

含铁铝合金线缆的发展现状

林海波, 黄宏军, 袁晓光

(沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110780)

摘要: 含铁铝合金线缆是一种为适应抗蠕变和高强度要求而发展的新型合金导线, 已受到越来越多的重视, 研发工作进展较快, 也取得了大量研究成果, 且成功地得到了应用。本文综述了国内外含铁 8000 系列铝合金线缆的研究现状及应用, 介绍了线缆用铝合金化学成分和性能指标, 与其他合金成分的线缆进行了性能特点对比, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 综述; 线缆; 含铁铝合金; 性能; 化学成分

Development Status of the Cables Made of Aluminum Alloy Containing Fe Element

LIN Hai-bo, HUANG Hong-jun, YUAN Xiao-guang

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, Liaoning)

Abstract: As a kind of newly developed wire, the cables made of aluminum alloy containing Fe element are characteristic of creep resistance and high strength. They had attracted more attentions and been applied successfully. Due to rapid progress in research, a large number of research results have been achieved. Overseas and domestic research situation and application of the cables made of 8000 series aluminum alloy containing Fe element were reviewed in this paper. The chemical compositions and performance indices of aluminum alloy for cables were introduced and compared with other kinds of alloy cables. The expectation of its development tendency was suggested meanwhile.

Key words: review; cable; aluminum alloy containing Fe element; performance; chemical composition

1 引言

随着我国经济的快速发展, 电力系统的大发展、大规模的基础建设, 我国对电线电缆的需求量快速大幅的增长^[1]。电缆工业“以铝节铜”是国际性趋向, 由于含铁铝合金导体优良的综合性能, 以及良好的社会、经济效益, 研究高强度、高导电性、耐高温、抗蠕变的线缆用铝合金导体, 成为近几年来国内外研究的一个热点^[2-3]。8000 系列铝合金属于 Al-Fe-X (X 为 Si、Cu、Mg、Zn 等) 系合金, 是由 Al-Fe-Mg 与 Al-Cu-Mg 系合金发展而来, 是真正用在配电线路上的含铁软质铝合金。8000 系列的铝合金导线是采用特殊紧压工艺和退火处理等先进技术制造, 该铝合金电线电缆弥补了以往纯铝电线电缆的不足, 提高了电线电缆的导电性能、弯曲性能、抗蠕变性能和耐腐蚀性能等, 能够保证电线电缆在长时间过载和过热时保持连续性能稳定^[4-7]。而我国对 8000 系列铝合金的研究和报道相对较少, 研究具有自主知识产权的线缆用新型节能铝合金高端产品, 将变得尤为重要。

2 含铁铝合金线缆的化学成分与性能

上世纪 20 年代初, 国外就开始铝合金导体材料的研发和使用, 随着电力工业的发展, 各国研发了一批具有某种特性的导电铝合金材料。如 Triple-E 合金 (美国 South wire 公司用洛佩兹法大量

生产含有 Fe0.55%的铝合金)；Super-T 合金(美国 South wire 公司在 Triple-E 合金的基础上研发的含有 Co0.5%的铝合金，其耐热性比前者较好)；CM71 合金(含 0.04%Cu 与 0.14%Mg 的导电用铝合金，其抗拉强度及导电率与 Al-Fe 系合金的差不多，而其蠕变性能则好得多)；含锆的耐热铝合金(耐热 58TAI-58%电导率耐热铝合金线，耐热 60TAI-60%电导率耐热铝合金线，超耐热 UTAI 铝合金线，特别耐热 XTAI 铝合金线，高强度耐热 KTAI 铝合金线等)；以及美国、加拿大等国家研发的 8000 系列的铝合金等^[8-10]。8000 系列的铝合金，是用在电线电缆上的含铁软质铝合金。部分软质铝合金电线的性能如表 1 所示。

表 1 部分软质铝合金电线的性能

Table 1 Performance of the part of the soft aluminum alloy wire

牌号或商品名称	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	导电率/%IACS
1350	74.5	27.5	32	63.5
Triple-E	95	67.7	33	59.5
Super-T	95	67.6	33	62.5
Stabiloy	113.8	53.9	20	61.8
NiCo	108.8	67.7	26	61.3
X8030	113	53.9	30	61.8
X8076	108.8	60.8	22	61.5
X8130	102	60.8	21	62.1

