「输电线缆」

国内钢芯耐热铝合金导线的研究和应用

文/中国能源建设集团天津电力设计院有限公司　刘建伟　赵　枫　郝艳勇

钢芯耐热铝合金导线是一种性能优良的架空输电线路用导线，它能提高线路输送容量，同时具有强度高、弧垂特性好和耐高温等特点。从工程应用、配套金具、施工以及设计注意事项等方面介绍了钢芯耐热铝合金导线在国内的研究及应用情况，并对其今后的发展提出了建议。

架空输电导线作为电力输送的载体，在输电线路中占有极其重要地位，长期以来，架空导线主要使用钢芯铝绞线（Aluminium Conductor Steel Reinforced，ACSR）。为实现安全可靠优质电力输送，各国的科技工作者一直在努力寻找理想的架空输电导线，以取代传统导线，如为提高强度而开发的钢芯铝合金绞线、全铝合金绞线和铝包钢芯铝合金绞线等，为提高防腐性能而开发的铝包钢芯铝绞线，为提高导线输送容量和耐热性能而开发的各种耐热铝合金导线，为降低导线弛度而开发的用殷钢芯代替普通钢芯导线等。

相比于同样规格的普通钢芯铝绞线，耐热铝合金导线具有输送更多电能，而且具有弧垂特性好、强度高和耐高温等特性，问世后不久即受到人们的广泛关注，伴随着品种的不断扩大和性能的不断提高，数十年来得到了很大的发展和应用。尽管可以通过提高导线运行温度增大载流量，同时可以控制线路导线弧垂，但由于偏低的导电率，使它们的电阻率较差，线路线损增加，限制了其推广应用。在保证提高载流量的同时，如何提高导电率、降低线损并有效控制成本成为耐热铝合金导线目前亟待解决的关键技术问题。随着铝合金材料研究的不断继续，高导电率的耐热铝合金导线逐渐涌现，必将以其低能耗、低弧垂的特性受到使用者的青睐。

耐热铝合金导线通常指最高运行温度达150 ℃的架空输电导线，在我国常用于城市线路增容改造，而在日本还用于长距离高压输电线路及超高压输电线路。耐热铝合金导线有钢芯耐热铝合金绞线（TACSR）和间隙型钢芯耐热铝合金绞线（GTACSR）。TACSR中的耐热铝合金线有58% IACS耐热铝合金线（58TAl）和60% IACS耐热铝合金线（60TAI）两种，其性能如表1所示。相应的导线分别称为58TACSR和60TACSR，典型TACSR和钢芯铝绞线（ACSR）的电气性能如表2所示。可见，TACSR的连续允许载流量约为ACSR

表1　耐热铝合金线与普通硬铝线性能对比表（直径为4.8～2.3 mm）

线种	型号	导电率（20 ℃）/%IACS	R_m/MPa	允许使用温度/℃		
				连续	短时	瞬时
58%导电率耐热铝合金线	58TAl	≥58	158～183	150	180	260
60%导电率耐热铝合金线	60TAl	≥60	158～183	150	180	260
硬铝线	HAl	≥61	158～183	90	120	180

注：短时允许使用温度是指在表中给定的温度下工作，每年内累计不能超过10 h；瞬时允许使用温度是指在表中给定的温度下工作，每次不能超过3 s。

www.eage.com.cn

的1.6倍，短时允许载流量达ACSR的1.36倍。为了弥补TACSR的强度和抗腐蚀性能的不足，用特高强度钢芯代替普通钢芯，制成特强钢芯耐热铝合金绞线（TACSR/EST）以提高导线强度，用铝包钢芯代替普通钢芯，制成铝包钢芯耐热铝合金绞线（TACSR/AC）以提高导线的耐腐蚀性能。普通钢芯的抗拉强度为1 380 MPa，特高强度钢芯的抗拉强度为1 770 MPa。间隙型钢芯耐热铝合金绞线的钢芯采用特高强度钢芯，与钢芯相邻的内层铝合金线为梯形截面。钢芯和铝线层之间存在一定的间隙，钢芯与内层铝合金线能各自独立移动，在间隙中填充有润滑油，以便减少钢芯与内层铝合金线之间的摩擦。间隙型增容导线在架设、运行过程中，全部机械负荷由特强钢芯承担，耐热铝合金线不承受张力，其弧垂大小完全由钢芯的线胀系数决定，从而使间隙型钢芯耐热铝合金绞线在运行过程中可维持低弛度。间隙型钢芯耐热铝合金绞线与相同截面钢芯铝绞线的性能对比如表3所示。为了弥补钢芯耐热铝合金绞线电导率的不足，材料工作者又在开发电导率为61% IACS的耐热铝合金绞线。该耐热铝合金导线的研制成功将改变耐热铝合金导线的增容属性，赋予其大容量输电导线的美称而加速其在超高压和特高压输电线路上的应用。

