

Abstract

Electric contact theory is the subject that researches physical-chemical process on boundaries between conductors and conductors or conductors and ions, during which the electric contacts occur, maintain and eliminate. The study of this thesis is on the pantograph slider of locomotive, which is a typical example of the sliding electric contact theory.

Based on the analysis of the regulations of the interactions between current-receiving bow and contact-net wires, and combined with demonstrations and economical cost, a new type of dual-lubricating copper base powder metallurgic slider is designed in this thesis. The alloying elements such as tin, graphite and lead etc. are added into the interior of copper base powder metallurgic slider, in which graphite and lead have the self-lubricating function, furthermore, aluminum sheath dual-lubricating structure that can improve further the effect of lubrication by combing high-strength graphite lubricating materials with the whole of metallurgic slider is adopted outside of the copper base power metallurgic slider. The designs of the new slider mainly include: structure of the slider, manufacturing method, ingredients, hardness of the slider, lubricating pieces, and sizes of the slider etc. In the end, the functions of the dual-lubricating copper base powder metallurgy slider are tested and the results prove that the design aims can be reached.

Keywords: pantograph slider, wear, contact pressure, powder metallurgy, dual lubrication

(Supported by Shenhua Group Zhungeer Energy Company Limited,
Supported by Liaoning Technical University)

创新点声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果：设计并研制了一种新型双润滑铜基粉末冶金滑板，为了使滑板耐磨、耐热、耐蚀而又能减磨，在滑板成分中按优化比例加入了铅、锡、石墨等材料；为了加强对滑板的外部润滑，减少滑板与导线的磨损，在结构上创造性地采用了双侧润滑；此外，该滑板在润滑块、外壳、整体配合、滑板尺寸等方面都进行了优化设计。

尽我所知，到目前国内外文献未见报道。

作者：董鹏

日期：2006年1月8日

1 绪论

电接触技术在电力系统、自动控制系统和信息传递系统等领域的应用日益广泛。由于使用场合和条件的不同，对电接触的要求存在较大差异。因此，电接触现象是一纷繁复杂的物理化学过程。电接触理论是研究电接触产生、维持和消除过程当中，两导体接触界面或导体与等离子体界面受机械、环境、气体放电作用所发生的各种现象的专门学科。

1.1 电接触与电接触材料概论

1.1.1 电接触的概念及电接触学科的发展

1.1.1.1 电接触的概念

电接触是指两个导体之间相互接触并通过接触面实现电流传递或信号传输的一种物理、化学现象。如果电接触是靠两个导体固定接触而维持，称之为固定电接触；如果电接触靠两个导体滑动接触而维持，称为滑动电接触；如果电接触的产生和消除导致两导体所处电路电流的接通和分断，则称为可分离电接触^[1]。

传递电流或输送信号的两导体称为触点或触头，根据一定的电流方向，也可称为阳极和阴极。在电力系统、自动控制系统和信息传递系统中，电接触现象随处可见。大量使用的各类开关电器中的触头直接执行接通和切断各种电路并承载正常工作电流的职能，属于典型的可分离电接触；各种电连接器及母线的连接等属于固定电接触；集电环、电刷、电力机车的受电弓与馈电线等属于滑动电接触。固定电接触和滑动电接触只有电接触的维持过程，而可分离电接触还有电接触的产生和消除过程（伴随电路的接通和分断过程）。电接触的产生、维持和消除过程是一纷繁的物理、化学过程，在两导体的接触界面或导体与等离子体界面发生的过程是电、磁、热、力及材料冶金效应相互作用的综合结果。

电接触理论正是研究电接触产生、维持和消除过程当中，两导体接触界面或导体与等离子体界面发生的物理化学过程的学科。这一学科涉及电弧物理、电磁场理论、计算机仿真、微观测试技术、电磁机构、电工材料与制造等等。其研究的最终目的是在满足一定的经济效益的前提，提高电接触的工作可靠性和工作寿命^[1]。

固定电接触在工作中出现的主要现象和问题是：接触电阻、接触温升和熔焊；滑动电接触除上述问题外，还有接触元件之间的摩擦、润滑和磨损；可分离电接触在工作期间常出现电弧，电弧与接触元件相互作用，会带来很多复杂的问题。因此，在三类形式的电接触中，接触电阻、温升和熔焊是电接触普遍存在的共同问题，摩擦、润滑和磨损是滑动电接触的特殊问题，电弧放电引起的温升、熔焊和侵蚀在可分离电接触中是最重要的问题。在本论文中所研究的电力机车受电弓滑板的工作是滑动电接触的典型例子。

1.1.1.2 电接触学科的形成与发展

电接触现象的研究已经有一百多年的历史。1958年，电接触学科的奠基人R·Holm出版著作——电接触手册，标志着电接触作为一门独立的学科已形成。50年代在美国成立Holm电接触年会，80年代由IEEE第一技术委员会TC-1管理，现已历49届，64年开始成立国际电接触委员会负责每两年一次的国际电接触会议(ICEC)，现历20届。日本原由东北大学倡导后由真野国夫教授领导的日本机电元件研究会每月召开一次学术会议，到现在已500多次。电接触科学尽管是一门交叉学科但却是一门独立学科。它有独立的理论和特殊的研究方法，有独自的工业和研究、教育体系，以及独立的学术组织。电接触科学是随电子学的发展而发展的，它一直是IEEE学会中最活跃的分支学科之一。此外，其它许多国际性学术会议也都涉及到电接触问题，如每两年在世界各地轮流举行的国际气体放电会议(International Conference on Gas Discharge)，每两年在世界各地轮流举行的国际游离化气体会议(International Conference on Phenomena in Ionized Gases)，每四年固定在波兰召开的开关电弧国际会议(International Conference on Switching Arcs)，及于美国召开的继电器年会(Annual National Relay Conference)等等。

我国从50年代起，已开始电接触方面的研究工作。1979年5月，在西安交通大学王其平教授和华中理工大学程礼椿教授倡议下，正式成立了全国电接触及电弧研究会，并定期举行学术交流。此外，西安交通大学已举办了三届国际电接触、电弧、电器及其应用国际学术会议，北京邮电大学也举办过电接触方面的国际会议。从1981年开始，在重要的国际电接触会议上，均有我国电接触方面的论文宣读或发表。1988年，华中理工大学程礼椿教授出版了中国第一部关于电

接触理论及应用方面的著作。

随着研究工作的不断深入，电接触学科也有了很大发展。首先从研究的角度来看，六十年代以前，主要从宏观上研究电路参数和弧隙参数对触头材料电弧侵蚀的影响，而现在是从微观上研究触头材料本身的组织结构特性与电弧的相互作用关系且取得了大量的研究成果。西安交通大学王其平教授和荣命哲博士近年来提出从表面动力学特性入手研究触头材料电弧侵蚀并揭示了二者之间的一般关系，为触头材料电弧侵蚀的研究提供了一条新的思路。华中理工大学程礼椿，大连理工大学邹积岩，福州大学张冠生，河北工业大学陆俭国，北京邮电大学章继高等教授在电接触理论和应用方面都做出了显著贡献。从研究的内容来看，已涉及电接触材料、电弧、环境、触点表面镀层、润滑剂、电接触可靠性、电连接器等众多研究领域且已取得了丰硕的研究成果。

1.1.2 电接触材料简介

1.1.2.1 电接触材料的分类

制作相互接触传导电流(电信号、电能)元件的材料称为电接触材料。电接触发生在材料接触表面的过渡区中，承受机械、电、热和环境气氛等作用的物理化学过程。

电接触材料的种类很多，常用的有纯金属、合金、碳素等，如表 1-1 所示^[2]。

表 1-1 常用电触头材料分类表

	类别	材料品种
强电用	复合触头材料	银一氧化镉、银一钨、铜一钨、银一铁、银一镍、铜一石墨、银一碳化钨
	真空开关触头材料	铜铋铈、铜铋银、铜碲硒、钨一铜铋、铜铁镍钴铋
弱电用	铂族合金	铂铱、钯银、钯铜、钯铱
	金基合金	金镍、金银、金锆
	银及其合金	银、银铜
	钨及其合金	钨、钨钼

1.1.2.2 电接触材料的制造方法

触头材料的制造方法将直接影响其电接触性能。电接触材料的制造方法主要有如下几种：

1、熔炼法

普通的电触头材料(例如Ag、AgPd合金、AgCd合金、Cu等)采用熔炼法制造。熔炼是金属和合金触头材料制造的首道工序,如首道工序处理不当,即使在以后的铸造和加工上狠下功夫,也不可能提高材质。为此,熔炼是触头材料制造过程中的最重要的环节之一。

2、粉末冶金(烧结)法

所谓粉末冶金法,简单地说,就是在制造过程中不用熔炼、铸造工艺而得到所要求的最终形状。为达到这种目的,粉末冶金法适用于如下情况:(1)组成材料之间互不相溶;(2)组成材料的沸点、熔点和比重等物理性质差别较大;(3)用熔炼、铸造方法不能得到所要求的特性;(4)供应的原料呈粉末状;(5)形状复杂者采用粉末冶金法比熔化铸造法成本低。采用粉末冶金法能将不互溶的两种金属或金属与金属化合物或金属与非金属制成复合物,而且复合物内各组份可按任意比例组合,这是熔炼法办不到的。

3、内氧化法

所谓内氧化法,即金属氧化物是通过一种或多种合金组份在均匀的熔融合金内部进行选择性氧化。这种合金由一种基体金属(例如银)和几种添加金属(例如镉)组成,添加金属含量大大低于基体金属含量。这是制造银—金属氧化物电触头最常用的方法。内氧化法通常分双面内氧化法和单面内氧化法。

4、电镀法

多数电触头使用贵金属材料的主要原因,是由于贵金属的化学稳定性远比其它金属优越。但是,贵金属存在材料价格高昂和机构强度低等缺点,因此,在一些场合,利用电镀技术将贵金属复合在其它金属表面上,既能获得相互补充的综合性能,还可降低费用。

1.1.2.3 电接触材料的基本要求

电接触材料的基本要求为:良好的导电导热性;低的接触电阻和温升;抗熔焊和抗环境介质污染等。

如前所述,电接触形式多样,过程复杂,材料种类繁多。电接触材料工作过程中经受电弧、电场、磁场、力、热及气氛等的共同作用,实现传导电流的使用性能。广义而言,材料研究的内容是材料成分、结构、工艺与性能之间的关系,电接触材料也不例外。但是电接触材料是一种特殊的功能材料,特殊之处在于其使用

状态。两个导电组件带电接触实现电流导通,是一个动态过程,即由分断到闭合导通或由闭合导通到分断。根据这一过程中电流有无及大小不同,动态过程产生电弧,电弧与电接触材料的相互作用决定了电接触材料大多数场合为烧损材料,烧损过程发生复杂的冶金、物理及化学反应。静态即闭合导通时两导电组件的表面结合状态决定了组件间接触电阻的大小,其数值对电接触组件的功能实现及其它使用性能起着关键作用^[3]。

1.1.2.4 电接触材料的发展趋势

随着电器工业的发展,强电触头材料在电器开关中地位非常重要,有向高电压、大电流方向发展的趋势,研究重点是它的抗熔焊性、耐损蚀性、接触电阻的稳定性及采用的制备技术、添加元素及粉末原材料对触头性能的影响等。中等电负荷的触头有向小型化发展的趋势,在材质方面,仍以银基合金及银金属氧化物为主。对于弱电触头材料,也有向小型化、高寿命和高灵敏度方向发展的趋势,为节约贵金属,将大量利用多种复层技术、挤压成型技术,以提高材料的利用率。材料的多层技术和复合材料将成为现代小功率触头材料研究的主要方向。

今后一段时期内,调整触头产品结构,改善其生产工艺,提高触头的性能指标,开发新型的电接触材料,特别是节银代银材料的研究及推广使用,将成为触头行业的发展方向^[4]。

1.2 电力机车概述

电力机车是从接触网上获取电能,由电动机驱动运行的机车。电力机车本身不带原动机,靠接受接触网送来的电流作为能源,由牵引电动机驱动机车的车轮。电力机车具有功率大、热效率高、速度快、过载能力强和运行可靠等主要优点,而且不污染环境,特别适用于运输繁忙的铁路干线和隧道多,坡度大的山区铁路。

电力机车的工作原理是:接触导线上的电流,经受电弓进入机车后经过主断路器再进入主变压器,交流电从主变压器的牵引绕组经过硅机组整流后,向六台分两组并联的牵引电动机集中供应直流电,使牵引电动机产生转矩,将电能转变为机械能,经过齿轮的传递驱动机车动轮转动。电力机车与接触网组成如图1—1所示。

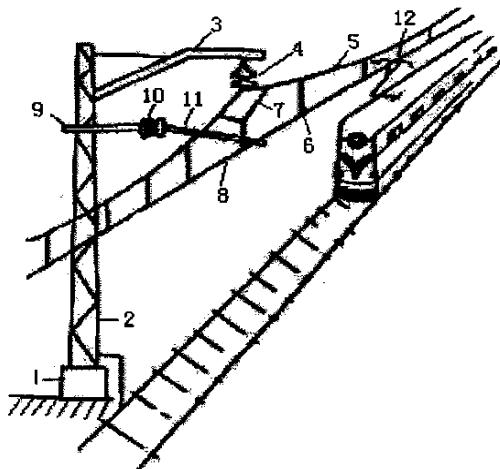


图 1—1 电力机车与接触网组成示意图

图 1—1 中 1 和 2 是立于路侧的接触网支柱及其基础，用来悬挂接触网。图中 3 和 4 是腕臂式支持装置和绝缘子，它们和定位架 9、绝缘子 10、定位管 11 一起，使接触导线稳定地悬挂在线路的上方。图中 5、6、7、8 分别为承力索、吊弦、弹性吊弦和接触导线，12 为受电弓。为了避免接触导线对受电弓滑板的集中磨耗，以提高滑板的使用寿命，并使滑板的受磨部位较为均匀，接触导线在直线区段均布置成之字形，即使在最强烈的风力下，导线的偏移也不超出受电弓滑板的工作范围。

电力机车是从接触网上获取电能的，接触网供给电力机车的电流有直流和交流两种。由于电流制不同，所用的电力机车也不一样，基本上可以分为直-直流电力机车、交-直流电力机车、交-直-交流电力机车三类。

直-直流电力机车采用直流制供电，牵引变电所内设有整流装置，它将三相交流电变成直流电后，再送到接触网上。因此，电力机车可直接从接触网上取得直流电供给直流串励牵引电动机使用，简化了机车上的设备。直流制的缺点是接触网的电压低，一般为 1500V 或 3000V，接触导线要求很粗，要消耗大量的有色金属，加大了建设投资。

交-直流电力机车采用交流制供电，目前世界上大多数国家都采用工频（50Hz）交流制，或 25Hz 低频交流制。在这种供电制下，牵引变电所将三相交流电改变成 25kV 工业频率单相交流电后送到接触网上。但是在电力机车上采用的仍然是直流串励电动机（这种电动机最大优点是调速简单，只要改变电动机的端电压，就能很方便地在较大范围内实现对机车的调速；缺点是这种电机由于带

有整流子，使制造和维修都很复杂，体积也较大），把交流电变为直流电的任务在机车上完成。由于接触网电压比直流制时提高了很多，接触导线的直径可以相对减小，减少了有色金属的消耗和建设投资。因此，工频交流制得到了广泛采用，世界上绝大多数电力机车也是交-直流电力机车。

交—直—交流电力机车采用交流无整流子牵引电动机（即三相异步电动机），这种电动机在制造、性能、功能，体积、重量、成本、维护及可靠性等方面远比整流子电机优越得多。它之所以迟迟不能在电力机车上应用，主要原因是调速比较困难。这种机车具有优良的牵引能力，很有发展前途。

目前，电力机车的发展越来越受重视，其主要原因有下面四点：

（1）时速最快。蒸汽机车最快时速为80km，内燃机车最快时速为100km，而电力机车时速可高达200km以上，甚至超过400km。

（2）运输能力最大。电力机车的运输能力为蒸汽机车的3倍，内燃机车的1.5倍。

（3）能耗最低。电力机车的能耗为蒸汽机车的 $\frac{1}{3}$ ，内燃机车的 $\frac{2}{3}$ 。

（4）无污染。

四点中以时速最为重要。铁路的电力机车化程度是发达国家交通的一个重要标志。大力发展电气化铁路是提高运输能力、提高铁路参与市场竞争能力的最有效方法。

1.3 受电弓滑板简述

据资料统计，到2005年止，我国电气化铁路里程达2万公里，主要采用铜、钢铝和铝合金三种接触网导线。接触网导线在使用过程中磨耗严重，甚至发生断线事故，究其原因，有多方面影响因素，其中受电弓滑板材质是主要影响因素。因此，作为电力机车主要易损部件的受电弓滑板引起了广泛关注，如何降低接触网导线的磨损及提高滑板自身的寿命成为研究者十分关心的问题。

受电弓滑板是电力机车获得动力来源的重要集电元件，安装在受电弓的最上部，直接与接触网导线接触，如图1—2所示。滑板在静止或滑动状态下从接触网导线上获得电流，为机车供应电力，维持电力机车正常运行。高速运行的电力机车上的滑板一旦失效，将严重危及行车安全。因此要求它的使用必须经济安全，既对接触网导线磨耗小，自身有足够的使用寿命，又不影响弓网关系。

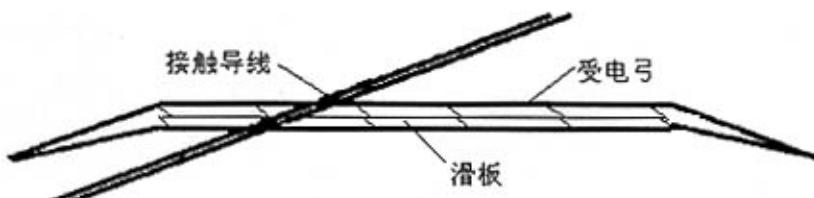


图 1—2 滑板工作原理示意图

1.3.1 滑板的工作条件及基本要求

滑板是电力机车获取动力的主要元件,受电弓滑板与接触网导线的工作属于滑动电接触。滑动电接触与固定电接触和可分离电接触相比,有它苛刻要求的一面。一般地说,滑动电接触既要求有小而稳定的接触电阻、不熔焊、寿命长,又要求有小的摩擦系数、低的磨损率、运动平滑和平稳^[5]。

针对上述情况,好的受电弓滑板需满足如下要求:

- (1) 机械强度高,能经受一定的振动和冲击而不损坏;
- (2) 优良的润滑性能和耐磨损性能,摩擦系数低,对接触导线及滑板自身的磨耗小;
- (3) 良好的电性能,小的电阻率和接触电阻;
- (4) 耐弧性强;
- (5) 轻量化。

1.3.2 国外受电弓滑板研究状况及发展历史

国外的受电弓滑板产品使用历史比较悠久,前苏联、日本、西欧等各国对受电弓的开发和使用都作了大量的研究,其中最具代表意义的是日本和西欧。美国虽是发达的工业国家,但其铁路系统相对滞后,所以这里仅对前苏联、日本和西欧作一些简单的介绍。

