ppm=10^{-6},下同)时,所得阴极铜虽粒子较少,但呈针状、板面粗糙且气孔密集,导致硫含量超标。这主要归因于过量的有机物附着于阴极表面,引起局部导电不均,干扰了铜的正常成核与生长过程。

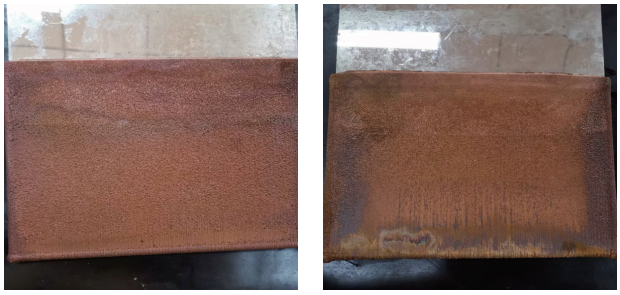


图5 试验4所得阴极铜

Fig. 5 The cathode copper obtained from Test 4

在维持高有机物含量(126 ppm)的条件下,进一步将古尔胶和硫脲添加量分别提高至300 g·t^{-1} Cu和80 g·t^{-1} Cu进行试验。电积仅24.52 h后,阴极便出现海绵铜现象(图6)。分析认为,过高的古尔胶用量与高有机物含量共同导致电积液粘度过大、流动性恶化,从而促使铜以细晶多孔的海绵状形态沉积。



图6 试验5所得海绵铜

Fig. 6 Sponge copper obtained from Test 5

3 工业化应用实践

基于上述试验研究成果,并结合生产现场实际,实施了以下主要技术改造:对反萃后的电富液建立了有机物(油)含量的在线监测;在原有超声波气浮除油工艺后,增设隔油槽及双层介质除油装置(上层

采用无烟煤深度吸附残余有机物，下层使用石榴石过滤固体悬浮物），实现了电富液的深度净化。刚果（金）某铜钴矿湿法冶炼厂于2022年完成扩产改造，技术改造前后的主要工艺参数及生产技术指标对比详见表5。由表5可知，经过改造后，各项生产指标均得到显著提升。

表5　刚果（金）某铜钴矿湿法炼铜厂技术改造前后工艺参数和技术指标对比

Table 5　Comparison of process parameters and technical indicators before and after the technical renovation at a copper-cobalt hydrometallurgical plant in the democratic republic of Congo

工艺参数	电流密度/（$A\cdot m^{-2}$）	油含量/ppm	固含量/ppm	吨铜消耗古尔胶/g	吨铜消耗硫脲/g	单槽电积液循环量/（$m^3\cdot h^{-1}$）	电积液浓度差/（$g\cdot L^{-1}$）
改造前	280~300	80~100	70~80	150~300	0~50	6~7	5~6
改造后	320~330	20~30	20~30	180~200	50	7.5~8	4.0~4.5
技术指标	铜浓度/（$g\cdot L^{-1}$）	铁离子浓度/（$g\cdot L^{-1}$）	钴离子浓度/（$g\cdot L^{-1}$）	吨铜电耗/kWh	电流效率/%	阴极铜合格率/%	年产铜量/万t
改造前	52~55	0.5~1.0	0.2~0.5	2 050~2 170	89.75	82.25	6.41
改造后	52~55	0.5~1.0	0.2~0.5	1 980~2 075	91.50	95.50	8.22

注：1 ppm=10^{-6}。

4　结论

1）电流密度是影响电积能耗与阴极铜结晶形貌的关键因素。电流密度升高导致槽电压与吨铜电耗显著增加，同时促使阴极铜结晶粗化，恶化板面平整度与产品质量。

2）添加剂古尔胶的用量需与电流密度精确匹配。在电流密度320 $A\cdot m^{-2}$、电积液有机物含量20~30 ppm（1 ppm=10^{-6}）的优化条件下，适度增加古尔胶用量（至150 $g\cdot t^{-1}$ Cu）可有效细化晶粒、减少板面粒子、降低杂质含量；但过量添加（如300 $g\cdot t^{-1}$ Cu）会恶化电积液流动性，诱发海绵铜异常沉积。

