

窄丝化工艺对第二代高温超导带材 临界电流特性的影响^{*}

焦婷¹, 余梦欣², 魏本刚¹, 李柱永^{2†}, 金之俭²

1. 国网上海市电力公司, 上海 200010;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

收稿日期: 2021-03-11; 接收日期: 2021-05-23

【摘要】 超导带材应用于超导电力设备时, 其临界电流特性受外界交变磁场大小和方向的影响, 展现出明显的各向异性. 为了减小外场对超导带材的影响, 本文通过窄丝化工艺将 4 mm 宽的高温超导带材分切成 2 mm 宽的高温超导细丝. 本文通过冷热循环疲劳测试实验和带材显微观察两个角度相互验证, 对 2 mm 超导细丝临界电流性能做了具体评估. 创新性地提出“在窄丝化工艺中引入电镀铜工艺作为过渡来改善超导细丝临界电流特性”, 通过实验以及显微观察证实“电镀铜工艺能够在超导细丝表面生成铜保护层, 有效降低超导细丝临界电流的衰减”. 本文也为后续超导细丝在复合结构的应用中提供了重要参考.

关键词: 窄丝化工艺, 超导细丝, 临界电流, 电镀铜工艺

PACS: 74.25.Sv, 74.25.F-

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.01.005

Influence of Narrowing Process on Performance Damage Characteristics of 2G HTS Tapes

JIAO Ting¹, SHE Mengxin², WEI Bengang¹, LI Zhuyong^{2†}, JIN Zhijian²

1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai, 200010;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240

Received date: 2021-03-11; accepted date: 2021-05-23

【Abstract】 When applied in superconducting power equipment, the critical current characteristics of high temperature superconducting (HTS) tapes were affected by the size and direction of the external alternating magnetic field, showing obvious anisotropy. To reduce the influence under external field, narrow HTS tapes with 2 mm width were manufactured by narrowing process. In this paper, the influence of different processes on the characteristics of the HTS narrow tapes was verified by the thermal cycle fatigue experiments and the microscopic observation experiments. This paper innovatively proposed the introduction of copper electroplating process to improve the critical current characteristics of superconducting tapes. Meanwhile, experiments and microscopic observations proved that the copper electroplating process could generate a copper layer on the surface of superconducting tapes, thereby effectively reducing the attenuation of the critical current. This paper also provided fundamental reference for the subsequent application of HTS narrow tapes in composite structures.

^{*} 国家电网有限公司科技项目(项目号:B3094020000D)和国家自然科学基金资助(项目号:52077134)资助的课题

[†] lizhuyong@sjtu.edu.cn

Keywords: Narrowing Process, Narrow HTS Tapes, Critical Current, Electro-coppering Process

PACS: 74.25.Sv, 74.25.F-

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.01.005

Reference method: JIAO Ting, SHE Mengxin, WEI Bengang, LI Zhuyong, JIN Zhijian, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0039 (2021)

1 引言

在过去的几十年中,性能更好的第二代高温超导带材已广泛应用于电力设备领域,例如超导变压器^[1-2],超导限流器^[3-4],超导电缆^[5-6]等.在实际应用中,外部磁场会降低高温超导带材的性能,包括临界电流和交流损耗^[7].为了减少外部磁场的影响,国内外研究者已经提出了许多新的带材结构^[8].但是,它们通常基于宽度为 4 mm 到 12 mm 的高温超导带材,宽度为 2 mm 以及 1 mm 宽的高温超导带材由本课题组在 2016 年率先研究^[9].

本文通过窄丝化工艺将 4 mm 宽的高温超导带材分切成 2 mm 宽的高温超导细丝.由于尺寸小,高温超导细丝能够低成本、低难度地制备堆叠和扭绞等复合结构线材,对超导电力设备尺寸要求也更低,有着广阔的研究与应用前景,但是窄丝化工艺破坏了带材分切处的超导层,导致带材临界电流的衰减.然而,只要在实际应用中,超导层的破坏不在冷热循环疲劳测试中进一步传播,临界电流衰减不进一步扩大,窄丝化工艺获得的收益将大于临界电流衰减带来的损失.因此,需要对超导带材性能做具体评估.