1.3.2.1 前苏联

前苏联1969年在1500V直流电气化铁道区段上开始试用粉末冶金滑板,1972—1976年,在保加利亚、匈牙利、东德、波兰、前苏联和捷克各国对完善电气化铁路的接触网及受流问题进行的综合科学技术研究中,对粉末冶金滑板进行了专门的研究并在适宜区段推广应用,其中前苏联对铁基粉末冶金滑板研究得较

多^[6]。

1.3.2.2 日本

日本在第二次世界大战前主要使用的是纯铜滑板，导线也是纯铜制成，故导线滑板之间的摩擦磨耗特别大；从1925年开始，为了节约有限的铜资源，不得不使用碳系滑板，该类滑板虽然对导线的磨耗率有所降低，但是滑板强度不够。容易引起冲击破坏、导线过热、熔断等弓网故障。目前，在日本的电气化线路中，铁基、铜基粉末冶金滑板成为主流产品。随着铁路高速化的发展，日本把碳滑板（浸金属）的研制提到了议事日程，在一些铁路的使用中取得了良好的效果。

说到日本，就不能不提新干线。在新干线开通之前，铜基粉末冶金滑板在日本的使用最为普通。新干线开通后，铜基粉末冶金、铜系铸造合金、铁基粉末冶金三类滑板同时被使用。随着时间的推移，铁基粉末冶金滑板的使用最多，铜次之^[7]。在高速行驶的条件下，对滑板的抗冲击性能及电性能的要求很高，铁系、铜系都达到了相应的要求，不足的是，它们对导线的磨耗较高。其中铁系烧结合金的自身磨耗值是期望值的3倍左右，因而滑板的使用寿命较短。为了解决这个问题，在铜系和铁系合金中加入了FeMo、FeCr、FeTi、Cr等耐磨成分，这样滑板的自身耐磨性能得到了提高^[8]，由此出现了列车速度不断提升，而受电弓数目不断下降的趋势。这两类材料使用的结果显示，在230km/h的运行速度下，其厚度磨耗率为0.2—0.6mm/km，体积磨耗率为4—11cm³/km^[6]。

1.3.2.3 西欧

在欧洲，高速铁路是非常时髦的东西，法国的TGV、德国的ICE和西班牙的AVE都是赫赫有名的高速铁路，它们和日本的新干线一起代表着现代铁路的最高水平，并不断刷新着列车速度的最高记录。在欧洲，碳滑板是主流产品，当然这主要指的是金属浸渗碳滑板。法国TGV东南线(270km/h)以前曾用过钢滑板，TGV大西洋线以前用的是钢和碳滑板两种，现在在TGV上用的普遍都是碳滑板，其磨耗率为2.5—5.4mm/万机车公里。德国的ICE(250km/h)自1991年运行以来，一直使用纯碳素滑板，其磨耗率在1.7—2.2mm/万机车公里。在英国，电气化铁路传统上使用的浸金属碳滑板，但其开发的纯碳素滑板电阻率低，强度高，磨耗率在2.5—5.4mm/万机车公里^[6]。

1.3.3 我国受电弓滑板的发展历史

在20世纪60年代，我国电力机车受电弓滑板使用的是铁、钢、碳三种滑板。1961年我国第一条电气化铁路宝凤段开通，电力机车受电弓上使用软钢滑板。由于对导线磨耗严重，1967年8月改用碳滑板，但滑板自身磨耗增大，使用寿命短。又由于碳滑板机械强度低，耐冲击韧性差，运行中遇到导线硬点容易造成滑板条折和破裂，使用寿命低且易局部拉沟，特别是在雨季和潮湿地区，因摩擦力增大，常出现弓网故障。为此，1965年西安铁路局、铁道科学研究院机车车辆所与北京天桥粉末冶金厂共同协作，研制了第一批粉末冶金滑板，它是采用某种金属粉末为基体，加入多种金属和非金属材料，通过成形、烧结等工艺制成。粉末冶金滑板自身磨耗不大，对导线磨耗较小，从磨耗机理看，粉末冶金滑板在使用中可不断形成润滑膜，降低对摩擦副的摩擦系数，起到减摩的作用。因此，80年代初，粉末冶金滑板成为我国的定型产品，但粉末冶金滑板也存在一些问题，主要是粉末冶金滑板的含油率低，当形成的润滑膜遇到破坏或者失效时，难以形成新的润滑膜来维持滑板与导线间良好的磨合状态。这样就产生了滑板对接触网导线严重磨耗的情况。

针对碳滑板对导线减磨，自身易碎的缺点，又研究开发了铝包碳滑板，它是用挤压的合金铝框与整根碳条粘接在一起，主要目的是增加碳条强度，在钢铝接触和铜接触线混架区段，铝包碳滑板获得了较好的运用效果。针对粉末冶金滑板材质润滑较少，含油较低的缺点，铁道部科学研究院金化所推出了机械复合式铜基粉末冶金滑板，这种滑板可随时提供润滑，大大地降低了对接触导线的磨耗，同时其自身的耐磨性也比较好，是一种较为理想的滑板。由于其问世较晚，应用范围并不广泛。

近几年来，浸金属碳滑板已开始应用，它是将碳基体中存在的大量气孔填满金属，形成实用的凝体，集中碳材料和金属材料的优点。我国哈尔滨电碳厂，早在60年代中期就开始了浸渍金属方面的研究，80年代已经具备了一定的水平，由铁科院及哈尔滨电碳厂联合研制的浸金属碳滑板，于1989年12至1990年7月进行了装车试验，并在1990年11月通过了浸金属碳滑板的技术标准。最近几年，他们生产的C₂₀₃滑板的部分性能已经接近世界先进水平，通过调整基体以及提高金属浸渍工艺和改善工艺设备，性能更好的浸金属碳滑板在我国诞生将不会遥远^[6]。

1.3.4 滑板的分类及性能特点

电力机车受电弓滑板是一种滑动摩擦集电材料，按材质主要分为金属基滑板和碳系滑板两大类。金属基滑板包括纯金属滑板和粉末冶金滑板，碳系滑板包括纯碳滑板和浸金属碳滑板。其种类主要有铜滑板、碳滑板、铁基粉末冶金滑板、铜基粉末冶金滑板、浸金属碳滑板，它们的性能如下^[6]:

(1) 铜滑板

机械强度高，取材方便，使用寿命长，成本低，引发弓网事故障碍概率小，对接触导线磨耗大，特别对铜接触导线磨耗严重。国内早期电力机车采用，现限制使用。

(2) 碳滑板

对导线磨耗低，可延长导线使用寿命，机械强度低易出现断裂、掉块现象，引发弓网事故故障概率大，使用寿命短，使用范围受限。

(3) 铁基粉末冶金滑板

机械强度高，表面硬度稍高，不易出现断裂、不均匀损耗现象，自身带有润滑材料，能减轻对导线的磨耗，对铜导线磨耗较大，应避免在铜导线区段使用。适用于钢铝接触导线。

(4) 铜基粉末冶金滑板

机械强度较好，表面硬度适中，滑板和导线的磨耗比较匹配。适用于铜接触导线。

(5) 浸金属碳滑板

从理论上讲，是目前最为理想的铜导电区段的受电弓滑板，分为整体式和组装式两类，具有较好的电学性能，基本上解决了碳滑板机械强度低的问题，耐磨性能大为提高，能根本解决导线磨耗过快的问题；但抗冲击力不足，出现掉块，使用过程中需要整形，价格过高，维护成本高，给机务部门带来较大的经济压力。

总体来看，在受电弓滑板的研究和应用方面，其材料主要经历了铜滑板、碳滑板、粉末冶金滑板、浸金属碳滑板、金属基复合材料或无机非金属基复合材料滑板的发展过程。

1.3.5 受电弓滑板的发展趋势

考虑到导线使用寿命30年，目前更换1km接触导线需要10万元以上的支出，应以保导线为原则，滑板的发展趋势是以碳纤维滑板、金属纤维滑板，带有润滑功能的金属基复合材料(如Cu—C)、具有自润滑功能的无机非金属基复合材料(如Ti: SiC₂/SiC)取代碳滑板、粉末冶金滑板^[6]。而根据我国的实际情况，受电弓滑板还应在以下方面加以改进：

(1)今后我国电力机车干线将采用铜合金导线，与之相匹配的受电弓滑板应以碳结构为主。浸金属碳滑板和碳基复合材料是今后的主要发展方向。

(2)整体式滑板在使用可靠性方面优于分段式的。开发新型滑板，需以整体式弧线型滑板为主。

(3)国外受电弓滑板上安装有快速降弓系统，以便在接触网位置异常或有异物、滑板磨耗到限或损坏时实现快速降弓，避免弓网事故的发生。我国也应开展带有故障自检装置的受电弓滑板的研究，实现紧急情况下自动快速降弓^[9]。

1.4 课题背景及研究意义

1.4.1 课题背景

1.4.1.1 接触网导线简介

大(大同)一准(准格尔)铁路东自国铁大同东站起，西至内蒙古准格尔旗薛家湾站。横跨两省(区)四盟(市)七县(旗)，地理位置见图 1-3，是目前我国煤炭系统最长的电气化专用铁路。

大—准电气化铁路于 1997 年 3 月投入临管运营，1997 年 6 月 28 日全线开通电气化牵引运行，其接触导线全长 280 公里，其中大(大同)—丹(丹洲营)段采用的是 GLCN—250 型铝包钢接触网导线，长约 64 公里；丹(丹洲营)—准(准格尔)段采用的是 FGLC—260—1 型铝包钢(绞线)，长约 216 公里。该接触网属混架区，其中 FGLC—260—1 型铝包钢(绞线)由于设计问题本身存在螺旋内应力，导线在架线时导线扭转变形，使用过程中发生偏磨现象。据了解 FGLC—260—1 型铝包钢(绞线)生产厂家为消除扭转变形，曾对导线进行了退火处理，此举不但没有消除导线扭转，反而降低了导线硬度，经检测导线实际硬度为

HB36-42。

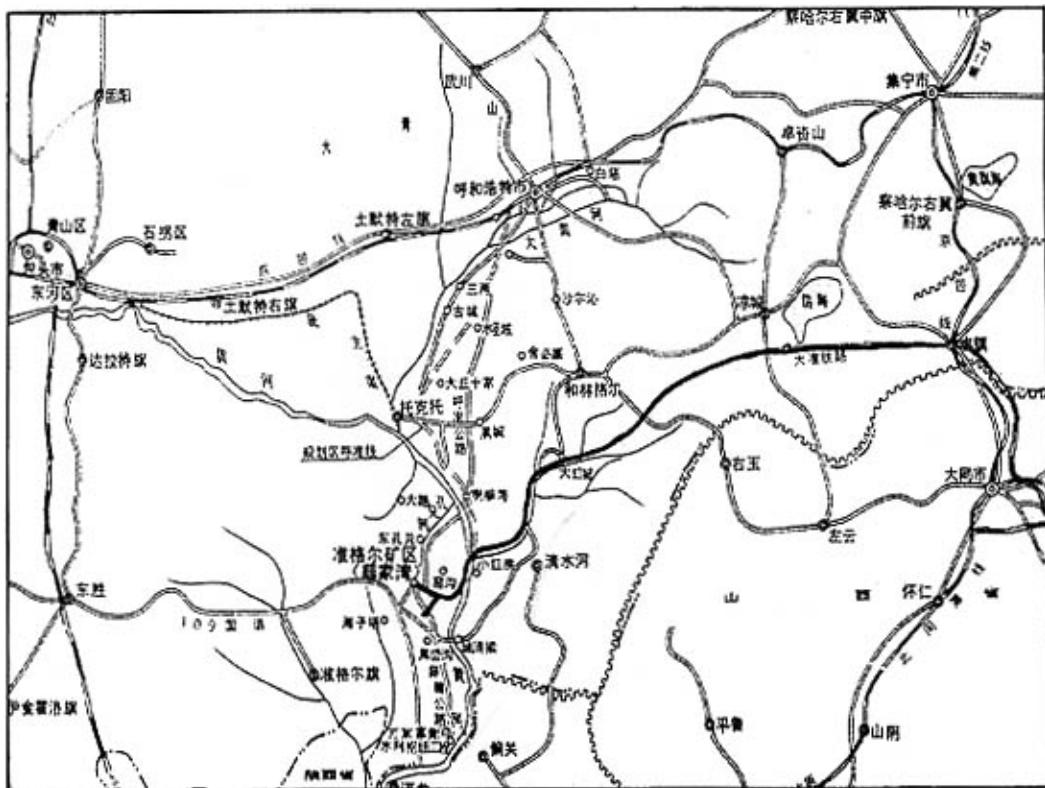


图 1—3 大准铁路地理位置图

1.4.1.2 接触网使用过的滑板简介

该接触网最初使用的是铁基粉末冶金滑板，后在大同局有关人员对采用铁基粉末冶金滑板提出疑问情况下，改用铜基粉末冶金滑板，现在使用的仍为铜基粉末冶金滑板。

1.4.1.3 导线磨损情况简介及原因分析

大准铁路运输部供电段技术室于 2001 年 4 月 5 日至 20 日对大准电气化铁路沿线各领工区检测的接触网导线断面高度进行了复测。复测结果如下：

1、大准电气化铁路接触网导线锚段端点断面与实测磨耗断面的比较

(1) 大—丹段采用的是 GLCN—250 型铝包钢接触网导线，导线磨耗面基本上与导线的耐磨面平行，偏磨现象不严重，实测磨耗最严重的导线断面高度尺寸为 18.14mm，参考锚段端点的断面高度 19.3mm，磨耗断面高度为 1.16mm(已磨耗近 12mm²)。

(2) 丹—准段采用的是 FGLC-260-1 型铝包钢（绞线）接触网导线。因其导线本身存在的问题（螺旋内应力）无法解决，基本上是在偏磨状态下运行的，由于导线断面几何形状的原因偏磨后测出的导线断面高度尺寸要比正常磨耗断面尺寸要高，加之电气化铁路开通时没有定点测试原始数据，所以偏磨后接触网断面高度只能与本次复测时补测锚段端点（没有磨耗）断面高度值进行定量比较，测磨耗最严重区段（近 60 公里）的导线磨耗后的断面高度为 16.45mm 至 16.74mm 之间，参考锚段端点的断面高度 18.84mm，最严重磨耗 2.39mm（导线可用磨耗面积约为 96mm²，在没有考虑偏磨造成减少可用面积情况下磨耗 22-25mm²），其他区段（断面中心垂线偏斜 35 度点）大部分磨耗 1.1mm 至 1.5mm 之间，磨耗近 13.15mm²。

2、对测试接触网断面磨耗的分析

(1) 大丹段采用的是钢铝电车线磨耗相对均匀，但因铝包钢芯的轴向水平方向硬点较多，虽然各领工区作了大量的消除硬点工作，但问题是不能从根本上解决，造成断面磨耗较严重。

(2) 丹准段采用的是铝包钢（绞线），因该导线存在严重的质量问题（螺旋内应力）造成导线耐磨面受内应力的影响，轴向扭曲变形使导线偏磨严重（目前采用人工无法解决），磨耗面与导线断面轴线左右倾斜 30 度至 40 度之间，严重达到 50 度左右，偏磨使导线有效使用面积相对减少，缩短了导线的使用寿命，加之实际磨耗相当严重，将大大缩短导线的实际使用年限，经分析与目前电力机车使用的受电弓滑板（材质）不当造成。

综合上述两种导线磨耗情况，在目前不更换接触网导线的情况下，要想延长导线的使用寿命只有解决适合接触网导线的电力机车受电弓滑板（材质）是唯一的途径。

根据以上大—准铁路运输部供电段技术室提供的检测结果及分析结论，我们又对现采用的铜基粉末冶金滑板的硬度和 FGLC-260-1 型铝包钢（绞线）的硬度进行了检测，现采用的铜基粉末冶金滑板的硬度为 HB 67-74.2，FGLC-260-1 型铝包钢（绞线）的硬度为 HB 36-42，二者硬度值相差较大，这是致使接触导线磨耗相当严重的主要原因，滑板与导线在磨擦过程中发生啮合现象，使用过的滑板表面粘附大量的铝。另外，现采用的铜基粉末冶金滑板是在两块滑板中间加

润滑块，在列车运行过程中润滑块只能对后边的滑板和导线之间的摩擦起到润滑作用，而对前边的滑板和导线之间的摩擦起不到润滑作用，润滑效果不理想，这也是致使接触导线磨耗相当严重的主要原因之一。经咨询，铁科院机辆所研制滑板的专业人员估计：在不解决滑板问题的情况下安排大量运输，不出五年，导线将因磨损严重出现局部露芯断线。

1.4.2 研究意义

自1997年6月全线开通投入使用以来，大（大同）—准（准格尔）铁路最初使用的是铁基粉末冶金滑板，后改用浸金属铜基粉末冶金滑板，因为不适合该段接触网导线，致使FGLC—260—1型铝包钢（绞线）接触导线磨耗严重，大大缩短接触网导线的使用寿命。

目前，国内现有滑板主要分两大类型，一是铜基粉末冶金滑板；二是浸金属碳滑板。铜基粉末冶金滑板应用场所主要为用铁铜合金导线接触网，其硬度范围为HB60—90，成分主要以铜、锌为主。从硬度和成分来分析均不适合于FGLC—260—1型铝包钢（绞线），这一点从铜基粉末冶金滑板对接触导线的磨损情况和使用过滑板的表面状态可以得到充分的证明。浸金属碳滑板从润滑角度来看较为理想，适合于FGLC—260—1型铝包钢（绞线）。但大—准接触网还有64公里长的GLCN—250型铝包钢接触网导线，若用该种滑板，一方面，该滑板自身使用寿命不足；另一方面，针对接触导线扭转变形，硬质点较多的特殊情况，该滑板在使用过程中受到较大冲击，有掉边或被冲断的可能，因此该种滑板也不适用于大—准接触网导线。

针对上述情况，如果研制出一种适合该段铁路接触网导线的新型滑板，可以延长接触导线的使用寿命，使其达到设计寿命15年以上，并同时满足保护导线和保证滑板自身使用寿命要求，既解决了多年来滑板不能与不同型号铝包钢接触线良好配合并保护导线的难题，又丰富了电接触理论。

1.5 本文所做的工作

本文所研究课题是辽宁工程技术大学与神华集团准格尔能源有限责任公司联合开发项目，旨在解决大（大同）—准（准格尔）电气化铁路接触网导线（两种型号铝包钢接触线混架区）与滑板的匹配问题。

通过分析,现有滑板不适用于大——准接触网导线,必须研制一种新型滑板,同时满足保护导线和保证滑板自身使用寿命要求。新滑板的设计目的和要求是:

- (1) 新滑板应以护线为主,尽量使导线接近其设计寿命 15 年;
- (2) 新滑板应该有足够的使用寿命,预期使用寿命为 3 万机车公里。

本文在对电接触理论、金属材料学、电弧等离子体等基本理论学习的基础上,首先分析了电力机车受电弓滑板与接触网导线相互作用规律,其次结合理论论证并考虑经济成本,设计并研制了一种新型双润滑铜基粉末冶金滑板。在铜基粉末冶金滑板内部加入锡、石墨、铅等合金元素,其中石墨和铅都起到自润滑作用,同时外部采用铝包双润滑结构,将高强石墨润滑剂与粉末冶金滑板整体结合,进一步提高润滑效果。新滑板的设计主要包括滑板结构设计、制造方法的设计、成分设计、滑板硬度值设计、滑板外壳的设计、润滑块的设计、滑板尺寸的设计等几个方面。最后对双润滑铜基粉末冶金滑板进行了性能检测,达到了预期的设计目标。

2 电力机车受电弓滑板与接触网导线相互作用规律分析

2.1 受电弓滑板与接触导线的工况特点

受电弓滑板与接触导线是一对较为特殊的摩擦副。与常规摩擦副相比，它们的工作条件有以下显著的特点和不同^[10]:

1、载荷周期性随机变化

滑板与接触导线分别属于两个独立的弹性系统——受电弓系统与接触网系统（见图 2—1）。其中，受电弓由滑板、托架、升弓弹簧等组成，受电弓抬升力靠升弓弹簧加载；接触网为一弹性悬挂系统。两个弹性系统相互接触提供了滑板和接触导线之间的接触压力^[11]。

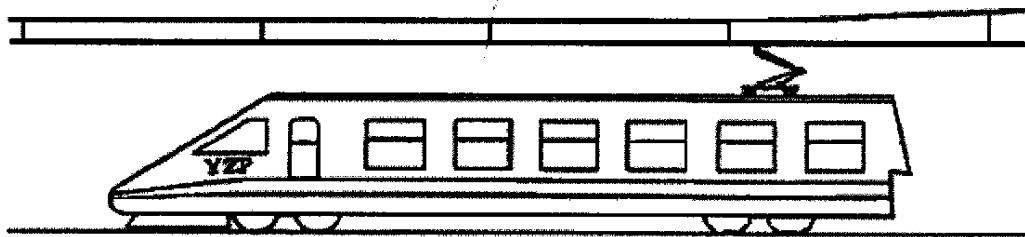


图 2—1 电力机车受电弓——接触网系统示意图

在运行中由于弓网的振动，使得滑板与接触导线间的接触压力呈随机变化的特征。又由于接触网按跨距布置，这一随机变化的载荷又具有一定的周期性。

此外，受电弓在经过接触网上“硬点”时，例如在过分相、分段绝缘器、接触导线硬弯及悬挂不平顺处，还会产生阶跃式的冲击，造成瞬间离线现象。

2、接触时有强电流通过

受电弓滑板与接触导线相接触，从接触网上获取电流，目前电力机车电流在 400A 左右，高速电力机车将提高到 850A。要通过如此强大的电流，即使是导电性能良好的滑板材料也会产生较高的温升。尤其当机车在车站停车时还要继续取流，受电弓滑板与接触导线相对静止，将导致局部高温，甚至发生接触导线熔融、断线现象。

在强电流作用下，当弓网间发生瞬间离线时，将产生严重的拉电弧现象，造成受电弓滑板和接触导线表面烧伤而使接触状况恶化。

3、高滑动速度

准高速铁路的速度为 160km/h 左右，对应的弓网相对滑动速度是 44.4m/s。当列车运行速度达到 250km/h，弓网间滑动速度为 69.4m/s。若要达到目前国际最先进的列车速度 400km/h，弓网相对滑动速度将达到 111m/s。在常规机械设计中，通常认为相对滑动速度超过 30m/s 即为高速摩擦副，显然弓网系统属于高速滑动摩擦磨损问题。

4、环境条件复杂多变

弓网系统工作在野外露天环境。夏日高温、阳光曝晒，冬季严寒、导线覆冰；雨雪天气，砂尘等等都对其摩擦磨损性能和导电性能起重要影响作用^[10]。

2.2 受电弓滑板与接触导线的摩擦磨损机理

从上述受电弓滑板与接触导线的工况条件可以看出：这是一对特殊的摩擦副，在周期性随机变载荷、强电流、高速滑动等因素的综合作用下，它们的摩擦磨损机理与通常的摩擦副有着显著差别^[10]。

2.2.1 机械作用下的摩擦磨损

物体作相对运动时其相互作用表面之间将产生摩擦，在无足够的润滑膜将两表面隔开时，磨损是不可避免的。在机械作用下引起的摩擦通常与其所受的载荷、相对滑动速度、表面品质（包括表面形貌、表面材料硬度等），以及环境因素如温度、湿度和腐蚀性介质等有关^[12]。机械磨损主要包括粘着磨损（如图 2—2 所示）、磨粒磨损（如图 2—3 所示）、疲劳磨损等形式。

受电弓滑板与接触导线间的机械磨损在正常情况下，以粘着磨损为主。在载荷作用下，实际接触峰点处的应力可能达到受压屈服极限而形成粘着结点，滑动中粘着结点剪切断裂，被剪切的材料或脱落成磨屑，或由一个表面迁移到另一个表面。根据粘结点的强度和破坏位置不同，粘着磨损有从轻微擦伤磨损、粘着到严重的胶合磨损几种形式。而粘着点的强度很大程度上取决于接触处的温度场，包括接触点温度和沿材料表面深度方向的温度梯度。

粘着磨损的主要表现特征有：沿滑动方向可见较明显的擦痕；表面上发现配对摩擦副材料的迁移等^[10]。

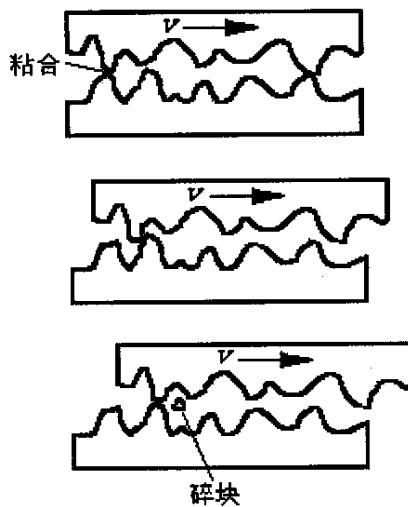


图 2-2 粘着磨损示意图

当受电弓滑板工作在粉尘、风沙较大条件时，砂粒 (SiO_2) 等硬颗粒附着在滑板或导线上进入接触，将导致磨粒磨损的产生。其磨损形成机理是：(1) 磨粒对表面产生犁沟作用或称微切削、划伤表面；(2) 磨粒压入表面，因挤压作用使表面材料塑性变形而脆化，从而在滑动时形成鳞片状的剥落碎屑^[13]。

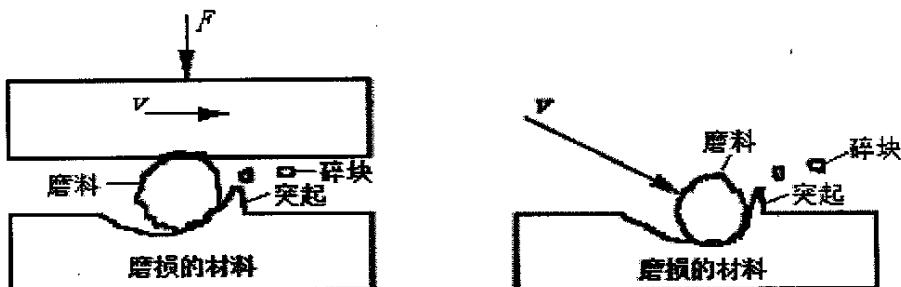


图 2-3 磨粒磨损示意图

本课题所研究的大—准铁路是煤炭系统第一条规模较大的自备铁路，在内蒙古地区是首条电气化铁路，它横跨蒙、晋两省，沿途经过六个旗县，在它的后方丹州营到燕庄段处在风口地带^[14]，当机车在粉尘风沙大的地方运行时，粉尘、砂粒等就会落在滑板与导线之间，产生磨粒磨损，增加滑板和导线的磨损。前面提到大—准铁路目前接触导线、滑板磨耗较严重，其中磨粒磨损占有一定比例。

受电弓滑板运行经过接触网上硬点或缺陷处，受到冲击力作用，对于韧性较差的材料如碳滑板，也常有滑板材料崩裂或以脆性剥落为特征的冲击磨损发生，其特征是磨屑的颗粒度较大^[10]。

所谓疲劳磨损是指凸部在反复剪切力的作用下产生疲劳裂纹，最后导致凸部微粒脱落而引起的磨损。受流系统由于温升的原因而频繁发生软化，该机理的磨损问题是不大的^[15]。

2.2.2 强电流作用下的摩擦磨损

受电弓滑板与接触网导线的工作特性在本质上属于电接触范畴，其磨损情况也突出地表现出电磨损的特点^[16]。受电弓经过硬点时会产生较大的振动，当接触压力减小到零时，受电弓滑板就要离线（离线是指机车运行中，受电弓离开接触导线并产生电弧的过程），产生火花或稳定的电弧。强电流作用下，一方面由于受电弓滑板与导线接触不良和离线等原因引起的火花或电弧而造成电气磨损，另外，在接触受流时由于电流通过引起温升，导致接触表面物理状态发生变化，造成附加的机械磨损，加大了总磨损。

在滑板离线过程中，接触点电流急剧增加产生热量使接触点金属熔化，形成液桥，最后断开形成电弧。此时在高温及强电场作用下，电子对表面强烈轰击，使材料蒸发或产生材料转移，在工作表而出现凹坑或结瘤，从而加速磨损。在强电流的作用下，摩擦表面的温升应当是不同热源对滑板材料作用的结果，包括电弧热、接触电阻热、摩擦热及体电阻热等^[17]。在强电流作用下表面接触温度将比机械摩擦副高出很多。研究表明，表面接触温度过高，会改变材料表面的组织结构和机械性能，甚至发生相变，从而严重影响材料的摩擦磨损性能。

另外，由于弓网处于野外环境并带电运行，因而受电弓滑板与接触导线间还存在以化学或电化学作用为主的氧化磨损或腐蚀磨损。氧化磨损和腐蚀磨损的共同特点是生成某些特殊的表面层，然后在机械作用影响下，表面层材料脱落。所不同的是，氧化表面层的生成具有两重性：一种是生成脆性层，与机体连结强度不高，易于剥落，使磨损加剧；另一种是形成对机体的保护层，有一定的减摩抗磨作用。而腐蚀磨损则只会加剧磨损，强电流作用是促使腐蚀磨损发生的主要因素^[10]。

由上述分析可知，受电弓滑板与接触导线的摩擦磨损是机械作用和强电流作用的综合结果，二者相互影响，互为因果，这是弓网系统摩擦学研究的重要特征。由图 2-4 可以看出，在机械参数完全相同的情况下，电流作用下的摩擦比没有

电流时的摩擦增加很多^[10]。

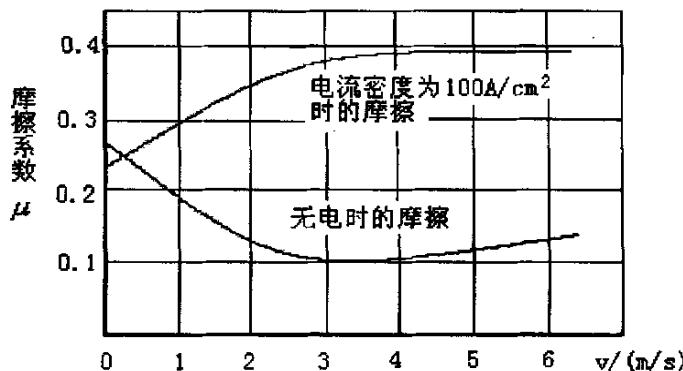


图 2-4 电流对摩擦系数的影响

综上,受电弓滑板的磨损方式可分为机械磨损、电气磨损、化学磨损等,如表 2-1 所示^[18]。

表 2-1 滑板主要磨损方式分类

机械磨损	电气磨损	化学磨损
粘着磨损	电弧熔损	腐蚀磨损
磨粒磨损	电离子转移	氧化磨损
疲劳磨损		

实际上,滑板磨损主要为机械磨损和电气磨损,滑板的使用寿命取决于滑板本身的材质和机车运行的工况条件,其主要的失效形式就是磨耗到限。影响滑板磨损的主要因素有接触压力、受电电流和走行速度。此外,还与线路状态、接触网悬挂类型、受电弓性能、滑板材质及运行条件等因素有关。下面分别来分析一下^[9]:

(1) 接触压力的影响

滑板的电气磨耗随着接触压力的增加而减小。这是因为随接触压力的增加离线现象减少。滑板的机械磨耗随接触压力的增大而增大。在滑板材质、润滑条件、速度一定的情况下,由摩擦产生的纯机械磨耗量可近似地认为与接触压力成正比。滑板离线产生的电弧放电也会使滑板表面变形、变质而增大机械磨损量。滑板和导线间的接触压力须控制适宜,过大可导致弓线间产生粘着磨损,过小会增加滑板离线率。

(2) 受电电流的影响

滑板的电气磨耗随受电电流增大而增大。受电电流还影响滑板表而温度。滑板表而在导电时产生的热量与电流的平方成正比。受电电流越大，滑板表而温度越高，使滑板接触而工况恶化，导致机械磨耗加剧。因此，在大负荷受电、离线又多的情况下，滑板的寿命变得极短。

(3) 走行速度的影响

走行速度对滑板磨耗的影响主要反映在两个方面。一是高速走行增加了离线次数，滑板磨耗量与离线率成正比。其次是高速走行增加了滑板而摩擦产生的热量，导致滑板表而升温，引起滑板表而状况恶化。因此，磨耗量随走行速度的提高而增大。

此外，滑板的磨耗还受到很多因素的影响，如周围环境：在有冰霜的季节和雨季，碳滑板的寿命会缩短，因为适量的水分能增加石墨的润滑性能，降低摩擦因数，但过多的水分容易造成火花和打弧现象，其结果使滑板的磨损增加。图 2—5 为滑板导线磨耗全过程^[19]。

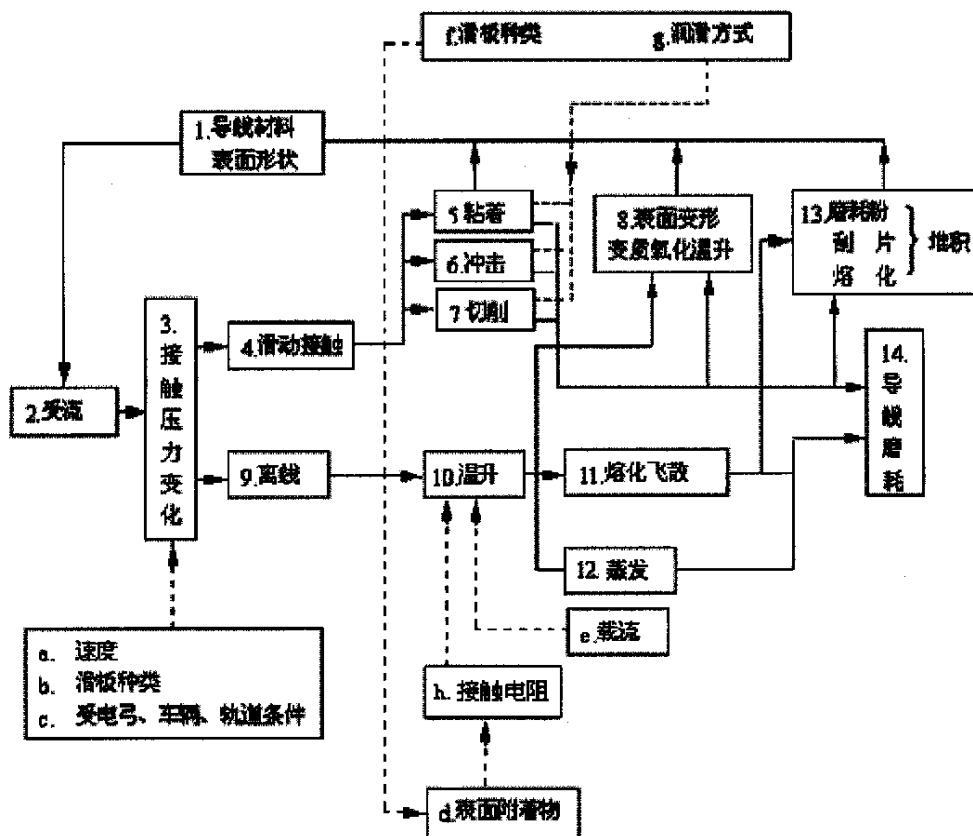


图 2—5 滑板导线磨耗全过程

2.3 受电弓与接触网导线相互作用的模型

2.3.1 物理模型建立

2.3.1.1 接触网物理模型

为了发展高速铁路，首先就得解决好列车的牵引动力，也就是要解决好受电弓的受流质量问题。而受电弓与接触网又是一个不可完全分离的系统，它们通过受电弓滑板与接触线动态接触而联系在一起。接触网的类型较多，目前国内外铁路上采用的接触网主要有简单链型悬挂接触网和弹性链型悬挂接触网，其中简单链型悬挂接触网与弹性链型悬挂接触网相比，具有结构简单、调节方便、成本低等优点，从而得到了广泛的应用，目前中国铁路的接触网也是采用这种形式^[20]。

对简单链型悬挂接触网，可建立如图 2-6 所示的简化模型。

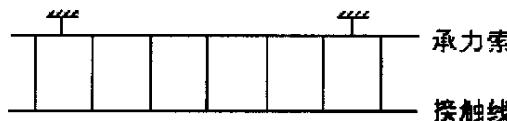


图 2-6 接触悬挂模型

2.3.1.2 受电弓物理模型

受电弓的种类很多，不同的受电弓因其适用的速度和场合的不同，其结构也不尽相同，目前在我国的电力机车上使用的还多为单臂受电弓。由于实际的受电弓杆件多、结构复杂，其中包括许多间隙、铰接点和摩擦副，因此很难建立完全反映实际情况的模型。图 2-7 列出了一些比较常用的受电弓模型^[21]。

目前研究受电弓的模型常采用归算质量模型，所谓归算质量模型就是利用动能等效原理将原结构简化成几个具有集总质量的模型，根据集总质量的数目可分为一元模型、二元模型、三元模型、多元弓模型，另外，国内有的学者直接采用受电弓的框架模型网。

图 2-7(a)是一元质量块模型，该质量块代表整个受电弓的归算质量，这个模型与实际受电弓差异较大，仅用来分析受电弓的低频振动特性。图 2-7(b)是一个较完整的受电弓模型，上面的质量、弹簧和阻尼可以直接由弓头参数转换而来，下面的质量、弹簧和阻尼则由框架部分的质量、各个构件的转动惯量、升弓