3）电积液中有机物（油）含量必须严格控制。过高的有机物含量（如126 ppm）是导致阴极板产生气孔、有机烧斑及硫含量超标的主要原因。为保障阴极铜质量，电积液中有机物含量宜稳定控制在30 ppm以下。综合而言，在320~330 $A\cdot m^{-2}$的高电流密度下，通过将电积液有机物含量控制在<30 ppm，并优化古尔胶与硫脲添加量（分别约为180~200 $g\cdot t^{-1}$ Cu与50 $g\cdot t^{-1}$ Cu），可实现电流效率与阴极铜质量的同步提升。

参考文献

[1] 卢道刚. 刚果(金)加丹加地区铜钴矿加工工艺现状及发展方向[J]. 世界有色金属, 2009(7): 72-75.
LU D G. Current situation and development direction of copper-cobalt ore processing technology in Katanga region, Democratic Republic of Congo[J]. World Nonferrous Metals, 2009(7): 72-75.

[2] 王玮, 陈波. 紫金山铜矿万吨级湿法炼铜厂的设计[J]. 铜业工程, 2005(1): 31-34.
WANG W, CHEN B. The design of a 10 000 t/a hydrometallurgical copper refinery in Zijinshan Copper Mine[J]. Copper Engineering, 2005(1): 31-34.

[3] 王成彦, 詹惠芳, 陈枫. 我国低品位铜矿浸出-萃取-电积铜厂投资概况及效益分析[J]. 矿冶, 1999, 8(1): 5-8.
WANG C Y, ZHAN H F, CHEN F. Survey of investment and economic benefit of leaching-solvent extraction-electrowinning plants for low-grade copper ores in China[J]. Mining and Metallurgy, 1999, 8(1): 5-8.

[4] 方亚超, 潘明熙, 黄惠, 等. 铜电解沉积过程中添加剂的影响研究现状及展望[J]. 矿冶, 2021, 30(5): 61-69.
FANG Y C, PAN M X, HUANG H, et al. Current situation and prospect of the additives in copper electrolysis deposition process[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(5): 61-69.

[5] 李样人. 提高电积铜质量降低电积能耗的方法[J]. 湿法冶金, 1999, 18(1): 25-28.
LI Y R. Methods for improving the quality of electrowon copper and reducing electrowinning energy consumption[J]. Hydrometallurgy, 1999, 18(1): 25-28.

[6] 张鹏, 衷水平, 赖桂华, 等. 高电流密度铜电积试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(1): 6-10.
ZHANG P, ZHONG S P, LAI G H, et al. Experiment of copper electrowinning under high current density[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(1): 6-10.

[7] 毛允正. 铜电解添加剂的作用机理及生产实践[J]. 有色金属再生与利用, 2003(7): 13-15.
MAO Y Z. Action mechanism and production practice of additives for copper electrolytic[J]. Nonferrous Metal Recycling and Utilization, 2003(7): 13-15.

[8] 张源, 李国才. 明胶作为铜电解添加剂的研究与实践[J]. 稀有金属, 2000, 24(1): 66-69.
ZHANG Y, LI G C. Research and practice of gelatin as additive of copper electrolytisis[J]. Rare Metals, 2000, 24(1): 66-69.

[9] 罗彤彤. 电积铜用阴极平滑剂的使用方法[J]. 铜业工程, 2012(1): 11-16.
LUO T T. The cathode smoothing agent usage method of

electro-deposition copper[J]. Copper Engineering, 2012(1): 11-16.

[10] 张兴勋, 康锦程, 谭希发, 等. 刚果(金)某铜钴资源综合利用生产调试总结[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(7): 20-25.
ZHANG X X, KANG J C, TAN X F, et al. Production debugging summary of copper and cobalt resource comprehensive utilization in Congo[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(7): 20-25.

[11] 陈春生. 提高堆浸厂电积铜质量的生产实践[J]. 有色矿山, 1999(增刊1): 30-32.
CHEN C S. Practice of improving the quality of electrodeposited copper in SX-EW plant[J]. Nonferrous Metals Mine, 1999(Sup. 1): 30-32.

[12] 张鹏, 衷水平, 康锦程, 等. 铜电积液脱油工艺及应用实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(1): 20-22.
ZHANG P, ZHONG S P, KANG J C, et al. Process and application of oil removement from copper electrolyte[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(1): 20-22.