

李宪奎 张德明 著

# 连铸结晶器

## 振动技术

冶金工业出版社

G249.7  
85

# 连铸结晶器振动技术

李宪奎 张德明 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2000

## 内 容 简 介

本书重点介绍了正弦、非正弦及三角形振动波形,振动参数的优化,拉速-振动参数最佳控制模型的建立;电液伺服驱动的非正弦振动装置;机械驱动的非正弦振动装置;振动机构,以及与振动相关的结晶器润滑及铸坯振痕的形成。

本书适合于从事连铸生产和科研的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

连铸结晶器振动技术/李宪奎,张德明著. —北京:  
冶金工业出版社,2000.8  
ISBN 7-5024-2577-2

I. 连… II. ①李…②张… III. 连续铸造-结晶-  
振动理论-研究 IV. TG249.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 19005 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 郭庚辰 美术编辑 王耀忠 责任校对 朱翔

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 8 月第 1 版, 2000 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 3.75 印张; 97 千字; 109 页;1-2500 册

11.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

连铸结晶器振动是常规连铸的基本特征,在连铸发展的历史上,只有当采用了振动的结晶器之后,连铸生产的工业化才得以实现。结晶器的振动波形(速度曲线)从矩形波、梯形波、正弦波直到近年来出现的非正弦波,波形的每一次演变和发展都对连铸工艺和铸坯质量产生了重大影响。特别是非正弦振动的出现使拉坯速度有了大幅度提高,其中最有代表性的是日本钢管公司福山厂5号板坯连铸机,由于采用了非正弦振动使板坯的拉坯速度提高到2.5m/min,最高达到3.0m/min,同时显著地提高了铸坯表面质量、减少了粘结性拉漏。因此,结晶器非正弦振动已被连铸工作者确认为发展高效连铸的关键技术。

作者结合近年来在结晶器振动方面的科研实践、教学体会及有关文献资料写成此书。

全书共分6章,重点介绍了非正弦振动波形的构造方法,振动参数的优化、拉速-振动参数最佳控制模型的建立;电液伺服驱动的非正弦振动装置、机械驱动的非正弦振动装置;三角形波及参数分析。同时还深入地介绍了正弦振动参数、拉速-振动参数同步控制模型的优化、振动机构;简要地介绍了与振动相关的结晶器润滑及铸坯振痕的形成。

限于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

全书由于敏之同志主审。

作 者

1999年10月8日

# 1 结晶器振动技术的发展

## 1.1 结晶器振动技术发展的历史

最初的连铸机结晶器是静止的,在拉坯过程中坯壳极易与结晶器壁发生粘结,从而导致拉不动或拉漏事故。因此,静止不振动的结晶器限制了连铸生产的工业化。直到1933年现代连铸的奠基人——德国的西格弗里德·容汉斯(Siegfried Junghans)开发了结晶器振动装置,并成功地应用于有色金属黄铜的连铸。

1949年S·容汉斯的合作者美国的艾尔文·罗西(Irving Rossi)获得了容汉斯振动结晶器专利的使用权,并在美国约阿·勒德隆钢公司(Allegheny Ludlum Steel Corporation)Watervliet厂的一台方坯连铸试验机上采用了振动结晶器。与此同时,容汉斯振动结晶器又被用于西德曼内斯曼(Mannesmann)公司胡金根(Huckingen)厂的一台连续铸钢试验连铸机。

容汉斯振动的结晶器在这两台连铸机上的成功应用,使其在钢连铸中迅速得到了广泛应用。从此,结晶器振动便成了连铸机的标准操作。

## 1.2 结晶器振动规律的演变

结晶器振动规律即结晶器振动速度随时间的变化规律是结晶器振动技术中最基本的内容,因为从连铸发展的历史上看每当结晶器采用了一种新的较过去更为合理的振动规律时,都对连铸坯的浇铸、表面质量及拉坯速度的提高产生了重大的影响。

