

铜包钢绞线在工程接地中的应用探讨

董晋明, 张曾

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 为有效的解决铜包钢绞线在实际工程接地中的应用问题, 建立实心圆柱及空心圆柱导体的并联模型并推导其阻抗表达式, 有针对性地研究计算铜包钢导体在工频下的自阻抗参数, 并得到其等效电阻率及磁导率。通过热稳定校验得到不同材料作为接地导体的最小截面积, 并选取合适的导体尺寸, 利用国际通用软件 CDEGS 进行大型地网的接地计算。通过对计算结果的分析, 验证了该方法的合理性, 并发现铜包钢地网的接地参数更接近铜地网的参数。对某一工程算例, 计算比较了铜、铜包钢、钢三种导体接地网的接地参数, 得出铜包钢作为接地网材料具有优良的接地性能、较大的经济优势等结论。

关键词: 铜包钢; 自阻抗; 热稳定; 接地参数

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0081-06

Discussion on the Application of Copper-clad Steel Wire in Grounding of Engineering

DONG Jinming, ZHANG Zeng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to solve the problem of the application of copper clad-steel wire in practical engineering, a parallel model of solid cylindrical conductor and hollow cylindrical conductor was established, and its impedance expression was proved. The minimum cross-sectional area of the ground conductor of different materials were checked with thermal stability, and the appropriate size of the conductors were selected, and the international general software CDEGS was used for grounding calculation of large grounding grid. The rationality of the method was proved with the analysis of the calculation results, and we found that the grounding parameters of copper-clad steel grounding grid was more close to the parameters of copper grounding grid. As a project example, the grounding parameters of copper grounding grid, copper-clad steel grounding grid, and steel grounding grid were calculated and compared, and these conclusions could be found, that copper-clad steel had excellent grounding performance and great economic advantages as grounding material.

Key words: copper-clad steel; self-impedance; thermal stability; grounding parameters

铜包钢绞线是一种新型双金属复合材料, 将铜与钢通过一定的工艺加工而成。铜包钢绞线具有铜和钢两者的优点^[1-4], 既有钢的高强度, 又有铜较

好的导电性能和优良的抗腐蚀性能, 且其具有很好的经济性, 在国外已逐步成为接地材料的优选之一。

关于铜包钢绞线, 美国、英国等国家已经有了相关标准^[5-7], 其中关于铜包钢已有相关的说明, 由于土壤对于铜材的腐蚀程度有限, 所以使用纯铜或者铜包钢作为接地导体时, 只要选择了合适的导体尺寸, 并且导体是完好未被破坏的, 就可以在几十年的时间内保证接地网络的完整性。铜层的厚度须要达到 0.25 mm 以上, 才能够保证 30 年以上的

收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 中国能建广东院科技项目“新型接地极及其环境影响研究”(EV03471W)

作者简介: 董晋明(1985), 男, 河北秦皇岛人, 高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂电气一次设计工作(e-mail) dongjinming@gedi.com.cn。

使用寿命。

国内关于铜包钢的应用研究多侧重于其生产工艺^[8-10],在接地领域中多是关于铜包钢材料的耐腐蚀性的研究^[11-13]。关于铜包钢材料的计算方面,文献[14]通过建立并联模型得到铜包钢的等效电导率,但未考虑到材料的电磁特性,仅限于直流情况;文献[15]研究了铜包钢导电性的频率特性,但没有涉及工程接地的应用。文献[16-17]采用数值计算方法,研究了铜包钢接地导体的电气性能,得到了其阻抗表达式,并应用到大型接地网的接地计算中,具有实际应用价值。

本文根据工程实际,建立实心圆柱及空心圆柱导体的并联模型并推导其阻抗表达式,有针对性的研究计算工程中铜包钢导体在工频下的自阻抗,求解得到其等效电阻率及磁导率,应用国际通用的接地计算软件 CDEGS^[18-20],计算接地网的接地参数,评价接地网的性能。

