

电力接地装置的 腐蚀与防护

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
徐松 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力接地装置的 腐蚀与防护

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
徐松 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为提高电力接地装置防腐能力,增强腐蚀防护技术,保障电力设备以及操作人员的安全,国网湖南省电力公司电力科学研究院基于多年的理论研究和经验总结,组织编写了本书。

本书共分为11章,包括概述、电化学腐蚀、接地材料腐蚀的特征及机理、接地材料腐蚀环境和影响因素、接地材料的杂散电流腐蚀与防护、接地材料微生物腐蚀与防护、接地装置防腐技术、直流感地极的腐蚀与防护、接地装置土壤腐蚀评价、接地装置腐蚀典型案例分析及接地网全过程技术监督。

本书可供从事电力接地设计、安装、运行维护、检修的专业技术人员和管理人员使用,也可供相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力接地装置的腐蚀与防护 / 徐松主编: 国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-5198-0900-3

I. ①电… II. ①徐…②国… III. ①触电保安器—防腐 IV. ①TM774

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第155104号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 高 芬 (fen-gao@sgcc.com.cn)

责任校对: 马 宁

装帧设计: 郝晓燕 左 铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2017年9月第一版

印 次: 2017年9月北京第一次印刷

开 本: 710毫米×980毫米 16开本

印 张: 17.25

字 数: 291千字

印 数: 0001—1000册

定 价: 70.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编 委 会

主 编 徐 松

副 主 编 冯 兵 周 舟

编写组成员 刘 凯 查方林 万 涛 周 挺

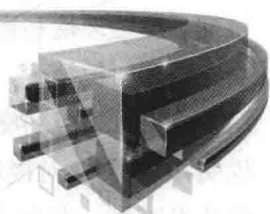
毛文奇 黄治国 吴俊杰 陈绍艺

王 凌 袁新民 龚尚昆 李 臻

何铁祥 钱 晖 郭 干

前 言

preface



腐蚀是金属（材料）和周围环境发生化学或者电化学反应而被破坏的现象，它具有普遍性、隐蔽性、渐进性和突发性等特点，不仅消耗资源、污染环境，还能造成灾害事故。据中国工程院重大咨询项目统计：2014 年我国腐蚀总成本超过 2.1 万亿元人民币，约占当年 GDP 的 3.34%，相当于每个中国人当年承担 1555 元的腐蚀成本，腐蚀代价相当惊人。接地装置是电力系统中输变电设备安全运行最重要的安全屏障，然而其腐蚀较为普遍，几乎每个省份的接地装置都存在不同程度的腐蚀，每年的改造费用多达上亿元，因此接地装置的腐蚀与防护一直是电力系统中主要的研究课题。

我国接地装置所用材料主要为热浸镀锌钢，镀锌厚度约 $60\sim 80\mu\text{m}$ ，由于接地装置的特殊性，其接地材料一部分处于大气环境中，一部分埋入土壤，大气、土壤对其产生的电化学腐蚀作用是不可避免的，再加上日益严重的环境污染，杂散电流、微生物等因素也加剧了接地装置腐蚀，造成了接地材料有效接地横截面越来越小。随着全球能源互联网的不断发展，特高压跨区域输电、智能电网技术应用越来越普遍，对输变电设备安全稳定运行的要求也越来越高。随着电压等级的升高，接地短路电流不断增大，接地材料由于腐蚀原因，使接地导体之间或接地引线与导体之间存在电气连接不良的故障点，运行中满足不了热稳定性要求，造成输变电设备“失地”，若遇雷击或者电力系统发生接地短路故障，将造成附近区域设备接触电压和跨步电压迅速升高，电流反击或电缆皮环流使得二次设备的绝缘遭到破坏，高压窜入控制室，使控制设备发生误动或拒动，进而造成一次设备的着火、损坏，发电厂、变电站全停，甚至发展成严重的大范围停电事故，造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响。