### 1.2.1 矩形速度规律

矩形速度规律是最早出现的一种振动方式,其速度变化规律如图1-1中的曲线1所示。它的主要特点是:结晶器在下降时与铸坯做同步运动,然后以3倍的拉坯速度上升。

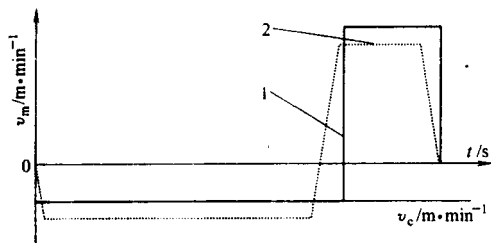


图 1-1 结晶器振动方式

生产实践表明,这种振动方式对铸坯的脱模是有效的,早期得到应用。但此种振动方式所存在的主要问题是:实现运动规律的凸轮加工制造比较麻烦;为了保证严格的同步运动,振动机构和拉坯机构之间要实行严格的电气连锁;在上升和下降的转折点处速度变化很大,加速度在理论上等于无穷大。虽然由于凸轮曲线的上升和下降段之间有过渡曲线相连使加速度达不到无穷大,但仍然是很大的。这对铸坯的质量和振动系统的正常运转都是不利的,因而也不便于采用高频率振动。

### 1.2.2 梯形速度规律

梯形速度规律是矩形速度规律的改进,其速度变化规律如图 1-1 中的曲线 2 所示。它的主要特点是:结晶器在向下运动的过程中有较长一段时间其速度稍大于拉坯速度,即所谓的“负滑动运动”。从而在坯壳中产生压应力,可以使结晶器里断裂的坯壳压合,使粘结的坯壳强迫脱模;结晶器在上升和下降的转折点处,速度变化比较缓和,有利于提高运动的平稳性。

实践证明,梯形速度规律是一种较好的振动规律,因此沿用了多年。后来才被正弦振动规律所取代。

### 1.2.3 正弦速度规律

正弦速度规律如图 1-2 中的曲线 1 所示(正弦波与余弦波相同)。选择这种速度规律的基本出发点是:打破结晶器和铸坯之间要有一定的速度关系的框框,着重发挥它的脱模作用;用偏心轮取代凸轮。

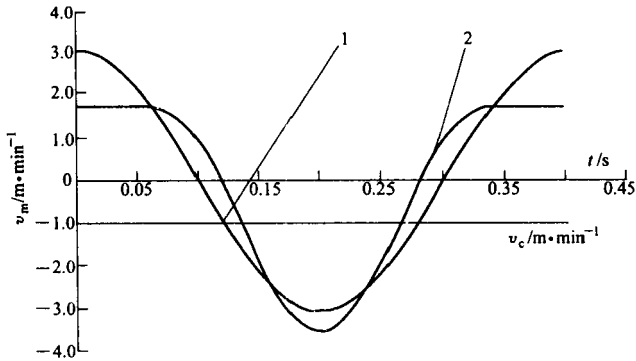


图 1-2 结晶器振动方式

这种速度规律的主要特点如下：

(1) 结晶器与铸坯之间没有同步运动阶段，但仍然有一小段负滑动，有利于拉裂坯壳的“愈合”和脱模。

(2) 由于速度是按正弦曲线变化，所以加速度是按余弦曲线变化的。使结晶器振动平稳。

(3) 由于加速度较小，可以采用较高频率振动，有利于消除坯壳的粘结，提高脱模作用。

(4) 正弦振动是用偏心机构来实现的，比采用凸轮机构优越：加工制造容易，润滑密封方便，运动精度高，易于采用高频振动。

正弦振动规律是目前国内外应用最广泛的一种振动规律。它在方坯、板坯及薄板坯连铸机上都有最广泛应用。

#### 1.2.4 非正弦速度规律

非正弦速度规律如图 1-2 中的曲线 2 所示。它是近年来出现的一种新型振动方式。其主要特点是：负滑动时间短，有利于减轻铸坯表面振痕深度；正滑动时间较长可增加保护渣的消耗量，有利于结晶器的润滑；结晶器向上的运动速度与铸坯运动速度差较小，可减小结晶器施加给铸坯向上作用的摩擦力，即可减小坯壳中的拉应力，减少拉裂。

