

新疆大学

硕士学位论文

短电弧机床关键技术—引流装置的研究与实现

姓名：丁国平

申请学位级别：硕士

专业：机械电子工程

指导教师：梁楚华

20070605

学位论文独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文系本人在导师指导下独立完成的研究成果。文中依法引用他人的成果，均已做出明确标注或得到许可。论文内容未包含法律意义上已属于他人的任何形式的研究成果，也不包含本人已用于其他学位申请的论文或成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本人如违反上述声明，愿意承担由此引发的一切责任和后果。

论文作者签名：

丁国平 日期：2007年6月5日

学位论文知识产权权属声明

本人的学位论文是在学期间在导师指导下完成的，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为新疆大学。

本学位论文属于：

保密 ，在 年解密后适用于本声明。

不保密 。

(请在以上方框内打“√”)

论文作者签名：

丁国平 日期：2007年6月5日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘要

特硬、超强、高韧性等难加工材料的表层去除加工始终是困扰机械制造业的难题之一，虽然目前可采用磨床、电火花加工机床以及碳弧气爆加工技术进行该类材料的表层去除加工，但都存在着很大的局限性。

属于我国原创技术的短电弧加工技术以其科学、经济、高效、低能耗、节省原材料、低噪声污染等技术特点，极大的提高了生产率，改善了工人的工作环境，有效的降低了工人的劳动强度，成为一种极具市场潜力、有着良好发展前景高效实用硬面材料加工技术。

本论文以昌吉市华胜机电加工部与首钢长白机械厂合作生产的“DHZ1604CG”型短电弧加工机床为例，对短电弧加工机床关键技术之一的短电弧机床引流系统进行了研究，包括对短电弧加工机床特种电源的工作特性分析，工具阴极和工件阳极引流装置工作状态的分析。对现有的各种引流形式进行了比较分析，继而最终选定适合短电弧加工机床工作特点的引流形式——集电环电刷上电，进而对影响电刷选型及集电环选型与加工的因素进行了分析，并最终确定了其具体规格型式，最后进行了选型鉴定，证明了前述理论分析的正确性。

关键词：短电弧加工机床 引流装置 堆焊

ABSTRACT

The surface-removed machining of hard machining material which has great rigidity, intensity, tenacity is a difficult problem which puzzles mechanical manufacturing.

Belonging to original technique of our country, the short electric arc machining technique is a scientific, economic, high effective, low energy consumed, raw and processed materials saved, low-noise technique and becomes a rigid surface material machining technique with market potential, all right developmental foreground, high effect and utility.

In this dissertation the author researches the electric current conducting system of short electric arc machine tool, which is one of the key technique of short electric arc machine tool, by taking the DHZ16040CG short electric arc machine tool as an example manufactured by Huashen electric engineering corporation and Changbai machine shop of Capital steel and iron factory, including the analysis of running characteristic of short electric arc machine tool's power supply and the working state of work piece anode and tool cathode. The author also makes a comparative analysis of every kind of electric current conducting system which is used presently, then choose one for our short electric arc machine tool, that is the carbon brush electric current conducting system, and analyses the relative ingredients which is about the choice of carbon brush and collector ring,

then chooses their specific model, in the end, the author makes a test for the choice above, which proves the correctness of academic analysis above.

Keywords: short electric arc machine tool, electric current conducting equipment, surfacing

第一章绪论

1.1 课题的来源、背景和意义

1.1.1 课题的来源

“机械制造及其自动化”学科 2003 年被评为新疆维吾尔自治区重点发展学科，同时确定“短电弧强电流切削加工技术”为该重点学科的优先重点研究方向。新疆大学机械工程学院项目组将承担相关课题研究中的全部工作任务。

1.1.2 课题的背景和意义

随着科学技术的不断发展和进步，许多新型装备都对整体工作性能和各项综合技术指标提出了愈来愈高的要求，特别是航空航天领域和军工领域以及特种行业，对产品的整体工作性能和各项综合技术指标的要求更加苛刻和严格。为了满足产品的特殊要求，对产品中所使用的材料也往往提出各种不同的性能指标要求，其中材料的硬度、强度和韧性也常常成为材料重要的技术指标之一。随着难加工材料应用的日益广泛和普及，其机械加工手段的不足已经逐渐成为一道摆在机械制造业面前的技术难题。

特硬、超强、高韧性等难加工材料的表层去除加工始终是困扰机械制造业的难题之一，虽然目前可采用磨床、电火花加工机床以及碳弧气爆加工技术进行该类材料的表层去除加工，但都存在着很大的局限性。磨床虽然可进行特硬、超强、高韧性等难加工材料的表层去除加工，但因为磨削加工属于接触式加工，加工效率低下、刀具磨损严重，加工成本高、加工周期长，因此很难满足对上述材料的经济、高效加工，一般只用于零件的精加工。

满足对上述材料的经济、高效加工，一般只用于零件的精加工。电火花加工机床属于非接触式加工，但电火花加工属于火花放电加工，且加工过程工件必须浸入油池，不但加工效率低下，而且被加工工件的尺寸受到了很大的限制，一般主要用于模具类零件的型腔加工和特殊曲线的加工。采用碳弧气爆加工工人劳动强度相当大，加工效率也不很高，而且加工后工件还有夹碳、渗碳、失圆度大等问题。因此，开发研制一种能进行特硬、超强、高韧性等难加工材料的表层去除加工的经济型高效机床，必将对机械制造业产生积极的作用。

为了解决特硬、超强、高韧性等难加工材料的表层去除加工的技术难题，新疆大学特种加工技术研究所特聘教授周碧胜等同志经过十多年潜心研究，终于成功的开发出了一种短电弧特种加工新型电源（研制的新型电源已于 2003 年申请并获得了实用新型专利“短电弧切削设备用的阴极装置及电源电路”，ZL 专利号：02291891.4），该电源为低电压、大电流直流脉冲电源。电源工作电压为 0—60V，工作电流可达 4000A，脉冲频率低于已知的电加工电源采用的频率。与之配套的工具电极材料可以是导电金属，也可以是石墨以及其它导电材料。形状为圆盘状、棒状、管状或环架状等异型。加工时工具电极与工件不接触，加工时机械切削力近于零，工作介质为水气混合物或水或气。该新型电源的成功问世，为开发短电弧高效特种加工机床奠定了基础，使难加工材料的高效机械加工成为了可能。

在此背景下，昌吉市华胜机电加工部与首钢长白机械厂签订了“DHZ16040CG 短电弧加工机床研制”横向协作项目合同，以求利用短电弧特种加工新型电源开发研制一台高效实用的水泥磨辊表层修复加工特种机床。首钢长白机械厂常年从事水泥磨辊以及

其他各种钢轧辊的表面修复工作，由于水泥磨辊或钢轧辊的表面工作层硬度高达 HRC59—62，对其进行修复加工极为困难。传统的修复工艺都是采用堆焊的方法对水泥磨辊表面出现的点蚀凹坑进行修补，然后再进行机械加工以恢复水泥磨辊的表面几何形状，不但修复效果差，而且无法修补损坏严重的水泥磨辊。对于损坏严重的水泥磨辊，必须去除表面疲劳层，然后再进行整体表面堆焊，最后在进行机械加工以恢复水泥磨辊的表面几何形状。表面疲劳层的去除以及堆焊层的机械修复加工由于始终难以找到高效实用的技术方法，因此对于损坏严重的水泥磨辊以及钢轧辊不得不进行报废处理，造成的经济损失非常巨大，比如一对水泥磨辊其市场价格就达上百万元。

根据与首钢长白机械厂签订了 DHZ16040CG 型短电弧加工机床研制横向协作项目合同所研制开发的 DHZ16040CG 型短电弧加工机床，采用了短电弧特种加工新型电源，该机床于 2004 年元月在首钢长白机械厂的水泥磨辊表面疲劳层的现场试验修复加工中，发挥了明显的技术优势，加工效率十分显著，加工精度明显提高。在对厚度达 80mm—90mm 的表面疲劳层的“切削”加工以及加工后堆焊修复的表层“切削”加工过程中，该机床运行稳定、工作可靠，加工噪音低于 75db，加工效率显著高于其他硬面加工机床，有效地解决了水泥磨辊修复加工的技术难题。表明了该研究成果在机械加工领域中的重要作用。

短电弧加工技术以其科学、经济、高效、低能耗、节省原材料、低噪声污染等技术特点，极大的提高了生产率，改善了工人的工作环境，有效的降低了工人的劳动强度，而成为一种极具市场潜力、有着良好发展前景高效实用硬面材料加工技术。

由于短电弧强电加工技术属于我国原创技术，国外没有与此

相关的科学研究与技术开发，因此短电弧强电加工技术的推广应用以及未来的产业化，必将对我国机械行业在国际上的地位起到一定的提升作用，同时强电加工机床的对外出口也必将提高我国机械产品出口的百分比，对我国机械行业的发展和为国家外汇创收都具有十分重要的意义。

短电弧强电加工技术的推广应用又会解决许多难加工材料的加工问题，一方面可以解决和推动使用难加工材料的技术领域积极发展和进步，同时还必将进一步推动新型材料的诞生与应用，对材料行业以及与其相关的行业发展起到积极的推动作用。而短电弧强电加工机床一旦进入产业化，将会使机械加工行业的加工手段更加多样化，对机械行业的发展同样具有积极的促进作用。

短电弧加工机床开发的社会效益主要表现在以下几个方面：

1. 改善工作环境

由于短电弧加工机床的加工噪声小于 75 分贝，不会造成噪声污染；同时短电弧加工机床工作过程中，不会产生碳弧气爆等强电加工机床所产生的有害气体和粉尘污染，将会为操作人员提供良好的工作环境。

2. 有利于环境保护

短电弧加工机床在为操作人员提供良好的工作环境的同时，因其不产生有害气体和粉尘污染，将非常有利于周边环境和大气环境的保护。

3. 促进相关行业发展

由于短电弧加工技术特别适合于硬面材料的高效加工，且具有加工稳定性好，能耗低、节省原材料、无噪音污染等明显的技术优势，必将为冶金、机械、航空、航天、石油、化工等行业的硬面材料加工提供一种高效实用的技术手段，可解决这些行业使

用硬面材料所碰到的加工技术难题，必将促进其技术进步和进一步的发展。

4. 推动新型材料的诞生

由于短电弧加工技术能够解决特种行业使用硬面材料所碰到的加工技术难题，将会提高这些行业在关键零部件设计中选用硬面材料的可行性并促进其使用硬面材料的积极性，这必将进一步推动新型材料的诞生。

5. 提升我国制造业的知名度

1.2 本论文的研究内容

本论文研究内容是短电弧强电流切削加工技术研究项目中的一部分。主要包括短电弧加工机床引流装置的研究与实现。由于短电弧加工技术是利用两个电极（工件为阳极，工具电极为阴极）之间产生的具有特定波形的稳定电弧放电来蚀除导电金属的表面金属层以达到加工目的的，因此就存在一个如何将上千安培的直流电从固定的电源输出端传送到旋转着的工件上去的问题。本文正是对如何解决这个问题进行了探讨，比较了几种现存的上电结构的优缺点，探讨了短电弧加工技术的特殊性，从而对数控短电弧加工机床上电系统的选型和尺寸结构进行了设计。

第二章短电弧切削技术

2.1 短电弧切削技术的定义与技术特点

2.1.1 短电弧切削技术的定义

短电弧切削技术是指在一定比例带压力水气混合物介质的作用下，利用两个电极之间产生的短电弧放电来蚀除金属或非金属导电材料的一种切削方法，它属于特种加工行业电加工技术范畴，是一种新的工业学名。它包括短电弧切削工作电压、工作电流、工作介质混合比、工件线速度、工件材料、工具电极线速度、工具电极材料七大要素。

2.1.2 短电弧切削技术的技术特点

短电弧的切削技术特点为：

1. 工件可以是各种导电的金属、半导体、非金属材料；工具电极材料多样化，可以是金属如铜、钢、铸铁、铝等，也可以是石墨、金属石墨或芯部是金属外缘是石墨，还可以是硬质合金、高速钢刀具；工具电极形状也可以多种多样，可以是刀具状、盘状、棒状、异形状、成型状，也可以是环架状。
2. 短电弧切削设备由于没有切削力或只有微小的切削力，因此它的原型机床设备与同类机床比较具有传动简单、外形小巧、低速、振动小、经济高效、高精度低强度切削、性能稳定可靠、对周围环境影响小、无环境污染等优点。
3. 短电弧切削设备可在同一个阴极装置上完成常规刀具切削（不接短电弧切削电源）和非常规刀具切削（接短电弧切削电源），减少了工件装卡次数和停机时间，提高了被加工工件表面质量，

为目前机加工工艺提供了一种缩短工艺流程的新办法。

4. 短电弧切削设备阳极装置完成工件的回转、往复直线运动和静止状态，并使工件带正电。阴极装置完成工具电极的静止、回转和机械往复间歇运动，并使工具电极带负电；其工具电极速度 $V \leq 2\text{m/s}$ 的回转或往复直线运动时，其材料为石墨、金属石墨或表面镀铜石墨；速度 $2\text{m/s} < V \leq 10\text{m/s}$ 时，其材料为金属、高速钢、硬质合金、不能使用石墨电极。工具电极或工件在切削过程中可以是静止、转动、或直线往复运动。
5. 短电弧切削设备其干式切削时工作介质可只供给气、采用石墨或硬质合金、高速钢电极，湿式切削时工作介质可供给水或水气混合物、采用石墨、高速钢或金属电极。

2.2 短电弧切削技术原理

短电弧强电加工以工具电极和工件作为放电电极，加工时工具电极与工件不接触，机械切削力近于零，工作介质为水气混合物或水或气，加工过程中工具电极与工件表面产生特殊的电作用，形成强电子电流(电源电流可达 4000A)，在雾化介质中进行短电弧放电并产生高温高热使工件表层金属迅速熔化而剥离工件母体，达到尺寸精度和粗糙度的加工目的。

短电弧强电流切削加工采用低电压、大电流直流脉冲电源。电源工作电压为 0—60V，工作电流为 0-10000A。脉冲频率低于已知的电加工采用的频率。加工时机械切削力近于零，工件介质为水气混和物或水或气。工件加工表面粗糙度可达到 R_a 12.5-50。加工尺寸精度可达到 IT8-IT12。其加工原理图可以用下图 2-1 表示：

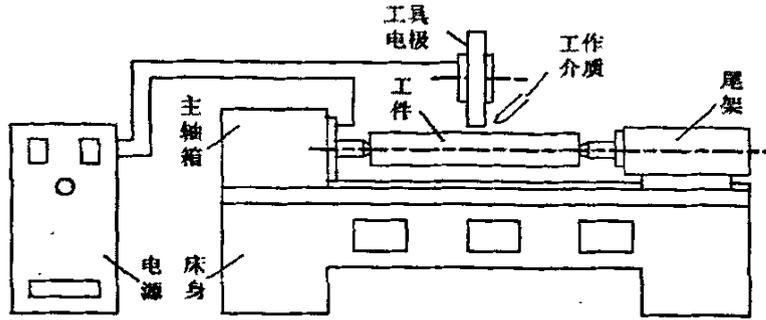


图 2-1 短电弧强电加工原理示意图

短电弧技术虽然也利用了直流电的极性效应（通常工具电极为阴极），但与阳极机械加工不同。阳极机械加工电源电流远小于短电弧加工的电流，而且多用于切断，而短电弧加工则主要用于回转表面、平面及曲面的成型加工。短电弧加工的工具电极可采用多种导电材料，即可采用金属材料，也可采用石墨等非金属材料。

短电弧加工采用了雾化水气作为加工介质，雾化水气介质起到了稳定电弧的作用，由于其特殊的机理作用，使加工过程中不出现爆裂声，加工噪声低于 75db。

短电弧强电加工属于特种加工技术范畴，与传统特种加工加工方法相比，短电弧强电加工技术生产率显著提高。以 DHZ16040CG 短电弧加工机床为例，每分钟金属去除量可达 900 克—1500 克，加工效率约为电火花加工的 110—190 倍（电火花加工每分钟金属去除量约为 8 克）；金属去除量和能耗比显著高于电火花等加工方式；成本、重量、传动结构简化程度、机床使用寿命等指标均明显优于其它各类传统机床。

短电弧强电加工技术特别适合于加工特硬、超强、高韧性等难加工材料，它针对性并经济有效地解决了新型特种材料如金属陶瓷、钛合金、钼合金、不锈钢、稀土合金、碳化钨、高铬合金、高锰合金等特硬、特粘、特脆、高耐磨、冷作硬化等材料的加工

难题，也有效地解决了半导体、非金属导电材料中高硬、高粘的加工难题；形成了电加工技术的跨越式发展，是我国特种加工（机床）行业的一次重大突破。这一技术可在冶金、机械、航空、石油、化工等行业得到广泛应用，为这些行业难加工金属表面处理提供适用、高效、快速可行的技术手段。

短电弧强电流切削加工技术属于我国具有完全知识产权的原创性技术。截止到目前为止从未见到国外有关该技术相关的研究报告，也未见到国外发表与此有关的学术论文。目前只有我国的有关科技人员完全掌握该技术，主要包括叶良才先生发明的电熔爆加工技术以及周碧胜发明的短电弧强电流切削加工技术。目前国内使用的特种加工技术有阳极机械加工、电火花加工、电子束加工、离子束加工、超声波加工、激光加工等，主要用于复杂表面、精密表面的加工，它们都无法用于硬面材料的经济高效加工。目前国内用于硬面材料加工的还有碳弧气爆技术和电熔爆技术，但它们都存在着较大的环境污染和局限性，且都不够成熟。短电弧加工技术则以经济、高效、低噪声、无污染等技术特点，极大的提高了生产率，改善了工人的工作环境，成为一种极具市场潜力、有着良好发展前景高效实用硬面材料加工技术。

2.3 短电弧强电流切削加工技术与其它特种加工技术

国内外目前用于硬面材料加工的强电加工技术除了短电弧强电流切削加工技术主要还有碳弧气刨加工技术、电熔爆加工技术以及电火花加工技术等。

德国、英国等工业发达国家已经采用碳弧气刨技术用于超硬材料的加工，虽然能解决部分难加工材料的加工问题，但由于范

围太窄，效率也不高，环境污染严重，且碳棒消耗量大于金属去除量，其推广应用受到了很大的限制。特别是碳棒消耗问题和环境污染问题，已经成为该技术发展的技术瓶颈。由于碳弧气刨加工过程中碳棒消耗量大，不仅增加了生产成本，而且产生大量有害气体弥漫在工作环境周围，严重影响操作人员的身心健康。此外，采用碳弧气刨加工工人劳动强度相当大，工件加工后还有夹碳、渗碳、失圆度大等问题，因此其实际应用空间仍有很大的局限性。

电熔爆加工技术属于我国自主知识产权的强电特种加工技术。电熔爆技术问世以来，因其能够对硬面难加工材料进行高效加工，曾经受到了机械加工行业的广泛关注。但电熔爆技术工作稳定性差，加工噪声大、环境与噪声污染严重、同时机床存在严重锈蚀的问题，难以开拓市场空间。特别是长期以来由于缺乏对其工作机理与关键技术的深入研究，致使电熔爆技术加工稳定性差，工作噪声大等问题始终没有的到解决，造成了该项技术无法适应工业生产的实际需求，相应的电熔爆机床也无法在市场上占有一席之地，最终导致电熔爆技术基本上丧失了生命力和实际应用价值。

电火花加工又称放电加工，是一种利用电、热能量进行加工的方法。在加工过程中，使工具和工件之间不断产生脉冲性的火花放电，靠放电时局部、瞬时产生的高温把金属蚀除下来。因放电过程可见到火花，故称为电火花加工。电火花加工机床属于非接触式加工，但电火花加工属于火花放电加工，且加工过程工件必须浸入油池，不但加工效率低下，而且被加工工件的尺寸受到了很大的限制，一般主要用于模具类零件的型腔加工和特殊曲线的加工。

短电弧加工技术则以其运行稳定、经济、高效、低噪声、无污染等技术特点，极大的提高了生产率，改善了工人的工作环境，有效的降低了工人的劳动强度，而成为一种极具市场潜力、有着良好发展前景高效实用硬面材料加工技术。