表2　典型钢芯耐热铝合金绞线与钢芯铝绞线电气特性对比

线种	导线结构	外径/mm	电阻/（Ω/km）	载流量/A	
				连续	短时
810 mm² 58TACSR	45/4.8+7/3.2	38.4	0.037 4	1 995（150 ℃）	2 286（180 ℃）
810 mm² 60TACSR	45/4.8+7/3.2	38.4	0.036 3	2 007（150 ℃）	2 297（180 ℃）
810 mm² ACSR	45/4.8+7/3.2	38.4	0.035 6	1 238（90 ℃）	1 683（120 ℃）

表3　810 mm²间隙型增容导线的载流量、张力、弧垂与温度的关系及与相同截面积钢芯铝绞线的比较

运行温度/℃		安装	40	50	60	70	115	150
TACSR −300/25	载流量/A	—	—	—	337	513	940	1 154
	张力/N	18 089	17 256	16 927	16 618	16 326	15 066	14 193
	弧垂/m	6.56	6.87	7.01	7.14	7.27	7.87	8.36
ACSR −300/25	载流量/A	—	—	—	340	531		
	张力/N	17 868	15 548	14 809	14 153	13 566	—	—
	弧垂/m	6.54	7.51	7.89	8.26	8.61	—	—

工程应用

我国应用耐热铝合金导线已有30余年的历史。1986年，安徽繁昌500 kV变电站首次将国产1 440 mm²钢芯58%导电率的耐热铝合金绞线（NRLH58GJ）作为母线，之后国产耐热铝合金导线在江苏徐州、上海和浙江杭州市瓶窑等地被大量采用。从1995年至今，数万吨国产耐热铝合金导线用于各类线路改造工程，不仅节约了工程投资，而且提高了输送容量40%～60%，经济效益十分明显。目前，各大线缆厂商已具备大量生产60%导电率耐热铝合金导线的能力，并在国内外电力建设中得到了广泛应用。随着材料性能逐步提高，工程逐渐成熟，现在耐热铝合金导线除在各类线路改造工程应用外，在大跨越输电工程、高压直流接地极线路工程也有广泛应用，并取得了良好效果。

1. 在增容改造工程中的应用

1995年，武汉市供电局设计院将耐热铝合金导线用于该市4 km长110 kV英栖线路的扩容改造设计中，采用国产钢芯58%导电率耐热铝合金导线（NRLH58GJ－240/30）替换原导线，这在国内是首次。

在2001年，深圳供电规划设计院承担对该市南山电厂和月亮湾电厂送出工程的南热Ⅰ、Ⅱ回110 kV线路进行增容改造。线路全长8 km，原使用导线为普通钢芯铝绞线（JL/G1A－400/35），最后采用相同规格的国产钢芯58%导电率耐热铝合金绞线（NRLH58GJ－400/35）更换原导线。在铁塔基本不动的前提下，不仅使载流量由原来的1 296 A/227 MW提高至2 026 A/356 MW，提高了45%（仅升温到110 ℃），而且为今后的扩容改造留了相当的余地。若不采用耐热铝合金导线更换