据报道日本钢管公司福山厂 5 号板坯连铸机采用了这种非正弦振动已取得拉速达 3m/min 的效果。



## 2 结晶器润滑

从一定意义上讲,结晶器的润滑和结晶器振动的作用是相同的,即减小结晶器和铸坯之间的摩擦力,防止坯壳和结晶器壁粘结,使铸坯顺利脱模,并获得良好的铸坯表面质量。

当然,它们的作用效果也不是完全相同的,如润滑还可以改善结晶器的传热,而振动还可以使结晶器里拉裂的坯壳愈合;合理的振动规律和振动参数有利于润滑作用的充分发挥。

最初的结晶器润滑是采用油润滑,后来由于结晶器保护浇注的需要出现了浸入式水口及保护渣润滑。现在浇铸板坯和大方坯等断面尺寸较大的铸坯时,都采用保护渣润滑,但断面较小的小方坯仍然采用油润滑。

### 2.1 油润滑

小方坯(断面 $\leq 120\text{mm} \times 120\text{mm}$ )结晶器一般都采用油润滑。浇注小断面,特别是连浇时,由于操作上的原因不能使用浸入式水口和保护渣。

#### 2.1.1 结晶器润滑油的特性

一般机械设备所用润滑油的作用是将摩擦表面隔离开来,减少摩擦部位的接触,从而起到降低摩擦、磨损的作用,即润滑作用。而结晶器铜管润滑除了应具有润滑的性质外,还必须具备一些满足连铸生产要求的特殊性质,如果油品选用不当,一旦起不到润滑作用,就会出现坯壳拉裂或拉漏事故。如果油中含有毒性物质,燃烧后产生的烟雾与气味,还会影响操作工人的健康。因此,连铸机结晶器铜管润滑油还必须具备以下特性:

(1)不能燃烧过早而失去润滑效果,因此油的闪点要高。

(2)即使是在较低温度时仍有好的流动性,油能铺展在结晶器内表面上;油能从油箱中泵入结晶器。

(3)要求灰分、残碳尽可能少,不致于增大钢坯中非金属夹杂物及碳含量。

(4)燃烧时要充分,烟雾要小,不影响操作工人的视线,不污染环境。

(5)燃烧时气味要小,无毒,以免影响现场工人的身体健康。

### 2.1.2 润滑机理

目前关于油润滑机理的研究还很不充分,因此有关的文献和报道很少。比较一致的说法是:当润滑油沿结晶器四周向下流入时,油的分解发生在到达钢液之前,或同红热的坯壳接触时。一部分油在高温下分解成碳和氢以气态蒸发在钢液面附近形成一个防止钢水氧化的气氛,碳沉积在结晶器壁上。在结晶器向下运动时,油或碳将被带入结晶器与凝固壳之间起润滑作用。

不过油润滑的具体过程取决于润滑油的性质;结晶器内腔表面温度,即结晶器的热面温度;结晶器在弯月面附近的锥度及弯月面坯壳的凝固和脱模过程。

如果所使用的润滑油的沸点较低,低于结晶器的热面温度,可以认为润滑油还没到达弯月面之前就在铜壁热面上完全蒸发掉;反之,润滑油的沸点较高,高于结晶器的热面温度,则润滑油就能较多地流入坯壳与结晶器间的气隙。

