

国际连续铸钢
会议论文集

目 次

中国连铸生产与展望	冶金工业部
关于铸坯力学和铸坯冷却的理论和试验研究	奥钢联
曼内斯曼二十年来的超低压头连铸	曼内斯曼 德马克公司
武钢板坯连铸近两年生产技术的新发展	武汉钢铁公司第二炼钢厂
✓ 小方坯的连续浇铸——科研、新的铸机部件与操作工艺	康卡斯特公司
✓ 引进的小方坯连铸机在我国的使用和设备改进情况	北京钢铁设计研究总院
新日铁君津厂板坯连续铸锭	新日铁君津厂
上海第三钢铁厂连铸技术的发展	上海第三钢铁厂 重庆钢铁设计研究院
连续铸钢的最近发展	FCB 公司
连铸最近的发展和它在连铸机现代化方面的应用实例	西马克公司
上海第一钢铁厂板坯连铸机的设计与开发	上海第一钢铁厂 西安重型机械研究所

特殊钢连铸的最新工艺	大同特殊钢厂
在连铸机二冷区安设电磁搅拌的效果	冶金部钢铁研究总院 涟源钢铁厂
紊流电磁搅拌技术及设备——消除白亮带的有效手段	武汉钢铁设计研究院
连铸坯大型氧化物夹杂的研究	北京钢铁学院
熔渣对几种夹杂物的润湿速度研究	中国四川省重庆大学
连铸用耐火材料技术	黑崎窑业有限公司
连铸中间包内钢液流动的数学模拟——对中间包流动过程的分析	北京钢铁学院
中间包内衬系统的改进及其对生产率和钢质量的影响	福塞科公司
曼内斯曼钢管公司的弧型园坯连铸机	曼内斯曼钢管公司
供直接轧制和热装的连续铸锭技术	奥钢联
改进高速板坯连铸机辊子的排列和结构	日立造船公司
喷雾冷却传热研究	北京钢铁学院
通过降低结晶器热流密度的方法来提高连铸板坯的质量	住友金属——鹿岛钢厂及中央研究所
高水基液压传动在连铸机上的应用	西安重型机械研究所
用于高产量热轧或直接轧制的连续浇铸设备	曼内斯曼钢管公司 曼内斯曼, 德马克

超低压头连铸机

.....达涅利公司

✓ 水平连铸设备的工业应用

.....Technica—Guss 公司

✓ 水平连铸技术的半工业性试验研究

.....上海钢铁工艺技术研究

✓ 钢的水平连铸（对浇铸小生产量，提供有经济意义的选择方案）

.....曼内斯曼 德马克

✓ 小钢坯水平连铸

.....日本钢管株式会社

✓ 水平连铸机分环温度场，应力场的研究分析

.....上海工业大学

中国连铸生产与展望

且克明

(冶金工业部)

中国连续铸锭起步较早,五十年代中期便开始进行探索性试验。1960年前分别在上海、重庆、唐山建成三台立式连注机。1964年在重庆钢铁公司三厂正式建成弧形板坯连铸机。以后陆续在上海几个钢厂以及天津、首钢等厂建成一批连铸机。到1984年止我国已有20个钢厂拥有42台连铸机。

1980年以后,我国连铸生产得到进一步发展,1984年共生产连铸坯460万吨,比1980年的230万吨增加一倍,连铸比达到10.6%。最近四年内(1981—1984)新建成14台连铸机,新增能力为201万吨,预期我国连铸发展速度还将进一步加快,许多钢铁企业都在积极创造条件,建设新的连铸机。

一、连铸设备基本状况

我国现有连铸机大体可分为三种类型

①由我国自行设计和创造:这类连铸机所占有的台数及生产能力在我国现有连铸机中占大多数。上钢三厂的矩形坯连铸机,自65年投产以来到84年底已累计生产连铸坯600万吨。上钢一厂板坯连铸机72年投入试生产至84年底,已生产合格板坯477万吨。为了进一步稳定与改造铸机的生产水平,这二个厂的大部分铸机已在近两年作了比较彻底的更新改造。

