

差动调速小型连轧机组负荷分配的研究

——小型轧机技术改造研究之一

北京钢铁学院 苏逢西、蒋金梅、陶小同、马晓平·
北京红冶钢厂 陈书文、江树声、王桂兴、吴 申
山东冶金学院 苏逢荃

摘 要

本工作在分析 $\Phi 250\text{mm} \times 6$ 半连续小型轧机的综合测定试验资料的基础上,着重研究了它的负荷分布情况,明确了差速器损坏的主要原因,给出了强化差速器设计所必需的扭矩 M_B 、功率 N 等负荷参数并建立了角钢连轧的能耗模型。

一、前 言 [1][2]

我国现有小型轧机约300套,分布于全国各地,布局较好。横列式轧机占绝大多数,产量达746万吨,约占钢材总产量的26.6%。但轧机形式落后,单机产量低,劳动强度大,产品规格比较单调。技术改造的潜力很大。采用连轧工艺可以加大坯料断面与单重,从而可以减少中间开坯次数,节约能源,减少切头尾损失,提高成材率,降低成本,改善劳动条件。因此采用连轧技术改造我国现有的老轧机,是技术改造、提高经济效益、逐步实现现代化的有效方案之一。

为了充份利用旧有设备、节省投资、缩短改造时间,北京红冶钢厂采用差动调速技术将 $\phi 300\text{mm} \times 2 / \phi 250\text{mm} \times 4 / \phi 300\text{mm} \times 1$ 横列式小型轧机改建成粗轧为 $\phi 300\text{mm} \times 2$ 、精轧为 $\phi 250\text{mm} \times 5$ 与 $\phi 300\text{mm} \times 1$ 的半连轧机组,成品轧制速度可达 $6.33\text{M}/\text{sec}$ 。不设立辊机架,采用扭转导板实现翻钢立轧。旧牌坊不更换;为了稳定连轧过程与保证产品精度,将胶木瓦改造为四列短圆柱滚动轴承;轴向调整装置改造为在一侧用正反丝扣控制的机构。轧辊传动机构为“万向接轴—梅花套筒”。主要产品为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 角钢以及厚 $6 \sim 19\text{mm}$ 、宽 $25 \sim 60\text{mm}$ 的扁钢,钢种有普碳、碳工、合结等,共八十多个品种规格。坯料为 $60^2\text{mm} \times 1.2 \sim 2\text{M}$ 、 $68^2\text{mm} \times 2\text{M}$ 与 $75^2\text{mm} \times 2\text{M}$ 三种。粗轧4~6个道次,精轧6个道次。精轧机组扁钢孔型系统为“平—平—立—平—立—平”,角钢孔型系统为:切分孔(K6、K5),上沿线不变的蝶式孔(K4、K3、K2)与开口或半开口式成品孔(K1)。81年投产后,经过一年多的技术适应,82年生产与改造前80年相比 [3],年综合合格率

· 参加本工作的还有王晓彬、刘玉海、刘昕悟、李子豪、吴伊兰及覃威等。

从98.87%提高到99.02%，角钢合格率从98.89%提高到99.45%，年成材率由94.65%提高到95.23%，工伤频率由改造前的5.8~1.8%下降为1.5%。多数规格班产都有不同程度提高。82年消耗降低获得增利20万元。这套第一次用于小型连轧的差动调速机组，通过两年的连续生产考验，也暴露出不少问题。主要是：i 差速器齿面磨损严重并多次发生整齿从齿根处断裂；差动调速系统运行噪音大。ii 连轧操纵调整技术不熟练，换辊、换产品之后的轧机调整时间长，粗计轧机实际作业率只有50~55%。iii 产品尺寸不够稳定，沿长度上成品尺寸高频率地波动，并具有“大头、大尾”现象。

为了对该机组工作性能进行科学的标定，提供强化差速器所需的参数，进一步完善并开发差动调速小型连轧技术，本工作在分析综合测试资料的基础上，着重研究连轧机组的负荷分配情况并建立能耗与轧制力矩的数学模型。

二、功率、转矩与能耗的测定结果与分析

差动调速系统的简图与性能参数如图1、表1所示。这是一种双电机差动调速技术，

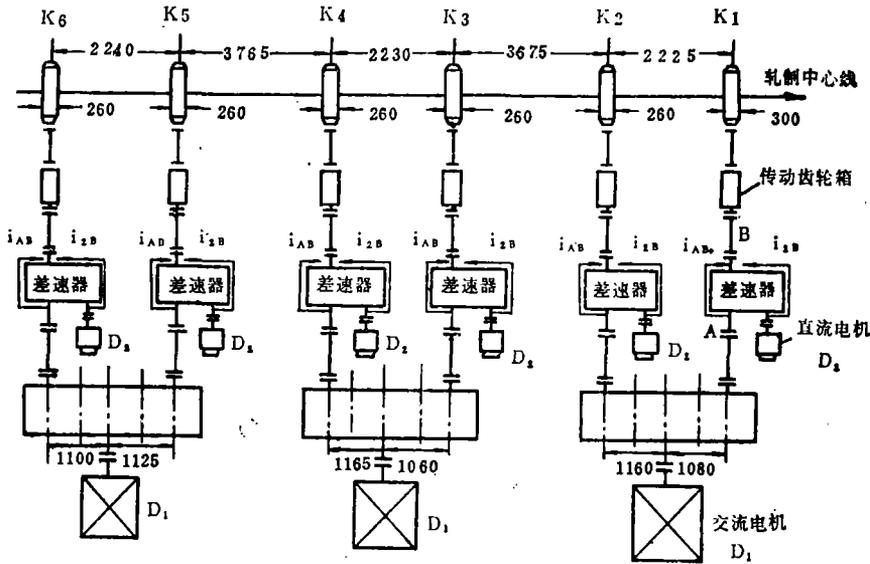


图1 差动调速连轧机组

即用小功率直流电机 D_2 调速，转速经差速器与交流主电机 D_1 转速合成后拖动轧辊。K2、K1机架的 D_1 有异步电机与异步机同步化两种运行方式；K6、K5以及K4、K3机架均为异步电机拖动。 D_2 拖动系统为“电机放大机——发电机——电动机”形式，电控上仅采用电压闭环，特性较软。差速器结构如图2所示，是二个自由度的周转轮系，三个基本构件是太阳轮A、B与转架C，a、b为行星轮，各有四个。