根据结晶器油润滑时坯壳凝固及铸坯表面振痕形成的机理(见下一章)可知,只有在结晶器每个振动周期的负滑动时间里,结晶器壁上的油膜或沉积碳才有可能被带入结晶器与凝壳之间。如果结晶器在弯月面位置上形成了负锥度,则在负滑动期间结晶器与坯壳间的气隙立即被封住,气隙内的油汽化并“裂解”出氢气,由于氢气的导热系数是空气的7倍,因此大大地改善了传热过程。但此时油膜和沉积碳也很难被带入气隙,只有负滑动结束时弯月面以上结晶器壁上的沉积碳起润滑弯月面坯壳的作用。

### 2.1.3 润滑油的选择

连铸结晶器润滑油可分为三种:矿物油、植物油(即菜籽油)和合成油。合成油一般是矿物油基的混合油,油的主要性质列在表

2-1 内。

据有关文献报道,润滑油在流入结晶器弯月面时,油被钢液的热辐射加热,经计算表明,油可被加热到 350℃,根据油的稳定性它在达到弯月面之前很大部分已损失掉。由于菜籽油有较好的高温稳定性,因此目前国内外主要是采用菜籽油作为润滑剂。荷兰艾莫伊登的霍哥文斯厂(Hoogovens IJmuiden)的小方坯连铸机从一开始就选用了精炼的植物油,其选用的理由是这种油有好的高温稳定性,比其他润滑油有更高的闪点,实际应用证明选用这种油是成功的。甚至在低流量的条件下(130mL/t),铸坯表面质量也是比较好的,产生的烟气少,而且无可见度的限制。Phenol、甲醇(Cresol)和多环芳香烃(Poly Cyclic aromatic hydrocarbons)的浓度在结晶器附近的不同位置进行测定,其测量值都远远低于法定的允许的最大值。因此,使用这种油对健康无影响。植物油的另一个优点是有低的凝固点,在冷的冬季也能顺利流入结晶器。

表 2-1 不同连铸油的性质

油类	闪点/℃	凝固点/℃	粘度(在 40℃)/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ( $\text{泊} \times 10^{-2}$ )
矿物油	160	-12℃	0.50(50)
合成油	240	—	0.32(32)
菜籽油	>300	—	0.32(32)
精炼植物油	350	-21℃	0.30(30)

#### 2.1.4 润滑油的管理

菜籽油由于质量变化很大,故管理时必须充分注意。

(1)保管时应避免温度过高,同时还必须防止混入金属离子,如混进  $10^{-6}$  的氟离子、 $10^{-7}$  的铜离子,就会促其氧化。

(2)菜籽油的含水量,通常应控制在 0.02% 以下。油在常温下含水量不超过 0.035%~0.04%。当水分超过 0.04% 时,就会失去透明度,变成白浊状态。油中的水分即便是很少的水分也会使铸坯产生皮下气泡,当然润滑油过量也会产生这种情况。过多的水分将引起钢液飞溅。