②从国外引进的板坯连铸机,武钢二炼厂引进西德三台单流板坯连铸机,设计能力为120万吨/年。85年上半年的产量已达到年产160万吨水平,超过设计能力30%,从85年3月份起已取消模铸,实现100%全连铸,并创造月产13.79万吨,连浇117炉,且漏钢率小于0.047%的较好水平。

③从国外引进小方坯连铸机,80年以来,从国外引进了一批小方坯连铸机。其中,有的是全部引进,有的是引进部份关键设备,这些铸机经过熟练操作,加强管理,以及对原设计进行部份改进。目前,生产渐趋正常。如三明钢厂85年上半年实际生产120×120, 150×150连铸坯8.13万吨,超过设计能力16%。我国连铸机的机型绝大部分为弧形连铸机占40台,立式为二台,从铸坯截面来分,板坯连铸机设备能力占40%,方坯占60%。

二、工艺操作方法

我国连铸生产的发展，除了逐步增加设备能力，还积极开发应用新技术，提高工艺操作水平：

①实现多炉连浇：根据连铸生产特点，这些年来各钢厂均加强了前后工序的调度管理，钢水温度测量等措施，大力提高连浇水平，如上钢三厂84年达到平均连浇炉数30.01炉连浇时间17.26小时。武钢达到了月平均连浇数7.84炉。

②普遍增设炉外处理工序，净化连铸钢水，目前各连铸钢厂，普遍采用吹氩调温工艺，部份钢厂采用了铁水予处理，钢水真空处理，转炉出钢挡渣工艺及喷粉工艺，以适应提高质量及扩大品种的需要。

③普遍采用伸入式水口，保护渣浇铸工艺：我国连铸钢厂中，凡铸坯断面允许的铸机已普遍采用伸入式水口，保护渣浇铸，耐火材料厂提供了各种材质的伸入式水口及保护套管，包括熔融石英、石墨高铝等各高等院校、研究单位和工厂协作，提供了适应不同钢种的保护渣配方。并开展了水力学模型，融液性能等试验研究工作。

④改善中间包工作条件：扩大中间包容量，采用挡渣墙，整体吹氩塞杆装置以及绝热板等措施，对降低夹杂含量，防止堵塞，适应多炉连浇，降低劳动强度等方面均起了积极的作用。

⑤采用气水喷雾冷却：武钢、上钢一厂等在连铸机二冷段采用气水喷雾冷却，使铸坯表面质量进一步提高，并为推行铸坯热送，热装，创造了条件。

⑥推行热送热装工艺：在实现以上措施的基础上，特别是注坯质量及调度工作得到改善以后，一些厂正在推行热送热装工艺，武钢目前已取得热装比较高的好成绩。

⑦在大力提高工艺操作水平的同时，还开发应用了不少新技术，如：方坯、板坯的电磁搅拌，已在不少厂进行了工业性试验。取得了增加等轴晶、减少偏析的予期效果，并进行不同部位按放电磁搅拌设备的试验。

水平连铸已攻克了结晶器，拉坯装置及分离环三大关键，目前正进入工业性试验阶段，并浇铸成功了优质炭素钢，低合金钢，不锈钢等多种钢种。

三、品种质量方面

随着连铸产量的不断增加，扩大品种方面的要求，越来越突出，为此，各连铸钢厂目前均努力扩大连铸钢种，现在各厂能正常生产的有：各种牌号的硅钢，包括取向及非取向硅钢等。 α_{60} 系列牌号的石油管线用钢及无缝钢管用钢。造船用钢、耐大气腐蚀、耐海水腐蚀用钢等低合金钢种、深冲及极深冲用钢等。