由于在 8000 系铝合金导体材料中含有铁、铜、镁、硼和稀土等元素，其力学性能、导电性能和安全性能得到了极大地改善。如：在铝合金导体材料中含有适量的铁元素可以提高其抗蠕变性；含有适量的铜元素可以增加铝合金导体材料在高温时的电阻稳定性；含有适量的镁元素可以提高铝合金导体材料的抗拉强度；含有适量的硼元素可以消除铝合金导体材料中杂质对其电导率的影响；含有适量的稀土元素可以提高铝合金导体材料的导电率、抗拉强度和抗腐蚀能力^[11-17]。

常用的 8000 系列铝合金牌号，是由美国研发的 AA8030 和 AA8176，其综合性能相近，受到专利权限限制。根据国外标准 ASTM B800-05(2011)“8000 Series Aluminum Alloy Wire Electrical Purposes Annealed and Intermediate Tempers”，8000 系列部分铝合金牌号的化学成分如表 2 所示^[18-20]。

表 2 8000 系部分铝合金的其他元素含量

Table 2 The content of other elements of the part of the 8000 series aluminum alloy

美国国家标准学会	硅	铁	铜	镁	锌	硼
8017	0.10	0.55~0.80	0.10~0.20	0.01~0.05	0.05	0.04
8030	0.10	0.30~0.80	0.15~0.30	0.05	0.05	0.01~0.04
8076	0.10	0.6~0.9	0.04	0.08~0.22	0.05	0.04
8130	0.15	0.40~1.0	0.05~0.15	—	0.10	—
8176	0.03-0.15	0.40~1.0	—	—	0.10	—
8177	0.10	0.25~0.45	0.04	0.04~0.12	0.05	0.04

AA8000 系铝合金导线，在退火状态(O)下，导线拉伸强度为 59~111MPa，接头拉伸强度不小于 59MPa；在加工硬化状态(H1X 或 H2X)下，导线拉伸强度达到 103~152MPa，接头拉伸强度不小于 76MPa，拉伸率都不小于 10%。其电导率能达到退火铜导线的 61%，在满足与铜导线相同载流量的条件下，只需要直径是铜导线的 1.5 倍，但是质量却比铜导体的低，安装成本被大大降低，其抗蠕变性能、屈服强度等性能与铜导线基本接近。且克服了纯铝导线的塑性差、弯曲性能不好、抗蠕变性能差等诸多缺点的同时，导电性能和力学性能又不明显降低。表 3 为电工铜、电工纯铝、

AA8000 系铝合金导体的性能对比^[21-26]。

表 3 电工铜、电工纯铝、AA8000 系铝合金导体的性能

Table 3 Performance of electric copper, electric aluminum, AA8000 series aluminum alloy conductor

导体特性	电工铜	电工纯铝		8000 系列
	软态	硬铝	软铝	铝合金
密度 (g/mm^3)	8.89	2.7	2.7	2.7
熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	1083	660	660	660
溶解热 (J)	51	95	95	95
线膨胀系数	17×10^{-6}	23×10^{-6}	23×10^{-6}	23×10^{-6}
电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	0.017241	0.028264	0.028264	0.0279
电导率%IACS (20°C)	100	61	61	61
抗拉强度 (MPa)	220~270	150~210	70~110	≥ 117
屈服强度 (MPa)	60~80	120~170	20~30	≥ 50
伸长率 (%)	30~45	0.5~2.0	23~25	≥ 10

3 合金元素和加工工艺对含铁铝合金线缆性能的影响

我国对电线电缆用含铁铝合金导体正处于研发阶段，各大科研院所、高校以及部分线缆企业，都在不断的探索当中。如中南大学的易丹青等人针对电线电缆用 Al-Fe-Cu 合金组织与性能的研究，在退火状态下，线材电导率能达到 61.98%IACS、抗拉强度达到 108MPa、断后伸长率 30%；合肥工业大学的苏勇等人对高性能稀土铝合金导体材料的研究，通过自硬树脂砂型铸造、旋锻加工等工艺制备含铈的稀土铝合金杆，经过退火处理工艺处理，抗拉强度为 129 MPa，断后伸长率为 15%，导电率为 62%IACS。；郑州大学的李庆奎等人研究合金元素含量与加工工艺对 8030 铝合金导线性能的影响，自制线材能达到 8030 铝合金的电导率国际标准^[27-29]。F·Kutner 等人研究了 32 种合金元素对铝合金导体材料电阻率的影响，结果表明：Zr、Cr、V、Mn、Li 和 Ti 等元素对铝合金导体材料的电阻率有严重的影响；Mg、Si、Cu、Ge、Ag 和 Fe 等元素对铝合金导体材料的电阻率有影响；Ca、Bi、Cd、Sb、Ni、Be、Tl、Pb、In、Ba、Ce、Sr、Co、Ga 和 Zn 等元素对铝合金导体材料的电阻率的影响较小。因此，要严格控制 Zr、Cr、V、Mn、Li 和 Ti 等元素在铝合金导体材料中的含量^[30-36]。

