

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.08.009

锂电铜箔制备技术与力学性能研究

阮英, 赵昭^{2*}, 包能远², 孙莉², 么玥²

(1. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100; 2. 金川集团铜贵股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 在电解铜箔生产过程中, 工艺参数及添加剂浓度对于铜箔晶核的形成及性能影响较大。本文结合实际生产, 采用金相显微镜、万能拉力试验机、X射线衍射仪等设备, 研究了溶铜罐中鼓风量、补铜泵流量、温度对溶铜效率的影响及溶液成分、添加剂对铜箔性能的影响。结果表明, 在生箔析出铜量恒定的条件下, 当鼓风量为 $600 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$, 溶铜温度控制在 $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$, 补铜泵流量为 $8 \text{ m}^3/\text{h}$, 可以满足电流强度 28 kA 时体系铜离子浓度的平衡, 实现铜离子的闭环控制。当铜离子浓度、酸离子浓度和氯离子浓度分别控制在 100 、 110 和 0.038 g/L 时, 析出镀层的外观质量及物性指标最佳。而当添加剂 A 剂为 7 g/kAh , B 剂为 15 g/kAh , C 剂为 3 g/kAh 时, 铜箔整体性能最佳。

关键词: 锂电铜箔; 供液系统; 添加剂; 温度; 性能

中图分类号: TG153.14

文献标识码: A

Research on preparation technology and mechanical properties of the copper foil for lithium battery

Ruan Ying¹, Zhao Zhao^{2*}, Bao Nengyuan², Sun Li², Yao Yue²

(1. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, China; 2. Jinchuan Group Copper and Precious Metals Co., Ltd., Jinchang 737100, China)

Abstract: In the production process of electrolytic copper foil, the process parameters and additive concentration have a great influence on the formation and performance of copper foil crystal nucleus. In this paper, the effects of air volume, copper replenishment pump flow rate and temperature on copper dissolving efficiency and the effects of solution composition and additives on copper foil properties in the copper dissolving tank were studied by using metallographic microscope, universal tensile testing machine, X-ray diffractometer and other equipment. The results show that under the condition of constant amount of copper precipitated from the green foil, the balance of copper ion concentration in the system under the current intensity of 28 kA can be satisfied and the closed-loop control of copper ions can be realized, when the air volume is $600 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$, the copper dissolution temperature is controlled at $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$, and the copper supplement pump is controlled at $8 \text{ m}^3/\text{h}$. When the concentrations of copper ions, acid ions and chloride ions are 100 , 110 and 0.038 g/L , respectively, the appearance quality and physical properties of the precipitated coating are the best. When the dosage of additive A, B and C are controlled at 7 , 15 and 3 g/kAh , the overall performance of copper foil is the best.

收稿日期: 2024-06-12

修回日期: 2025-04-25

作者简介: 阮英(1971—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为钢铁冶金、铜冶金、铜及铜合金加工, email: tykj@jnmcc.com

通信作者: 赵昭(1992—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为铜及其铜合金加工及设计工艺, email: 1581158619@qq.com

引用信息: 阮英, 赵昭, 包能远, 等. 锂电铜箔制备技术与力学性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(8): 56-64.

Ruan Ying, Zhao Zhao, Bao Nengyuan, et al. Research on preparation technology and mechanical properties of the copper foil for lithium battery[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(8): 56-64.

Keywords: lithium battery copper foil; liquid supply system; additive; temperature; performance

随着全球能源结构的转型和新能源汽车的快速发展,锂电池作为一种绿色、清洁、高效的储能设备,其需求量呈现出迅猛增长的态势^[1-6]。一般锂电池的结构主要包括五个部分,即由正极、隔膜、负极、有机电解液、电池外壳等组成^[7-8]。其中,负极材料作为锂离子电池的核心组成部分之一,在电池的循环性能、安全性能以及能效比等方面起着至

关重要的作用,其质量直接关系到电池的性能和安全性^[9]。铜箔因具有高导电性、良好的化学稳定性和优异的机械性能,是锂离子电池负极材料首选之一^[10-11]。当前,锂电铜箔的制备工艺,主要包括电积法和压延法两种^[12]。其中,电积法具有生产效率高、成本低等特点而被广泛应用,其工艺流程如图 1 所示。

