

架空输电用高电导率铝线研究

金 鹏¹ 蔡西川² 党 朋² 杨长龙¹ 祝志祥³ 星守疆⁴
(1.国网辽宁省电力有限公司; 2.上海电缆研究所有限公司;
3.全球能源互联网研究院有限公司; 4.重庆泰山电缆有限公司)

摘 要 分析了 20 种架空输电导线用硬态铝线的元素组成以及各种杂质元素含量与硬态铝线电导率之间的关系。结果表明,杂质元素总量与电导率并不完全呈负线性关系,微量杂质元素 Ti、V、Mn 和 Cr 对其电导率有显著影响,稀土元素对高电导率铝线并无直接影响,适量 B 元素可有效改善铝线电导率。在杂质元素总量低于 0.20% 时,仅当 $w(\text{Ti}+\text{V}+\text{Mn}+\text{Cr})<0.001\%$ 、 $w(\text{Fe})<0.10\%$ 、 $w(\text{Si})<0.05\%$ 时,才可使硬态铝线的电导率高于 36.25 MS/m,同时才可保证其对应软态铝线电导率达到 37.12 MS/m 以上。

关键词 电工铝;高电导率;硬态铝线;软态铝线

中图分类号 TG146.21;TG113.22⁺4 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.014 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:



High Conductivity Aluminum Wire for Overhead Conductors

Jin Peng¹, Cai Xichuan², Dang Peng², Yang Changlong¹, Zhu Zhixiang³, Xing Shoujiang⁴
(1.State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd.; 2.Shanghai Electric Cable Research Institute;
3.Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.; 4.Chongqing Taishan Cable Co., Ltd.)

Abstract: The element composition of 20 kinds of hard aluminum wires for overhead transmission lines was analyzed, and the relationship between the content of each impurity element and the conductivity was investigated. The results reveal that the total amount of impurity elements is not completely negative linear to conductivity, while the trace impurity elements Ti, V, Mn and Cr have significant effects on the conductivity. Proper amount of boron can effectively improve the conductivity, while rare earth elements can be ignored for effect on wires. Under the condition that the total amount of impurity elements is less than 0.20%, only when $w(\text{Ti}+\text{V}+\text{Mn}+\text{Cr})$ is less than 0.001%, $w(\text{Fe})$ is less than 0.10%, and $w(\text{Si})$ is less than 0.05%, the conductivity of hard aluminum wire can be higher than 36.25 MS/m, and that of the related annealed aluminum wire can be guaranteed to reach above 37.12 MS/m.

Key Words: Electrical Aluminum, High Conductivity, Hard Aluminum Wire, Annealed Aluminum Wire

高压及特高压架空输电线路的长度基本都在数千千米以上,Al 因其具有易获得性、密度小及传输电能优良等特点,一直是架空输电导线的首选材料。目前,架空输电线路中采用的电工铝导体材料有两种形式,即硬态铝线和软态铝线。GB/T 17048-2017 将硬态铝线按电导率分为 L (35.38 MS/m)、L1 (35.67 MS/m)、L2 (35.96 MS/m) 和 L3 (36.25 MS/m) 4 个等级^[1]。GB/T 29325-2012 中要求软态铝线的电导率不低于 36.54 MS/m^[2]。当前架空输电导线中用量最大的电工铝材料为 L 型硬态铝线。

在架空输电线路中,不可避免会产生电能损耗。据

测算,在 220 kV/500 MW 输电线路中,导体材料的电导率每提高 1 MS/m,每千米年电阻损耗降低约 4 828 kW·h^[3]。因此,如何提高电工铝的导电性能从而降低线路损耗始终是架空输电线路导体材料发展过程中的焦点问题。随着国内电解铝原材料品位、熔炼精炼装备及工艺水平的提升,电工铝导体制造水平也不断提高。在满足现行标准基础上,如何将硬态铝线的电导率提升至 36.54 MS/m (63% IACS) 以及将软态铝线的电导率提升至 37.12 MS/m (64% IACS) 以上,已成为当前国内架空输电线路导体制造企业的努力方向。