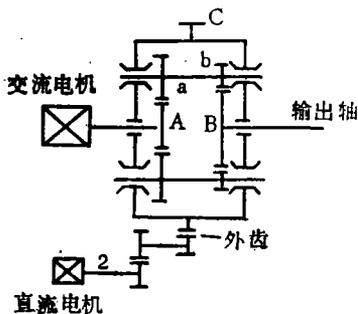


图2 外齿啮合的2K—H型差速器

采用了“从实测电机功率 N 与转速 n 推求扭矩 M 与能耗 E ”的方法。按两瓦表法原理将FS—15型三相不

表1 差动调速系统基本参数

项目		参数	架次	K6	K5	K4	K3	K2	K1
交流电机	D ₁	功率(kw)	转速(r.p.m)	210	270	264	360	366	494
				480	625	860			
直流电机	D ₂	功率(KW)	转速(r.p.m)	60	60	60	60	60	100
				1000	1000	1000	1000	1000	1000
分速箱速比		i _{1A}		2.25	1.75	1.946	1.405	1/2.054	1/2.375
差速器速比		i _{1B}		2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04
		i _{2B}		23.16	23.16	23.16	23.16	23.16	15.2
轧	基	速	名义直径(mm)	260	260	260	260	260	300
			r.p.m	120	166	186	257	292	338
辊	调	速	r.p.s	2.15	2.77	3.1	4.28	4.87	5.36
			m/sec	1.75	2.25	2.53	3.50	3.98	5.30
			r.p.m	86~172	122~209	142~229	214~301	248~335	273~404
			r.p.s	1.43~2.87	2.05~3.48	2.38~3.82	3.57~5	4.15~5.58	4.53~4.73
速	幅	m/sec	1.17~2.35	1.67~2.85	1.94~3.12	2.91~4.09	3.39~4.57	4.27~6.33	
		幅度(%)	33.5	26.1	23.2	16.8	14.8	19.4	

平衡有功功率变送器中的二个测功单元接成三相二元件功率测量线路。二个单相功率元件的输入电压经电压互感器(变比60)联接D₁的线电压U_{AB}与U_{CB};其输入电流分别取自相电流I_A与I_C的电流互感器(对K6—5、K4—3与K2—1的变比分别为30、40与60);二个测量元件的直流输出电流串接示波器振子自动记录。采用纯电阻性负载标定了功率变送器,标定曲线为线性的,灵敏度K=0.01174KW/mm。在测量N_{D1}的同时,测量了D₂电枢回路电流I与电压U、轧制力P、轧辊转速n_B、轧件温度,并切取了各道次轧件的小样,用称重法计算各道次轧件的截面积Fi与延伸系数μ_i。共进行了四次测定,其生产条件如表2所示。

图3~4为连轧5×50²mm与4×40²mm角钢实测N·I·P与n_B等参数的典型示波照象。可以看出,直流马达拖动系统的响应速度不高,咬钢与脱尾阶段电枢电流I的过渡过程约0.3~0.45秒。从咬入与脱尾后I值的变动可以判定K6到K1机架的连轧关系基本是“微堆—微堆—微拉—微堆—微堆”。整个连轧机组形成了一个相互影响的系统。取决于辊缝S与转速n_B的设定值,第i机架咬钢之后与第i+1机架要形成一定的连轧关系,此种轧制过程状态变化的“扰动”要逆轧制方向地传递到i+2, i+3, …等各个机架上,使其运动学条件、变形条件与力能参数发生变化;越是邻近的机架受到影响的程度就越大;这种干扰必然影响着连轧动态过程的稳定性以及成品尺寸精度。同样第i机架抛钢后使i与i+1架间的连轧关系消失,这个状态变化的“扰动”要顺轧制方向地传递到i-1, i-2, …等各个机架上。受限于坯料的单重,在轧制5°(4°)角钢的同一瞬间最多可使三(四)个机架构成连轧关系。通过轧件除去传递扰动与调节作用之外,还会在机架之间传递能量。对于任一机架,根据能量守恒定律都可写成

表2 四次测定试验的生产条件

成品	坯料 F(mm ²)×L(m)	钢种	化学成分(%)		轧制线辊径(mm)						延伸系数				V _{HI} (m/sec)	轧件t°(c) (AKG)		
			C	Mn	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	μ ₁	μ ₂			μ ₃	μ ₄
5×50 ²	75 ² ×1.8~2	BY2F BY3F			312	276	278	275	269	272	1.19	1.34	1.43	1.20	1.09	1.33	6.4	960~1100
5×40 ²		BY2F	0.12	0.37	315.5	273.5	274	274.5	274	267	1.36	1.21	1.23	1.21	1.24	1.21	6.4	920~1080
4×40 ²	60 ² ×1.8~2	BY3F	0.2~0.19	0.41~0.45	315.5	273.5	274	274.5	274	267	1.51	1.27	1.28	1.14	1.27	1.22	6.7	920~1070
4×40 ²		BY3F BY2F	0.18 0.15~0.13	0.4 0.49~0.44	312	265	266.4	263.8	261.4	217.8	1.34	1.41	1.21	1.19	1.23	1.17	6.7~6.8	910~1010 880~1010

$$N = N_p + N_f + N_{qH} - N_{qh}$$

式中 N_p 为金属变形的功率消耗， N_f 为摩擦消耗的功率， N_{qh} 、 N_{qH} 为前、后张（推）力功率， N 为传动轧辊所施加的功率。对于由 n 个机架组成、无卷取机与开卷机的连轧机组有

$$\sum_{i=1}^n (N_{qH_i} - N_{qh_i}) = \sum_{i=1}^n [(N_{p_i} + N_{f_i}) - N_i] = 0$$