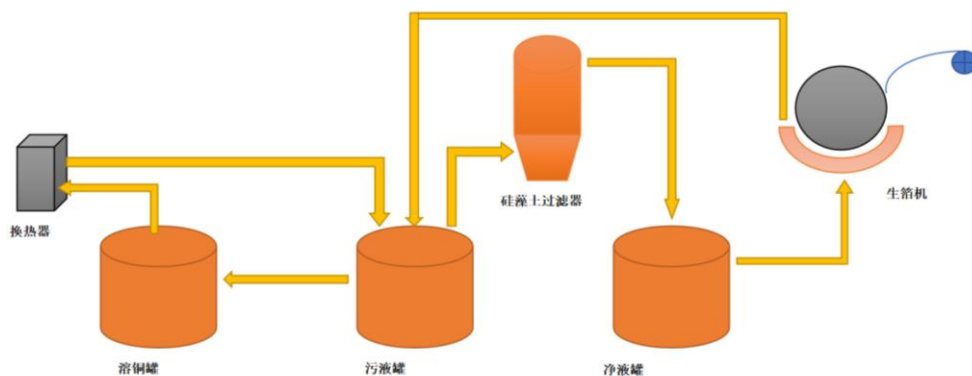


图 1 工艺系统图

Fig.1 Diagram of the process system

电积法作为锂电铜箔制备的主流工艺,其生产过程中的电解工艺参数对铜箔的微观组织和宏观性能具有决定性影响,电流密度、铜离子浓度、氯离子浓度、添加剂种类及溶液温度等参数的优化,是实现高质量铜箔生产的关键^[13-15]。特别是电解过程中的电沉积阶段,工艺参数的精确控制对于制备性能优异的铜箔至关重要。李谋翠等^[16]研究了光亮剂聚二硫二丙烷磺酸钠(SPS)和3-巯基-1-丙磺酸钠(MPS)对铜电沉积及锂电铜箔抗拉强度、延伸率、光泽度及粗糙度的影响,发现SPS和MPS浓度分别为1.0和1.5 mg/L时,有利于提高铜箔抗拉强度和铜箔延伸率。尽管已有研究对电积法制备铜箔的工艺参数进行了一定程度的探讨,但对各参数如何综合作用用于铜箔微观结构和力学性能的影响机制研究甚少。

正交试验设计是一种高效、有序的实验安排方法,通过合理选择少量的试验点,全面考虑多个因素的影响,从而减少试验次数,提高试验效率^[17]。因此,本文通过采用正交试验,研究不同电解工艺参数和添加剂对锂电铜箔制备过程中微观组织、表面质量、织构以及力学性能的影响,以期优化电解铜箔生产工艺提供理论依据和技术支持。

1 实验

1.1 溶铜罐风量、补铜泵流量、温度对溶铜效率影响

在酸性条件($\text{pH} < 7$)下,金属铜由于其标准电极电位(Cu^{2+}/Cu)为0.337 V,高于氢的标准电极电位,因而能够在硫酸等溶液中稳定存在,难以被氢离子置换^[18]。因此,在溶铜过程中,氧气对铜材表面的氧化具有显著影响。电解液温度过高,溶液中添加剂易分解失效^[19];温度过低,会降低硫酸铜的溶解度,影响溶铜效率^[20]。基于此,本文通过对实际生产过程中,溶铜罐中的风量(提供氧气)、补铜泵流量(提供硫酸)和温度等关键参数进行跟踪记录,探究出生产电流一定条件下,最佳的溶铜风量、补铜泵流量、温度。

1.2 电解液铜、酸、氯离子对铜箔性能影响

硫酸-硫酸铜溶液中铜、酸离子浓度对铜箔电沉积质量密切相关,铜离子浓度过低,会使铜离子沉积疏松,镀层整平性差,物性强度低;铜离子浓度过高,电沉积速率加快,镀层表面较粗糙^[21]。电解液中氢离子作为导电离子,浓度过低会影响离子运动速率,过高则会增重设备腐蚀;溶液中氯离子能

提高阴极极化并与添加剂协同作用^[22]。所以,通过生产实际跟踪,利用金相显微镜及拉伸试验机研究硫酸-硫酸铜体系不同浓度的铜、酸、氯离子对铜箔性能的影响,探究最佳铜、酸、氯离子浓度至关重要。

1.3 电解液添加剂对铜箔性能影响

硫酸-硫酸铜体系中,适量的添加剂可使镀层致密、光滑、物性性能较佳,在铜箔生产系统中,添加剂可吸附成核周围铜离子,抑制晶粒(110)晶面生长,促进(220)晶面择优生长^[23]。目前,铜箔系统添加剂分为有机类:含硫类化合物(C剂)及无机类^[24]:氯离子,所以,通过生产实际跟踪,利用金相显微镜、X射线衍射仪、万能拉伸试验机等研究硫酸-硫酸铜体系不同浓度的添加剂含量对铜箔性能的影响,探究最佳添加剂配比。研究中所使用的不同添加剂的作用机制如图2~图4所示。