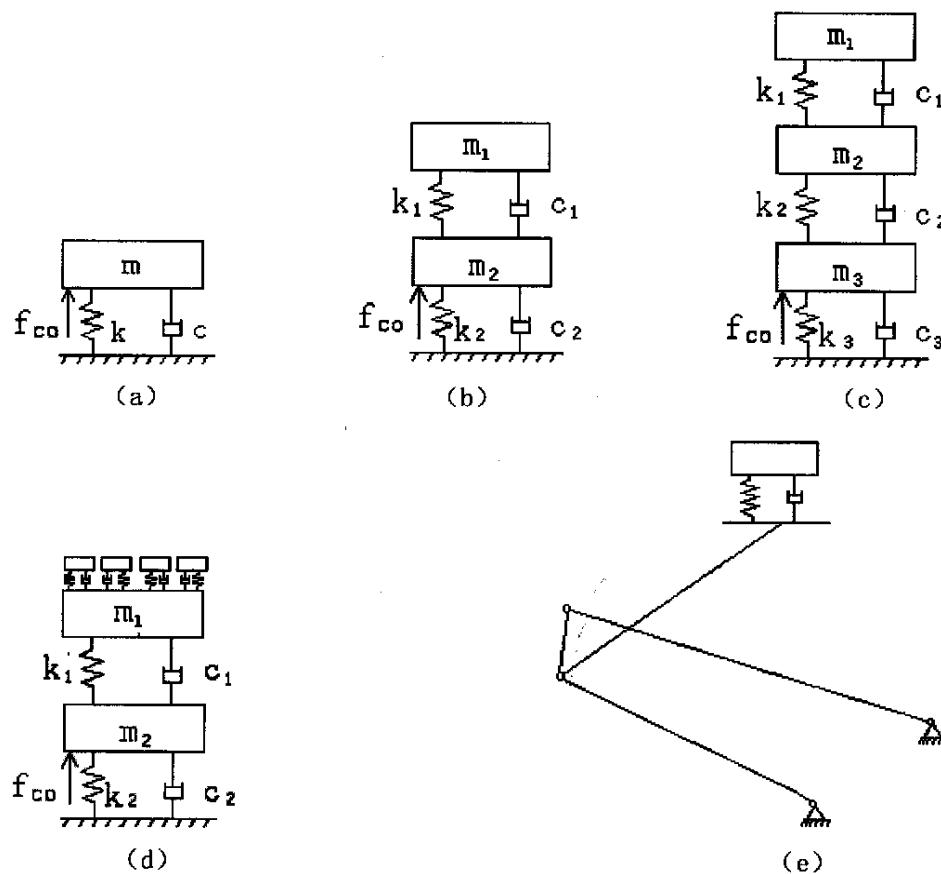


图 2-7 常用的受电弓模型

力、重力、摩擦与阻尼等参数转换而来。如果把受电弓的各个构件看成刚体的话，受电弓确实有两个自由度。图 2-7(c)是三元质量块模型，它是在二元质量块模型的基础上把框架部分又分成了上框架和下框架两个集总质量。应该说三元质量块模型比二元质量块模型更能反映实际情况。图 2-7(d)是多元弓模型，它是根据不同受电弓的结构特点，又将弓头细分的模型。图 2-7(e)是受电弓的框架模型，这种模型比较形象直观^[21]。

归算质量模型具有计算简单的优点，下面的分析中采用受电弓二元模型。

2.3.1.3 受电弓与接触网系统动力学模型

结合上述模型，建立了如图 2-8 所示的受电弓与接触网系统动力学模型。接触网为简单链型悬挂，受电弓考虑为二元线性化模型（忽略干摩擦的影响），受电弓与接触网系统通过接触力耦合在一起。

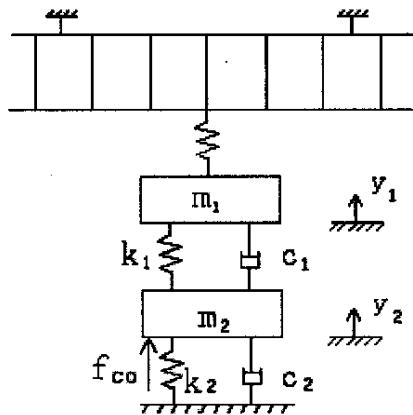


图 2-8 受电弓与接触网系统动力学模型

2.3.2 数学模型分析

根据上述模型，建立接触网及受电弓的运动方程。

2.3.2.1 接触网的运动方程

对简单链型悬挂接触网，作离散化处理如图 2-9 所示，可建立其运动方程^[22]：

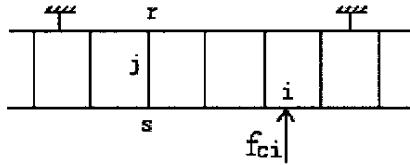


图 2-9 接触悬挂计算模型

$$My + Cy + Ky = F - [0 \cdots f_{ci} \cdots 0]^T \quad (2-1)$$

式中：M——接触悬挂的质量矩阵；C——接触悬挂的阻尼矩阵；

K——接触悬挂的刚度矩阵；y——接触悬挂的位移矢量；

F——作用在接触悬挂上的静载荷； f_{ci} ——受电弓运行至 i 点时的接触力。

M 为对角阵，根据承力索与接触线的密度以及离散化分段长度，并考虑吊弦、支撑杆、定位器等的质量后构成。K 为刚度矩阵：

$$K = K_L + K_D \quad (2-2)$$

其中： $K_L = \begin{bmatrix} K_{L1} & \\ & K_{L2} \end{bmatrix}$ ， K_{L1} 和 K_{L2} 分别为承力索与接触线的刚度矩阵；

$$K_D = \sum_{j=1}^m K_{Dj} = \sum_{j=1}^m \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & k_j & \cdots & -k_j \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ & -k_j & \cdots & k_j \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

K_{Dj} 为单根吊弦的刚度矩阵, 由第 j 根吊弦的受拉刚度系数 k_j 和该吊弦两端节点 r 、 s 决定^[23]。

2.3.2.2 受电弓的运动方程

受电弓原本是一个非线性系统, 但在其工作点位置附近可作线性化处理, 并用等效粘性阻尼来代替库仑阻尼。简化后的受电弓力学模型见图 2-10 所示, 其运动方程为:

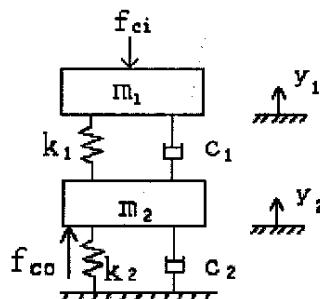


图 2-10 受电弓计算模型

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ci} \\ f_{co} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

式中: m_1 、 m_2 ——分别为弓头、框架的质量;

c_1 、 c_2 ——分别为弓头、框架的阻尼;

k_1 、 k_2 ——分别为弓头、框架的刚度;

y_1 、 y_2 ——分别为弓头、框架的位移; f_{ci} ——为升弓力。

当受电弓运行至 i 点时, 弓一网保持接触时有:

$$y_1 = y_i \quad (2-5)$$

这样便可对弓一网动态受流进行求解^[22]。

2.3.2.3 接触力的计算

弓一网接触力 f_{ci} 可按下式计算^[22]:

$$f_{ci} = m_1 \ddot{y}_1 + c_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 (y_1 - y_2) \quad (2-6)$$

通过上述动力学模型的建立, 确定了导线与滑板接触压力的计算公式。在滑板性能检测时, 一般取导线与滑板接触压力值为静态接触压力最佳值 70N, 这样, 就可以应用公式 2-6 来计算弓头的刚度 k_1 , 在保证 $f_{ci} = 70N$ 的前提下, 确定合适的 k_1 值, 使滑板与导线达到良好接触。

2.4 弓网系统中影响高速受流因素分析

高速受流是指高速运行的电力机车通过受电弓与接触线的滑动接触取得电能并传给电力机车的过程^[21]。高速受流是电力牵引向高速发展必然要遇到的关键问题之一, 此间, 受电弓与接触线是相互依赖、相互制约、相互作用的。实际上, 动态受流性能是高速滑动接触点所具有的导电能力, 它受许多因素的影响, 如弓线间的接触压力、接触悬挂类型、接触悬挂的弹性系数、滑板材质等。理论研究证明: 对于接触悬挂——受电弓系统而言, 其间的接触压力变化幅度越小、变化率越低, 则动态受流质量越高; 反之则变坏^[24]。另外, 其间的接触压力过大时, 则导线和滑板的磨耗加剧, 寿命缩短; 而压力过小或趋近为零时, 则使弓网间接触不良, 造成离线, 甚至引起拉弧, 烧损接触线和滑板, 形成取流状态恶性循环。下面, 对弓网系统中影响高速受流的因素做一下具体分析:

1、弓线间的接触压力

接触压力是指在高速运行下, 描述在受电弓抬升力作用下的动态弓线间的接触程度与状态, 是评价与控制受流质量重要条件及内容^[24]。包括最大接触压力、最小接触压力、平均接触压力值。

由于接触线和受电弓滑板之间失去接触或接触力不足就会产生电弧, 这个动态接触压力一般取决于受电弓静态抬升力、空气动力、垂直方向运动的质量惯性力等。由于动态接触力分散性大、变化幅度大, 所以引入标准偏差概念来进行评价。

$$\text{接触压力平均值: } \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (2-7)$$

$$\text{接触压力的标准偏差: } \sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (2-8)$$

$$\text{最大接触压力: } F_{\max} = \bar{F} + 3\sigma_f \quad (2-9)$$

$$\text{最小接触压力: } F_{\min} = \bar{F} - 3\sigma_f \quad (2-10)$$

式中 n 为采样点数^[25]。

接触压力最大值、最小值及其离散性(即标准偏差)是评价弓网动态相互作用的最重要的指标。标准偏差估计了接触力的波动范围,由于接触力按正态分布,根据高斯分布定律,接触压力最大以 3 倍的偏差值在平均值上下波动(如式 所示)。显然,标准偏差越低,运行质量越好。研究表明:若标准偏差约为平均值的 20%,最大接触力不超出 200N,最小力不低于 50N 时,则可以认为运行是优质的^[26]。

2、接触压力不均匀系数

其表达式为:

$$C_h = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (F_{i\max} - F_{i\min})}{\sum_{i=1}^n (F_{i\max} + F_{i\min})} \quad (2-11)$$

式中:n——采样点数;

$F_{i\max}$ 、 $F_{i\min}$ ——分别为某一跨距或某一个检测区段采样点处的接触压力的最大值和最小值。

接触压力不均匀系数可以评判动态过程中接触力的变化状态及弓网的匹配效果与性能^[24]。

3、离线率

离线是弓网失去接触的状态,会对受流造成严重后果,所以离线也被许多国家作为评价受流的主要指标。一般用最大离线时间和离线率来衡量离线的大小,通常将 10ms 以下的离线称为小离线,10—100ms 为中离线,大于 100ms 时为大离线^[26]。从受电弓方面看,当列车运行速度增大至 100km/h 以上时,受电弓自身就要产生垂直方向的加速度,从而引起接触悬挂的振动,由此使二者的良好接触遭到破坏,造成离线。离线率为运行期间弓网脱开时间与运行时间的百分比:

$$S = \frac{\sum t}{T} \times 100\% \quad (2-11)$$

式中, S 为离线率; $\sum t$ 为运行期间弓网脱开时间(即运行时间内各次离线时间总和); T 为运行时间^[27]。

各国离线率标准不同,如日本规定离线率小于 10%为良好,法国规定每 100m 允许有一次可见电弧,德国规定离线率小于 5%。对于 300km/h 的高速电气化铁路,离线率一般控制在 5%以内^[26]。

4、接触悬挂的弹性系数及弹性差异系数

接触网的弹性也是影响接触网受流质量的一个主要因素。接触网的弹性应较小,尽量均匀,即弹性差异系数要小。平均弹性系数和弹性差异系数分别表示接触悬挂弹性性能及均匀程度。其表达式为:

$$\text{平均弹性系数: } K_0 = (K_{\max} + K_{\min})/2 \quad (2-11)$$

$$\text{弹性差异系数: } \varepsilon = (K_{\max} - K_{\min})/(K_{\max} + K_{\min}) \quad (2-12)$$

式中 K_{\max} 、 K_{\min} 分别表示检测或指定跨距内的弹性系数的最大值及最小值^[24]。

5、接触线波动传播速度

所谓波动传播速度是指接触导线传播波的速度,定义为接触网张力与单位长度质量比值的平方根,即波动传播速度表达式为^[26]:

$$v_p = \sqrt{\frac{\text{接触网张力 (N)}}{\text{接触导线质量 (kg/m)}}} \quad (2-13)$$

当列车速度接近接触网波动传播速度时,在受电弓后方的接触网上形成大波,使受电弓和接触网之间的接触导线被强烈弯折,从而导致接触导线应力增大,后续受电弓的离线现象也增多。离线增加加速了接触导线的电气磨损,形成接触导线的波状磨损。由理论和实践的结果得出:当列车速度限制在波动传播速度的 0.7 以下(一般取 $0.5 v_p - 0.7 v_p$),才能保证稳定受流。为提高列车运行速度,就要提高接触网的波动速度,由式 2-13 可以看出,其措施是加大接触网的张力和减小单位长度的质量^[26]。

6、接触线的抬升量

在受电弓运行过程中,接触线因受到受电弓的抬升力而被抬升。抬升量过大,

会使接触线的振动加剧，应力增加，悬挂不稳定，甚至影响受电弓对建筑物的绝缘距离。一般用跨内的最大抬升量和平均抬升量来衡量受流质量。一般要求在一跨内的最大抬升量小于 100mm^[21]。

7、受电弓最大幅值、受电弓运行轨迹

可以用下式来描述：

$$2A = H_{\max} - H_{\min} \quad (2-14)$$

式中： H_{\max} 、 H_{\min} —— 分别为受电弓滑行状态下，距轨面高度的最大值及最小值。它表明受电弓在外界干扰力作用下所具有的平稳性^[24]。

8、受电弓一些主要参数对受流的影响

当接触导线高度变化时，受电弓上部各部件也随着升降。对于抬高量、速度、加速度等物理量，滑板上最大，上框架次之，下框架最小。影响受流的受电弓的参数主要有受电弓的质量、弹簧刚度和阻尼。

质量是决定受电弓惯性的重要因素。减小质量，尤其是减小加速度大的部件如滑板和上臂杆的质量，可明显减小受电弓的运动惯性，提高受电弓的跟随能力。日本新干线使用的受电弓弓头质量为 7—10kg，法国 TGV 的弓头质量为 9kg。

减小滑板弹簧刚度，使滑板相对框架易于运动，有利于提高其跟随性。对受电弓弹簧刚度的要求是跨距中部的接触线能够提供足够的位移来维持接触力。弹簧刚度的大小应随接触网形式和运行速度的不同而不同。

受电弓的阻尼包括滑板阻尼、框架阻尼、还有干摩擦等。滑板阻尼增加，受电弓低频响应改善，但高频响应变差了；框架阻尼增加使低频响应变坏，而高频响应改善。有计算表明，滑板阻尼的最佳值为 $500N \cdot s/m$ ，框架阻尼的最佳值为 $60N \cdot s/m$ ^[28]。

综上，弓网系统受流性能受到许多因素的影响，受流过程是一个动态过程，包括了多种机械运动形式和电气状态变化。在受流过程中，受电弓滑板与接触线接触，相对滑动，从接触网上取下电流，输送给电力机车，只要其中之一出现问题，都会破坏正常的受流特性。可见，滑板设计性能好坏与受流效果密切相关。

3 双润滑铜基粉末冶金滑板设计与试制

前面的分析表明,影响接触网导线和滑板磨耗的因素有多种,如导线性能、滑板性能、道路情况、线路架设情况、供电方式等等。其中应重点考虑滑板与接触网导线这一具有电接触特性的摩擦副之间的性能匹配关系^[16]。在对受电弓滑板与接触网导线作用规律分析的基础上,结合滑板的工作特点并考虑经济成本,设计并研制了双润滑铜基粉末冶金滑板。

3.1 双润滑滑板的设计

设计的目的和要求:

从护线角度考虑:新滑板的硬度应该接近于现有导线的硬度,应该有优良的润滑条件,较低的电阻率。

从滑板使用寿命角度考虑:新滑板应该具有耐磨、耐高温、抗冲击和耐腐蚀特性。

3.1.1 结构设计

现在正在使用的铜基粉末冶金滑板,其外部润滑主要依赖于两块铜滑板中间的润滑块(如图 3-1 所示^[29])。在列车行驶过程中,润滑块只能润滑一侧的铜滑板,另一侧铜滑板由于没有外部润滑,且自身硬度较高,与导线磨损严重。另外,从使用角度考虑,在换铜滑板时,有时忽略换润滑块,也同样造成滑板与导线磨损严重。考虑到上述因素,将润滑块由单侧润滑改为双侧润滑,同时将润滑块与铜滑板做成整体结构,这样做的实际效果是:首先双侧润滑加强对铜滑板的外部润滑,能更好的保护导线和延长滑板的使用寿命;其次结构紧凑,可承载更大的电流;另外在换滑板时同时更换润滑块,减少操作工序。

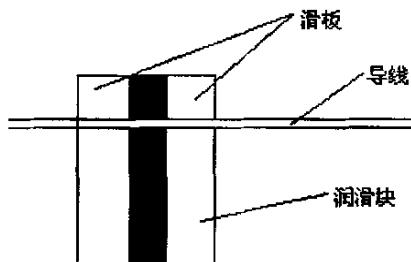


图 3-1 原滑板润滑示意图

3.1.2 制造方法的设计

为使新型滑板同时达到保护导线和有足够的使用寿命，在实验室进行了多次试验，结合理论论证和多次试验的结果并考虑经济成本，最后确定采用粉末冶金方法制造滑板的方案。

3.1.3 成分设计

3.1.3.1 基体成分设计

从导电性角度考虑，粉末冶金基体应该采用铜或铝，从磨擦角度考虑，同一磨擦幅中不应该用同种金属，故基体成分最后确定采用铜粉。

3.1.3.2 合金元素的设计

由于新型滑板具有耐磨、耐热、耐蚀的要求，故在滑板中加入锡。锡的加入可极大提高滑板耐蚀性、耐磨性和高温强度，据资料可知，由于锡的加入，可使滑板的工作温度提高到 300°C 以上。由于锡的加入，滑板的耐磨性、耐蚀性和高温强度同时提高，因此滑板的使用寿命提高。

从保护导线和延长滑板使用寿命这一矛盾的结果进行综合考虑，新型滑板不但耐磨而且应该减磨。所以在设计滑板时，一方面考虑外部由单侧润滑改为双侧润滑加强滑板的外部润滑；另一方面，又在滑板中加入固体润滑剂，加强滑板的自润滑。石墨、铅都是良好的自润滑剂，但过多的石墨会降低滑板的强度和冲击韧性，故在设计成分时采用石墨和铅按一定比例同时加入滑板中，这样既保证滑板具有优良的润滑性，同时又使滑板具有足够的强度和冲击韧性。

3.1.4 滑板硬度值的设计

在调研过程中，铁科院机辆所研制导线和滑板的专业人员分别介绍：从保护导线角度考虑，滑板的硬度值应该小于导线的硬度值，只有这样，才能使导线在磨擦过程中磨耗最小。从理论上分析，滑板的硬度值较小时，在磨擦过程中主要磨耗滑板，对导线的磨耗较小，可以延长导线的使用寿命。但针对大准接触网 FGLC—260—1 型铝包钢（绞线）这一特殊情况，如果把滑板硬度值降低到导线硬度值（HB36--42），则此滑板从性能上表现为硬度不足，强度不足，不能保证使用寿命，更何况大准接触网还有 64 公里长的 GLCN—250 型铝包钢接触网导线，