本论文通过实验角度和微观角度来评估超导细丝的临界电流特性.实验角度,采取冷热循环疲劳测试来研究超导细丝临界电流变化.微观角度,通过显

微观察来研究超导细丝表面形貌特征.同时提出通过电镀铜工艺来改善超导细丝的性能损伤特性的方法.本文通过机械分切工艺、高温镀焊锡工艺以及电镀铜工艺制备了多种类型的高温超导细丝,对不同类型超导细丝开展冷热循环疲劳测试实验和带材表面显微观察实验.

2 超导细丝制备工艺

本研究采用了两种超导细丝制备工艺流程.图 1(a)所示工艺流程为“先镀后切”,即首先将 4 mm 宽的表面镀铜超导带材通过机械分切工艺^[10],制备未封装的 2 mm 宽超导细丝.考虑到单根 2 mm 宽超导细丝机械特性较差,实际应用过程中容易出现弯折、断裂、分层等情况,采取高温镀焊锡工艺对其进行封装来提高机械强度,制备镀焊锡封装的 2 mm 宽超导细丝.图 1(b)所示工艺流程为“先切后镀”.与图 1(a)所示工艺流程不同的是,本研究采用 4 mm 宽表面镀银超导带材,机械分切后先采取电镀铜工艺进行初步封装,制备 2 mm 电镀铜封装超导细丝,在此基础上再采取高温镀焊锡工艺制备 2 mm 宽电镀铜与镀焊锡封装超导细丝.经过以上工艺,本研究共制备 4 种类型 2 mm 宽超导细丝,每种类型有 2 组样品.采用四引线法,测量出所有超导细丝样品的初始临界电流(I_{c0}),相关结果如表 1 所示.

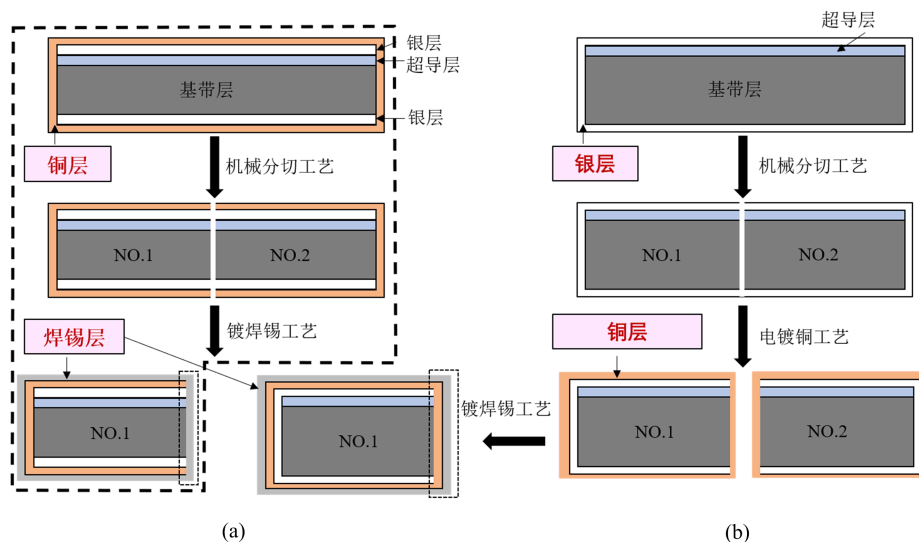


图 1 超导细丝制备工艺流程图(a)先镀后切、(b)先切后镀

表 1 不同类型超导细丝初始临界电流值

未封装超导细丝		镀焊锡封装超导细丝		电镀铜封装超导细丝		电镀铜和镀焊锡封装超导细丝	
样品	I_{c0}/A	样品	I_{c0}/A	样品	I_{c0}/A	样品	I_{c0}/A
A1	56	C1	111	E1	96	G1	93
A2	104	C2	74	E2	123	G2	105
B1	108	D1	108	F1	114	H1	96
B2	112	D2	35	F2	123	H2	105

