

轮轨高速电气化铁路接触网用接触线的研究

黄 崇 祺

(上海电缆研究所, 上海 200093)

摘 要: 根据轮轨高速电气化铁路接触网用接触线的要求, 结合我国目前接触线的生产现状, 研讨了接触线研究、开发的可能性, 在综合分析抗拉强度与导电率的矛盾, 接触线的允许最高强度、最大截面、耐磨性及抗疲劳性等技术特性, 国产化的可能性和现实性后, 指出应研究开发镁铜合金、锡铜合金和铜包钢接触线。另外, 对现有的银铜类合金接触线应改善它的平直度, 以降低离线率, 使质量达到国外同类先进产品的水平。并建议及时组织机械和铁道系统的设计、制造单位的专家进行技术论证和工作协调, 做好高速接触网用接触线研究开发的前期工作, 为国产化统一和明确方向, 以赶上京—沪轮轨高速电气化铁路对国产接触线的需要, 加速高速、准高速接触网用接触线国产化的进程。

关键词: 轮轨高速; 电气化铁路; 接触网; 接触线; 研制; 国产化

中图分类号: U225.41 **文献标识码:** A

1 前 言

中国经济发展的地区趋向是北上西移, 高速铁路将起到很大的作用。铁路的发展史, 实际上也是速度的发展史, 铁路要发展必须向高速发展。目前, 全世界的铁路约有 160 万 km, 但已开通的高速铁路也只有 4 000 多公里, 高速铁路正处于发展时期。

发展高速铁路, 可与轮轨高速电气化列车相竞争的是高速磁悬浮列车, 但在 10 年内无论是常导、低温超导或高温超导的高速磁悬浮列车, 除短程或观光线外都不会在中国商业化。德国虽有建高速磁悬浮线路的计划, 但一直没有启动, 日本有高速磁悬浮线路的试验段, 但是否新建尚待试验完成后再次评估。目前我国的广深线, 租赁瑞典的摆式列车, 最高时速 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (属准高速), 接触网用的是德国产 120 mm^2 银铜接触线。磁悬浮列车尚在试验阶段, 轮轨高速电气化铁路还未启动, 但前期工作已在进行。在京沪这条黄金通道上建轮轨高速电气化铁路(全长 1 300 km)既需要又迫切, 它将是高速铁路零的突破和示范工程, 它与三峡工程、南水北调工程列为我国 3 个跨世纪工程项目, 耗资将达 1 000 亿元人民币。

随着电气化列车向高速、重载的发展, 对接触

线的材质及其品种提出了更高的要求, 也推动了接触线的发展。目前高速电气化铁路, 在我国建设在即, 准高速电气化铁路也将会有较大发展, 显然接触线有着较大的国内外市场, 因此我国的接触线如何开发、选型和国产化, 受到了使用、设计、研究和生产单位的密切关注。中国是一个大国, 高速和准高速电气化铁路用的接触线, 不能长期、大量的仰仗进口, 必须尽快地、在高质量的基础上进行国产化, 而且还应出口。

京沪高速铁路初定的速度目标值为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 近期按 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 实施行车, 预留 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件。这个速度也是国际高速电气化铁路的发展趋向。电气化铁路接触网用的线主要有接触线、载流承力索、不载流承力索和吊弦(线)等几种。本文仅对接触线进行研讨, 另外的接触网用线再另行讨论。

2 接触网用接触线的发展

为实现电气化列车的高速化, 必须在受电弓沿接触线高速滑行的过程中达到稳定的受流状态。根据国外高速电气化列车实际的运行经验, 当列车的运行速度在波动传播速度的 70% 以下时, 可以达到稳定的受流状态。电力机车受电弓沿接触线高速滑动时, 引起接触线上、下振动的横波, 其波动传

播速度 v_c 与接触线的架线张力和线密度(单位长度的重量)有关, 即:

$$v_c = 3.6 \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

式中, v_c ——接触线的波动传播速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$;
 T ——接触线的架线张力 / N ;
 ρ ——接触线的线密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