1 铜包钢导体自阻抗计算推导

1.1 实心圆柱导体的阻抗表达式

假设一个单位长度的实心圆柱导体,其半径为 r ,电阻率为 ρ ,磁导率为 μ ,其电阻表达式可以表示为:

$$R = \frac{\rho}{\pi r^2} \quad (1)$$

实心圆柱导体的自感推导如下:

应用安培环路定理,导线内部距轴线为 a 处的磁感应强度为:

$$\vec{B} = \frac{\mu I}{2\pi r^2} a \vec{e} \quad (2)$$

导线内部磁感应线呈同心圆,在单位长度范围内,穿过在 a 处厚度为 da 截面的磁通为:

$$d\varphi = \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{\mu I a}{2\pi r^2} da \quad (3)$$

这些磁通仅与电流的一部分交链:

$$I' = \frac{\pi a^2}{\pi r^2} I = N' I \quad (4)$$

则有:

$$d\varphi = N' \cdot d\varphi = \frac{\mu I a}{2\pi r^2} \cdot \frac{a^2}{r^2} da \quad (5)$$

$$\varphi = \int_0^r \frac{\mu I a^3}{2\pi r^4} \cdot da = \frac{\mu I}{8\pi} \quad (6)$$

$$L = \frac{\mu}{8\pi} \quad (7)$$

则实心圆柱导体的电抗表达式如下:

$$X = \omega L = \omega \frac{\mu}{8\pi} \quad (8)$$

1.2 空心圆柱导体的阻抗表达式

假设一单位长度空心圆柱导体,外径为 r_1 ,内径为 r_2 ,电阻率为 ρ ,磁导率为 μ ,其电阻表达式如下:

$$R = \frac{\rho}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} \quad (9)$$

空心圆柱导体的自感推导同实心圆柱,这些磁通交链的电流为:

$$I' = \frac{\pi(a^2 - r_2^2)}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} I = N' I \quad (10)$$

则有:

$$d\varphi = N' \cdot d\varphi = \frac{\mu I a}{2\pi r^2} \cdot \frac{a^2 - r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} da \quad (11)$$

$$\varphi = \int_{r_2}^{r_1} \frac{\mu I a (a^2 - r_2^2)}{2\pi r^2 (r_1^2 - r_2^2)} \cdot da = \frac{\mu I (r_1^2 - r_2^2)}{8\pi r_1^2} \quad (12)$$

$$L = \frac{\mu(r_1^2 - r_2^2)}{8\pi r_1^2} \quad (13)$$

则实心圆柱导体的电抗表达式如下:

$$X = \omega L = \omega \frac{\mu(r_1^2 - r_2^2)}{8\pi r_1^2} \quad (14)$$

1.3 铜包钢导体的自阻抗表达式

设铜包钢导体外径为 r_1 ,钢部分半径为 r_2 ,外层铜的电阻率和磁导率为 ρ_1, μ_1 ,内部钢的电阻率和磁导率为 ρ_2, μ_2 。

单位长度铜空心圆柱导体的阻抗为:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = \frac{\rho_1}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} + j\omega \frac{\mu_1(r_1^2 - r_2^2)}{8\pi r_1^2} \quad (15)$$

单位长度钢实心圆柱导体的阻抗为:

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = \frac{\rho_2}{\pi r_2^2} + j\omega \frac{\mu_2}{8\pi} \quad (16)$$

则单位长度铜包钢导体的自阻抗表达式为:

$$Z = R + jX = Z_1 // Z_2 \quad (17)$$

2 铜包钢绞线的选型

2.1 铜包钢绞线热稳定计算

接地导体的最小截面应符合下式的要求:

$$S_g \geq \frac{I_g}{C} \sqrt{t_e} \quad (18)$$

式中: S_g 为接地导体的最小截面, mm^2 ; I_g 为流过接地导体的最大接地故障不对称电流有效值, A; t_e 为接地故障的等效持续时间, s; C 为接地导体材料的热稳定系数。根据电力行业规范, 校验铜和铜包钢材接地导体热稳定用的 C 值如表 1 所示, 其中铜包钢的导电率为外层铜电阻率与铜包钢导体电阻率的比值。