初步统计，我国已能采用连铸生产的钢种约60余个，目前正根据市场需要，不断扩大新钢种。

四、今后展望

近年来我国连铸生产建设尽管取得一定成绩，但无论从连铸机生产规模、产量、质

量、钢种、工艺和自动化程度等方面与先进国家相比，还存在差距，发展连铸是我国钢铁工业的既定技术政策。在第七个五年计划期间(1986—1990)将新建一大批，包括大中型板坯、方坯合金钢连铸机，圆坯连铸，水平连铸在内的各种类型新连铸机。使1990年连铸比达到25~30%。

在发展连铸生产过程中，我们竭诚欢迎与各国厂商，进行各种形式的合作，这一方面在前一阶段我们已有了良好的开端。宝钢已从日立造船（生产指导：新日铁）引进了年产400万吨的大型板坯连铸机。

我国已从奥钢联、意大利坦尼利等厂引进了合金钢连铸机。武钢从西德引进的板坯连铸机在生产中取得了好成绩，引进的小方坯连铸机正逐步在生产中发挥作用。此外，在合作设计、合作制造、软件转让等方面，均有一定进展。总之，我们合作的前景是十分广泛的。我们相信在未来的日子里，与各国朋友的交往，合作一定会取得更新的进展。

关于铸坯力学和铸坯冷却的 理论和试验研究

G.N.Holleis 和 K.L.Schwaha

(林茨 奥地利 奥钢联)

1. 前 言

在凝固过程中,铸流的凝壳总要断断续续地承受变化着的机械载荷和热载荷。如果凝固壳中产生的应力和应变超过了临界值(1),那么这些载荷就会使连铸坯产生若干缺陷。

可以用数学模型来确定这些缺陷——主要是各种裂纹的形成、发生部位和程度。这些数学模型是设计连铸机的基础,同时也可以用来优化操作条件说明质量情况。

为了正确地建立铸坯性能的数学模型,最有说服力的前提就是通过精心设计的工厂试验来验证所提出的模型。把冶金质量结果和应力——应变理论分析进行对比,就能导出不同钢号、不同类型缺陷相应的临界应力值和临界应变值。因为这些临界值都是和一定的数模有关,经过计算所得的数值,所以就几乎不可能把从不同试验研究所得到的绝对数值来加以比较。

本文中,围绕着下列课题介绍有关铸坯研究项目中所获得的若干结果:

- 在稳定状态和过渡状态时的鼓肚现象,
- 铸坯变形,
- 铸坯冷却。

2. 对铸坯鼓肚现象的研究

曾推测铸坯鼓肚现象在形成各种内裂和中心偏析上起着主要作用。为了对这种现象进行理论研究,奥钢联在假定材料具有热粘滞—弹性—塑性的特性基础上,发展了一种逼真的有限单元模型。这已由 Rammerstofer 等人作了报导。这个模型现在仍在这一专题方面占有最为领先的地位。

为了检验模型假说的确实性,把鼓肚现象及其对铸坯内部质量的影响作为冷却强度、浇铸速度和辊距的函数系统地进行了研究。为了减少变量的数目、这些研究的对象

仅限于深冲用铝镇静钢。

2.1. 鼓肚测量

测量是在奥钢联的4号板坯连铸机上进行的。测量的位置和在铸坯支撑装置上所做的改变如图1所示。为了研究辊距的影响,在位于拉坯机和位于弧形段前半段上的铸坯支撑装置上取走了若干辊子。

图1还示出了取走一个辊子后安装在铸坯支撑装置上的测量装置。在一个辊距范围内测量时,只需使用一个差动变送器。在两倍辊距范围内测量铸坯鼓肚的形状,就需要用三个差动变送器,它们按四等分的距离均布。基准面是一块和辊子接触的水冷支撑板,利用弹簧把它压在两个相邻的辊子上。

在两倍辊距时,鼓肚发展的程度已大到足以用对准窄面的电影摄影机拍摄下来。在图2中就有这些照片中的一个实例。在窄面发暗的角部陪衬下,宽面明亮火光的鼓肚清晰可见。还可看见测量设备中的两个传感器。除了对于测量本身以外,这些照片还特别对于研究过渡状态提供了有价值的信息。