第三章短电弧机床应用设计方案

3.1 总体方案的论证和设计

3.1.1 总体方案的论证

由于水泥磨辊或钢轧辊等工件均为大型回转件，根据短电弧加工技术的工作原理和技术特点，因此可采用卧式车床的基本布局形式，在此基础上在进行必要的结构设计，增加短电弧加工所需的阴极装置、阳极装置、水气混合装置以及其他辅助装置，即可构成一台短电弧加工机床。

鉴于上述考虑，该机床总体方案确定为：采用 CW61100 大型卧式万能车床进行改装设计，该机床的卧式布局结构，便于工件的装卸和加工；电源采用额定电流为 4000A 的短电弧加工电源；主床身与辅助床身采用分体结构，以便于安装调试；机床主轴采用重型滚动轴承支撑，并进行有效地绝缘防护，对工件采取增加辅助支撑的方式，以减少主轴的载荷和防止工件自重造成过大的弯曲变形，保证机床加工的稳定性；机床导轨采用普通滑动导轨；机床设置阴极和阳极装置，阴极装置安装在刀架位置并进行有效地绝缘防护；另外配套水气混合装置和排屑除渣装置的基本技术方案。

在短电弧加工机床设计中必须要解决好以下一些关键技术问题：

1. 该机床所要加工的是大型工件，其尺寸为 $\phi 1600 \times 5000$ ，初步估算质量大约为 25 吨，故该机床属于大、重型机床，因此必须解决好动力传输和工件的支撑问题。
2. 由于该机床采用短电弧放电方式进行加工，工作电流高达

4000A, 因此必须解决好电流通道设计和相关机构之间的绝缘问题, 以保证加工性能的稳定性和电流工作效率。

3. 阴极装置和阳极装置是短电弧加工技术中, 除电源以外的重要电气工作机构, 其工作原理和结构非常重要, 必须确保电流的输送和工具电极与工件之间的正常放电加工。
4. 水气混合装置是短电弧加工必不可少的重要组成部分, 其水气混合效果以及水气的雾化效果都对短电弧加工机床的加工性能和加工质量起着至关重要的作用, 必须引起足够的重视。

以下针对上述几个关键性的技术问题, 进行简要的分析说明:

关于大型、重型机床的动力传输和工件的支撑问题, 目前都有比较成熟的结构可作参照, 同时针对短电弧加工机床的技术特点, 采取必要的技术措施即可保证动力的可靠传输以及工件的支撑问题。比如该机床加工过程中主轴转速很低, 远远低于一般的大、重型机床的主轴转速, 因此主传动系统可考虑采用减速比很大的谐波齿轮传动; 对于大型工件的支撑问题可采用增加辅助支撑的技术措施予以解决。对于机床工作过程中的电流通道问题, 要解决好电流的损耗和漏电问题, 特别是对工件的上电, 最方便简单的方法就是经过主轴送电, 而主轴又和整个机床紧密相联, 要防止电流通过机床其他构件泄漏, 因此是送电的关键环节。考虑到机床主轴直径较大, 送电过程中的电阻非常之小, 送电通道最短, 只要设计必要的绝缘装置即可得到解决。阳极装置和阴极装置, 在短电弧研制过程的实验中, 已经经过多次改进设计和实际验证, 可以实现电流的稳定输送和工具电极与工件之间的正常放电加工, 在该机床的配套设计中, 只需针对该机床的具体结构特点, 稍作改进设计即可保证正常工作。水气混合装置是短电弧加工机床的重要配套装置之一, 该装置主要用于提供短电弧加工

机床工作时所需的水气混合物并进行水气雾化处理，也已经进行过大量的实验，实验结果稳定可靠，可直接用于该机床当中。

综上所述，该机床拟采用的技术方案符合实际情况，具有良好的可实施性，其总体布局和技术措施合理可行。该机床研制成功后的试验运行情况和加工效果证明，该方案的制定考虑周全、科学、确保了机床一次性试验运行获得了成功，为今后短电弧加工机床的开发研制创造了良好的开端。

3.1.2 短电弧机床总体方案的设计

在上述总体方案论证的基础上，综合考虑被加工对象的特点和各种其他因素，对 DHZ16040CG 短电弧加工机床进行了方案设计。根据设计方案，该机床采用 CW61100 大型卧式万能车床进行设计改装，在设计过程中主要考虑了短电弧的强制性技术要求和原机床的一些基本特性，在保证实现各方面功能的情况下，力求做到设计结构轻型化、传动系统简单化。

根据水泥磨辊尺寸系列所确定的机床机械部分主参数为：最大加工直径 $\phi 1600\text{mm}$ ，最大加工长度 5000mm 。用于改装的原型机床 CW61100 型车床最大加工直径为 1000mm ，最大加工长度为 8000mm ，该机床最大加工长度完全能够满足设计主参数的要求，但最大加工直径却不能满足设计主参数的要求，因此必须对机床的中心高进行改造。采取对 CW61100 型车床主轴箱和尾架增高的技术措施，在主轴箱和床身之间以及在尾架和床身之间增加垫高座，使中心高达到 1000mm ，以满足机床设计主参数的要求。

由于水泥磨辊重量达 20t ，使机床主传动系统驱动工件时的扭矩有所增加。该机床从电机轴到机床主轴箱输入轴采用皮带传动，为了保证扭矩传递，则必须增加皮带的张紧力，其结果将会造成

主轴箱输入轴产生进一步弯曲变形，从而恶化机床传动系统的工作状况。为了解决机床扭矩增大带来的上述问题，采用卸荷皮带轮传动结构，可将作用在主轴箱输入轴上的径向载荷卸去，以改善主轴箱输入轴的受力状况，确保机床正常工作。

DHZ16040CG 短电弧加工机床的床身由主床身和辅助床身两部分组成。主床身沿用 CW61100 型车床主的主床身，用于支撑机床主轴箱和机床尾架；辅助床身采用全新设计结构，主要用于支撑短电弧机床的阴极装置及对应的动力驱动装置。由于 DHZ16040CG 短电弧加工机床属于单件小批生产，且制造工期较短，不适合采用铸造床身，因此选用焊接结构床身，即可降低生产成本，又可缩短制造周期。由于阴极装置（工具电极）需要实现纵向进给和横向进给，因此在辅助床身上设有纵向和横向两个滑板，以确保纵向进给和横向进给的实现，导轨采用镶钢结构。

工具电极是短电弧加工机床的切削工具（相当于普通机床的刀具），在工作过程中作为短电弧加工的阴极，工件作为阳极，采用非接触式极间放电方式进行加工。工具电极通过工具电极主轴安装在阴极装置上，并通过皮带传动。为了避免阴极装置出现漏电现象，除了采用皮带传动驱动工具电极外，在阴极装置与机床滑板之间还安装有绝缘材料层。工具电极及驱动装置安装在横向进给滑板上，横向进给滑板安装在纵向进给滑板上，而纵向进给滑板又安装在辅助床身上。上述安装结构可实现工具电极的纵向进给和横向进给。

DHZ16040CG 短电弧加工机工具电极采用圆盘式结构，工作时工具电极以一定的转速旋转，从而实现设定的工作线速度。由于工具电极在工作时，存在着一定的电极损耗，为了延长工具电极的工作寿命，电极采用旋转方式进行放电加工，可实现圆周上的

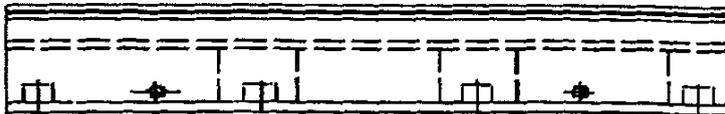
均匀损耗，从而延长其寿命。工具电极主轴采用滚动轴承支撑，动力源采用电动机并通过皮带传动，电极采用防护罩防护。

DHZ16040CG 短电弧加工机床所加工的水泥磨辊、磨煤辊以及钢轧辊等工件的设计最大加工直径为 $\phi 1600\text{mm}$ ，最大加工长度 5000mm ，因此工件重量要远远大于 CW61100 型车床所能加工的工件重量，原机床主轴承能力已经不能满足 DHZ16040CG 短电弧加工机床的设计承载要求。为了确保所研制的短电弧加工机床的承载能力，实现正常的加工，需要增加辅助支撑，从而提高机床的承载能力。辅助支撑安装在机床主床身上，与工件的接触方式采用滚轮支撑，当工件旋转时，滚轮跟随工件同时旋转，以减小接触面的磨损。

3.2 短电弧机床本体部分设计

3.2.1 短电弧机床床身的设计

短电弧加工机床的床身由主床身和辅助床身两部分组成。主床身沿用 CW61100 型车床主的主床身，用于支撑机床主轴箱和机床尾架；辅助床身采用全新设计结构，主要用于支撑短电弧机床的阴极装置及对应的动力驱动装置。由于 DHZ16040CG 短电弧加工机床属于单件小批生产，且制造工期较短，不适合采用铸造床身，因此选用焊接结构床身，即可降低生产成本，又可缩短制造周期。由于阴极装置（工具电极）需要实现纵向进给和横向进给，因此在辅助床身上设有纵向和横向两个滑板，以确保纵向进给和横向进给的实现，导轨采用镶钢结构。



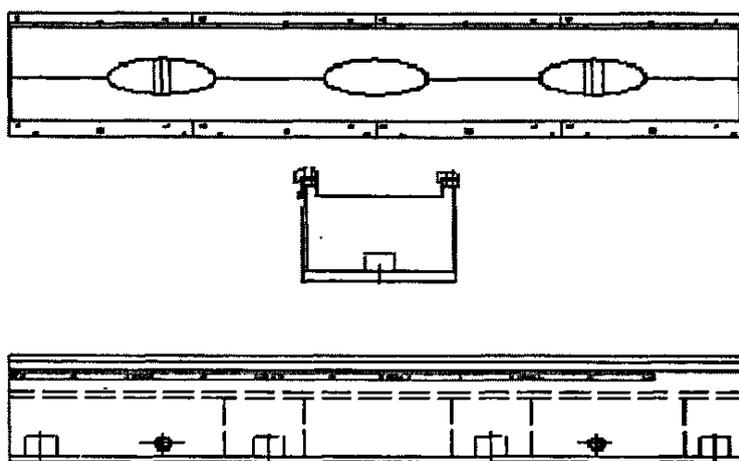
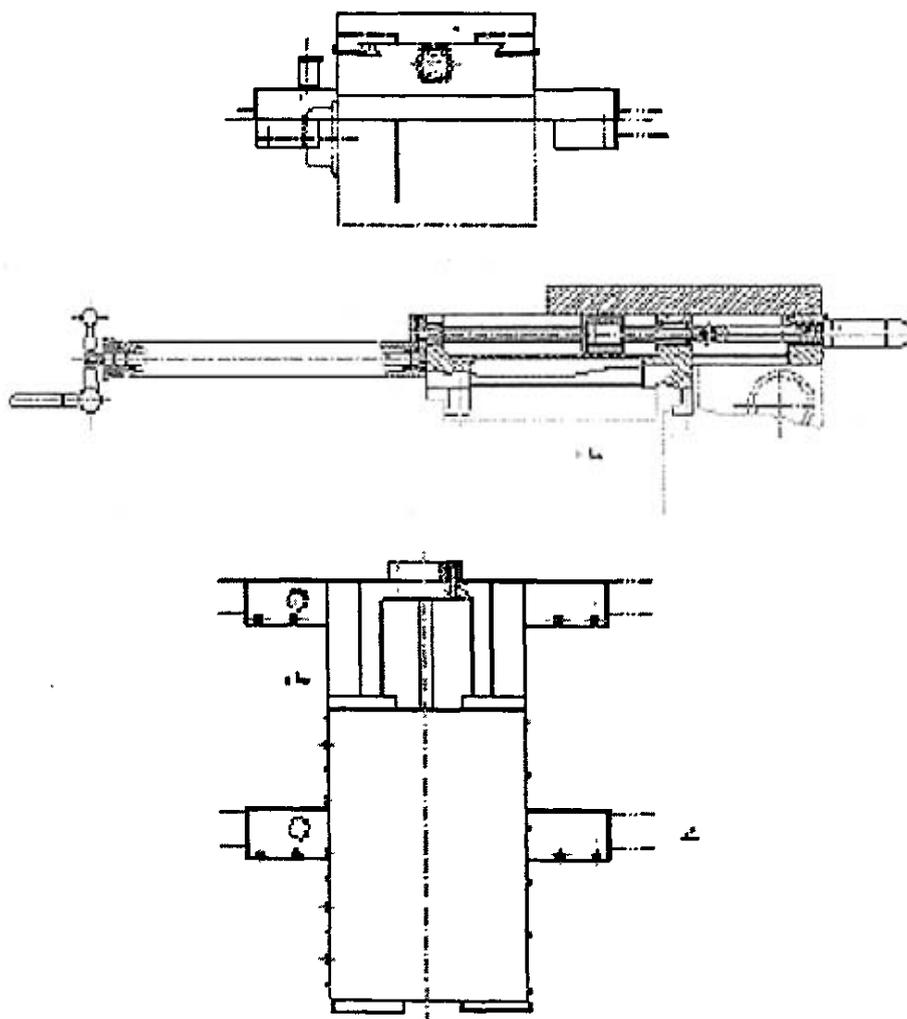


图 3-1 辅助床身结构示意图



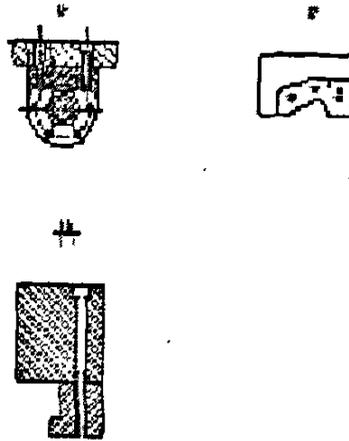


图 3-2 床鞍总成结构示意图

3.2.2 垫高座设计

根据水泥磨辊尺寸系列所确定的机床机械部分主参数为：最大加工直径 $\phi 1600\text{mm}$ ，最大加工长度 5000mm 。用于改装的原型机床 CW61100 型车床最大加工直径为 1000mm ，最大加工长度为 8000mm ，该机床最大加工长度完全能够满足设计主参数的要求，但最大加工直径却不能满足设计主参数的要求，因此必须对机床的中心高进行改造。采取对 CW61100 型车床主轴箱和尾架增高的技术措施，在主轴箱和床身之间以及在尾架和床身之间增加垫高座，使中心高达到 1000mm ，以满足机床设计主参数的要求。图 3-3 为主轴箱和床身之间垫高座结构示意图，图 3-4 为 DHZ16040CG 短电弧加工机床外形一角。

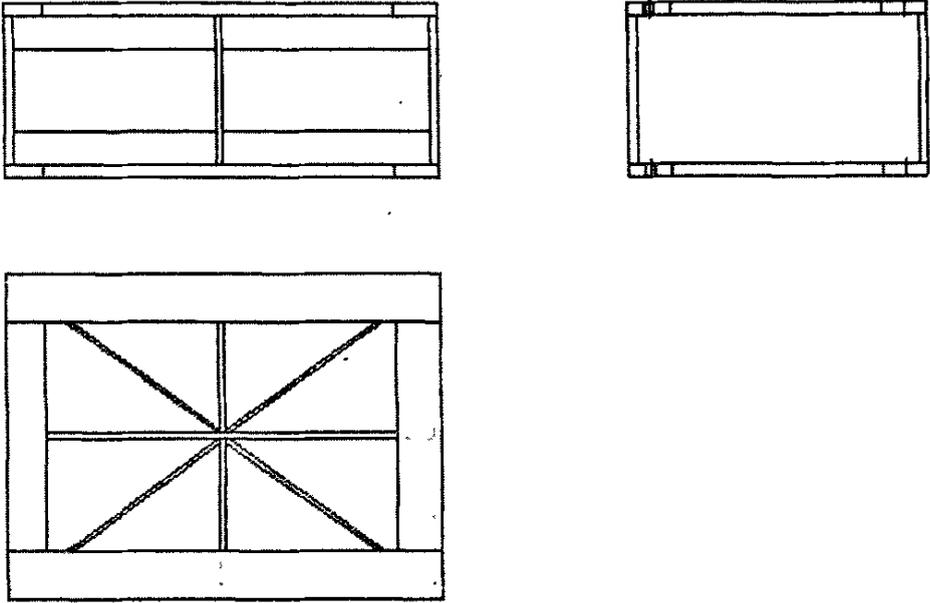


图 3-3 主轴箱和床身之间垫高座结构示意图

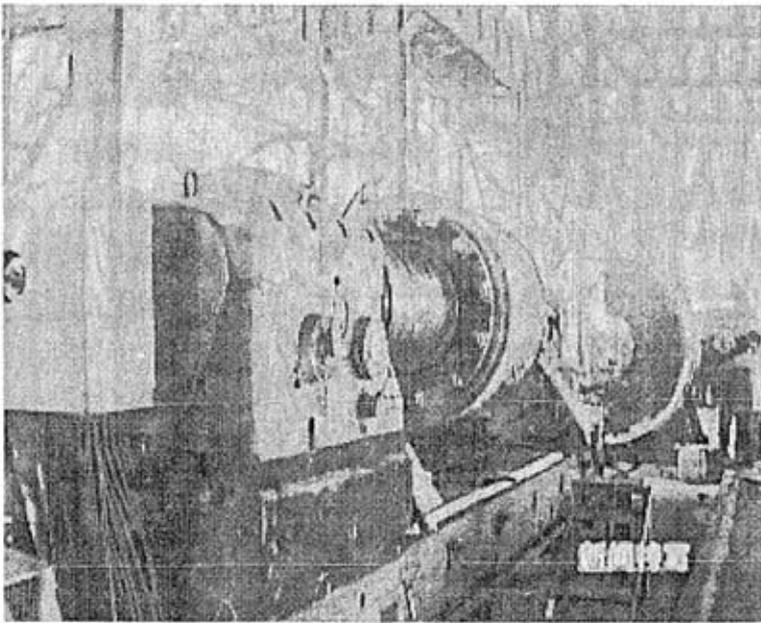


图 3-4 DHZ16040CG 短电弧加工机床外形一角

3.2.3 机床传动系统设计

由于水泥磨辊重量达 25t，使机床主传动系统驱动工件时的扭矩有所增加。该机床从电机轴到机床主轴箱输入轴采用皮带传动，为了保证扭矩传递，则必须增加皮带的张紧力，其结果将会造成主轴箱输入轴产生进一步弯曲变形，从而恶化机床传动系统的工作状况。为了解决机床扭矩增大带来的上述问题，采用卸荷皮带轮传动结构，可将作用在主轴箱输入轴上的径向载荷卸去，以改善主轴箱输入轴的受力状况，确保机床正常工作。卸荷皮带轮传动结构见图 3-5，图 3-6 为 DHZ16040CG 短电弧加工机床卸荷皮带轮实体。

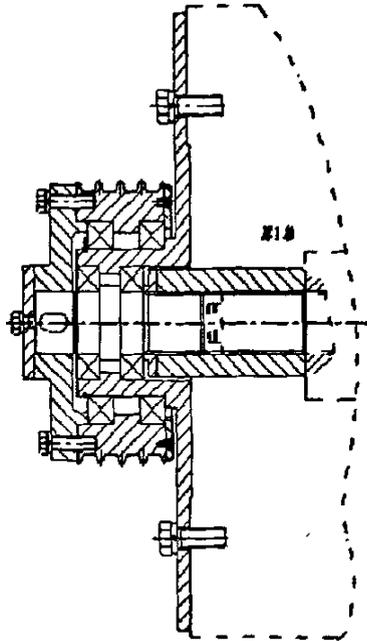


图 3-5 卸荷皮带轮传动机构

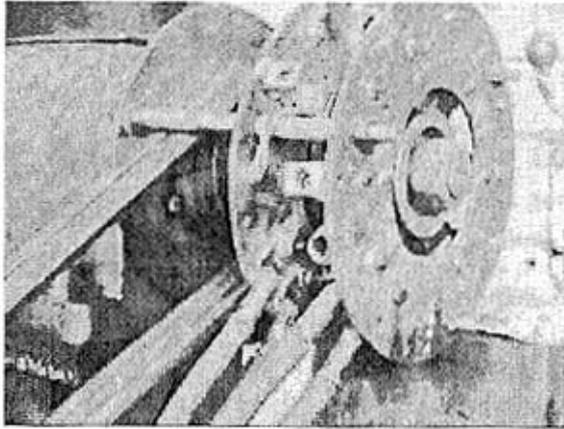


图 3-6 DHZ16040CG 短电弧加工机床卸荷皮带轮

3.2.4 工具电极和驱动装置设计

工具电极是短电弧加工机床的切削工具（相当于普通机床的刀具），在工作过程中作为短电弧加工的阴极，工件作为阳极，采用非接触式极间放电方式进行加工。工具电极通过工具电极主轴安装在阴极装置上，并通过皮带传动。为了避免阴极装置出现漏电现象，除了采用皮带传动驱动工具电极外，在阴极装置与机床滑板之间还安装有绝缘材料层。工具电极及驱动装置安装在横向进给滑板上，横向进给滑板安装在纵向进给滑板上，而纵向进给滑板又安装在辅助床身上。上述安装结构可实现工具电极的纵进给与横向进给。工具电极与阴极装置结构示意图如图 3-7 所示，图 3-8 为 DHZ16040CG 短电弧加工机床阴极装置实体。