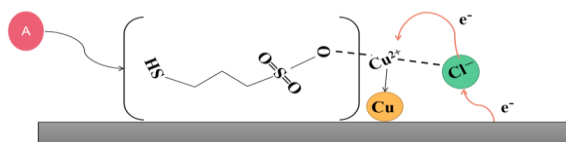


图2 添加剂A剂作用机理

Fig.2 Action mechanism of the additive A

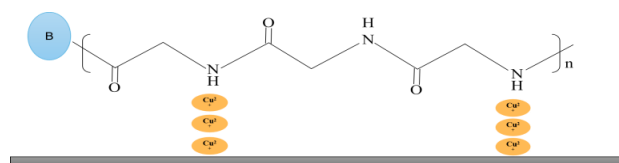


图3 添加剂B剂作用机理

Fig.3 Action mechanism of the additive B

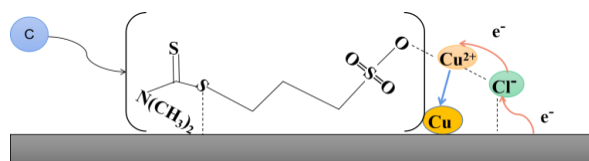


图4 添加剂C剂作用机理

Fig.4 Action mechanism of the additive C

2 结果与讨论

2.1 溶铜罐风量、放铜阀流量、温度对溶铜效率影响

在净液槽铜浓度95 g/L和生箔机电流28 kA的条件下,为进一步探究溶铜过程中,风量、放铜阀流量和体系温度三个关键工艺参数对溶解效率的影响,现采用三因素四水平正交表进行实验设计,实验结果将通过极差分析来确定各因素的影响重

要性,找寻最优工艺组合,以提高溶铜效率并保证铜箔质量,其水平因子高低如表1所示。正交试验及水平响应值如表2和表3所示。

在净液槽铜浓度稳定、箔机电流密度一定的情况下,为了使溶铜和析铜达到平衡,根据理论析铜质量=溶铜效率×电化当量×电流×时间,计算出理论补铜泵量,根据理论补铜量研究对应溶铜效率下的实际风量、补铜泵流量、溶铜罐铜离子浓度参数^[25]。

表1 溶铜罐电解液中风量、放铜阀、温度正交试验因素

Tab.1 Orthogonal experimental factors of air volume, copper discharge valve and temperature in the electrolyte of copper dissolving tank

水平因素	A 风量/ (N·m³·h⁻¹)	B 放铜阀流量 (m³·h⁻¹)	C 温度/°C
1	300	5	65
2	400	6	70
3	500	7	75
4	600	8	80

表2 电解液风量、放铜阀、温度组成成份的正交试验表

Tab.2 Orthogonal test table of the composition of electrolyte air volume, copper discharge valve and temperature

水平	A 风量 (N·m³·h⁻¹)	B 补铜泵流 量/(m³·h⁻¹)	C 温度 /°C	铜离子溶出值 (g·L⁻¹·h⁻¹)
1	300	5	65	1.52
2	300	6	70	1.56
3	300	7	75	1.65
4	300	8	80	2.44
5	400	5	70	2.67
6	400	6	65	2.44
7	400	7	80	3.34
8	400	8	75	4.15
9	500	5	75	4.31
10	500	6	80	4.72
11	500	7	65	4.15
12	500	8	70	4.27
13	600	5	80	5.19
14	600	6	75	5.32
15	600	7	70	5.63
16	600	8	65	5.60

表 3 电解液风量、放铜阀、温度组成成份均值响应表

Tab.3 Mean response table for the electrolyte air volume, copper discharge valve, and temperature components

水平	A 风量/ (N·m ³ ·h ⁻¹)	B 补铜泵流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	C 温度/°C
1	1.792	3.423	3.427
2	3.150	3.510	3.532
3	4.362	3.692	3.857
4	5.435	4.115	3.923
Delta	3.643	0.692	0.495
排秩	1	2	3

从表2和3实验数据可以看出：影响铜离子析出的影响因素，主次顺序为A>B>C；其中，最佳工艺参数组合为：A₄B₄C₄，即当鼓风量在600 N·m³，溶铜温度控制在80 °C，补铜泵控制在8 m³/h，可以满足电流强度28 kA下，体系铜离子浓度的平衡，实现铜离子的闭环控制。

2.2 生箔系统电解液中铜、酸、氯离子对铜箔性能影响

在生箔系统中，电解液环境的复杂性对铜箔性能有着显著的影响。为深入探究铜离子浓度、硫酸浓度、氯离子浓度等因素对铜箔抗拉强度、延伸率、粗糙度的影响，找寻最佳工艺参数，在生箔机电流控制在28 kA的条件下，采用正交试验设计方法进行系统的研究，其水平因子高低如表4所示。

表 4 电解液中铜、酸、氯离子成分正交试验因素

Tab.4 Orthogonal experimental factors of copper, acid and chloride ion components in electrolyte