图3作为稳定状态条件下研究结果的一个例子,显示了在拉坯机部位,在一个辊距和两倍辊距时,鼓肚量和铸速的关系。在一个辊距为255毫米时,测得的鼓肚值是在“0”以上一点、很小,而辊距在510毫米时,鼓肚值在2.0毫米(铸速1.3米/分)和5.5毫米(铸速1.7米/分)之间。

随后的冶金评价令人印象深刻地证明了鼓肚和形成中心裂纹的关系,就和理论假定的一样。铸流支撑装置不作改变时,铸速高达1.7米/分,在纵断面上也没有裂纹。在取走一个辊子后,如果两倍辊距的位置接近凝固点,那么即使以1.1米/分的速度浇铸,也可在所有的试样上找出明显的内裂纹带。

该研究项目还包括了研究如铸速变化、铸坯停住等过渡状态,因为在过渡状态下的铸坯特性对于工艺工程师来说是极其重要的,特别是对发展和完善过程自动化的新的数学模型、如二次冷却模型来说是极其重要的。

图4给出了铸坯从很高的铸速一下子停住后的鼓肚情况、鼓肚曲线很清楚地说明了:

——鼓肚对辊距有着强烈的依存关系、

——与时间有关的现象占主导地位,即蠕变的影响比之弹性或塑性的影响起重要作用。

这些试验数据证明,一个逼真的铸坯模型必须要把蠕变现象包括进去。弹性的、或是弹一塑性的分析都忽略了铸坯特性中的一个重要因素,因而可能导致错误和把结论引入歧途,在研究浇铸的过渡状态时尤其如此。

2.2 测量结果的理论分析

如前所述,鼓肚测量开始是用来检验数学模型的,但最后它推进了数模的改进。现在针对上一节所说的几种情况来说明理论和试验结果的相应关系。

图5中比较了所计算的在稳定态下,相应于一个辊距和两倍辊距的液-固相界面应变变量。考虑到它们巨大的差别,因此两倍辊距导致内裂形成、如纵断面上硫印所显示的那样,就不足为怪了。在数学模型稍稍改进后、鼓肚的计算值和测量值相合得很好。

第二个例子。即图4中铸坯停住的分析用图6表示于图6中,它给出了

——所用的模型,

——对三个时距相应的计算应变变量曲线图,

——两倍辊距对内部质量的影响,其内部质量用纵断面的硫印检查表示,

与一个辊距比较,两倍辊距使得液-固相界面的应变变量增加了25倍。

至于内部质量,在硫印图上可看到两个不同的裂纹带。靠外侧的裂纹带是由于铸坯停住时过度的应变所致,靠内侧的裂纹带则是重新拉坯时鼓肚了的铸流变形造成的。作为比较,在铸流的下半部看不见任何裂纹,因其下部铸坯支撑装置未经改动、辊距仍保持为255毫米。

这一结果验证了经常在文献中描述的试验,即在辊距大时,必须避免使铸坯突然停住,因为这会引起巨大的鼓肚,这样不仅会使铸坯质量恶化,而且还会导致铸坯粘住辊子、使辊子永久变形。在辊距小时,对设备的操作就没有必要进行这样的限制。

3. 铸坯变形的研究

除了鼓肚之外,支撑辊对中不良也能使固-液相界面的应变过大,从而导致形成内裂。为研究这些影响、用一个可调节的驱动辊来模拟辊子的对中不良,用液压缸把该驱动辊压进铸坯。

