北京铸铁成金机电设备有限公司
Beijing Zhutiechengjin Electromechanical Equipment Co., Ltd. · 铜覆钢接地材料 · 2009 年至今

接地防腐材料的收敛

从百花齐放到 DL/T 2650-2023 的定性：弱腐蚀镀锌钢，中、强腐蚀铜覆钢，极强腐蚀纯铜

镀锌钢接地网大面积腐蚀失效之后，中国电力行业先后尝试了锌包钢、不锈钢及不锈钢复合材料、高纯铁、纯铜、铜覆钢，以及纳米碳涂层钢、石墨基柔性接地体等。本报告梳理这一"百花齐放"的阶段，以及 DL/T 2094-2020、Q/GDW 12015-2020 到 DL/T 2650-2023 三部规范如何按土壤腐蚀等级把选材收敛成一条阶梯。所有条款引自原文并注明出处。

技术报告 ZTCJ-TR-02 · 2026 年 10 月 · 第 1 版
编制：北京铸铁成金技术部 · 审核：总工程师 丛远新
依据：DL/T 2650-2023、DL/T 2094-2020、Q/GDW 12015-2020、DL/T 1312-2023、Q/GDW 10466-2021

摘要

一条阶梯。DL/T 2650-2023《电力工程接地金属材料技术监督导则》第 5.1.1.5 条把接地金属材料的选型按土壤腐蚀等级定成四档，这是中国电力行业对"用什么防腐接地材料"这个问题的最终表态：

微、弱腐蚀	中腐蚀	强腐蚀	强特殊 / 室内地下
热浸镀锌钢（锌层平均 ⩾ 85 μm、最小 ⩾ 70 μm）	热镀锌钢联合阴极保护，或铜覆钢（铜层 ⩾ 0.60 mm）	铜、铜覆钢（铜层 ⩾ 0.80 mm）或其他等效防腐性能材料	含盐 ⩾ 1.5% 的滨海、填海、化工、盐碱区宜用铜（Q/GDW 12015）；室内及地下变电站应采用纯铜

这条阶梯的逻辑是"每一档用能满足设计寿命的最便宜材料"：弱腐蚀用铜是浪费，中腐蚀镀锌钢寿命不够，强腐蚀 0.6 mm 不够，极强腐蚀铜覆钢也扛不住。它不是对任何一种材料的否定，而是把每种材料放到它真正创造价值的区间。

1　问题的起点：镀锌钢接地网的腐蚀失效

中国存量接地网的绝大多数是热浸镀锌扁钢和圆钢。它便宜、焊接方便、与铁塔和构架同质，在弱腐蚀土壤中可以工作几十年。问题出在中、强腐蚀土壤：锌层只有几十微米，在盐渍土、酸性土和杂散电流环境下几年内耗尽，之后钢基体以每年零点几毫米的速度减薄，接地引下线在土壤交界处锈断是最典型的失效形态。

DL/T 2650-2023 附录 E 收录了一个典型案例，可以直接作为这一阶段的注脚：某 110 kV 输电线路接地扁钢严重腐蚀，一根塔腿接地引下线已锈断，腐蚀区位于扁钢与土壤交界处，开挖检查发现全线接地引下线普遍腐蚀。检测结果：基体为合格的 Q235B；镀锌层仅 2.3–13.2 μm，属冷镀工艺；土壤 Cl^- 3930 mg/kg、硫酸盐 1320 mg/kg、电阻率 2.3 Ω·m、pH 8.57，判定为"强"腐蚀等级。导则给出的结论和建议是：

> E.5.1　主要原因：未结合工程所在地土壤腐蚀性分级及工程特点合理选材，导致镀锌接地引下线在强腐蚀土壤环境下无法达到设计使用年限；次要原因：该镀锌件采用冷镀工艺，镀层厚度偏低……
> E.5.2　建议：结合大修计划，将该区域输电线路接地材料改造为铜材或镀层厚度大于 0.8 mm 的铜覆钢材料。
> —— DL/T 2650-2023 附录 E（资料性）接地金属材料典型失效分析案例