(3)菜籽油的粘度受温度影响较大(见图 2-1),故必须把油温控制在一定的范围内。

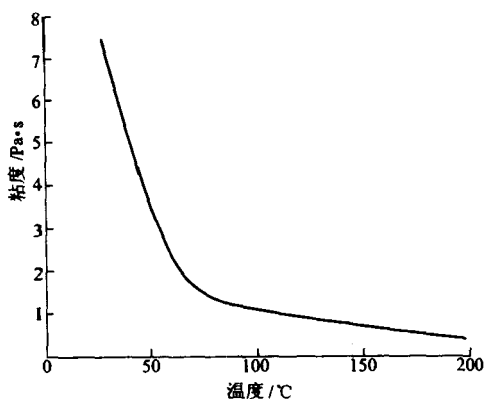


图 2-1 菜籽油的粘度变化

(4)菜籽油的供油系统每年至少要清洗一次。通常用 10% 左右的苛性苏打或苏打粉进行清洗,但碱会促使菜籽油氧化,造成粘度升高,因此必须用水彻底地冲洗干净。

### 2.1.5 供油系统

供油系统包括两部分:供油装置和给油装置。

#### 2.1.5.1 供油装置

结晶器润滑耗油量少,一般的耗油量为 50~200g/t。由于低流量、低压力供油系统不易通畅,因此对供油装置的基本要求是流量控制准确、工作可靠。

常用的供油装置有自动供油装置和重力供油装置两种。

#### A 自动供油装置

图 2-2 所示为国内某厂结晶器润滑自动供油装置。该装置为一般的稀油润滑系统。

作为该系统动力源的齿轮泵结构简单、体积小、工作可靠、成本低、便于维护与修理,适合比较恶劣的工作环境;选用 1-10B 节流阀来控制系统的流量,调整流量 20mL/min;有两台齿轮泵,一

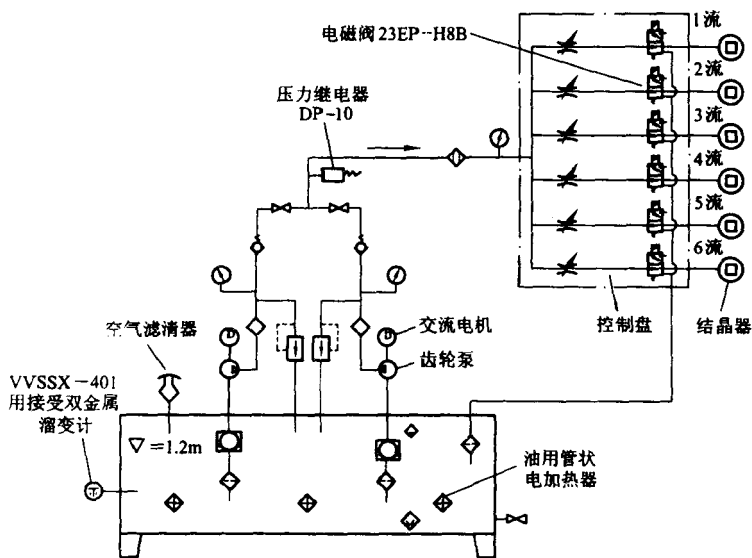


图 2-2 结晶器润滑系统图

台工作，一台备用，用压力继电器控制，当系统压力低于  $0.2\text{MPa}$  ( $2\text{kgf/cm}^2$ ) 时，备用泵立即起动；用电磁球阀来控制系统的供油与不供油；系统油箱有电加热器，一般控制在  $40\text{C}$  左右为宜。

### B 重力供油装置

重力供油一般是把油箱放在操作平台的支架上，使油箱内的润滑油与结晶器之间形成一定的压头，利用油的重力进行供油。可以用改变油箱位置的办法调节供油量，也可以用阀门来调节。这种供油方式设备简单可靠。图 2-3 所示为国内某厂小方坯连铸机重力供油装置示意图。

#### 2.1.5.2 给油装置

比较常用的给油装置是装在结晶器上端的油缝式给油盒。其中的一种是将  $0.3\sim 0.5\text{mm}$  的环缝装在铜管上部，要求浇钢时油流能缓慢均匀地从油缝中溢出，如图 2-4 所示。另一种是结晶器上带分配器，油从一根管子送来，经分配器分为四根管子，从结晶器