3.1. 试验的设定

如图7所示,该变形试验是在4号板坯连铸机的弧形段上部进行的。该处辊距是230毫米。在浇铸达到稳定状态之后,就把图7中指出的驱动辊压进铸坯约1分钟,

——或者用高的液压压力压向固定的档块,

——或者是用预先定好的一定的液压压力。

在后一种情况下、用差动变送器来测量变形量,

一次特殊试验所得的所承受载荷与所产生的铸坯变形量的关系也示于图7中。弧形段的外弧侧没作改变,所以仅仅是铸坯的一面受到压入。

3.2. 冶金结果

铸坯受可调节辊挤入所产生的结果是形成了如图8所示的内裂带,该图中用作硫印检查的纵向试样被可调节辊挤入9毫米。在铸速1.4米/分时,裂纹尖端离表面约59毫米。假定内部尖端的位置表示了挤入时的凝壳厚度,就可求得凝固系数是26毫米/分。

利用交错变化液压压力的方法研究了形成裂纹和挤入量的关系。在图9中以两个图表的形式给出了在一次连浇过程中进行试验的结果,相应地表示了裂纹密度和裂纹长度

与挤入量的关系。从这些试验中得出的结论是明显的：

——形成内裂纹的低限值在 1 到 2 毫米之间，

——裂纹密度随着铸坯挤入量的增加而增加，但在变形量 5 毫米左右时，也就达到了饱和程度。

——裂纹的平均长度也随铸坯压入量的增加而逐渐增加，甚至在挤入量大于 5 毫米后也是如此。

在高速板坯连铸中获得这些成果还是无双的，因为至今仅有的挤入试验是 Miyazaki 等人报导的在大方坯连铸机上进行的，其铸速也低，为 0.55 米/分（3）。比较他们的成果与本报告中的成果，必然会注意到两点主要的不同之处：

——Miyazaki 等人在挤入量达 2.8 毫米时也没观察到试验的低碳钢（0.17% C）产生裂纹，而在本研究中发现了临界值在 1 到 2 毫米之间。

——Miyazaki 等人声称裂纹的平均长度与变形量无关，而本报告的图 9 表明它们之间有明显的依存关系。

考虑到含碳 0.17% 的钢（3）裂纹敏感性要比含碳 0.05% 的钢（本报告）高，这些不同点只能说主要地是由于在浇铸速度上存在着巨大差异。

3.3. 理论上的思考

除了上面所叙述的结果之外，对于铸坯变形提出了一种新的基本见解。在评定纵断面的硫印图时，发现在每一种场合下，产生的裂纹带都超出了开始变形的范围。这一观察清楚地指明了在取掉辊子处之前相当距离（约 200—300 毫米）的地方就已产生了过度的拉伸应变。

为了证实这种说法，在变形试验中记录了其前方相邻的一个辊子的旋转情况，由此发现在变形过程中这个辊子停止转动。这表明这辊子已不和铸坯接触，以及铸坯在比两个辊子距离大的范围内由于移去辊子而产生了向内的弯曲。

至今一般都假定钢水静压力总是使得铸坯和相邻的两个辊子之间保持密切接触。因此，由于对中不良而引起的固—液相界面应变也是简单地按相邻两辊子间的弹性梁弯曲来进行理论计算（4）。新的试验明显地证明了这假设是完全错误的，因此通常使用的、对中不良时的辊距和变形量的关系式也深受怀疑。为了校正这些关系，就需要有一个更复杂的理论分析，它要考虑鼓肚、变形和材料非线性特性、特别是铸坯硬化的相互影响（5）。

4. 二次冷却的研究

因为二次冷却是影响铸坯内在和表面质量的一个非常重要的因素，因此它是连铸研究的一个持久的课题。该强烈影响的原因在于：

——首先，在高温下钢的机械性能和温度有着强烈的依赖关系，

——其次，如发生温度不均匀的情况，就要产生热应力。

4.1. 冶金观点

机械性能受温度的强烈影响(6)。因此凝壳抗外来载荷、如钢水静压力的能力,裂纹生成的敏感性都取决于凝壳内的温度分布。因而铸坯冷却是操作者影响铸坯质量的很有用的参数。尽管如此,不能误以为可用此手段来补偿连铸机的不良设计。