铝合金导体随着合金元素的加入，电导率势必将下降；加工成型将改变合金的组织 and 性能，不同的加工条件，影响的情况将会不同；热处理工艺的制定，对最终产品的性能非常重要；固溶时效处理后，可以改善合金的力学和电学性能，组合时效也许会达到更好的效果；在退火温度达到回复或再结晶阶段时，合金的电导率将升高、抗拉强度下降、伸长率升高。为了获得综合性能优良的铝合金导体，需要严格控制合金元素含量和配比，采用合理的加工和热处理工艺，改善净化、生产技术。

4 含铁铝合金线缆国内标准制定状况

针对电线电缆用铝合金导线生产与应用问题，对比了国外相关标准 ASTM B800-05(2011) “8000 Series Aluminum Alloy Wire Electrical Purposes Annealed and Intermediate Tempers” 和 UL 44-2010 “Thermoset-insulated wires and cables”，由上海电缆研究所、安徽欣意电缆有限公司、中国标准化研究院主要负责起草了 GB/T 30552-2014 《电缆导体用铝合金线》。该标准草案规定了电缆导体用铝合金线退火状态 (O) 和加工硬化状态 (H) 的产品型号、规格、材料、电气和力学性能、试验方法、包装及标志等^[37]。其中规定的电缆导体用铝合金线的化学成分见表 4。

表 4 GB/T 30552-2014 规定的电缆导体用含铁铝合金化学成分

Table 4 The chemical compositions of aluminum alloy containing Fe element
for conductors of insulated cables in GB/T 30552-2014

合金 类别	化学成分（wt，%）								
	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	B	其他		Al
							单个	合计	
1	0.10	0.55~0.80	0.10~0.20	0.01~0.05	0.05	0.04	0.03	0.10	余量
2	0.10	0.30~0.80	0.15~0.30	0.05	0.05	0.001-0.04	0.03	0.10	余量
3	0.10	0.60~0.90	0.04	0.08~0.22	0.05	0.04	0.03	0.10	余量
4	0.15	0.40~1.0	0.05~0.15	—	0.10	—	0.03	0.10	余量
5	0.03~0.15	0.40~1.0	—	—	0.10	—	0.05	0.15	余量
6	0.10	0.25~0.45	0.04	0.04-0.12	0.05	0.04	0.03	0.10	余量

标准规定的含铁铝合金线缆力学性能和 20℃时的直流电阻率应符合表 5 的参数。

表 5 GB/T 30552-2014 规定的电缆导体用铝合金线的力学性能和电阻率

Table5 The mechanical properties and resistivity of aluminum alloy wires
for conductors of insulated cables in GB/T 30552-2014

状态	抗拉强度/MPa	伸长率/%	20℃时的直流电阻率/($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
O	100~160	≥ 10	≤ 0.028264
H	≥ 185	≥ 1.0	≤ 0.028976

该标准中还规定了电缆导体用铝合金线的压蠕变试验方法,可直观对比该铝合金导体所具备的优于电工铝导体的抗压蠕变性能。抗压蠕变性能是该合金可用作制造电缆用线芯导体的重要技术性能。为了使铝合金导体的压蠕变试验更加客观,对样品进行化学成分、电阻率、抗拉强度、伸长率试验后,再对样品进行压蠕变试验,得出典型的压蠕变曲线。如图 1 为铝、电缆导体用铝合金和铜导体在相同试验条件下的典型压蠕变示意曲线。ASTM B800-05 (2011) 和 UL 44-2010 两项国外标准中均未涉及铝合金导体抗压蠕变性能的相关试验项目。