因此随着列车运行速度的提高, 接触线的架线张力必须增加或者降低线密度。接触线允许使用的架线张力与接触线的拉断力(抗拉强度 \times 面积)有关, 籍增加接触线的面积以增加拉断力, 并不能降低 β 值(行车速度与波动传播速度之比), 如表 1 所示。再考虑接触线允许的磨损和安全系数等因素, 实质是必须提高接触线的抗拉强度。线密度与接触线的比重和面积有关。同种材质, 面积增加, 线密度也增加, 铜、钢和铝的比重分别为 $8.89 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $7.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 因此, 籍不同材质或调节不同材质的面积比构成复合型接触线有望提高抗拉强度或降低线密度。

由于列车速度的提高, 尤其在受电弓通过定位点、分相、接头及接触线高度变化处时, 易形成离线

而产生电弧, 使接触线温度升高、机械强度下降、电烧蚀损耗和机械磨损增加, 因而要求提高接触线的耐高温性能、耐磨性能和平直度。

电气化列车要具有高速和重载的能力, 接触线必须提高载流能力。接触线的载流量与线的导电率、截面积、环境条件和最高工作温度有关。它也直接影响接触网在长期使用条件下接触线的抗拉强度, 疲劳性能和蠕变性能。提高接触线的导电率和增加截面可增加载流量, 但对金属而言, 铜、铜合金、铝和钢的导电率是依次下降的, 而且往往导电率和抗拉强度是相互矛盾的, 只有复合金属接触线可调整两种金属的面积比, 并在一定范围内可调节它的强度和导电率。接触线截面的增加, 也增加了整个接触网的重量, 因此在接触网的设计中从机械和电气角度出发, 还存在着“最佳接触线截面”的选择问题, 一旦“最佳截面”选定后, 不管是否符合现行接触线标准中的截面等级规范, 但从制造上看是不会有太大问题的。

综上所述, 根据高速电气化列车对接触线的要求, 如表 1 所示, 各国的高速电气化铁路尚处于发展时期, 高速接触网用接触线的材质及其品种繁多,

表 1 高速电气化铁路接触网用接触线的性能、设计参数和可能的选择

速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	国别	接触线类型 及 截 面 / mm^2	接触线性能						设计参数			
			温度不大于 100℃的 抗拉强度 / $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	拉断力 / kN	高温抗拉强度/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$		导电率(%) IACS	150℃载流 量/A	线密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	接触线 架线张力 / kN	波动传 播速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	$\beta = \frac{\text{行车速度}}{\text{波动传播速度}}$
					150℃ 软化后	300℃ 软化后						
240	日	铜/170	340	57.82	332.4	212.9	97.0	/	1.51	14.7	355	0.676
300	法	铜/150	358	53.7	350	224.2	97.0	/	1.33	20	441	0.68
250	德	银铜/120	395	47.4	395	377	96.5	700	1.07	15	426	0.587
140	京郑线 (中)	银铜/120 (CTHA)	365	43.8	365	348.2	96.6	700	1.073	15	359	0.39
180~200	环行线 (中)	锡银铜/120 (CTHB)	367.5	44.1	367.5	351.0	90.0	680	1.073	15	359	0.56
/	中	锡银铜/120 (CTHC)	375.8	45.1	354.6	338.3	85.0	670	1.082	/	/	/
/	中	锡铜/120 (CTHC)	360.8	43.3	340.7	325.0	70	620	1.082	/	/	/
350	法	锡铜/120	537.5	64.5	407.1	483.8	77.6	/	1.07	24	539	0.65
270	法	镉铜/120	/	/	/	/	/	/	1.07	14	412	0.655
/	日	铬锆铜/110 (PHC)	555.5	61.1	/	/	78.8	/	0.98	/	/	/
330	德	镁铜/120	503	60.4	503	465	68.1	/	1.08	27	569	0.58
目前小于 100	中	钢铝/250 (CGLN)	216	54	/	203.2	46.3	/	0.994	20	511	0.20
370/340	日	钢铝/196 (TA)	350	68.6	/	/	46.5	/	0.758	15/20	496/573	0.75/0.59
300	日	钢铜/110 (GT-CS)	655	73.2	655	608	60.2	/	0.942	20	525	0.57
300	日	钢铜/110 (GT-CSD)	493	54.3	450	373	81.1	/	0.957	20	520	0.577