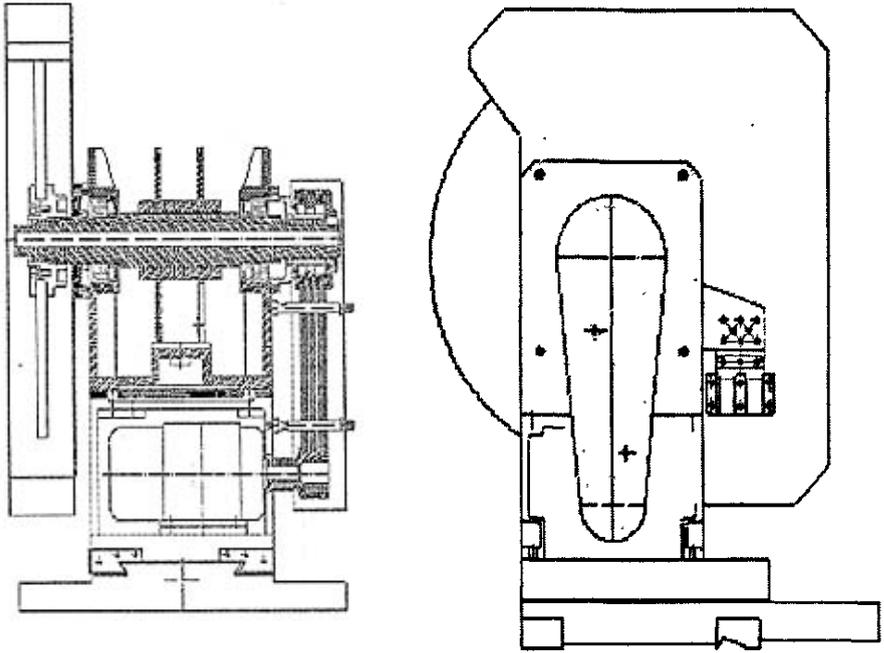


图 3-7 工具电极和阴极装置结构示意图

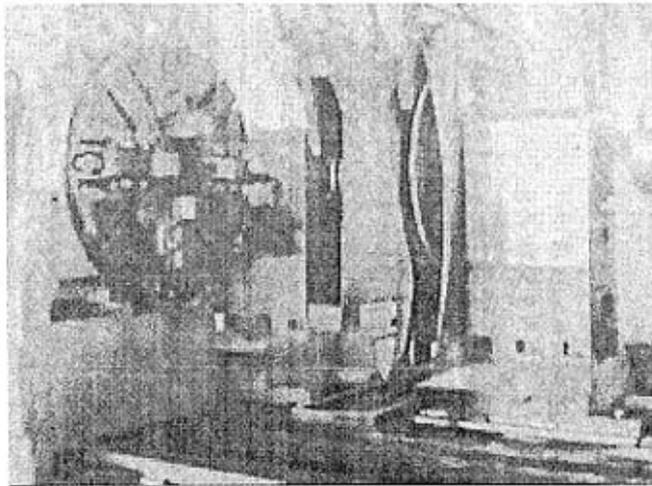


图 3-8 DHZ16040CG 短电弧加工机床阴极装置

DHZ16040CG 短电弧加工机床工具电极采用圆盘式结构，工作时工具电极以一定的转速旋转，从而实现设定的工作线速度。由

于工具电极在工作时，存在着一定的电极损耗，为了延长工具电极的工作寿命，电极采用旋转方式进行放电加工，可实现圆周上的均匀损耗，从而延长其寿命。工具电极主轴采用滚动轴承支撑，动力源采用电动机并通过皮带传动，电极采用防护罩防护。图 3-9 为工具电极驱动方式示意图。

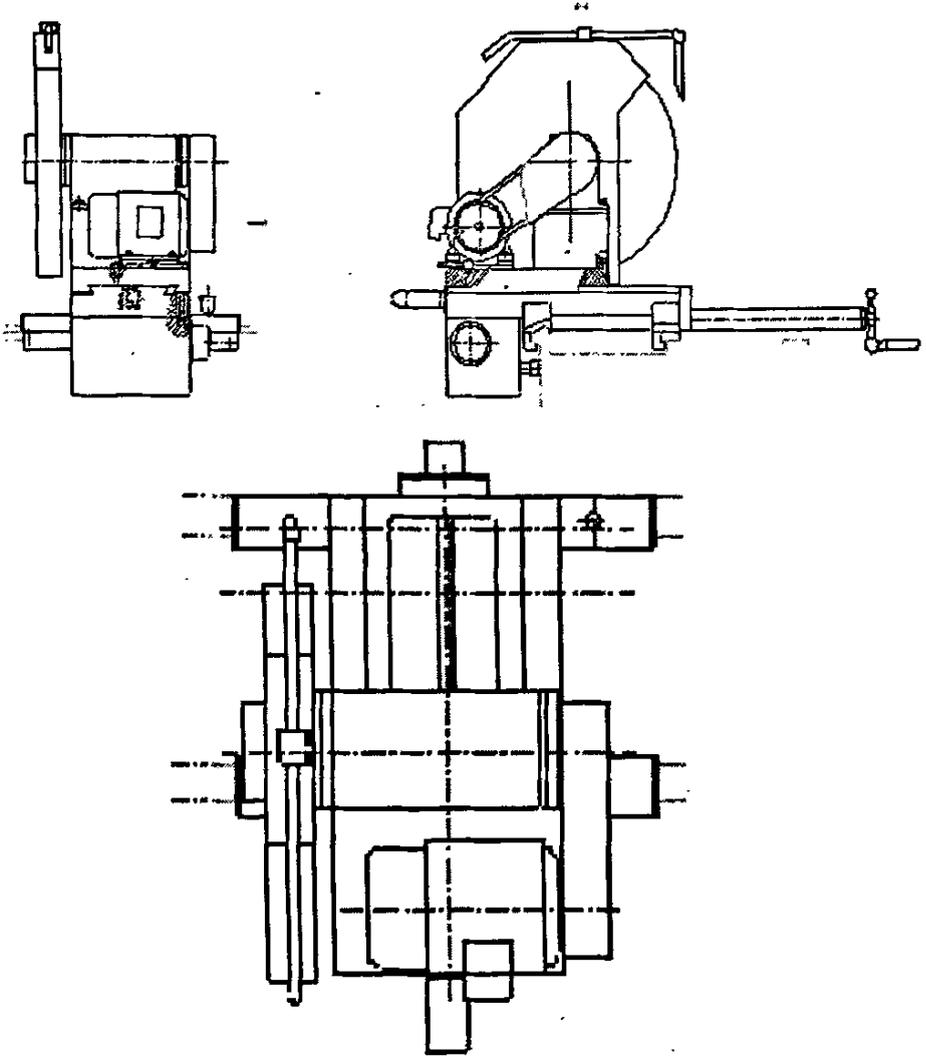
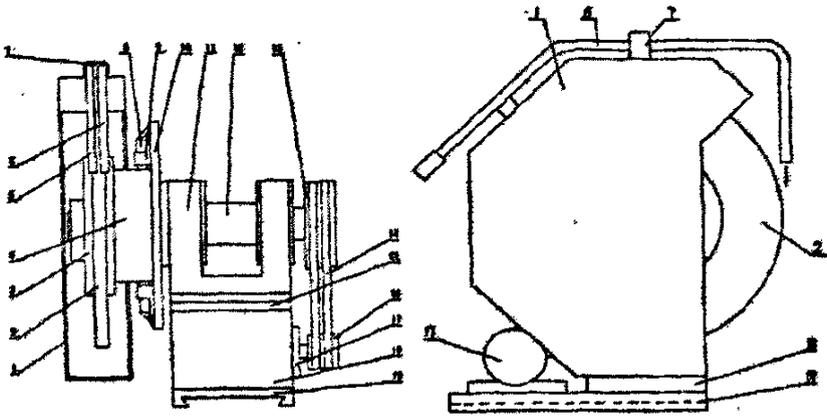


图 3-9 工具电极驱动方式示意图

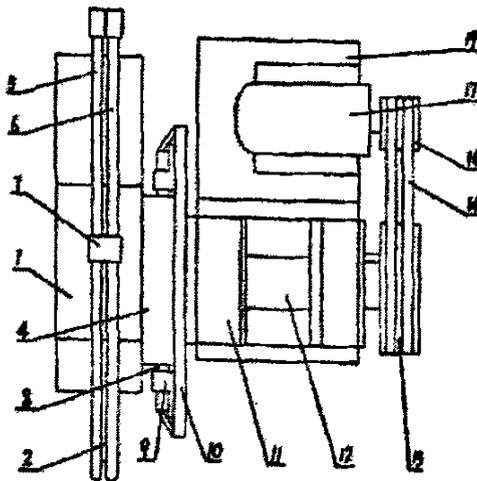
3.2.5 阴极装置阳极装置设计

阴极装置和阳极装置是短电弧加工技术中，除电源以外的重要电气工作机构，其工作原理和结构非常重要，必须确保电流的输送和工具电极与工件之间的正常放电加工。特别是阴极装置，因为要向工具电极提供电流并驱动工具电极旋转以及进给，除设置电流输送通道外，还必须设置相应的工具电极驱动机构和工具电极进给机构。图 3-10 为阴极装置结构简图。



a) 阴极装置主视图

b) 阴极装置左视图



c) 阴极装置俯视图

1. 防护罩 2. 工具电极 3. 电极座 4. 阴极集电环 5. 压力水管 6. 压力气管
7. 水气管固定座 8. 电刷 9. 电刷架 10. 阴极集电板 11. 主轴座 12. 主轴 13. 从动皮带轮 14. 传动带 15. 绝缘板 16. 主动皮带轮 17. 主轴调速电机 18. 垫高块 19. 拖板

图 3-10 阴极装置结构示意图

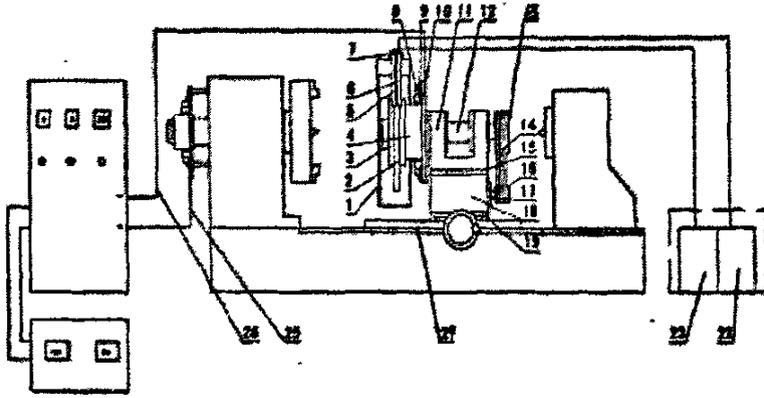
以下就阴极装置工作原理进行简要介绍:

1. 上电装置: 短电弧加工机床工作时, 工具电极与短电弧加工电源的阴极相联, 工件与短电弧加工电源的阳极相联。由于工具电极 2 通过电极座 3 与主轴 12 相联, 因此可通过对电极座 3 上电而实现对工具电极 2 的上电。在阴极装置的主轴座 11 上设有一块阴极集电板 10, 上电电刷 8 固定在阴极集电板 10 的电刷架 9 上并通过弹簧紧压在阴极集电环 4 上, 阴极集电环 4 又与电极座 3 联为一体。因此对工具电极的上电可通过电刷 8 到阴极集电环 4 后再通过电极座 3 到工具电极 2 实现。工件的上电可通过在机床主轴尾部加装阳极集电环和阳极电刷实现上电。
2. 工作介质喷淋装置: 短电弧加工技术中采用的工作介质由具有一定压力的水和具有一定压力的气混合构成, 水气混合液通过水气混合装置的作用呈现雾化状态。水气混合雾化液的作用在于吹离短电弧放电加工时工件表面形成的熔化金属层, 同时对工具电极进行冷却。雾化状态的水气分别通过压力水管 5 和压力气管 6 对准工具电极 2 参与“切削”加工的部位, 实现加工过程的辅助作用。
3. 工具电极驱动装置: 短电弧加工机床工作时, 要求工具电极以设定的转速进行旋转, 其转速调节范围为 0—10m/s。工具电

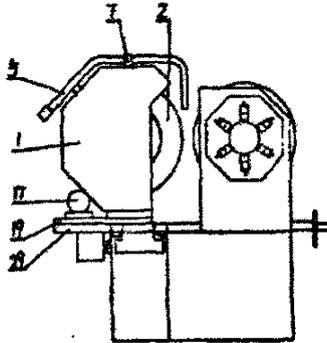
极的旋转由调速电机 17 通过带传动驱动主轴 12 实现,而工具电极的调速由调速电机 17 实现。根据对工件加工的具体工艺要求,可实现工具电极在 0—10m/s 范围内的无级调速。

4. 绝缘装置:为了保证短电弧加工的总体性能和加工效率,防止电流通道产生漏电现象,必须解决好阴极装置的绝缘问题。在阴极装置的垫高块 18 和主轴座 11 之间安装绝缘板 15 即可实现阴极装置的绝缘,防止产生漏电现象。
5. 拖板与垫高块:拖板 19 用于实现阴极装置与专用辅助床身导轨上的床鞍连接,并可在专用辅助床身导轨的床鞍上实现工具电极的横向进给,而专用辅助床身导轨上的床鞍可拖动阴极装置实现工具电极的纵向进给。垫高块的作用在于调整工具电极与工件的空间位置,保证工具电极与工件的空间位置满足加工要求。
6. 工具电极:工具电极的形状和材料是工具电极的两项重要技术指标。工具电极的形状主要取决于被加工工件的加工表面形状。圆盘状工具极一般可用于加工外圆、内圆以及平面,棒状或管状工具电极主要用于孔加工,环架状工具电极主要用于材料切割,异形工具电极主要用于仿形加工。工具电极的材料与工具电极的工作速度有关,大量的实验证明,当工具电极的工作速度在 0—2m/s 范围之内时,工具电极的材料可选择金属、石墨、表面镀铜石墨以及芯部为金属外缘为石墨的各种材料。当工具电极的工作速度在 2—10m/s 范围之内时,工具电极的材料只宜选择金属材料,而不宜选择其它材料。特别是粗规范加工时,实践证明采用 A3 钢(Q235A)最为经济实用,不但制造方面、工具电极损耗率小,同时也易于加工出工作所需的副偏角。

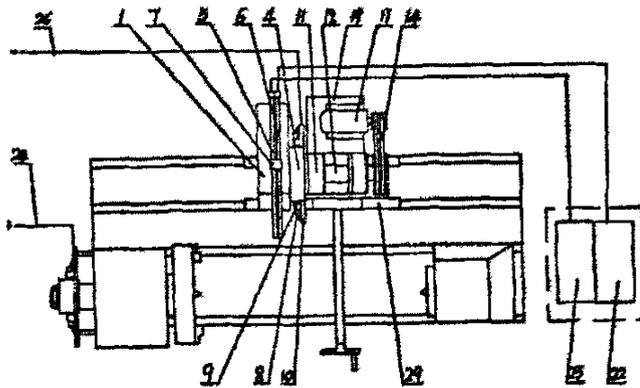
阴极装置与短电弧加工机床安装关系如图 3-11 所示:



a) 总装主视结构示意图



b) 总装左视结构示意图



c) 总装俯视结构示意图

1. 防护罩
2. 工具电极
3. 电极座
4. 阴极集电环
5. 压力水管
6. 压力气管

7. 水气管固定座 8. 电刷 9. 电刷架 10. 阴极集电板 11. 主轴座
12. 主轴 13. 从动皮带轮 14. 传动带 15. 绝缘板 16. 主动皮带轮
17. 主轴调速电机 18. 垫高块 19. 拖板 22. 气源 23. 水源 25. 阳
极电缆 26. 阴极电缆 29. 床鞍

图 3-11 阴极装置与短电弧加工机床安装关系示意图

3.2.6 水气混合装置

水气混合装置是短电弧加工必不可少的重要组成部分，水气混合效果以及水气的雾化效果都对短电弧加工机床的加工性能和加工质量以及降噪起着至关重要的作用。在水气混合装置的研制中，所确定的核心思想就是尽可能提高短电弧加工的加工效率、想方设法抑制和降低噪声、尽可能保证表面加工质量等。为此，进行了大胆创新，经过长期的研究和探索，并进行了大量的实验和反复调试，最终研制成功的水气混合装置，工作性能稳定可靠，达到了预期的工作效果，为强电加工机床的研发提供了一种新型工作介质供给装置。

1. 分离式水气供给：在水气供给装置的初期研制中，主要采用了分离式水气供给方式，即水和气分别由两根管线输送，然后在管线出口处进行混合。研制过程中设计了水平分离式（图 3-12 a）和垂直轴向分离式（图 3-12 b）两种结构的分离式水气供给装置并进行了大量的实验研究。研究表明，水平分离式水气供给装置工作效果较差，而垂直轴向分离式水气供给装置在采用石墨工具电极的情况下，取得了较好的工作效果，但对于金属工具电极工作效果却不理想。

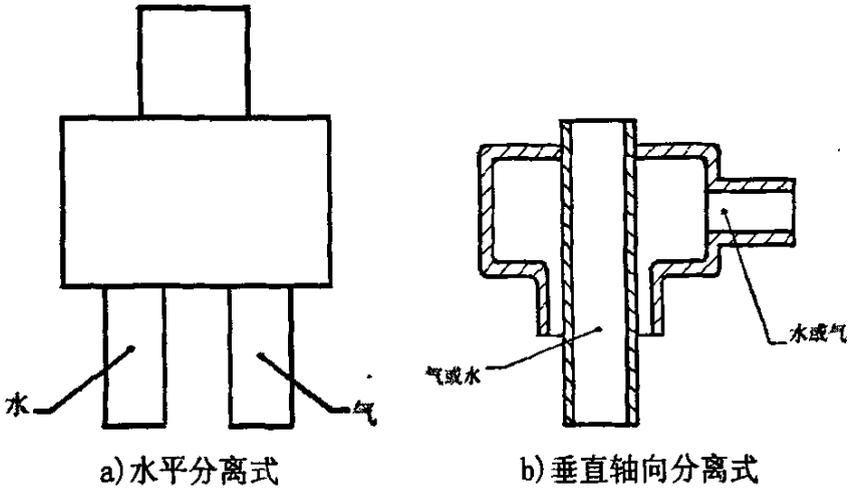


图 3-12 分离式水气供给装置

2. 混合式水气供给：由于分离式水气供给装置经过反复实验，其工作效果未达到设计时的理想状态，因此又对水气供给装置进行了进一步的改进设计，在垂直轴向分离式水气供给装置的基础上，重新拟定了外混式水气供给装置（图 3-13 a）和内混式水气供给装置（图 3-13 b）两种结构并进行了大量的实验研究。研究表明，内混式水气供给装置工作效率明显提高，达到了预定的设计要求。内混式水气供给装置既可以保证气体工作压力稳定、损耗小，又能获得因工件和工具电极材料不同时所需的液滴大小，且工作稳定，加工效率高。