本课题基于架空输电用铝线性能的实测数据及分

收稿日期:2020-09-03;修改稿收到日期:2020-09-23
基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5455DW190007)
第一作者简介:金鹏,男,1979 年出生,高级工程师,沈阳(110811),E-mail:46176575@qq.com
通信作者:蔡西川,男,1980 年出生,高级工程师,上海(200093),E-mail:caixichuan@secri.com
引用格式:金鹏,蔡西川,党朋,等. 架空输电用高电导率铝线研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):328-331.
JIN P, CAI X C, DANG P, et al. High conductivity aluminum wire for overhead conductors[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):328-331.

析,探讨影响铝线电导率的因素,并从工业生产角度提出获得高电导率电工铝线的途径。

1 试验材料与方法

选取了当前国内架空输电导线常用的 20 种硬态铝线,样本具有随机性,铝线的直径为 3.8~4.5 mm。这些铝线均通过铝杆连续拉拔而成,铝杆采用连铸连轧工艺生产。考虑到电工铝经过轧制,再经过拉拔大变形,其性能仅表现为强度提高,而材料的电导率无明显变化^[4~8],研究时忽略铝线直径对电导率的影响,重点分析各种铝线中不同元素及其含量与电导率之间的关系。同时,将所有试样在 380 ℃×1 h 下进行完全退火处理,并在相同环境条件下测量软态铝线的电导率。

试样成分检测采用电感耦合等离子光谱发生仪(Thermo Fisher ICP-OES 7200),每种测 3 个试样并取

平均值。

试样的电导率按照 GB/T 3048.2-2007 进行测量^[9]。电阻采用 4 点法测量,测量电位端之间的长度为 1 m,测量环境温度为(20±1) ℃,电阻测量精度为 0.001 mΩ,每种试样测 3 个并取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 杂质元素总量对铝线电导率的影响

表 1 为 20 种铝线试样的元素组成及含量,并按杂质元素总量从高到低进行排序。依据杂质元素总量,将 20 种试样分为 3 组,第Ⅰ组的杂质元素总量高于 0.30%,第Ⅱ组杂质元素总量在 0.20%~0.30%之间,第Ⅲ组杂质元素总量低于 0.20%。从表 1 可以看出,所有硬态铝线试样的电导率均满足架空输电用硬态铝线电导率不低于 35.38 MS/m 的要求。

