



# 水平连铸双金属复合接地极缺陷 分析与工艺改进

案例制作：林高用 教授

中南大学材料科学与工程学院





# 内容提纲



1、案例来源与背景



2、缺陷分析



3、工艺改进



4、总结与思考



# 1、案例来源与背景

➤ 案例来源：浙江省某公司

➤ 案例背景：

接地是防雷工程的最重要环节。目前我国仍处于**防雷接地技术**发展的初级阶段，应用领域和产品规格都有待系统开发。**铜包钢**及**锌包钢**双金属复合材料作为防雷接地极具有广阔的市场前景，特别是铜包钢双金属复合导电线，兼具铜与钢的优良特点，导电性好、高频衰耗小、强度高、结构重量轻、能耗小和成本低、可节省60%~85%的铜使用量。



### ▶ 案例背景：

本案例采用“水平连铸”的短流程技术工艺生产防雷接地设施用**铜包钢**（CCS）及**锌包钢**（ZCS）双金属复合线、棒产品。

本案例采用的“水平连铸”法主要工艺流程如图1所示：

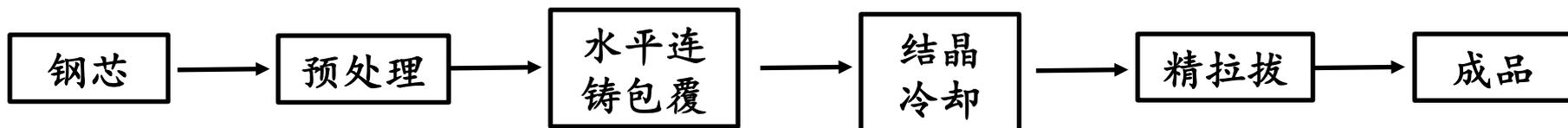


图1 水平连铸工艺流程图

生产过程中，首先对钢芯进行多辊矫直，并进行表面除锈、净化预处理，使钢芯经过对中装置进入电解铜溶液包覆铜层，随后于结晶器中冷却结晶，盘绕成卷，最终进行精整拉拔，成品入库。

铜包钢与锌包钢均采用“水平连铸”的方法生产，但两者的具体工艺参数有所区别，**铜包钢**原料为钢芯盘卷料，而**锌包钢**钢芯为直杆料。





铜包钢生产线



## ► 案例背景：

连铸铜包钢接地极是一种双金属复合材料，是将铜与钢两种金属通过特殊工艺加工而成的复合导体。该导体既有钢的高强度、优异的弹性、较大的热阻和高导磁特性，又有铜的良好导电性能和优良的抗腐蚀性能。连铸铜包钢接地极是接地极强度与高抗腐蚀性能的完美结合，是接地效果佳、施工方便的接地极。本产品导电能力强，抗腐蚀性能极佳，保证了所使用的钢材具有极高的抗张强度，可直接打入地下。使用寿命可达50年以上。

### ◆ 产品特性

- 1、**特殊工艺制造**：水平连铸工艺制造，铜钢冶金分子结合。绝不会出现脱节、翘皮、开裂现象。复合表层为无氧铜，尤其是外部包覆的铜层具有良好的抗腐蚀性能、导电性能更优。
- 2、**高导磁性能**：复合基体金属为优质碳素钢，强度高、导磁性好。
- 3、**电气性能更佳**：表层为金属铜，导电性能好，电阻远低于钢材、镀锌钢材等常规材料。
- 4、**抗腐蚀性能更佳**：铜层更厚，保证了其抗腐蚀性能更佳，产品符合国家相关标准，铜层厚度有：  
0.5 mm、1mm、1.5mm。  
可按照客户的要求定制。



## ► 案例背景：

**锌包钢复合接地材料**是一种新型的接地产品，它以低碳钢和高纯锌为主要原料，通过特殊工艺**加热挤压**，将高纯锌加热处理压覆到低碳钢上，形成双金属复合材料。该产品综合了锌带阳极和传统镀锌钢质接地材料的优点，即具有钢的高强度、较高的热稳定性，又具有阴极保护的功能，接触电阻小于 $0.5\Omega$ ，且比接地与阴极保护分开做更科学、更经济、使用年限更长，寿命一般可达50年以上。锌包钢复合接地极可广泛应用于接地及阴极保护共同存在的场合，也可分别作为接地产品和阴极保护产品。