钢对滑板的磨耗加剧，这样的滑板在混架区根本无法使用。考虑到 FGLC—260—1 型铝包钢（绞线）硬度值较小，而 GLCN—250 型铝包钢线硬度值较大，滑板在保证使用寿命的同时，尽量起到保护导线的作用，故滑板硬度值设计为 HB45—52，在实际制做滑板过程中，可以调节滑板成分配比和制造工艺参数来达到此硬度值。

3.1.5 滑板外壳的设计

为固定润滑块和保证润滑块与滑板充分接触，润滑块外侧采用加外壳方式进行固定，外壳的形状见图 3-2，长边为 250mm，底部宽为 64mm 上部面宽度为 62mm，外壳厚度为 3mm，其中外壳底部与壳壁夹角为 86°。

在设计外壳时充分考虑到外壳硬度应该低于 FGLC—260—1 型铝包钢（绞线），同时外壳应该具有足够的强度，以防在列车运行时将外壳拉开这两方面因素，故外壳选用硬度 HB 低于 32 的纯铝，纯铝的厚度为 3mm。

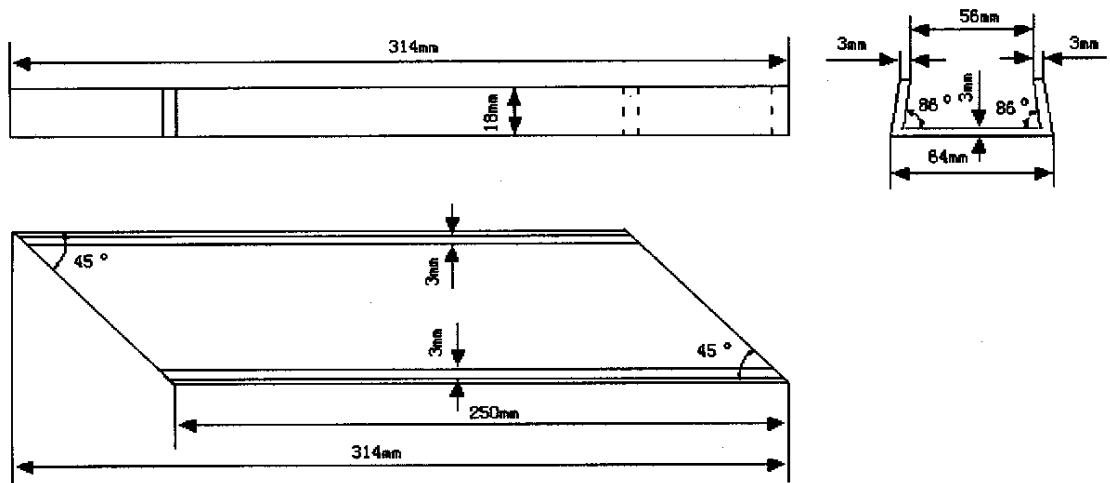


图 3-2 铝壳部件尺寸图

3.1.6 润滑块设计

润滑块在新型滑板中起到两方面的作用，第一、有良好的润滑性，在列车运行过程中对粉末冶金滑板进行充分的外部润滑。第二、承担一部分载荷，起到了支撑导线的作用。综合考虑这两方面因素，润滑块采用具有较高强度的高强石墨。

3.1.7 滑板整体配合的设计

为使高强石墨润滑块与粉末冶金铜滑板配合紧密，高强石墨与铜滑板分别采用倒正梯形结构（见图 3-3、3-4），在螺丝固定铜滑板后，依靠铜滑板和铝壳来固定高强石墨。

3.1.8 滑板尺寸的设计

考虑到现在使用的受电弓情况，为了使原来使用的受电弓仍可继续使用，新滑板设计的螺孔尺寸与受电弓螺孔尺寸相同，滑板长度与原来滑板长度相同，即固定安装方式不变。

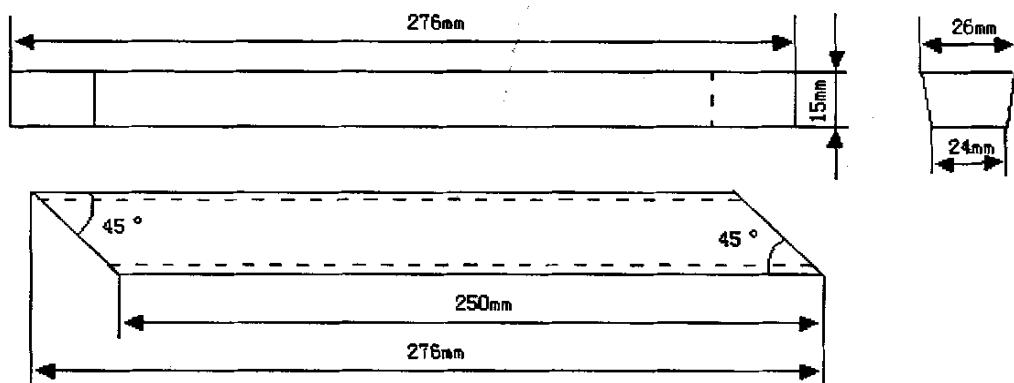


图 3-3 粉末冶金部件尺寸图

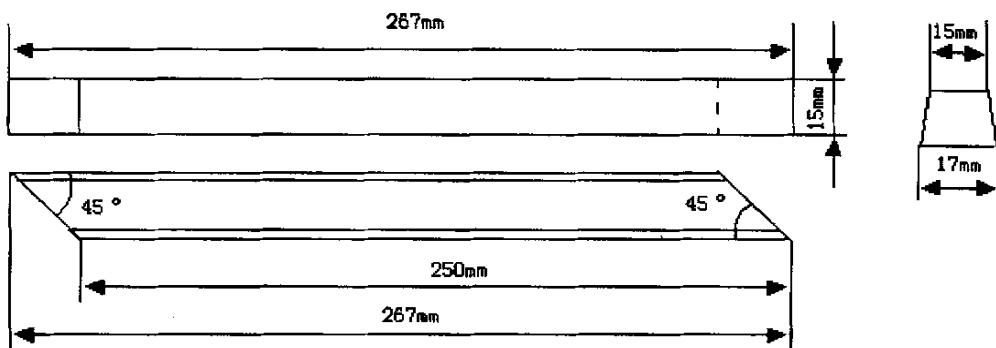


图 3-4 石墨部件尺寸图

在滑板使用过程中，最坏条件下，滑板与导线的接触可以看作是线接触，当滑板从导线受流时，可能会使导线局部产生过热，为避免导线过热，滑板应适当加宽。本设计中，粉末冶金铜滑板上顶宽 26mm，下底宽 24mm；高强石墨上顶宽

15mm，下底宽17mm；铝壳厚度为3mm，故滑板总宽度为62mm。该宽度一方面保证导线与滑板的良好接触，减少导线局部过热；另一方面，使滑板受流面积增加，受流能力增大，新型滑板最大受流可达900A以上（不考虑高强石墨受流）。

滑板的高度是根据滑板的使用寿命和磨耗比来确定的。因为该滑板应用于钢芯铝绞线和铝包钢线混架区，使用寿命要达到30000机车公里（一个辅修期）以上，据此所设计的滑板磨耗高度为10mm，考虑到滑板磨损到限后滑板仍有一定强度，所以滑板增厚5mm，加上铝壳厚3mm，滑板实际高度为18mm。

图3-5为双润滑滑板的装配图。

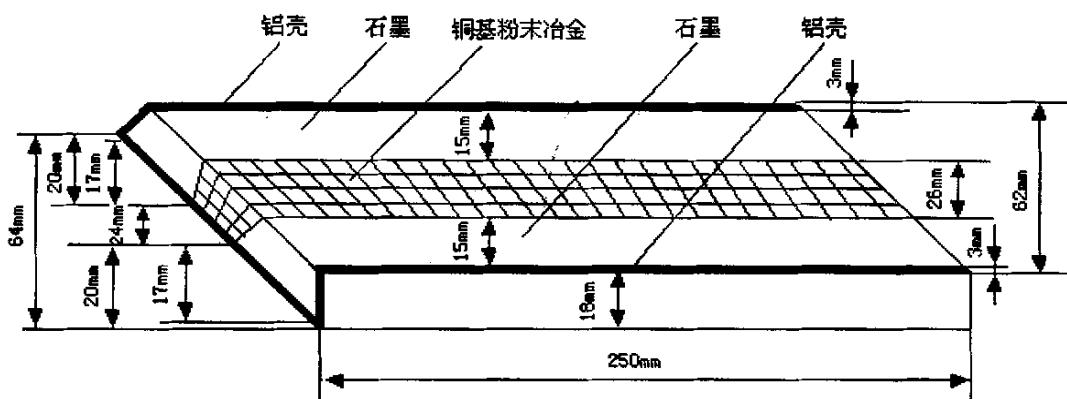


图3-5 装配图

3.2 双润滑滑板的试制

3.2.1 实验设备

实验材料：铜粉，纯度99.99%， $53\mu m$ ；锡粉， $74\mu m$ ；铝粉， $53\mu m$ ；石墨粉， $53\mu m$ ；高强石墨条；纯铝板，厚3mm；腐蚀剂为盐酸30mL、 $FeCl_3$ 70g、酒精120mL；

混料设备：自制粉末冶金混料设备、电子称、台式天平；

压制设备：YA32315型四柱式万能液压机；

烧结设备：DRZ9型电阻炉、密封箱；

润滑块成型设备：铣床、千分卡尺；

铝壳成型设备：剪床、划线仪、卷边机、千分卡尺；

整体装配设备：攻丝机、磨床。

3.2.2 双润滑滑板的试制过程

针对滑板的使用要求，粉末冶金滑板中必须有铜、锡、自润滑剂等成分，成品硬度值为 HB45—52。由于设定的硬度值范围小，这就对成分配比和工艺参数以及实际操作提出严格的要求。经过反复研究与试验，最终确定了最佳的成分配比与工艺参数。

3.2.2.1 第一次试制简介

(1) 成份：为获得良好的润滑效果，加入 $a_1\%$ （重量）石墨， $b_1\%$ （重量）锡， $c_1\%$ （重量）铜。

(2) 工艺参数：最大压力 2.3 吨，最高烧结温度 780°C，送温速度 50°C/小时，最高温度保温时间 5 小时。

(3) 模具制造：采用低碳钢，精加工后表面淬火。

(4) 试制结果与分析：

滑板制成功后，硬度 HB37—43，石墨粉分布均匀（金相检测）滑板与导线对磨时，滑板表面有大量石墨，润滑效果较好，但滑板的硬度值过低，冲击韧性不足。

滑板的硬度过低是由于石墨粉含量过多所致，石墨粉重量百分比为 $a_1\%$ 时，其体积百分比可达到 $4.5a_1\%$ ，过多的石墨粉使铜粉结合力不足，硬度低，冲击韧性不足。

3.2.2.2 第二次试制简介

(1) 成份：石墨粉 $a_2\%$ （重量），为保证润滑加入 $d_2\%$ （重量）铅， $b_2\%$ （重量）锡， $c_2\%$ （重量）铜。

(2) 工艺参数：最大压力 2.9 吨；最高烧结温度 815°C，送温速度 50°C/小时，最高温度保温时间 5 小时。

(3) 模具制造：由于压力提高，表层淬火的模具强度不足，故采用合金钢模具，整体淬火。

(4) 试验结果与分析：

滑板制成功后，硬度 HB 43—45.5，石墨粉分布均匀（金相检测），滑板与铝对磨时，润滑效果良好，冲击韧性提高。

但该滑板仍未达到设计硬度值，分析原因，石墨粉含量较高是一方面因素；

另一方面，烧结温度不足，锡未充分发挥其应有的强化作用，另外，送温过快也是产生该问题的原因之一。

3.2.2.3 第三次试制简介

(1) 成份：石墨粉 $a_3\%$ (重量)、锡 $b_3\%$ (重量)、铅 $d_3\%$ (重量)、铜 $c_3\%$ (重量)。

(2) 工艺参数：最大压力 2.9 吨，最高烧结温度 830°C ，送温速度 $30^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，最高温度时间 5 小时。

(3) 试验结果与分析：

滑板硬度 HB 45--47、石墨粉分布均匀，滑板与导线对磨时，润滑效果良好，滑板冲击韧性良好。

硬度值与设计硬度值仍有差距，分析原因，石墨粉含量微高，烧结温度稍微有些低。

3.2.2.4 第四次试制简介

(1) 成份：石墨粉 $a_4\%$ (重量)、锡 $b_4\%$ (重量)、铅 $d_4\%$ (重量)，其余为铜 $c_4\%$ (重量)。

(2) 工艺参数：最高压力 2.9 吨，最高烧结温度 850°C ，送温速率 $30^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，最高温度保温时间 5 小时，为确保滑板质量，此次试验采用原苏联产铜粉。

(3) 试验结果与分析：

滑板硬度，HB 46--51，石墨粉分布均匀，滑板与导线对磨时，润滑效果良好，磨面光滑，滑板冲击韧性良好。

经过前后近 10 次的试验，研制的双润滑铜基粉末冶金滑板终于达到预期设计要求并将准备到铁科院质量检验中心检测。

3.3 工艺路线

双润滑铜基粉末冶金滑板试制工艺路线如图 3—6 所示。

3.3.1 铜基粉末冶金滑板成型

3.3.1.1 选料

1、铜粉选择

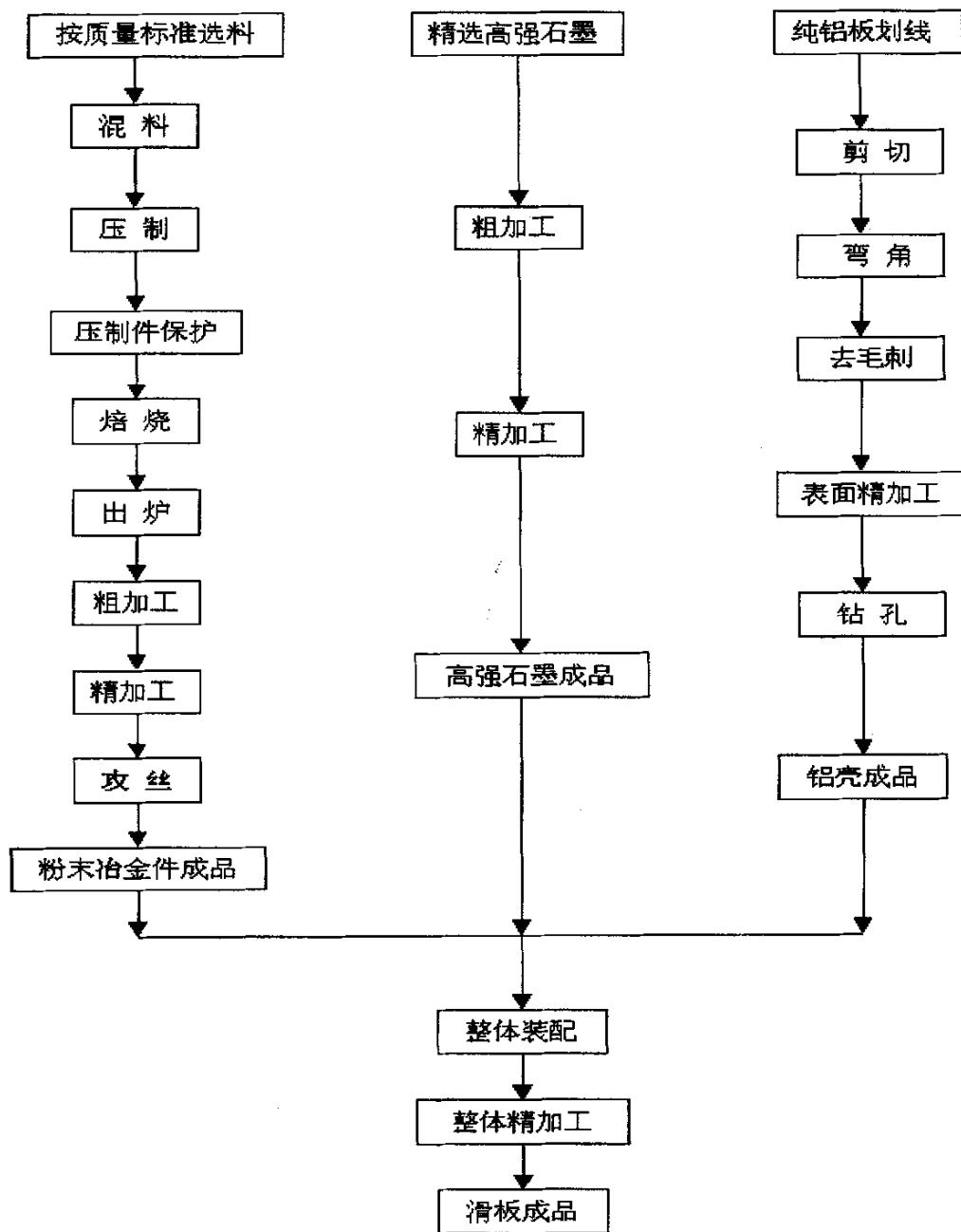


图 3-6 双润滑铜基粉末冶金滑板试制工艺路线图

- (1) 要求: 选用原苏联进口铜粉
- (2) 粒度: 300 目
- (3) 纯度: 99.95%以上

2、锡粉选择

- (1) 粒度: 300 目

(2) 纯度: 99.95%以上

3、石墨粉选择

(1) 粒度: 300 目

(2) 纯度: 99.5%

4、铅粉选择

(1) 粒度: 300 目

(2) 纯度: 99.9%以上

3.3.1.2 混料

1、主要设备与工具

混料机 电子秤 台式天平

2、工艺要求

混料前预热 混料时间 2 小时

3.3.1.3 压制

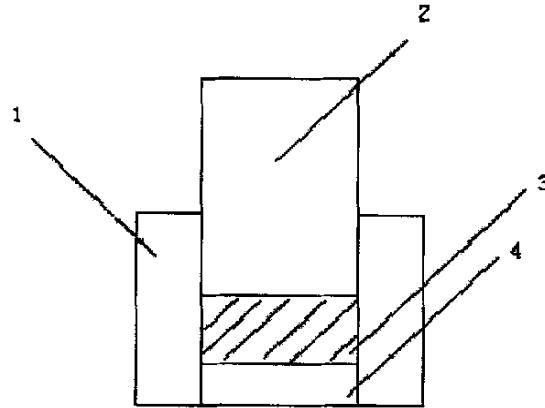
1、主要设备与工具

立式油压机

2、工艺要求

填料均匀, 保压时间 25 秒

粉末冶金压制示意图^[29](见图 3-7)。



1-阴模; 2上冲模; 3-粉末; 4-下冲模

图 3-7 试样压制示意图

3.3.1.4 烧结

烧结是粉末冶金中必不可少的工序, 也是最后一道主工序, 对烧结产品的性

能起着决定性的作用，同时也是粉末冶金中的高温作业，能耗最大的工序。通常随着压制压力的增大，烧结件的电阻率下降；随着保温时间的延长，烧结件的电阻率上升。增加烧结温度，引起烧结件的电阻率上升。烧结温度过高或过低对烧结件耐磨性和减摩性都不利。可见烧结在粉末冶金中起着至关重要的作用。图3-8是本试验的烧结工艺曲线^[29]，按该工艺曲线进行烧结的试件表面无低熔点元素跑、冒、飞溅现象，表面光洁，膨胀和收缩不明显，说明该烧结工艺曲线的加热速度、保温温度和时间是可行的，当然加热的最高温度不同，试件性能有所不同（本曲线取的是最高烧结温度850℃）。