这个案例说明了两件事：失效的根源是"没有按土壤腐蚀等级选材"，而不是镀锌钢本身不好；修复的方向是铜或 0.8 mm 以上的铜覆钢。

2　百花齐放：行业给出的各种答案

镀锌钢失效的压力下，二十一世纪头十几年里，中国市场上出现了一大批防腐接地材料，各有其标准、厂家和试点工程。按材料类别整理如下：

材料	原理与卖点	对应标准	实践中暴露的问题
锌包钢	钢芯外包 1 mm 以上锌层，牺牲阳极式保护，与镀锌网同质	DL/T 1457	锌层消耗快，强腐蚀土壤需 3–5 mm 锌层（DL/T 2650 表 2），弯折处易裂
不锈钢 / 不锈钢复合材料	奥氏体不锈钢或不锈钢包覆钢芯，钝化膜防腐	DL/T 248、DL/T 1667	氯离子环境点蚀；两部防腐规范均注明滨海土、盐渍土不宜使用；导电率低
高纯铁	降低杂质以减缓腐蚀	—	仅见于 DL/T 2094 强腐蚀备选，应用有限
纯铜	耐蚀、导电、放热焊接成熟	DL/T 1342	价格高，防盗压力大，与钢构架的电偶腐蚀需评估
铜覆钢	钢芯承力、铜层防腐导电，铜用量为纯铜的 1/5 左右	DL/T 1312、Q/GDW 10466	早期 0.25 mm 电镀产品在中、强腐蚀土壤寿命不足（见本公司 TR-01 报告）
纳米碳涂层钢	在钢质接地体表面涂覆纳米碳防腐涂层，以涂层隔绝土壤	属 DL/T 2094 第 5.4 条"防腐涂层保护"范畴：涂料须符合国家、行业涂料标准，被涂覆的接地体本身仍须满足接地材料标准，与阴极保护联用时须避免过保护损伤涂层（5.4.1–5.4.4）	涂层一旦在运输、施工或弯折中破损，破损处即为裸钢，防腐依赖涂层完好性，现场无法像镀层那样测厚验收；据行业反馈，主要在中石化系统内使用，其他行业未推开，质量问题较多
石墨基柔性接地体（石墨绳：铜芯外包石墨）	非金属外层不腐蚀，柔性便于杆塔基础敷设	行业标准《输电线路杆塔石墨基柔性接地体技术条件》	适用范围限于输电线路杆塔接地：线路允许一定的雷击跳闸率，杆塔接地电阻的要求也远宽于变电站地网；变电站、轨道交通、化工等对接地电阻和热稳定有硬性要求的项目不采用。不在 DL/T 2650 金属材料监督范围内