- 1、通过特殊加热挤压工艺将纯锌（0#锌）压覆到低碳钢上形成双金属复合导体，为国内先进工艺。
- 2、耐腐蚀性强，使用年限长达50年。锌包钢采用国际最先进的技术，残留物不会残留在锌包钢棒体内，棒体表面经过防腐处理，从而克服了传统扁钢、圆钢接地的腐蚀造成的使用寿命的问题。
- 3、表层为0#纯锌，锌层厚度大于3mm，锌层不会被破坏，导电性能好，电气性能稳定。
- 4、锌包钢接地极选用较大截面的低碳钢，保证了该产品的机械强度、热稳定性。
- 5、由于足够厚的锌层，对设备的阴极保护具有积极的作用，一次性同时解决阴极保护和接地两个问题，从而大大降低了工程成本。
- 6、锌包钢复合接地极以低碳钢为钢芯，具有钢的强度和热稳定性，保证接地泄流功能。
- 7、锌作为覆层金属，其导电性能更优。
- 8、锌作为覆层金属，具有较强的耐腐蚀性，大大延长使用寿命。
- 9、锌包钢由于有一定厚度的锌层（3mm以上），可以作为牺牲阳极体，能保护地网、地下金属构筑物和相关钢铁设备等。
- 10、锌具有防爆功能，施工不产生火花。



## 2、缺陷分析

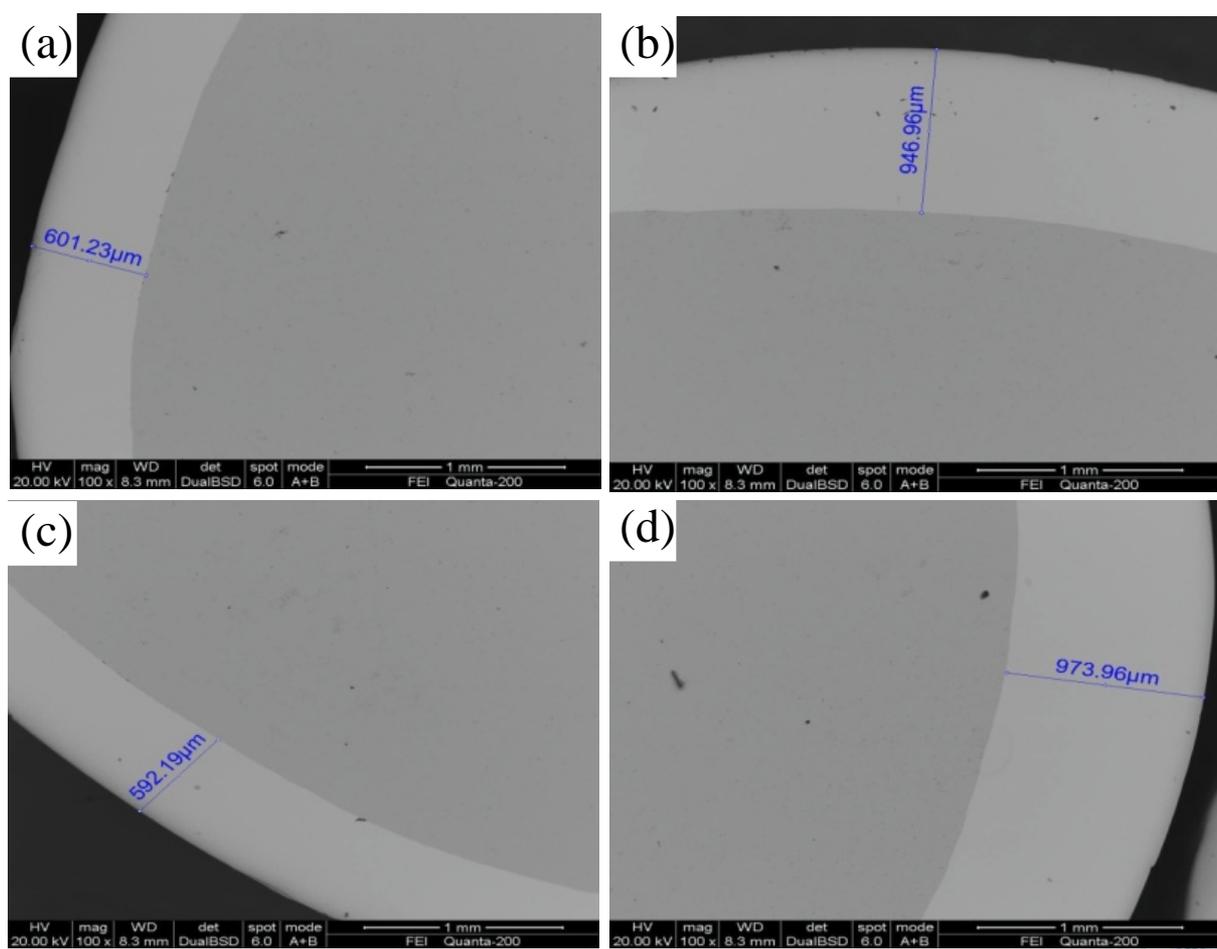
### ►缺陷分析:

实际生产过程中发现，铜包钢棒材包覆的铜层厚度不均，存在严重的偏心问题，包覆层厚度差最大可达 $381.77\mu\text{m}$ ，偏心率达48.8%；而锌包钢棒材包覆的锌层厚度较为均匀，但Zn/Fe界面存在明显的裂纹，沿着界面延伸范围大。

本案例首先针对上述铜包钢和锌包钢产品出现的缺陷进行分析，分析缺陷形成的规律和机理；然后依据分析结果，从预处理、工装模具和工艺等方面提出工艺改进方案，并实现产业化应用。



## 2.1 铜包钢缺陷



铜包钢双金属复合材料的盘卷钢芯经过辊式矫直时，钢芯由于发生了变形，内部存在残余应力。当进入熔炉时，遇到高温的铜液，由于应力的释放使钢芯发生变形弯曲；在进入结晶器时，偏离原来的路径，产生对中偏移问题，导致最终产品存在覆层壁厚不均。此外，铜包钢双金属复合接地极要求包覆铜层厚度较薄，从而，铜层厚度更难以控制，偏心问题被放大。

图2 铜包钢复合材料不同方位铜层厚度测量 (SEM)



## 2.2 锌包钢缺陷

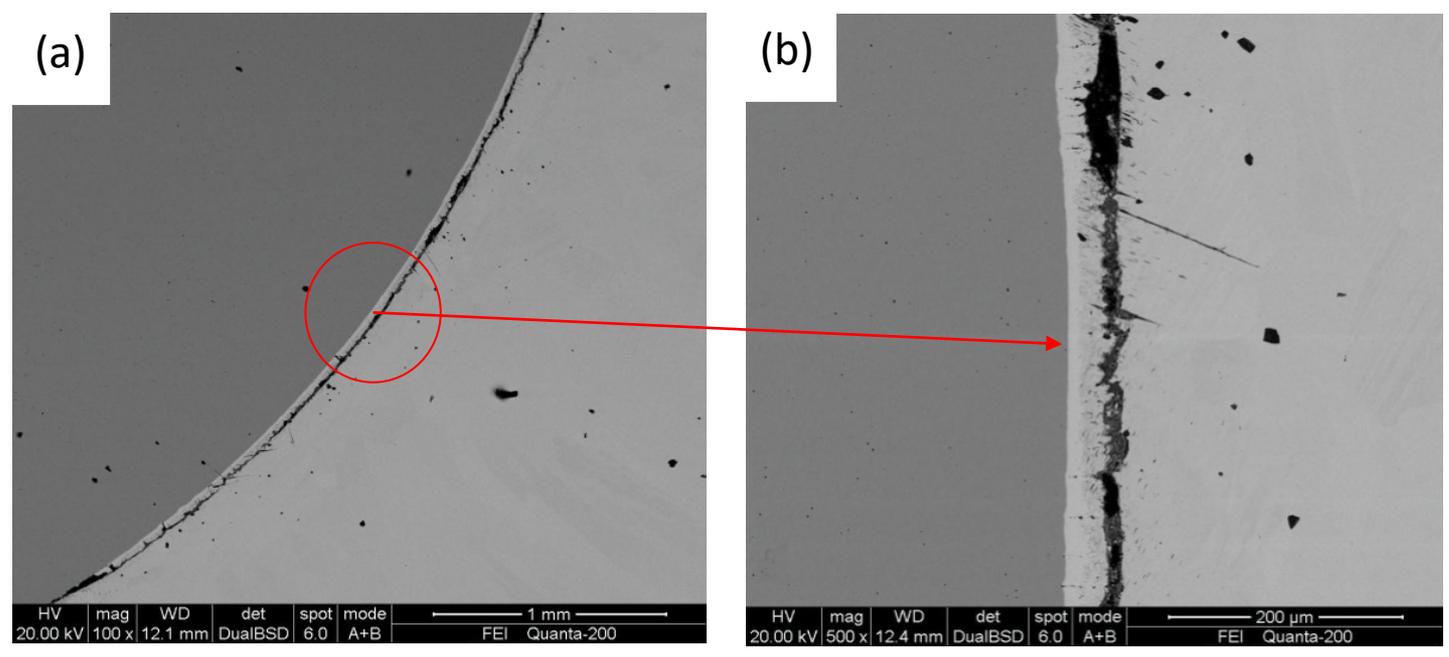


图3 锌包钢双金属复合材料的界面扫描形貌(SEM)  
