

# 青藏直流输电线路工程建设用可拆分式抱杆研制及材料的选用

郝玉靖, 缪谦, 江明, 梅文明

(中国电力科学研究院, 北京, 100192)

**摘要:**高海拔地区低温缺氧、自然条件恶劣, 建设施工难度大。为了解决高海拔地区输电线路施工难题, 研制了一种具有可拆分式标准节的施工抱杆。通过将标准节设计为多片组装式并选用合理的钢结构材料及钢铝组合比例等方法将抱杆本体单重降低, 以降低抱杆在人力搬运及组装的劳动强度, 也便于机械运输及机械装卸。首台研制的可拆分式抱杆样机经检测及试验后, 完成了青藏直流输电线路工程第十标段 453、421 号铁塔的组立施工。

**关键词:**青藏直流输电工程; 施工抱杆; 可拆分式标准节; 材料

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0068-04

## Development of the Holding Pole with Modular Mast Section and Derrick Material Selection in Qingzang Electric Transmission Engineering

Hao Yujing, Miao Qian, Jiang Ming, Mei Wenming

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Because of low temperature, deficient oxygen and bad nature condition, it is difficult to construction in high altitude. In order to solve the difficult of the electric transmission engineering construction, the holding pole with modular mast section was researched and manufactured. The mast section was designed to be multi-pieces assembly and select rational derrick material. It can minimize weight of singleton to decrease labor intensity in transported and reassembled. It is also helped to mechanical transport, loading and unloading. After detection and experiment, the first holding pole was used in the No. 453 and No. 421 steel tower construction in the Section 10 of the Qingzang electric transmission engineering construction.

**Key words:** Qingzang Transmission Project, construction holding pole, modular mast section, Derrick Materials

青藏直流输电线路工程, 东起青海格尔木换流站, 西至西藏拉萨换流站, 线路全长 1 038 km, 最高海拔 5 300 m, 平均海拔在 4 650 m 左右, 海拔 4 000 m 以上的地区有 900 km, 全线共计 2 361 基铁塔, 是世界上距离最长的高海拔直流输电线路。青藏高原低温缺氧, 全线平均海拔高, 自然条件非常恶劣, 建设施工难度极大。这给广大工程建设者、管理者们的身体健康带来了极大挑战, 造成广大工程建设者劳动能力、负载能力大幅下降。因此, 为了保障工程建设的顺利进行, 保障施工作业人员的身体健康和安全, 在施工中减轻施工设备及工器具的自重, 降低工程建设劳动强度是工程建设的关键。

抱杆是架空输电线路施工中一种通用的施工设备, 使用抱杆组立铁塔已形成成熟的施工工艺, 是青藏直流输电线路工程中必不可少的施工设备。

文章通过将标准节设计为多片组装式及选取适当的钢结构材料等方法将抱杆本体单重降低, 以降低抱杆在人力搬运及组装中的劳动强度, 也便于机械运输及机械装卸。

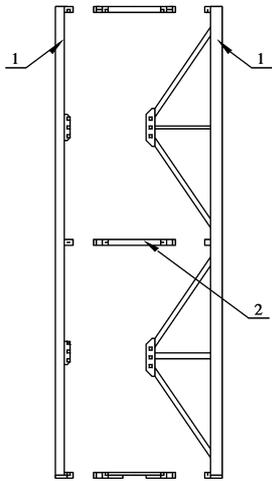
### 1 抱杆结构分析

国内输电线路施工抱杆均采用整体标准节, 按照常规地区条件下进行设计制作, 抱杆标准节一般单节长度为 3 m 左

右, 单节重量可达 120 kg 左右, 这已经对施工人员造成较大的劳动强度, 而且采用机械运输时占用空间大, 运输效率低。在青藏线路工程建设中, 施工人员作业能力大幅下降, 施工单位如果仍采用常规施工抱杆进行组塔, 施工人员很难甚至无法实现工程建设需要。只有大幅减少设备自重, 才能实现工程建设所需。

抱杆主要由结构、机构及附属件组成, 其自身重量主要集中在结构标准节自身。如果按照常规设计方法和思路, 在满足强度要求的条件下, 一般采用减少标准节长度的方法以减轻抱杆总重量, 但是在抱杆总长度不能更改的前提下, 仅仅减少标准节单节长度, 则导致抱杆标准节数量过多, 整体自重增加, 组装难度大, 组装质量很难控制, 直线度很难满足设计制造要求, 且连接螺栓较多, 不仅增加了成本和工作量, 也对施工造成了一定的安全质量隐患, 因此必须采用全新的结构形式抱杆。