作为例证,在图10中比较了在工厂试验中所获得的、用两种不同冷却方式产生的固-液相界面应变量和相应的裂纹指数,在采用深冲钢的标准冷却方式时,板坯没有内裂纹,但如果转用适于微合金钢的冷却方式,就产生了密集度指数为0.2的内裂纹。裂纹可集中于在弧形段的下部生成,在该部这两种方式都不对铸坯直接冷却、但是A方式的强化冷却使得铸坯在连铸机的这一部位时表面温度较低,因而鼓肚较小。

现在,相应于传热、凝固和质量之间的基本关系已清楚地得到理介,在这方面发表了大量的工作成果。因此,已可利用理论模型来设计冷却系统(7.8)。设计步骤是首先要对每一组钢种规定冷却要点,其特征为一定的表面温度曲线,由此可以计算出所需的冷却强度。为达到这个目的,对每个区采用平均传热系数的整体热分析法就足够了,因为仅仅在比较长的范围内的温度变化才是重要的(图11)。

涉及到产生热应力,必须区别两种类型的温度变化:

——尤如在冷却区之间的过渡处铸坯产生复热那样的长范围温度变化产生热应力,其作用贯穿整个凝壳层,并在固-液相界面引起附加的拉伸应变。

——短范围的温度变化,如因用平喷嘴在一个辊距内产生的变化,其产生的热应力局限于在表面,但对凝固前沿没有影响。

为了证明后一个论点,用局部热分析法对短范围的温度变化的渗透深度进行了研究。研究成果的一个典型例子示于图11的下部。根据这些计算,在和辊子接触处温差是剧烈减小的,从表面的 80° 降至表面以下7.5毫米深处的 2° 。这结果证明了小范围的温度变化及其所产生的热应力都局限于表面。因此它们不影响内部质量,但是在分析表面质量问题,如纵裂和横裂形成时,则必须考虑到它们。

4.2. 气-水冷却

近几年来二次冷却的主要课题之一竟是一个旧主意的复兴,换言之即应用所谓喷雾冷却的气-水冷却系统。

对气——水冷却重又产生兴趣的动机是:

- 扩大喷水密度的控制范围;
- 获得比较均匀的冷却方式;
- 获得比较高的冷却效率、较少用水量;
- 可用直径比较大的喷嘴,因而减少堵塞,

对之期望的东西还更多(9),在该文中报导了防止表面纵裂的有益效果,该文还把气-水冷却称为提高连铸机出口处板坯表面温度以进行直接轧制的先决条件。

另一方面,也存在一些反对装设气-水冷却系统的争论:

——由于要两套管路和仪表、喷嘴价高和添加空压站，因此投资和生产费用都较高，

——在压缩空气供应出毛病时，冷却作用就不足。

因为关于应用喷雾冷却所发表的材料互相矛盾，因此重要的是要有第一手试验。七十年代中期，为西德 Klöckner Bremen 和加拿大 Sidbec Dosco 厂的连铸机装设气—水冷却系统作为二次冷却和/或机器冷却时，奥钢联获得了一些经验。在生产了一些时间以后，这两个厂里都用通常的水冷取代了气—水冷却系统，因为在质量和机器功能方面的改进不足以抵消所增加的费用。

同时，奥钢联进行了实验室试验，从喷水的均匀分布、冲击压力、传热等方面来改进喷嘴的功能，以使这种系统的潜在效益可为连铸生产接受。

为了进行工业生产规模的试验，已在奥钢联的 4 号板坯连铸机上安装了气—水冷却系统。至今的效果已经证实靠拉宽喷嘴的深度在喷雾冲击范围内的温度降已如预期的有了降低。至于冷却效率，气—水冷却系统在喷水比为 $0.25 \sim 0.50 \text{ l/kg}$ 时几乎和原来的水冷系统在 $0.30 \sim 0.70 \text{ l/kg}$ 时相等。到目前为止气—水冷却系统的主要好处似乎在于防止喷嘴堵塞而有较高的生产安全性和减少了用水量，这对于过渡状态是特别重要的。