表 1 20 种铝线的元素组成、含量及电导率

Tab.1 Chemical composition and electric conductivity of 20 kinds of aluminum wire																	
组别	编号	$w_B/\%$													杂质元素 总量/%	硬态电导率/ (MS·m ⁻¹)	软态电导率/ (MS·m ⁻¹)
		Fe	Si	Mg	Zn	Ni	Cu	Mn	Ti	V	Cr	B	Zr	Ce	La		
Ⅰ	1	0.13	0.12	0.04	0.02	0.003	—	0.001	—	0.003	—	0.006	—	—	—	0.323	35.525 0
	2	0.16	0.05	0.03	0.02	0.003	0.001	0.002	—	—	—	0.01	—	—	—	0.276	35.687 4
	3	0.14	0.08	0.02	0.02	0.002	—	0.001	—	—	—	0.006	—	—	—	0.269	35.496 0
	4	0.17	0.06	0.007	0.01	0.004	0.007	0.002	—	—	0.001	0.006	—	—	—	0.267	35.635 2
	5	0.14	0.05	0.006	0.003	0.006	—	—	0.005	0.002	—	0.008	—	0.03	0.01	0.260	35.768 6
	6	0.14	0.04	0.005	0.003	0.006	0.001	0.001	0.005	—	—	0.005	—	0.03	0.02	0.256	35.704 8
	7	0.16	0.07	0.005	0.004	0.005	0.004	0.001	—	—	—	0.004	—	—	—	0.253	35.594 6
Ⅱ	8	0.16	0.04	0.004	0.02	0.004	0.001	0.002	—	—	—	0.006	—	—	—	0.237	35.832 4
	9	0.15	0.05	0.003	0.02	0.004	0.002	0.002	—	—	—	0.004	—	—	—	0.235	35.658 4
	10	0.15	0.06	0.003	0.005	0.005	0.001	0.001	—	—	—	0.01	—	—	—	0.235	35.844 0
	11	0.17	0.04	0.004	0.002	0.005	—	0.001	—	—	—	0.005	—	—	—	0.227	35.739 6
	12	0.13	0.06	0.01	0.01	0.005	0.001	0.002	—	0.003	—	0.003	—	—	—	0.224	35.629 4
	13	0.14	0.04	0.004	0.01	0.005	0.001	0.002	—	0.004	—	0.003	—	—	—	0.209	35.646 8
	14	0.14	0.04	0.002	0.01	0.004	—	0.001	—	—	—	0.006	—	—	—	0.203	35.768 6
Ⅲ	15	0.11	0.05	0.004	0.007	0.005	0.003	0.002	—	0.002	—	0.008	—	—	—	0.191	35.658 4
	16	0.08	0.06	0.003	0.02	0.004	0.002	—	—	—	—	0.02	—	—	—	0.189	36.192 0
	17	0.10	0.04	0.001	0.006	0.005	—	0.001	—	—	—	0.03	—	—	—	0.183	36.261 6
	18	0.12	0.04	0.003	0.005	0.004	—	0.001	—	0.004	—	0.003	—	—	—	0.180	35.617 8
	19	0.09	0.04	0.005	0.006	0.005	—	0.002	—	—	—	0.01	—	—	—	0.157	35.797 6
	20	0.08	0.05	0.003	0.003	0.006	0.005	—	—	—	—	0.01	—	—	—	0.157	36.731 4

对于电工铝导体而言,杂质元素会引起基体原子的晶格畸变,从而对其电导率造成不利影响。对比杂质元素总量与其对应的电导率来看,随着杂质元素总量降低,电导率并未呈线性升高趋势。特别是在第Ⅱ组中,杂质元素总量从 0.276%降低至 0.203%,但硬态电导率却在 35.496 0~35.844 0 MS/m 范围内波动。而在纯度更高的第Ⅲ组试样中,电导率差异更加明显,且与杂质元素总量无对应关系。总的来看,杂质元素总量与电导率并非完全呈负线性关系,但要获得更高电导率(如 35.96 MS/m 以上)铝线,其杂质元素总量须处于较低

水平。

不同类别杂质元素对于其电导率影响是有区别的。其中对电工铝合金电导率影响最为显著的杂质元素为 Ti、V、Mn 和 Cr^[10]。第Ⅲ组 15、18 和 19 号试样中均因其含有微量 Mn、V,其电导率远低于同组中的其他试样,甚至低于大多数第Ⅱ组中杂质元素总量更高的试样。特别是 18 号试样,因其 Mn、V 含量相对较高,其硬态时电导率仅为 35.617 8 MS/m。

2.2 Fe、Si 对铝线电导率的影响

在电工铝导体中,Fe 和 Si 是最主要的杂质元素。

Fe 和 Si 除了以固溶方式存在于铝基体中,还会形成 Al-Fe-Si 三元化合物。根据 Al-Fe-Si 三元相图,不同的 $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 比会形成不同类型化合物,包括 $\alpha\text{-Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}_2$ 相和 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相^[11]。关于 Fe 和 Si 对于电工铝电导率的影响已有很多研究。赵海玉等^[12]研究表明, $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 值越小,电阻率越小;且因其考虑到实际生产中需减少铸锭裂纹, $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 值为 1.3~1.7 时,可使 90% 以上的电工铝杆电导率不低于 36.076 MS/m。陈德斌等^[13]对工业电解铝液中不同 Fe、Si 含量的铝杆电导率进行了试验,发现当 $w(\text{Fe}) \leq 0.16\%$, $w(\text{Si}) \leq 0.08\%$, 且 $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 为 2~3 时,电工铝杆的电导率才能保证不低于 35.699 MS/m。王桂芹等^[14]研究表明,工业纯铝中 $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 值为 3.0~3.8 时,铝线的电导率才会处于比较高的水平。