3 结果与分析

3.1 冷热循环疲劳测试实验

在四引线法测量临界电流的基础上,本研究进一步提出冷热循环疲劳测试方法.与一般临界电流测量实验通过一次测量得到带材临界电流值不同,

冷热循环疲劳测试实验中,对一根超导带材每隔数个小时便开展一次临界电流测量,带材所处的环境在液氮温区(77 K)与常温温区间不断循环,最终得到临界电流值随时间变化的曲线,以此分析判断临界电流衰减在实验过程中是否进一步扩大.

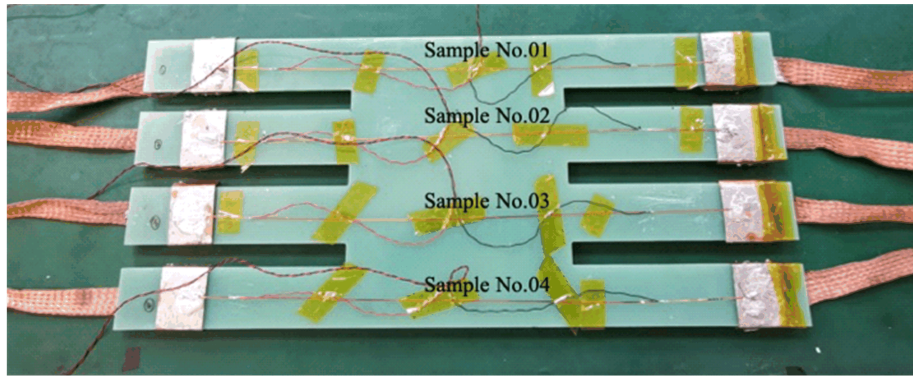


图 2 冷热循环疲劳测试实验模具

冷热循环疲劳测试是本论文研究窄丝化工艺对超导带材性能损伤特性的重要方法.图 2 是本论文设计的冷热循环疲劳测试实验模具,其优点在于能够在相同环境下一性测量同一类型 4 根超导细丝的临界电流值,避免了反复焊接和拆卸对超导细丝产生的负面影响.同时,通过选取合适长度的样品,可以最大程度减小疲劳测试过程中人为因素对实验结果的干扰.本研究中,超导细丝选取长度为 22 cm,电压引线之间的距离为 12 cm.单根超导细丝临界电流测量循环实验持续 200 小时左右,形成 20 组左右实验数据.图 3~6 为四种类型超导细丝的冷热循环疲劳测试实验结果.根据初始临界电流值(I_{c0})以及冷热循环疲劳结束后测量的临界电流值($I_{c_{200h}}$),可以计算出超导细丝临界电流变化率(η),计算公式如下:

$$\eta = \frac{\Delta I_c}{I_{c0}} = \frac{I_{c_{200h}} - I_{c0}}{I_{c0}} \quad (1)$$

以图 3(a) 所示,纵轴数据为归一化处理后的临界电流数据,这样可以将不同超导细丝样品的复杂结果简单化,便于理解与分析实验结果.横轴为冷热循环疲劳测试过程的持续时间.图中定义了两条虚直线,分别是归一化后值为 0.95、1.05 的两条虚直线.考虑到临界电流测量过程中,测量结果也会有 1~2 个电流增长周期的误差.本研究过程中,如果临界电流变化率在 $\pm 5\%$ 以内,即认定临界电流值在冷热循环疲劳测试前后未发生衰减.