(a)锌/钢界面扫描图片；(b)局部放大界面扫描图片



## 2、缺陷分析

### 锌包钢缺陷分析

由锌包钢双金属复合材料的界面扫描形貌可知，Zn/Fe界面存在明显的**裂纹**，裂纹较为严重，沿着界面延伸范围大。且裂纹主要产生在离界面较近的锌层一侧。这是因为两种金属物理性能差异较大，在水平连铸复合过程中，未预热的钢芯进入锌熔体时，锌液附着在钢芯凝固，形成冶金结合；进入结晶器后，外侧的锌层凝固收缩较内侧剧烈，引起锌层内部产生**径向拉应力**；此时锌层为铸态组织，晶粒粗大，强度较低，在拉应力达到一定程度时，锌层将被拉裂，释放内应力；在拉应力的进一步作用下，裂纹扩展形成宏观裂纹。冷热不均匀或者快速冷却造成内应力较大，超过了锌层的强度而开裂。可见，通过**预热钢芯**或降低结晶器冷却强度，可在一定程度上降低凝固热应力。





## 3、工艺改进

### 3.1 铜包钢工艺改造

(1) 钢芯在轧辊矫直后增加一道次的热处理，加热到AC3以上进行完全退火，可以进行相变重结晶，使得内应力消除，且能改善其组织，提高其性能，能较大程度减少因内应力释放而产生的偏心。

