

870166

TF777

1987年

# 连续铸钢学术 会议论文选集

唐山

中国金属学会连续铸钢学会

## 47、小方坯连铸机设备选型的探讨

北京钢铁设计研究总院 王浦江

### 一、世界小方坯连铸机发展概况

由于连铸小方坯在轧制建筑用钢筋,线材以及小型型钢方面的优越性,使小方坯连铸得到迅猛发展,不仅在小型钢厂,就是在200—300吨的大型转炉厂也不乏配备多流小方坯连铸机的例子,如英钢公司的阿普莱拜—佛洛丁汉钢厂(Appleby-Frodingham)以300吨转炉配8流小方坯连铸机。因而从1970年—1982年间小方坯连铸的产量是以600吨/年的速度直线地增长着,其后两年有所减缓,但很快又上升到500万吨/年的增长速度,到1986年6月的统计,世界上小方坯连铸的设计能力已达到10800万吨/年<sup>(1)</sup>。

从1986年1月统计的各种连铸机型向发展比例看<sup>(2)</sup>,小方坯连铸机的台数,约占各种机型总数的50%,也说明小方坯连铸机的重要地位,见下表:

表47—1

| 机 型   | 台 数  | 流 数  |
|-------|------|------|
| 小 方 坯 | 683  | 2265 |
| 大 方 坯 | 302  | 1123 |
| 板 坯   | 333  | 518  |
| 合 计   | 1318 | 3906 |

小方坯连铸技术的发展,要求小方坯连铸设备的不断更新,如不拆换铜管的结晶器,简化的二冷装置,刚性引锭杆,双层冷床,翻转冷床等,现在各连铸机制造公司,都在设计制造刚性引锭杆的小方坯连铸机。又如康卡斯特公和奥钢联公司都设计、制造二冷一段可移开的挠性引锭杆的小方坯连铸机。

为了便于处理事故,这种可移开的二冷一段,当送上引锭杆后,与开浇的同时,一段移开,铸坯在无障碍的喷淋水中通过,冷却均匀而强化,万一漏钢也便于处理。

### 二、我国小方坯连铸机的现状

到1986年已建成投产的连铸机,各种机型所占比例如表47—2。

表47—2 我国连铸机各种机型占的比例，%

| 机 型   | 台 数 | 生产能力(万吨) | 比例(台数)% |
|-------|-----|----------|---------|
| 板 坯   | 17  | 268.5    | 29.8    |
| 大 方 坯 | 1   | 10       | 1.8     |
| 小 方 坯 | 39  | 530.5    | 68.4    |
| 合 计   | 57  | 809      | 100     |

可见我国的连铸工业发展中、小方坯连铸机不论在建台数，或是生产能力都占重要地位、这主要是由于1980年以来引进新型方坯连铸机起了决定性的作用。

1980年以前我国制造和生产着的小方坯连铸机，多数停留在一机多流、多辊牌方式二冷装置、多辊拉矫机的状态，车间布置上采用整机备用，所以设备重，作业率低。

1980年以来，我国引进了德马克机型和康梯组机型，1981—1982年我国设计、制造了第一台全国产的新型小方坯连铸机，在此基础上又设计了韶关R6米=流弧形连铸机，同时又设计、制造投产了一批2~6流的R5.25米小方坯连铸机，使我国的连铸工业有了较快的增长。

近年来各钢厂又引进了丹尼利型挠性引锭杆小方坯连铸机（天津三轧厂买旧设备），丹尼利型刚性引锭杆小方坯连铸机（青岛钢厂引进）、康卡斯特挠性引锭杆小方坯连铸机（首钢公司引进），另外还有罗可普型（临汾钢厂买旧设备），日本住友型（无锡钢厂）奥钢联型（兰州钢厂）等等…，共计从7个国家9个厂家引进了小方坯连铸机，加上近年投产的国产化小方坯连铸机的生产经验，从技术上为我们博采各家所长，打下了基础，现在我们有条件谈论如何合理的选择小方坯连铸机的设备结构型式。

我国连铸工业水平还很低，先进国家如日本连铸比已达90%以上，我国1986年也只有12%，板坯连铸机要发展，小方坯连铸机也要发展，发展连铸会促进炼钢技术改造，不能因为中小厂炼钢技术水平低就不上连铸。恰恰相反，由于连铸对炼钢有高标准、严要求，从而促进了炼钢技术的提高，目前小方坯连铸机达产率低，主要原因不在设备，但有一个合理、先进、适用的设备，必将促进小方坯连铸事业的发展。

### 三、小方坯连铸机设备选型的探讨

#### （7）小方坯连铸机设备设计探讨

连铸机整体结构形式。当钢包容量大，在合理的浇注时间内一流的浇注速度不能满足要求时，需采取多流浇注，多流连铸机的结构有两种形式，一是国内过去采用的一机多流，一般是一机二流，二流铸坯同时振动、同步拉坯矫直，但由于开浇的不致。水口侵蚀不一致，以及铸坯出现漏钢事故的不同，两流间互相有干扰；自从引进新型小方坯后，各种机型无一不是多流多机，每流可单独控制，此后我国新设计的、或改造旧有设备，均采

取了多流多机的结构，这种结构的铸机当一流出现故障或漏钢不严重时，可以把铸坯拉出，重新上引锭杆第二次开浇；若在浇注过程中有一流漏钢，还可进入二冷喷水室处理事故后重新上引锭杆再开浇，这对延长多炉连浇时间起到了保证作用，而在一机多流的铸机上根本办不到的。