旧导线，则需改造2基铁塔，新增20基铁塔，加上1个多月的施工，改造费用共计约需要1 000万元。采用耐热铝合金导线方案后，工期大大缩短，改造费用实际只用了300万元，节约700万元。经济效益十分明显。至今，深圳地区采用耐热铝合金导线进行扩容改造的线路已达200 km。在城网线路扩容改造工程中，耐热铝合金导线的长处特别明显，尤其在线路走廊狭窄地区，只需要更换相近截面规格的导线，基本上不需要更换铁塔即能满足强度和导线对地弛度安全的要求。从1995—2002年，大约有2 900 t国产耐热铝合金导线用在各类线路改造工程中，不仅节约了大量工程投资，而且提高了输电容量（40%～60%），产生了明显的经济效益。

选用新型耐热增容导线对原有线路进行增容改造时，除了考虑备选导线的改造费用、运行经验和输送容量外，还需根据工程实际地形情况校验导线的对地距离，对于工程中大跨越段等重要线路必须着重考虑导线运行经验和抗拉强度。

2. 在大跨越输电工程中的应用

选用强度比普通导线更大的特殊线型以提高导线的拉重比，是减小大跨越输电线路跨越档弧垂最直观的方法。随着导线生产制造技术的不断提升，适用于大跨越输电工程的导线种类也越来越多。

根据我国近几十年来的大跨越输电设计经验，目前仍被广泛应用于大跨越输电工程的导线主要有：高强钢芯（耐热）铝合金绞线、特强钢芯高强铝合金绞线、特强钢芯（耐热）铝合金绞线以及铝包钢绞线等。

特强钢芯高强耐热铝合金绞线（KTACSR/EST）是具有强度高和耐热性能好双重特性的电工用铝合金导体材料，靠牺牲铝合金的部分强度实现导线输送容量的增加。与同等拉重比的导线相比（KTACSR/EST）可以使分裂根数减少或导线外径减小，这对于降低工程投资很有成效。具有使用温度高、耐热性好和载流量大的特点，无疑在强度和输送容量上具有着巨大的优势，因此该种导线适合于大跨越输电工程。表4列出了特强钢芯高强耐热铝合金绞线在广东地区部分大跨越输电工程中的使用情况。

目前，国内220 kV以上的大跨越输电线路因其强度的特殊要求，仅少数几条跨越采用了国产钢芯铝合金导线，大部分都采用进口钢芯铝合金导线。有若干条大跨越输电线路兼顾提高强度和增大载流量的双重考虑，采用了进口耐热铝合金导线，例如哈尔滨的松花江大跨越、广东的珠江大跨越和上海的黄浦江大跨越等。

3. 在直流输电接地极线路中的应用

在直流输电系统的接地极线路工程中，导线一般约占整个工程投资的30%，而且导线形式与铁塔和塔基设计直接相关，很大程度上决定了线路工程的建设投资。由于特高压直流工程接地极线路运行电流大、电压低且运行时间短，在导线选型原则上与一般直流输电线路有较大差别。

接地极线路的导线截面选择时，在综合考虑运行和节省投资的要求时，可不按常用的经济电流密度进行设计，不须电晕校验，也不必将电能损耗作为选择导线的控制条件，只须根据线路可能出现的最严重运行方式进行热稳定校验，这样选择的导线既能满足直流工程技术要求，又可节约投资。

运行实践表明接地极线路采用耐热导线有如下优点。

1）耐热导线具有非常好的机电性能，可通过

表4　广东地区特强钢芯高强耐热铝合金绞线在大跨越输电工程中的使用情况

大跨越输电工程名称	电压等级/kV	建设年	跨距/m	塔高/m	导线型号	
					分裂数	截面/m²
沙江线跨狮子洋	500	1988	1 547	236	2	720/300
沙江II线跨莲花山	500	1995	985	110	2	720/300
潮红线跨榕江	220	1996	946	116	1	530/240
汕官线跨汕头海湾	220	1997	1 279	166	1	720/300
罗江II线跨小塘	500	2003	1 084	113	2	610/270
肇西线跨富湾	500	2004	1 481	168	2	720/300
台香线跨崖门	500	2005	1 425	216	2	720/300
潮汕线跨榕江	500	2009	1 444	216	2	720/300
黄赤线跨珠江增容	220	2010	738	132	1	610/80
狮五线跨西江	500	2011	1 227	184	2	1 000/260