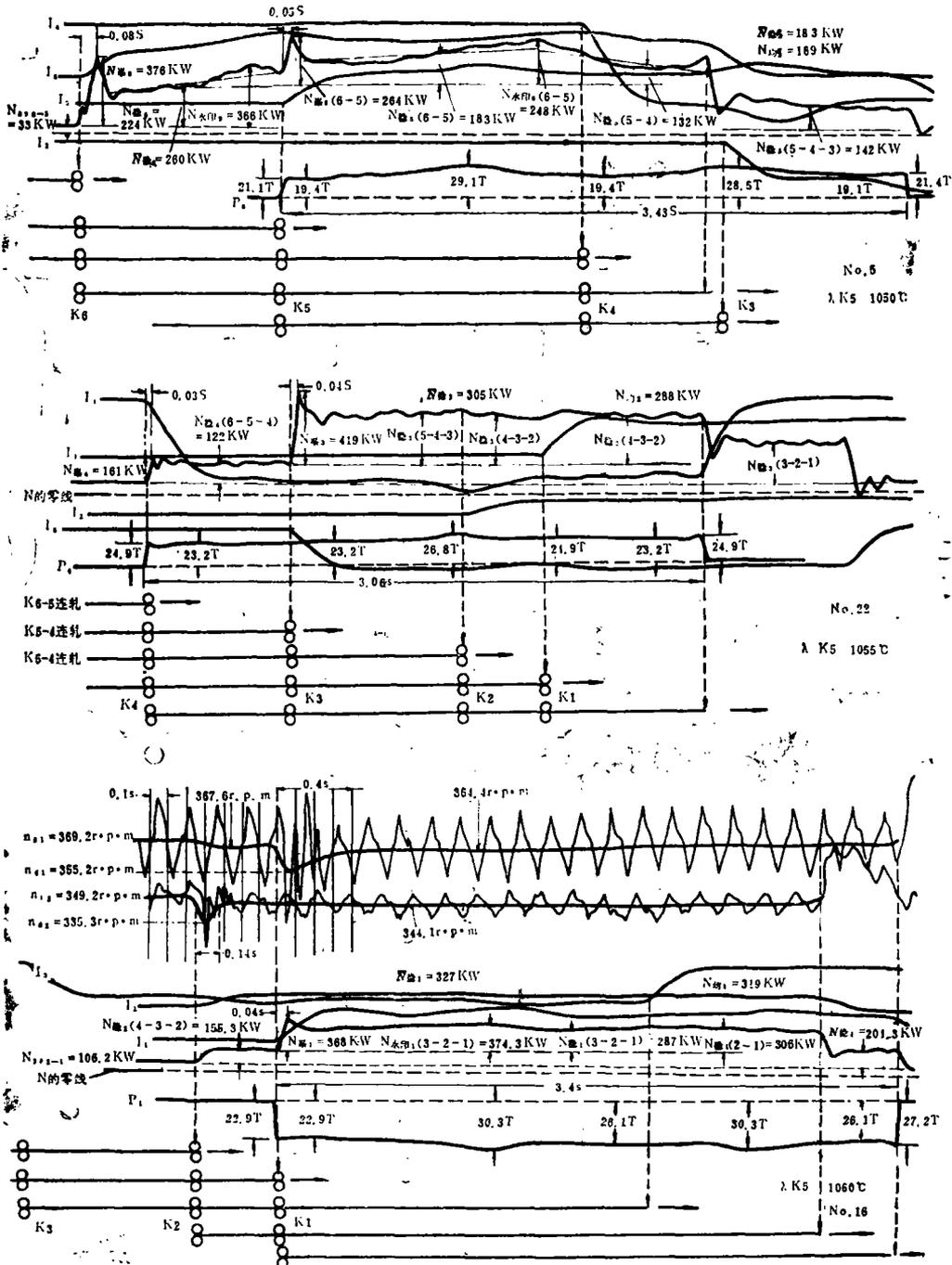


图 3 连轧 5×50^2 mm角钢交流马达功率 N 、直流马达电流 I 、轧制力 p 与 ωp 的示波照象

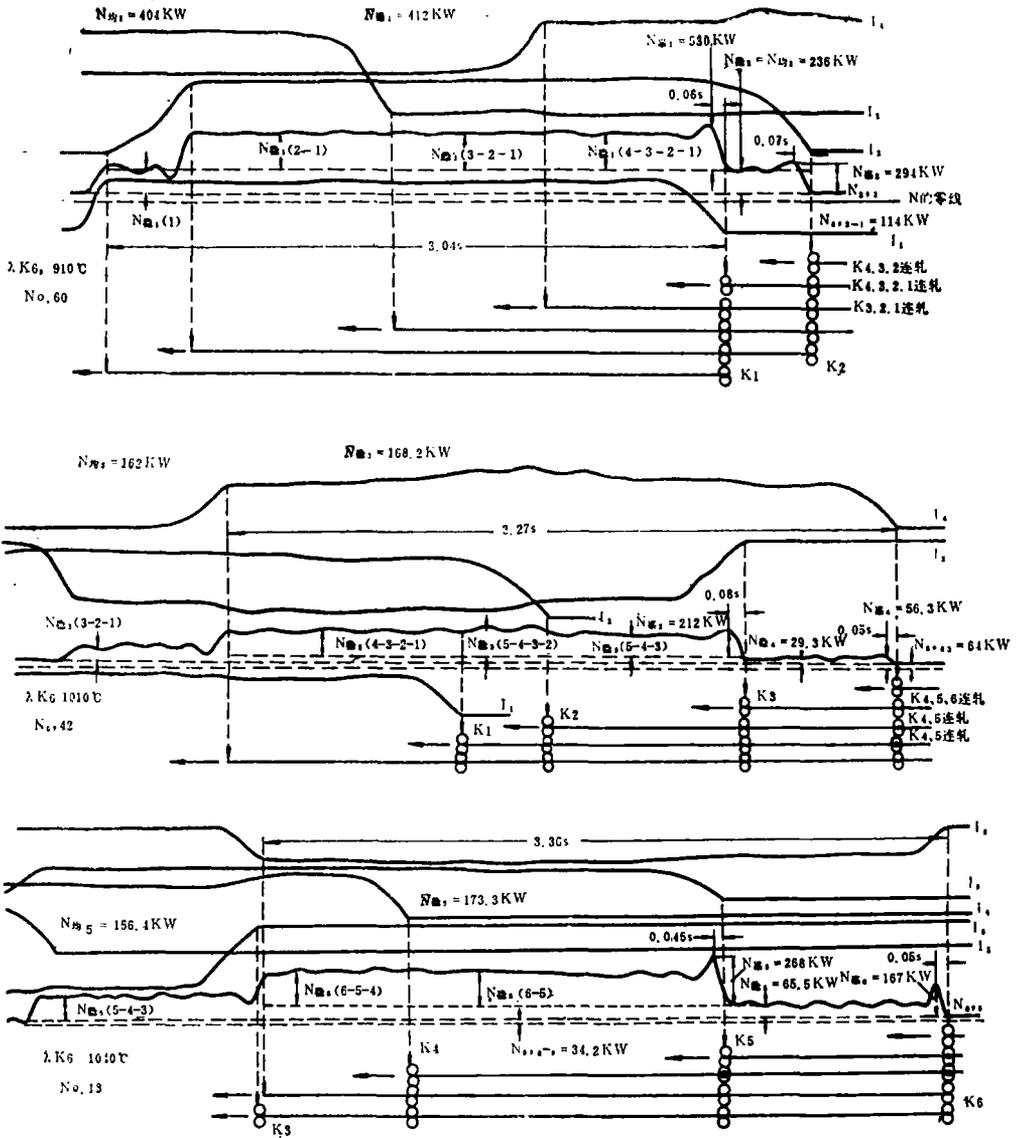


图 4 连轧 4×40^2 mm 角钢交流马达功率 N 与直流马达电流 I 示波现象

说明了各机架间的拉堆关系只起传递能量的作用，并不产生与消耗能量。这种能量转移的现象使各机架差速器的负载扭矩随机架间的连轧关系而变化，后张力与前堆力会使其扭矩增加，而后推力与前张力则使其扭矩减小。

根据以上分析并考虑差速器三轴间的力矩关系 [4] 为

$$M_B = i_{AB} M_A = i_{2B} M_2$$

我们按框图 5 从实测 N_i 推求各架差速器 λ 、出轴扭矩 M_{A1} 与 M_{B1} 。以图 4 为例， $N_{均6}$ (即 $N_{均6}$) 是 K6 自由轧制状态的功率值， $\bar{N}_{均5}$ 是 K5 机架、K6—K5 与 K6—K5—K4 二种连轧状态下功率的加权平均值， $N_{均5}$ 是 $N_{均5}(6-5)$ 、 $N_{均5}(6-5-4)$ 与 $N_{均5}(5-4-3)$ 的加权平均值。