该书分为 11 章，第 1 章介绍了电力系统接地装置及其材料腐蚀概况，第 2 章

介绍了电化学腐蚀基本原理，第3章、第4章详细阐述了接地材料腐蚀的特征、机理、腐蚀环境和影响因素，第5章、第6章介绍了接地材料的杂散电流、微生物腐蚀与防护技术，第7章重点阐述了接地装置各种防腐技术及应用，第8章介绍了直流感地极的腐蚀与防护，第9章对接地装置土壤腐蚀评价方法进行了细致说明，第10章对接地装置腐蚀典型案例进行了分析，第11章介绍了接地网全过程技术监督。本书力求理论联系实际，侧重于应用，为从事电力接地设计、安装、运行维护、检修的专业技术人员提供有益参考。

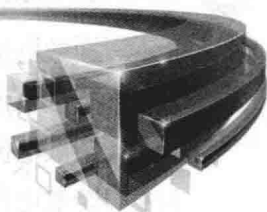
本书在编写过程中引用了国内外同行一些资料和研究成果，在此谨向他们致以诚挚谢意。由于编者水平有限，疏漏谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2016年12月

目 录

contents



前言

1	概述	1
1.1	电力系统接地	1
1.2	电力接地材料的腐蚀	6
2	电化学腐蚀	15
2.1	电化学腐蚀现象与特征	15
2.2	电化学腐蚀原理	16
2.3	电化学腐蚀倾向的判断	20
2.4	电化学腐蚀速率	34
3	接地材料腐蚀的特征及机理	46
3.1	接地材料的腐蚀类型	46
3.2	接地材料的电化学腐蚀机理	47
3.3	接地网具体部位腐蚀机理	54
4	接地材料腐蚀环境和影响因素	57
4.1	大气腐蚀及其影响因素	57
4.2	土壤腐蚀及其影响因素	65

5	接地材料的杂散电流腐蚀与防护	75
5.1	杂散电流的产生	75
5.2	杂散电流腐蚀的危害	76
5.3	杂散电流腐蚀特点	78
5.4	杂散电流腐蚀判断标准	79
5.5	杂散电流的防护	79
6	接地材料微生物腐蚀与防护	84
6.1	生物种类	84
6.2	微生物腐蚀的特点	85
6.3	微生物参与腐蚀的机理	86
6.4	微生物腐蚀的影响因素	90
6.5	我国材料土壤腐蚀试验中微生物腐蚀	91
6.6	微生物腐蚀的防护措施	93
7	接地装置防腐技术	95
7.1	增大横截面积	95
7.2	选择耐腐蚀性导电材料	96
7.3	表面防腐技术	121
7.4	阴极保护	143
8	直流接地极的腐蚀与防护	157
8.1	接地极概况	157
8.2	接地极结构型式	157
8.3	接地极腐蚀机理	161
8.4	接地极材料腐蚀与防护	164
8.5	接地极入地电流对埋地金属物的腐蚀影响	171

9	接地装置土壤腐蚀评价	175
9.1	土壤腐蚀评价指标及分析方法	175
9.2	接地装置土壤腐蚀评价	186
9.3	变电站防雷及接地装置状态量评价	204
10	接地装置腐蚀典型案例分析	207
10.1	某 110kV 输电线路引下线腐蚀	207
10.2	某 500kV 变电站水平地网腐蚀	214
10.3	某 500kV 输电线路接地网腐蚀	223
10.4	某 220kV 变电站接地网腐蚀 1	226
10.5	某 220kV 变电站接地网腐蚀 2	230
11	接地网全过程技术监督	235
11.1	规划可研阶段	236
11.2	工程设计阶段	237
11.3	设备采购阶段	241
11.4	设备制造阶段	246
11.5	设备验收阶段	248
11.6	设备安装阶段	252
11.7	设备调试阶段	255
11.8	竣工验收阶段	257
11.9	运维检修阶段	260
11.10	退役报废阶段	263
	参考文献	265