试验中,Fe 含量为 0.08%~0.18%,Si 含量为 0.04%~0.12%,而 Fe 和 Si 的总量为 0.13%~0.25%。整体来看,电导率更高的第Ⅲ组试样中 Fe 和 Si 含量要低于第Ⅰ、Ⅱ组。表 1 中 $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 介于 1.08~4.25 之间(1~11 号)。在第Ⅱ组试样中, $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 范围为 1.75~4.25(2~11),但该组试样的电导率并无显著差异。在杂质元素总量更低的第Ⅲ组试样中, $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 对铝线电导率的影响也不明显。

结合表 1 中 17 和 20 号试样可以看出,当 $w(\text{Fe}) \leq 0.10\%$, $w(\text{Si}) \leq 0.05\%$ 时,才可能获得电导率高于 36.25 MS/m 的硬态铝线。在工业生产中,Fe 和 Si 主要来源于重熔铝锭或电解铝水,以及在熔炼或铸造过程中由外部引入。为获得更高电导率的铝线,除需选择更高纯度的原材料(如 Al 纯度在 99.85% 及以上)之外,还需避免在熔炼及铸造过程中再次引入这些杂质元素,使 Fe 和 Si 等杂质元素总量处于较低水平,但对 $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 要求并不明确。

2.3 Ti、V、Mn、Cr 对铝线电导率的影响

Ti、V、Mn 及 Cr 作为工业纯铝中的微量杂质元素,对其电导率有显著影响。文献[13,15]均提出当铝中 $w(\text{V}+\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Mn}) > 0.015\%$ 时,电工铝杆的电导率会低于 35.699 MS/m 表明,Ti、V、Mn、Cr 等 4 类微量元素对电工铝的电导率有显著负面影响。由表 1 可见,试样中 $w(\text{V}+\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Mn})$ 范围为 0~0.007%。在第Ⅱ组试样中,由于其他杂质元素含量较高,Ti、V、Mn、Cr 对电导率的影响并不明显;但在纯度更高的第Ⅲ组试样中,Ti、V、Mn 及 Cr 的含量对其电导率有显著影响。图 1 为第Ⅲ组试样中(不包括 16 号) $w(\text{V}+\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Mn})$ 与电导率之间的关系曲线,可以看出,随着 $w(\text{V}+\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Mn})$ 增大,电导率明显降低。特别是当 $w(\text{V}+\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Mn})$ 从 0 增加至 0.002% 时,电导率

从 36.54 MS/m 以上降低至 35.96 MS/m 以下。

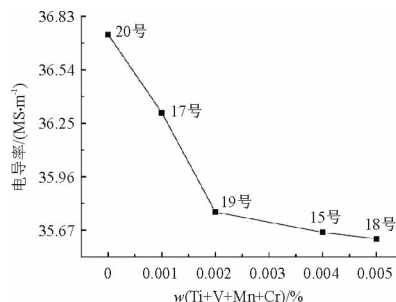


图 1 V+Ti+Cr+Mn 含量与硬态铝线电导率关系曲线
Fig.1 Relationship between $w(\text{V}+\text{Ti}+\text{Cr}+\text{Mn})$ and electric conductivity of hard aluminum wire

从第Ⅲ组试样中也可以看出,在杂质元素总量要求较低的基础上,V+Ti+Cr+Mn 含量须低于 0.001%,才能使硬态铝线电导率达到 36.25 MS/m 以上。在工业实践中,为获取更高电导率铝线,除需控制杂质元素总量外,更需严格控制 V+Ti+Cr+Mn 含量。