同样处理， $N_{均4}$ 是 K6—K5—K4 连轧时 K4 的功率值， $\bar{N}_{均3}$ 是 $N_{均3}(5-4-3)$ 、 $N_{均3}$ 是 $(5-4-3-2)$ 与 $N_{均3}(4-3-2-1)$ 的加权平均值， $N_{均3}$ 是 $N_{均3}(5-4-3)$ 、

$N_{\text{稳}3}$ (5-4-3-2)、 $N_{\text{稳}3}$ (4-3-2-1) 与 $N_{\text{稳}3}$ (3-2-1) 的加权平均值。 $N_{\text{稳}2}$ 是 $K^4-K3-K2$ 连轧时的功率值； $\bar{N}_{\text{稳}1}$ 是 $N_{\text{稳}1}$ (4-3-2-1)、 $N_{\text{稳}1}$ (3-2-1) 与 $N_{\text{稳}1}$ (2-1) 的加权均值； $N_{\text{均}1}$ 则是 $N_{\text{稳}1}$ (4-3-2-1)、 $N_{\text{稳}1}$ (3-2-1)、 $N_{\text{稳}1}$ (2-1) 与 $N_{\text{稳}1}$ (1) 的加权平均值。由于 $\bar{N}_{\text{稳}i} > N_{\text{均}i}$ ，为了校核减速器的负载，取 $\bar{N}_{\text{稳}i}$ 作为第 i 机架的稳态值，根据它推定 M_{A1} 与 M_{B1} 并建立能耗模型。按图 5 第 3 框决定各架空转功率 N_0 时，假设第 i 与 $i+1$ 架的空转力矩相等。