这一阶段的特征是：每种材料都能举出成功的试点，也都有失败的案例；设计院面对十几种选择，缺少一个按工况判断的统一尺度。规范体系随后做的，正是提供这个尺度。

3　规范的收敛：三步走到一条阶梯

3.1　第一步：DL/T 2094-2020 按腐蚀等级列出可选材料

DL/T 2094-2020《交流电力工程接地防腐蚀技术规范》第 5.2.1 条首次把选材与土壤腐蚀等级绑定，并给出各材料的最低包覆层厚度：

> 5.2.1　接地装置金属材料可选用普通碳素钢、热浸镀锌钢、高纯铁、锌包钢、铜覆钢、铜、不锈钢等。
> 5.2.1.1　土壤腐蚀性为微时，可采用普通碳素钢或热浸镀锌钢。
> 5.2.1.2　土壤腐蚀性为弱时，可采用热浸镀锌钢、锌包钢或铜覆钢……铜覆钢铜层厚度应大于 0.25mm。
> 5.2.1.3　土壤腐蚀性为中时，宜采用热浸镀锌钢，可采用热浸镀锌钢联合阴极保护、铜覆钢、锌包钢等方法。锌包钢锌层厚度不低于 1.0mm；铜覆钢铜层厚度应大于 0.6mm……
> 5.2.1.4　土壤腐蚀性为强时，宜采用热浸镀锌钢联合阴极保护方法，亦可采用高纯铁、锌包钢、铜、铜覆钢、不锈钢或不锈钢复合材料。不锈钢或不锈钢复合材料在氯离子含量高的滨海土和盐渍土地区不宜使用。铜覆钢铜层厚度应大于 0.8mm……
>
> —— DL/T 2094-2020 第 5.2.1 条

这一版还保留了"百花齐放"的痕迹：中、强腐蚀仍以镀锌钢联合阴极保护为"宜"，高纯铁、锌包钢、不锈钢都在备选之列。但三个关键数字已经出现：0.25 / 0.6 / 0.8 mm。

3.2　第二步：Q/GDW 12015-2020 收紧备选、点名重要站点

国家电网的企业标准 Q/GDW 12015-2020《电力工程接地材料防腐技术规范》同年发布，选材原则（第 5.2.2 条）与 DL/T 2094 同构，但有三处明显收紧：微腐蚀直接"宜采用热浸镀锌钢"；中腐蚀把铜、铜覆钢列为与镀锌钢并列的常规选项，镀锌钢须"根据当地土壤腐蚀数据加大设计截面"，阴极保护须"经充分论证"；强腐蚀备选中不再出现高纯铁和锌包钢。它还新增了两条针对性规定：

- 第 4.8 条：中、强腐蚀地区的 330 kV 及以上厂站、全户内变电站、220 kV 及以上枢纽站、66 kV 及以上城市站、紧凑型站，以及强、强特殊腐蚀地区的 110 kV 厂站，"宜采用铜、铜层厚度大于等于 0.8mm 铜覆钢或其他等效防腐蚀措施"。
- 第 5.2.2.5 条：含盐量 ⩾ 1.5% 的滨海区、填海区、化工区、盐碱地等强特殊腐蚀地区，变电站接地工程宜选用铜；第 5.2.2.6 条：pH ⩽ 4.5 时铜覆钢铜层宜 ⩾ 1.0 mm。

3.3　第三步：DL/T 2650-2023 定性

DL/T 2650-2023 是技术监督导则，它不再讨论"可以用什么"，而是规定供电企业在设计校核、基建监督、运行监督三个阶段按什么尺度检查。第 4.3 条划定监督对象为"裸碳钢、热浸镀锌钢、锌包钢、铜、铜覆钢、不锈钢、不锈钢复合材料等材料及其连接件"——非金属接地体不在其列。第 5.1.1.5 条给出最终的阶梯（见摘要），并以三张表把每种包覆材料的最小厚度按腐蚀等级定死：

土壤腐蚀性分级	热浸镀锌钢 锌层	锌包钢 锌层 mm（引下线及水平极 / 垂直极）	铜覆钢 铜层 mm	不锈钢复合材料 包覆层 mm
微、弱	平均 ≥ 85 μm，最小 ≥ 70 μm（5.1.3.3）	1 / 3	0.25	0.50
中		3 / 3	0.60	0.50
强		3 / 5	0.80	0.70

出处：DL/T 2650-2023 表 2（锌包钢）、表 4（铜覆钢）、表 5（不锈钢复合材料）；均为任意测试点最小值。

导则还写入了几条此前分散在各规范中的硬性规定：长期使用的接地材料不应为裸碳钢，不应采用铝导体（5.1.1.4）；室内变电站及地下变电站应采用纯铜（5.1.1.7）；同一区域宜采用同一材质，铜和铜覆钢可用于同一接地区域，改造工程用代用材料须预先评估电偶腐蚀（5.1.1.2）；强腐蚀区域除合理选材外应综合考虑加大截面、增加镀层厚度、联合阴极保护（5.1.1.6）。