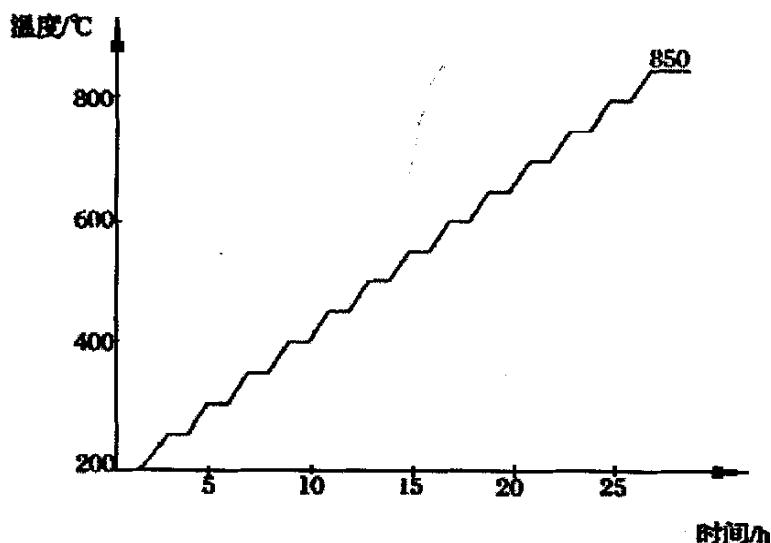


图3-8 烧结工艺曲线

1、主要设备与工具

电阻炉 密封箱

2、工艺要求

送温速率 30°C/小时，温度达到790°C时保温3小时，温度达到850°C时，保温5小时。降温时，断电后随炉冷却，温度低于100°C时出炉。

3.3.2 高强石墨润滑块成型

3.3.2.1 所用设备与工具

铣床 千分卡尺

3.3.2.2 工艺要求

加工后，石墨件表面光洁，无凹坑、毛刺等缺陷。

3.3.3 铝壳成型

3.3.3.1 选料

选用纯度 99%以上纯铝，纯度硬度 HB 32 以下。

3.3.3.2 所用设备与工具

剪床 划线仪 卷边机 千分卡尺

3.3.4 整体装配

3.3.4.1 所用设备与工具

攻丝机 磨床

3.3.4.2 工艺要求

整体装配后，在粉末冶金铜滑板上按设定尺寸攻丝，拧上螺栓后，进行整体精加工，得到成品。

4 双润滑铜基粉末冶金滑板性能检测及改制

4.1 一般性检查

主要包括下面几项：

1、外观检查

主要包括样品形状、表面质量、颜色、粗糙程度的检查，检查方法为目测；

2、结构检查

主要包括零部件结构、电气装配、机械装配是否合理等的检查，检查方法为目测；

3、尺寸检查

主要包括铝包外壳尺寸及夹角、铜基粉末冶金滑条上下部分尺寸、金属滑条两侧高强石墨润滑剂上下尺寸、螺孔及螺栓是否标准等的检查，检查方法采用游标卡尺、测角仪或量角器等仪器。

以上项目检查都符合图纸技术要求。

4.2 组织检测

进行微观组织检查设备为：0—4号砂纸，抛光膏（三氧化二铬），LP76—1型金相抛光机，XTL—立式金相显微镜，腐蚀剂（盐酸30毫升，三氯化铁70克，酒精120毫升）。

暴光时间为50秒。

放大倍数为400倍。

经能谱和X射线检测后，大准铁路以前使用的滑板主要成份为铜和锌，自润滑剂几乎没有，双润滑铜基粉末冶金滑板显微组织照片见图4-1（合格产品的金相组织见图4-1，不合格产品的金相组织见图4-2）。从扫描照片中可见，双润滑铜基粉末冶金，滑板组织均匀，并且含有大量石墨粉，石墨粉在摩擦过程中起到了良好的自润滑作用。金相组织检查结果符合规定的技术要求。

4.3 性能检测

4.3.1 导电性能检验

仪器为 QJ—36 型电桥, 20℃电阻率应 $\leq 0.3 \mu \Omega \cdot m$ 。经实验室检测电阻率为 $2.020 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 。

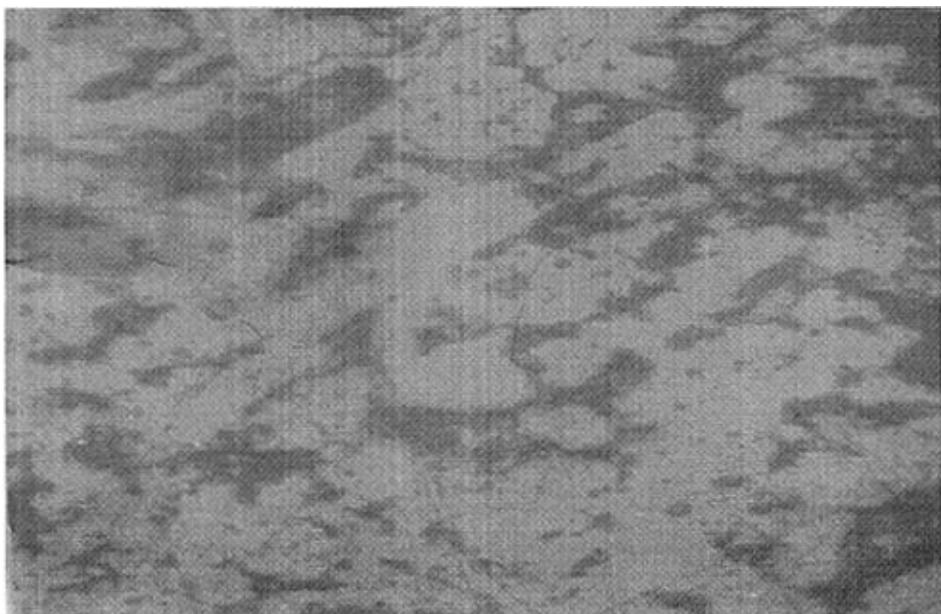


图 4-1 合格产品的金相组织

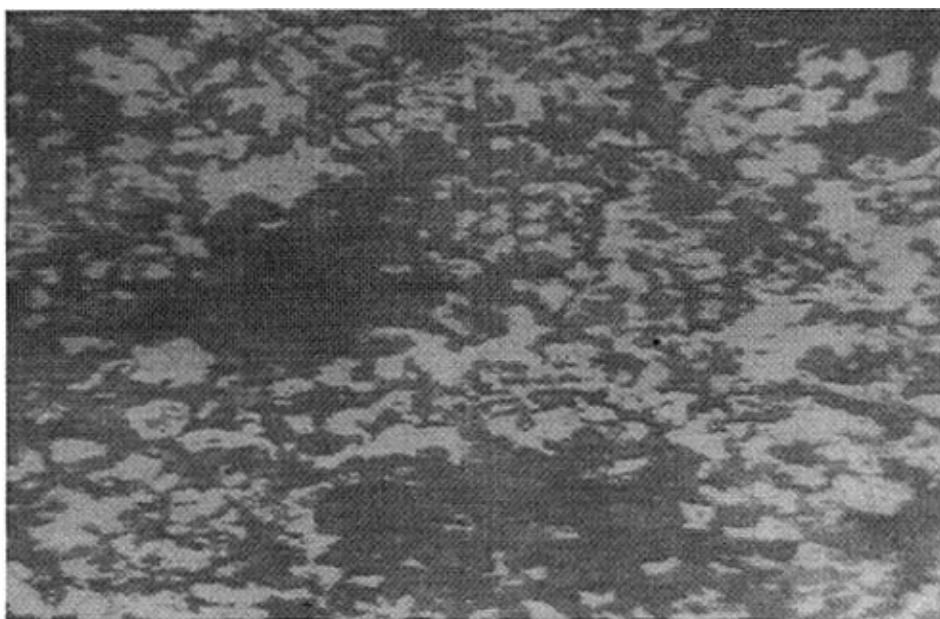


图 4-2 不合格产品的金相组织

4.3.2 硬度检查

采用 HB—3000 型布氏硬度计，铜基粉末冶金滑板的布氏硬度为 HB45—52，平均显微硬度值为 107。

4.3.3 滑板寿命及与铝包钢接触线磨耗实验室检测

研制的双润滑铜基粉末冶金滑板在铁道部产品质量监督检验中心接触网零部件检验站进行磨耗试验，温度为 16.5℃，湿度为 27%，双润滑铜基粉末冶金滑板质量检验报告结果如下：

- (1) 接触线磨耗比为 0.048 平方毫米/万弓架次，导线标称截面积为 260 平方毫米；
- (2) 滑板磨耗比为 10.82 毫米/万机车公里，滑板原始高度为 18.03 毫米，磨耗后剩余高度 17.52 毫米；
- (3) 滑板重量磨耗比为 202.23 克/万机车公里；
- (4) 导线换算到实际使用的万弓架次为 146 万弓架次；
- (5) 滑板换算到实际使用的万机车公里为 7.7 万机车公里。

磨耗用接触导线为 FGLC—260—1 型铝包钢（绞线）接触导线，试验时速度为 70km/h，通电电流为 300A，导线与滑板接触压力为 70N。

可见滑板具有较高的使用寿命，与铝包钢接触线达到了良好配合^[30]。

4.3.4 滑板与铝绞线摩擦表面状态对比

从图 4-13（见附件）的摩擦表面状态对比照片中可以看到，大准铁路以前使用的铜基粉末冶金滑板上，表面状态特别粗糙，粘附大量铝，并且磨过后的滑板厚度不均。双滑铜基粉末冶金滑板，磨过后滑板表面光洁，没有粘铝现象，并且滑板磨过后厚度均匀。这说明以前使用的滑板由于本身自润滑剂含量特别少，滑板自润滑效果差。且同一块滑板硬度不均，经实际检测，同一块硬度值分别为 HB68—74 不等。而双润滑铜基粉末冶金滑板，由于自身含有大量自润滑剂，再加上外部双润滑。所以减磨效果良好，且自身硬度均匀，同一块滑板硬度值为 HB46—51，所以磨耗效果良好（硬度值为辽宁工程技术大学力学性能实验室检测

值)。

4.4 工业性运行试验

用研制的双润滑铜基粉末冶金滑板代替浸金属铜基粉末冶金滑板,在SS3668机车上安装试验,通过近3个月的现场工业试验,得到运行检测记录如表4-1所示。

表4-1 双润滑滑板运行检测记录

记录时间	公里数 (km)	滑板磨耗高度 (mm)	有无偏磨	润滑条有无破损	备注
8月12日至8月13日	0				兰西中修回来
8月13日至8月20日	3987	0.16	有	无	更换弹簧
8月21日至8月29日	4853	0.24	无	无	
8月30日至9月3日	1807	0.1	无	无	
9月4日至9月10日	4169	0.24	无	无	
9月11日至9月17日	2349	0.16	无	无	
9月18日至9月25日	6330	0.85	无	无	
9月26日至10月1日	4211	0.7	无	无	
10月2日至10月9日	5721	1.1	无	无	
10月10日至10月20日	7042	1.25	无	无	
10月21日至10月28日	5982	1.17	无	无	
10月29日至11月3日	4049	1.1	无	无	
合计	50500	7			

注: 公里数为总走行, 滑板运行公里数为总走行除以2, 即25250km

根据双润滑粉末冶金滑板自身特点及工业试验结果, 可以得出如下结论:

(1) 结构上特点:

双润滑铜基粉末冶金滑板采用铝包双润滑结构, 两侧为高强石墨, 中间为铜基粉末冶金滑板, 无论机车向哪个方向运行, 润滑条都能对铜基粉末冶金滑板和铝接触线给予充分的润滑, 充分保护了导线并延长了滑板的使用寿命。而现在用的浸金属铜基粉末冶金滑板采用单润滑结构, 润滑效果要逊于双润滑结构。

(2) 两种滑板表面状况比较:

双润滑铜基粉末冶金滑板在使用过程中表面光滑, 没有铝的粘着现象, 而浸金属铜基粉末冶金滑板表面粘附大量的铝, 说明对导线刮磨严重。

(3) 滑板内部成分结构:

除外部双润滑外, 铜基粉末冶金滑板内部采用加入锡、石墨、铅等合金元素, 其中石墨和铅都起到自润滑作用, 可延长滑板与导线的使用寿命。

(4) 滑板的物理特性

双润滑滑板的硬度为 HB45—50，铝接触网的硬度为 HB36—42，可与导线达成良好配合并延长导线的使用寿命，而浸金属铜基粉末冶金滑板硬度为 HB68—76，远远大于铝接触网导线的硬度，没有形成良好的配合。

(5) 滑板的使用寿命

通过近三个月的工业实验，滑板已磨耗 7mm，运行 2.525 万机车公里，通过计算，双润滑滑板每运行 1 万机车公里磨耗 3.11mm。现滑板还剩 11mm，可磨耗 6mm，还能运行 1.9292 万机车公里，故滑板的使用寿命为 4.4542 万机车公里，大于一个辅修期的上限 3 万机车公里。而浸金属铜基粉末冶金滑板的使用寿命为 1.7 万机车公里。

(6) 接触网导线使用寿命预测

根据铁道部产品质量检测中心接触网导线可通过 146 万弓架次。按目前西部铁运的运输状况每天最多可通过 60 弓架次，最少可运行 67 年，远大于要求的 15 年以上。

4.5 双润滑铜基粉末冶金滑板的改制

研制的双润滑铜基粉末冶金滑板通过工业性运行实验后，按照神华西部铁路运输股份有限公司机务段提出的“建议滑板重量减轻，受电弓两边的滑板的厚度应与弯角的厚度一致”的建议，对滑板进行了改制。

4.5.1 改制的原则

- 1、保持滑板的双润滑结构不变；
- 2、对铜基粉末冶金及高强石墨材质不做改动。

4.5.2 改制的方法

滑板的整体厚度变薄，整体宽度变窄。

4.5.2.1 滑板外壳的改制

为固定润滑块和保证润滑块与滑板充分接触，润滑块外侧仍采用加外壳方式进行固定，外壳的形状及尺寸见图 4—3，长边为 248mm，底部宽为 58mm 而宽度为 50mm，外壳厚度为 3mm，其中外壳底部与壳壁夹角为 86°。

在设计外壳时充分考虑到外壳硬度应该低于 FGLC—260—1 型铝包钢（绞

线), 同时外壳应该具有足够的强度, 以防在列车运行时将外壳拉开这两方面因素, 故外壳选用硬度 HB 低于 32 的纯铝, 纯铝的厚度为 3mm。

4.5.2.2 铜基粉末冶金部件及高强石墨的改制

铜基粉末冶金部件从下底面在厚度上去掉 3mm, 上顶宽仍为 26mm, 下底宽为

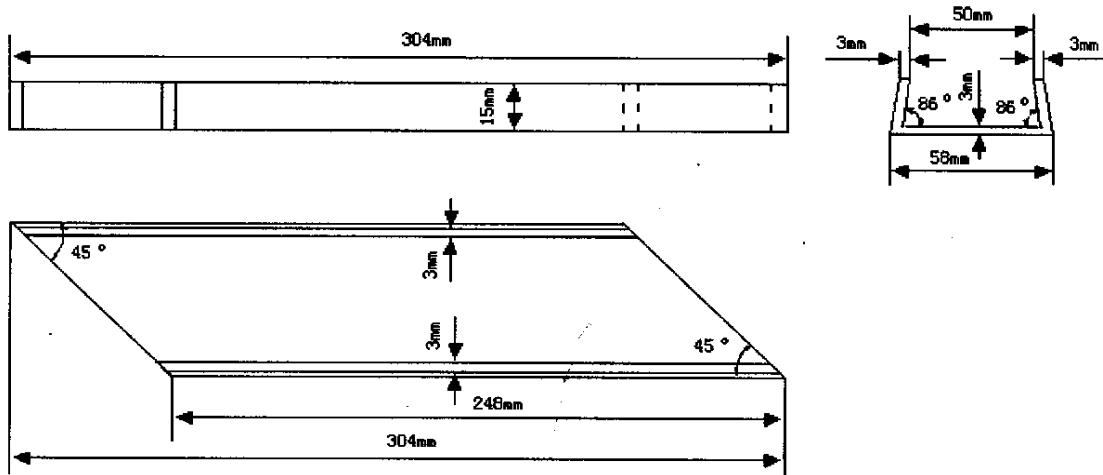


图 4—3 铝壳部件尺寸图

24.4mm, 尺寸见图 4—4; 高强石墨上顶宽 12mm, 下底宽 13.8mm, 尺寸见图 4—5;

铝壳厚度为 3mm, 故滑板总宽度为 56mm。该宽度一方面仍能保证导线与滑板的良好接触, 减少导线局部过热; 另一方面, 使滑板受流能力不变, 新型滑板最大受流可达 900A 以上 (不考虑高强石墨受流)。

4.5.2.3 改制后的整体配合尺寸见图 4—6。

4.5.2.4 受电弓两边滑板的改制

为了使受电弓两边的滑板的厚度与弯角的厚度一致, 并且过渡平缓均匀, 保证接触导线经过此处时不造成阻卡现象。对边部使用的滑板进行了改制, 主视图如图 4—7 所示。

改制后每块滑板重 0.75kg, 改制前每块滑板重 1.05kg, 比原来每块减少了 0.3kg, 用改制后的滑板安装好的受电弓重为 10.75kg, 比原使用的受电弓 (9.8kg) 重约 1kg。弓头支持装置弹簧及升弓弹簧不用更换即可满足要求。至于改制后的滑板的使用寿命, 按改制前滑板的工业性运行结果, 滑板每运行 1 万机车公里磨耗 3.11mm 进行换算, 改制后的滑板的使用寿命为 3.4896 万机车公里, 大于一个辅修期的上限值 3 万机车公里。