水平 因素	A 铜离子浓度 /(g·L ⁻¹)	B 硫酸浓度 /(g·L ⁻¹)	C 氯离子浓 度/(g·L ⁻¹)
1	85	100	0.020
2	90	105	0.026
3	95	110	0.032
4	100	115	0.038

正交试验及水平响应值如表5所示。

表 5 电解液中铜、酸、氯离子成分正交试验设计

Tab.5 Orthogonal experimental design of copper, acid and chloride ion components in electrolyte

序号	A 铜离子浓度 /(g·L ⁻¹)	B 硫酸浓度 /(g·L ⁻¹)	C 氯离子浓度 /(g·L ⁻¹)	抗拉强度 /Pa	延伸率 /%	粗糙度 Rz /μm
1	85	100	0.02	306.96	4.75	2.375
2	85	100	0.026	314.14	6.38	2.237
3	85	100	0.032	314.93	6.5	2.116
4	85	100	0.038	319.49	9.84	2.015
5	90	105	0.026	319.04	9.08	2.003
6	90	105	0.032	319.49	9.84	2.015
7	90	105	0.038	312.78	9.31	1.849
8	90	105	0.02	315.705	8.13	1.918
9	95	110	0.032	325.038	8.38	1.804
10	95	110	0.038	324.149	8.94	1.73
11	95	110	0.02	329.901	10.38	1.504
12	95	110	0.026	324.251	8.44	1.799
13	100	115	0.038	325.890	9.5	1.759
14	100	115	0.02	324.342	9.44	1.785
15	100	115	0.026	325.471	7.69	1.673
16	100	115	0.032	325.411	7.54	1.842