(2) 在熔炉与结晶器对接位置增加一处可移动**对中调整装置**，可以使铜层厚度的控制更加精确，减少偏心。

(3) 在结晶器表层增加一个水冷循环回路，通过控制水流速度达到加速冷却效率的目的。保证钢芯表层的铜液快速凝固，降低铜液因自身重力的影响流向钢芯下部造成严重偏心。

(4) 减少辊矫和无酸洗预处理系统的震动，减少内应力的产生。

### 3.2 锌包钢工艺改造

(1) 适当的对钢芯进行预热，精确控制预热温度，降低裂纹产生倾向。

(2) 降低冷却速度，控制冷却水的进水量和出水量，以及冷却水的温度，流速等工艺。



# 3、工艺改进

## 3.3 结晶器改造

### 1、水冷循环回路设计

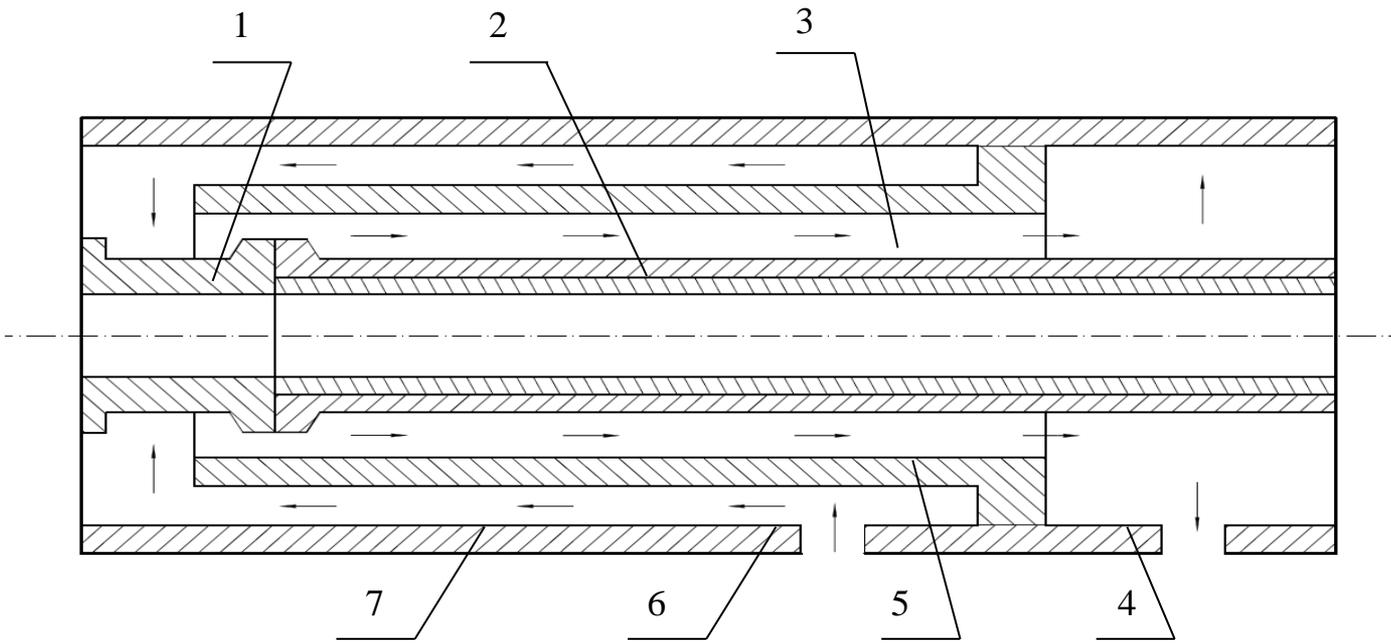


图4 结晶器冷却水循环简图 (箭头所示方向即为冷却水循环方向)  
 1.短铜套; 2.石墨套; 3.铜衬套; 4.出水口; 5.紫铜水套;  
 6.进水口; 7.钢外套