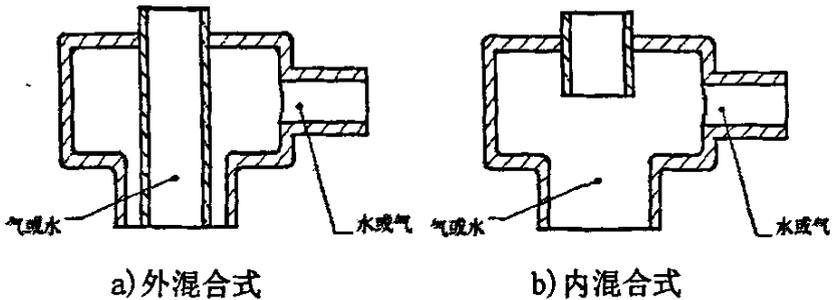


图 3-13 混合式水气供给装置

水气混合装置的工作效果除与结构有关外，还与水泵的供水压力、气泵的供气压力、水咀口径以及气咀口径等参数有关。通过控制调节系统改变供水压力、供气压力、水咀口径以及气咀口径等参数，即可调节水气混合介质的工作状态，获得所需特性和状态的水气混合工作介质。

对于不同的工件材料，可以选择不同的工作气体和不同的水溶液配方。不同的工作气体和不同配方的水溶液的合理组合，可以获得加工所需的理想工作介质，最大限度地抑制和减少加工过程中熔化金属参与热爆炸，降低加工噪音。同时，理想工作介质还可促使熔化金属快速剥离工件表面，提高加工效率，获得理想的加工表面质量。

3.2.7 辅助支撑设计

DHZ16040CG 短电弧加工机床所加工的水泥磨辊、磨煤辊以及钢轧辊等工件的设计最大加工直径为 $\phi 1600\text{mm}$ ，最大加工长度 5000mm ，因此工件重量要远远大于 CW61100 型车床所能加工的工件重量，原机床主轴承能力已经不能满足 DHZ16040CG 短电弧加工机床的设计承载要求。为了确保所研制的短电弧加工机床的承载能力，实现正常的加工，需要增加辅助支撑，从而提高机床的承载能力。辅助支撑安装在机床主床身上，与工件的接触方式采用滚轮支撑，当工件旋转时，滚轮跟随工件同时旋转，以减小接触面的磨损。图 3-14 为辅助支撑结构示意图，图 3-15 为可见辅助支撑结构的 DHZ16040CG 短电弧加工机床正在加工水泥磨辊。

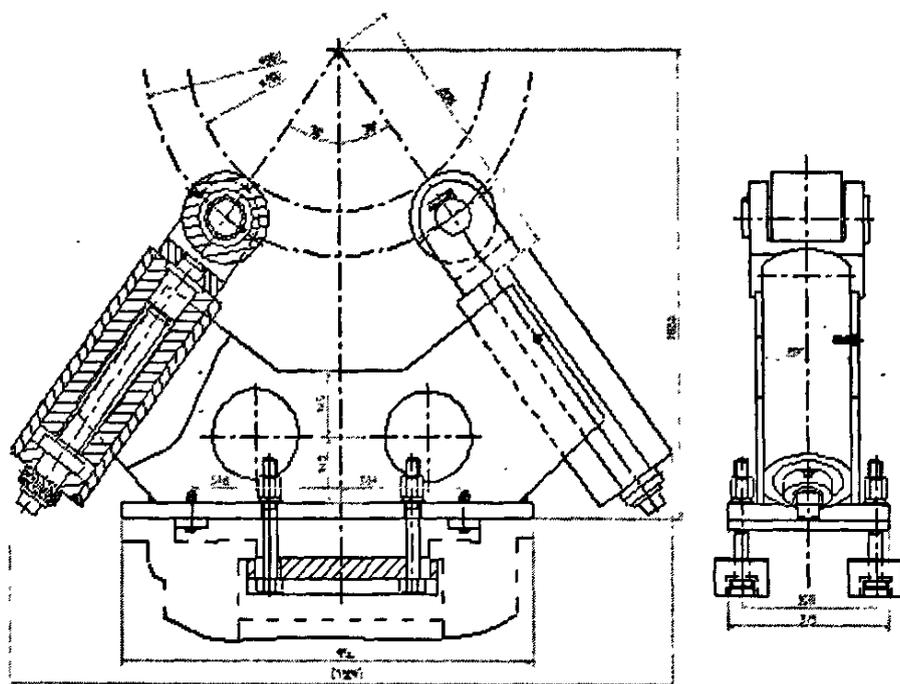


图 3-14 辅助支撑结构示意图

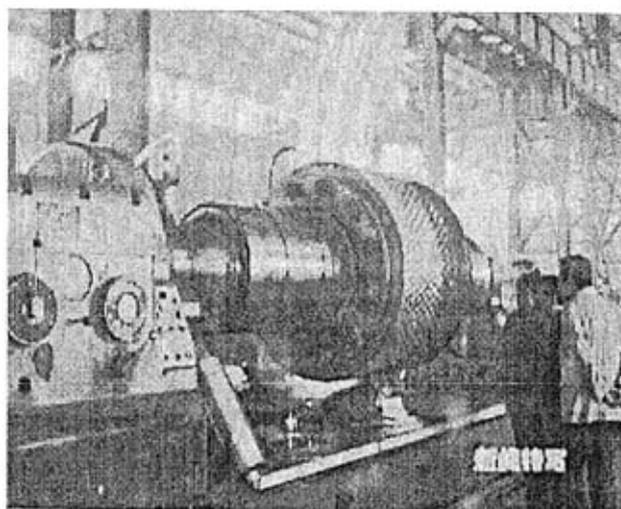


图 3-15 DHZ16040CG 短电弧加工机床正在加工水泥磨辊

3.3 短电弧机床电气系统设计

3.3.1 短电弧加工电源

短电弧加工技术中的短电弧加工电源是该技术的核心部件之一，经过多年来的潜心研究和大量的实验，特别是经过电流性能的比较实验证明，所研究的短电弧加工电源与配套装置具有独特的技术性能，能够进行硬面材料的高效去除加工。

短电弧加工以工具电极和工件作为放电电极，加工过程中工具电极与工件表面产生特殊的电作用，形成强电子电流（电源电流可达 4000A），在雾化介质中进行短电弧放电并产生高温高热使工件表层金属迅速熔化而剥离工件母体，达到尺寸精度和粗糙度的加工目的。

与短电弧加工电源性能相关的主要技术参数有整流形式、电流上升速度、电流整形后的特定波形及工作频率、工作电压、工作电流等。另外，与短电弧加工电源配套的阴极装置以及水气混合装置的技术性能也直接影响短电弧加工的综合技术性能。在综合考虑各种影响因素的基础上，经过长期研究和大量的实验，最终研制成功的短电弧加工电源工作原理如图 3-16 所示。

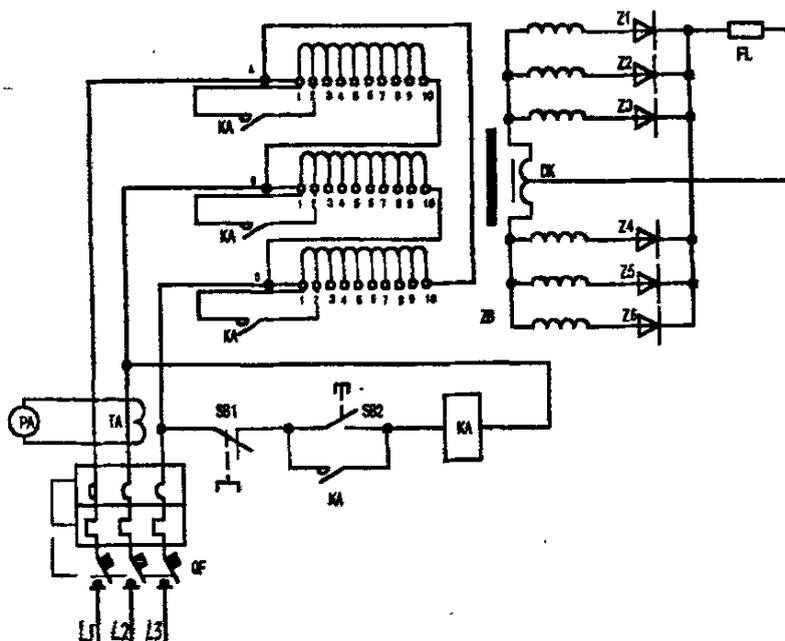


图 3-16 短电弧加工电源电路图

该电源由主电路和控制电路组成，通过空气开关 QF 与三相动力电源线相联。控制电路上依次串联有停止按钮 SB2、启动按钮 SB1 以及交流接触器 KA，同时在启动按钮 SB1 两端并联有交流接触器 KA 的常开触点，以完成相关控制逻辑。主电路主要由特制的变压器 ZB 和输出装置组成。变压器的初级绕组的三个线圈采用三角形接法，其三角形联结方法为 AB、BC、CA 相联，在每个线圈上均设置有动静调压接线柱，动静调压接线柱通过单独的导线相联，在联结线路中设有交流接触器的常开触点 KA。另外，在主电路中设置有电流互感器 TA，电流表 PA 与电流互感器并联。该电源的设计工作电压为 0—60V、工作电流 0—10000V，通过动调压接线柱 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 的不同调节，可实现 6V、12V、18V、24V、30V、36V、42V、48V、54V、60V 的调压功能。变压器 ZB 次级线圈采用带引弧电抗器 DK 的双反星接法，引弧电抗器 DK 的输出端通过整形电路与短电弧加工机床

的阴极装置相联。引弧电抗器的两端分别与次级绕组线圈双反星联结的两个输入点相联，双反星联结的六个整流二极管的负极相互并联并通过分流起 FL 经过整形电路后与被加工工件相联，采用该联结方式可以实现工作中需要的 0—10000A 自由浮动工作电流。

3.3.2 短电弧机床工作电路设计

DHZ16040CG 短电弧加工机床电气系统主要工作元件有水气混合装置工作气泵、水气混合装置工作水泵、纵向工作进给电动机、主轴驱动电动机、工具电极驱动电动机等，工作电路原理图如图 3-17 所示。

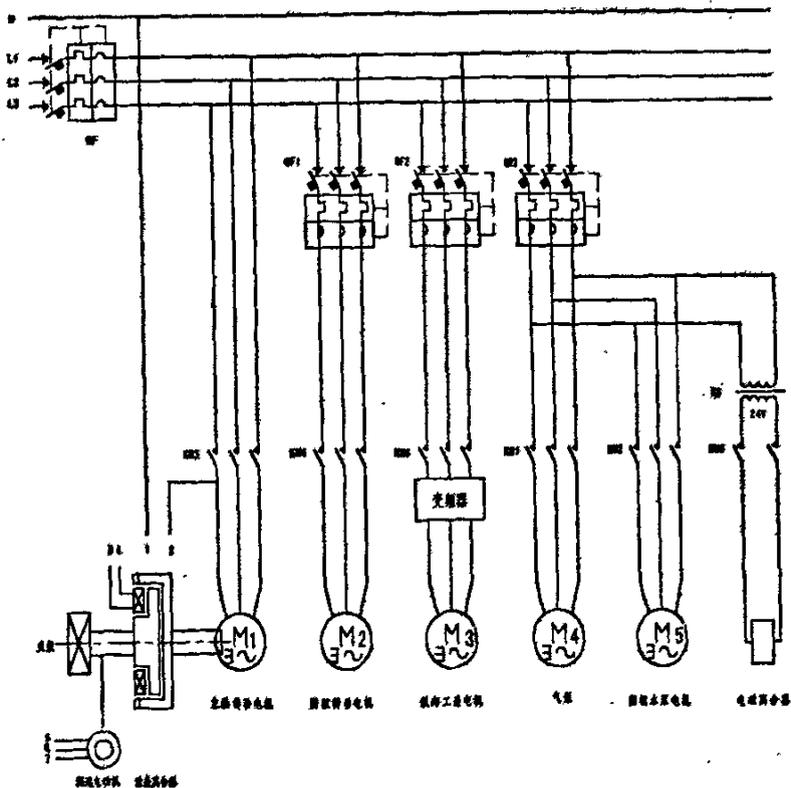


图 3-17 DHZ16040CG 短电弧加工机床工作电路原理图

按照设计要求, 为了防止在无工作介质的情况下, 因操作失误出现电弧放电现象, 机床工作时要首先输送工作介质, 因此将气泵、水泵电机起动安排在操作程序的第一步。气泵、水泵电机起动和停止分别由接触器 KM1 和 KM2 的常开触点控制。

在工作介质打开后, 即可起动主轴驱动电动机和工具电极驱动电机(阴极转动电机)。主轴驱动电动机的启动和停止分别由 KM3 和 KM4 接触器的常开触点进行控制。

在上述操作完成后, 即可起动纵向周期性进给电机。纵向周期性进给电机及配套变频器的启动和停止由 KM6 接触器的常开触点进行控制。由于纵向周期性进给有手工进给和机动进给两种进给方式, 且手工进给和机动进给由电磁离合器进行切换。手动进给时电磁离合器断开将机动进给路线切断, 而机动进给时电磁离合器合上将机动进给路线接通。在接通机动进给之前, 为了防止传动齿轮打齿, 要在电磁离合器通电吸合后延时一定时间再接通纵向机动进给电机, 该功能可通过时间继电器实现。电磁离合器的通断由 KM5 接触器的常开触点进行控制。

3.3.3 短电弧机床控制电路设计

按照工作电路中的各有关元件工作顺序和工作要求, 可进行控制电路设计, 所设计的 DHZ16040CG 短电弧加工机床控制电路原理图如图 3-18 所示。

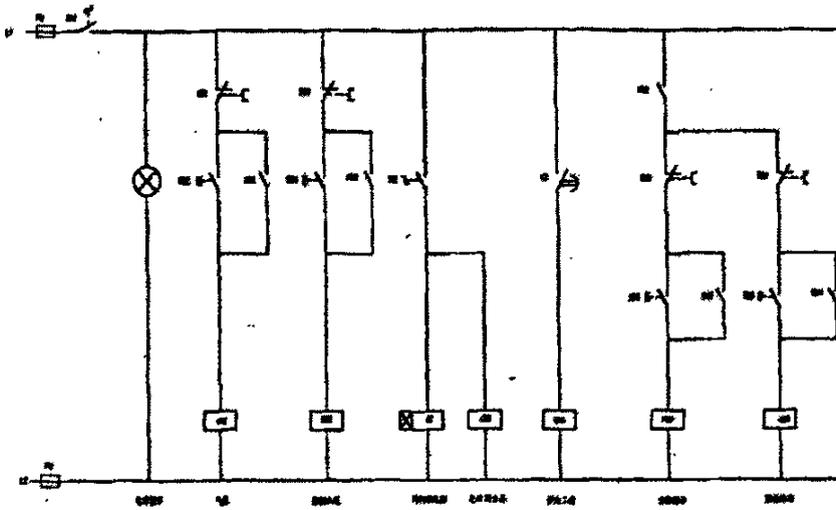


图 3-18 DHZ16040CG 短电弧加工机床控制电路原理图

在控制电路中设有控制电路总电源开关，接触器、继电器控制开关和电源指示灯。当接通控制电路总电源开关 SA1 后，控制电路上电，电源指示灯亮。

为了实现工作电路中各有关元件工作顺序要求，在控制电路的 KM3（主轴起动停止控制）和 KM4（工具电极起动停止控制）接触器电路中串联了 KM2（阴极水泵起动停止控制）接触器的常开触点，以确保只有当阴极水泵工作后，才能起动主轴驱动电机和工具电极驱动电机。

为了实现纵向周期性进给机构的工作顺序要求，即在电磁离合器通电吸合后延时一定时间再接通纵向机动进给电机，在控制电路中与接触器 KM5（纵向机动进给和手动进给切换电磁离合器通电控制）并联一个时间继电器 KT，时间继电器 KT 为上电延时继电器，其常开触点与接触器 KM6（纵向机动进给电机起动停止控制）串联。当接触器 KM5 通电同时接通时间继电器 KT，即可保证纵向机动进给和手动进给切换电磁离合器通电一定时间后，在接通纵向工作进给电机电源，以防止操作不当造成打齿现象。

第四章 短电弧机床引流系统设计

4.1 短电弧加工机床的电源

短电弧机床的加工电源为新疆大学特种加工技术研究所特聘教授周碧胜等同志经过十多年潜心研究，开发出的一种短电弧特种加工新型电源（研制的新型电源已于 2003 年申请并获得了实用新型专利“短电弧切削设备用的阴极装置及电源电路”，ZL 专利号：02291891.4），该电源为低电压、大电流直流脉冲电源。电源工作电压为 0—60V，工作电流可达 4000A，脉冲频率低于已知的电加工电源采用的频率。

4.1.1 短电弧加工电源的主要技术特性简述如下：

1. 整流形式：实验证明电源整流形式对材料去除效率具有直接的影响，所研制的电源采用特殊整流方式，其加工效率明显高于三相半波整流方式、六相半波整流方式以及三相桥整流方式等。
2. 电流上升速度：电流上升速度对生产率及正常放电加工有非常重要的影响，如果电流上升速度达不到工作要求，将无法实现高效加工。短电弧加工电源采取某些特殊的技术措施，实现了在粗规准、半精规准和精规准加工中有比较合理且符合各规准要求的电流上升率，即可保证加工效率，又能节省电能消耗。事实证明，为实现电流上升率所采用的技术措施是成功的。
3. 电源工作特性：电源工作特性对短电弧加工电源的加工效率也有直接的影响。通过大量的实验和比较，所选择的电压硬特性和电流自由特性完全符合加工要求，生产率高于其它特性，且易于操作和控制。

4. 电流波形和工作频率：电源电路中电流整形的目的是为了产生和获得能维持短电弧加工过程所需的持续稳定的电流，满足不同规范下的加工要求以及取得显著降噪效果的特定波形。目前所选用的电流波形和工作频率正是经过大量实验所取得的突破性技术成果，而且已经得到了生产实际的验证。同时，采用特定的电流波形，即降低了电极的损耗率，又保证了高效加工。生产实践和大量实验证明，电流波形对以上指标的影响是至关重要的。
5. 工作稳定性：由于强电流及相关频率影响，如何有效保证电源能够长期稳定工作，是该电源研制需要解决的关键技术之一。通过采用先进的设计理念和各种技术手段，对实验数据进行分析筛选，经过优化设计，确保了短电弧加工电源的工作稳定性。所研制的短电弧加工电源实际运行效果表明，该电源工作稳定可靠、电效率高、可以根据工作状态自动维持合理稳定的电流力、常时间连续运行温升不超过 40℃，完全能够满足工作要求。
6. 电流通道：由于采用短电弧放电方式进行加工，工作电流高达数千安培，因此如何保证电流通道最短，电流损耗最小，是保证短电弧加工电源工作性能的关键环节之一。设计短电弧加工机床时，要采取必要的技术措施，优选电流通道，采用绝缘材料进行关键部位的绝缘，都可保证短电弧加工电源的电流工作效率。

短电弧加工原理与电火花加工的原理不同，它们在电源放电过程中，利用的区间不同，以下为电火花加工时的五种放电状态，其中的稳定电弧阶段为短电弧加工时的工作区间，而电火花却是利用了其中的火花放电区间。

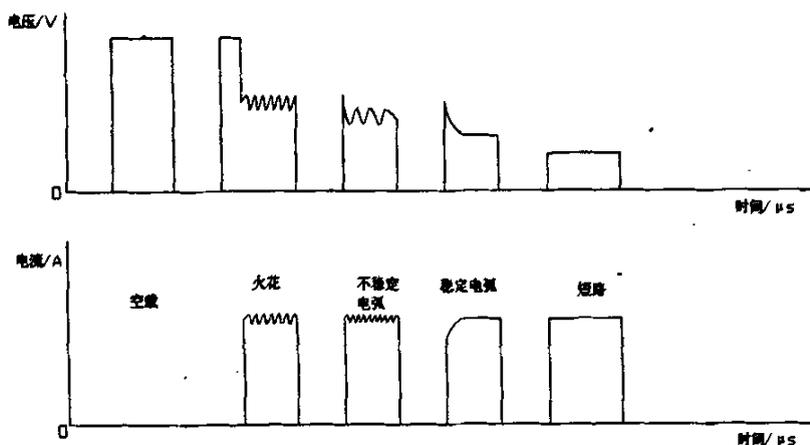


图 4-1 电火花加工时的 5 种放电状态

4.2 现有上电方式——液态汞上电

汞又称水银，原子序数 80，原子量 200.59，为常温下唯一呈液态的普通金属，熔点 -38.87°C ，沸点 356.58°C ，密度 $13.5939\text{g}/\text{cm}^3$ 。汞很容易与几乎所有的普通金属形成合金，包括金和银，但不包括铁，这些合金统称汞合金(或汞齐)；该金属同样有恒定的体积膨胀系数，其金属活性低于锌和镉，且不能从酸溶液中置换出氢。通常的汞化合物中，它的化合价是 +1 或者 +2。很少有 +3 价的汞化物存在；汞在空气中很容易挥发；汞导热性能差，但具有良好的导电性，其在 20°C 时的电阻率是 $95.8 \times 10^{-3}\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。汞最常用的应用是制造工业用化学药物以及在电子或电器产品中获得应用；此外，由于汞的恒定的体积膨胀系数的特性，使得汞可以用来制作温度计，尤其是在测量高温的温度计中，但是由于汞的易挥发性，现在很多国家都开始禁止在人体