注: GT-CS 铜: 61.6 mm^2 ; 钢: 50.0 mm^2 ; GT-CSD 铜: 85.9 mm^2 ; 钢: 24.3 mm^2 ; 合计: 110.1 mm^2 。
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

也同样处于发展的试验和试用阶段，但接触线向铜合金化和复合金属化发展已成为世界接触线发展的总趋向。综观对它们评价的主要指标体现在：常温抗拉强度、比强（抗拉强度与线密度之比）、高温抗拉强度、导电率、线密度、载流量和行车速度与波动传播速度之比（ β ）。

3 接触网用接触线的选型与国产化

3.1 对京沪轮轨高速电气化铁路接触网用接触线可行性研究倾向性意见的研讨

在京沪轮轨高速电气化铁路的可行性研究^[1]中，对接触网用接触线已初步提出的倾向性意见（见表 2）是值得研讨的，因为它将直接关系到高速接触网设计的质量，接触线研究开发、国产化的方向以及制造厂的投入和经济效益。

根据表 2 的要求，对照表 1 和国内接触线生产的现状，无疑这个要求是相当高的，它可作为我国接触线研究开发和生产的参考和努力方向。但面对这些具体要求，从接触线选型和国产化角度出发必须首先探讨它的技术可能性。

（1）抗拉强度和导电率往往是矛盾的，强度越高，导电率越低，接触线也越硬，给制造和架线带来较多的不适应性。抗拉强度要在 $600\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 以上，导电率又要在 80%IACS 以上，如表 1 所示，目前现有的银铜、锡铜、镁铜、铬锆铜、铝包钢和铜包钢接触线均达不到上述要求，看来需进一步研讨可行的指标。

的。甚至当接触网在晚上看起来像一条“火龙”那样运行时，这些要求就更值得进一步研讨了。

（3）按要求的线密度 1.1~1.2 推算，对铜及铜合金接触线而言，其最大截面可达 135mm^2 ，对铝包钢、铜包钢接触线截面还可放得更大。如果放大后的截面在接触网设计中认为是有技术经济效果的话，那么，从制造厂而言也是可行的。

（4）一般而言，材质抗拉强度（高温抗拉强度）高而不脆，其耐磨性能和疲劳性能也高。如上所列，各种铜合金和复合金属接触线，其耐磨性能应不低于铜接触线。

接触线耐腐蚀性能的好坏，与架线的环境条件密切相关。一般而言，纯金属的耐腐蚀性能要比合金和复合金属为好，而且复合金属还存在着两种不同金属相接触的电化腐蚀问题，因此，在接触网设计中应根据不同的综合条件，选用合适的接触线，对特殊的环境，如我国大西南地区在隧道中架设的接触线等应作特殊的选线处理。

3.2 高速、准高速接触网用接触线选型和国产化的研讨

随着电气化列车速度的提高，在设计开发高速接触网的同时，在铜合金和复合金属型接触线中不断研究开发了新的接触线，但对高速接触网用的接触线而言国外也尚处于试验和试用的阶段，只是比我国先走了一步。我国应根据国外和自己的实践经验，以高速接触线的基本要求和以京沪高速铁路为目标，结合我国接触线制造厂的可能条件进行研究和生产。中国地域广阔、地理和气候条件不一，看来只开发一种高速和准高速用的接触线以覆盖全国是不太现实的，但开发太多，也可能会影响投资效益。

3.2.1 铜合金型接触线

（1）银铜合金类接触线。包括银铜和锡银铜。银铜材质的梯形铜排，电缆行业早有生产的经验。我国现已生产和标准化（铁道系统行业标准）的银铜和锡银铜接触线，按其性能已和德国产银铜接触线相当，但在接触线的平直度上尚需稍作改进提高，以降低受电弓和接触线的离线率。这类线，根据德国在 Re—250 型接触网中使用时速可达 250 km。