3.4 三部规范的阶梯对照

腐蚀等级	DL/T 2094-2020（2020）	Q/GDW 12015-2020（2020）	DL/T 2650-2023（2023，监督定性）
微	碳钢 / 热浸镀锌钢	宜热浸镀锌钢	宜热浸镀锌钢
弱	镀锌钢 / 锌包钢 / 铜覆钢 > 0.25	镀锌钢 / 铜覆钢	
中	宜镀锌钢；可镀锌钢+阴保 / 铜覆钢 > 0.6 / 锌包钢	镀锌钢（加大截面）/ 铜 / 铜覆钢 ≥ 0.6 / 锌包钢	宜镀锌钢+阴保、铜覆钢 ≥ 0.60
强	宜镀锌钢+阴保；可高纯铁 / 锌包钢 / 铜 / 铜覆钢 > 0.8 / 不锈钢（非滨海）	镀锌钢（加大截面）/ 铜 / 铜覆钢 ≥ 0.8 / 不锈钢（非滨海）	宜铜、铜覆钢 ≥ 0.80 或等效材料
强特殊 / 室内地下	pH ≤ 4.5 不宜铜、铜覆钢	含盐 ≥ 1.5% 宜铜；pH ≤ 4.5 铜覆钢 ≥ 1.0；重要站点宜铜或铜覆钢 ≥ 0.8	室内及地下变电站应纯铜

三年之内，备选从七八种收敛到三种主材（镀锌钢、铜覆钢、铜），阴极保护退为辅助措施，锌包钢和不锈钢复合材料保留为有条件的替代。这就是本报告标题所说的"收敛"。

4 阶梯为什么长成这样

- **每一档取最低成本满足全寿命。**弱腐蚀用镀锌钢已经够 30 年，上铜覆钢是多花钱；中腐蚀镀锌钢不够，0.6 mm 铜覆钢按 0.007 mm/a 的铜腐蚀速率 30 年耗 0.21 mm，有余量；强腐蚀 0.8 mm 按 0.012 mm/a 耗 0.36 mm，仍有余量；含盐 ≥ 1.5% 或 pH 极端时铜覆钢也不保险，用纯铜。
- **可验证性。**阶梯里留下的材料都有现场可测的指标：镀锌层和铜层可以用测厚仪当场测，结合力可以现场锤击、弯折（DL/T 2650 附录 B），镀层质量可以现场大电流试验（附录 C）。被收窄的材料往往缺少这样的现场判据。
- **材料一致性。**存量地网是镀锌钢，弱腐蚀区扩建用同种材料延接，避免铜与镀锌钢连接处的电偶腐蚀；而铜与铜覆钢同为铜表面，可以用于同一区域（5.1.1.2）。

- **失效分析的制度化。**导则第 4.4 条要求"接地材料失效应查明原因，并总结普遍性、家族性缺陷"，附录 E 就是示范。阶梯是从失效案例里倒推出来的，不是从材料宣传里挑出来的。