www.eage.com.cn

导线允许温度的提高来满足接地极线路最大持续电流的要求。

2）接地极线路采用耐热导线，对线路的弧垂和线路金具有一定影响，必要时要加大线路对地高度，采用耐热金具。因此，在接地极线路采用耐热导线时要权衡利弊，合理运用。

3）接地极线路采用耐热导线能大大降低主要材料指标，且无线损问题，既响应了国家节能降耗的政策，又符合电网两型化的要求，必将产生显著的经济效益和社会效益。

配套金具

因耐热铝合金导线的运行温度较高，与其相联接的金具必须具有良好的散热性能，否则会使导线与金具连接部分温度过高，线路存在安全运行隐患，同时导线的热量容易通过金具向绝缘子传导，使绝缘子片受热不均，需要配套设计金具。通过提高金具与耐热导线的直接接触面积和有效载流面积，减少通过金具的电流密度，降低金具运行温度，或采用耐热材料制造而成的耐热金具，保证金具安全运行。因此，耐热导线的金具与普通导线金具有所不同。目前，已有数家金具生产厂家配套生产不同型号的耐热导线金具。

（1）新型增容导线耐热金具

耐热导线配套金具的制造核心技术是设计合理的金具尺寸，保证较高温度运行时金具对导线的握力，耐热金具的制造工艺，金具的压接工艺。这3项核心技术有效地保证金具运行温度在较低的范围内，以及保证输电线路的安全运行。耐热金具设计如表5所示。

表5　耐热金具与普通金具对比表

导线名称	钢芯铝绞线	特种增容耐热导线	
耐张金具	压接型	耐热材料，压接型（稍长）和楔形结构	特殊材料、特殊设计、特殊尺寸、特殊压接工艺
接续管	标准件	耐热材料，压接型（大尺寸）和楔形结构	
悬垂金具	标准螺栓型	标准螺栓型	含耐热护线条
防振锤	标准件	标准件	含耐热护线条
		特殊施工安装工具	特殊牵引头、紧线线夹

目前针对新型增容导线已研制出与之相适应的配套金具，无论是机械强度还是电气性能指标均满足现行国家标准、行业标准及规范的要求，满足工程的使用要求，已经有一定的运行经验。

（2）耐张线夹与接续管

耐热耐张线夹及接续管可以在高温下满足其机械张力和电气连接的作用。同时铝管的设计应超过导线截面。导线的散热面增大，从而使保护绝缘子不致受热加速老化。结构除具有耐热性能外，一般尺寸需略加长些，以保证与导线间有足够的拉力。耐张线夹和接续管均为压接型，耐张线夹采用单引流板和双引流板结构，根据截面大小设计，对导线的握力强度为95%RTS。

（3）耐张线夹补强条

压接型耐张金具引流板与本体是面接触，是耐张线夹最薄弱部分，容易发生过热现象，在国内线路上曾经发生过多起引流板断裂事故。为保险起见，可以考虑引流板补强条。

（4）悬垂线夹

传统悬垂线夹的线夹本体和盖板可能引起轻度的齿状压痕和内层绞线变形，特别是当采用软铝导体时，因软铝强度低易受擦伤，因此悬垂线夹采用有预绞丝保护导线，耐热橡胶衬垫的结构。采用目前在导线上广泛使用的单支点或双支点预绞式悬垂线夹，可避免不必要的变形和压痕。

（5）防振金具

由于具有较优良的自阻尼特性，新型导线借鉴常规导线的防振措施即可。安装防振锤金具时，在与导线接触处，都应该用预绞丝包裹保护。

施工工艺

钢芯耐热铝合金导线跟传统的架空电力线施工安装方式基本一致。必须根据线路的具体情况、考虑安装单位施工经验和规范及施工机械，制订详细的施工方案。确保钢芯耐热铝合金导线的施工安装能顺利进行。张力放线机、滑轮组和牵引网套如图1、图2和图3所示。