浇铸装置的设计。首先由于小方坯连铸机结构上采取多流多机的特点，因而对中间罐水口与结晶器上口对中的严格性提出了更高的要求，如中间罐在中间罐车上的位置要求可调，一般横向调整靠中间罐车在轨道上移动来实现，而纵向则由车上的机构调整，当流较多，中间罐车大时则可采取分两个中间罐浇注以增加对中的灵活性，另外鉴于浇注平台上跑钢、冒钢在所难免，中间罐车轨道的平直度难以保证，有采用中间罐转台或悬挂式中间罐车的例子，由于不用轨道也不必担心跑钢粘往轨道中间罐车难以离开的问题；小方坯浇注还有一个采用锭经水口，还是采用塞棒浇注的问题，前者设备简化，操作方便，只靠调节拉坯速度，就可控制结晶器内钢水液面高度，但是当操作不当时易造成废钢增加。

塞棒控制在铸坯断面较大时比较有利，因为这时水口直流较大，不易发生“堵眼”现象，且多一个塞棒等于增加一个调节液位的手段，这样灵活性更大一些，浇注成功的几率更高。

结晶器的结构。过去在我国小断面铸坯也采用组合式结晶器、或设有锥度的管式结晶器，自从引进带弧形并且有锥度的管式结晶器后，目前国内已可制造，而 $95 \times 130\text{mm}$ 的矩形铜管虽也制试成功，并用于生产，浇出质量优良的铸坯，国内目前小方坯大都采用了管式结晶器。

结晶器做为连铸机的核心部件，关系到铸坯的质量，漏钢的几率，同时因为铜管是消耗件，水套又最易受冒钢、跑钢的损坏，所以结晶器装置设计的合理与否也和维修工作的难易密切相关，如结晶器铜管应便于装卸，导流水套应保证冷却均匀，冷却水流速适宜，恒定不变，这就要求导流水套刚性好不变形，与铜管外壁间的水缝尺寸不变。

同时结晶器的结构要求保证尽可能的延长铜管的寿命，目前铜管下部结构花样也很多，有一组足辊和多组足辊的，有装多级结晶器的，目的是增加出铜管后铸坯的刚度、坯壳厚度，避免漏钢，防止铸坯变形，结晶器下端的足辊起支持初生坯壳的作用，更重要的起到保护铜管下口不受上引锭杆时的损坏，但下口装置如果较复杂，反而对处理漏钢不利。

结晶器振动装置分析。目前小方坯连铸机的结晶器振动装置，各公司设计大同小异如均为短臂四连杆仿弧形振动装置（直结晶器者例外），对振动的两个主要参数的实现：如频率调整，视所浇断面而定，如断面变化不大，采用交流变速电动机也可，但因连铸技术发展，频率趋向增高，所以采用直流电动机调速的机型增加，因为它方便、可靠有可控硅变流，投资也不太高。另一个重要参数为振幅，也是由于采用小振幅的趋势，设计振幅可调的振动装置较多，因为结构并不复杂，但为变换断面、调整频率提供了改变振幅的可能，小振幅对铸坯表面质量有好的影响。

振动装置的设计，有整体更换和局部可换两种，从实践看与结晶器接触的振动台易被跑、漏钢烧变形，传动装置要经常维护，而振动臂和支架这部分，应尽可能的固定，以免生产基准位移，影响振动轨迹的精确度。

二冷装置宜简宜繁？二次冷却引导装置，国外设备无不趋向简化，对挠性引锭杆的连铸机，二冷引导装置主要是引锭杆进入结晶器，只设必要的导辊和导板，以支承外弧，并设少量的导辊在内弧、防止开浇拉坯阻力增大时，把挠性引锭杆绷直。

在刚性引锭杆连铸机的设计中，在二冷段只设3—4个外弧辊，没有内弧辊，而导辊支架的设计保证其刚性不变形主要靠水冷，而不是靠增加结构断面，增大设备重量。

国内有一种看法，认为二冷段要防止铸坯变形，必需把铸坯夹紧，夹辊要多，结构要结实，结果导致拉坯阻力增大，拉矫机的拉力随之也增大，同时二冷引导装置结构复杂在发生漏钢时，处理粘钢很困难，对此在挠性引锭杆的小方坯连铸机中，有的公司把结晶器下面一米多的一段设计成可移开装置，当穿好引锭杆后，与拉坯的同时可移开段移开，只剩铸坯在喷水管间通过，其优点是铸坯冷却均匀，发生漏钢时便于处理。

关于喷水装置对高碳钢趋向于弱冷却，冷却区延长，对低碳钢则趋向于在结晶器下一米多一段强冷却，使坯壳迅速凝厚，防止漏钢和变形。

小方坯的拉坯与矫直。如上所述，合理的设计二冷引导装置，拉坯阻力不会较大，甚至不可能成为负值，只是由于矫直铸坯增加了摩擦阻力，拉坯力才成为正值，但对小方坯来说铸坯的自重在一定长度时足以矫直铸坯本身，所以外加的矫直压下力也不需过大，这就是新型小方坯拉矫机设计简化的原因，如罗可普型刚性引锭杆小方坯连铸机的拉矫机只3个辊子，但考虑到坯头与坯尾的矫直，还是以切点以后能有三点矫直较可靠，这样整个拉矫机则为5辊。