2.4 稀土、B 及其他元素对铝线电导率的影响

为改善铸坯组织及消除铝水中杂质元素,在电工用铝杆连铸连轧的精炼过程中常采用硼化和稀土工艺处理。杨钢等^[16]研究了稀土元素对电工纯铝电阻率的影响,发现 $w(\text{RE}) < 0.2\%$ 时,对电工圆铝杆的电阻率影响不明显; $w(\text{RE}) > 0.2\%$ 时,随着 RE 添加量增加,其电阻率有增加的趋势^[16]。刘顺华等^[17]研究发现,工业纯铝的纯度不同,添加稀土对铝导体导电性的影响差别很大。混合稀土对杂质含量较高的电工铝的导电性有改善,其原因是可以降低 Si 的含量,但对杂质含量低的电工铝导电性改善作用不明显。本研究除了 5、6 号试样中含有稀土元素 La 和 Ce 外,其他试样中均无稀土元素。在第Ⅱ组试样中,含有 La 和 Ce 的试样相对于其他试样,Si 含量无明显差异,电导率也无明显差异。结合第Ⅲ组试样可以看出,稀土元素对高电导率硬态铝线没有直接影响。

王桂芹等^[18]在 99.7% 工业纯铝中添加 Al-B 中间合金,发现随 B 含量的增加,电阻率呈线性降低。表 1 中所有试样均含有 B。杨钢等^[16]在 99.8% 的电解铝液中加入不同量的 Al-B 中间合金,也可以明显地提高铝杆的电导率,在 B 含量为 0.06% 时铝杆的电导率可达到 36.760 4 MS/m。分别对比第Ⅱ组和第Ⅲ组试样可以看出,不考虑其他元素影响的前提下,B 含量较高试样的电导率要高于低 B 含量的试样。同时结合 Ti、V、Mn 和 Cr 含量来看,在 B 含量高的样本中,其微量元素 Ti、V、Mn 和 Cr 含量较低,这表明适量的 B 可有效降低微量元素 Ti、V、Mn 和 Cr 含量,从而明显改善电工铝的电导率。从第Ⅲ组试样来看,要获得高电导率铝合

金,添加适量 B 是必须的,且只有当 B 含量可完全去除微量元素 Ti、V、Mn 和 Cr 的影响时,才能获得更高的电导率。从 17 号试样来看,B 含量在 0.03% 时,其硬态铝线的电导率仍可以达到 36.261 6 MS/m。

除上述元素外,在电工铝线中还存在的其他杂质元素主要包括 Mg、Zn、Ni、Cu 等。从表 1 看出,试样中的这些元素含量差异较大,对比 II 和 III 组来看,高电导率铝线试样中的这些杂质元素含量也相对较低。对比 16 和 20 号试样,仅由于 16 号试样中 Mg 含量较高,导致其电导率要明显低于 20 号试样。因此,在高电导率铝线制备中,除需控制主要杂质元素 Fe、Si 外,其他所有元素也必须严格控制。

2.5 高电导率软态铝线分析

由表 1 可知,所有试样在退火处理后,其电导率均满足标准要求(≥ 36.54 MS/m)。图 2 为硬态铝线与其软态铝线电导率对比图。可以看出,软态铝线的电导率与硬态铝线的电导率有直接对应关系。硬态铝线的电导率越高,对应软态铝线电导率也越高。

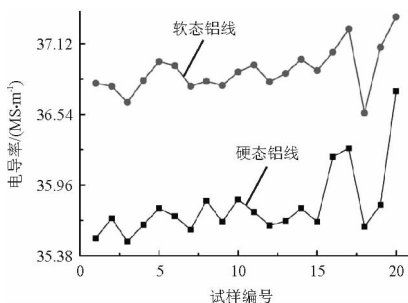


图 2 硬态铝线与对应软态铝线电导率对比图

Fig.2 Comparison of electric conductivity between hard aluminum wires and annealed aluminum wires

从表 1 可以看出,当硬态铝线的电导率在 35.96 MS/m 以下时,其对应软态铝线的电导率不会超过 37.12 MS/m;而从第 III 组中 17、20 号试样可以看出,仅当硬态铝线的电导率在 36.25 MS/m 以上时,才能保证软态铝线的电导率达到 37.12 MS/m 以上。

3 结 论

(1) 电工铝导体的电导率由其杂质元素含量决定。但杂质元素总量与电导率并不完全呈负线性关系,不同类别杂质元素对于其电导率影响不同。电工铝中的微量杂质元素 Ti、V、Mn 和 Cr 对其电导率有显著影响。