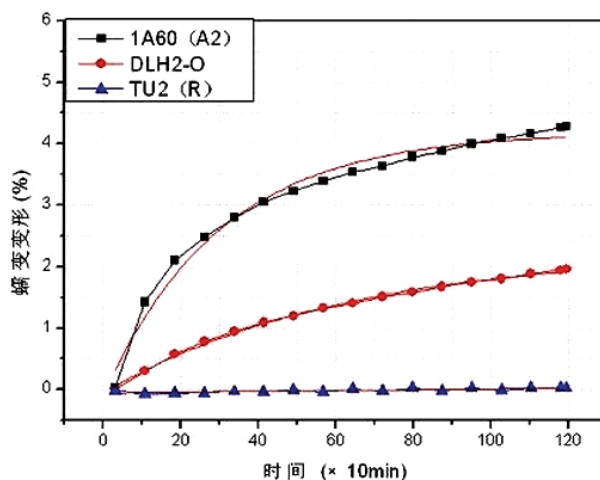


图 1 电工导体产品的典型压蠕变曲线

Fig. 1 The curve of typical compressive creep of electric conductor products

5 含铁铝合金线缆的应用

含铁铝合金导体由于其稳定的链接性能、优异的安装性能和诱人的性价比,被广泛用于住宅、商业、工业和军事等诸多领域,目前是应用最广的电线电缆原材料之一,并且运行良好^[38]。含铁铝合金线缆中,由美国研发的 8000 系的铝合金导线应用较为广泛,在北美已经有 30~40 年的安装历史,这种导线性能优越,使用效果比较好,既解决了纯铝导线应用的问题,又解决了传统铝合金导线的连接问题^[39]。欧美等发达国家绝缘电线电缆用铝及铝合金导体的比例远高于亚洲与非洲国家,并对铝合金的具体性能指标有明确的规定,如美国国家电气标准 NFPA (National Fire Protection Association, 美国国家防火协会)*70《National Electrical Code》、UL445《热固性绝缘电线电缆》、UL83《热塑性绝缘电线电缆》、UL1569《金属包覆电缆》等标准,对于铝合金电缆的导体材料,规定采用 AA8000 系列的铝合金导体^[40]。国外已经在很多大型商场、体育馆、机场、会展中心等场地运用此系列合金电缆。如亚特兰大奥运会主体育馆、肯尼迪国际机场、通用会展中心、沃尔玛购物商场、拉斯维加斯威尼斯人酒店、甲骨文数据处理中心等。其他地区,如加拿大多伦多国际机场、威斯汀酒店、墨西哥的立福马大厦、天空商场等均使用了此系列铝合金电缆。

目前,含铁 8000 系铝合金电缆已经在我国多个省、市及自治区销售和安装。加铝(天津)铝合金产品有限公司是加铝电缆设立在中国境内的一家独资世界级的生产基地。中国线缆行业将迈入铝合金电缆时代,未来的发展前景非常可观。国内已经有约 200 个项目在使用此系列铝合金电缆,如郑州中原百姓广场、蓝光 IBP 空港总部、成都欢乐谷公园、普洛斯天津物流园、北京海淀中学、西安大唐西市、北京太平洋百货、福建奔驰项目等领域^[41-42]。

6 结束语

尽管含铁铝合金线缆的研究工作取得了很多成果,也得到了实际应用,但是在大力提倡节能降耗的环保时代,研究工作还待进一步深入。针对目前含铁铝合金线缆存在的问题及电力系统发展的需要,笔者认为下述工作还需加强。

(1) 进一步开展含铁铝合金成分设计的理论研究,探求合金元素综合作用对线缆电学性能的影响规律,为合金成分设计提供理论支撑。

(2) 优化此类合金成分,进一步开发净化合金熔体技术,围绕提高合金线缆的导电性能和综合力学性能,获得高品质合金的制备开展研究工作。

(3) 进一步开展此类合金线缆的成形技术研究工作,优化拉拔和拉拔过程中的热处理工艺,保证线缆在制备过程中具有较高的电学和综合力学性能。

参考文献:

- [1] 宗刚,王琨.我国电线电缆行业现状与发展研究[J].电器工业,2008,02:31-36.
- [2] 本报记者 杨娜.国产铝合金线缆再添新锐[N].中国电力报,2014-01-16006.
- [3] 黄崇祺.电工用铝和铝合金在电缆工业中的应用与前景[J].电线电缆,2013,02:4-9.
- [4] 花光昌.导体应用铝材的思考[J].研究与探讨,2007,(2):11-12.
- [5] 陈迪,李成栋,赵晓冬.铝合金在电力传输领域的研究及应用[J].材料导报,2013,15:145-148.
- [6] 胡大伟,金海升,齐东海.民用建筑电缆选型浅析[J].智能建筑电气技术,2009,3(3):101.
- [7] 黄旭.浅析铝合金电缆的选用[J].石油化工设计,2014,01:5-9.
- [8] 李丰庆.硼对铝中杂质元素的作用及其对导电率的影响[D].大连:大连理工大学,2003.
- [9] 李玉华.微合金元素对铝圆杆性能的影响[D].昆明:昆明理工大学,2005.
- [10] 王祝堂,田荣璋.铝合金及其加工手册[M].长沙:中南大学出版社,1989:1038-1048.
- [11] Toshiyuki Horikoshi, Hiromitsu Kruoda, Michiaki Shimizu, et al. Development of aluminum ally conductor with high electrical conductivity and controlled tensile strength and elongation[J]. Hitachi Cable Rev, 2006,25:18.