1

概 述

1.1 电力系统接地

1.1.1 接地概念

接地是指将电力系统以及电气设备的某些导电部位与大地相连，提供故障电流及雷电流的泄流通道，稳定电位，提供零电位参考点，以确保电力系统、电气设备的安全运行，同时确保电力系统运行人员及其他人员的人身安全。在接地系统中，埋入大地并且直接与大地接触的金属导体称为接地体，其中专门以接地为目的而人为埋入地中的金属构件如扁钢、角钢、钢管、圆钢等称为人工接地体，可以兼起接地作用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑（构）筑物的基础、金属管道和设备等称为自然接地体。将电气装置、设施的接地端子与接地体连接用的金属导电部分称为接地引下线。接地体和接地引下线合称为接地装置。

1.1.2 接地种类

电力系统中的接地有三种：工作接地、保护接地、防雷接地。

工作接地是根据电力系统电气装置的正常运行方式的需要将电网中的某一点接地，如变压器中性点接地。在交流系统中，正常情况下流过工作接地电极的电流是数值不大的不平衡电流，只有在系统发生接地故障时，才会流过高达数十千安的短路电流，且持续时间不长（0.5s左右）。在直流系统中，单极运行时会有数以千安计的工作电流长期流过接地电极。通常110kV及以上的交流系统的工作接地电阻 R 的取值以保证短路电流 I 在接地体上的电压降落不大于2000V为原则，即要求 $R \leq 2000/I$ ；但是当 $I > 4000\text{A}$ 时，可取 $R \leq 0.5\Omega$ ，但跨步电位差和

接触电位差必须满足人身安全设计要求。对于高压直流输电系统，由于可能需要长期通过较大的工作电流，因此发热问题严重，其工作接地电阻一般要求比交流系统更小。

保护接地则是为了防止电气装置的金属外壳、配电装置的构架和线路杆塔等由于绝缘损坏而可能带电，危及人身和设备安全而设的接地。当电气设备绝缘损坏而使外壳带电时，流过保护接地体的故障电流应该可以使相应的保护装置动作，切除已经损坏的设备，或者使外壳的电位保持在安全值以下，从而避免因电气设备外壳带电而造成的触电事故。

防雷接地是为了避免雷电的危害，为雷电保护装置（避雷针、避雷线和避雷器等）向大地泄放雷电流而设的接地。雷电流通常时间很短暂（数十微秒），但是其值有时可达数十至数百千安。架空输电线路杆塔的接地电阻一般为 $10\sim 30\Omega$ ，而避雷器的接地电阻一般不超过 5Ω 。

应当指出的是，上述三种接地有时是很难区分的，例如在大部分情况下发电厂、变电站中的电源和各种电气设备以及防雷装置都处在同一个地网之中，它们不易分开，所以发电厂、变电站的接地网实际上是集工作接地、保护接地和防雷接地于一体的接地装置。

1.1.3 接地目的

接地是电力系统安全运行的重要保证，其接地性能一直受到设计和生产运行部门的重视。发电厂或变电站的接地网不仅为发电厂或变电站内的各种电气设备提供一个公共的参考地，而且在电力系统发生接地故障时，将故障电流迅速导入大地，控制接地网的最大电位升高，保证人身和设备安全，所以合格的接地网在电力系统安全运行中具有十分重要的作用。电力接地的目的主要有：

- (1) 降低电气设备绝缘水平。电力系统中性点的工作接地，能够降低作用在电气设备上的电压，从而降低电气设备的绝缘水平。
- (2) 确保电力系统安全运行。输电线路杆塔接地装置的接地电阻必须降到一定值，以确保雷击输电线路杆塔时，塔顶电位与导线的电位差小于绝缘子串的50%冲击放电电压，保证线路的正常运行，如果接地电阻过大，则可能造成塔顶电位很大，引起绝缘子串闪络而造成停电事故。另外升压站、变电站通过避雷器等来吸收和泄漏电能，这些防雷设备必须通过接地装置将雷电能量泄放到大地。
- (3) 保护接地。将所有电器设备外壳接地，当电气设备绝缘损坏或者老化而