小方坯的拉矫机的传动，由于拉速高，又靠变换拉速调整结晶器的液面，所以新型小方坯连铸机的拉坯传动多不用链传动，而用齿轮或蜗轮或通过万向接轴直接传动辊轴，使速度变化或反正转调节灵敏，而链传动总有松边、紧边之分，特别在链条松驰后，控制灵敏度降低，且易发生铸坯脉冲行进现象对设备不利。

为了达到铸坯矫直，辊子压下传动对小方坯说目前采用气动压下的渐多，如果气动压力足够，则不论从经济和便于维护方面说都是可取的。

机械剪还是火焰切割？机械剪：剪切速度快、金属损耗少、不产生切割渣，机械剪有两种传动型式，电动飞轮与液压，而液压前的推广目前尚有一定阻力。

火焰切割：设备重量轻，切割速度慢、金属损耗大，但定尺较长时这些缺点则微不足道，主要看能源情况，如果要专门建乙炔站则投资上也失去了优越性。

国产机械剪采用了平面二次包络蜗轮付，其特点为承载能力大、效率高，优于尼曼蜗轮付，在制造、安装维护中应注意：齿形啮合正确，达到精度要求，安装正确、保证公差要求，安装牢固不能在工作中受震动偏离公差要求，维护上主要注意蜗轮付跑合后及时换去有铜屑的润滑油，润滑油应选用150—2100号的极压齿轮油，工作中保证油温 $<60^{\circ}\text{C}$ ，绝对不能无油工作。

机械剪的剪刀目前有槽形剪刀、45对角剪和平剪刀等型式，基本上都能满足轧钢要求，但以45对角剪更适应轧钢要求，剪口可完全避免扩大。

随着国内液压元件质量的提高，引进液压剪日益增多，使用顺利，国内自制的液压剪有了改善，这都为小方坯连铸机采用液压剪创造了条件。

机械剪的最大缺点是剪力受铸坯温度限制，国产机械剪北京钢铁学院曾测定150方坯

温度760℃时剪切力为292吨，如果把剪切温度从800℃降低到600℃则剪机吨位必须成倍增长，这是不经济的，机械剪与火焰切割经济比较：

首先火焰切割的维修费用比机械剪高3倍在特殊情况下甚至高达5倍，第二、年操作费用也将高出3—5倍<sup>(3)</sup>，而金属损耗，如按3米定尺切6mm缝宽，则损耗量为0.2%，按4流年产20万吨产量计，每年收有400吨钢变为熔渣，显然对机械剪不能求全要求。

小方坯冷床的选择。小方坯冷床近年出现了双层冷床的翻转冷床，使每流一个小冷床的历史可以结束了。

双层冷床的特点在冷床区的输出辊上安装了一套各流单独控制的翻钢装置，可以把输入的铸坯迅速翻到上层横梁上，把输入和输出铸坯的矛盾减少到最低程度，因而多流机组可以共用一个冷床，不必担心多流时出坯不同互相影响的问题。

翻转冷床是适应小断面长定尺铸坯而产生的设备，铸坯在冷床上翻转前进，不受推头拉爪的作用，因而铸坯冷却快、平直度好。

冷床的选择视铸坯断面和定尺长度，断面小的铸坯（≤100方）定尺较短也可以用翻转冷床，铸坯断面大（≥160方）定尺长时也可以用双层冷床，因为这两种冷床都可以按2—3倍定尺进坯，一般说对小方坯言<8米的采用双层冷床，>10米的采用翻转冷床为宜。

刚性引锭杆还是挠性引锭杆？

近年来在弧形小方坯连铸机的设计中，出现了刚性引锭杆的机型，由于引锭成刚性圆弧，作为导向的支承外弧辊得以减少、防止绷直的内弧辊可以取消，因而二冷设备减轻了；开浇时引锭杆稳定不抖动，减少了漏钢事故，引锭杆存放向连铸机上空发展，使铸机长度可以缩短，这些都是刚性引锭杆连铸机的优点。

刚性引锭杆的缺点是：引锭杆变形后穿入结晶器困难，二冷导辊减少了但对弧严格性增加了，引锭杆存放在剪机上方对检修吊装有碍防。显然浇注铸坯断面增大时，引锭杆自身重量增加、防止抖动、绷直这些优点不再明显，而自重增加，长度增加造成引锭杆变形传动困难都将突出起来，所以对较大断面的铸坯是采用刚性引锭杆还是挠性引锭杆则应视具体条件而定。

## （2）关于设备选形的建议

综上所述，小方坯连铸机应按两个方向发展，对一般以产生低碳钢、低合金钢<120方，小断面铸坯为主的中小厂，适于提供一种设备轻、价格低的普及型设备，简化仪表控制，以刚性引锭杆为基本机型。

对以生产优质钢、金属钢>120方的铸坯断面为主的大中型厂，应提供一种自动化、机械化水平较高的设备，以挠性引锭杆为基本机型，配以钢流保护装置，电磁搅抹设备，电子计算机等，则设备会重一些，价格也高一些，而生产的优质铸坯给以补偿。