表 1 校验铜和铜包钢材接地导体热稳定用的 C 值

Tab. 1 C value for thermal stability of copper and copper-plated steel

最大允许温度/℃	铜	导电率 40% 铜包钢绞线	导电率 30% 铜包钢绞线	导电率 20% 铜包钢棒
700	249	167	144	119
800	259	173	150	124
900	268	179	155	128

2.2 铜包钢绞线规格尺寸的选取

根据接地导体热稳定校验计算, 得出铜包钢绞线接地材料的最小截面, 选取合适的铜包钢绞线规格尺寸。国内铜包钢绞线生产厂家众多, 不同生产厂家的参数有所不同, 可根据选定厂家的导体材料参数进行选取, 导电率 40%、30% 的铜包钢绞线的参考尺寸如表 2 所示。

表 2 铜包钢绞线参考尺寸

Tab. 2 Reference size of copper-clad steel wire

铜包钢绞线导电率 30%			铜包钢绞线导电率 40%		
导线截面/ mm^2	导线股数/个	单股直径/ mm	导线截面/ mm^2	导线股数/个	单股直径/ mm
300	37	3.20	300	37	3.20
240	19	4.11	240	19	4.11
185	19	3.67	185	19	3.67
150	19	3.26	150	19	3.26
120	7	2.91	120	19	2.91
95	7	4.11	95	19	2.59
70	7	3.67	75	7	3.67
50	7	3.26	50	7	3.26
35	7	2.59	35	7	2.59
25	7	2.31	25	7	2.31
16	7	1.83	16	7	1.83

2.3 铜包钢铜层厚度计算

根据国外标准, 铜层的厚度须达到 0.25 mm 以上, 以保证 30 年以上的寿命。单根导线的电导率、

导体直径、铜层厚度之间有一定的关系。对于交流工频下的铜包钢绞线, 电抗值远大于电阻值, 在并联模型中, 等效电阻的并联可忽略电抗的影响, 则有以下表达式:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (19)$$

带入铜包钢导体的电阻表达式则有:

$$\frac{\pi r_1^2}{\rho} = \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{\rho_1} + \frac{\pi r_2^2}{\rho_2} \quad (20)$$

式中: ρ 为铜包钢导体的电阻率。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^2} + \frac{1}{\rho_2} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (21)$$

钢的电阻率相对铜为 10, 即 $\rho_2 = 10\rho_1$, 设铜层厚度为 t , 铜包钢导体直径为 d , 那么可得 $r_2 = r_1 - t$, $d = 2r_1$, 上式可转化为:

$$\frac{t}{d} = (1 - \sqrt{1.11(1 - \frac{\rho_1}{\rho})})/2 \quad (22)$$

对于导电率 30% 铜包钢绞线:

$$\frac{\rho_1}{\rho} = 30\% \quad (23)$$

$$\frac{t}{d} = 5.9\% \quad (24)$$

对于导电率 40% 铜包钢绞线:

$$\frac{\rho_1}{\rho} = 40\% \quad (25)$$

$$\frac{t}{d} = 9.2\% \quad (26)$$

根据选择的铜包钢绞线单根导体直径计算铜层厚度, 且铜层厚度须达到 0.25 mm 以上。

2.4 等效电阻率及等效磁导率计算

选择确定铜包钢绞线的尺寸后可计算出其阻抗值 Z 。当导体处于通过工频电流时, 铜包钢的趋肤效应很小, 电流在整个到体内均匀分布^[17], 此时认为铜包钢的等效电阻、等效电抗表达即为实心圆柱导体的表达式, 即