体温计中使用汞，转而使用酒精或别的替代物；汞可以将金从其矿物中分解出来，因此经常被用在金矿中；其它用途：水银开关、杀虫剂、牙医用的汞齐、生产氯和氢氧化钾的过程中、防腐剂、在一些电解设备中充当电极、电池和催化剂。

4.2.1 液态汞上电方式典型应用及其特点

用于汞在常温下为液态，具有很好的流动性，用来传递电流具有电阻小，无干扰信号产生等优点，因此常被用来做为动体与静体之间的电流或电信号的传递介质。水银作为电信号传递介质的典型应用有水银导电滑环，旋转接头等，这些结构具有结构紧凑，经久耐用，无需维护，无杂讯，接触电阻小于 $1m\Omega$ 等优点。水银作为电流传递介质的典型应用如一种新型的电机无泄漏集电装置，其结构如图：

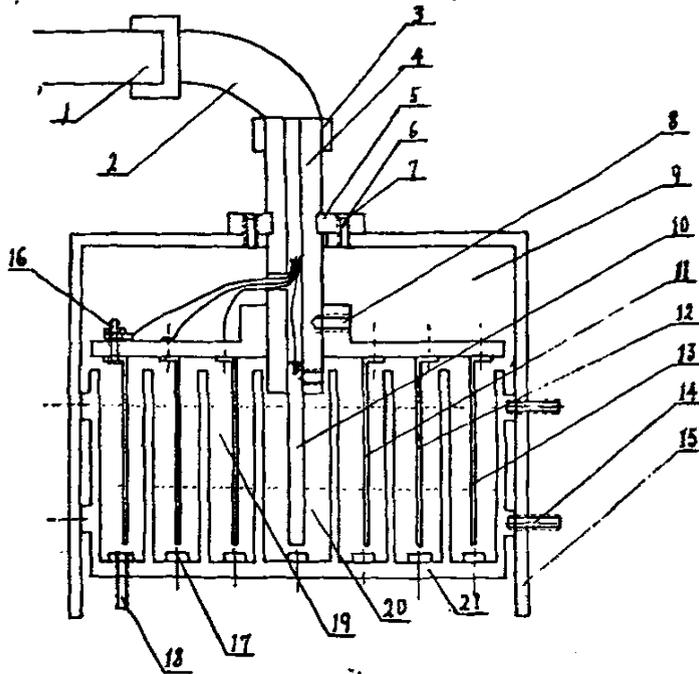


图 4-1 液态汞上电的典型应用

1—电机转轴，2—软轴或万向轴，3—连轴器，4—集电装置转轴，5—轴瓦，6—螺丝，7—转轴中心孔引出电源线，8—螺丝，9—集电环座，10—集电棒，11、12、13—集电空心环，14—固定螺丝，15—外壳架，16—固定螺丝连接柱，17—导电环，18—固定螺丝连接柱，19—绝缘油，20—导电液（水银），21—总导电液（水银）箱杯体

该装置的工作原理：采用集电环与导电液箱（杯）体以直立悬空包含固定的技术方案，将集电环设置成空心环和棒形，其中集电棒固定在转轴中心，集电空心环直径需大于转轴直径，可根据电机的不同类型和规格将集电空心环分别套在转轴外层，沿转轴作轴向固定或轴的径向固定；然后根据集电空心环和集电棒的直径及在转轴上的轴向或径向固定形式，将导电液体箱（杯）设置匹配包含集电空心环和集电棒成上开口的杯体状，其底部有固定的接线柱连接着的导电环，导电液体注入直立状的导电液箱（杯）体内，当电机工作时，电流从固定的导电液箱（杯）体底的接线柱连接的导电环通过导电液体传入转动的集电环（棒），向电机转子输送电流；对于高速电机在导电液箱（杯）体口可设置成液体防溢圈，可有效防止液体外溢，在导电液体箱（杯）体内注入导电液后，可再注入适量轻质绝缘油浮在导电液上层，可有效防止导电液体蒸发，而且可起冷却和吸热作用，从而实现无需附加密封机构的无泄漏液体集电装置。它可直接连轴在立式电机上使用，对于卧式电机可用弹簧，橡胶软轴或万向轴 90 度转向连轴使用。本装置与集电环碳刷上电形式相比具有如下优点：

1. 结构简单，生产及使用、安装维护方便，它无需复杂的机械密封附加机构，整个装置一体化。

2. 安全、可靠，无火花，无电刷，无磨损。
3. 高效、节能，本装置的集电环（棒）接触导电面积 100%的高效率，导电液采用泵，经 Qj44 双臂电桥对样机两极接触电阻测定为 0.00443Ω ，其电阻的功耗热耗极低；而且静，动态均有优良的接触性能，大大提高了电机工作的动态稳定性能。

4.2.2 液态汞上电方式的缺点：

汞很易蒸发到空气中引起危害：因为：

1. 在 0°C 时已蒸发，气温愈高，蒸发愈快愈多；每增加 10°C 蒸发速度约增加 1.2~1.5 倍；空气流动时蒸发更多。
2. 汞不溶于水，可通过表面的水封层蒸发到空气中。
3. 粘度小而流动性大，很易碎成小汞珠，无孔不入地留存于工作台、地面等处的缝隙中，既难清除，又使表面面积增加而大量蒸发，形成二次污染源。
4. 地面、工作台、墙壁十天花板等的表面都吸附汞蒸气，有时，汞作业车间移作它用，仍残留有汞危害的问题。工人衣着及皮肤上的污染可带到家庭中引起危害。

4.3 现有上电方式——集电环电刷上电

4.3.1 电刷

电刷是用于电机的换向器或滑环上，作为导出导入电流的滑动接触体，它的导电，导热以及润滑性能良好，并具有一定的机械强度。

4.3.1.1 电刷材料——石墨

石墨和金刚石一样，同为碳的同素异形体，它的结晶格架为六边形层状结构，每一网层间的距离为 3.40Å，同一网层中碳原子的间距为 1.42Å。属六方晶系，具完整的层状解理。解理面以分子键为主，对分子吸引力较弱，故其天然可浮性很好。石墨质软，黑灰色；有油腻感，可污染纸张。硬度为 1~2，沿垂直方向随杂质的增加其硬度可增至 3~5，比重为 1.9~2.3。在隔绝氧气条件下，其熔点在 3000℃以上，是最耐温的矿物之一。

1. 石墨特性

石墨由于其特殊结构，而具有如下特殊性质：

- 1) 耐高温性：石墨的熔点为 $3850 \pm 50^\circ\text{C}$ ，沸点为 4250°C ，即使经超高温电弧灼烧，重量的损失很小，热膨胀系数也很小。石墨强度随温度提高而加强，在 2000°C 时，石墨强度提高一倍。
- 2) 导电、导热性：石墨的导电性比一般非金属矿高一百倍。导热性超过钢、铁、铅等金属材料。导热系数随温度升高而降低，甚至在极高的温度下，石墨成绝热体。
- 3) 润滑性：石墨的润滑性能取决于石墨鳞片的大小，鳞片越大，摩擦系数越小，润滑性能越好。
- 4) 化学稳定性：石墨在常温下有良好的化学稳定性，能耐酸、耐碱和耐有机溶剂的腐蚀。
- 5) 可塑性：石墨的韧性好，可压成很薄的薄片。
- 6) 抗热震性：石墨在常温下使用时能经受住温度的剧烈变化而不致破坏，温度突变时，石墨的体积变化不大，不会产生裂纹。

2. 石墨类别

石墨的工艺特性主要决定于它的结晶形态。结晶形态不同的石墨矿物，具有不同的工业价值和用途。工业上，根据结晶形态

不同，将天然石墨分为三类：

1) 致密结晶状石墨

密结晶状石墨又叫块状石墨。此类石墨结晶明显晶体肉眼可见。颗粒直径大于 0.1 毫米。晶体排列杂乱无章，呈致密块状构造。这种：石墨的特点是品位很高，一般含碳量为 60~65%，有时达 80~98%，但其可塑性和滑腻性不如鳞片石墨好。

2) 鳞片石墨

石墨晶体呈鳞片状；这是在高强度的压力下变质而成的，有大鳞片和细鳞片之分。此类石墨矿石的特点是品位不高，一般在 2~3%，或 100~25%之间。是自然界中可浮性最好的矿石之一，经过多磨多选可得高品位石墨精矿。这类石墨的可浮性、润滑性、可塑性均比其他类型石墨优越；因此它的工业价值最大。

3) 隐晶质石墨

隐晶质石墨又称非晶质石墨或土状石墨，这种石墨的晶体直径一般小于 1 微米，是微晶石墨的集合体，只有在电子显微镜下才能见到晶形。此类石墨的特点是表面呈土状，缺乏光泽，润滑性也差。品位较高，一般的 60~80%，少数高达 90%以上。矿石可选性较差。

3. 石墨的用途

由于石墨具有以上优良的性能，因而在冶金、机械、电气、化工、纺织、国防等工业部门获得广泛应用。

1) 作耐火材料

石墨的一个主要用途是生产耐火材料，包括耐火砖，柑祸，连续铸造粉，铸模芯，铸模洗涤剂 and 耐高温材料。近 20 年来，耐火材料工业中两个重要的变化是镁碳砖在炼钢炉内衬中被广泛应用，以及铝碳砖在连续铸造中的应用。使石墨耐火材料与炼钢业

紧密相连，全世界炼钢业约消耗 70%的耐火材料。

- (1) 镁碳砖镁碳耐火材料是 60 年代中期，由美国研制成功，70 年代，日本炼钢业开始把镁碳砖用于水冷却电弧炉炼钢中。目前在世界范围内镁碳砖已大量用于炼钢，并已成为石墨的一种传统用途。80 年代初，镁碳砖开始用于氧气顶吹转炉的炉衬。目前英国用作氧气顶吹炼钢炉衬的材料大部分是镁碳砖，炉衬寿命为 1000 次—1500 次，而日本，炉衬的寿命为 2000 次—2500 次。
- (2) 铝碳砖铝碳耐火材料主要用于连续铸造、扁钢坯自位输管道的保护罩，水下喷管以及油井爆破筒等。在日本用连续铸造生产的钢占总生产量的 90%以上，英国为 60%。
- (3) 坩锅及有关制品用石墨制造的成型和耐火的坩锅及其有关制品，例如坩锅、曲颈瓶、塞头和喷嘴等，具有高耐火性，低的热膨胀性，熔炼金属过程中，受到金属浸润和冲刷时亦稳定，高温下良好的热震稳定性和优良的热传导性，所以石墨坩锅及其有关制品被广泛用于直接熔融金属的工艺中。

传统的石墨粘土坩锅用含碳量大于 85%的鳞片石墨制造，通常石墨鳞片应大于 100 目（BSS 筛），而目前国外在坩锅生产技术中的重要改进是，所用石墨的类型、鳞片大小和质量有了更大的灵活性；其次是用碳化硅石墨坩锅替代了传统的粘土石墨坩锅，这是随着炼钢工业中恒压技术的引进而产生的。采用恒压技术还可以使小鳞片石墨得到应用，在粘土石墨坩锅中，含碳量达 90%的大鳞片石墨约占 45 %，而在碳化硅石墨坩锅中，大鳞片成分的含量仅占 30%，石墨的含碳量降为 80%。

2) 炼钢

石墨和其他杂质材料用于炼钢工业时可作为增碳剂。渗碳使用的碳质材料的范围,很广,包括人造石墨、石油焦、冶金焦炭和天然石墨。在世界范围内炼钢增碳剂用石墨仍是土状石墨的主要用途之一。

3) 作导电材料

石墨在电气工业中广泛用来作电极、电刷、碳棒、碳管、水银整流器的正极、石墨垫圈、电话零件、电视机显像管的涂层等等。其中以石墨电极应用最广,在冶炼各种合金钢、铁合金时,使用石墨电极,这时强大的电流通过电极导入电炉的熔炼区,产生电弧,使电能转化为热能,温度升高到 2000 ℃ 左右,从而达到熔炼或反应的目的。此外,在电解金属镁、铝、钠时,电解槽的阳极也用石墨电极。生产金刚砂的电阻炉也用石墨电极作炉头导电材料。

电气工业中所使用的石墨,对粒度和品位要求很高。如碱性蓄电池和一些特殊的电碳制品,要求石墨粒度控制在 150 目~325 目 (0.01mm — 0.042mm) 范围内,品位 90% - 99% 以上,有害杂质 (主要是金属铁) 要求在 10% 以下。电视机显像管所用的石墨,粒度要求在 0.5mm 以下。

4) 作耐磨和润滑材料

石墨在机械工业中常作润滑剂。润滑油往往不能在高速、高温、高压的条件下使用,而石墨耐磨材料可以在 200 ℃ ~2000 ℃ 温度并在很高的滑动速度下 (100 m/s) 不用润滑油工作。许多输送腐蚀介质的设备,广泛采用石墨材料制成活塞环、密封圈和轴承,它们运转时,勿需加入润滑油,石墨乳也是许多金属加工 (拔丝、拉管) 时的良好的润滑剂。

5) 作耐腐蚀材料

石墨具有良好的化学稳定性。经过特殊加工的石墨，具有耐腐蚀、导热性好、渗透率低等特点，而广泛用于制作热交换器、反应槽、凝缩器、燃烧塔、吸收塔、冷却器、加热器、过滤器、泵等设备。这些设备用于石油化工、湿法冶金、酸碱生产、合成纤维、造纸等工业部门，可节省大量的金属材料。

6) 作铸造、翻砂、压模及高温冶金材料

由于石墨的膨胀系数小，而且能耐急冷急热的变化，可作为玻璃器皿的铸模，使用石墨后，黑色金属得到的铸件尺寸精确，表面光洁，成品率高，不经加工或稍作加工就可使用，因而节省了大量金属。生产硬质合金等粉末冶金工艺，通常用石墨材料制成压模和烧结用的器皿。单晶硅的晶体生长柑祸、区域精炼容器、支架、夹具、感应加热器等，都是用高纯石墨加工而成的。此外，石墨还可以作真空冶炼的石墨隔热板和底座，高温电阻炉炉管、棒、板、格栅等元件。

7) 用于原子能工业和国防工业

石墨具有良好的中子减速性能，最早作为减速剂用于原子反应堆中，铀—石墨反应堆是目前应用较多的一种原子反应堆。作为动力用的原子能反应堆中的减速材料应当具有高熔点、稳定、耐腐蚀的性能，石墨完全可以满足上述要求。作为原子反应堆用的石墨纯度要求很高，杂质含量不应超过几十个PPM(为百万分之一)，特别是其中硼的含量应小于0.5PPM。在国防工业中还用石墨制造固体燃料火箭的喷嘴，导弹的鼻锥，宇宙航行设备的零件，隔热材料和防射线材料。

8) 作防垢防锈材料

石墨能防止锅炉结垢，有关单位试验表明，在水中加入一定

量的石墨粉（每吨水大约用 49 ~59g），能防止锅炉表面结垢。此外石墨涂在金属、烟囱、屋顶、桥梁，管道上可以防腐和防锈。

9) 石墨新用途

随着科学技术的不断发展，人们对石墨也开发了许多新用途。

柔性石墨制品。柔性石墨又称膨胀石墨，是 70 年代开发的一种新的石墨制品。1971 年美国研究成功柔性石墨密封材料，解决了原子能阀门泄漏问题，随后德、日、法也开始研制生产。这种产品除具有天然石墨所具有的特性外，还具有特殊的柔性和弹性。因此，是一种理想的密封材料。广泛用于石油化工、原子能等工业领域。国际市场需求量逐年增长。

制作半金属摩擦材料。自 70 年代以来，离合器和自动衬广泛使用半金属摩擦材料。半金属摩擦材料是将石墨和金属粉、钢纤维、陶土粉用合成树脂粘结而成。这些自动衬主要可用于高速设备，如飞机、卡车以及越野车的制动装置和离合器片。近几年来，石棉逐渐被石墨所取代，在一些半金属衬面中，石墨的含量已从 1%~2%增加到 5%。该领域石墨消耗量取决于汽车工业的发展状况。

4.3.1.2 电刷的分类

随着科学技术的发展，电机的种类和使用的工矿条件越来越多样化，因而需要有各种不同品级的电刷来满足这些要求，故电刷的种类也随着电机工业的发展而越来越多。

人们为了使用和管理方便，对众多的电刷进行了分类。目前国内流行的主要分类方法有：

1. 按材质的软硬可分为软质电刷、中硬质电刷和硬质电刷；

2. 按电刷的使用对象可分为汽轮发电机用电刷、轧钢电机用电刷、牵引电机用电刷、汽车拖拉机电机用电刷、电动工具电机用电刷、飞机电机用电刷等；
3. 按电刷的颜色可分为黑色电刷（用纯碳石墨材料制成）和有色电刷（用铜等金属材料和石墨制成）；
4. 按原材料的组成和生产工艺的不同可分为：石墨刷——以石墨粉为原料，以沥青（煤焦油）或树脂为粘结剂经混合、压制、焙烧或固化而制成；炭石墨刷——以焦炭和石墨为原料，以沥青（煤焦油）为粘结剂经混合、压制、焙烧而制成；电化石墨刷——以焦炭粉或石墨粉为原料，以沥青（煤焦油）为粘结剂经混合、压制、焙烧、石墨化而制成；金属石墨刷——以金属粉末和石墨粉为原料经混合、压制、烧结而制成；

这种分类方法比较科学，使用比较广泛。我国电刷也采用这种分类法。

电刷的分类如表 4-1 所示：

表 4-1 电刷的类别

类别代号	系列代号	特点	型号
石墨 S	S1	天然石墨基	S103、S113、S126、S178
	S2	焦炭基	S251、S253、S255、S270
	S3	炭黑基	
电化 石墨 D	D1	天然石墨基	D104、D106、D172、D172NM
	D2	焦炭基	D202、D213、D214、D215、D252、 D280、D229
	D3	炭黑基	D308、D308L、D309、D312、D313、

			D317、D317F、D374、D374B、D374D、 D374F、D374L、D374BL、D374DL、 D374N、D374S、D374IG、D376、 D376N、D376Y
	D4	木炭基	D464F、D479
树脂 粘合 石墨 R	R1	天然石墨基	R101、R103、R104、R126、R151、 R153、R155、R170
	R2	焦炭电化石 墨基	
	R3	炭黑电化石 墨基	
金属 石墨 J	J1	不带粘结剂 铜电刷	J100、J101、J102、J103、J104、 J105、J106、J113、J151、J164、 J190
	J2	带粘结剂 铜电刷	J200、J201、J203、J204、J205、 J206 J208、J209、J210、J213、J220
	J4	直接压入法 连接铜电刷	J412、J453、J455、J456、J457、 J458、J469、J470、J471、J472、 J476、J480、J481、J482、J483、 J484、J485、J488、J489、J490、 J491

其中S—表示石墨电刷，“S”之后的数字为顺序号；

D—代表电化石墨电刷，“D”之后的第一位数字表示：

- 1—代表石墨基（即原材料以石墨为基础）；
 - 2—代表焦碳基（即原材料以焦炭为基础）；
 - 3—代表炭黑基（即原材料以炭黑为基础）；
 - 4—代表木炭基（即原材料以木炭为基础），其余数字为顺序号；
- J—代表金属石墨电刷，“J”之后的第一位数字表示：1—代表无粘结剂电刷，
- 2—代表有粘结剂电刷，其余数字为顺序号，字尾字母 M、L、N、P、S、Y 等表示刷体浸渍不同的有机物