具体说设备选型

普及型：定径水口浇注，结晶器用油润滑，刚性引锭杆、二冷一段只设喷水管，30°以下加外弧托辊三个，直接传动五辊拉矫机，45°液压剪，集中传动辊，双层冷床。

提高型：潜入水口浇注，塞棒控制，保护渣浇注，挠性引锭杆、二冷一段可移开式，上部传动五辊式拉矫机，电动机械剪，集中传动辊道，双层冷床或翻转冷床。

## 48 加速开发具有我国特色的连铸机液压传动系统

### (摘要)

西安重型机械研究所 熊律明 汪开诚

国外连铸机几乎都采用滑阀元件构成的液压系统,通过液压缸对压紧辊施以夹紧。在国内连铸机建造过程中,对选用液压系统最为关注的问题是油液泄漏和防火安全问题。近年来,不少用户对连铸机采用油滑阀系统,并因使用国内液压元件常来的油液泄漏吃了不少苦头。武钢根据近年来采用国产元件的情况谈到①:“国内元件与国外元件差距仍然明显,国外元件累计到使用时间可达2.5万小时,而国内元件一般好的可用数月,差的几天就要更换,有些厂的液压件性能不合格率达20%,个别甚至更高。”由于国内滑阀式液压件质量和寿命问题,不少用户提出采用高水基液压传动的迫切要求。

本文就82年以来,我所在消化武钢连铸机油阀系统基础上,着重分析了国内现有连铸机几种液压系统的结构形式,就连铸机采用高水基液压传动的可行性进行了分析与探讨,首次创新与开发了高水基液压传动在连铸机上的实践与应用。通过总结上钢一厂三台弧形及太钢一台立式不锈钢板坯连铸机采用高水基液压传动系统的设计,调试和使用,结合目前在重钢六厂双流方坯连铸机采用的更新的方案,阐述连铸机采用锥阀式电液换向阀用于系统的可行性及其特点:

1) 锥阀与滑阀相比,具有压力损失小,过流量大,切换时间短,响应速度快,可实现无泄漏密封关闭,寿命长等一系列优点外,还具有对各种介质的适用性。实践证明,由锥阀构成的液压系统,既可用于高水基介质,也完全适用于矿物油及——乙二醇等各种抗燃介质。

2) 锥阀式电液换向阀的结构和原理,既可构成叠加式阀,也可构成与油滑阀控制功能完全相同的单个阀门,其安装连接尺寸完全符合国标GB2514—81和国际标准DIN24340的规定,因而可以与国产油滑阀及进口油滑阀相互通用。

3) 锥阀式电液换向阀及零件标准化程度极高,同一通径的各种机能的换向阀,其阀芯完全可通用,互换,只存在阀体的差异。

4) 滑阀由于采用研配时隙密封,损坏后必须整体更换,而锥阀是采用锥面阀口密封,大大改善和克服了时隙密封的内泄漏而实现无泄漏密封关闭,从而提高了使用寿命,即使损坏后,可再次研磨锥阀阀面或者只须更换阀芯,阀座零件,大大降低整体更换的维修成本。

5) 锥阀式三位四通换向阀,其左右两个电磁铁,既可同时通电工作,也可同时断电工作,这是一般三位四通滑阀无法实现的双重中位功能,因而在使用方法上,可按控制对象工艺特点,选用断电或通电进液夹紧工作制,而断电夹紧工作制又特别适用于连铸机较

长时时夹紧保压浇注的工艺动作，既克服了电磁铁长时间通电的发热，还节约了电能，又可免除浇注过程中，因突然电器故障带来的阀门复位，造成系统的慢动作，且双重中位功能的差动加压，有利于节约系统压力水的耗用，即节约能源消耗。

以高水基液取代油液传动，可彻底解决热加工液压设备采用油压传动的安全防火问题，进而减少设备用油和油液贮存运输费用，节约能源。

基于锥阀式电液换向阀是籍助锥面阀口形成的比压实现无泄漏密封，因而是高水基介质最为理想的结构形式。它既能密封粘度极低的水介质，当然更可密封油或水——乙二醇等控燃介质，其密封效果将更佳，寿命将更长。

液压系统用工作介质和阀门元件的选择，是涉及系统结构和使用性能、节能、环保、防火等一系列应综合分析和全局性考虑的问题。有无适用于等种介质中可靠工作的液压件，是选择该种介质最基本的条件，我们正是针对这一基本事实解决其中的技术关键，从而使高水基液在连铸机上应用取得进展。高水基液压传动目前尚只适用于开关型阀门控制的液压系统，一切有防火要求的开关型系统都以选用水介质为宜。以排污、环保角度，选用水介质比油及其他介质为好。从节约设备用油，节能考虑，也宜选用水基介质。反过来说，从改善油液泄漏，提高元件质量及使用寿命，降低维修成本来讲，既使对油系统也宜选用锥阀式电液换向阀取代油滑阀。而且可获得多样，灵活和节能的控制方法。

注①液压与气动86年1期。

## 49. 小方坯连铸机摆式飞剪的运动速度

冶金部北京冶金设备研究所 綦书阡

### 一、前言

德马克型小方坯连铸机摆式飞剪的运动速度包括两个方面，一是上、下裁刃在固定空间的运动速度和加速度，即，上、下剪刀的绝对速度和绝对加速度；一是上、下剪刀闭合过程中的剪切速度。本文在《小方坯连铸摆式飞剪的轨迹方程》〔1〕一文基础上进行讨论，所用符号除新设者外继续沿用〔1〕的符号，座标系与机构图也与〔1〕同，只是因本文使用矢量，有时将座标系扩大为三维，以便表连角速度矢量。