$$Z = R + jX = \frac{\rho}{\pi r^2} + j\omega \frac{\mu}{8\pi} \quad (27)$$

式中: ρ , μ 为铜包钢导体的等效电阻率及等效磁导率。根据实际铜包钢绞线的阻抗值 Z 及以上公式, 可计算得到 ρ 和 μ 。

3 铜包钢接地网接地参数计算分析

CDEGS 是加拿大 SES 公司开发的电力系统接

地及与之相关的数值计算软件,是国际上该领域通用性及功能最强大的软件。其中MALZ用于计算地网不等电位模型下的接地参数,其主要输入为导体参数(电阻率、磁导率),地网参数(地网的布置、尺寸等),土壤模型参数、电流注入点及电流值、频率等。

根据以上推导分析,计算铜包钢导体的等效电阻率及等效磁导率,输入其他参数,即可对铜包钢接地网进行计算分析。

设一接地网尺寸为 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$,网孔尺寸为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,导体埋深为 0.8 m ,均匀土壤电阻率为 $200\ \Omega \cdot \text{m}$ 。最大接地故障电流为 30 kA ,入地电流为 22 kA ,接地故障持续时间为 0.5 s 。根据导体热稳定校验公式计算接地导体的最小截面积,从而选取不同材料接地导体的合适尺寸,其结果如表3所示。

表3 不同材料接地导体的尺寸选择

Tab. 3 Size selection for grounding conductors of different material

材料	热稳定系数	最小截面积/ mm^2	选择尺寸/ mm^2
铜绞线	249	85.2	120
导电率40%铜包钢绞线	167	127	150
导电率30%铜包钢绞线	144	148	185
扁钢	70	303	480

采用导电率30%的铜包钢绞线,对应为19股单根直径为 3.67 mm 的铜包钢导线,根据单根导线电导率、导体直径、铜层厚度之间的关系计算得 $t=0.2165\text{ mm}$,且铜层厚度不小于 0.25 mm ,则 $t=0.25\text{ mm}$,可得: $r_1=1.835\text{ mm}$; $r_2=1.585\text{ mm}$ 。

采用导电率40%的铜包钢绞线,对应为19股单根直径为 3.26 mm 的铜包钢导线,计算得 $t=0.2999\text{ mm}$,则有: $r_1=1.63\text{ mm}$, $r_2=1.33\text{ mm}$ 。

已知铜的电阻率 $\rho_1=1.7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$;磁导率 $\mu_1=4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$;钢的电阻率 $\rho_2=10\rho_1$;磁导率 $\mu_2=636\mu_1$ 。采用MATLAB编程计算,得到铜包钢绞线的等效电阻率及等效磁导率、等效相对电阻率及等效相对磁导率。四种材料接地导体的参数如表4所示。

用CDEGS分别计算以该地网采用以上不同接地材料时的接地参数, Z_0 , U , K_v , K_k , K_j 分别为接地网接地阻抗、接地网电位、网内电位差占电位

升高的百分比、最大跨步电势、最大接触电势。采用电流中心注入和电流边角注入的计算结果,分别如表5和表6所示。

表4 四种材料接地导体的参数

Tab. 4 Parameters of grounding conductors of different material

导体材料	相对电阻率	相对磁导率	等效半径/mm
铜绞线	1.00	1.00	6.18
导电率40%铜包钢绞线	2.53	16.58	6.90
导电率30%铜包钢绞线	3.15	29.23	7.68
扁钢	10.00	636.00	15.00

表5 电流中心注入

Tab. 5 Current inject at center

导体材料	Z_0/Ω	U/V	$K_v/\%$	K_k/V	K_j/V
铜绞线	0.2307 \angle 2.17	5074	1.14	221	1112
导电率40%铜包钢绞线	0.2329 \angle 2.74	5124	2.34	221	1100
导电率30%铜包钢绞线	0.2337 \angle 3.03	5142	2.84	222	1089
扁钢	0.2467 \angle 5.96	5427	9.14	223	1015