4.3.2 集电环

集电环即是安装在动体上，从碳刷向动体传输电流的中间环节，一般用导电性、耐磨性和自润滑性能良好的金属材料制成。

4.3.2.1 集电环分类

1. 铜及铜合金集电环

1) 铜及铜合金由于具有一些优良的性能而在集电环的制造中获得了广泛的应用。

（1）优良的导电、导热性

铜最有优异的品质是具有极高的导电、导热性，其导电率为 $58m/(\Omega \cdot mm^2)$ ，热导率为 $386W/(m \cdot K)$ ，仅次于银。

（2）良好的耐蚀性

铜具有良好的耐蚀性能，由于普通钢材，在碱性气氛中优于铝。铜极耐大气腐蚀，因在其表面可形成一层主要由碱式硫酸铜组成的保护薄膜。不含 CO_2 和 O 的凝结水对铜实际不起作用。铜在淡水中的腐蚀速度很低（约 $0.05mm/a$ ）。

（3）易加工成形性

铜是面心立方晶体结构,有 12 个滑移系,塑性变形能力强(抗拉强度为 220Mpa、疲劳强度为 70Mpa、断裂韧性在室温时为 $80\sim 140 J/cm^2$),可以在冷热状态下进行各种压力加工成形,如挤压、轧制、拉伸、冲压、模锻等,可加工成板、带、箔、棒、型、线及各种形状的构建如螺母、螺栓、销钉、支架、罩壳、轴承保持器等,广泛应用于所用工业领域,是世界上最重要的金属材料之一。

2) 铜合金集电环的缺点

运行中集电环与电刷磨损严重,使用寿命短,磨损产生的大量粉末易烧伤集电环与电刷的接触面,故时有引起短路烧坏电动机事故的发生,以致造成设备故障;铜质集电环材质昂贵,制造工艺性差,产品的压溃强度低,在压装和装机过程中,因断裂和铸造缺陷使报废率高。

2. 钢质集电环

由于铜及铜合金集电环存在的以上缺点,行内开始考虑使用钢质集电环。与铜质集电环相比,钢质集电环具有耐磨性好,机械强度大,价廉物美,制造成形性好等优点,对于要求耐蚀性好的场合,我们可以选用不锈钢。不锈钢制集电环的常用材料为含铬的不锈钢如 ZG1Cr13,ZG1Cr8Ni9Ti 等制造,其中以 ZG2Cr13 的综合效果最佳,该不锈钢的主要组分(重量百分数)为:碳 $0.16\sim 0.24$,铬 $12.0\sim 14.0$,杂质为锰 ≤ 0.6 ,硅 ≤ 0.6 ,硫 ≤ 0.03 ,磷 ≤ 0.04 ,余量为铁。加工方法采用离心铸造法制造,将离心铸造成的毛坯,经热处理后,再车削加工而制成。

用 ZG2Cr13 制成的不锈钢集电环的技术性能参数如下:压溃强度 $1617 N/mm^2$,抗拉强度 $539\sim 637 N/mm^2$,延伸率 $\geq 16\%$,硬度 $170\sim 220HB$,而且这种不锈钢集电环组织致密,它与常规铜

质集电环相比，由于其压溃强度高，抗拉强度高，与各种电刷匹配运行时磨损小，通用性好，使用寿命可延长 5~15 倍，且还可提高与其匹配的电刷的使用寿命近 1 倍，同时能显著降低电机的运行故障，此外，制造时可以少量的铬代替大量的铜、锡、铅、锌、银等贵重有色金属，这样既节省了有色金属，又可降低制造成本 20~30%，并避免了在制造、压装和装机过程中因断裂和缺陷所造成的报废现象引起的废品率高的问题，总之它具有明显的经济效益和显著的社会效益。

· 不锈钢制集电环的缺点：由于集电环内部组织的不均匀，常常导致集电环三相电阻的不平衡，在装机运转过程中常因闪弧结瘤无法修复而报废；不锈钢材料不易加工，容易产生裂纹，废品率高；目前制造集电环用导电环的方法有铸造、锻造、或轧制等，这些方法都需要先制成长筒形毛坯料，经精加工后再切成单环，手续繁杂，费工费时，经济效益差；

3. 锌合金集电环

锌合金集电环是以锌合金为原料，通过压铸工艺一次制成导电环的单环毛坯，经过精加工，焊引线，压入绝缘塑料，制得锌合金集电环。这种集电环所使用的锌合金，是以锌为主要原料，辅以铝、铜、镁等元素按一定比例熔化而成，需要指出的是，必须选用纯度高的原料配制，如铝必选选 3 号以上的铝锭。若原料纯度低，制得的集电环致密性差，易溃裂。锌合金集电环的锌合金的配料比（重量百分比）： $Al23\sim28\%$ ， $Cu1.5\sim2.5\%$ ， $Mg0.01\sim0.03\%$ ，杂质 $Fe\leq 0.2\%$ ， $Pb\leq 0.03\%$ ， $Cd\leq 0.02\%$ ，余量为 Zn。

4. 复合材料集电环

为了克服单一材质集电环不可避免的缺点，如铜质集电环存

在的铸造组织不致密，存在疏松、砂眼、气孔和夹渣，且这类缺陷大多只有在组装后加工时才能发现，造成返工报废损失大；不锈钢集电环存在的导电性不佳，加工性能差，不易达到工作表面粗糙度要求，与碳刷匹配性差、摩擦系数高，运行中易出现拉弧，造成工作表面局部熔融产生硬点，从而加速碳刷磨损和集电环的烧损等，出现了一种复合材料集电环，即采用某种复合结构技术将易导电的铜及铜合金复合在金属基体上形成的集电环，这种复合材料复合结构技术如：焊接、刷镀、压铸，堆焊等，其中最常用的是堆焊技术。这种集电环与单一材质的铸铜集电环相比，具有工作表面组织致密，耐磨性高，可提高电机使用寿命，减少电机维护费用，提高加工的一次性合格率且不会造成装配后加工的返工报废损失，节约了铜材，降低了成本等优点；与单一材质的不锈钢集电环相比，具有导电性能好，易切削加工达到工件表面粗糙度要求且与碳刷的匹配性好，摩擦系数低，不易因拉弧形成硬点，减少碳刷磨损和集电环烧损，延长电机寿命，减少电机维护费用等优点。

5. 铜瓦—铜轴导电机构

铜瓦—铜轴导电机构是一种以铜和巴比特合金为载体并辅以石墨导电油的旋转导电机构。其具体导电机构如下图所示：

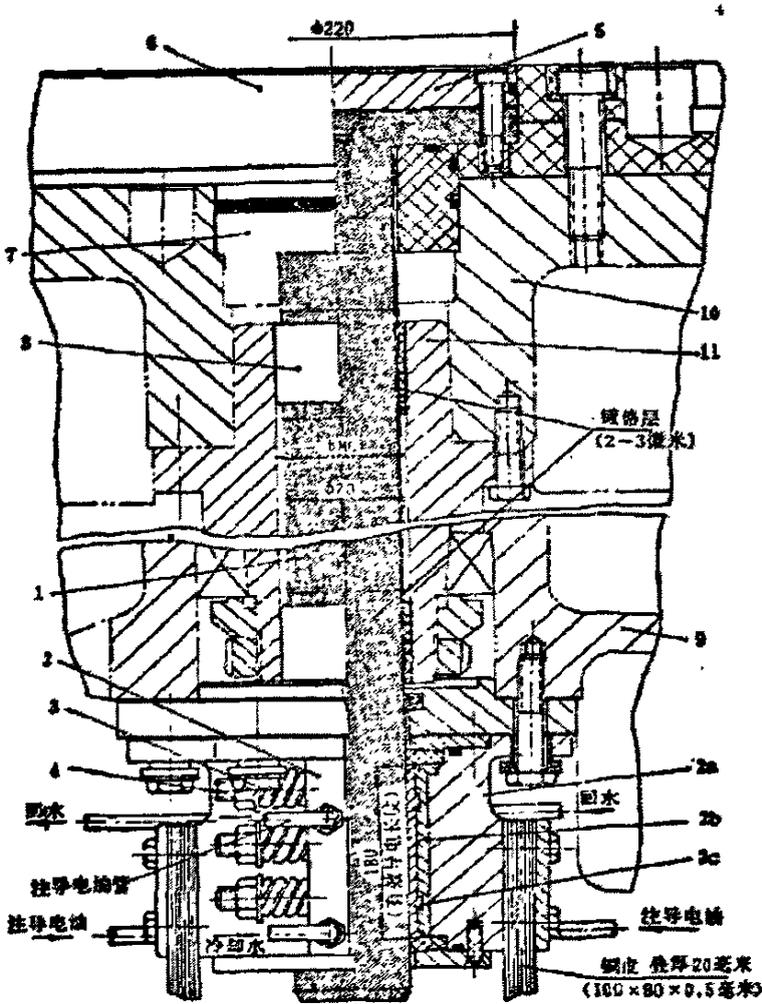


图 4-2 铜瓦—铜轴上电装置

1—导电杆（紫铜）；2—轴承（2a：轴承座，2b 青铜衬套，2c 巴比特合金）；3—弹簧；4—螺栓；5—紫铜盘；6—绝缘工作台（玻璃钢）；7—衬套（玻璃钢）；8—尼龙衬套；9—铸铁工作台底座；10—铸铁工作台；11—工作台主轴

1) 工作原理

在机床工作台底座 9 下面，固定连接了两个对半开合的滑动轴承 2。而随同机床工作台 10 一起旋转的铜导电杆（铜轴）1，则在轴承 2 中相对滑动旋转接触，从而把电流从静体传递到转动轴

上。

两个半滑动轴承 2, 借助 12 个弹簧 3、螺栓 4 压紧, 在工作过程中保证了轴瓦 2 与铜导电杆 1 之间有一定的接触压力。轴承 2 由轴承座 2a、铜衬套 2b 和巴比特合金 2c 等组成。两个半轴承座 2a 上各铣有 100×80 毫米² 的平台, 安装了 40 层 0.5 毫米厚的薄铜皮, 借以与直流电源阳极引出的铜汇流排连接起来。

铜衬套 2b 内浇注耐磨的巴比特合金 2c, 导电杆 1 上面与轴瓦 2 接触的相应部位电镀了 2~3 毫米厚的铬层。这样既保证了轴瓦 2 与铜导电杆 1 之间有良好接触, 利于导电, 又增加了导电杆 1 的表面硬度, 延长了使用寿命。

装配时, 铜杆 1 ($\phi 70 \times 1020$ 毫米, 材料 T_3) 从机床工作台主轴 11 的 $\phi 80$ 通孔中自上而下穿入通过轴瓦 2。铜杆 1 上端的法兰盘 ($\phi 220 \times 25$ 毫米) 连同安在其上部同样大小的紫铜盘 5 一起, 用四个埋头螺钉与绝缘工作台 6 (事先已于机床本身的铸铁工作台 10 连成一体) 连接。于是, 铜杆 1 就随同机床工作台主轴 11 一起旋转。

铜杆 1 与机床铸造工作台 10、主轴 11 之间隔以玻璃钢衬套 7 与尼龙衬套 8, 保证了金属机床与阳极电流绝缘。同时, 采取了密封措施, 在紫铜盘 5、铜杆 1 的法兰盘, 以及玻璃钢衬套 7 的外圆、端面上分别安装 O 形密封圈, 防止绝缘工作台面上的电解液渗入金属机床工作台内部。

在相对回转的铜杆 1 和轴承 2 的间隙之中, 注入鳞状石墨与枪炮油混合成的稠导电润滑剂 (俗称导电油), 既润滑又导电, 保证了旋转导电副的顺利传导。导电油本身的阻值在 25~30 欧之间。为防止铜杆 1 与轴承 2 之间接触电阻发热, 特地在两半轴承座 2a 上沿圆周各钻了一排 $\phi 8$ 毫米的轴向长孔, 构成蛇形通道, 通以自

来水强迫冷却，保证稳定导电。

2) 铜瓦—铜轴集电环缺点：

采用铜瓦—铜轴滑动接触导电，当铜瓦和铜轴相对滑动速度较大是，容易引起温升，当温升较大，达到铜瓦或铜轴的熔化温度时，容易出现二者的熔焊，造成事故。

4.4 短电弧加工机床的上电系统

4.4.1 上电系统型式的选择

由短电弧加工机理知道，短电弧加工机床的工作电压为0-42V，工作电流最大为4000A，如此大的电流，如果选用液态汞上电，由于汞的易挥发性，很容易对工作环境和操作人员造成伤害，且没有成熟的技术方案可以参考，考虑到石墨也是很好的良导体，且具有成熟的应用技术，我们只需对现有结构加以分析，针对短电弧加工技术的特点，在现有技术上加以改造，就可以满足我们机床的需要。

4.4.2 电刷的选择

4.4.2.1 电刷的选择方法

正确选择和使用电刷是保证电机正常运行的重要条件。但电刷的型号选择是很复杂，到目前为止，国内外还没有一套科学的选型方法，即能根据电机的种类、电机的性能、使用条件、周围环境等的要求，对照电刷的技术性能，就能选出适用的电刷。目前世界各国往往要在预选的基础上经过实际运行试验，才能确定选用何种电刷。

1. 电刷选型前的资料准备

要想在各种情况下很快选出适合电机需要的电刷，首先必须对电机有较深入的了解。国内外的经验表明，在选型前掌握下述资料对于电刷选型是必不可少的。

- 1) 电机使用单位（工厂名称、地点）；
- 2) 电机的名称：发电机（交、直流），电动机（交、直流）；
- 3) 电机的用途；
- 4) 电机制造单位的名称，电机的型号，电压，结构（电枢的构造、机壳的结构、是敞开式还是密闭式），电机的容量、规格、电流（普通情况、最大电流），转速（普通、最大），频率；
- 5) 特殊条件：振动情况、温度、湿度、腐蚀性气体、粉尘、油烟（电刷附近的环境）；
- 6) 与整流相关的性能：主极数，有无换向极及数量，有无补偿绕组，整流子的直径及材质，云母片下刻还是齐平，电刷的排列方法等；
- 7) 滑环：环数（个），每环的电刷数（只），每环的电流（安），环的直径（毫米），环的材质，环的表面状况（粗糙度、有无沟槽）；
- 8) 要求电刷的电流密度（安/个或安/厘米²）；
- 9) 电刷的尺寸：厚度×宽度×高度（毫米）；
- 10) 电刷的形式：径向式、前倾式还是后倾式等；
- 11) 电刷的压力（安/厘米²）；
- 12) 以前使用的电刷的型号；
- 13) 有关电刷方面的问题：火化的等级及类型，有无异常磨损，有无不均匀磨损，滑动接触时的噪音大小，电刷振动情况，

电刷是否过热，电刷刷辫或其他部分有无烧损，点刷压板有无破损，刷握弹簧动作是否良好，有无飞弧等情况；

- 14) 整流子上或滑环上的问题：氧化膜是否过厚（黑化）还是过薄，氧化膜是否有条痕，整流子或滑环是否偏心，滑动接触表面是否有分段磨损或过大磨损，有无斑点，整流子或滑环有无凸凹不平现象，整流子有无云母片凸出，整流片有无打滑现象，整流片是否有积尘等等；

2. 新的电机品种电刷选型

对于新的机种，在没有电刷使用经验可以借鉴的情况下，可以采用如下步骤进行预选：

1) 根据单项性能进行预选

(1) 根据相近类型电机所使用的电刷型号来预选

(2) 根据电刷的电阻率来预选

众所周知，国产电刷的电阻率范围是很广的。电阻率从 $0.03 \sim 120 (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$ 甚至更高。电刷电阻率的值不同，其适用的范围也不相同，详见表 4-2 所示。可根据电机的特点，预选某个电阻率范围内的电刷。

表 4-2 电刷的电阻系数值及其适用范围

电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	电刷基体类别	适用范围
50 以上	树脂做粘结剂的石墨电刷，炭黑基和木炭基电化石墨刷	换向困难的电机
30~50	炭黑基和木炭基电化石墨电刷	换向较困难的电机
20~30	焦炭基电化石墨电刷	一般直流电机
10~20	石墨电刷，焦炭基和石墨基电化	一般直流电机

	石墨电刷	
1~10	含有 25%~50%铜的金属石墨刷	电压较低的电机
0.5~1	含有 60%~75%铜的金属石墨刷	低电压电机
0.03~0.5	高含铜量的金属石墨刷	低电压大电流电机

(3) 根据要求的电流密度来预选

假设有一台电机，要求电刷的允许电流密度在 $12\text{A}/\text{mm}^2$ 以上，根据国产主要电刷的技术特性和工作条件表，可以挑出一些能满足这一要求的电刷作为预选的对象。

(4) 根据电刷允许的圆周速度来预选

假设这台电机的圆周速度为 40 米/秒，对照各种电刷允许圆周速度，也能挑出一些符合这一要求的电刷作为单项预选的对象。

(5) 根据电机的使用环境来预选

电机的使用环境（包括温度、湿度、粉尘、有害气体和振动等）的不同，对电刷的要求也不同。例如，在有振动情况下使用的电机，最好选用强度大一些，韧性好一些的电刷；在湿热带地区，所选用的电刷的硬度要比正常情况下高一些为好，以防止氧化膜过厚；在空气稀薄的高原地区，要选用成膜性能好一些的电刷等，这些因素在单项预选时，都要考虑到。

(6) 根据电刷无火花换向区域来预选电刷

在有些场合下，不但对电刷的换向性能，而且对电刷的过载能力也有较严格的要求。遇到这种情况，在有条件的地方，也可以根据电刷的无火花换向区域来预选电刷。

必须指出，一台电机对电刷的要求决不止上述几个方面，在

实际选型时，应将电机本身、使用条件和周围环境。负荷情况等对电刷提出的要求一一加以研究，进行多方面的单项预选。

2) 进行综合预选

单项预选完毕后，要进行综合预选。因为在进行单项预选时，仅仅根据电机的磨一项要求，可能选出一种或几种能满足这一要求的电刷，而根据同一电机的另一项要求，又可能预选出几种电刷，其中有的电刷可能满足这一要求，而不能满足另一项或几项要求，综合平衡后，可能发现其中某一、两种电刷不但从重点而且还能从较多方面满足这一电机的各项要求，这种型号的电刷即可作为综合预选的结果。

3) 选型的试验鉴定

进行实际电机试验，是电刷选型的最后阶段，综合预选的结果是否正确，就要通过它来鉴定了。在运行试验中，通过观察氧化膜的状况，火花的大小等是迅速鉴别电刷预选的是否合适的可靠办法，因为电机在运行过程中的一切不良因素的影响都通过氧化膜和火花的状况表现出来。如果不合适，再重新进行预选。

4.4.2.2 短电弧机床电刷的选择

1. 电刷的预选

1) 电刷种类的选择

根据短电弧加工技术的定义我们知道，短电弧加工技术的工作电压范围为 12~42 伏，最大工作电流为 4000A，属于低电压，高电流电机，根据表 4-2，我们选用电阻率为 $0.03\sim 0.5 (\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m})$ 的适合低电压大电流电机的金属石墨电刷。

2) 电刷型号的选择

根据表 4-3a，我们知道电阻率在 $0.03\sim 0.5 (\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m})$ 之间

的金属石墨电刷有 J101、J102、J103、J113、J151、J164 六种，因为短电弧加工低电压，高电流的特点，必须保证电流通道最短，电流通道中的电流和电压损失最小，以满足加工时的电压和电流要求，因此在上述六种电刷中我们选用接触电压降最小（仅为 0.10~0.30V）的 J164 电刷。

表 4-3a 国产主要电刷的技术特性和工作条件

型号	电阻率 ($\Omega \cdot mm^2 / m$)	硬度			一对电刷上的接触电压降 (V)	工作条件			
		布氏 kg/ mm^2	压入法 kg/ mm^2	肖氏		摩擦系数	电流密度 A/ cm^2	允许圆周速度 m/s	使用时的单位压力 g/cm^2
S103	8.0~20		10~3 5		1.5~2.3	2 5	11	25	200~2 50
S-4	80~120		15~2		4.0~50	1 5	12	40	200~2 50
S-5	90~150		20~2 8		3.5~4.5	1 8	10	35	220~3 00
S126	15~23		3.0~4 3		1.4~3.0	2 8	12	70	220~4 00
S-9	200~300		12~2 2		4~5.5	1 8	8	35	220~3 00