### 二、上剪刀的绝对速度

设上剪刀F点在 $S_Q$ 座标中的径矢为 $\vec{\gamma}_{QF}$ ，则根据〔1〕的（6—4）式有

$$\begin{aligned} \vec{\gamma}_{QF} = & \left\{ + \{ -a \sin(\phi - \varphi) \right. \\ & + \frac{a(d + \overline{DF})}{c} \sin(\psi + \phi) \\ & - \frac{a(a+b)}{c} \sin(\psi + \phi) \cos(\psi + \phi) \} \cos(\psi - \phi_0) \\ & - \{ -a \cos(\phi - \psi) - (d + \overline{DF}) + (a+b) \cos(\psi + \phi) \\ & - \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin^2(\psi + \phi) \} \sin(\psi - \phi_0) \\ & \left. + h \right\} \vec{i}_Q \\ & + \left\{ + \{ -a \sin(\phi - \psi) + \frac{a(d + \overline{DF})}{c} \sin(\psi + \phi) \right. \\ & - \frac{a(a+b)}{c} \sin(\psi + \phi) \cos(\psi + \phi) \} \sin(\psi - \phi_0) \\ & + \{ -a \cos(\phi - \psi) - (d + \overline{DF}) + (a+b) \cos(\psi + \phi) \\ & - \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin^2(\psi + \phi) \} \cos(\psi - \phi_0) \\ & \left. + 1 \right\} \vec{j}_Q \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中 $\vec{i}_Q$ 、 $\vec{j}_Q$ 为 $S_Q$ 的底矢

设上剪刀F点的绝对速度为 $\vec{v}_{QF}$ ，则

$$\begin{aligned}
\vec{v}_{QF} &= \frac{d}{dt} \vec{y}_{QF} \\
&= + \left\{ + \{ -a \cos(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \\
&\quad + \frac{a(d + \overline{DF})}{c} \cos(\psi + \phi) \cos(\psi - \phi_0) \\
&\quad + (a+b) \sin(\psi + \phi) \sin(\psi - \phi_0) \\
&\quad - \frac{a(a+b)}{c} \cos[2(\phi + \psi)] \cos(\psi - \phi_0) \\
&\quad + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 a} \sin[2(\phi + \psi)] \sin(\psi - \phi_0) \left. \right\} \frac{d\phi}{dt} \\
&\quad + \left\{ + 2a \cos(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \\
&\quad + \left\{ \frac{a(d + \overline{DF})}{c} - (a+b) \right\} \cos(\phi - \phi_0 + 2\psi) \\
&\quad - \frac{a(a+b)}{c} \cos[2(\phi + \psi)] \cos(\psi - \phi_0) \\
&\quad + \left\{ \frac{a(a+b)}{2c} + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 a} \right\} \sin[2(\phi + \psi)] \sin(\psi - \phi_0) \\
&\quad + (d + \overline{DF}) \cos(\psi - \phi_0) \\
&\quad + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin^2(\psi + \phi) \cos(\psi - \phi_0) \left. \right\} \frac{d\psi}{dt} \left. \right\} \vec{i}_Q \\
&\quad + \left\{ + \left[ + a \sin(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \right. \\
&\quad + \frac{a(d + \overline{DF})}{c} \sin(\psi - \phi_0) \cos(\phi - \psi) \\
&\quad - (a+b) \cos(\psi - \phi_0) \sin(\psi + \phi) \\
&\quad - \frac{a(a+b)}{c} \sin(\psi - \phi) \cos[2(\psi + \phi)] \\
&\quad - \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \cos(\psi - \phi_0) \sin[2(\phi + \psi)] \left. \right] \frac{d\phi}{dt} \\
&\quad + \left[ - 2a \sin(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \\
&\quad + \left\{ \frac{a(d + \overline{DF})}{c} - (a+b) \right\} \sin(\phi + \phi_0 - 2\psi) \\
&\quad - \frac{a(a+b)}{c} \sin(\psi - \phi_0) \cos[2(\psi + \phi)] \\
&\quad - \left\{ \frac{a(a+b)}{2c} + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \right\} \sin[2(\psi + \phi)] \cos(\psi - \phi_0) \\
&\quad + (d + \overline{DF}) \sin(\psi - \phi_0)
\end{aligned}$$

$$+ \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+\overline{DF})}{2c^2d} \sin^2(\psi+\phi) \sin(\psi-\phi_0) \Big] \frac{dt}{dt} \Big\} \vec{j}_0$$

(2-2)

式中的  $\frac{d\phi}{dt}$ 、 $\frac{d\psi}{dt}$  分别为曲轴（摇杆）和摆体的旋转角速度。

### 三、下剪刀的绝对速度

设下剪刀E点在  $S_0$  座标中的径矢为  $\vec{r}_{QE}$ ，根据〔1〕的（5—8）式有

$$\begin{aligned} \vec{r}_{QE} = & + \left[ -\frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\ & + \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{pg \sin(\psi-\phi_0)}{p \sin(\psi-\phi_0) + g \cos(\psi-\phi_0)} + h \Big] \vec{i}_0 \\ & + \left[ -\frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\ & \left. - \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{pg \cos(\psi-\phi_0)}{p \sin(\psi-\phi_0) + g \cos(\psi-\phi_0)} + l \right] \vec{j}_0 \end{aligned}$$

(3-1)