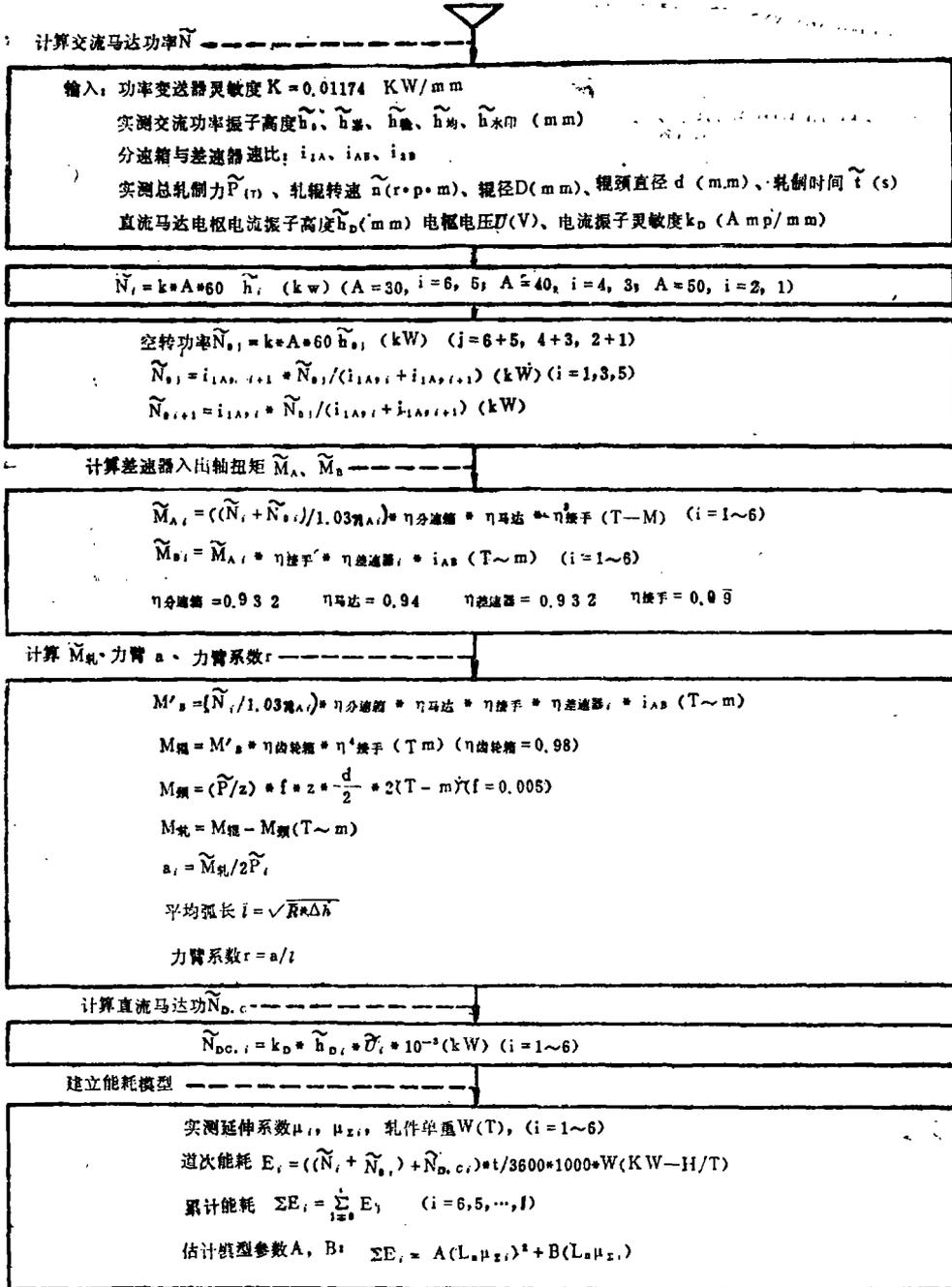


图 5 整理实测功率、扭矩、能耗的计算流程

按框图 5 计算的各架差速器负载扭矩的分配结果如图 6~9 所示, 图中温度均为入 K6 的轧件 $t^{\circ}(\text{C})$ 。分析如下:

(1) 各机架功率与扭矩的咬钢峰值均大于稳速阶段的数值, $M_{B\text{峰}}/M_{B\text{稳}}$ 值有随负载增加而加大的趋势。对于 5° 与 4° 角钢, $M_{B\text{峰}}/M_{B\text{稳}}$ 值分别约为 $1.15 \sim 1.65$ 与 $1.05 \sim 1.67$ 。出现咬钢峰值的原因是多方面的, 例如: 轧件前端温度低, 咬钢时的 $P_{\text{峰}}$ 值高于稳速段 P 值约 10% (图 3); 轧件咬入变形区时接触点处的上下辊径与线速度不相等, 会出现空转的二个辊分别被传动的状态, 变为咬入时通过轧件的联系而造成的大直径轧辊传动小直径轧辊的状态, 因而形成冲击载荷 $M_{B\text{峰}}$; 轧件头部尺寸偏大, 机架受力后弹跳变形的滞后等。从图 3 可以看出, $N_{\text{峰}}$ 值一般出现在动态速降阶段。这时由于惯性的作用, 传动的机械系统要放出动能以帮助马达做功, 因此实际的负载扭矩值会大于从 $N_{\text{峰}}$ 推算得到的 $M_{\text{峰}}$ 值。以上情况说明了该机组差速器是处于“传送较大功率的负载、有较大的冲击载荷且冲击频繁”的工作状态, 估计冲击次数可达 2000 次/班; 因此设计差速器时必须正确地选定安全系数, 以保证它的安全运转。

(2) 轧件温度对负载扭矩 M_B 值影响很大。以图 9 的 4° 角钢为例, 入 K6 的轧件温度从 1090°C 降到 910°C 时, K6~K3 机架的 M_B 值大约分别上升 53%、33%、19% 与 44%; 对 K2~K1 机架, 入 K6 轧件温度从 1010°C 降到 910°C 时, M_B 值各上升约 8% 与 12%。

在轧制 5° 角钢时, 由于加热炉能力薄弱, 炉底水管在轧件上形成的黑水印对 N 、 P 与 M_B 值有明显的影响。如图 3 所示, $N_{\text{水印6}}$ 大于 $N_{\text{稳6}}$ 约 60%, $N_{\text{水印5}}$ 大于 $N_{\text{稳5}}$ 约 35%, $P_{\text{水印5}}$ 大于 $P_{\text{稳5}}$ 约 50%; 随着轧制变形后轧件变长, 沿轧件长度上温度分布比较均匀, 水印的影响程度减弱, $N_{\text{水印1}}$ 大于 $N_{\text{稳1}}$ 约 14%, $P_{\text{水印1}}$ 大于 $P_{\text{稳1}}$ 约 16%。