# 3、工艺改进

## 2、对中调整装置设计

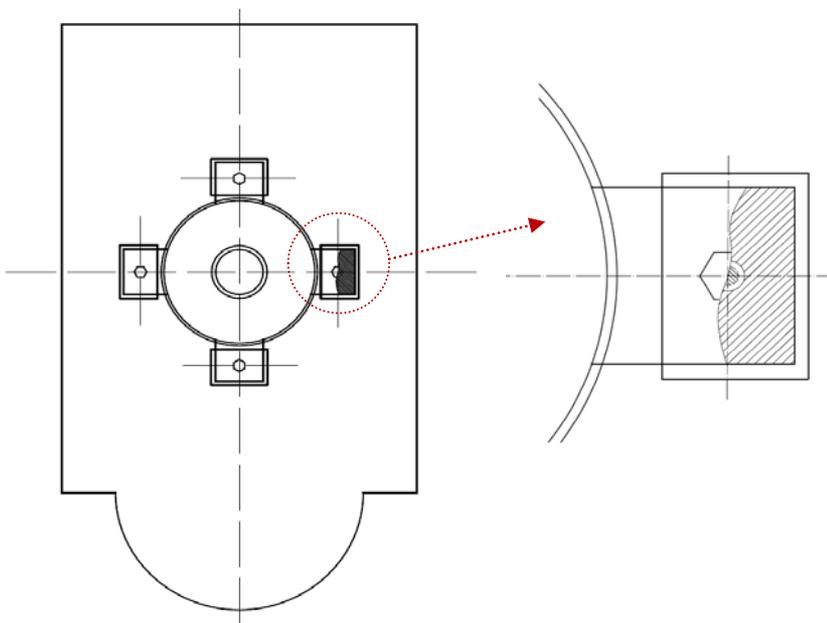


图5 结晶器对中调整装置正视图及其局部放大

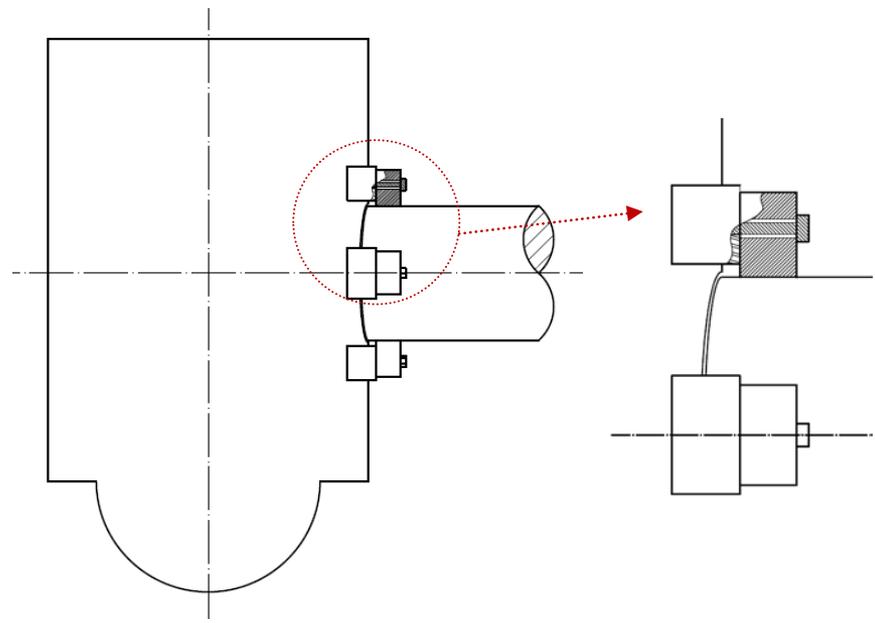


图6 结晶器对中调整装置左视图及其局部放大图



# 3、工艺改进

## 3.4 改进后生产线及产品

### 1、改进后生产线

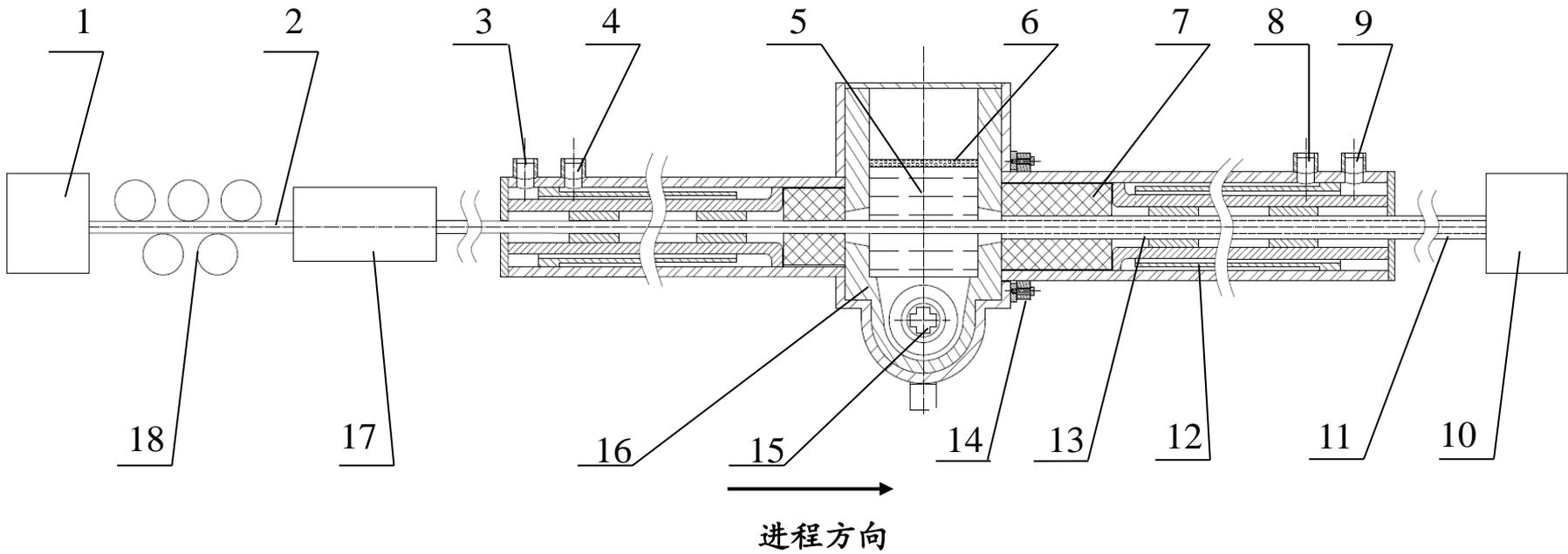


图7 双金属复合接地极改进后生产线示意图