为使实验结果更加形象化，对上述实验条件下生产的铜箔，采用金相显微镜进行表面形貌观察，

如图5所示。

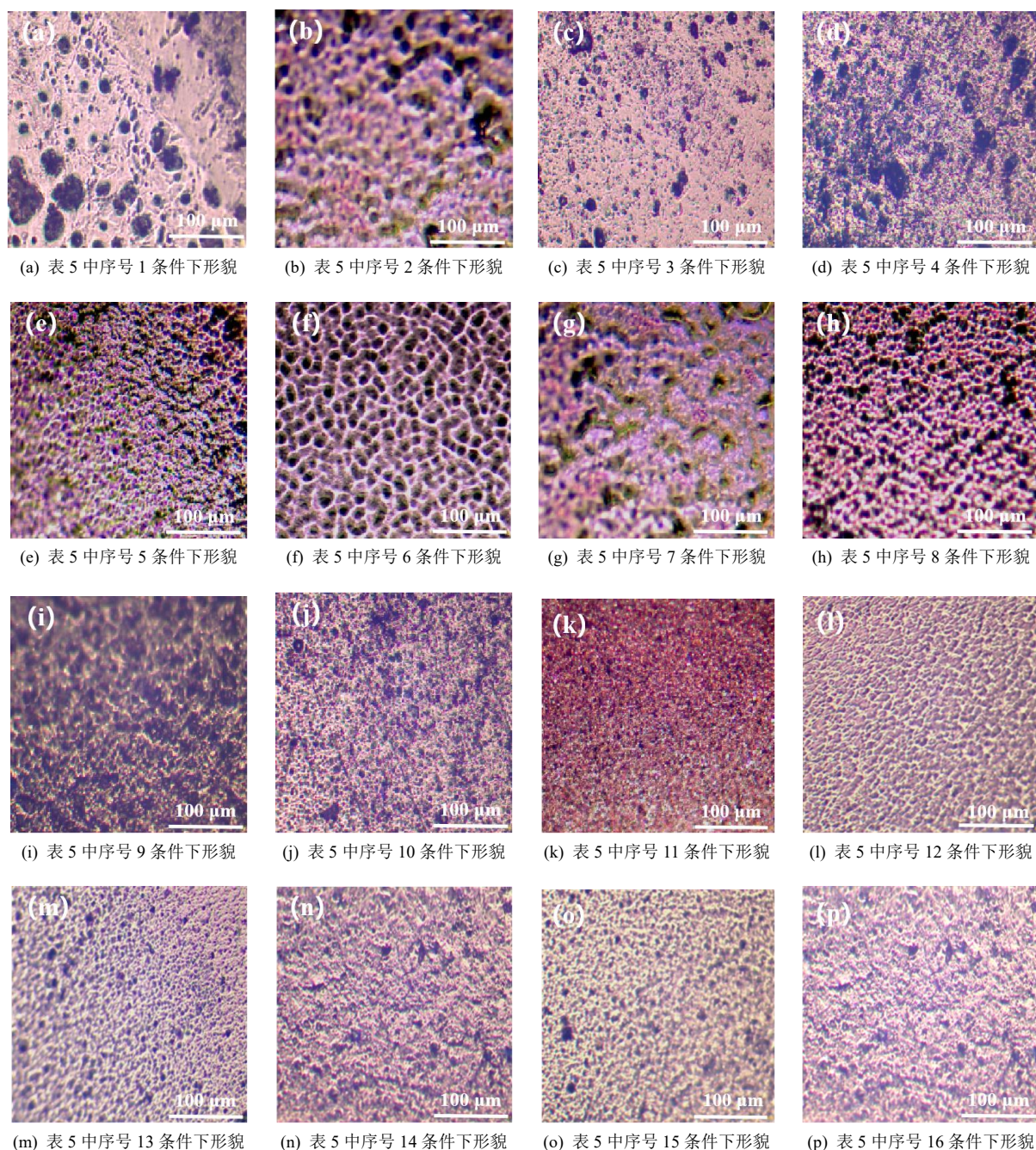


图 5 铜箔表面微观形貌图

Fig.5 Micro-morphology of copper foil surface

研究表明,铜箔表面粗糙度越小,铜箔的晶粒就越致密^[26]。由图5可以看出,铜、氯离子浓度一定时,当硫酸浓度达110~115 g/L时,铜箔表面较平整,如图5(k)至图5(m)。这是由于电解液中起导电作用的主要是氢离子,在一定范围内,酸浓度越高,则导电性越好,但酸浓度过高也会对设备造成较大腐蚀性;当酸、氯离子浓度一定时,铜离子浓度达100 g/L时,铜箔表面越平整,颗粒越细致紧密。如图5(m),结合表5可以看出,铜箔物性指标较好,这

是由于铜离子浓度较低时,铜离子不能及时在阴极表面补充析出,导致电流效率低,镀层不紧密;当铜、酸离子浓度一定,氯离子浓度达0.038 g/L时,铜箔表面越平整,如图5(m),这是由于氯离子能加快铜离子转化为结晶速率,提高阴极极化作用,增大铜离子还原电流。对上述实验结果,采用minitab V21.4.2对三因素铜、酸、氯离子进行均值分析,其结果如表6所示。

表 6 电解液中铜、酸、氯离子成分均值响应表

Tab.6 Mean response table of copper, acid and chloride ion components in electrolyte

水平	A 铜离子浓度 /(g·L ⁻¹)	B 硫酸浓度 /(g·L ⁻¹)	C 氯离子浓度 /(g·L ⁻¹)
1	107.6	109.7	110.2
2	109.3	110.4	110.2
3	112.2	110.3	110.0
4	111.9	110.5	110.6
Delta	4.5	0.8	0.6
排序	1	2	3

通过表6可以分析得知，影响铜箔性能的影响因素主次顺序为A>B>C，其最优参数组合为A₄B₃C₄。为进一步验证此工艺下铜箔的抗拉强度和延伸率性能，对其进行了性能检测，其结果如图6所示。

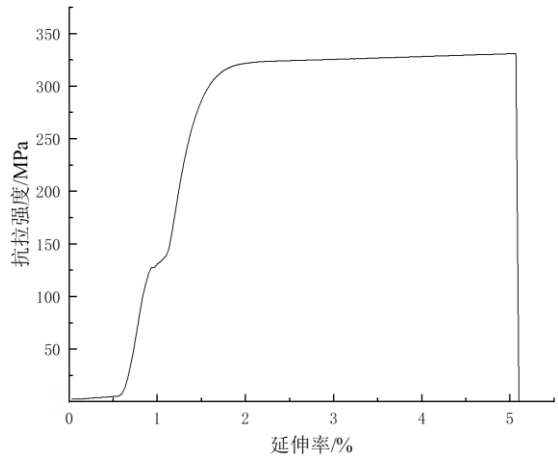


图 6 最优参数组合下的应力应变曲线

Fig.6 Stress and strain curve under optimal parameter combination

结合实际生产，可以得出，当铜离子浓度控制在100 g/L，酸离子浓度控制在110 g/L，氯离子浓度控制在0.038 g/L，析出的镀层外观质量及物性指标最佳。

2.3 溶液中添加剂对铜箔性能影响

在溶铜体系中，添加剂的使用对铜箔的性能有着显著的影响。添加剂能够改变铜沉积的反应电位，影响镀层的微观结构和形貌，从而提升电解铜箔的特定性能。因此，采用单一变量法对A、B、C添加剂，在不同浓度条件下的铜箔晶体结构进行了测试，其结果如图7至图9所示。