表6 电流边角注入

Tab. 6 Current inject at corner

导体材料	Z_0/Ω	U/V	$K_v/\%$	K_k/V	K_j/V
铜绞线	0.2366 \angle 6.35	5204	3.98	265	1200
导电率40%铜包钢绞线	0.2445 \angle 7.82	5378	7.64	286	1290
导电率30%铜包钢绞线	0.2478 \angle 8.58	5451	9.16	296	1324
扁钢	0.2944 \angle 14.85	6477	26.12	429	1822

由以上计算结果可以分析得出,根据短路接地故障电流校验热稳定得到不同材料导体的不同尺寸,各种导体材料接地网的接地阻抗值差别不大,地电位升高、最大跨步电势、最大接触电势值按照铜绞线、铜包钢绞线、扁钢呈升高的趋势,接地阻抗值、接地阻抗感性分量按照铜绞线、铜包钢绞线、扁钢呈升高的趋势,且不等电位问题按照铜绞线、铜包钢绞线、扁钢更严重。

由于热稳定校验后各种材料导体的尺寸不同,且选择的导体尺寸也不相同,以上结论不是一定的,如电流中心注入时, $60 \times 8\text{ mm}$ 扁钢接地网(导体半径 15 mm)的跨步电势与 120 mm^2 铜绞线接地网(导体半径 6.18 mm)的跨步电势基本相同,且扁钢接地网的接触电势略低。

以上比较计算适用于工程实际,采用不同材料

时, 接地导体的截面也不相同。电流中心注入时, 接地参数相差不大, 但对于电流边角注入, 铜地网的接地参数优于扁钢地网, 且铜包钢地网的接地参数更接近铜地网的参数。导电率 30%、40% 铜包钢绞线的各接地参数相差不大。

电流边角注入时, 以上不同导体材料、尺寸在不同土壤电阻率下的接地阻抗幅值, 计算结果如表 7 所示。

表 7 不同土壤电阻率下接地阻抗幅值

Tab. 7 Grounding impedance amplitude of different soil resistivity Ω

$\rho/(\Omega \cdot m)$	10	100	200	500	1 000
铜绞线	0.029 2	0.123 8	0.236 6	0.577 9	1.147 9
导电率 40% 铜包钢绞线	0.038 0	0.132 5	0.244 5	0.584 9	1.154 1
导电率 30% 铜包钢绞线	0.041 9	0.136 2	0.247 8	0.587 5	1.156 0
扁钢	0.082 8	0.186 7	0.294 4	0.628 1	1.190 8

随着土壤电阻率的增大, 各种材料接地网的接地阻抗值增大, 土壤电阻率越大, 各材料接地网的接地阻抗值越接近, 且铜包钢地网的接地阻抗更接近铜地网的接地阻抗值。导电率 30%、40% 铜包钢绞线的各接地参数相差不大。

4 工程算例计算

某海外工程厂区主接地网(包含二期预留场地)如图 1 所示, 导体埋深为 1.0 m, 均匀土壤电阻率为 $68.8 \Omega \cdot m$ 。最大接地故障电流为 50 kA, 入地电流为 22.5 kA, 接地故障持续时间为 0.25 s。

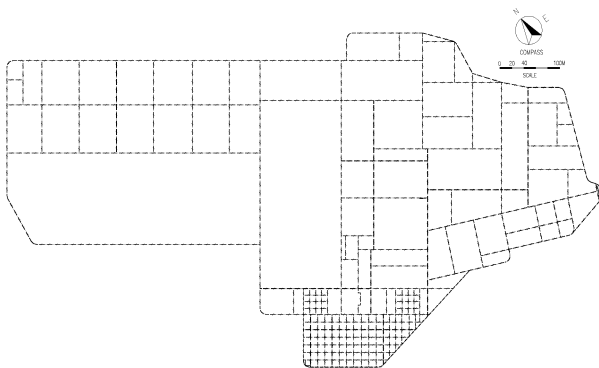


图 1 某海外工程厂区主接地网(包含二期预留场地)