- 1.盘卷料； 2.钢芯； 3.出水口； 4.进水口； 5.铜水； 6.覆盖剂； 7.石墨模； 8.进水口； 9.出水口；
- 10.牵引机； 11.铜（锌）包钢； 12.水冷循环回路； 13.结晶器； 14.可移动精确对中调整装置； 15.有芯熔炉； 16.耐火炉砖； 17.免酸洗表面处理； 18.辊式矫直





### 3、工艺改进

### 缺陷分析与工艺改进

#### 2、改进工艺后生产的产品

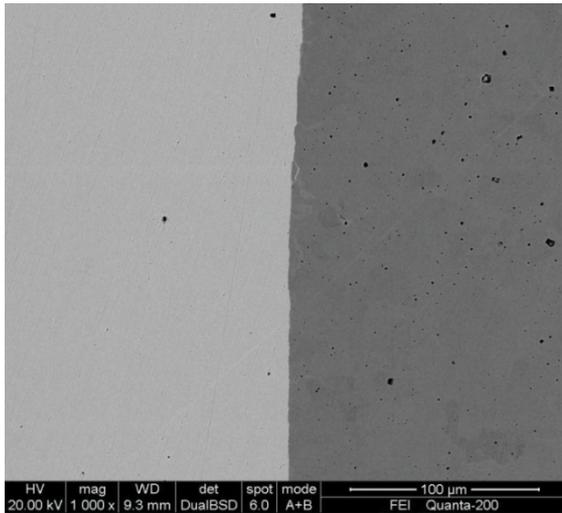


图8 工艺改进后锌包钢双金属复合接地极界面扫描形貌 (SEM)