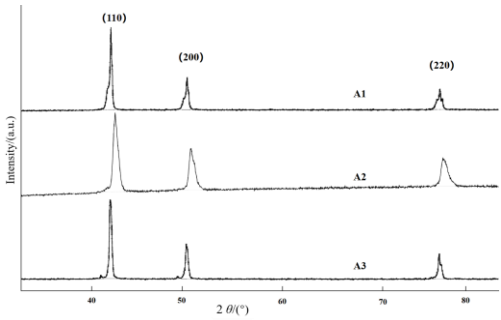


图 7 不同浓度 A 剂制备的铜箔 XRD 图

Fig.7 XRD diagram of copper foil prepared with different concentrations of A agent

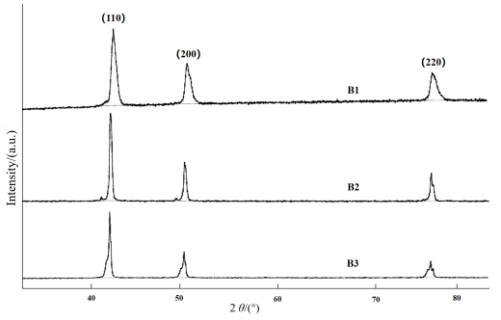


图 8 不同浓度 B 剂制备的铜箔 XRD 图

Fig.8 XRD diagram of copper foil prepared with different concentrations of B agent

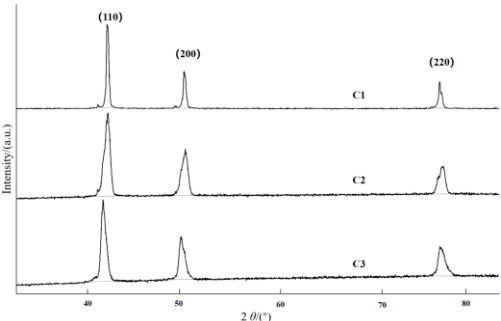


图 9 不同浓度 C 剂制备的铜箔 XRD 图

Fig.9 XRD diagram of copper foil prepared with different concentrations of C agent

对不同浓度的A剂进行XRD分析，从图(7)可以看出，在40°、50°、80°的位置分别是(111)、(200)、(220)的衍射峰。随着A剂浓度的不断加大，(111)、(200)的峰值不断减弱，(220)的峰值先加强后减弱，这是由于A剂的加入提高了晶粒的成核速率，但浓度过高，又会抑制晶粒的成核速度。

对不同浓度的B剂进行XRD分析，从图(8)可以看出，随着B剂浓度的不断加大，(111)、(200)的峰值不断减弱，(220)的峰值先加强后减弱，这是由于B剂对铜箔的电沉积过程起到平滑镀层的作用，随

着B剂的增加,B剂对表面沉积颗粒粗大区域吸附部分失效,使得结晶粗糙。

对不同浓度的C剂进行XRD分析,从图9可以看出,随着C剂浓度的不断加大,(111)、(200)的峰值不断减弱,(220)的峰值无明显变化。说明影响晶粒细化、择优生长的,主要受A、B剂影响。因此,为进一步探究A、B、C添加剂之间的交互作用,对铜箔表面形貌物性指标的影响,根据生产实际,选取三种不同浓度添加剂,进行正交试验设计,其水平因子高低如表7所示。正交试验及水平响应值如表8所示。

为使实验结果更加形象化,对上述实验条件下生产的铜箔,采用金相显微镜进行表面形貌观察,如图10所示。

表 7 三种添加剂正交试验因素

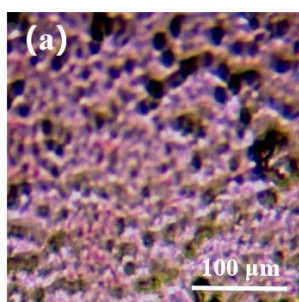
Tab.7 Orthogonal experimental factors of three additives

序号	A 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	B 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	C 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]
1	3	10	1
2	5	15	3
3	7	20	5

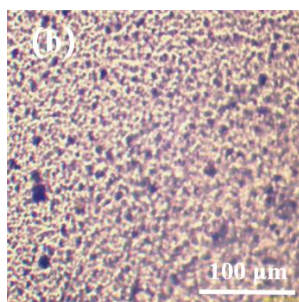
表 8 添加剂正交试验表

Tab.8 Additive orthogonal experiment table

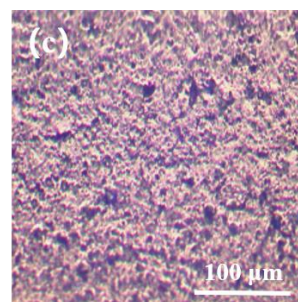
序号	A 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	B 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	C 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	抗拉强度 /Pa	延伸率 /%	粗糙度 R_z /μm	光泽度 /GU	翘曲 /mm
1	3	10	1	311.73	8.44	2.046	124	3
2	3	15	3	313.71	10.13	1.924	127	8
3	3	20	5	314.72	7.59	1.731	129	15
4	5	10	3	313.71	8.18	1.724	145	8
5	5	15	5	325.04	10.22	1.691	147	6
6	5	20	1	320.21	7.56	1.845	141	6
7	7	10	5	318.28	4.13	1.659	130	7
8	7	15	1	322.91	9.38	1.634	185	10
9	7	20	3	319.25	10.75	1.714	190	13