上述情况说明, 提高加热炉能力, 保证正常轧制温度 (例如入 K6 轧件 t° 不应 $< 1000^{\circ}\text{C}$), 对于降低差速器负载、提高它的使用寿命具有重要意义。

(3) 各机架差速器的负载分配严重不均, 造成的主要原因是轧辊孔型设计的变形量分配不够合理以及轧机调整不当。以大规格产品 5° 角钢 (图 6) 为例, K6 与 K3 机架变形量大, μ 值分别为 1.33 与 1.43。入 K6 温度 $1030 \sim 1060^{\circ}\text{C}$ 时, $M_{A\text{稳6}} = 0.84T - M$; $M_{A\text{水印6}} = 1.13T - M$, $M_{A\text{峰6}} = 1.16T - M$; $M_{A\text{峰3}} = 0.77T - M$; 温度 930°C 时, $M_{A\text{稳3}} = 0.71T - M$, $M_{A\text{水印3}} = 0.85T - M$, $M_{A\text{峰3}} = 1.06T - M$ 。原设计三组行星轮、按接触强度与抗弯强度确定的允许扭矩 $M_{A\text{允}}$ 仅为 $0.7T - M$ [5]。所以在 K6 的稳态与咬钢阶段以及 K3 的咬钢阶段, 这二架差速器的实际负载均超过允许值。即便轧制较小规格产品, 在轧制低温钢与 μ 值分配不当时, 差速器也会超载。如: $5 \times 40^2 \text{mm}$ 角钢 (图 7)、入 K6 轧件温度 890°C 时, $M_{A\text{峰6}} = 0.89T - M$, $M_{A\text{峰5}} = 1.12T - M$, $M_{A\text{稳5}} = 0.71T - M$, $M_{A\text{峰3}} = 0.76T - M$; $t^{\circ} = 830^{\circ}\text{C}$ 时, $M_{A\text{峰1}} = 0.728T - M$ 。轧制 $4 \times 40^2 \text{mm}$ 角钢 (图 8), $t^{\circ} = 990^{\circ}\text{C}$ 时, $M_{A\text{峰5}} = 0.73T - M$; $900 \sim 910^{\circ}\text{C}$ 时, $M_{A\text{峰6}} = 0.7T - M$, $M_{A\text{峰5}} = 1.02T - M$ 。如果再考虑到意外事故, 则差速器的设计强度更显得过小。这是差速器处于超载运行状态、损坏严重的主要原因。