新疆大学硕士学位论文

D104	6.0~16		3.0~9 .0		2.0~3.0	2 0	12	40	150~2 00
D106	6.0~12		3.0~6 .0		2.0~3.0	2 5	12	40	150~2 00
D172	10~16			20~ 30	2.4~3.4	2 5	12	70	150~2 00
D202	14~35		12~5 0		2.0~3.2	2 3	10	45	200~2 50
D207	22~32			35~ 55	1.5~2.5	2 5	10	40	200~4 00
D213	22~40		10~5 0		2.5~3.5	2 5	10	40	200~4 00
D214	22~36			40~ 60	2.0~3.0	2 5	10	40	200~4 00
D215	20~40			30~ 50	2.4~3.4	2 5	10	40	200~4 00
D252	8.0~18		6.0~2 .5		2.0~3.2	2 3	15	45	200~2 50
D308	31~50			42~ 55	1.9~2.9	2 5	10	40	200~4 00
D309	30~45			38~ 53	2.4~3.4	1 5	10	40	200~4 00
D373	35~70			40~ 60	2.1~3.0	2 0	15	50	320~3 50
D374	35~80		20~5		3.2~4.4	2	12	50	200~4

			5			5			00
D374 B	45~75		18~3 5		2.3~3.5	2 5	12	50	200~4 00
D374 D	35~60		16~5 0		2.4~3.5	3 0	12	50	200~4 00
D479	15~35		7.0~2 5		1.6~2.6	2 5	12	40	200~4 00
J101	0.03~0.15	6.0~ 18			0.1~0.3	2 5	20	20	180~2 30
J102	0.10~0.35	6.0~ 14			0.3~0.7	2 0	20	20	180~2 30
J103	0.10~0.35	6.0~ 14			0.3~0.7	2 0	20	20	180~2 30
J113	0.05~0.20		6~18		0.2~0.7	7 0	20	20	180~2 30
J151	0.04~0.12	5.0~ 10			0.15~0. 35	2 0	25	20	180~2 30
J164	0.05~0.15	6.0~ 18			0.10~0. 30	2 0	20	20	180~ 230
J201	1.0~6.0		12~3 5		1.0~20	2 5	15	25	150~2 00
J203	5.0~12		9.0~2 8		1.4~2.4	2 5	12	20	150~2 00
J204	0.2~1.3		10~3 0		0.6~1.6	2 0	15	20	200~2 50

J205	1.0~12		8.0~2 8		<2.0	2 5	15	35	150~2 00
J206	1.0~6.0		10~3 0		1.0~2.0	2 0	15	25	150~2 00
J220	4.0~12		8.0~2 5		1.0~1.8	2 6	12	20	150~2 00

说明：上表中摩擦系数的权是 10^{-2} ；

表 4-3b 各种型号电刷的应用范围

电刷型号	应用范围
S3	换向正常，负荷均匀，电压为 80-120 伏的直流电机：小容量交流电机的滑环
S4、S5、S6	交流正流子式变速电动机和高速微型直流电机
D104	换向正常，电压为 80-120 伏的直流电机：汽轮发电机、同步发电机的滑环及电焊发电机
D172	大型高速汽轮发电机的滑环，换向正常，电压为 80-220 伏的直流电机
D202	电压为 120-400 伏的直流发电机：牵引电动机及角速度高的微型直流电机
D207	大型轧钢设备的直流电机及矿用大、中型直流电机
D213	汽车发电机和具有机械振动的牵引电动机
D214	换向困难，电压在 220 伏以上带有冲击性负荷的
D215	直流电机：汽轮发电机的励磁机
D252	换向困难，电压为 120-440 伏的直流电机：牵引电

	动机：汽车发电机
D308	换向困难的直流牵引电动机：角速度较高的小型
D309	直流电机：以及功率扩大机等
D373	电力机车用直流牵引电动机
D374	电力及内燃机车的直流牵引电动机：换向困难的
D374B	
D374D	
D479	换向非常困难的直流电机
J101	感应电动机的滑环：电压在 6 伏以下的起动机： 高电流低电压电机
J102	电解用电源发电机：交流电动机的滑环
J103	低电压高电流发电机：电压在 6 伏以下的起动机： 电流密度较高的异步电动机的滑环
J113	
J151	
J164	
J201	汽车发电机：电压在 60 伏以下的充电发电机：电 压在 24-40 伏的起动机：异步电动机的滑环
J203	电压在 80 伏以下的充电发电机：电压较低的小型 牵引电动机：异步电动机的滑环
J204	汽车、拖拉机起动机：单枢交流机各感应电动机 的滑环：以及电压在 40 伏以下的发电机和电动机
J205	电压在 60 伏以下的充电发电机：拖拉机的起动机： 感应电动机的滑环
J206	电压 25-80 伏的小型直流电机：高速而换向困难的 低压电机

J220	电压在 80 伏以下的充电发电机：低电压小型牵引电动机
------	-----------------------------

3) 电刷规格的选择

由于型号为 J164 的电刷有多种规格，各种规格的电刷其截面积不同，可以导通的电流大小不同，且其应用场合不同，因此有必要确定其具体规格。根据下表我们选用规格为 $25 \times 32 \times 60$ ，结构形式为 T8，导线长度为 120mm，面积为 10mm^2 的电刷。

表 4-4 J164 电刷规格

电刷型号	规格(mm)	结构型式	导线面积(mm^2)	导线长度(mm)	其他	适用电机
J164	$6 \times 25 \times 40$	K1	4	100	套管	交流变速电动机集电环
J164	$6.3 \times 70.7 \times 45.5$	-	2.5	400	套管	龙门吊车电机
J164	$8 \times 25 \times 40$	K1	4	100	套管	交流变速电机集电环
J164	$8 \times 25 \times 40$	K1	5	69	套管	交流变速电机集电环
J164	$12 \times 32 \times 40$	T1	10	110	套管	交流变速电动机

J164	12×32× 45	T1	8	145	套管	交直流电动机
J164	12.5×20 ×25	M2	-	-	-	交流集电环电 动机
J164	12.5×32 ×42	M1	8	-	-	交流集电环电 动机
J164	16×32× 40	T1	6	110	套管	交直流变速电 机集电环
J164	16×44× 36	M2	10	-	-	JR型交流电 动机集电环
J164	20×25× 48	T8	6	120	顶部有 孔	直流发电机
J164	20×32× 48	T9	16	120	顶部有 孔	低压直流发电 机(上直)
J164	25×32× 48	T9	10	120	顶部有 孔	低压直流发电 机(上直)
J164	25×32× 60	T8	10	120	顶部有 孔	发电机电动机 集电环
J164	25×32× 60	K11	8	140	-	交直流发电机
J164	16×45× 50	T4	16	155	套管	交直流发电机
J164	5×18× 23	T4	1	128	套管	交直流发电机

4) 电刷个数的选择

J164 金属石墨碳刷的截面积为 $25 \times 32 \text{ mm}^2$ (即 800 mm^2) , 电流密度为 20 A/mm^2 , 因此理论上讲, 为满足短电弧加工时 4000A 电流的要求应该使用 J164 ($25 \times 32 \times 60$) 电刷 25 个 (以电刷接触面积为 100% 计), 但是考虑到电刷和集电环并不是 100% 的接触 (一般要求其真实接触面积为电刷截面积的 80%) , 以及导电环旋转对电刷导电的影响, 我们选择电刷数为 36 个。为保证对集电环的均匀磨损, 我们将这 36 个电刷安装在两块集电板的四侧面, 沿集电环径向均布。

2. 电刷选型的试验鉴定

1) 电刷圆周速度的检验

由于短电弧加工机床工具电机的线速度为 $0 \leq V_2 \leq 10 \text{ m/s}$, 工具电极的尺寸: 石墨电极 $D \leq 600 \text{ mm}$, 金属电极 $D \leq 800 \text{ mm}$, 算出工具电极的角速度最大为 $100/3 \text{ (rad/s)}$, 阴极装置主轴直径为 125 mm , 铜集电环厚度为 17.5 mm , 算出主轴装集电环部分半径为 80 mm , 电刷与集电环接触面的圆周速度为 $8/3 \text{ (m/s)}$, 远小于 J164 电刷的允许圆周速度 20 m/s 。

2) 电刷电流的检验

短电弧机床最大电流为 4000A, 电刷的个数为 36 个, 每个电刷的截面积为 800 mm^2 , 算出每个电刷的电流密度为约为 13.9 A , 小于 J164 电刷的允许电流密度 20 A/mm^2 。

4.4.3 短电弧机床集电环

4.4.3.1 集电环选择

由于短电弧加工属于低电压, 大电流加工方式, 因此对于电流的要求高, 综合集中集电环的优缺点, 我们选用堆焊的复合材

料集电环。

4.4.3.2 堆焊材料的选择

堆焊属于一种金属熔焊的一种特殊形式，即用焊接方法在零件表面堆敷一层具有特定性能金属的工艺过程。堆焊不是为了连接零件，而是为了增加零件的耐磨、耐热、耐腐蚀等性能。堆焊主要用于制造新零件和修复旧零件两个方面。

堆焊件的工作条件复杂多变，因而对堆焊金属的使用性能的要求也是多种多样的，除了耐磨性外，耐冲击性，耐腐蚀性及高温下的使用性等都有要求。而实际工作中常常对几个性能同时有要求，因而使堆焊金属的选择更加复杂。

表 4-5 堆焊合金选择的一般指南

工作条件	堆焊用合金
高应力金属间磨损	亚共晶钴基合金，含金属间化合物钴基合金
低应力金属间磨损	堆焊用低合金钢
金属间磨损+腐蚀或氧化	大多数钴基或镍基合金
低应力磨料磨损、冲击侵蚀、磨料侵蚀	高合金铸铁
低应力严重磨料磨损、切割刃	碳化物
气蚀侵蚀	钴基合金
严重冲击	高合金锰钢
严重冲击+腐蚀+氧化	亚共晶钴基合金
高温下金属间磨损	亚共晶、含金属间化合物钴基合金

凿削式磨料磨损	奥氏体锰钢
热稳定性, 高温蠕变强度 (540℃)	钴基合金、碳化物型镍基合金

在选择堆焊金属时, 一般按下列几个步骤进行:

- 1) 分析工作条件, 确定对堆焊金属的要求;
- 2) 按一般指南列出几种可供选择的材料;
- 3) 分析待选材料和基体材料的相容性 (包括热应力和裂纹), 初步选定堆焊材料的形状并制定初步堆焊工艺;
- 4) 进行样品堆焊, 堆焊后的工件要在模拟工作条件下经受运行试验;
- 5) 综合考虑使用寿命和成本, 最后选定堆焊金属;
- 6) 选择堆焊方法, 制定堆焊工艺, 这是必须全面考虑熔敷速度、熔敷效率、稀释率和总的费用 (包括消耗品的费用和工艺过程的费用)。

由于我们的集电环是与金属石墨碳刷滑动接触, 并且传导电流, 因此, 除了要满足耐磨损, 耐低应力冲击, 耐高温腐蚀等性能外, 还应满足高的导电性要求。参照表 4-5 和堆焊合金选择的一般步骤我们选用铜基堆焊金属。

表 4-6 铜及铜合金焊丝的类型及化学成分

类型	型号	化 学 成 分 (%)													其他元素总量
		Cu	Zn	Sn	Si	Mn	Ni	Fe	P	Pb	Al	Ti	S		
铜	HSCu	≥98.0	*	≤1.0	≤0.5	≤0.5	*	*	≤0.15	≤0.02	≤0.01	-	-	≤0.05	

黄铜	HSCuZn57.0~	0.5~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-1	60.0	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HSCuZn56.0~	0.8~	0.04~	0.01~	-	0.25~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-2	60.0	1.1	0.15	0.5	-	1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	余量	0.5~	0.1~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
铜	HSCuZn56.0~	0.5~	0.1~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-3	62.0	1.5	0.5	≤1.0	≤1.5	≤0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HSCuZn61.0~	-	0.3~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	63.0	-	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
白铜	HSCu	46.0~	-	-	≤0.25	-	9.0~	-	≤0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ZnNi	50.0	-	-	-	-	11.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	余量	-	*	≤0.15	≤1.0	-	29.0~	0.40~	≤0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HSCuNi	余量	-	-	-	-	32.0	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
青铜	HSCuSi	≤	≤1.0	2.8~	≤1.5	*	≤0.5	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HSCuSn	6.0~	*	*	*	*	0.10~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.0	0.35	≤	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	余量	≤	-	≤0.10	≤2.0	-	-	*	0.02	7.0~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HSCuAl	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
HSCu	≤	-	0.5~	0.5~	≤2.0	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AlNi	1.0	-	≤0.10	3.0	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4-7 常用铜及铜合金焊丝的牌号、型号及用途

牌号	型号	名称	化学成分/%	熔点 /°C	用途
HS201	HSCu	特制	Sn1.1,Si0.4,Mn0.4	.	用于紫铜氩

		紫铜 焊丝	余为 Cu		弧焊及氧-乙炔 气焊时作为填 充材料
HS202	—	低磷 铜焊 丝	P0.3,余为 Cu	1060	用于紫铜氧- 乙炔气焊及碳 弧焊时作为填 充材料
HS220	HSCuZn-1	锡黄 铜焊 丝	Cu59,Sn1,余为 Zn	860	用于黄铜的 氧-乙炔焊和惰 性气体保护焊 时作填充材料。 也适用于钎焊 铜、铜合金、铜 镍合金
HS221	HSCuZn-3	锡黄 铜焊 丝	Cu60,Sn1,Si0.3,余为 Zn	890	黄铜氧-乙炔 气焊及碳弧焊 时作填充材料。 也广泛应用于 钎焊铜、钢、铜 镍合金、灰口铸 铁以及镶嵌硬 质合金刀具等
HS222	HSCuZn-2	铁黄 铜焊 丝	Cu58,Sn0.9,Si0.1,Fe0.8, 余为 Zn	860	黄铜氧-乙炔 气焊及碳弧焊 时作填充材料。

					也可用于钎焊铜、钢、铜镍合金、灰口铸铁以及镶嵌硬质合金刀具等
HS224	HSCuZn-4	硅黄铜焊丝	Cu62,Si0.5,余为 Zn	905	黄铜氧-乙炔气焊及碳弧焊时作填充材料。也可用于钎焊铜、铜镍、灰口铸铁等

由于我们的堆焊层除了要满足耐磨，耐腐蚀的性能外，还需具有良好的导电能力，结合以上对影响堆焊金属选择因素的分析及铜合金焊丝的分类，我们最终选用锡黄铜焊丝 HSCuZn-3 作为我们集电极的堆焊材料，实际上考虑到加工方便，成本因素，机床“DHZ1604CG”采用的是锡化黄铜焊条 BCu60ZnSn-R (HS221)。

4.4.3.3 堆焊方法的选择

堆焊是一种异质材料的熔化焊，采用堆焊时需要考虑的冶金问题和异种钢焊接时相类似，最突出的是稀释率、堆焊的熔合区与过渡层以及热循环。

1. 堆焊的冶金特点：

1) 稀释率

堆焊层的成分和金相组织由于基材的稀释作用会发生不同程度的变化。稀释作用的大小与选用的堆焊方法和堆焊工艺有关，

各种堆焊方法的稀释率见下表。高的稀释率不仅会降低堆焊层的性能，而且会增加堆焊材料的消耗。稀释率高的堆焊方法只有在堆焊层较厚时才能用。用多层堆焊能降低稀释的影响。一般堆焊三层后性能就趋于稳定，但堆焊成本增加而且容易出现堆焊层裂纹、剥落等缺陷，也可以采用含有较高合金的堆焊材料，以便对单层堆焊层的稀释进行补偿，但这样堆焊虽然费用较低，成分和性能的稳定性的确比多层堆焊差。

表 4-8 几种堆焊方法特点比较

堆焊方法		稀释率(%)	熔敷数度 (Kg/h)	最小堆焊 厚度(mm)	熔敷效率 (%)
氧— 乙炔 焰堆 焊	手工 送丝	1~10	0.5~1.8	0.8	100
	自动 送丝	1~10	0.5~6.8	0.8	100
	粉末 堆焊	1~10	0.5~1.8	0.8	85~95
手工电弧 堆焊		10~20	0.5~5.4	3.2	65
钨极氩弧 堆焊		10~20	0.5~4.5	2.4	98~100
熔化极气 体保护电 弧堆焊 其中：自保		10~40	0.9~5.4	3.2	90~95
		15~40	2.3~11.3	3.2	80~85

护电弧堆焊					
埋弧堆焊	单丝	30~60	4.5~11.3	3.2	95
	多丝	15~25	11.3~27.2	4.8	95
	串联电弧	10~25	11.3~15.9	4.8	95
	单带极	10~20	12~36	3.0	95
	多带极	8~15	22~68	4.0	95
等离子弧堆焊	自动送粉	5~15	0.5~6.8	0.8	85~95
	手动送丝	5~15	0.5~3.6	2.4	98~100
	自动送丝	5~15	0.5~3.6	2.4	98~100
	双热丝	5~15	13~27	2.4	98~100
电渣堆焊		10~14	15~75	15	95~100

注：稀释率为单层堆焊结果

2) 堆焊的熔合区和过渡层

堆焊的熔合区和异种金属焊接一样有时会出现延性下降的脆性交界层，在冲击载荷作用下易出现堆焊层剥离。熔合区在高温条件下工作时，有时有碳迁移现象，使高温持久强度和抗腐蚀性下降。如果堆焊层和基材线膨胀系数差别大，在堆焊后的冷却，

热处理和运行中将产生很大热应力，甚至出现裂纹。有些堆含铁量有严格要求的有色金属堆焊材料，如果堆在钢的基材上，将受到铁的严重污染。所以堆焊中有时采用过渡层或障碍层的方法减少上述各种问题的影响。例如在钢基材上堆焊铜合金时，常选用高合金材料如镍、因康镍合金或铝青铜作障碍层。

3) 热循环

堆焊层经受的热循环比一般焊缝复杂的多，因为堆焊多数情况下时多道焊或者多层焊，后续焊道使先焊的焊道反复多次受热。另外，在堆焊生产过程中，为了防止堆焊层开裂或剥离，需要采取预热、层间保温和焊后缓冷等措施。复杂的热循环使堆焊层的化学成分和金相组织变得很不均匀。使用不同的堆焊方法时，工件承受热循环可以有很大差别。如用氧—乙炔焰堆焊钴铬钨合金件时，工件的加热和冷却速度与手工电弧堆焊相比都较慢，因此堆焊层碳化物颗粒粗大，加上还原焰的增碳作用，时堆焊层耐磨性较高。有些堆焊件焊后需要去应力退火。不锈钢和镍基合金因为热强度高，必须高温退火。在 490~870℃之间，可能有碳化物或 σ 相沉淀析出，从而将增加堆焊层的脆性并减低抗腐蚀能力。

2. 影响堆焊方法选择的因素：

1) 堆焊层性能要求

堆焊应用范围很广，因而对堆焊层性能的要求差别大。堆焊层性能受成分和金相组织的影响。多数堆焊层是在焊后状态使用的，结构上是铸造组织，成分和组织都很不均匀。成分的变化主要受母材稀释的影响；氧—乙炔焰堆焊时的增碳、电弧堆焊时元素的烧损也有影响，各种堆焊方法的稀释率差别很大。保证堆焊层性能时，稀释率时主要考虑因素之一。不同的堆焊方法堆焊层凝固速度差别很大。因而产生不同的金相组织，这对性能也有很

大影响。此外，由于工艺原理和机械化，自动化水平的不同，堆焊层性能的稳定性也有很大差别。如氧—乙炔焰堆焊，只要操作得当，堆焊层质量很高。各种自动化堆焊与手工电弧堆焊相比，堆焊层质量稳定得多。

除了性能外，对堆焊层质量的要求差别也很大。例如，阀门表面堆焊钴铬钨合金时，对堆焊层得完整性要求很高。为保证质量常采用氧—乙炔焰堆焊或粉末等离子弧堆焊，而且对堆焊材料的质量和焊工的操作技能提出严格要求。又如对于抗腐蚀的堆焊层，必须保证完整无缺陷。因为裂纹、针眼孔、夹渣等小缺陷都可能产生快速的局部腐蚀而引起灾难性的破坏，还必须严格控制稀释率，因成分的变化对腐蚀性能影响也很大。所以常用带极埋弧堆焊及改进的熔化极气体保护电弧堆焊。此外，挖土机铲斗等零件的堆焊，只要求耐磨损、延长使用寿命，对堆焊层中气孔、裂纹等缺陷的限制不严格，稀释率的影响也小些。因此可以在现场手工堆焊。