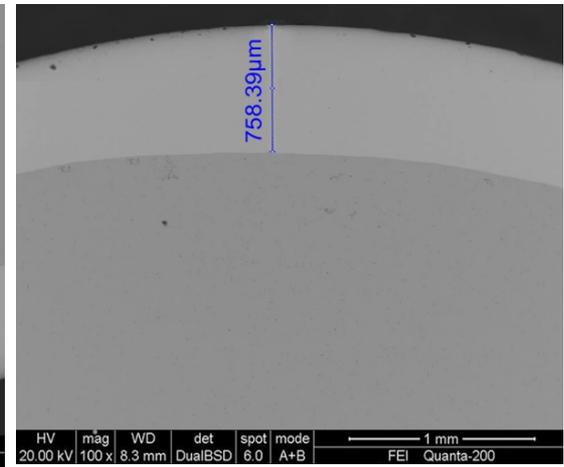
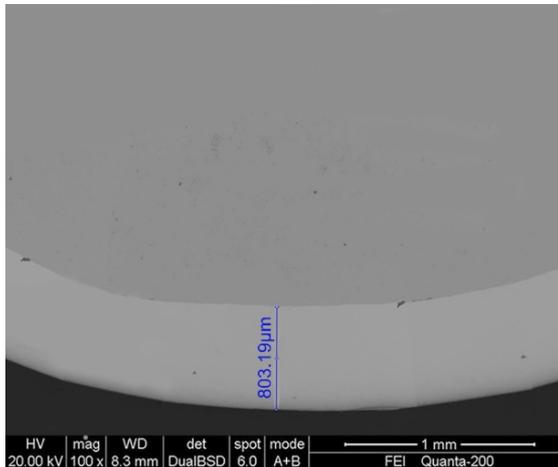
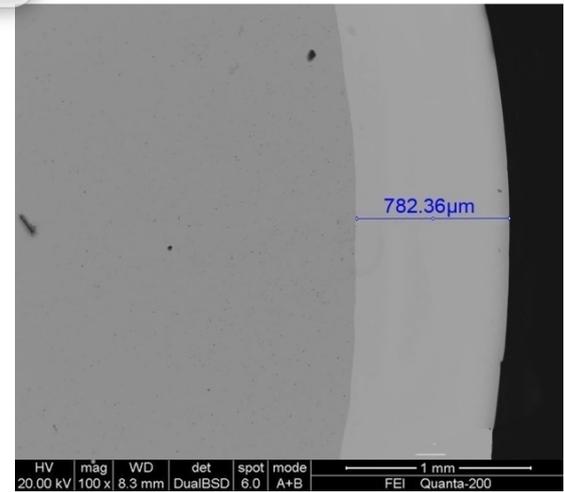
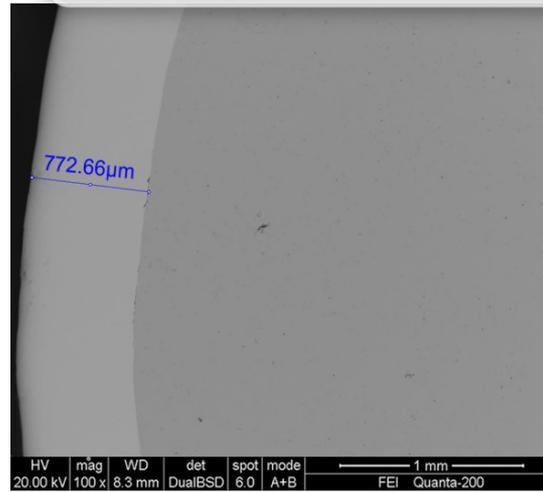


图9 工艺改良后铜包钢双金属复合接地极不同方位铜层厚度 (SEM)



## 4、总结与思考

通过分析总结了铜包钢和锌包钢双金属复合接地极中的缺陷，并提出了相应的工艺改进方案，得出如下结论：

1) 在**铜包钢**双金属接地极中，铜层厚度存在偏差，偏心问题较为严重，偏心率达到48.8%。这主要是由于矫直后钢芯内部存在的残余应力在熔炉中遇热而释放，发生微小变形，而导致铜层凝固厚度存在差异。

2) 在**锌包钢**双金属接地极中，离界面较近的锌层一侧中产生较大裂纹。这主要是由于锌和钢热膨胀系数相差较大，且冷却速度较快，使Zn/Fe界面产生较大的内应力，使裂纹在抗拉强度较小的锌层中萌生并扩展。

3) **改善铜包钢双金属接地极的偏心问题**可通过减少内应力释放和增加对中调整装置解决。

4) **改善锌包钢双金属接地极的开裂行为**可通过钢芯预热和降低冷却速率解决。

### 思考题：

- 1、针对此类双金属复合接地极产品，是否还有更好的加工方式？或者，能否设计出更佳的材料结构？
- 2、避雷系统有哪些结构？选用什么材料？



## 4、总结与思考

### 引申思考：

1、**解决问题的两个基本途径：预防和补救。**凡事首先应尽可能预防问题的产生，但并非所有问题都能预防。本案例中，铜包钢的钢芯原料为盘卷线杆，尽管进入铜熔体前进行了矫直，但无法完全消除其弯曲变形，因此容易从进入结晶器开始就产生偏心；而在炉内高温熔体中设置纠偏装置显然不现实，因此只能在炉外设置纠偏装置，这就是一种典型的**补救**措施。

2、**夯实专业基础知识。**本案例对于锌包钢产品的界面开裂缺陷，是通过对直条钢芯进行预热和降低结晶器冷却强度进行有效**预防**的。其中涉及金属反向凝固原理及铸造应力形成机理等问题，与本专业的**基础理论**密切相关。由此可引导学生**夯实基础**，学会将理论与实际结合解决工程问题的方法。



谢谢！