1）安装导线时应控制张力，保持足够的放线张力，从而使导线在任何时候都不会接触地面。导线线盘应合理设置，使其旋转方向与张力机一致，避免钢丝打结。

图1 张力放线机

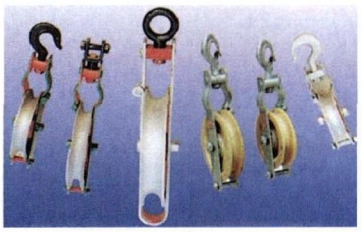

图2 滑轮组

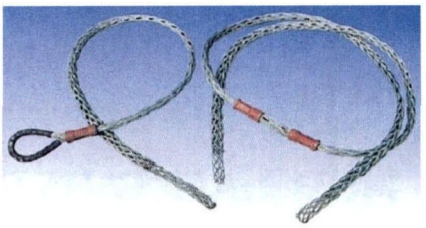

图3 牵引网套

2）牵引、制动系统应平滑运行，防止对导线造成任何突然撞击（人工放线时更应注意）；能随时调整放线速度和张力；张力机和牵引机上应有限制和张力指示装置，使导线在任何时候都能以特定张力值平稳地运行。张力机、牵引机能够灵活制动，使得暂停展放导线时仍维持张力不变。原则上使用自动保护型制动装置。

3）安装前应对滑轮组进行适当的维护和检验，防止滚轮损伤，在安装前要装上橡胶槽。为减小导线外层绞线受到磨损，滑轮应适当地加以润滑，处于良好的工作状态，从而使导线受到平滑牵引。滑轮应该接地，至少两端的牵引滑轮与杆塔应一同接地。滑轮一般都与抱箍、横担、杆塔等结构直接相连，在杆塔上形成U形环从而保证滑轮自由运动，用于悬挂滑轮的抱箍、横担等附件，应根据导线所受的张力和滑轮的型号而定。

设计注意事项

1）规范耐热导线运行温度。国内电线电缆厂家生产的耐热导线由于特性不同，运行温度也不一样，从90 ℃到150 ℃甚至更高，因而急待出台行业标准来规范产品技术参数。

2）开发生产适用于耐热导线的耐张线夹、压接管、补修管、防振锤和间隔棒等金具。目前，虽然已有金具厂家开发试制出此类耐热产品，但未能形成行业标准化金具。

3）与换流站或接地极普通设备连接时要设计过渡的金具。耐热导线比同等截面的铝包钢芯铝绞线的输送容量要大得多，而变电站引线只能采用铝包钢芯铝绞线，因此要根据耐热导线的容量选择相匹配的多分裂铝包钢芯铝绞线或者单根大截面铝包钢芯铝绞线，同时应根据连接形式选用相应的过渡线夹。

结论及展望

1）制定国家标准或行业标准，推动钢芯耐热铝合金导线发展。国内还没有耐热铝合金导线的行业标准或国家标准，线缆企业按照相关的企业标准组织生产与验收。目前仍处于58TAL与60TAL耐热铝合金导线并存生产的阶段，为了降低线损，国家电网公司在2009年颁布耐热铝合金导线的企业标准，该标准中规定耐热铝合金线的电导率≥60%IACS，20 ℃时的电阻温度系数为0.003 9/℃、抗拉强度为150～160 MPa，导线长期运行温度为150 ℃。为了进一步降低线路损耗，国家电网公司在推广应用钢芯63%IACS导电率硬铝线，铝合金芯铝绞线和中强度全铝合金绞线等节能型导线的同时，投入经费开展61%IACS耐热铝合金导线的研制。鉴于间隙型耐热铝合金导线的低弧垂特性，间隙型61%IACS导电率耐热铝合金导线必将以其低能耗、低弧垂的特性受到使用者的青睐。

2）改善钢芯耐热铝合金导线研制方法，提高导线性能。在输电线路的节能改造中，为了达到降低输电线损，提高线路寿命的目的，采用高导电率的钢芯耐热铝合金导线替代钢芯铝绞线实现线路的降耗节能是发展趋势之一。在高导电率耐热铝合金研究方面，国外主要通过采用较高纯度的电工铝同时严格控制成分、工艺来提高导电率。国内研究者通过控制合金元素的交互作用来提升导电率，通过加入微量合金元素，同时调整各个成分的含量，并且控制杂质元素含量在合金中的占比，并通过热处理工艺来调整合金的微观组织结构，制备得到具有高导电率的中强铝合金单丝。试验结果表明，该发明制备的导电率为62%IACS的中强铝合金单丝的抗拉强度为252 MPa，断后伸长率为3.51%。