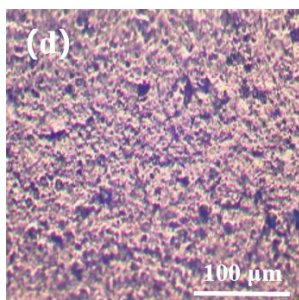
(a) 表 8 中序号 1 条件下形貌



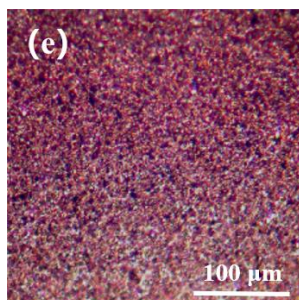
(b) 表 8 中序号 2 条件下形貌



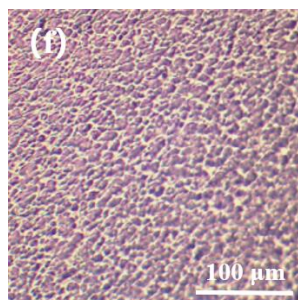
(c) 表 8 中序号 3 条件下形貌



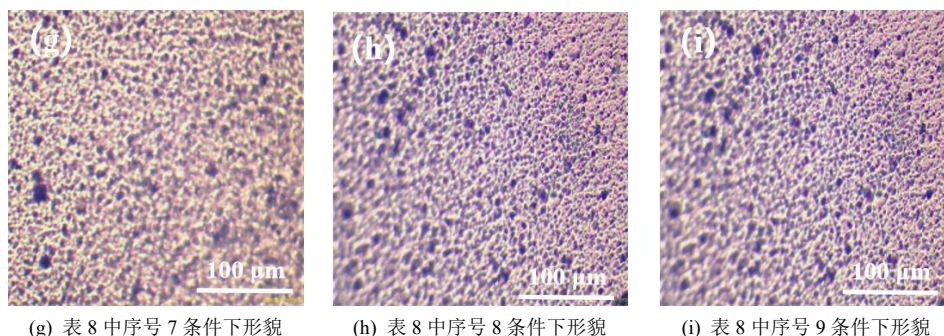
(d) 表 8 中序号 4 条件下形貌



(e) 表 8 中序号 5 条件下形貌



(f) 表 8 中序号 6 条件下形貌



(g) 表 8 中序号 7 条件下形貌

(h) 表 8 中序号 8 条件下形貌

(i) 表 8 中序号 9 条件下形貌

图 10 铜箔表面微观形貌图

Fig.10 Micro-morphology of copper foil surface

由图10中(a)~(c)可以看出,随着B剂和C剂的增加,铜箔表面晶粒颗粒变小,空隙减少,这是由于随着B、C剂的增加,对铜离子沉积速度起到抑制作用,使得晶粒变细腻;由图10中(d)~(f)并结合表7可以看出,随着B剂的增加,C剂的减少,铜箔表面越平整,晶粒越均匀,空隙几乎被填平,且铜箔抗拉强度整体呈上升趋势,粗糙度呈下降趋势。随着A、B剂继续增加,铜箔表面开始变得不平整,这是由于随着A、B剂的不断增加,它们之间开始相互抑制,进而使得铜箔晶粒变得粗大,物性指标降低。

对三因素A、B、C添加剂进行均值分析,其结果如表9所示。

表 9 三种添加剂均值响应表

Tab.9 Mean response table of three additives

水平	A 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	B 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]	C 浓度 /[g·(kAh) ⁻¹]
1	91.87	92.46	96.98
2	96.21	98.64	98.14
3	101.65	98.62	94.60
Delta	9.78	6.18	3.54
排列	1	2	3

通过表9可以分析得知,影响铜箔性能的影响因素主次顺序为A>B>C,其最优参数组合为A₃B₂C₂。为验证此工艺下铜箔的抗拉强度和延伸率性能,对其进行了性能检测,其结果如图11所示。