设下剪刀E点的绝对速度为  $\vec{v}_{QE}$ ，则

$$\begin{aligned} \vec{v}_{QE} = & \frac{d}{dt} \vec{r}_{QE} \\ = & + \left[ -\frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi+\phi_0-2\psi) \frac{d\phi}{dt} \right. \\ & - \left\{ 2 \frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\ & \left. - 1 \left( -\frac{\overline{GE}}{c} \frac{pg \cos(\psi-\phi_0)}{p \sin(\psi-\phi_0) + g \cos(\psi-\phi_0)} \right) \right. \\ & \left. + \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{p^2 g \sin(\psi-\phi_0) \cos(\psi-\phi_0) - pg^2 \sin^2(\psi-\phi_0)}{[p \sin(\psi-\phi_0) + g \cos(\psi-\phi_0)]^2} \right\} \frac{d\psi}{dt} \Big] \vec{j}_0 \\ & + \left[ +\frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi+\phi_0-2\psi) \frac{d\phi}{dt} \right. \\ & - \left\{ 2 \frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\ & \left. - \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \frac{pg \sin(\psi-\phi_0)}{p \sin(\psi-\phi_0) + g \cos(\psi-\phi_0)} \right) \right. \\ & \left. - \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{p^2 g \cos^2(\psi-\phi_0) - pg^2 \sin(\psi-\phi_0)^2 \cos(\psi-\phi_0)}{[p \sin(\psi-\phi_0) + g \cos(\psi-\phi_0)]^2} \right\} \frac{d\psi}{dt} \Big] \vec{j}_0 \end{aligned}$$

(3-2)

#### 四、上剪刀的绝对加速度

德马克小方坯连铸机摆式飞剪剪切机构的运动，上下剪刀除在与摆体相固连的 $S_1$ 座中受曲轴驱动产生相对运动外，还受摆体线曲轴转轴线的迴转运动的牵连，产生牵连运动。摆体绕固定轴线摆动这项牵连运动，必将使上下剪刀在运动中产生科氏加速度(Cor-  
iolis acceleration)〔2〕〔3〕。因此，上剪刀F点的绝对加速度应为

$$\vec{a}_{FQ_s} = \vec{a}_{QF_r} + \vec{a}_{QF_e} + \vec{a}_{QF_c} \quad (4-1)$$

式中， $\vec{a}_{QF_s}$ —在 $S_Q$ 中表达的上剪刀F点的绝对加速矢量；

$\vec{a}_{QF_r}$ —在 $S_Q$ 中表达的上剪刀F点的相对加速度矢量；

$\vec{a}_{QF_e}$ —在 $S_Q$ 中表达的上剪刀F点的牵连加速矢量；

$\vec{a}_{QF_c}$ —在 $S_Q$ 中表达的上剪刀F点的科氏加速矢量。

上剪刀F点的相对加速度是F点在 $S_1$ 中的运动所产生的加速度。 $S_1$ 是与摆体相固连的动座标系，当摆体运动时，在 $S_1$ 中视为动点的运动皆为相对运动，F点就是这样的动点。

以 $\vec{v}_{1F_r}$ 表示F点在 $S_1$ 中的相对速度，以 $\vec{a}_{1F_r}$ 表示F点在 $S_1$ 中的相对加速度，则

$$\vec{a}_{1F_r} = \frac{d}{dt} \vec{v}_{1F_r}$$

再将(4-2)式变换到 $S_Q$ 座标中表达，则有

$$\vec{a}_{QF_r} = \frac{d}{dt} \vec{v}_{QF_r} \quad (4-3)$$

关于上剪刀F点的牵连加速度，可以先在座标 $S_1$ 中讨论，一般情况下有

$$\begin{aligned} \vec{a}_{1F_e} &= \frac{d}{dt} \vec{v}_{1F_e} \\ &= \frac{d}{dt} (\vec{\omega}_b \times \vec{r}_{1F}) \end{aligned} \quad (4-4)$$

式中， $\vec{a}_{1F_e}$ —上剪刀F点在 $S_1$ 中表达的牵连加速度矢量；

$\vec{v}_{1F_e}$ —上剪刀F点在 $S_1$ 中表达的牵连速度矢量；

$\vec{\omega}_b$ —摆体摆动的旋转角速度矢量，方向与 $X_1$ 、 $g_1$ 轴的正向构成右手系。

$\vec{r}_{1F}$ —上剪刀F点在 $S_1$ 中的径矢

显然，有

$$\vec{v}_{1F_e} = \vec{\omega}_b \times \vec{r}_{1F} \quad (4-5)$$

将(4-5)式的计算结果转入 $S_Q$ 中获得 $\vec{v}_{QF_e}$ ，于是

$$\vec{a}_{QF_e} = \frac{d}{dt} \vec{v}_{QF_e} \quad (4-6)$$

上剪刀F点的科氏加速度 $\vec{a}_{QF_c}$ 的大小，根据〔2〕〔3〕，为

$$\vec{a}_{QFc} = 2 \cdot \frac{d\psi}{dt} \cdot v_{QFr} \quad (4-7)$$

方向指向  $\frac{d\psi}{dt}$  转动的一边，且与  $v_{QFr}$  垂直， $\vec{a}_{QFc}$  也可用矢量表达，即

$$\begin{aligned} \vec{a}_{QFc} &= 2 \vec{\omega}_b \times v_{QFr} \\ &= \begin{vmatrix} \vec{L}_Q & \vec{j}_Q & \vec{k}_Q \\ 0 & 0 & 2 \frac{d\psi}{dt} \\ \frac{d}{dt} X_{QFr} & \frac{d}{dt} Y_{QFr} & 0 \end{vmatrix} \quad (4-8) \end{aligned}$$

(4-8) 式将  $S_Q$  座标扩大为三维，以适应表达  $\vec{\omega}_b$  的需要。式中  $\vec{k}_Q$  为  $z_Q$  轴的底矢。