使外壳带电时，能够保证接触设备外壳的人员安全。另外变电站接地装置通过降低接地电阻和采取均压措施来保证接触电压和跨步电压满足人身安全要求。

(4) 防止静电干扰。通过接地可以将由于摩擦等产生并积蓄的静电尽快释放到大地，防止静电干扰引起的事故和破坏。

(5) 检测接地故障。为了保证人身和财产安全，低压线路采用漏电断路器等各种故障保护装置来检测接地故障。

(6) 等电位连接。等电位连接是指使各种外露导体和装置外导电体的电位相等的连接方式，在建筑物内的电气设备，可以通过将设备外壳与敷设的主接地母线相连来实现等电位连接。

(7) 防止电磁干扰。通过将电子设备的屏蔽外壳和电缆屏蔽层接地来降低或者消除外部电磁干扰的影响。

(8) 功能接地。有些设备在功能上即可加以接地，如阴极保护利用电化学原理防止金属的腐蚀，为了使腐蚀电流流入土壤或水中，则应在系统中进行接地。

(9) 作业用接地。在停电作业时，需要采用接地来泄放线路中充电装置中的能量，以防止电磁干扰在线路中的感应电流的危害，也可以防止他人误操作对作业人员的致命危害。

1.1.4 接地装置的类型

电力系统的接地装置可分为两类，一类为升压站、变电站的接地网，另一类为比较简单的输电线路杆塔的接地装置，如水平接地体、垂直接地体、环形接地体等。

变电站接地网的主要功能是泄流短路故障电流，确保电气设备和人身安全，对变电站的安全稳定运行至关重要。变电站电气装置的接地装置，除利用自然接地极外，应敷设以水平接地极为的人工接地网。人工接地网的外缘应闭合，外缘各角应做成圆弧形，圆弧的半径不宜小于均压带间距的一半。接地网内部按3、5、7、10、15、20m的等间距布置敷设若干均压导体为主的水平接地网，并在主干交点处装设一些垂直接地体。接地网的埋设深度一般介于0.6~1m。

变电站接地装置一般采用网格状型式，对于一些土壤电阻高，接地电阻不易降到规程要求值，或者由于地理环境限制，无法大面积敷设接地网的变电站，近年来出现了一些新型的接地装置，如深井压力灌注式、离子接地极、复合接地网等型式。变电站接地网根据其网格的形状又可分为长孔地网、等间距方孔地网、

不等间距地网，几种水平地网的示意图如图 1-1 所示，垂直接地体的示意图如图 1-2 所示。



图 1-1 变电站接地网水平接地网示意图

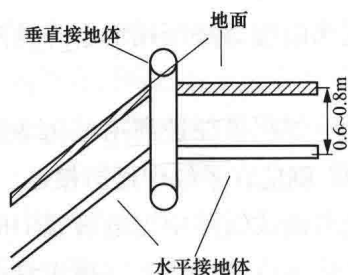


图 1-2 变电站接地网垂直接地体示意图

输电线路杆塔接地装置的主要功能不同于变电站的接地网。杆塔接地主要以防雷为主要目的，当线路遭受雷击或线路附近有较强雷电时，直击的雷电流或者感应雷电流经接地装置流散入地，防止线路过电压。GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定高压架空线路杆塔的接地装置可采用下列型式：