(2) 稀土元素对高电导率铝线影响不大,而适量 B 可明显改善电工铝线的电导率,其原因是 B 可以有效降低铝中的微量杂质元素 Ti、V、Mn 和 Cr 的含量。

(3) 在工业生产中为获得电导率高于 36.25 MS/m

的硬态铝线,除降低主要杂质元素 Fe 和 Si 外,还需严格控制 Ti、V、Mn 和 Cr 等有害元素。在满足杂质元素总量低于 0.20% 条件下,仅当 $w(\text{Ti}+\text{V}+\text{Mn}+\text{Cr})$ 低于 0.001%、 $w(\text{Fe})$ 低于 0.10%、 $w(\text{Si})$ 低于 0.05% 时,才能保证硬态铝线的电导率高于 36.25 MS/m。

(4) 退火处理后软态铝线的电导率与其硬态时的电导率呈直接对应关系。当硬态铝线的电导率低于 35.96 MS/m 时,其对应软态铝线的电导率在 36.54~37.12 MS/m 之间;仅当硬态铝线电导率在 36.25 MS/m 以上时,才能保证其软态电导率达到 37.12 MS/m 及以上。

参 考 文 献

- [1] GB/T 17048-2017 架空绞线用硬铝线[S].
- [2] GB/T 29325-2012 架空导线用软铝型线[S].
- [3] 李钊,李春燕,冯砚厅.节能导线在输电线路中的节能效果分析[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(10): 28-32.
- [4] 范新会,李建国,傅恒志.单晶连铸铝线材的导电性能[J].中国有色金属学报, 1999, 9(4): 106-109.
- [5] 张广平,李孟林,吴细毛,等.尺度对金属材料电阻率影响的研究进展[J].材料研究学报, 2014, 28(2): 81-84.
- [6] CETINARSLAN C S. Effect of cold plastic deformation on electrical conductivity of various materials[J]. Mater. Design, 2009, 30(3): 671-675.
- [7] 余虹云,李瑞,陈庆吟.纯铝线强度和电导率反常制约现象及机制分析[J].轻合金加工技术, 2018, 42(2): 37-42.
- [8] 罗雪梅,余虹云,李瑞.拉拔和轧制变形铝导线的结构演化及力学与导电性能[J].材料研究学报, 2018, 32(5): 357-364.
- [9] GB/T 3048.2-2007 电线电缆电性能试验方法 第 2 部分:金属材料电阻率试验[S].
- [10] OLAFSSON P, SANDSTROM R, KARLSSON A. Comparison of experimental calculated and observed values for electrical and thermal conductivity of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(16): 4 383-4 390.
- [11] 向凌霄.原铝及其合金的熔炼与铸造[M].北京:冶金工业出版社, 2005.
- [12] 赵海玉,曹有名. $w(\text{Fe})/w(\text{Si})$ 值对电工圆铝杆电性能影响的研究[J].有色金属加工, 2005, 34(1): 11-12.
- [13] 陈德斌,胥福顺,王荣莉,等.杂质元素对电工圆铝杆导电性能的影响[J].轻合金加工技术, 2009, 37(6): 33-36.
- [14] 王桂芹,刘顺华,高洪吾,等.几种元素对工业纯铝导电性的影响[J].大连理工大学学报, 2000, 40(4): 437-439.
- [15] 荣莉,何正夫,田素兰.V、Ti、Cr、Mn 对电工圆铝杆导电性能的影响[J].有色金属, 2009, 38(3): 12-14.
- [16] 杨钢,何正夫,张红耀,等.含稀土、硼的高电导率电工圆铝杆试验研究[J].轻合金加工技术, 2005, 33(7): 38-40.
- [17] 刘顺华,王桂芹,高洪吾,等.稀土元素对铝导体导电性能的影响[J].机械工程材料, 2005, 29(10): 46-49.
- [18] 王桂芹,刘顺华.硼对工业纯 Al 导电性的影响[J].金属学报, 2000, 36(6): 597-601.

(编辑:栗万仲)