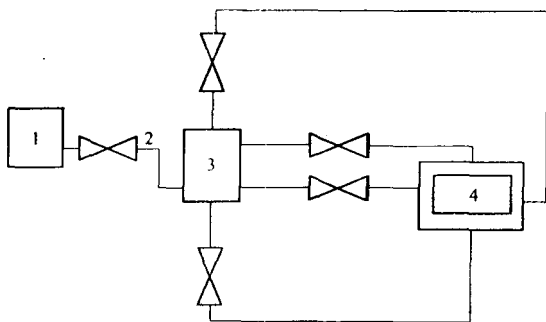


图 2-3 润滑系统示意图

1—盛油桶；2—油管；3—供油分配罐；4—结晶器

四面输入，这样油流更为均匀。

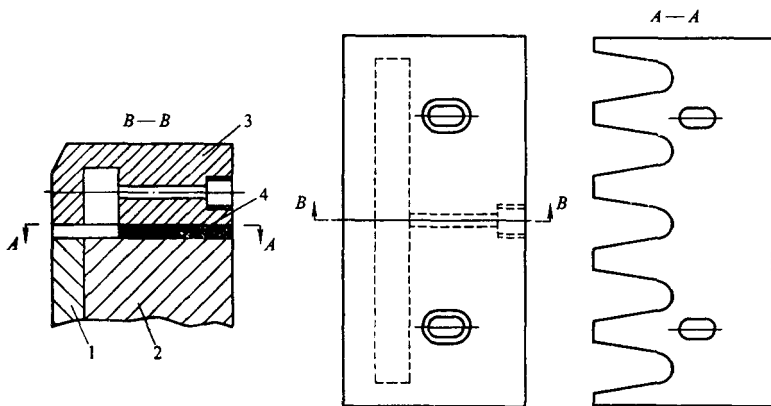


图 2-4 油缝式给油盒

1—结晶器内壁；2—结晶器外壁；3—给油盒；4—垫片

## 2.2 保护渣润滑

在连铸生产中除了浇注断面较小（一般是不大于  $120\text{mm} \times 120\text{mm}$ ）的铸坯是敞开浇注、油润滑外，大都使用保护渣（配合浸入式水口）。保护渣除了作为结晶器内壁和凝固坯壳之间的润滑剂之外，它还具有许多重要作用，如绝热保温作用，可以防止结晶器

中钢液面结壳,防止浸入式水口外围结钢、结渣;阻隔空气作用,防止结晶器中钢液被氧化;净化钢渣界面,吸收结晶器中到达钢渣界面处的氧化物、夹杂物;改善凝固传热,消除或减小结晶器与坯壳之间的空隙,减小热阻提高结晶器的综合换热系数。

连铸保护渣的使用必须以浸入式水口导流作为前提条件,其模式如图 2-5 所示。

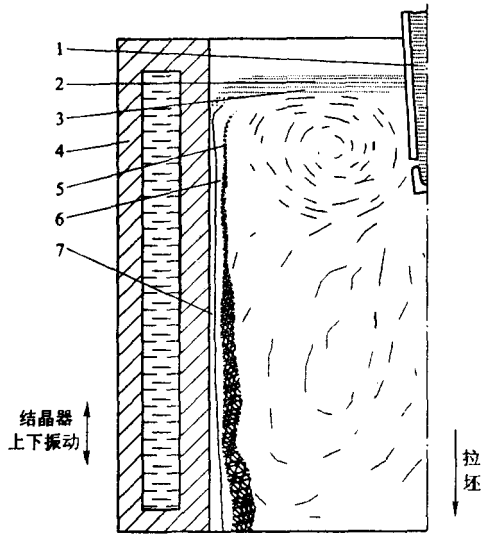


图 2-5 浸入式水口保护渣连铸板坯过程

- 1—浸入水口;2—粉渣层;3—熔渣层;4—结晶器;  
5—凝壳;6—液态渣层;7—凝固渣皮

由于浸入式水口的导流作用,将属于上注型的连续铸钢过程,在结晶器区段上部改造成准下注型的浇注过程,为向钢液面添加保护渣,避免注流卷渣创造条件。

在连铸过程中加入到结晶器的保护渣,要发挥上述各方面的作用,必须要求保护渣有规定的熔化模式,也就是要求在钢水液面上形成粉渣层-烧结层-液渣层,所谓三层结构。

添加到结晶器高温钢液(1500℃左右)面上低熔点(1100~1200℃)的渣粉,吸收钢液提供的热量,在钢液上形成了一定厚度的液渣覆盖层(约10~15mm),钢水向粉渣层传热减慢,在液渣层上面的粉渣受热作用,渣粉之间互相烧结在一起形成所谓烧结层(温度在900~600℃),在烧结层上面的粉渣接受从钢水传递的热量更少,温度低于500℃,故保持为粉状,均匀覆盖在钢水液面上,防止了钢水散热,阻止了空气中的氧进入钢水。