- (1) 在土壤电阻率 $\rho \leq 100 \Omega \cdot \text{m}$ 的潮湿地区，可利用杆塔和钢筋混凝土杆自然接地，对变电站的进线段应另设雷电保护接地装置。在居民区，当自然接地电阻符合要求时，可以不设人工接地装置。
- (2) 在土壤电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m} < \rho \leq 300 \Omega \cdot \text{m}$ 的地区，除利用铁塔和钢筋混凝土自然接地外，并应增设人工接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.6m。
- (3) 在土壤电阻率 $300 \Omega \cdot \text{m} < \rho \leq 2000 \Omega \cdot \text{m}$ 的地区，可采用水平敷设的接地极，埋设深度不宜小于 0.5m。
- (4) 在土壤电阻率 $\rho > 2000 \Omega \cdot \text{m}$ 地区，可采用 6~8 根总长不超过 500m 的接地极或连续伸长接地极。放射形接地尽可能采用长短结合的方式。接地度不宜小于 0.3m。
- (5) 居民区和水田中的接地装置，宜围绕杆塔基础敷设成闭合环形。
- (6) 放射形接地极的最大长度，应符合表 1-1 的要求。

表 1-1 杆塔放射型接地极每根的最大长度

土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)	$\rho \leq 100$	$100 < \rho \leq 1000$	$1000 < \rho \leq 2000$	$2000 < \rho \leq 5000$
最大长度 (m)	40	60	80	100

通常输电线路杆塔推荐图 1-3 所示的三种水平接地布置形式：

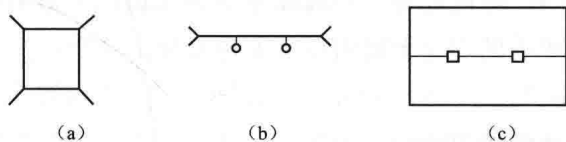


图 1-3 输电线路三种水平布置型式

(a) 口字型；(b) 一字型；(c) 日字型

其中 (a) 适用于铁塔，为口字型加四射型；(b) 适用于钢筋混凝土门型杆，为一字型两头两射线形；(c) 适用于钢筋混凝土门型杆，为日字环型无射线（闭合式接地）。

1.1.5 接地装置的关键参数

接地装置的关键参数主要有接触电位差、跨步电位差和接地电阻。

电气设备发生接地故障时，如人体的两个部分（通常是手和脚）同时触及漏电设备的外壳和地面，人体两部分分别处于不同的电位，其间的电位差即为接触电压，在电气安全技术中是以站立在离漏电设备水平方向 0.8m 的人，手触及漏电设备外壳距地面 1.8m 处时，其手与脚两点间的电位差为接触电位差计算值。

电气设备发生接地故障时，在疏散区（电位分布区）行走的人，其两脚处于不同的电位，两脚之间（一般人的跨步约为 0.8m）的电位差称为跨步电位差。

接地电阻是电流由接地装置流入大地再经大地流向另一接地体或向远处扩散所遇到的电阻。接地电阻值体现电气装置与“地”接触的良好程度和反映接地网的规模。按通过接地极流入地中工频交流电流求得的电阻，称为工频接地电阻；按通过接地极流入地中冲击电流求得的接地电阻，称为冲击接地电阻。通常情况下，接地电阻主要是大地呈现的电阻，包括接地引线的电阻、接地极本身的电阻、接地极与大地的接触电阻以及电极至无穷远处的土壤电阻。接地电阻的大小除和大地的结构、土壤的电阻率有关外，还和接地体的几何尺寸和形状有关，在雷电冲击电流流过时，还和流经接地体的冲击电流的幅值和波形有关。

如果接地电阻超过规定值，当电力系统发生接地短路故障或遭遇雷击时，变电站接地网将无法正常工作泄放故障电流，故障电流引发的地面电位可能会击穿电气设备的绝缘，甚而发生高压窜入二次控制室，使监测和控制设备发生误动作或拒

动作而导致事故扩大化,严重影响电力系统的安全可靠性,带来巨大的经济损失以及不良的社会影响。除此之外,当故障电流在大地内扩散开时,跨步电位差会因为超出人体所能承受的安全上限而危及人身安全。