- [12] Ricardo H.R.Castro, Pilar Hidalgo, Eric C. Diniz. Enhanced electrical conduction in aluminum wires coated with carbon nanotubes[J]. Materials Letters, 2011,(65): 271-274.
- [13] FengWang, BaiqingQiong, YonganZhang, et al . Microstructural characterization of an Al-Cu-Mg alloy containing Fe and Ni, [J]. Journal of alloys and compounds, 2009, (487):445-449.
- [14] R. Spolenak, O. Kraft, E. Zrzt. Effects of alloying elements electromigration [J]. Microelectronics Reliability, 1998, (38): 1015-1020.
- [15] Tabatabaei N, Taheri AK, Vaseghi M. Dynaxnic strain aging of a commercial Al-Mg-Si-Cu alloy during equal chaxnnel angular extrusion Process[J]. Journal of Alloys And Compounds, 2010,502:59-62.
- [16] Buha J, Lumley RN, Grosky AG, et al. Secondary precipitation in an Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2007,55:3015-3024.
- [17] A. K. Lakshminarayanan, Balasubramanian, Elangovan. Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminum alloy joints[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009,40:286-296.
- [18]肖亚庆. 铝加工实用技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [19] AA-TH56-1989-R1998 Aluminum Electrical Conductor Handbook Third Edition[S]. 1989.
- [20] 美国材料学会. 电气用退火及中温回火 8000 系列铝合金导线标准规范 [EB]. 2010. <http://wenku.baidu.com/view/bb48158da0116cl75fDe4897.html>
- [21]黄崇祺. 铜、铝导体生产的发展趋向及有关问题的探讨[C]. 导体与装备技术研究会论文集, 2003:32-53.
- [22]黄崇祺, 李文浩, 丁关森等. 架空电力线路用增容导线[J]. 电线电缆. 2005,(2):8-13.
- [23]叶杨. STABILOY (赛德合金)建筑电缆替代铜电缆节能浅析[C]. 第十届中国科协年会光伏技术与照明节能技术论坛论文集. 郑州: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2008.86-91.
- [24]杜毅威. 铝合金电缆在建筑工程中的应用[J]. 建筑电气, 2010,(5):42-44.
- [25]杨维迅. 铜、铝导体的应用[J]. 电气工程应用, 2008,(2): 28-31.
- [26]葛福余, 刘欣欣. 0.6~1kV Stabiloy~(TM)合金电缆与铜电缆的比较[J]. 电气应用, 2009,08:26-29.
- [27]李卫红. 电线电缆用 Al-Fe-Cu 合金组织与性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [28]陈文平. 高性能稀土铝合金导体材料研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [29]张国玲. 合金元素含量与加工工艺对 8030 铝合金导线性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [30]程雪梅. 电工铝杆电阻率偏高的影响因素及对策[J]. 甘肃冶金, 2007, 29(5): 70-73.
- [31]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.
- [32]吴克义. 铝线材中的杂质及其影响[J]. 轻合金加工技术, 1989(6): 13-20.
- [33] R. Spolenak, O. Kraft, E. Arzt. Effects of alloying elements on electromigration[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 386.
- [34] Raeisinia B, Poole W J, Lloyd D J. Examination of precipitation in the aluminum alloy AA6111 using electrical resistivity measurements [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 420(1-2): 245-249.
- [35]贺文雄, 王尔德, 孙宏飞, 等. 亚微米晶 Cu-5%Cr 冷拉拔后的回复再结晶及热稳定性[J]. 稀有金属材料科学与工程, 2007, 36(3): 665-669.
- [36]张旦闻, 赵冬梅, 懂企铭, 等. 组合时效对 Cu-Ni-Si 合金性能的影响. 功能材料. 2004, 35: 2160-2167.
- [37] GB/T 30552-2014, 电缆导体用铝合金线 (征求意见稿) [S].
- [38]龙伟任, 徐铮. 铝合金导线的市场展望与工艺改进[C]. 中国电工技术学会电线电缆专业委员会论文集, 2000: 127-130.
- [39]吴迈生. 浅析国产铝合金导线发展前景[J]. 湖南电力, 2004, 24(6): 55-58.
- [40]胡大伟. 工程建设中电线电缆导体材料的合理使用[J]. 现代建筑电气, 2011(3): 47.
- [41]王春光. STABILOY 合金电缆开辟行业新天地[J]. 建筑电气, 2009, 28(23): 14-17.
- [42]袁松林. 加铝 Stabiloy 建筑电缆的应用[J]. 浙江建筑, 2010, 27(12): 60-62.