对实验结果进行整理得到表 2.可以看到,未封装超导细丝与镀焊锡封装超导细丝存在明显的临界电流衰减.实验结果表明,机械分切工艺对超导带材超导层产生的破坏在冷热循环疲劳测试中进一步传播,导致临界电流出现衰减.同时,镀焊锡工艺的高温环境进一步破坏了超导带材超导层,超导细丝临界电流出现大幅度衰减甚至失超.同样作为封装工艺,

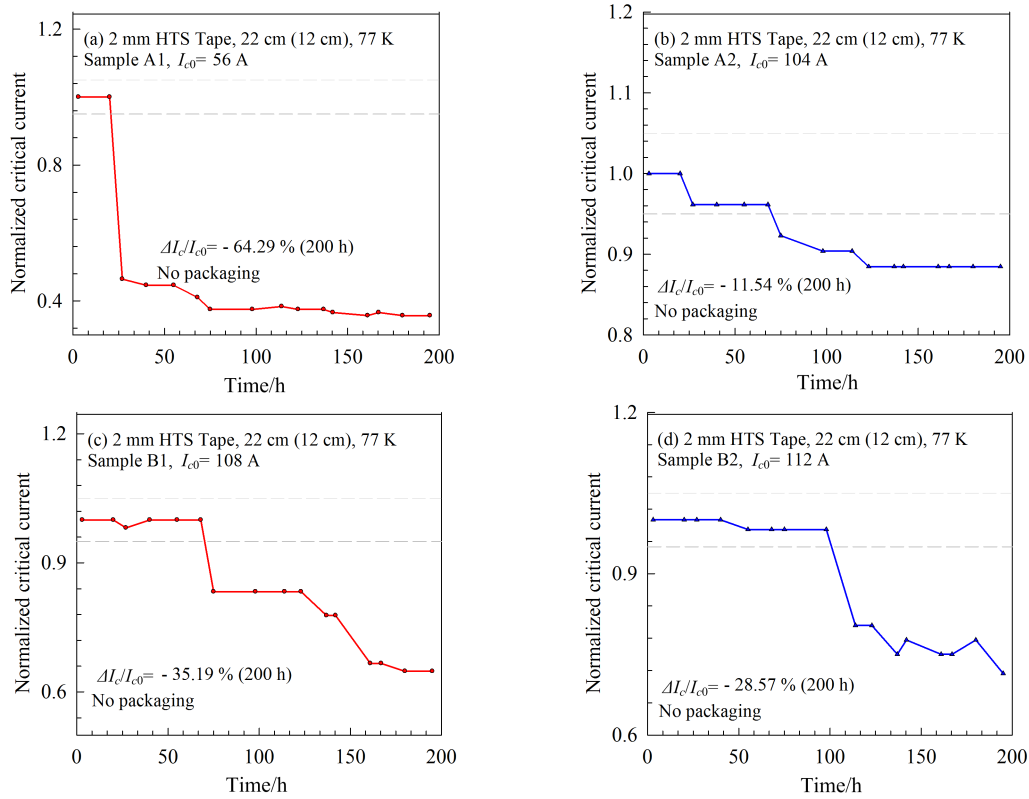


图3 A、B组未封装 2 mm 超导细丝冷热循环疲劳测试结果(a) 样品 A1、(b) 样品 A2、(c) 样品 B1、(d) 样品 B2