浇注初期,往结晶器内钢液面上加入第一批保护渣之后,很快在钢液面上形成液渣层。液渣受到结晶器壁的冷却,沿着结晶器壁一周形成一圈凝固渣皮。在结晶器壁向下振动的带动下,渣皮插入弯月面下,并夹在弯月面下形成的初生凝固坯壳与结晶器之间。由于初生凝壳受到由渣皮传递来的挤压力的作用,形成向钢液一面弯曲的振痕。所以,夹在此处的渣皮靠结晶器壁一面为平板形,靠凝壳振痕一面则向振痕内凸起,在开始拉坯阶段,拉坯速度低,凝壳外表面的温度较低,渣皮与凝壳之间暂时难于形成有效的润滑状态。在这种情况下,夹在有振痕的初生凝壳与结晶器壁之间的渣皮,当结晶器壁转为向上振动时,难于将带下的渣皮向上带回原位,只能随着拉坯运动被凝固坯壳带下去,凝壳与结晶器之间从上到下便形成保护渣层。

随着拉坯速度的提高,结晶器中的钢液与结晶器壁之间的热交换加强,凝壳外表面温度很快升高,夹在凝壳与结晶器壁之间的凝固渣皮,在靠近凝壳的一侧变为熔融状态的渣膜,便呈现出有效的润滑状态。这时,保护渣的润滑作用方才发生。

拉坯不断进行,液态渣膜在自身的流动和结晶器壁的上下振动及向下拉坯的综合作用下,连续地被带出结晶器。钢液面上的液渣层不断地通过弯月面向下供给熔渣,相应地分批向结晶器中添加新渣。如此循环,保护渣不断地被消耗掉。



### 3 铸坯表面的振痕

结晶器振动有利于铸坯脱模,但振动也使铸坯表面产生振痕。通过对铸坯振痕金相组织的分析发现,在振痕谷部其夹渣、成分偏析均较严重。同时,还伴随有微观裂纹,而且振痕愈深上述情况愈严重。

振痕的危害是多方面的:振痕较深时可能在矫直时产生横裂,或严重时将引起拉漏;振痕谷底的夹渣、成分偏析将影响轧材的成分均匀和力学性能。较深的振痕还将在冷轧或热轧带卷上产生振痕条纹或振痕裂纹。

因此,必须对振痕的形成过程有所了解,以便通过结晶器操作的优化减轻振痕。

振痕的形成还与结晶器的润滑方式有关。

#### 3.1 敞开浇注油润滑振痕的形成

目前有关敞开浇注油润滑条件下振痕形成机理的报道很少,其中比较有说服力的报道如图 3-1 所示:截面 A~E 是在一个振动周期中在弯月面区域沿纵向所截得的五个剖面。

剖面 A 是结晶器在一个振动周期开始时的情况,假设初始的凝固壳粘结在结晶器上,随结晶器向上运动,该坯壳被称为弯月面坯壳,但没有凸面形状。以拉坯速度向下运动的坯壳的最上端没有粘附在结晶器上,由于坯壳与结晶器之间的间隙,使运动坯壳和结晶器之间的热阻大于粘结坯壳和结晶器之间的热阻。

弯月面坯壳和下行坯壳的连接处想像为第二弯月面,由于两者之间还没有连接,因此不存在撕裂现象。向下运动的坯壳使结晶器暴露于钢液中,暴露的结晶器壁立刻被向下延伸的弯月面坯壳所覆盖。沿结晶器壁快速发展的凝固壳,钢的优先生长方向为 $\langle 100 \rangle$ 凝固学方向,该方向与热流方向相反。