（2）锡铜合金接触线。日本早先在电气化铁路上也采用银铜接触线，后来采用含 0.3%左右锡的锡铜接触线。我国已列入行业标准的锡铜接触线，抗拉强度接近银铜接触线，但导电率稍低（70% IACS），根据工程中接触网设计的具体要求，也许

表 2 对京沪高速接触线要求的初步倾向性意见^[1]

要求项目	要求参数	备注
1 架线张力/kN	25~30	设计计算假设条件;
2 线密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	1.1~1.2	(1) 安全系数, 2.2;
3 常温抗拉强度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	600~700	(2) 张力差, 10%;
4 拉断力/kN	70~85	(3) 张截面, 120 mm ² 。
5 导电率/(%) IACS	80~95	
6 高温抗拉强度下降率/(%)	10~0	
7 耐磨和耐腐蚀性	与铜接触线相当	

（2）接触线的允许最高工作温度，在高速接触网设计中有着重要的作用，但在要求中没有明确的指标，它直接关系到线的载流量、截面、经济电流密度、高温抗拉强度、耐磨性、蠕变性能和耐疲劳性能。如果允许最高工作温度以 300℃衡量，那么高温抗拉强度下降率，低于 10%也是需要努力

可用于时速在 200 km 以下的接触网中。现在法国在时速为 300 km ~ 350 km 的接触网中研制和试用的锡铜—120 接触线, 常温抗拉强度和导电率分别可达 $537.5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 77.6% IACS, 如果文献 [1] 的数据来源属实, 那对锡铜接触线是一个新的发展。对照我国目前的锡铜—120 接触线, 其抗拉强度和导电率分别为 $360.8 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 70% IACS, 从材质提高的可能性上看, 要达到法国的水平, 既要大幅度提高强度, 又要保持、甚至提高导电率, 恐怕要添加第二, 甚至第三元素才行, 这需要我们进一步的研究开发。

(3) 铬锆铜合金接触线。日本开发的 PHC—110 接触线, 抗拉强度和导电率分别可达 $555.5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 78.8% IACS, 其线密度为 0.98, 也比较低, 但这种合金析出强化型的材质, 在生产中必须进行热处理才行。将铬锆铜合金做成部件, 在国内外的合金厂中有生产和应用, 但在我国电线电缆厂中要做成大长度的接触线, 实现大规模的生产, 还缺少此类大型的热处理和熔炼设备, 热、冷加工工艺, 特别是大规模连续生产的热加工工艺尚需摸索。

(4) 镉铜合金接触线。镉铜有比较高的抗拉强度和导电率, 但在生产中因镉有毒, 危害人体, 因此在环保和劳保还没有妥善解决的条件下, 是难于实现大规模生产的。

(5) 镁铜合金接触线。目前的抗拉强度和导电率可分别达到 $503 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 68.1% IACS。如果还要进一步提高强度, 保持或提高导电率, 看来还需添加第二甚至第三元素才行。另外, 镁在制作镁铜合金的大规模生产中是难于连续稳定控制的元素, 这些都需我们去研究和开发。德国在开发时速达 330 km 的 Re—330 型接触网中研制的镁铜—120 接触线已进入试运行阶段, 并取得了预期的效果。

3.2.2 复合金属接触线

(1) 铝包钢接触线。我国通过改型生产的 CGLN—250 铝包钢接触线有较多的生产和使用经验。继中国之后日本也研制和试用了 TA—196 铝包钢接触线。根据高速接触网用接触线的要求, 这两种铝包钢接触线, 抗拉强度和导电率都较低(表 1), 分别达到 $216 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 、 $350 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 46.3% IACS、46.5% IACS, 但它们的拉断力不