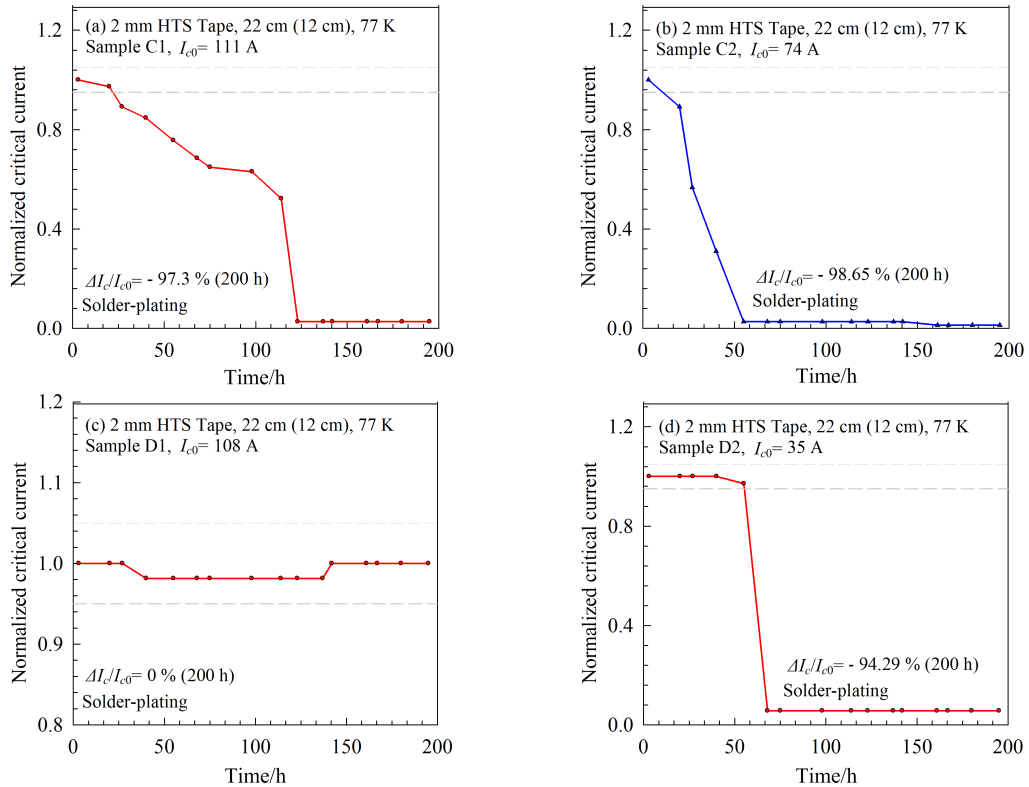


图4 C、D组镀焊锡封装 2 mm 超导细丝冷热循环疲劳测试结果(a) 样品 C1、(b) 样品 C2、(c) 样品 D1、(d) 样品 D2

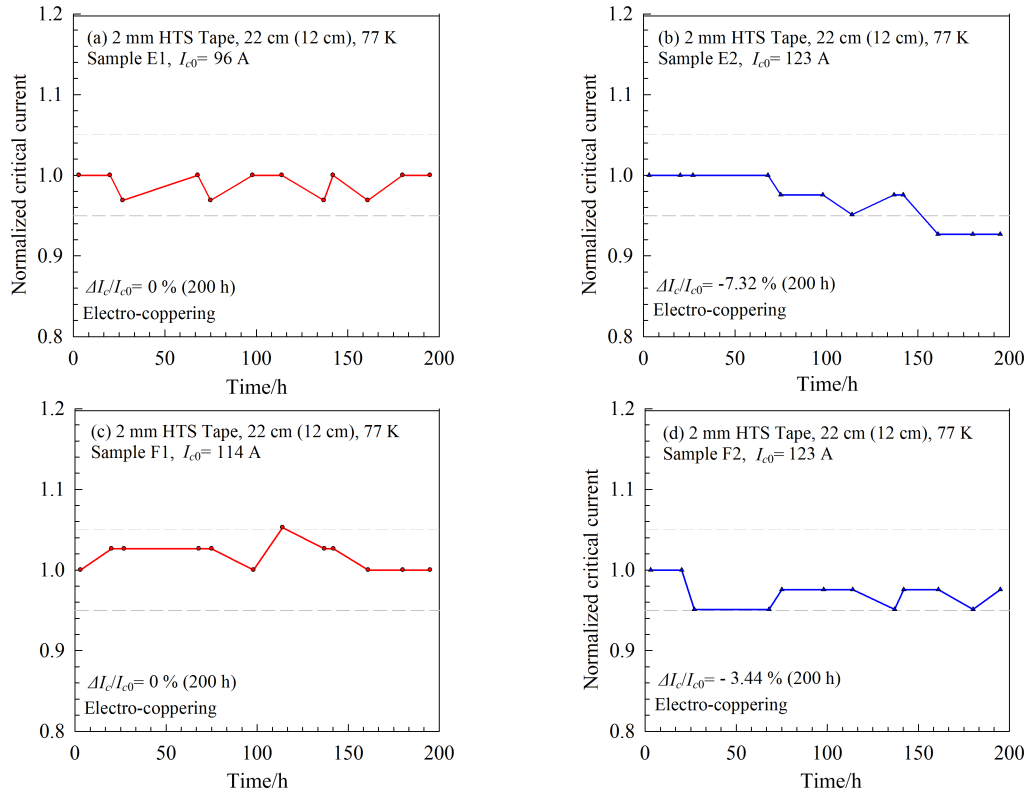


图 5 E, F 组电镀铜封装 2 mm 超导细丝冷热循环疲劳测试结果(a) 样品 E1、(b) 样品 E2、(c) 样品 F1、(d) 样品 F2