综上所述,当A剂浓度为7 g/kAh, B剂浓度为15 g/kAh, C剂浓度为3 g/kAh时,铜箔整体性能最佳。

3 结论

电解铜箔在生产过程中工艺参数及铜箔晶核

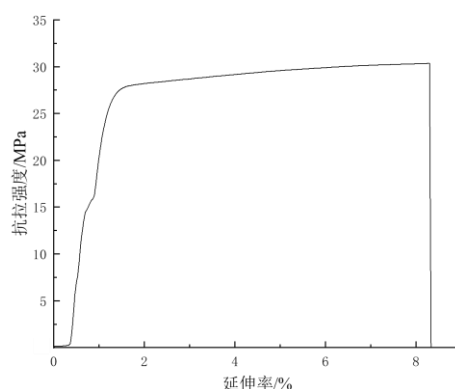


图 11 最优参数组合下的应力应变曲线

Fig.11 Stress and strain curve under optimal parameter combination

生产尤为重要,这是因为工艺参数的稳定对稳定的生产创造了条件,且晶核择优生长,对铜箔表面性能及力学性能很关键。本文借助金相显微镜及结合实际生产,得出以下结论:

(1) 在生箔析出铜量恒定的条件下,当鼓风量在 $600 \text{ N} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,溶铜温度控制在 $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$,补铜泵控制在 $8 \text{ m}^3/\text{h}$,可以满足电流强度在28 kA时,体系铜离子浓度的平衡,实现铜离子的闭环控制。

(2) 当铜离子浓度控制在100 g/L,酸离子浓度在110 g/L,氯离子浓度控制在0.038 g/L时,析出的镀层外观质量及物性指标最佳。

(3) 当添加剂A剂浓度为7 g/kAh, B剂浓度为15 g/kAh, C剂浓度为3 g/kAh时,铜箔整体性能最佳。

参考文献

- [1] 张越超,高金津,高秀玲,等.高比能量锂离子电池的全周期安全性[J].电池,2024,54(5): 682-687.
- [2] 许广庆,万强.固态电池技术的产业现状、投资潜力与

- 前景[J]. 电池, 2024, 54(5): 715-718.
- [3] 张继阳, 郑秀, 赵斌, 等. 电网级大规模储能的电池技术进展[J]. 电池, 2024, 54(5): 745-750.
- [4] 李岚春, 刘清, 陈伟, 等. 新阶段美国清洁能源战略解构与比较研究[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(8): 1348-1364.
- [5] 张川, 胡沛裕, 殷格格, 等. 低碳能源系统中能源利用技术现状及展望[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 164-175.
- [6] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1323-1343.
- [7] 方元庆, 陈晶. 碳达峰碳中和背景下我国新能源技术发展及意义[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 35-40.
- [8] 韩瑶, 朱燕华, 鲍中秋, 等. 锂电池内部结构原位表征方法开发与验证[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(5): 24-27, 67.
- [9] 陆豪宇, 沈文锋, 吕大伍, 等. 锂离子电池热失控安全防护研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(14): 24060110.
- [10] 熊明华, 冯连朋, 李华清. 电池集流体材料的研发与应用[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S1): 241-247.
- [11] 江鹏, 于彦东. 铜箔在锂离子二次电池中的应用与发展[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3504-3510.
- [12] 杨蕾, 朱茂兰, 翁威, 等. 锂电池用电解铜箔性能调控研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(10): 113-121.
- [13] 代明伟. 电解工艺参数及添加剂对电解铜箔性能的影响机制研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2023.
- [14] 程曦. 电解工艺对电解铜箔组织与性能影响的研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2019.
- [15] 郭立功, 徐建平. 电解铜箔材料的电化学制备及储锂性能分析[J]. 世界有色金属, 2019(17): 165-166.
- [16] 李谋翠, 樊斌锋, 赵玉龙, 等. 含硫添加剂对 8 μm 锂电铜箔性能的影响研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(2): 188-191.
- [17] 张庆军, 谢颖, 吴松. 基于正交实验与回归分析的机载共形天线吸波涂层厚度预测[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2693-2699.
- [18] 胡增开. 极薄锂电铜箔添加剂效果研究[J]. 福建冶金, 2022, 51(5): 21-24.
- [19] 朱若林, 宋言, 代泽宇, 等. 聚乙二醇对锂电铜箔组织性能的影响[J]. 铜业工程, 2022(4): 9-11, 20.
- [20] 宋言, 朱若林, 林毅, 等. 光亮剂对锂电铜箔表面质量的影响研究[J]. 铜业工程, 2022(3): 6-9.
- [21] 杨森. 锂电池用高性能超薄电解铜箔的研究[D]. 常州: 常州大学, 2022.
- [22] 丁杰. 高电流密度下电解铜箔添加剂的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [23] 余科淼. 低分子蛋白对超薄锂电铜箔性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(23): 1676-1679.
- [24] 文雯. 高频超薄载体铜箔制作及应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [25] 周杰, 顾伟伟, 张建, 等. 基于随机森林和改进竞争群算法的铜电解过程能耗优化[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(1): 60-67.
- [26] 樊振龙. 有机添加剂在电解铜箔生产中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.