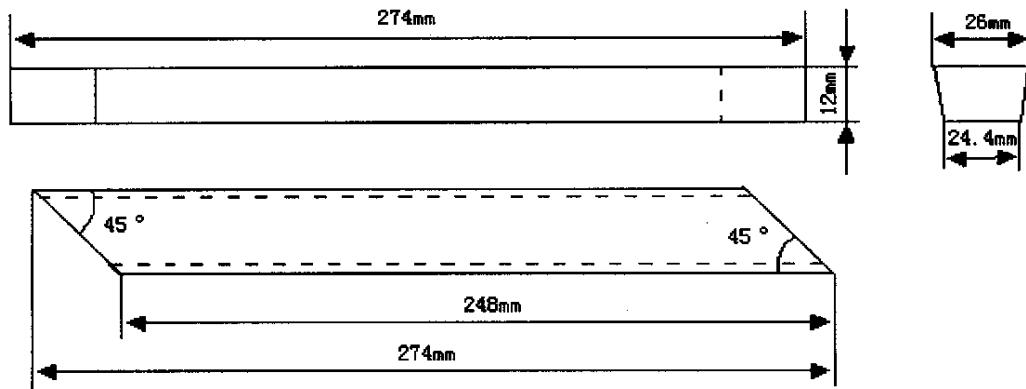


图 4—4 粉末冶金部件尺寸图

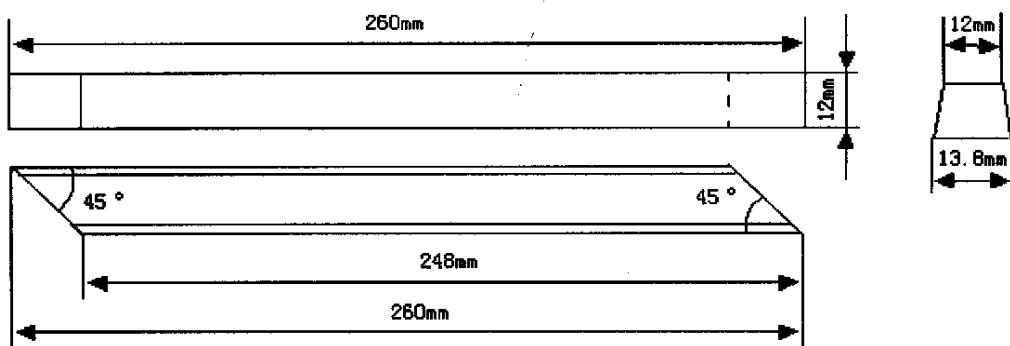


图 4—5 石墨部件尺寸图

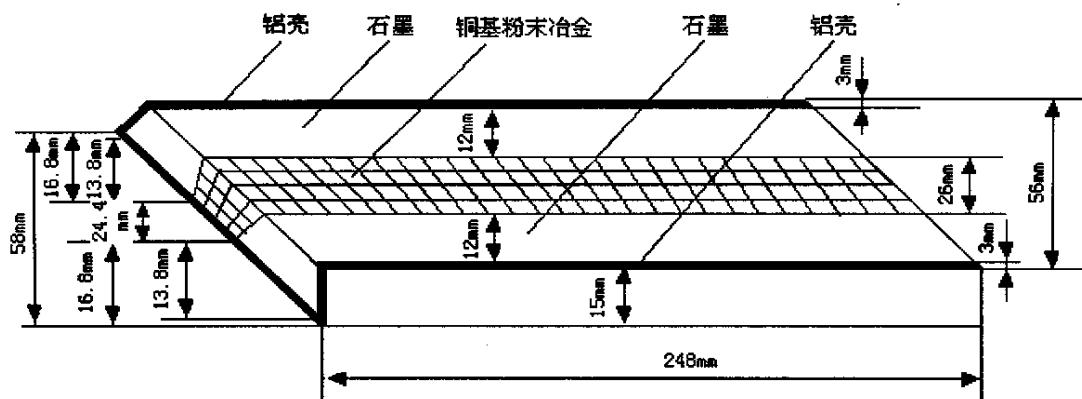


图 4—6 装配图

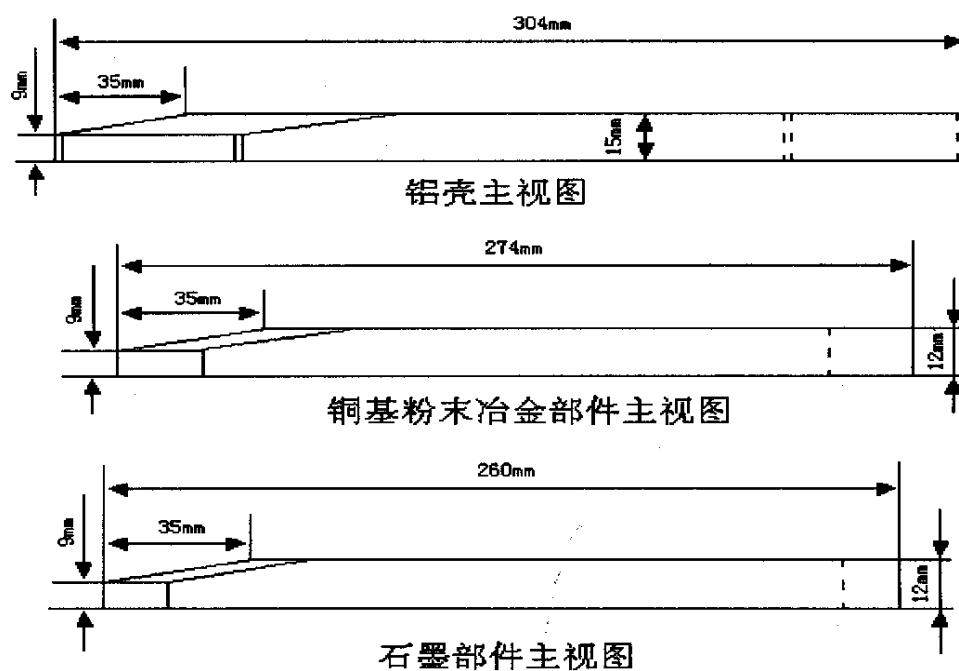


图 4—7 边部滑板铝壳、粉末冶金、石墨部件主视图

4.6 双润滑铜基粉末冶金滑板的应用前景展望

进入 21 世纪后，我国在 2001 年一年就建成 3665.40km 电气化铁路，创造了世界电气化铁路建设速度的历史记录；2002 年又建成 1193.12km，还建成了我国第一条快速客运专线——秦沈线。至 2005 年止，我国电气化铁路里程约达 2 万公里，位居亚洲第一、世界第三，仅次于俄罗斯和德国，成为世界电气化铁路大国。我国的接触网导线主要采用铜、钢铝和铝合金三种接触网导线，新建电气化铁路将大部分采用铜接触网导线。铜接触网导线具有良好的导电率和较低的电阻率，有着广阔的应用前景。

双润滑铜基粉末冶金滑板是针对大准电气化铁路两种不同的接触网导线而设计的，其中大（大同）—丹（丹洲营）段采用的是 GLCN-250 型铝包钢接触导线，长约 64 公里，丹（丹洲营）—准（准格尔）段采用的是 FGLC—260—1 型铝包钢（绞线），长约 216 公里。经过实践证明，此滑板的各项性能都达到预期标准，具有内部自润滑、耐磨、减磨、耐腐蚀、耐高温、承载电流大等特点。双润滑铜基粉末冶金滑板在结构具有独创性，从护线和增加滑板使用寿命等目的出

发，为了使滑板耐磨、耐热、耐蚀而又能减磨，在滑板成分中按优化比例加入了铅、锡、石墨等材料；为了加强对滑板的外部润滑，减少滑板与导线的磨损，在结构上创造性地采用了双侧润滑；此外，该滑板在润滑块、外壳、整体配合、滑板尺寸等方面都进行了优化设计。

研制的双润滑铜基粉末冶金滑板实验证明其与铝接触网导线具有优良的电接触特性，但对大量使用铜接触网导线的国铁干线是否适用还需进行大量的实验研究。初步分析认为，双润滑铜基粉末冶金滑板改变硬度值等性能指标后即可用于各种铜接触线、铜合金接触线，具有推广价值。这种双润滑结构及自滋润性能将使导线的磨耗大大降低，推广后将带来十分巨大的经济效益和社会效益。

将来还需要对双润滑滑板与铜接触导线配合的可行性进行深入研究，进一步完善上述研究成果，丰富电接触理论，指导滑板材料的研制和生产。

附件：

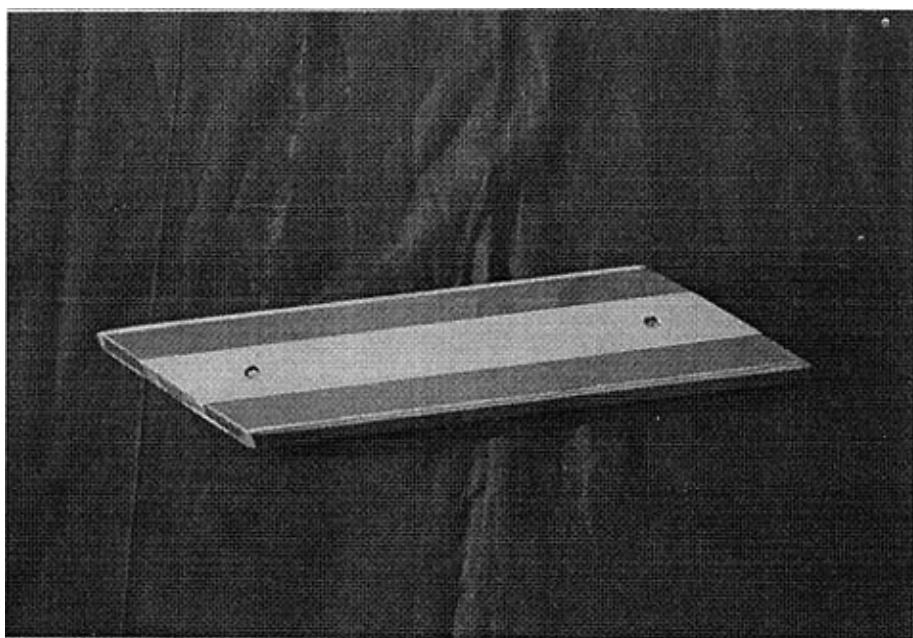


图 4—8 研制的双润滑铜基粉末冶金滑板

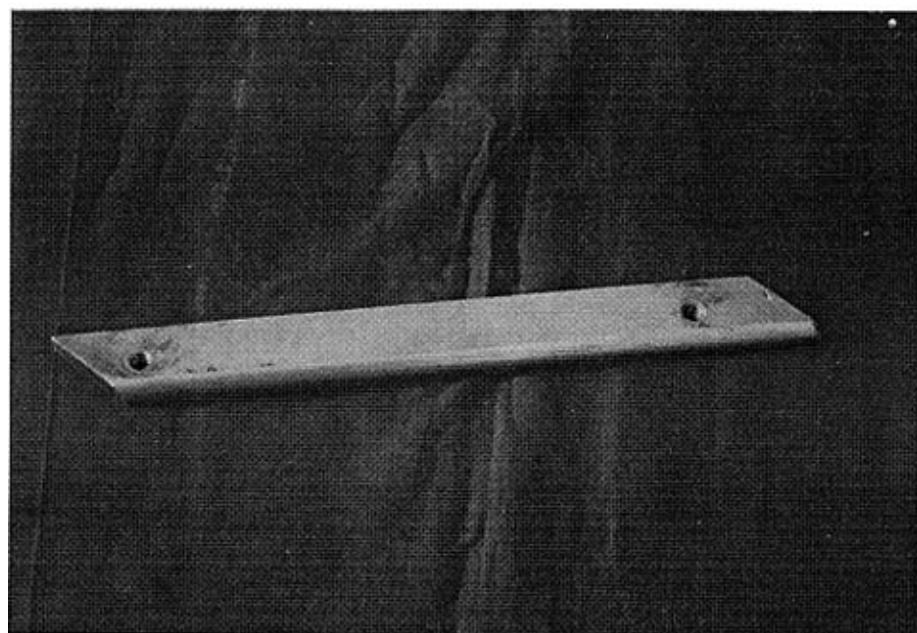


图 4—9 现使用的铜基粉末冶金滑板

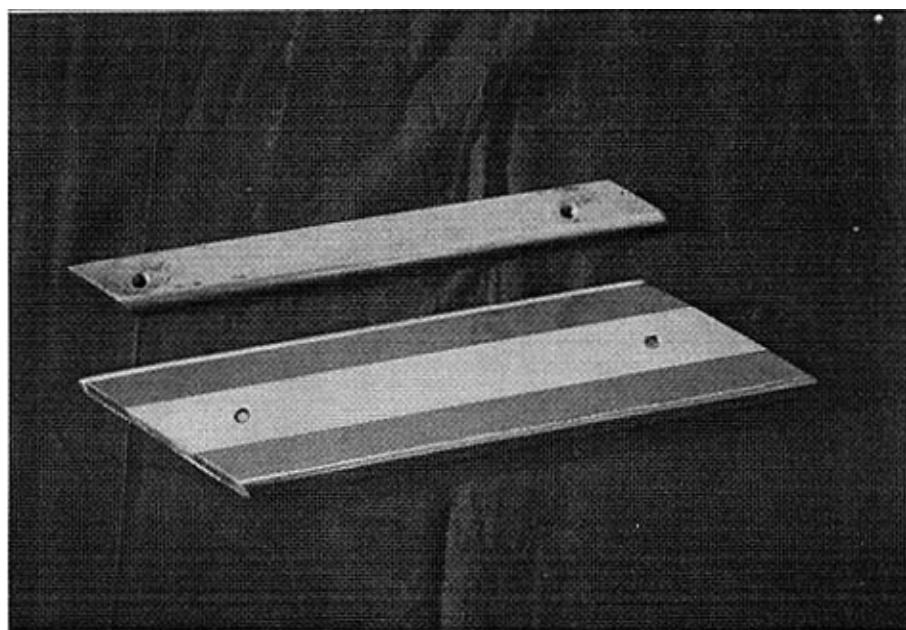


图 4-10 两种滑板外形对比

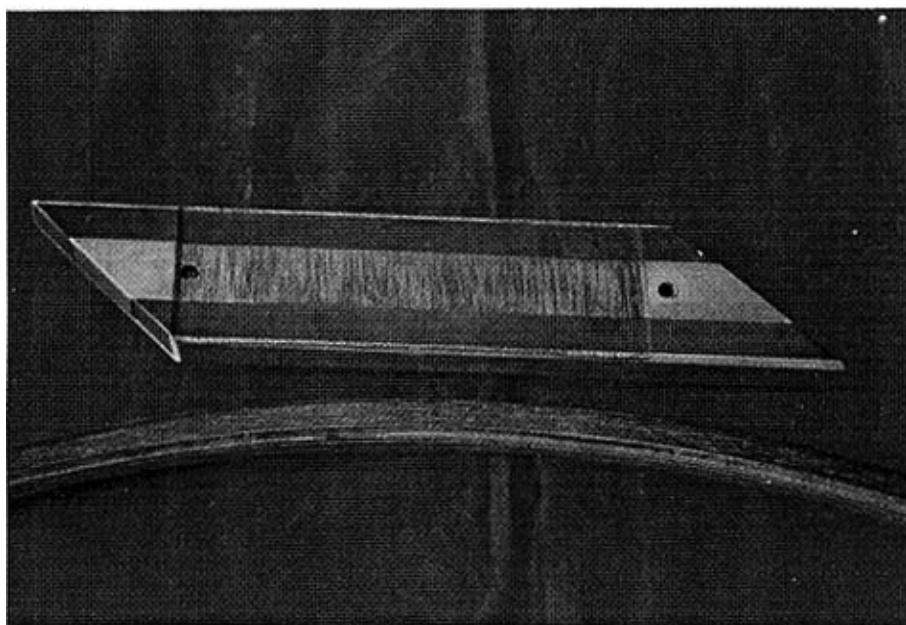


图 4-11 磨耗试验后的滑板和导线

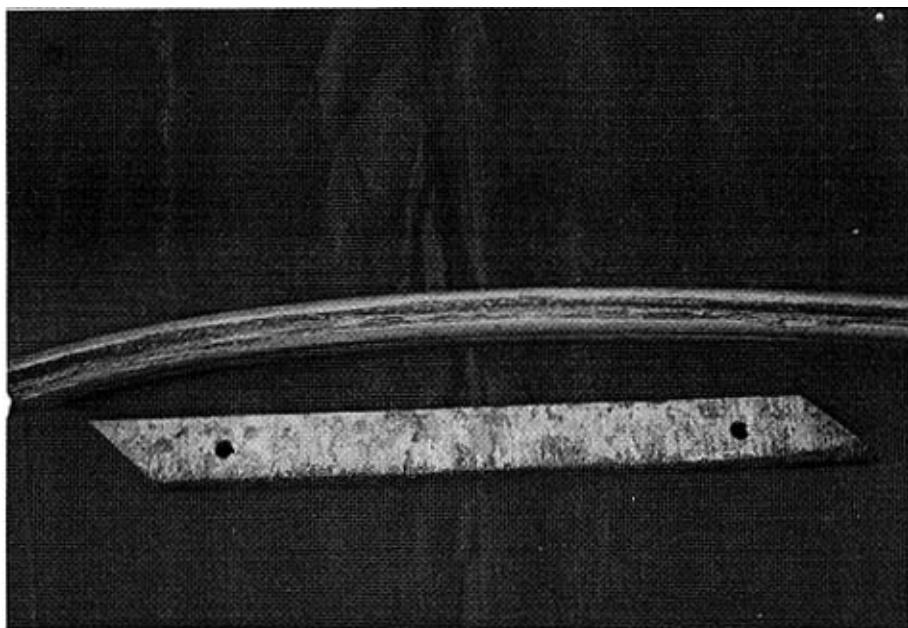


图 4-12 现场使用后的滑板和导线

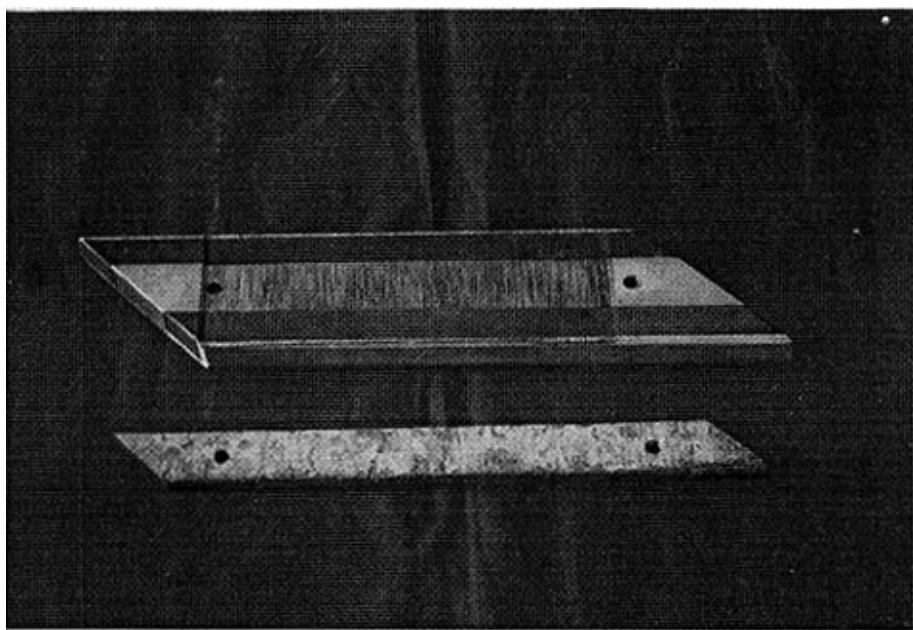


图 4-13 两种滑板与导线磨耗后表面对比

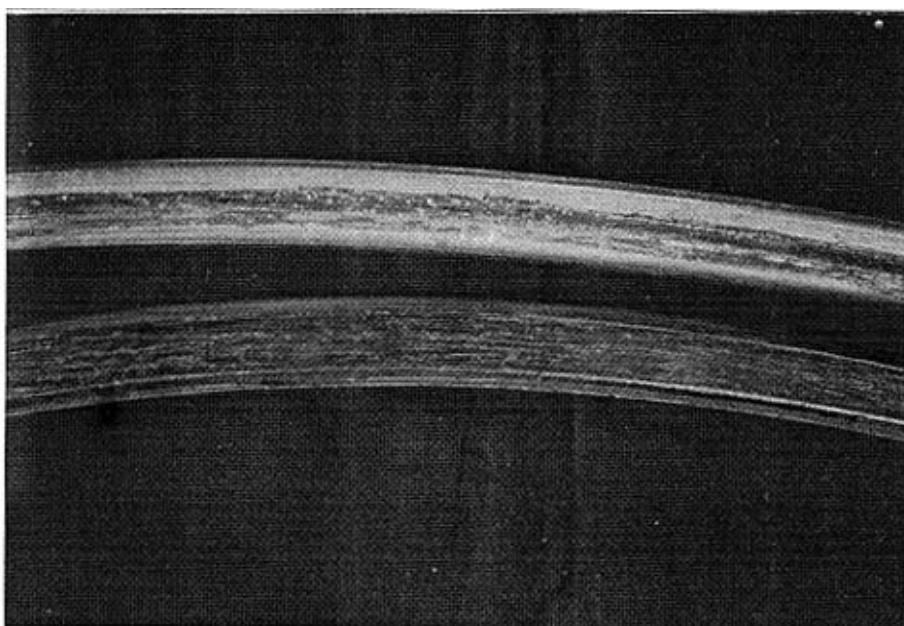


图 4-14 导线与两种滑板磨耗后表面对比
(下边为与研制的滑板磨耗后的导线)