将 (4-3)、(4-4)、(4-8) 诸式的计算结果代入 (4-1) 式，最后获得上剪刀 F 点的绝对加速度是：

$$\begin{aligned} \vec{a}_{QFa} &= + \left\{ + \left[ - \left\{ \frac{a(d+\overline{DE})}{c} - a \right\} \sin\phi \cos\phi \right. \right. \\ &\quad + \frac{2a(a+b)}{c} \sin 2\phi \cos\phi \\ &\quad - b \cos\phi \sin\phi \\ &\quad \left. \left. - \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+DF)}{c^2d} \cos 2\phi \sin\phi \right] \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right. \\ &\quad + \left[ + \left\{ \frac{a+(d+\overline{DF})}{c} - a \right\} \cos\phi \cos\phi \right. \\ &\quad - \frac{a(a+b)}{c} \cos 2\phi \cos\phi \\ &\quad - b \sin\phi \sin\phi \\ &\quad \left. \left. - \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+DF)}{2c^2d} \sin 2\phi \sin\phi \right] \frac{d^2\phi}{dt^2} \right. \\ &\quad + \left[ + 2a \sin(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\ &\quad - (d+\overline{DF}) \sin(\phi-\phi_0) \\ &\quad - \left\{ \frac{a(d+\overline{DF})}{c} - (a+b) \right\} \sin(\phi-\phi_0+2\psi) \\ &\quad + \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+DF)}{2c^2d} \{ \sin 2(\psi+\phi) \} \cos(\psi-\phi_0) \\ &\quad - \sin^2(\psi+\phi) \sin(\psi-\phi_0) \} \\ &\quad + \frac{a(a+b)}{c} \{ \cos 2(\psi+\phi) \} \{ \sin(\psi-\phi_0) \\ &\quad \left. \left. + \sin(\phi+\psi) \cos(\psi+\phi) \cos(\psi-\phi_0) \right\} \right] \left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ -a \sin(\phi - \phi_0 + 2\psi) \right. \\
& \quad + (a+b) \sin(\psi + \phi) \cos(\psi - \phi_0) \\
& \quad + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin[2(\psi + \phi)] \cos(\psi - \phi_0) \\
& \quad - \frac{a(d + \overline{DF})}{c} \sin(\psi - \phi_0) \cos(\psi + \phi) \\
& \quad \left. + \frac{a(a+b)}{c} \sin(\psi - \phi_0) \cos[2(\psi + \phi)] \right] \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{d\phi}{dt} \\
& + \left[ +a \cos(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \\
& \quad + (d + \overline{DF}) \cos(\psi - \phi_0) \\
& \quad - (a+b) \cos(\psi + \phi) \cos(\psi - \phi_0) \\
& \quad + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin^2(\psi + \phi) \cos(\psi - \phi_0) \\
& \quad - \frac{a(d + \overline{DF})}{c} \sin(\psi + \phi) \sin(\psi - \phi_0) \\
& \quad \left. + \frac{a(a+b)}{2c} \sin[2(\phi + \psi)] \sin(\psi + \phi_0) \right] \frac{d^2 \psi}{dt^2} \\
& + 2 \left[ + \left\{ \frac{a(d + \overline{DF})}{c} - a \right\} \cos \phi \sin \phi_0 \right. \\
& \quad - \frac{a(a+b)}{C} \cos 2\phi \sin \phi_0 \\
& \quad + b \sin \phi \cos \phi_0 \\
& \quad \left. + \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin 2\phi \cos \phi_0 \right] \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{d\psi}{dt} \Big\} \vec{i}_0 \\
& + \left\{ + \left[ + \left\{ \frac{a(d + \overline{DF})}{C} - a \right\} \sin \phi \sin \phi_0 \right. \right. \\
& \quad - \frac{2a(a+b)}{C} \sin 2\phi \sin \phi_0 \\
& \quad - b \cos \phi \cos \phi_0 \\
& \quad \left. - \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{c^2 d} \cos 2\phi \cos \phi_0 \right] \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \\
& \quad \left. + \left[ - \left\{ \frac{a(d + \overline{DF})}{c} - a \right\} \cos \phi \sin \phi_0 \right. \right. \\
& \quad + \frac{a(a+b)}{c} \cos 2\phi \sin \phi_0 \\
& \quad - b \sin \phi \cos \phi_0 \\
& \quad \left. - \frac{c(a+b)[2ad - c(a+b)] - a^2 d(1 + \overline{DF})}{2c^2 d} \sin 2\phi \cos \phi_0 \right] \frac{d^2 \phi}{dt^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ +2\cos(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\
& \quad + (d+\overline{DF})\cos(\psi-\phi_0) \\
& \quad + \left\{ \frac{a(d+\overline{DF})}{c} - (a+b) \right\} \cos(\phi-\phi_0+2\psi) \\
& + \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+\overline{DF})}{2c^2d} \{ \sin[2(\psi+\phi)] \sin(\psi-\phi_0) \\
& + \sin^2(\psi+\phi)\cos(\psi-\phi_0) \} \\
& - \frac{a(a+b)}{c} \{ \cos[2(\psi+\phi)] \cos(\psi-\phi_0) - \sin(\psi+\phi)\cos(\psi+\phi)\sin(\psi+\phi_0) \} \left. \right] \left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 \\
& + \left[ -a\cos(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\
& \quad + (a+b)\sin(\psi-\phi_0)\sin(\psi+\phi) \\
& \quad + \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+\overline{DF})}{2c^2d} \sin[2(\psi+\phi)] \sin(\psi-\phi_0) \\
& \quad + \frac{a(d+\overline{DF})}{c} \cos(\psi+\phi)\cos(\psi-\phi_0) \\
& \quad - \frac{a(a+b)}{c} \cos[2(\psi+\phi)] \cos(\psi-\phi_0) \left. \right] \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{d\phi}{dt} \\
& + \left[ -a\sin(\phi+\phi_0-2\psi) \right. \\
& \quad + (d+\overline{DF})\sin(\psi-\phi_0) \\
& \quad - (a+b)\sin(\psi-\phi_0)\cos(\psi+\phi) \\
& \quad + \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+\overline{DF})}{2c^2d} \sin^2(\psi+\phi)\sin(\psi-\phi_0) \\
& \quad + \frac{a(d+\overline{DF})}{c} \sin(\psi+\phi)\cos(\psi-\phi_0) \\
& \quad - \frac{a(a+b)}{2c} \sin[2(\psi+\phi)] \cos(\psi-\phi_0) \left. \right] \frac{d^2\psi}{dt^2} \\
& + 2 \left[ + \left\{ \frac{a(d+\overline{DF})}{c} - a \right\} \cos\phi \cos\phi_0 \right. \\
& \quad - \frac{a(a+b)}{c} \cos 2\phi \cos\phi_0 \\
& \quad - b\sin\phi \sin\phi_0 \\
& \quad - \frac{c(a+b)[2ad-c(a+b)]-a^2d(1+\overline{DF})}{2c^2d} \sin 2\phi \sin\phi_0 \left. \right] \left[ \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{d\psi}{dt} \right] \cdot \vec{j}_Q \\
& \hspace{15em} (4-9)
\end{aligned}$$