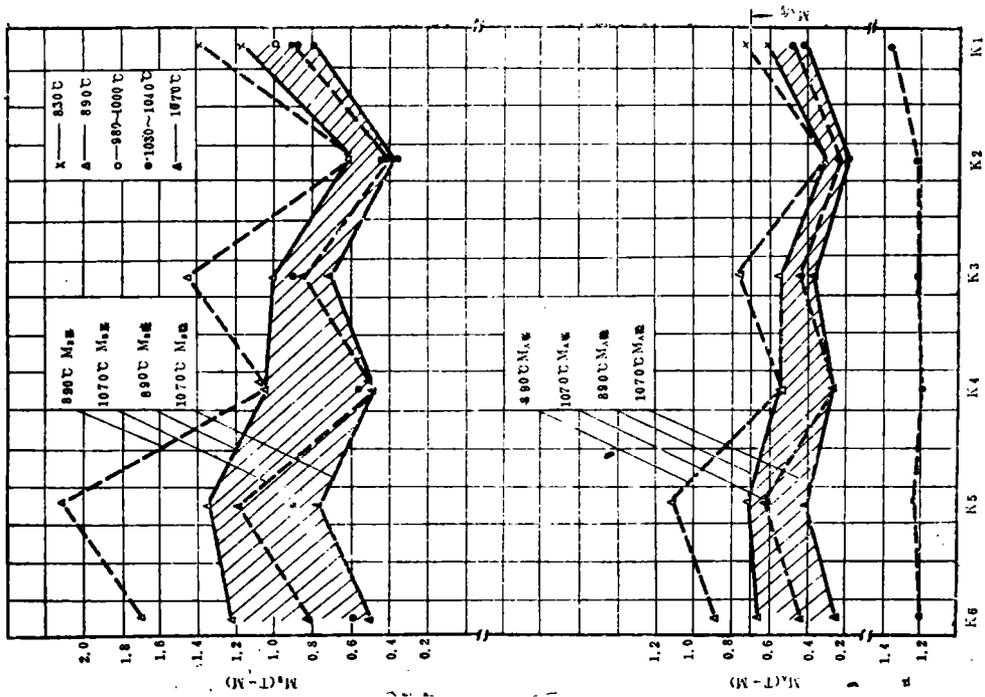


图 7 5×40mm角钢实测 M_A 、 M_B 值

14

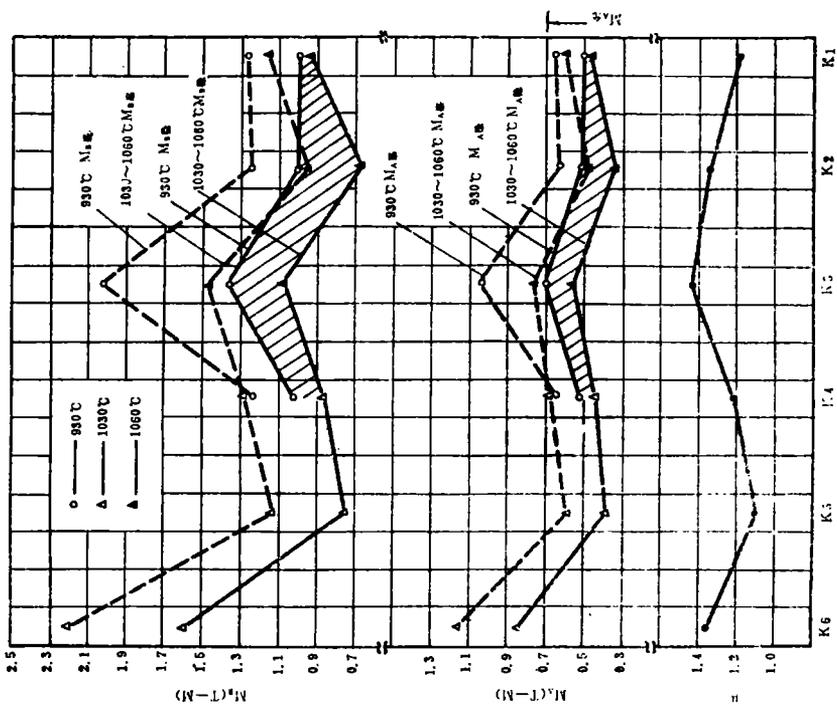


图 6 5×50mm角钢实测 M_A 、 M_B 值

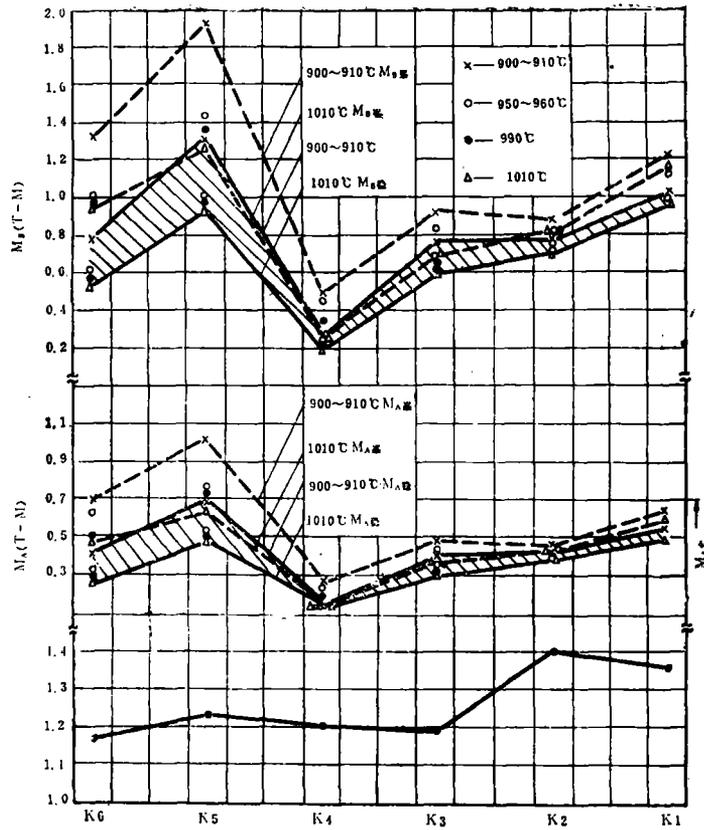


图 8 4×40^2 mm角钢实测 M_A 、 M_B 值

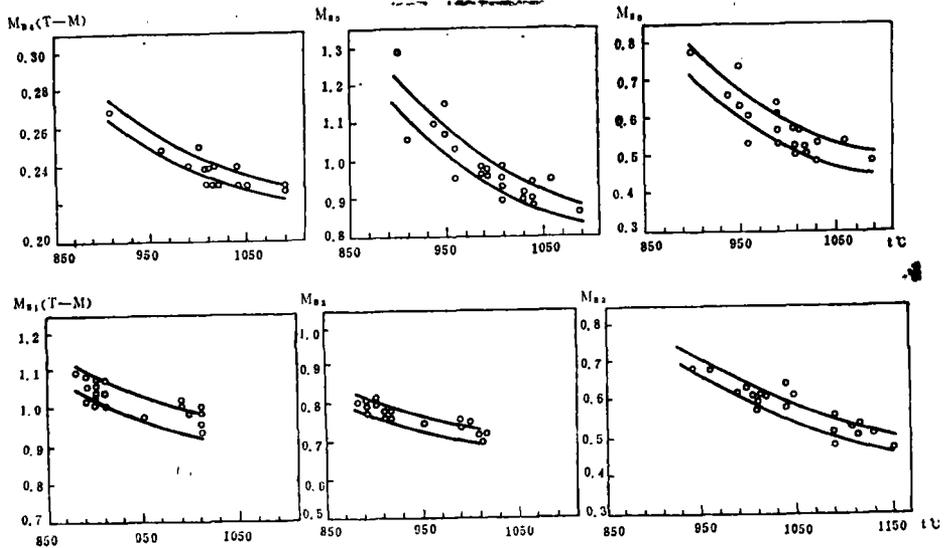


图 9 入K6轧件温度对 M_B 值的影响 (4×40^2 mm角钢)

三、角钢连轧轧制力矩计算与能耗模型

进一步提高该连轧机组的生产控制水平，必需建立预报机电设备负载的轧制力矩 $M_{\text{轧}}$ 与能耗模型。采用以下两种方案建立这些模型：

(1) 根据实测的 \tilde{P} 与 \tilde{M}_B 值，将各道次孔型（轧件）简化成矩形，按图5中第5框决定力臂长度 a 与力臂系数 r ，结果如图10所示；即