低, 分别为 54 kN 和 68.6 kN, 而且线密度也比较低。从表 1 可以看出, 日本的 TA—196 和我国的 CGLN—250 相比, 两者导电率相当, 但前者抗拉强度和拉断力都比较高, 线密度也更低, 显然在 TA—196 中组成材料之一的钢, 其抗拉强度有了改进提高。因此, 铝包钢接触线在准高速、高速接触网中的应用前景, 似乎应在保持或稍加提高接触线拉断力的条件下, 尽量提高导电率。从导电率着眼, 铜总比铝好, 它们分别为 97% IACS 和 61% IACS, 所以在控制同样拉断力的条件下, 铜包钢接触线要比铝包钢接触线的导电率容易提高, 而且可以高得多。

(2) 铜包钢接触线。GT—CS—110 和 GT—CSD—110 铜包钢接触线是由日本采用浸涂法研究开发的新产品, 拟在时速 300 km 的高速接触网中使用, 目前已进入试运行阶段, 并达到了预期的效果。这两种接触线通过调整铜、钢面积之比, 以获得不同的强度和导电率供工程设计选择和试用。前者的抗拉强度和导电率分别为 $655 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 60.2% IACS, 后者则分别为 $493 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 81.1% IACS。用浸涂法制造无氧铜杆, 我国有引进设备和正常的生产规范, 如果生产允许和投资效果明显, 扩大研究开发铜包钢接触线是有基础的, 至于用浸涂法制造铜包钢杆和线, 我国也有一定的实践, 问题是尚需针对铜包钢接触线进行设备改造、工艺改进和产品开发。

4 结 论

(1) 高速、准高速接触网用接触线, 从技术、国产化的可能性和现实性分析应研究开发镁铜合金、锡铜合金和铜包钢接触线。

(2) 应及时组织机械和铁道系统的研究、设计和制造单位的专家进行技术论证和工作协调, 做好高速接触网用接触线研究开发的前期工作, 为国产化统一和明确方向, 以赶上京沪轮轨高速电气化铁路对国产接触线的需要。

(3) 对现有的银铜类合金接触线应改善它的平直度, 降低离线率, 使质量达到国外同类先进产品的水平。

参 考 文 献

1 刘宝钺. 高速铁路牵引供电技术研究——高速接触网接触线的选择. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
2 张 强. 中、高速电气化铁路接触线的选择. 铁道机车车辆, 1997, (4).
3 张 强. 我国高速电气化铁路接触线与承力索的研制. 电气化铁道, 1997, (2): 9 ~ 14.
4 小比田正. 高速列车对应架线材料设备的现状(日). 铁道与电气技术, 1997, 8(4): 32 ~ 35.
5 吴成三, 门汉文. 德国接触网发展现状. 电气化铁道, 1997, (2): 19 ~ 26.
6 赵永清摘译. 日本高速铁路摘要. 电气化工程局电气化勘测设计研究院, 1995.
7 中华人民共和国技术监督局. 钢、铝复合接触线. GB12971. 3—91.
8 中华人民共和国铁道部. 铜合金接触线. TB/ T 2821—1997.

On Contact Wire Line Used in Catenary of
High Speed Wheel-Rail Electrified Railway

HUANG Chong-qi

(Shanghai Cable Institute, Shanghai 200093 China)

Abstract: According to the requirement of contact wire line used in catenary of high-speed wheel-rail electrified railway, and considering the present domestic product of contact wires, discusses the possibility of developing the contact wires. After analyzed the contradiction between tensile strength and conductivity, the permitted maximum tension, maximum section, wearability, fatigue resistance and the possibility and reality of localization are given. The paper points out the Ma-Co, St-Co alloy and coppering steel contact wires must be developed. It must improve the regularity of the present cupreous alloys in order to reduce the rate of contact loss and make its quality reaches up to the level of excellent overseas congeneric product. At the same time, it's advised to organize experts from units of researching, designing, manufacturing mechanics and railway system to carry through technology testification and work coordination, and do a good job in the earlier stage of the research on contact wires of high speed electrified railway. To make the localization fully understood and meet the need of localization contact wire line for Jing-Hu wheel-rail high speed electrified railway. To accelerate the localization process of contact wire line used in the catenary of high-speed and semi-high speed electrified railway.

Keywords: High-speed wheel-rail; Electrified railway; Catenary; Contact wire line; Research and development; Localization

(责任编辑 杨宁清)