3）新型耐热铝合金导线的研发需要综合考虑各方面的因素，使得导线的练合性能达到最佳。我国急需开发用于高架输电线路中的新型耐热铝合金导线，此类导线应具有较高的强度（不低于

（下转第91页）

www.eage.com.cn

变压器110 kV侧避雷器带电测试试验数据。数据在2014年4月B相明显出现异常增长，但当时试验人员未能及时发现，最终导致该避雷器B相爆炸，主变压器差动保护动作。因此，避雷器带电测试能及时有效地反映避雷器的运行状态，应引起相关试验人员的足够重视。

4）在避雷器带电试验中，由于存在相间或运行环境的干扰，导致测试数据异常，有时甚至严重偏离正常值，这种干扰的影响，随着运行电压的升高，影响更大，造成无法对避雷器带电测试数据进行趋势分析而影响试验人员对避雷器运行状态的判断。当出现干扰现象，无法对带电测试数据进行判断时，建议先使用非补偿法对避雷器进行测试，并将测试数据存档，然后使用补偿法重新测量，以供测试人员进行综合判断。可从全电流、阻性电流和相角等值的变化趋势，利用横向、纵向等分析方法进行分析判断。当干扰较严重，使用补偿法也无法对避雷器的运行状况进行有效判断时，建议按照相关规程对避雷器进行停电试验，也可缩短停电试验周期。

5）根据上述MOA试验不合格原因分析，该避雷器硅橡胶外套被烧蚀应属于电离性放电，这种放电一个很重要的特征是电离区附近局部温度升高，但现场红外测试结果并没有反映这一事实，而第二个案例中，避雷器爆炸前的红外测温数据也未见异常。一般来说，MOA整体温度分布均匀，最大温差仅在1K范围内。当避雷器内部出现缺陷时，如元件老化、受潮等，阻性电流会明显增大，导致避雷器整体温度分布不均匀，温差增大，这种过热属于电压致热型，一般要求测试仪器有较高的测试精度，从现场红外测试仪器的配置看，应能满足测试需要，但现场却未能发现避雷器有局部过热的情况，因此该问题还需进一步研究。**EA**

（收稿日期：2016.07.06）
（编辑：刘群垚）

（上接第77页）

295 MPa）、高导电率（60% IACS左右）；短期与长期运行温度分别不应低于150 ℃与230 ℃。新型导线的研发必须综合考虑载流量与线损及弧垂、强度与导电率的关系。导线还需具有良好的抗蠕变性、抗热膨胀性、相当的断后伸长率、良好的耐蚀性等以延长其使用寿命。

4）提高性价比，扩展钢芯耐热铝合金导线的应用范围。近些年来在国内低电压等级的旧线路改造中，随着技术水平的提高，国内生产耐热铝合金导线的厂家的技术水平完全能够满足工程上的要求。目前，国内应用耐热铝合金导线的长距离、高电压等级线路还比较少，但耐热铝合金导线在旧线路改造、重冰区和大跨越线路中应用广泛，其在输送容量、电磁环境、防腐性能和安全可靠性方面有显著的优势，在引起的工程投资增加不大的前提下，性价比高的耐热铝合金导线经济性更好，必将得到广泛应用。

耐热导线应用于增容工程中的不利因素是线损加大，但在接地极线路工程中线损不是问题，因为接地极线路的作用是将换流站的入地电流引至接地极，通过接地极将电流泄入大地，线路损耗不影响泄流效果。

特强钢芯高强耐热铝合金绞线（KTACSR/EST），在大跨越输电工程中的应用，实现导线输送容量增加的同时，具有高强度和耐热性能好的双重特性，对于降低工程投资很有成效。**EA**

（收稿日期：2016.05.03）
（编辑：刘群垚）

www.eage.com.cn