在总结中国输电线路工程施工抱杆研制的基础上, 借鉴其他行业建筑机械相关技术, 并结合高海拔地区施工条件的现状, 通过对青藏直流线路铁塔结构尺寸特点的研究发现, 可采用将标准节拆分为标准节片的方式降低抱杆单件标准节的自重, 如图 1。拆分式标准节在运输过程中占用空间小, 运输和搬运方便。



1 代表标准节片 2 代表稳定框  
图 1 可拆分式标准节示意图

根据现场情况,选择线路中典型的 ZV83 直线塔进行研究。图 2 为青藏直流 ZV83 直线塔塔图,该塔型全高最高 59.5 m,最大根开 13.52 m,顶部最大宽度 35.2 m,最大自重 41 t,塔身段均可拆分单片安装。顶部横担 1 号段重量 0.66 t,2 号段重量 1.3 t,3 号段重量 2 t,在安装时均可整段安装。

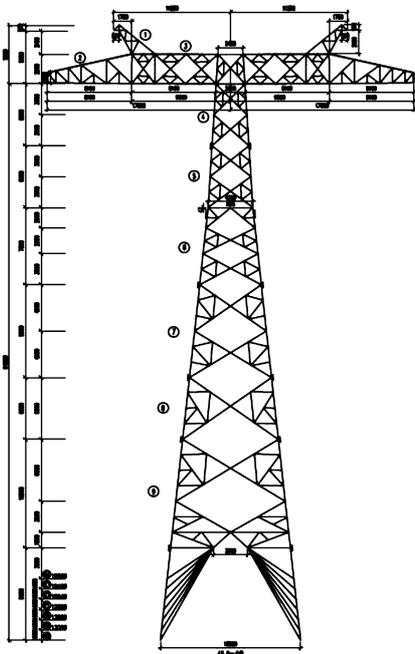


图 2 青藏直流铁塔图(ZV83 直线塔)

根据铁塔参数的研究结果,考虑组塔施工的需要,可初步确定抱杆的基本参数:抱杆标准节长度为 3 m/节,单件重量 25 kg 左右,便于加工及搬运,根据现场情况抱杆全长可组合为 22 m、18 m 等不同长度,以满足现场施工需要,图 3 为抱杆组立铁塔工况示意图。

采用了可拆分式标准节的抱杆,其拆分后标准节片的单件重量仅为整体式标准节的 1/4 左右,机械运输空间仅为整体式标准节的 30%。采用该形式既满足强度、稳定性和结构

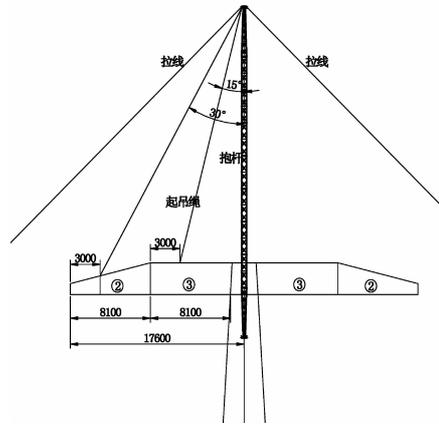


图 3 抱杆起吊横担工况示意图

需求,又大大减少抱杆运输和组立时的人工劳动强度,运输、使用方便,特别适用于山区、高原等交通不便及自然条件恶劣的特殊环境。

## 2 抱杆材料选取

青藏高原低温缺氧,全线路平均海拔高,自然条件非常恶劣,这对输电线路工程施工设备及工器具提出了更高要求。在青藏直流输电工程应用中,抱杆材料选用基本原则是能够满足低温缺氧的自然条件,并且最大减轻抱杆自重和单重。文章主要对常用的 Q235 和 Q345 以及 2A12 进行了研究,选择出相应的金属材料。

材料选取通常从材料的使用性能、工艺性能、经济性等方面考虑<sup>[1]</sup>,在满足性能要求的条件下,最大限度的发挥材料的潜力,做到物尽其用,在注重材料强度水平的前提下,需要兼顾材料的消耗和降低加工成本。

如图 4 所示,抱杆在应用过程中所受应力最大的点应在标准节中部轴心,两端受力较小,因此标准节主材选用强度高的钢材,上下端节采用密度小、比强度高铝合金 2A12。一般抱杆节在 3 m 左右,其重量为 60 kg 左右,为了尽量减少抱杆单件重量,采用 1 m 端节设计后,抱杆本体全部单件重量均能控制到 25 kg 左右。