1.2 电力接地材料的腐蚀

1.2.1 接地材料的性能要求

接地装置需要瞬间将故障电流或雷击电流引入大地,接地材料的性能必须满足热稳定性、耐腐蚀性和导电性三个要求。

1. 热稳定性

在有效接地系统中,流入接地网的短路电流一般在几千安到几十千安的范围。这样大的短路电流流过接装置时将在接地材料中产生很高的热量。另外,短路电流的持续时间很短,取决于离短路点最近的断路器的主继电保护装置动作时间与断路器分闸时间之和,一般只有零点几秒。在这样短的时间内产生的热量来不及散入周围的土壤介质中,全部热量都用来使接地材料升温

$$\Delta t = \frac{E}{V\rho C_p} \quad (1-1)$$

式中: E 为短路电流产生的能量, J; V 为接地导体的体积, m^3 ; ρ 为导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; Δt 为吸收能量 E 后的温升, $^{\circ}\text{C}$; C_p 为导体的定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

由式 (1-1) 可知,当入地电流一定时,接地导体材料体积越大,即横截面越大,其升温越低。因此,在接地装置设计时,通常通过限定横截面来满足热稳定性要求,GB/T 50065—2011 也作了详细规定。

当温度超过一定值以及在土壤中自然冷却之后,导体的机械性能就会剧烈下降,特别是在导体之间的连接处,如果在遇到短时大电流作用,导体就会遭到破坏;当短路电流很大,导体温度很高,达到金属材料的熔点时,导体将被融化。这两种原因都有可能使接地网导体断裂,接地网解体,大大降低接地网的可靠性。每一种导体材料都具有短时最高允许温度,如果导体温度超过它,就意味着其性能下降。同样,每种材料都有他自己的熔点,允许最高温度及熔点温度越高,其热稳定性能越好。铜的短时最高允许温度为 300°C ,熔点为 1083°C ;钢的短时高允许温度为 400°C ,熔点为 1510°C ;因此钢的热稳定性能要好一些。

2. 耐腐蚀性

大部分接地装置埋在土壤中，由于土壤是复杂的电解质，埋在土壤中的金属将不可避免被腐蚀，这种腐蚀属于电化学腐蚀的范畴。由于腐蚀的作用，导体直径不断减小，横截面就减少，接地网的热稳定性能及导电性能都会不断降低，超过一定的年限导体就会被腐蚀，断裂、接地网解体造成事故。因此在选择导体材料时应考虑选用耐腐蚀的材料。

土壤对导体的腐蚀程度可以用腐蚀速度表示，平均腐蚀速度可以用单位时间内单位面积上所损失的重量来表示，也可用单位时间内金属表面的腐蚀深度来表示，一般用腐蚀深度来表示更为确切。据有关文献表明，普通钢在土壤中的腐蚀速度约为铜的5~10倍；镀锌钢在土壤中的腐蚀速率为铜的1~5倍，因此，接地材料大多选择镀锌钢或者铜，而不会使用没有经过处理的普通裸钢。但应当注意，金属在土壤中的腐蚀要受很多因素的影响，如土壤孔隙度、电阻率、溶解的盐类、水分、酸碱度和细菌等。因此在不同环境中金属导体的腐蚀有很大的差别。所以在选择接地材料时，应测量该土壤接地材料的腐蚀速率，为选择导体材料和截面积提供可靠地依据。

3. 导电性

在大型接地网中，当强大的短路电流经接地导体流散到土壤中时，由于导体本身电阻的存在，使得接地网各部分导体的电位差就愈大。如面积为 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ ，间距为 12.5cm ，等间距布置的模拟接地网放置在电阻率为 $30\Omega \cdot \text{m}$ 的自来水中，自正方形的一角注入电流时，测试其对角顶点的电位降低值，对于电阻率为 $0.5 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{m}$ 的钢接地网，电位降低值为5.3%；对于电阻率为 $0.24 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{m}$ 的锰铜接地网，电位降低值为4.3%；在其他条件不变的情况下，当水的电阻率为 $1.8\Omega \cdot \text{m}$ 时，钢接地网电位降低值由5.3%增加到35.6%。如果以接地网各处导体电位相差10%计算，取短路电流不同点相连接的设备外壳之间可能出现的最大电位差达400V，设计中必须考虑对这种电位差的控制，否则将会引起事故。此外，由于钢的电阻率约为铜电阻率的8倍，在同样大的短路电流作用时，钢发热要严重得多，导体升温高得多，对热稳定性不利，因此铜的导电性要好些。