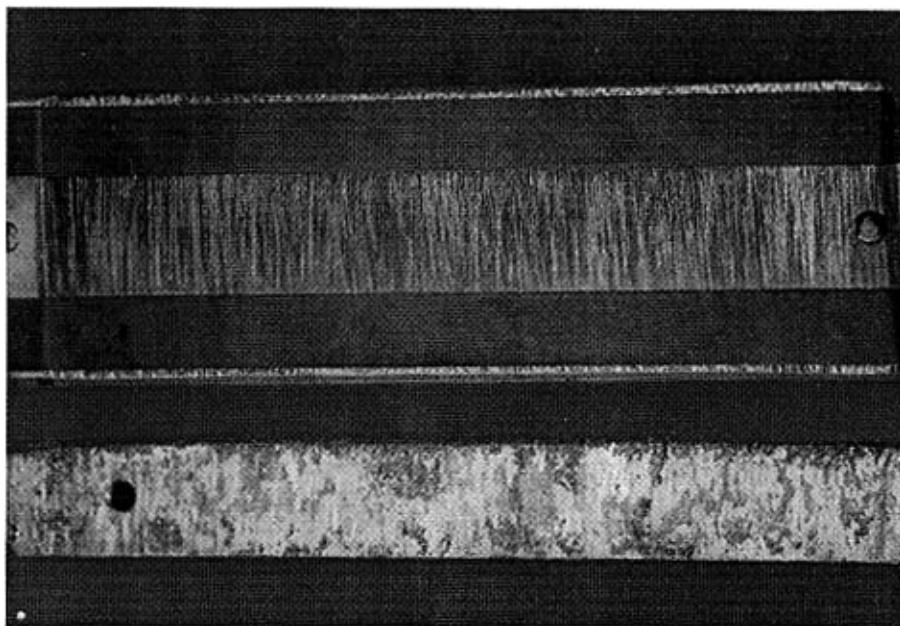


图 4-15 两种滑板与导线磨耗后表面对比

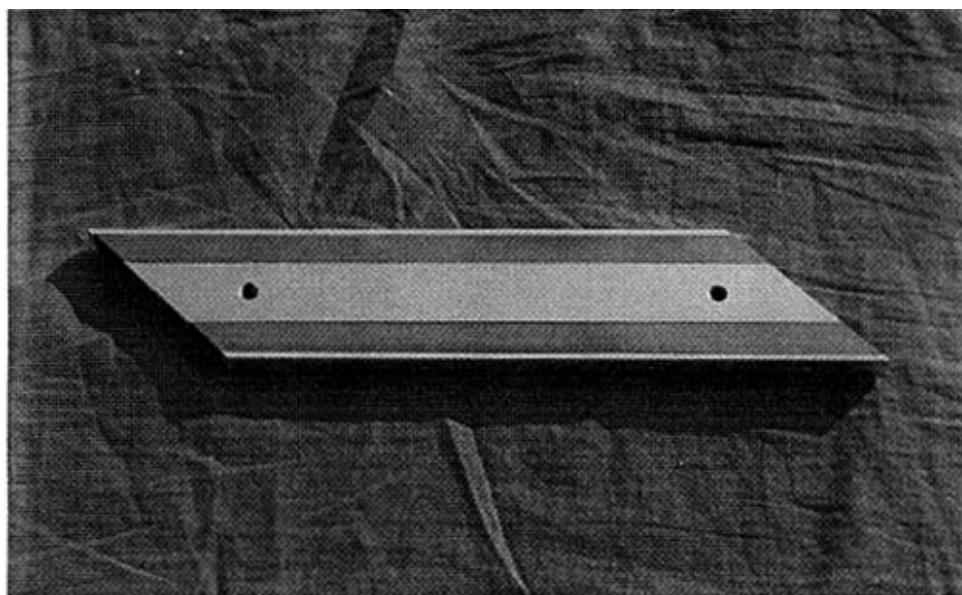


图 4-16 改制后的滑板

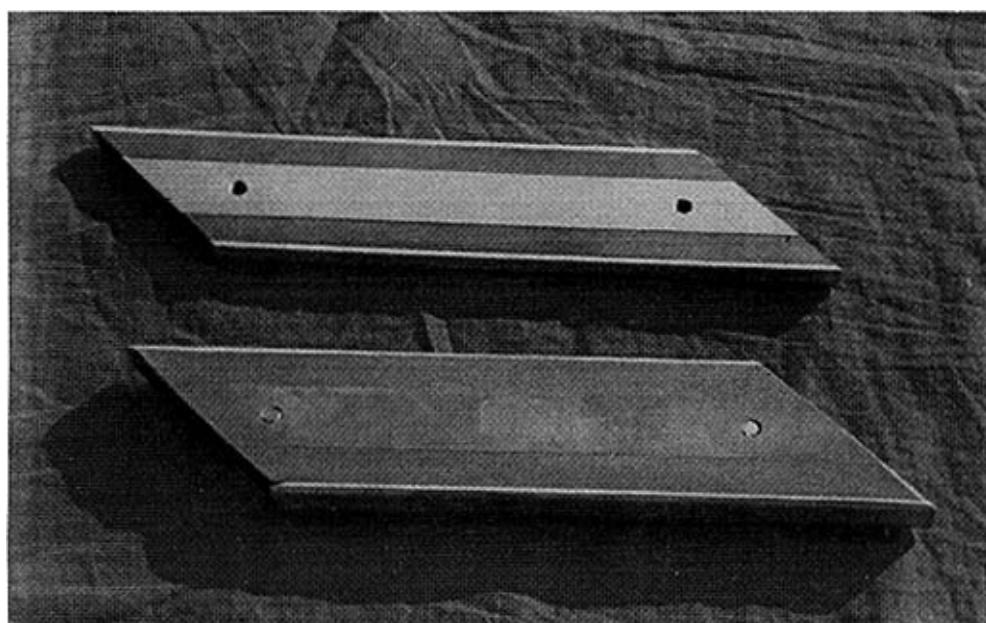


图 4-17 改制前后滑板的对比
(上边为改制后的滑板)

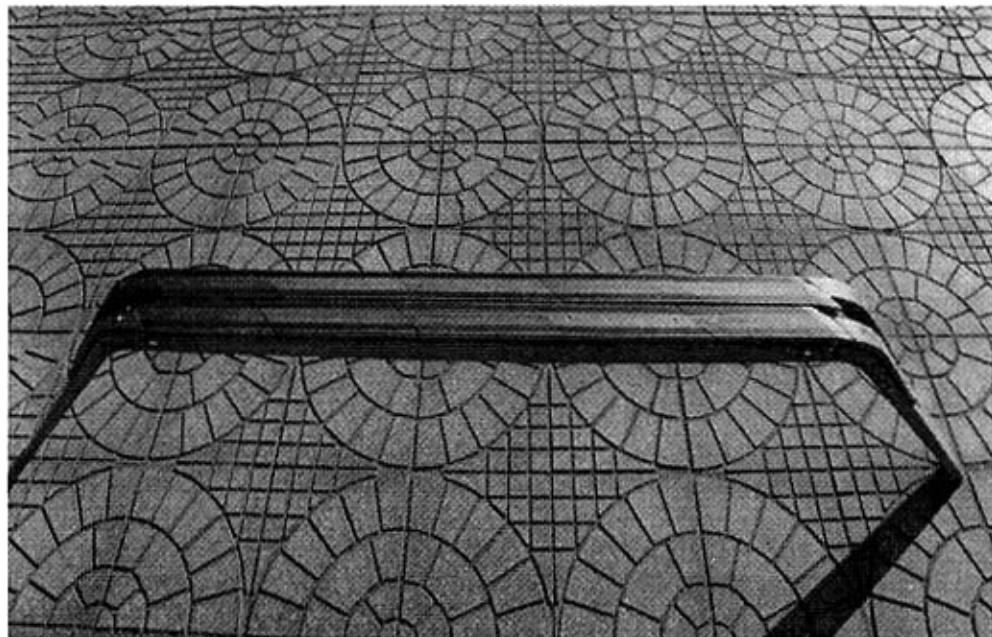


图 4-18 滑板改制后安装好的受电弓

5 结论

本文在对电接触理论、金属材料学、电弧等离子体等基本理论学习的基础上，分析了电力机车受电弓滑板与接触网导线相互作用规律。分析发现，改善润滑效果是降低机械磨损的有效办法，而为了降低电气磨损，除了在滑板材料中添加高温下抑制材料转移的元素及选用低电阻、高熔点的材料外，同时还要通过选择合理的成分和配比，抑制电弧的产生和扩大，提高材料的抗熔焊性能。由此，结合理论论证并考虑经济成本，研制了一种新型双润滑铜基粉末冶金滑板。

针对大——准电气化铁路铝接触网导线与滑板不能匹配、导线磨耗大、缩短了接触线的运行寿命等问题，对受电弓滑板与接触网导线相互作用进行了分析，开展了滑板结构、材料等方面的研究。研究发现造成这一现象的原因是铝接触线与滑板的硬度值相差太大。由于大一准铁路的铝接触导线本身存在的问题，目前国内主要使用的铜基粉末冶金滑板和浸金属碳滑板均不适用于该类接触网导线。因此，从护线和增加滑板使用寿命等目的出发，研发了双润滑铜基粉末冶金滑板。为了使滑板耐磨、耐热、耐蚀而又能减磨，在滑板成分中按优化比例加入了铅、锡、石墨等材料；为了加强对滑板的外部润滑，减少滑板与导线的磨损，在结构上创造性地采用了双侧润滑；此外，该滑板在润滑块、外壳、整体配合、滑板尺寸等方面都进行了优化设计。主要特点如下：

(1) 结构上

双润滑铜基粉末冶金滑板采用铝包双润滑结构，两侧为高强石墨，中间为铜基粉末冶金滑板，无论机车向哪个方向运行，润滑条都能对铜基粉末冶金滑板和铝接触线给予充分的润滑，充分保护了导线并延长了滑板的使用寿命。

(2) 内部成分

除外部双润滑外，铜基粉末冶金滑板内部采用加入锡、石墨、铅等合金元素，其中石墨和铅都起到自润滑作用，可延长滑板与导线的使用寿命。

(3) 物理特性

双润滑滑板的硬度为 HB45—50，铝接触网的硬度为 HB36—42，可与导线达成良好配合并延长导线的使用寿命。

该产品经铁道部产品质量监督检验中心验证和现场工业性试验证明，滑板具

有优异的技术性能，寿命大大增加，各项指标均超过技术任务书规定的要求，在矿区电气化铁路运输中能发挥较大作用。

将来还需要对双润滑滑板与铜接触导线配合的可行性进行研究，揭示双润滑滑板与接触导线这对特殊摩擦副之间滑动接触下的电接触特性。对双润滑滑板电接触特性进行深入研究可以进一步完善原已取得的研究成果，丰富电接触理论，指导适合不同接触导线的性能优异滑板的研制和生产。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1]Design and Realization of A New Type Pantograph Contact Strips, ICEE2005, EM1-02 ICEE-C0139 (A-36) .
- [2]银基触头材料电弧侵蚀特性及裂纹形成机理分析(英文),中国电机工程学报,2004年,第29卷,第9期。
- [3]新型受电弓滑板的设计与实现,煤炭科学技术,2005年,第33卷,第3期。

致谢

本论文是在导师郭凤仪教授的悉心指导下完成的。导师科学的思维方式、严谨的治学态度、丰富的知识经验使我受益匪浅，在此致以最衷心的感谢！

此课题（电力机车受电弓滑板材料的优化研究）是在课题组全体成员共同努力之下完成的，特别是陈忠华副教授，在实验过程中做了大量工作，在论文的完成过程中，给予了热情的帮助和指导，在此表示衷心的感谢。另外，神华集团准格尔能源有限责任公司、阜新电炭厂、铁道部产品质量监督检验中心等单位在课题完成过程中提供了较大帮助，在此一并表示感谢。

最后，向参加论文审阅、论文答辩的有关专家、教授和老师及所有帮助过我的老师、朋友和同学表示感谢！

参考文献

- [1] 荣命哲编著, 电接触理论, 机械工业出版社, 2004
- [2] 吴南屏编, 电工材料学, 机械工业出版社, 1993
- [3] 堵永国, 张为军, 胡君遂, 电接触与电接触材料(一), 电工材料, 2005. 2
- [4] 钱宝光, 耿浩然等, 电触头材料的研究进展与应用, 机械工程材料, 2004. 2
- [5] 程礼椿, 具有自润滑性能的滑动电接触用新型复合材料, 电工合金, 1994. 4
- [6] 王贵青, 陈敬超, 孙加林, 电力机车受电弓滑板的研究状况及发展趋势, 材料导报, 2003. 1
- [7] 迁村太郎, 滑板用材料, 国外机车车辆工艺, 2000. 1
- [8] 青木纯久, 高速铁道车辆用受电弓滑板的现状与存在问题, 国外机车车辆工艺, 1994. 3
- [9] 潘连明等, 电力机车受电弓滑板, 机车车辆工艺, 2001. 3
- [10] 李娜, 张弘, 于正平, 受电弓滑板—接触导线摩擦磨损机理与特性分析, 中国铁道科学, 1996. 12
- [11] 刘建军, 朱波, 王成国, 电力机车受电弓滑板的技术现状, 机械工程师, 2003. 10
- [12] 温诗铸, 黄平编, 摩擦学原理, 清华大学出版社, 2002
- [13] 徐春园, 张思成, 陈卫华, 电车线材料的干滑动摩擦磨损研究现状, 甘肃科技, 2005. 5
- [14] 贺亚卿, 大风情况下接触网——受电弓故障分析, 内蒙古科技与经济, 2004. 18
- [15] 松山晋作, 受电弓的受流摩擦学, 电力牵引快报, 1997. 1
- [16] 丁红卫等, 机车受电弓用新型粉末冶金滑板, 电工材料, 2002. 1
- [17] 戴利民, 林吉忠等, 受电弓滑板受流摩擦中体温升的模拟计算分析, 铁道学报, 2002. 5
- [18] 胡建红, 铜基受电弓滑板成分优化及组织性能研究, 昆明理工大学 2004 年 硕士论文
- [19] 刘鉴洋, 电力机车受电弓滑板三十年发展情况, 铁道机车车辆, 1992. 1
- [20] 梅桂明, 张卫华, 刘红娇, 不同结构类型接触网动态特性, 交通运输工程学报, 2002. 2
- [21] 刘红娇, 受电弓机构几何参数优化与主动控制的研究, 西南交通大学, 2002 年硕士论文
- [22] 吴天行, 弓—网高速动态受流仿真研究, 铁道学报, 1996. 4
- [23] 吴天行, 接触网的有限元计算与分析, 铁道学报, 1996. 3
- [24] 于涤, 高速接触网受流的理论分析, 铁道学报, 1998. 5

- [25] 王宁, 单圣熊, 受电弓与接触网间接触压力的分析, 电气化铁道, 2000. 2
- [26] 连级三主编, 电传动机车概论, 西南交通大学出版社, 2001
- [27] 梅志红, 王冰容, 邓文华, 接触网受流质量综合评价手段的研究, 华东交通大学学报, 1997. 4
- [28] 赵明元, 杨绪红, 朱衡君, 中、高速受电弓设计初探, 电力机车技术, 2000. 2
- [29] 孙跃军, 仲伟深, 郭凤仪, 新型滑板的研制, 有色金属, 2003. 4
- [30] 陈忠华, 郭凤仪, 董讷, 仲伟深, 新型受电弓滑板的设计与实现, 煤炭科学技术, 2005. 3
- [31] 程礼椿主编, 电接触理论及应用, 机械工业出版社, 1988
- [32] 黄汉中, 李木林, 固体润滑材料在受电弓滑板上的应用, 粉末冶金技术, 1997. 1
- [33] 金永平, 郭斌, 铜基受电弓滑板试件电阻率和磨损性能研究, 哈尔滨工业大学学报, 2003. 4
- [34] 久保俊一, 碳系受电弓滑板的开发, 国外机车车辆工艺, 2000. 5
- [35] 迟春阳等, 电力机车滑板材料的发展, 碳素, 1999. 4
- [36] Shunichi KUBO 等, 金属—碳复合材料导电弓滑板的耐磨性, 国外机车车辆工艺, 1998. 6
- [37] Shunichi KUBO, Koji KATO, Effect of arc discharge on wear rate of metallized carbon contact strip sliding against copper trolley wire, Quarterly Reports of Railway Technical Research Institute, 1998. 3
- [38] Senouci A, Zaidi H, Frene J, et al, Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel, Applied Surface Science, 1999. 1
- [39] 刘建军, 朱波, 王成国, 碳纤维复合材料电力机车受电弓滑板的研制, 工程塑料应用, 2003. 8
- [40] 胡建红, 陈敬超等, 电力机车用滑动电材料的研究及其选用, 电工材料, 2004. 1