目前抱杆标准节所用的材料主要有碳素结构钢 Q235 系列和低合金结构钢 Q345 系列。

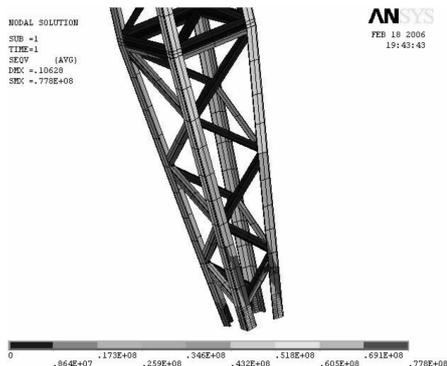


图 4 中间段应力图

Q235属于碳素结构钢<sup>[2]</sup>。碳素结构钢是指钢中不含其它任何有意添加合金元素,只含有铁、碳、硅、锰及杂质元素磷、硫,工艺简单,成本低,是钢铁中生产量最大、品种最多、用途最广的钢类,其性能主要取决于钢中的碳含量,分为A、B、C、D 4个质量等级。Q345属于低合金结构钢。低合金结构钢<sup>[3]</sup>是指在碳钢的基础上,加入少量合金元素,提高钢材的强度或改善其某方面的使用性能,而发展起来的工程结构用钢。低合金高强度结构钢在强度等级系列中分为A、B、C、D、E 5个质量等级。Q345钢中比普通碳钢中化学成分多了一定含量的Mn元素,具备低合金钢的良好力学性能,尤其是塑性、韧性;微观金相组织为铁素体F+珠光体P。Q235与Q345的化学成分如表1所示。

钢的化学成分对于钢的力学性能影响很大,与Q235相比,Q345中Mn的含量较高,Mn是能够与钢中的有害物质硫形成高熔点的MnS,并能够与钢中的FeO反应形成MnO进入炉渣,从而降低钢的脆性,提高钢的强度和硬度。质量等级A、B、C、D、E表示其中含有杂质元素(如P、S等元素)含量的多少,从A到E代表杂质含量越少,力学性能越高。

从表2可以得出,Q235抗拉强度为375~500 MPa,Q345抗拉强度为470~660 MPa。从化学成分和力学角度

分析,Q345的强度比Q235高。

对于标准节材料的选择,Q235和Q345从使用性能角度看,一般以强度控制的宜用Q345,以变形控制的宜用Q235。当结构截面需按强度控制且在有条件的情况下,宜采用Q345钢材。两种钢材在常温静载下的韧性相差不大,在低温时,Q345钢材的韧性要好。在动载下,随着加载速度的增加,脆性都随之增加,但Q235脆性增加更快。所以,在温度比较低、承受动载时,适合用Q345钢材。

从经济角度看,与Q235相比,Q345性价比较高,市场价格也略高。Q345比Q235屈服强度提高45%左右,理论上用Q345可节约用钢量15%~25%,故抱杆标准节主材采用Q345钢材,部分辅材可选用Q235钢材。

Q345分为A、B、C、D、E 5个质量等级,它们的化学成分略有差别,如表1。

Q345A: 含P、S量均 $\leq 0.045\%$ ; Q345B: 含P、S量均 $\leq 0.040\%$ ; Q345C: 含P、S量均 $\leq 0.035\%$ ; Q345D: 含P、S量均 $\leq 0.030\%$ ; Q345E: 含P、S量均 $\leq 0.025\%$ 。

而P、S杂质元素在钢中的含量越多,其冲击韧性就越差,P、S杂质元素含量的减少,可促使低温下的冲击韧性得到提高,在不同的冲击温度下,所得冲击值不同,如表2。

表1 Q235和Q345的化学成分比较

钢号	等级	化学成分/%								
		C	Mn	Si $\leq$	P $\leq$	S $\leq$	V	Nb	Ti	Al $\geq$
Q235	A	0.14~0.22	0.30~0.65	0.30	0.045	0.050	—	—	—	—
	B	0.12~0.20	0.30~0.70	0.30	0.045	0.045	—	—	—	—
	C	$\leq 0.18$	0.35~0.80	0.30	0.040	0.040	—	—	—	—
	D	$\leq 0.17$	0.35~0.80	0.30	0.035	0.035	—	—	—	—
Q245	A	$\leq 0.20$	1.00~1.60	0.55	0.045	0.045	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—
	B	$\leq 0.20$	1.00~1.60	0.55	0.040	0.040	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—
	C	$\leq 0.20$	1.00~1.60	0.55	0.035	0.035	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015
	D	$\leq 0.18$	1.00~1.60	0.55	0.030	0.030	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015
	E	$\leq 0.18$	1.00~1.60	0.55	0.025	0.025	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015