2) 堆焊件的结构特点、冶金特点

对于小工件，只要堆焊位置合适，一般堆焊方法都能用。但如果要求堆焊层薄，堆焊部位准确，则必须采用氧—乙炔焰堆焊或钨极氩弧堆焊。对于大型的、难以运输和翻转的工件，推荐用手工电弧堆焊或半自动熔化极气体保护电弧堆焊。

堆焊时是否需要采用加热、保温等措施，除和堆焊材料有关外，也和堆焊件材质和结构有关，不同的堆焊方法也有影响。各种堆焊方法传给工件的热量差别很大。对于小线能量的堆焊方法可能要预热，而大线能量的就不一定需要。

当基材和堆焊层膨胀系数差别大需要过渡层时，稀释层有时能起过渡层的作用，选择堆焊方法时，这一因素也得考虑。

3) 经济性

堆焊的目的是延长部件工作区的寿命以获得最大的经济效益，所以经济的合理性是选择堆焊方法的决定性因素。

堆焊成本包括人工费用、堆焊材料的成本、设备和运输费用。人工费用主要决定于对焊工技能的要求和堆焊方法的熔敷速度，也包括焊前的准备堆焊材料和工件的清理、加工以及预热、缓冷等的费用。熔敷速度是决定生产率的重要因素，理想地堆焊方法是保证稀释率满足要求的情况下尽量提高熔敷速度。堆焊材料的价格决定于原料价格和堆焊材料的形状。在钴基、镍基和碳化钨等材料中，原料价格起主导作用，而在铁基材料中，材料的形状是决定价格的主要因素。一般说，管状材料最便宜，冷拔的焊丝最贵，特别是所需批量小时更明显。铸棒和粉粒状的价格介于两者之间。从价格看，粉粒状比铸棒更价廉，但粉粒堆焊材料的熔敷效率低的多。另外，堆焊材料的形状有限制着堆焊方法的选择，从表 32-4 可看到堆焊材料形状与堆焊方法的关系。堆焊设备的费用取决于工件的批量。批量小的宜采用现有的通用设备，批量很大时，设计一个自动化程度高的专用设备一般更合理。

表 4-9 堆焊材料的形状及适用的堆焊方法

堆焊材料形状	适用的堆焊方法
丝 ($a_w=0.5\sim 5.8\text{mm}$)	氧—乙炔焰堆焊、熔化极气体保护电弧堆焊、振动堆焊、等离子弧堆焊、埋弧堆焊
带 ($t=0.4\sim 0.8\text{mm}, B=30\sim 300\text{mm}$)	埋弧堆焊、电渣堆焊
铸棒 ($d_w=2.2\sim 8.0\text{mm}$)	氧—乙炔焰堆焊、等离子弧堆焊、钨极氩弧堆焊

粉(粒)	等离子弧堆焊、氧-乙炔焰堆焊
管状焊丝	自保护电弧堆焊、氧-乙炔焰堆焊、埋弧堆焊、钨极氩弧堆焊
堆焊用焊条(钢芯、铸芯、药芯)	手工电弧堆焊

由于我们选择的堆焊材料为锡黄铜焊丝 HSCuZn-3, 结合以上对影响堆焊方法选择因素的分析, 我们最终选用熔化极气体保护电弧堆焊。

4.4.3.4 熔化极气体保护电弧堆焊与现在采用的手工电弧堆焊比较

实际上考虑到加工成本等因素, 机床“DHZ1604CG”采用的是手工电弧堆焊, 以下是手工电弧焊和熔化极气体保护焊的比较:

- (1) 手工电弧焊电弧温度高、热量集中, 因此熔深大, 稀释率高, 造成堆焊层硬度和耐磨性下降, 所以通常要焊 2~3 层, 但多层堆焊易导致开裂; 熔化极气体保护焊采用短路过渡焊时, 焊丝很细 (达 0.8~1.2mm), 熔深浅, 稀释率可小到 5%, 可全位置焊接。
- (2) 手工电弧焊由于是焊接工人直接手工操作, 因此对焊工的焊接技能要求较高, 而且不适合于批量生产。而熔化极气体保护焊, 堆焊过程是自动化或半自动化的过程, 对焊工操作技术要求低。
- (3) 熔化极气体保护焊堆焊层没有渣, 减少了清渣时间, 提高了堆焊设备的负载持续率。
- (4) 熔化极气体保护焊可见度好, 特别适合于堆焊区域小, 形状不

规则的工件和小工件，堆焊同样工件，熔敷速度比手工电弧焊快一倍以上。

4.4.3.5 集电环的加工

1. 焊前分析

1) 物理性能的差异

- (1) 熔点 熔焊时两种基体金属和熔敷金属都须熔化，若两者熔化温度接近（相差 100℃以内），通常的焊接方法和工艺都能顺利进行。当两者熔化温度相差很大时，就会因它们熔化不同步，低熔点金属过早熔化而发生流淌或者与高熔点金属产山未熔合。此外，熔点高的金属凝固和收缩早，会使尚处于部分凝固和薄弱状态的低熔点金属产生应力，可能导致裂纹。本例中锡黄铜焊丝锡黄铜焊丝 HSCuZn-3, 熔点 890℃，45#钢熔点为 1500℃，相差很大。
- (2) 热导率和比热容 热导率和比热容是影响焊件热循环、温度场分布和结晶过程的重要因素。当两种金属热导率和比热容相差很大时，会导致热输入失衡，熔化量不均和改变焊缝及其两侧的结晶条件。如，热导率高的金属热影响区宽，冷却数度快容易淬硬，而热导率低的金属则发生过热。遇到这种情况往往是对热导率高的金属预热或焊接热源略为偏向该侧。本例中，45#钢的热导率为 $50.2/W\cdot(m\cdot k)^{-1}$ ，比热容为 $0.46 \times 10^3 / J\cdot(Kg\cdot^{\circ}C)^{-1}$ ；锡黄铜焊丝 HSCuZn-3 的热导率为 $125.1/W\cdot(m\cdot k)^{-1}$ ，比热容为 $0.39 \times 10^3 / J\cdot(Kg\cdot^{\circ}C)^{-1}$
- (3) 线膨胀系数 线膨胀系数差别较大的异种金属焊接在一起的时候，由于彼此间冷却收缩不一致，便会引起较大的焊接应力，

严重时能导致焊接裂纹。焊成的接头在高温应用时，将产生热应力。如果受到周期性热循环，就成为交变应力，接头因热应力而过早破坏。这种热应力是无法消除的，在工程上常选用线膨胀系数介于两母材之间的金属作填充金属（即第三种金属）进行焊接，以减少母材之间线膨胀系数差所造成的热应力。本例中 45# 钢的线膨胀系数为 $11.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，锡青铜焊丝 HSCuZn-3 的线膨胀系数为 $21 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

- (4) 磁场作用 有磁性金属和无磁性金属组合，当采用直流电弧或电子束方法焊接时，会因磁场的作用，使电弧偏吹或电子束偏离其轴线（偏向磁铁体一侧），其后果是使磁铁体金属熔化量过大，产生过分稀释，或无磁性金属根部未熔合等缺陷。遇到这种情况常采取一些措施，如改用交流电弧焊接，电子束焊利用电磁偏转技术来克服等。

2) 异种金属的相溶性

异种金属之间能否进行焊接，决定于这两种金属在焊接条件下，它们合金元素之间的相互作用。常利用金属学中二元或多元状态图进行分析。当两种金属元素之间不但在液态而且在固态下都互相溶解。能形成一种新相——固溶体，那么这两种金属元素之间便具有了冶金学上的“相溶性”。原则上是可以焊接的。因为固溶体组织均匀，塑性和韧性好，是理想的焊缝金相组织。但是，合金元素之间相溶是有条件的，即：

- (1) 两种晶格类型相同（如同为体心立方晶格）
- (2) 原子大小相近（即原子半径相差不大）
- (3) 元素周期表中相邻（即电学性质相差小）

若同时满足这三个条件，则能无限制地溶解，所形成的固溶体称无限固溶体，也称连续固溶体。如果只是部分的满足上述条

件，则只能有限地溶解，这样的固溶体称有限固溶体。有限固溶体的限度称溶解度，它受温度的影响，大部分是随温度降低而减小，当有限固溶体的溶质金属量超过了溶解度（即已达饱和），就可能出现两种情况：一是以该固溶体中析出另一种固溶体，从而形成两相混合物；二是从改固溶体中析出金属间化合物。金属间化合物的性质硬而脆，常称脆相，它不能用于连接金属，在焊缝金属中不希望出现这种组织。如果在固溶体焊缝中出现了金属间化合物，则接头的塑性和韧性下降，其影响程度取决于它的类型、数量、形态及其分布。若焊缝中金属间化合物越多，且在晶界上呈网状分布，则接头的性能就越差。因此，对有可能形成金属间化合物的异种金属焊接时，应设法避免或控制金属间化合物的形成。由于金属间化合物形成需要一定孕育时间，而且和温度有关。若能采用在较低的温度下焊接或加热时间很短，就有可能不产生金属间化合物。所以异种金属大多数的组合，选用固态焊接比用熔化焊接的方法更易实现。

如果两种金属在液态、固态下互相不溶解，又不形成金属间化合物，则在液态时便会按比重分层，冷却时各自独立结晶。对这类无相容性的金属组合是不能直接焊接的。需要这两种金属焊接时，只能寻找与这两者金属都具有相容性的第三种金属作中间层（过渡层）才有可能进行焊接。

总之，合金元素之间发生不同的相互作用：或相互溶解形成固溶体，或相互反应形成金属间化合物，或互溶和反应皆有，形成混合物或其他复杂组织。对焊接而言，无限互溶的异种金属之间具有最好的相容性，其焊接性最好；有限互溶的异种金属焊接行较差，能形成金属间化合物而相互间又不作用的异种金属焊接性最差。

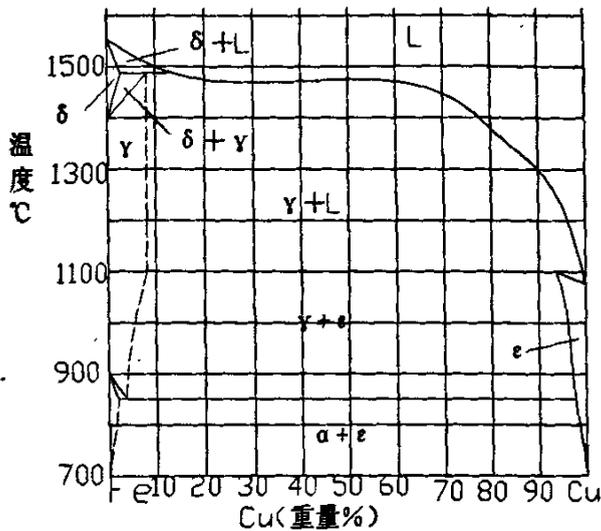


图 4-2 铜铁合金二元相图

从上面的铜铁合金相图我们知道，当铁向铜扩散时，形成有限溶解度的 ϵ 固溶体。室温下处于平衡状态时，在 α 铁中溶解的铜不超过 0.3%，在铜中溶解的铁不超过 0.2%，铜与铁不形成脆性金属间化合物。温度从 700°C 升高到 1000°C 时，铁在铜中的溶解度从 0.3%~0.35% 直线上升到 2.6~2.9%。当铜向 α 铁扩散时，同样形成有限溶解度的固溶体。在 750~835°C 温度区间内，铜的溶解度达到 3.5%。在 835°C 时，过饱和的 α 及 ϵ 固溶体形成 $\alpha + \epsilon$ 的共晶体。在 835~910°C 温度区间内，铜在 α 铁内的溶解度下降，同时铜降低了铁的 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变温度。铜溶解于铁内可以有 α 固溶体和 γ 固溶体两种形式。铜在 γ 铁内的极限溶解度大于铜在 α 铁内的溶解度。如果焊后冷却速度快，则在扩散过渡区内产生铜、铁的过饱和固溶体，甚至含铁量达到 2~2.5% 时，也未发现游离状态的铁。熔焊时，铜与铁之间的熔合线十分明显，且含有富铁相。

众所周知，焊接时金属的结合是依靠原子间相互作用来实现

的，这就必须使一种金属的原子与另一种金属的原子接近到小于被焊金属晶格参数的距离。 γ 铁的晶格参数为 $3\sim 36\times 10^{-10}$ 米，铜的晶格参数为 3.61×10^{-10} 米， α 铁是 2.86×10^{-10} 米。铁的原子间最小距离是 2.476×10^{-10} 米，而铜是 2.551×10^{-10} 米。因此，为了获得铜和钢的焊接接头，就必须使它们的原子接近到 $(2.5\sim 3.6)\times 10^{-10}$ 米。这时铁原子的外层电子（两个）和铜原子的外层电子（一个）组合成共价电子体系，铜和钢焊接正是依靠这种共价结合形成金属键，达到焊接目的。

在铜和铁之间所以能够形成牢固的金属键，是因为它们具有一系列相近的物理化学性能，如：在元素周期表中，铜与铁同在一个横列中，铜和 γ 铁的晶型都是体心立方体，其晶格参数和原子体积（铜为7.100，铁为7.089）也都很接近。

2. 焊前准备

由焊前分析我们知道，为了在45#钢基体上获得稳定的铜合金堆焊层，我们必须在堆焊前做到：

- 1) 基体处理：彻底清除堆焊表面的水分、铁锈、油污、氧化膜及一切影响焊接质量的因素。
- 2) 检查焊丝是否有异物，并用酸洗的方法对其进行处理。
- 3) 堆焊铜合金与钢的熔点相差大，我们必须对钢进行焊前预热，预热温度为
- 4) 由于钢和铜合金的冷却速度、线膨胀系数、热导率，比热容不一样，我们必须进行焊后缓冷。

3. 焊后检验

焊后清理堆焊表面，检查外观。机加工至图样规定尺寸后未发现裂纹、气孔，而且钢与钢的结合面熔合良好，满足了使用要求。

第五章 结束语

本文主要针对短电弧加工机床的关键技术——引流系统进行了分析和研究，包括对短电弧加工机床特种加工电源的分析，重点对短电弧加工机床引流装置进行了分析与研究。

本文以昌吉市华胜机电加工部与首钢长白机械厂合作生产的“DHZ1604CG”型短电弧加工机床为例，在充分地介绍了短电弧加工技术的产生背景、本课题的来源、背景，意义及短电弧机床的基本结构之后，着重对短电弧加工机床的引流系统进行了分析和研究。包括对短电弧加工机床特种加工新型电源的分析，工具阴极和工件阳极的工作条件和工作要求的分析，继而在对现有引流系统进行比较分析的基础上，确定了短电弧加工机床引流装置的引流形式——集电环碳刷上电，并进一步就电刷的型号及具体规格的选择进行了分析和确定，就集电环的具体种类进行了选择，通过比较分析选用了一种复合材料集电环即通过在主轴上堆焊铜合金形成集电环，最后就在 45# 钢基体上堆焊铜合金进行了可行性分析，制定了堆焊工艺，并在焊后进行了焊后检查和实际运行试验，证明了电刷和集电环选择的正确性和集电环堆焊工艺的可行性。

由于时间和水平有限，文中难免有疏漏、欠缺甚至错误之处，敬请不吝批评、指教。

参考文献

- [1] 宋正芳,《碳石墨制品的性能及其应用》,机械工业出版社,1987年2月,49~137P
- [2] 白基成、郭永丰、刘晋春,《特种加工技术》,哈尔滨工业大学出版社,2006年8月,第一版,P37
- [3] 彭福泉,《金属材料实用手册》,机械工业出版社,1987年第一版,P21~29
- [4] 何康生、曹雄夫,《异种金属焊接》,机械工业出版社,1986年10月第一版,P327~337
- [5] 中国机械工程学会焊接学会,《焊接手册—第一卷》,机械工业出版社,1992年11月第一版,P528~543
- [6] 中国机械工程学会焊接学会,《焊接手册—第二卷》,机械工程出版社,1992年12月第一版,P605~606
- [7] 钟卫佳、马可定、吴维治,《铜加工技术实用手册》,冶金工业出版社,2007年1月第一版,P50~60
- [8] 曲敬信、汪泓宏,《表面工程技术》,化学工业出版社,1998年3月第一版,P728
- [9] 高禄、栗卓新、李国栋、李红,铜-钢异种金属焊接的研究现状和进展,《焊接》,2006年,第12期,P16~19;
- [10] 谭玉春,陈一新.T2铜管和1Cr18Ni9Ti不锈钢管的焊接[J]. 株洲工学院学报,2003,17(2):74.
- [11] 张秉刚,冯吉才,吴林. 铬青铜与双相不锈钢电子束熔钎焊接头形成机制[J]. 焊接学报,2005,26(2):17-24.
- [12] 徐晓菱,朱凌云,申捷,等. 紫铜与高碳合金钢的摩擦焊焊接性[J]. 焊接,1995,6:17-18
- [13] 申捷. 铜与低碳钢摩擦焊特性研究. 焊接技术[J]. 1995,4:17~20.

- [14] 宋永伦,. 不锈钢表面超薄铜层的激光熔覆[J]. 焊接学报. 1998, 19(2):88.
- [15] 王向斌,赵晓红,周石泉,等. T2 紫铜与 10#钢异种金属电子束焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2005, 26(1):42~44.
- [16] 洪永昌. 铜与钢的二氧化碳气体保护焊实验研究[J]. 马钢职工大学学报. 2003, 13(1):1
- [17] 徐越兰,余进,王建平. 铜钢熔敷焊工艺方法分析研究[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(4):401
- [18] 李亚江,王娟,刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[J]. 北京:化学工业出版社, 2004. 176
- [19] 徐在林, 45# 钢活塞堆焊铜合金工艺[J]. 机械工人(热加工)1999. 01
- [20] 付志鸿,肖人志,轴上铝青铜的堆焊[J]. 机械工人(热加工)2002. 03
- [21] 王克鸿. 无熔深熔覆铜工艺[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 69—72
- [22] Malin V. Development of mold solidification welding for depositing non-ferrous alloys on steel[J]. Welding Journal, 1992, 71(5): 35—36
- [23] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002
- [24] 姜军记,倪世丰,张鹏举, 10CrNiMoCu 钢的堆铜焊工艺[J]. 焊接. 2006. 04
- [25] 朱军,王东,陈东高,等. 浅谈铜与钢异种材料的氩弧钎焊[J]. 兵器材料科学与工程. 2000, 23(4): 43~47.
- [26] 肖宏滨,李谦,祝要民,等. 爆炸焊接铜/钢复合板结合界面的组织结构分析[J]. 洛阳工学院学报. 2000, 21(4): 27~30.
- [27] 周振丰,张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京:机械工业出版社, 1988. 427~434.
- [28] 吴广宁. 大型发电机的故障放电在线监测及诊断技术[M]. 西南交通

大学出版社, 2001

- [29] 李录平. 汽轮机组故障诊断技术[M]. 中国电力出版社. 2002
- [30] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 新时代出版社, 1987.
- [31] 李明辉. 电火花加工的理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [32] 蒋存波, 牛秦州, 朱明日等. 电火花技术在成型磨削加工中的应用. 桂林工学院学报 2002. 22(4): 401~405
- [33] 翟宁. 新型滑动电接触材料的性能及其影响因素的研究[D]. 上海交通大学硕士论文, 1999
- [34] 高强, 吴渝英, 翟宁, 洪钺, 铜石墨材料导电性能研究[J]. 机械工程材料. 2002. 26. 9
- [35] 高强, 吴渝英, 肖学明. 短碳纤维对铜石墨复合材料冲击值的影响. 上海交通大学学报, 2002, 36(1): 36

致谢

在次论文完成之际，首先我要真诚地感谢我的导师梁楚华教授给予我的指导。三年来，梁老师在学术研究上给予了我极大的帮助，他深厚的理论水平，严谨的治学态度科学的思维方式，丰富的实际经验给我留下了深刻印象，使我受益匪浅，对我的学习生活产生了深远的影响。

其次，我要感谢在我三年的学习生活中，曾经帮助过我，给予我关心和支持的老师和同学们。

再次，我要感谢在这三年中和我一起走过的同学们，是你们带给了我欢乐，给予我力量，使我得以完成这三年的求学过程。

丁国平

2007年6月

作者在攻读硕士学位期间发表的论文

1. 超硬材料加工技术及其发展趋势, 丁国平, 梁楚华, 机械制造, 2007 (6)