5 每种材料的位置

材料	阶梯中的位置	使用条件（规范原文要点）
热浸镀锌钢	微、弱腐蚀的首选；中腐蚀须联合阴极保护或加大截面	锌层平均 ⩾ 85 μm、最小 ⩾ 70 μm；冷镀不可接受（附录 E 案例）；最小尺寸：圆钢 Ø8 / Ø10、扁钢 48 mm² × 4 mm（表 1）
铜覆钢	中、强腐蚀的主材；与铜可同区使用	铜层 0.60 / 0.80 mm 任意点最小值；pH < 4.5 提高一级或 ⩾ 1.0 mm；按 DL/T 1312 / Q/GDW 10466 水平接地体宜退火态；划伤段不得使用
纯铜	强腐蚀并列选项；强特殊腐蚀和室内、地下变电站的唯一选项	最小尺寸：铜棒 Ø8 / Ø15、扁铜 50 mm² × 2 mm、铜绞线 50 mm²（表 3）；需评估对钢构架、电缆、管道的电偶腐蚀
锌包钢	中腐蚀有条件替代	锌层 ⩾ 1.0 mm，按表 2 随腐蚀等级增至 3 / 5 mm；弯折处不应开裂
不锈钢 / 不锈钢复合材料	强腐蚀有条件替代	包覆层 0.50 / 0.70 mm（表 5）；氯离子含量高的滨海土、盐渍土不宜使用（DL/T 2094 5.2.1.4）；锰 ⩽ 2% 的奥氏体不锈钢
裸碳钢、铝	退出	长期使用不应为裸碳钢，不应采用铝导体（5.1.1.4）；碳钢引下线仅作临时接地（5.1.2.2）
纳米碳涂层钢	防腐涂层措施，不是独立材料档	按 DL/T 2094 第 5.4 条管理：涂料达标、基材达标、与阴保联用防过保护；实践中局限于个别行业
石墨基柔性接地体	仅输电线路杆塔	按其行业标准用于杆塔接地；不用于变电站、轨道交通、化工等项目

6 对海外项目的启示

海外项目面对的材料选择与中国十年前相似：镀锌钢便宜但在腐蚀土壤中失效，纯铜可靠但贵且易被盗，各种"新材料"各有说法。中国用三部规范走完的路可以直接借用，步骤是：

1. **评价土壤腐蚀等级。**按电阻率、pH、氯离子、硫酸盐和含盐量综合判定（中国用 DL/T 1554 多因子评级；附录 E 案例给出了一组典型的"强腐蚀"数据可供对照）。
2. **按阶梯选材。**弱腐蚀镀锌钢即可——我们会这样建议，哪怕这意味着不买我们的产品；中腐蚀铜覆钢 ⩾ 0.60 mm；强腐蚀铜覆钢 ⩾ 0.80 mm 或铜；含盐 ⩾ 1.5%、室内地下用铜。
3. **把可验证的指标写进规格书。**镀层或铜层"任意测点最小厚度"、退火态、弯折次数、结合性能试验方法；到货时用测厚仪和锤子验，不依赖供应商的报告。
4. **同区域材料一致。**新旧地网衔接处评估电偶腐蚀；铜与铜覆钢可以混用。

7　本公司的立场

本公司只生产铜覆钢，但我们按整条阶梯给建议，而不是只推自己的产品：弱腐蚀土壤我们会建议热浸镀锌钢；强特殊腐蚀和室内、地下变电站我们会建议纯铜；中、强腐蚀土壤的水平接地体，我们供应并推荐 0.6 / 0.8 mm 连铸退火铜覆钢，按 DL/T 1312-2023 全套型式试验、任意点铜层不低于标称值、现场可锤击可测厚。免费评估的计算书会写明项目落在阶梯的哪一档、为什么，以及如果不选铜覆钢应该选什么。

参考标准

1. DL/T 2650-2023《电力工程接地金属材料技术监督导则》，国家能源局 2023-10-11 发布，2024-04-11 实施（首次发布）。
2. DL/T 2094-2020《交流电力工程接地防腐蚀技术规范》，国家能源局发布。
3. Q/GDW 12015-2020《电力工程接地材料防腐技术规范》，国家电网有限公司，2020-11-27 发布实施。
4. DL/T 1312-2023《电力工程接地用铜覆钢技术条件》；Q/GDW 10466-2021《电力工程接地用铜覆钢技术条件》。
5. DL/T 1457《电力工程接地用锌包钢技术条件》；DL/T 248《输电线路杆塔不锈钢复合材料耐腐蚀接地装置》；DL/T 1667《变电站不锈钢复合材料耐腐蚀接地装置》；DL/T 1554《接地网土壤腐蚀性评价导则》；DL/T 2049《电力工程接地装置选材导则》。

本报告为技术资料，引用条款以各标准正式出版物为准。北京铸铁成金机电设备有限公司 · www.ztcjbj.com · WhatsApp +86 186 1002 3872