5. 结论

在板坯连铸机上把铸流鼓肚作为铸速、冷却强度和辊距的函数进行了测量。测量的结果证实辊距具有决定性影响和证明了蠕变现象在研究铸流特性、特别是研究浇铸过渡状态时的重要性。

采用可调节的驱动辊模拟了支撑辊的对中不良。在高速铸造时，形成内裂纹的临界值相当低，约 2 毫米。试验表明，由于一个对中不良的辊子引起铸流变形，其范围要比相邻的辊子间距更大，还表明对中不良时辊距应变量有关的简单公式是不正确的。

有关铸流冷却的研究证实，仅是温度级和大范围的温度变化对内部质量才是重要的，因为由于个别的传热机理，如辊子接触和喷水引起的表面温度变化渗透的深度相当小。气—水冷却系统正在实验室和工厂试验研究中。

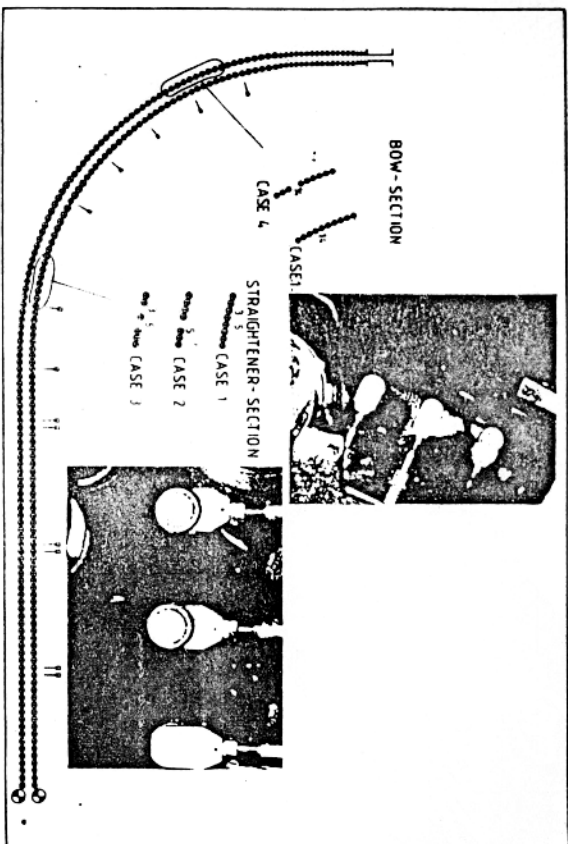


Fig. 1: Bulging Measurements at Slab Caster No. 4