1.2.2 常用金属接地材料

(1) 热浸镀锌钢及锌包钢。我国接地网的设计根据GB/T 50065—2011，通常使用镀锌碳钢，镀锌厚度一般大于 $70\mu\text{m}$ ，锌与基底钢为冶金结合，附着力非

常好，导电性能优良，按照热稳定要求，其规格一般大于 $4\times 40\text{mm}$ ，由于锌电位低于碳钢，锌作为阳极，碳钢作为阴极从而被保护，由于热浸镀锌钢综合性能优良，价格低廉，在我国被广泛应用于电力接地材料。

锌包钢是用挤压包覆或拉拔工艺将较厚的锌层包覆在钢表面，克服了热浸镀锌钢镀层太薄的弊端，从而起到防腐的目的，锌厚度一般大于 $500\mu\text{m}$ ，使用寿命比热镀锌大幅提高。随着工艺的逐渐成熟，锌包钢开始慢慢用于作为接地材料。

(2) 铜及铜包钢。欧美发达国家接地网设计采用 IEEE Std 80—2013 《Guide for Safety in AC Substation Grounding》，（交流变电站接地安全指南）标准，接地材料使用铜材较为普遍，铜材包括纯铜、镀铜钢（电镀，最大厚度 0.254mm ）和铜包钢（水平连铸，厚度大于 0.3mm ），市场上另有一种热浸锡铜镀钢，即在铜镀钢的外边镀一层锡，其防腐性能更好。当然，我国也有逐渐采用铜做接地（核电为国内最早采用）的趋势，目前在国内电力系统接地网已有使用铜材的案例。据文献统计，包括美国、欧洲等全球50%以上地区的接地系统采用水平铜网加镀铜钢垂直接地棒，60%接地系统采用放热焊接方式作为接地系统连接，其中包括非洲苏丹、乍得、亚洲缅甸、柬埔寨、南美的海地等国家。铜及铜合金是一种耐土壤腐蚀的材料，由于表面氧化膜的保护作用，铜的腐蚀速率呈逐年减小趋势，但是价格昂贵。

(3) 不锈钢及不锈钢包钢。不锈钢是指含铬量大于12%的一类铁合金，由于表面形成含铬钝化膜，使其具有优异的耐自然环境腐蚀性能，尤其适用于酸性土壤接地材料。不锈钢包钢（厚度大于 0.5mm ）是最新发展的一种接地材料，类似铜包钢，即在钢铁表面包覆一层不锈钢，目的是为了节省成本，其土壤腐蚀性与纯不锈钢一样。不锈钢最早在苏联就用于接地材料，目前我国也开始使用于酸性土壤环境下的接地。

(4) 铝合金。铝是电位非常负的金属（ -1.662V ），表面极易形成 Al_2O_3 保护膜，因此，在大气和弱酸性溶液中有足够高的稳定性。铝一般用作电缆托架和铝电缆导体的接地，此外气体绝缘变电站（GIS）的外壳是铝或者铝合金，为了减少电偶腐蚀，铝也被作为接地引下线使用，目前，在我国铝及铝合金还没有在水平接地网上应用，但作为一种潜在耐土壤腐蚀材料，国内外进行了大量的土壤腐蚀研究。

表 1-2 为几种常见金属接地材料性能参数比较，由表 1-2 可知，纯铜（软铜）导电性能最好，不锈钢包钢导电性与碳钢相当，但热稳定性稍好于铜。表 1-3 为