表2 Q235和Q345的力学性能

钢号	质量等级	抗拉强度/MPa	冲击吸收功 $A_{KV}$ (径向)/J			
			20 °C	0 °C	-20 °C	-40 °C
Q235	A	375~500				
	B	375~500	27			
	C	375~500		27		
	D	375~500			27	
Q345	A	490~675				
	B	490~675	34			
	C	490~675		34		
	D	490~675			34	
	E	490~675				27

因 Q345 钢材为结构用钢,在青藏联网电力输电铁塔及相关施工机械设备中常处于低温状态,因此在低温条件下仍然要达到一定的力学性能要求,如冲击韧性。在低温下,随着温度的降低,钢材因杂质元素等作用,淬硬性、脆性增强,而韧性和塑性会呈降低的特点。由上述可知,由于 P、S 元素的影响,Q345A 不适合用低温状态,B、C、D、E 牌号依次更适合用低温状态,并能提供安全的力学性能和稳定的化学性能。从材料的经济性能考虑,Q345D 和 Q345E 成本较高,综合考虑也很少使用。应用最广泛的是 Q345 B 和 Q345 C,由表 1 可知它们的化学成分仅在磷、硫两项化学成分指标上有微小差别,最重要的区别在于要求的冲击韧性试验温度<sup>[4]</sup>。因此,建议采用 C 级钢。

### 3 抱杆试验

根据电力行业标准《架空输电线路施工抱杆通用技术条件及试验方法》的试验要求,抱杆采取落地加载方式。加载时,采取拉力表与手扳葫芦串联,以记录拉力数值,图 5 为测试拉力表照片。

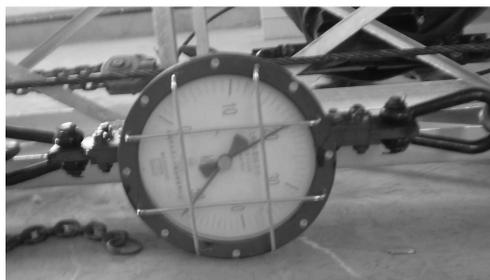


图 5 测试拉力表照片

按照标准的试验要求,载荷试验测试中的最大应力压应力(无论钢和铝)均小于材料的许用应力,强度和稳定性安全系数均大于 2.5,使用安全。图 6 为抱杆测试应力图。

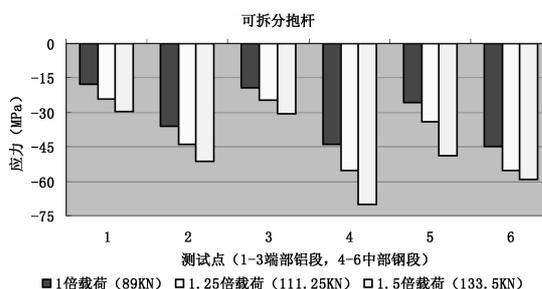


图 6 抱杆测试应力图

### 4 结论

通过对抱杆结构的分析以及几种常用的金属材料的结构性能分析,研制了适合青藏高原低温恶劣环境的可拆分式抱杆,并在国家电网公司《可拆分式抱杆的研制及在青藏直流输电线路工程中的应用》项目中得以实际应用。首台研制的可拆分式抱杆样机经检测及试验后,完成了青藏直流输电线路工程第 10 标段 453、421 号铁塔的组立施工。工程应用表明:可拆分式抱杆特别适用于高海拔等自然条件恶劣地区铁塔组立施工,能够有效减轻施工人员劳动强度,提高施工安全性。

#### 参考文献:

- [1] SD 165—87 电力建设施工机具设计基本要求[S]. 北京:中国水利电力出版社,1987.
- [2] 方昆凡,黄英. 机械工程材料实用手册[M]. 沈阳:东北大学出版社,1995. 7.
- [3] 干勇,等. 中国材料工程大典[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [4] GB/T 1591—94 低合金高强度结构钢国家标准[S]. 北京:中国标准出版社,1994.

(编辑 梁远华)

(上接第 48 页)

#### 参考文献:

- [1] 黄本才. 高层建筑结构计算与设计[M]. 上海:同济统计大学出版社,1997.
- [2] 李正良. 复杂体型筒体结构考虑剪力滞后效应的简化分析[D], 重庆:重庆建筑大学,1987.
- [3] 高雁. 筒体结构剪力滞后效应研究及其简化分析[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- [4] 张文福,姚芳. 三角形高层框筒结构在水平荷载作用下剪力滞后

的有限元分析[J]. 四川建筑科学研究, 2005,31(1):45-47.

- [5] 方鄂华. 多层及高层建筑结构设计[M]. 北京:地震出版社, 1994.
- [6] 梁启智,陈加猛. 高层筒中筒结构的整体稳定分析[J], 华南理工大学学报:自然科学版,1998,26(1):76-84.

(编辑 胡英奎)