Fig. 1 Schematic diagram of grounding grid of a project

计算接地导体为铜绞线、导电率 30% 铜包钢绞线、扁钢时导体的最小截面积, 选取合适的导体尺寸, 并计算铜包钢绞线等效相对电阻率及等效相对磁导率, 结果如表 8 所示。

分别计算以上不同接地导体下的地网的接地参数, Z_0 、 K_k 、 K_j 分别为接地网接地阻抗、最大跨步电势、最大接触电势(电势参数只计算本期工程), 结果如表 9 所示。

表 8 不同材料接地导体的参数

Tab. 8 Parameters of grounding conductors of different material

导体材料	最小截面 积/ mm^2	选择尺 寸/ mm^2	相对 电阻率	相对 磁导率	等效 半径/ mm
铜绞线	100.4	150	1.00	1.00	6.91
导电率 30% 铜包钢绞线	174.0	240	3.45	33.84	8.74
扁钢	357.0	480	10.00	636.00	15.00

表 9 不同导体接地网的接地参数

Tab. 9 Grounding parameters of grounding grid with different conductors

导体材料	Z_0/Ω	K_k/V	K_j/V
铜绞线	0.072 0 \angle 20.13	58	247
导电率 30% 铜包钢绞线	0.085 4 \angle 20.86	72	279
扁钢	0.121 8 \angle 20.83	107	405

计算该工程跨步电势、接触电势允许值分别为 282.4 V、218.7 V, 由表 9 可以看出该工程若采用扁钢作为接地材料, 则接触电势不满足要求, 需要另采取措施以降低接触电势, 此方案会增加工程量和造价; 采用铜绞线或铜包钢绞线, 接地参数均可满足安全要求。

根据最新市场报价, 不同接地导体材料的单价如表 10 所示:

表 10 不同接地导体材料的单价

Tab. 10 Price of different grounding conductors

导体材料	导体尺寸/ mm^2	单价/ (元 \cdot 米 $^{-1}$)
铜绞线	150	86.0
导电率 30% 铜包钢绞线	240	55.0
扁钢	480	18.7

对于单位长度价格, 扁钢最低, 铜包钢绞线次之, 铜绞线最贵。可见, 接地网采用铜包钢绞线相对铜绞线存在明显的经济优势。

5 结论

1) 建立实心圆柱及空心圆柱导体的并联模型并推导其阻抗表达式, 有针对性地研究计算铜包钢导体在工频下的自阻抗参数, 得到其等效电阻率及磁

导率。

2)通过热稳定校验得出不同材料作为接地导体的最小截面积,并选取合适的导体尺寸,利用国际通用软件CDEGS进行大型地网的接地计算,通过对计算结果的分析,验证了该方法的合理性。

3)铜包钢地网的工频接地参数更接近铜地网的工频接地参数值,接地阻抗低,且不等电位问题较扁钢地网有明显优化。

4)在实际工程中,采用铜包钢导体作为接地材料,可按本文方法进行接地参数计算,其具有更优良的经济性。

参考文献:

[1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 93.

[2] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

China Electricity Council. Code for design of AC electrical installations earthing: GB/T 50065—2014 [S]. Beijing: China Plan Press, 2014.

[3] 徐华,文习山,李中建,等. 大型变电站钢材和铜材接地网的性能比较 [J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 18-19.

XU H, WEN X S, LI Z J, et al. Performance comparison of copper and steel material grounding grids of large substation [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 18-19.

[4] 张波,蒋愉宽,杨建军,等. 接地材料对大型水电站接地阻抗的影响 [J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 964-969.

ZHANG B, JIANG Y K, YANG J J, et al. Influence of the ground material on the ground impedance of large-scale hydro-power plant [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 964-969.

[5] IEEE. Standard for grounding and bonding equipment: UL 467 [S]. [S. n.]: [s. l.], 1996.

[6] BS Institution. Code of practice for earthing: BS 7430-1998 [S]. [S. n.]: [s. l.], 1998.