## 五、下剪刀的绝对加速度

同理，获得下剪刀 E 点在  $S_Q$  座标中表达的绝对加速度为

$$\begin{aligned}
\vec{a}_{QE} = & + \left\{ + \frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi + \phi_0) \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right. \\
& - \frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi + \phi_0) \frac{d^2\phi}{dt^2} \\
& + \left[ + 2 \frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \\
& \quad - \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \frac{Pg \sin(\psi - \phi_0)}{P \sin(\psi - \phi_0) + g \cos(\psi - \phi_0)} \right. \\
& \quad \left. \left. - \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \frac{Pg \cos(\psi - \phi_0) \{ p \cos(\psi - \phi_0) - g \sin(\psi - \phi_0) \}}{[p \sin(\psi - \phi_0) + g \cos(\psi - \phi_0)]^2} \right) \right] \left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 \right. \\
& - \frac{\overline{GE}}{c} a \{ \sin(\phi + \phi_0 - 2\psi) + 2 \sin(\phi + \phi_0) \} \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{d\psi}{dt} \\
& + \left[ + \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{Pg \cos(\psi - \phi_0)}{P \sin(\psi - \phi_0) + g \cos(\psi - \phi_0)} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right] \frac{d^2\psi}{dt^2} \left. \right\} \cdot \vec{i}_Q \\
& + \left\{ + \frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi + \phi_0) \cdot \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right. \\
& \quad + \frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi + \phi_0) \cdot \frac{d^2\psi}{dt^2} \\
& + \left[ + 2 \frac{\overline{GE}}{c} a \cos(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right. \\
& \quad + \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \frac{pg \cos(\psi - \phi_0)}{p \sin(\psi - \phi_0) + g \cos(\psi - \phi_0)} \right. \\
& \quad \left. \left. - \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{pg \sin(\psi - \phi_0) \{ p \cos(\psi - \phi_0) - g \sin(\psi - \phi_0) \}}{[p \sin(\psi - \phi_0) + g \cos(\psi - \phi_0)]^2} \right) \right] \left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 \right. \\
& - \frac{\overline{GE}}{c} a \{ \cos(\phi + \phi_0 - 2\psi) + 2 \cos(\phi + \phi_0) \} \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{d\psi}{dt} \\
& + \left[ + \left( 1 - \frac{\overline{GE}}{c} \right) \frac{pg \sin(\psi - \phi_0)}{p \sin(\psi - \phi_0) + g \cos(\psi - \phi_0)} \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{\overline{GE}}{c} a \sin(\phi + \phi_0 - 2\psi) \right] \frac{d^2\psi}{dt^2} \left. \right\} \cdot \vec{j}_Q \quad (5-1)
\end{aligned}$$

需要指出的是，由于剪切前离合器脱开，曲轴与摆体的初速皆为零，剪切时离合器合上，突然启动，故（4-9）、（5-1）式中的角加速度 $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ 与 $\frac{d^2\psi}{dt^2}$ 都不等于零。

## 六、剪切速度

剪切速度是上剪刀闭合的速度，不同于上、下刃的运动速度。求解剪速度直接了当的方法是将〔1〕中的（7—1）式对  $t$  求导。设剪切速度为  $v_s$ ，则有

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{d}{dt} K \\ &= - \left[ + (a+b) \sin(\phi+\psi) \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{a(a+b)}{c} - \frac{(a+b)^2}{2d} \right\} \sin[2(\phi+\psi)] \right] \left( \frac{d\phi}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \right) \end{aligned} \quad (6-1)$$

（6—1）式的负号表示剪切速度方向使开口度闭合。观察（6—1），当  $\phi+\psi=90^\circ$  时， $v_s$  的绝对值最大。

### 参考文献

1987年3月

〔1〕南京工学院西安交通大学主编《理论力学》

人民教育出版社 1978年10月第1版

〔2〕Charles E WjLson

J Peter Sadler

Walter J Mjchels

《Kinematics and Dynamics Of Machinery》

1983