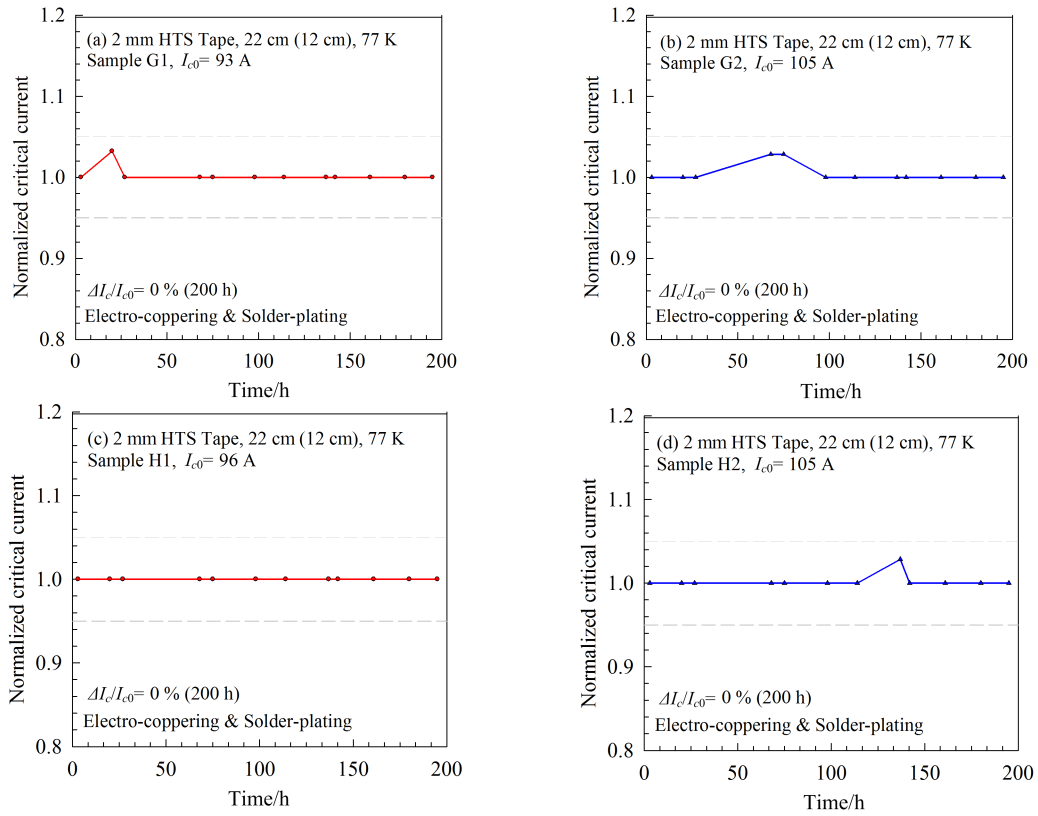


图 6 G, H 组电镀铜与镀焊锡封装 2 mm 超导细丝冷热循环疲劳测试结果(a) 样品 G1、(b) 样品 G2、(c) 样品 H1、(d) 样品 H2

电镀铜工艺则不会导致超导细丝临界电流进一步衰减,且能够有效提升超导细丝在冷热循环疲劳测试中的表现.与镀焊锡封装超导细丝大部分样品最终

失去超导特性相比,先采取电镀铜工艺再采取镀焊锡工艺,超导带材的性能得到巨大提升,电镀铜工艺让超导细丝进一步应用成为可能.