[7] IEEE. IEEE guide for safety of AC substation grounding: IEEE Std. 80-2000 [S]. [S. n.]: [s. l.], 2000.

[8] 李宝绵,李兴刚,许光明,等. 铜/钢复合材料的研究机应用 [J]. 材料导报, 2002, 16(2): 22-25.

LI B M, LI X G, XU G M, et al. Study and application of Cu/Steel clad metal [J]. Materials Review, 2002, 16(2): 22-25.

[9] 王庆娟,杜忠泽,王海波. 铜包钢生产工艺的特点及现状 [J]. 电线电缆, 2002(4): 15-17.

WANG Q J, DU Z Z, WANG H B. Characteristics and technical status of the manufacturing process for copper-clad steel wire [J]. Electric Wire & Cable, 2002(4): 15-17.

[10] 贺飞,刘利梅,钟云,等. 铜包钢线材及其生产工艺 [J].

表面技术, 2007, 36(5): 78-80.

HE F, LIU L M, ZHONG Y, et al. Copper-clad steel and its producing technology [J]. Surface Technology, 2007, 36(5): 78-80.

[11] 马光,韩钰,聂京凯,等. 电气工程接地用铜覆钢腐蚀性能研究 [C]. // 第十一届电站焊接学术讨论会, 济南: [s. n.], 2010: 130-135.

MA G, HAN Y, NIE J K, et al. Study of the corrosion resistance of copper-clad steel in electrical grounding [C]//The 10th Power Plant Welding Workshop, Jinan, China; [s. n.], 2010: 130-135.

[12] 詹涛,孙建新,高义斌,等. 变电站用电镀铜包钢接地材料在酸性高盐分土壤中腐蚀研究 [J]. 物流工程与管理, 2013, 16(2): 196-197.

[13] 周佩朋,王森,李志忠,等. 耐蚀性金属接地材料研究综述 [J]. 电力建设, 2010, 31(8): 50-54.

ZHOU P P, WANG S, LI Z Z, et al. Review of corrosion resistant metals for grounding [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(8): 50-54.

[14] 戎志平,夏瑞东. 铜包钢线导电特性的研究 [J]. 电线电缆, 1994(Supp. 1): 13-16.

RONG Z P, XIA R D. Study on conductive properties of copper-clad steel wire [J]. Wire and Cable, 1994(Supp. 1): 13-16.

[15] 费俊保,张绍先,陈正宏. 铜包钢复合导线的高导特性 [J]. 电线电缆, 1997(3): 19-21.

FEI B J, ZHANG S X, CHEN Z H. High conductivity properties of copper-clad steel wire [J]. Wire and Cable, 1997(3): 19-21.

[16] 文习山,宋周,谭波,等. 铜覆钢接地导体的电气性能 [J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 608-614.

WEN X S, SONG Z, TAN B, et al. Electrical properties of copper-clad steel grounding conductors [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 608-614.

[17] 杨琪,蓝磊,杨建军,等. 大型铜包钢接地网的数值计算方法的研究 [J]. 电瓷避雷器, 2015(1): 93-98.

YANG Q, LAN L, YANG J J, et al. Research on the numerical computation method of large copper-clad steel grounding grid [J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1): 93-98.

[18] 牛晓民. 电力系统接地分析软件CDEGS简介 [J]. 华北电力技术, 2004(12): 29-31.

[19] 豆朋,陆培钧,屈勇,等. 利用CDEGS软件比较分析铜和钢接地网的性能 [J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 217-219.

[20] 郭振威,罗庆跃,袁旭龙,等. CDEGS在复杂大型接地网优化设计中的应用 [J]. 湖南电力, 2010, 30(2): 4-8.

GUO Z W, LUO Q Y, YUAN X L, et al. Application of CDEGS on complicated large grounding grid design [J]. Hunan Electric Power, 2010, 30(2): 4-8.

(责任编辑 高春萌)