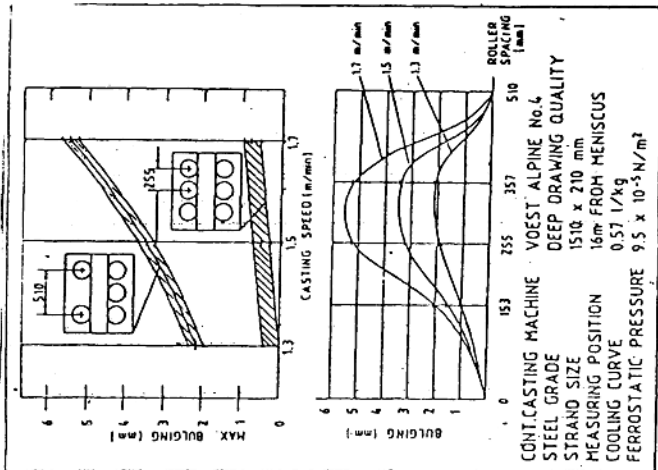


Fig. 3: Bulging Measurements at Steady State Conditions

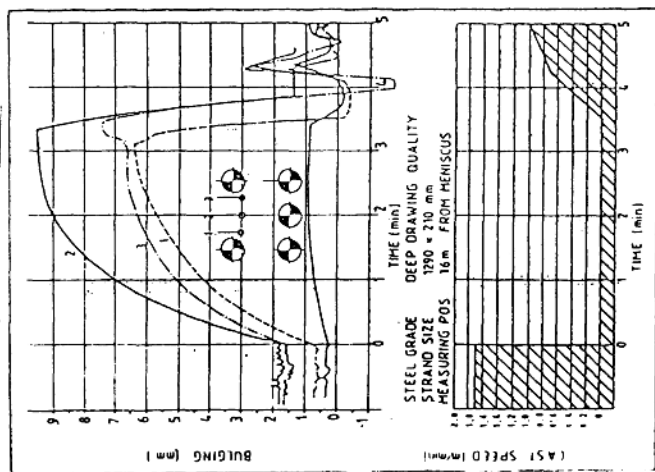


Fig. 4 Bulging during Strand Standstill

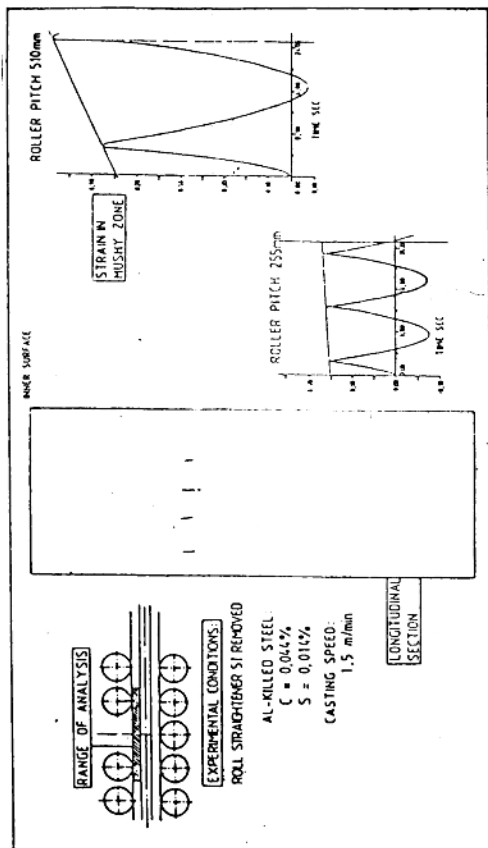


Fig. 5: Influence of Roller Pitch onto Internal Quality at Steady State Conditions

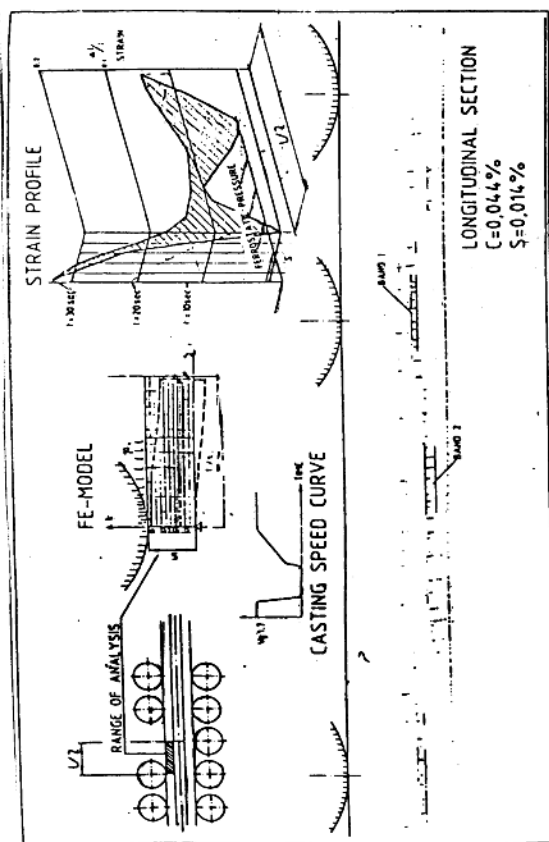


Fig. 6: Influence of Enlarged Roller Pick onto Internal Quality at Standstill