表 2 不同类型 2 mm 超导细丝冷热循环疲劳测试前后临界电流数据

未封装超导细丝		镀焊锡封装超导细丝		电镀铜封装超导细丝		电镀铜和镀焊锡封装超导细丝	
样品	临界电流变化率	样品	临界电流变化率	样品	临界电流变化率	样品	临界电流变化率
A1	-64.29%	C1	-97.3%	E1	0%	G1	0%
A2	-11.54%	C2	-98.65%	E2	-7.32%	G2	0%
B1	-35.19%	D1	0%	F1	0%	H1	0%
B2	-28.57%	D2	-94.29%	F2	-3.44%	H2	0%

3.2 显微观察实验

本研究通过金相光学显微镜^[11-12] (MOM, Metallographic Optical Microscope)对超导细丝带材侧

面做显微观察来进一步表征窄丝化工艺过程中超导细丝的性能损伤.显微观察结果如图 7 所示.

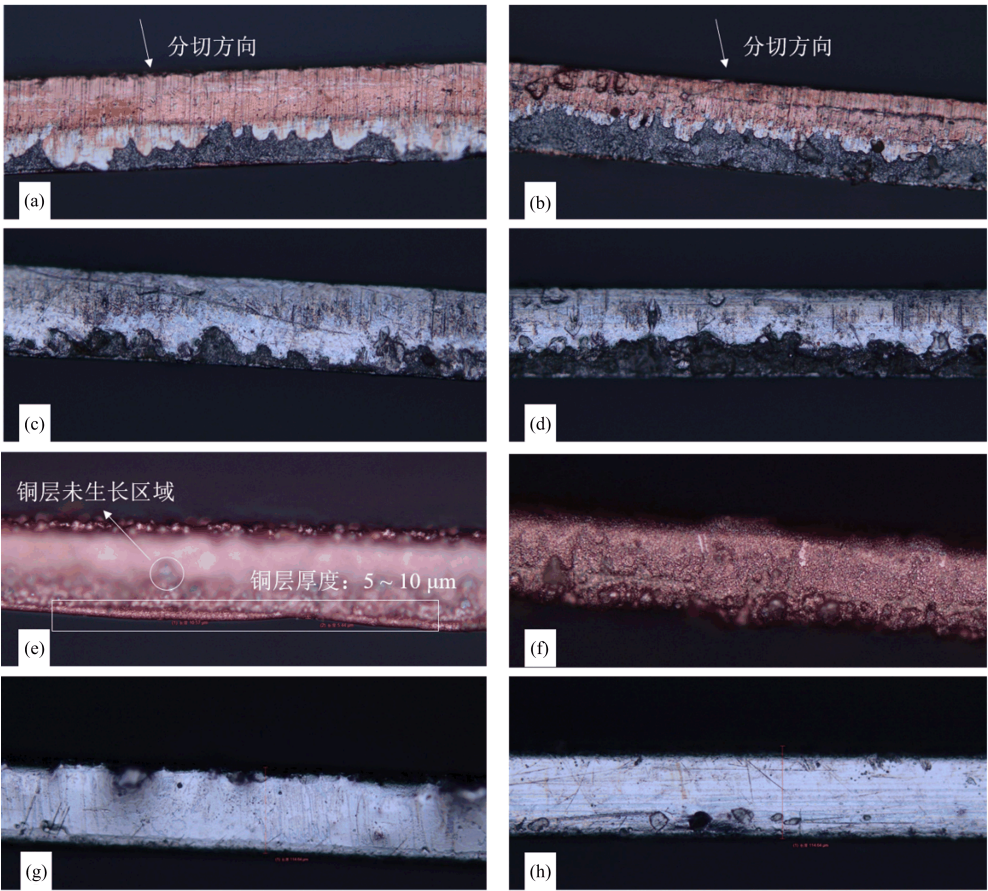


图 7 超导细丝显微形貌图(a) 未封装带材分切面铜层延展较大、(b) 未封装带材分切面铜层延展度较小、(c) 镀焊锡封装带材分切面焊锡覆盖率较高、(d) 镀焊锡封装带材分切面焊锡覆盖率较低、(e) 单次电镀铜工艺后分切面、(f) 两次电镀铜工艺后分切面、(g) 电镀铜与镀焊锡封装带材分切面、(h) 电镀铜与镀焊锡封装带材非分切面

图 7(a),图 7(b)为超导细丝分切面铜层延展显微形貌图. 本研究发现超导细丝表面的铜层会在分切过程中沿着分切方向向下延展,从而覆盖了一部分分切面,铜层延展率大小将直接影响焊锡层的覆盖率. 图 7(c),图 7(d)为超导细丝分切面焊锡覆盖率显微形貌图. 可以看出,焊锡与铜层有着很好的结合力,铜层延展率较大的情况焊锡附着率同样较大. 同时,当铜层覆盖率较低时,超导细丝不能在分切面有效形成起保护作用的焊锡层,此时镀焊锡封装后的超导细丝虽然机械性能得到加强,但是焊锡层容易在外界因素影响下出现分层甚至脱落. 图 7(e)为单次电镀铜后分切面显微形貌图,超导细丝分切面不能被铜层 100% 有效覆盖,分切面存在不连续的铜层未生长区域. 图 7(f)为过两次电镀铜工艺后,分切面都能够被铜层有效覆盖,形成铜保护层. 图 7(g),图 7(h)为电镀铜与镀焊锡封装带材分切面以及非分切面显微形貌. 超导细丝分切面生成了完整

的、正常的焊锡保护层,这个前提是电镀铜工艺在分切面生成了完整的铜保护层. 再一次验证电镀铜工艺有效提升超导带材的性能,让超导细丝进一步应用成为可能.

4 结 论

本文通过窄丝化工艺制备 2 mm 宽超导细丝,并从实验角度与微观角度对超导细丝样品临界电流特性进行评估. 研究发现如下:机械分切工艺与高温镀焊锡工艺对超导层的破坏在冷热循环疲劳测试过程中进一步传播,导致超导细丝临界电流出现持续衰减,性能大大降低. 显微观察结果表明,镀焊锡工艺不能在超导细丝分切面有效生成保护层. 在引入电镀铜工艺后,超导细丝的临界电流性能有明显改善,分切面能够形成完整的焊锡保护层. 本研究为 2 mm 宽超导细丝的后续应用提供了重要的参考依据.

参 考 文 献

- [1] 罗朝志,邱清泉,张宏杰,韦德福,郭铁,张京业,靖立伟,张国民,低温与超导,2020, **48**(10), 23-28.
- [2] 戴少涛,王银顺,滕玉平,许熙,南方电网技术,2015, **9**(12), 87-97.
- [3] 信赢,南方电网技术,2015, **9**(03), 1-9.
- [4] 信赢,田波,魏子镪,电工电能新技术,2017, **36**(10), 1-7.
- [5] 杨本康,张东,李秋君,低温与超导,2019, **47**(09), 1-7.
- [6] 魏周荣,电线电缆,2019, (01), 1-4.
- [7] Iwakuma M et al., 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15** (2), 8476082.
- [8] Fietz W H, Wolf M J, Preuss A, Heller R, and Weiss K P., 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(4), 4800705.
- [9] Li Z, Li J, Wang Y, Yao Z, Kang Z, Yuan B, Yang Z, Jin Z, and Hong Z., 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (4), 8201104.
- [10] Li Z, Li Y, Wang M, Xi D, Zhang J, Ma Y, Hong Z, Jin Z, and Ryu K., 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (3), 4800405.
- [11] Yao L P et al., 2019 *Journal of Physics Conference Series*, 1293:012039.
- [12] She M X et al., 2020 *Journal of Physics: Conference Series*, 1590(1): 012030.