$$M_{\text{轧}} = 2 \cdot P \cdot \bar{l} \cdot r$$

可以看出轧件 t° 对 r 值无显著影响。

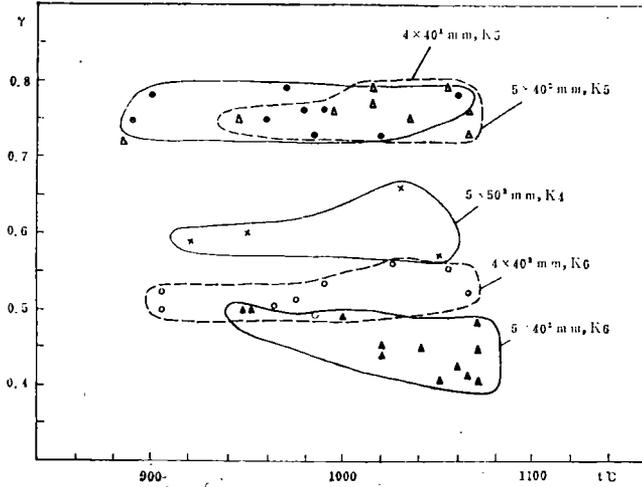


图 10 5 *、4 *角钢切分孔、蝶式孔 r 间接量测值

(2) 将累计延伸系数 ($\ln \mu \Sigma_i$) 作为主要自变量，采用多项式

$$\Sigma E_i = A (\ln \mu \Sigma_i)^2 + B (\ln \mu \Sigma_i) \quad (1)$$

的方程结构，按图5中第7、8框建立角钢连轧能耗 $E(\text{KW}-\text{H}/\text{T})$ 的模型。结果如表3与图11所示。

表3 能耗模型参数A、B的估计值

产品规格 (mm)	A	B	λ K6 轧件温度 ($^\circ\text{C}$)
5 × 50 ² 角钢	1.852	11.226	1030~1060
5 × 40 ² 角钢	2.561	14.119	920~950
	2.528	10.801	1030~1070
4 × 40 ² 角钢	3.043	14.154	900~910
	4.306	10.619	950~960
	4.729	9.845	990
	4.691	9.142	1010

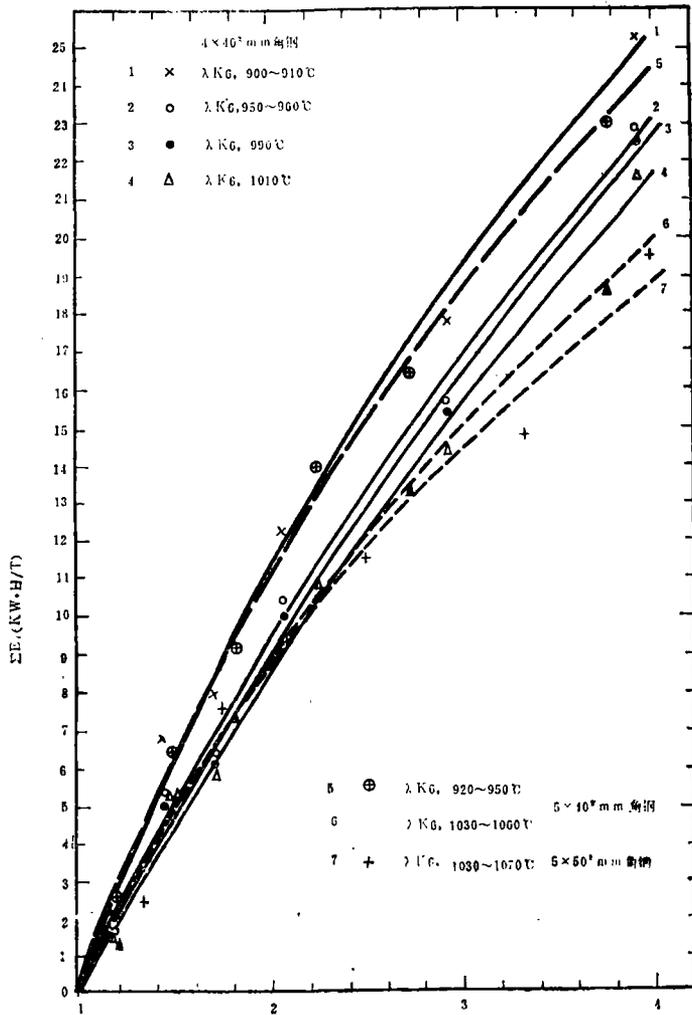


图 11 5*、4*角钢连轧能耗模型

四、结 束 语

1.北京红冶钢厂采用电机差动调速的连轧技术，将原横列式 $\phi 250\text{mm}$ 小型轧机改造成半连续机组，取得了基本成功的经验。进一步增大差速器的强度，增大坯重强化加热与后道工序能力，肯定会进一步发挥小型型钢连轧技术的优越性，获得更高的经济效益。

2.差速器处于传输负载大、有较大冲击载荷且冲击频繁的工作状态。由于设计强度薄弱，各个道次轧制变形量分布不合理而造成的负荷分配不均，齿轮啮合的润滑系统不够完善，以及轧制低温钢与意外事故等原因，使差速器齿面磨损比较严重并且多次发生整齿断裂现象。可以认为是一种辗击破坏的机理。为了完善差动调速连轧技术，应在改善差速器结构、强化设计、降低运行噪音的同时，采用规程优化的方法，按等负荷的目标

$$\left(\frac{M_{B\text{允}} - M_{B\text{实}}}{M_{B\text{允}}} \right) = \text{常数}, \quad (i = 1 \sim 6)$$

或
$$f_i = \min \left\{ \frac{M_{B允} - M_{B实}}{M_{B允}}, \frac{P_{允} - P_{实}}{P_{允}} \right\} = \text{常数}, \quad (i = 1 \sim 6)$$

进行轧辊孔型设计。

3. 轧件温度对差速器的负载扭矩 M_B 与轧制力 P 的影响很大；入K6轧件温度从1090°C降到910°C时，稳态的 M_B 值可增大20~50%；轧件明显黑水印处的 $M_{B水印}$ 、 $P_{水印}$ 值可较高温部位高50%。因此强化加热能力并均衡轧制节奏，保持均匀、一定的轧件温度，对于差速器的安全运转与稳定轧制过程有着重要意义；特别对于大规格产品。

4. 式(1)与表5给出的能耗模型可以用于轧辊孔型设计变形量 (μ) 分配的优化计算，以预报传动系统的负载力矩与主马达的功率。

5. 电机差动调速的连轧技术可以作为我国小型轧机技术改造的方案之一。为了进一步完善型钢连轧技术，应开发轧辊孔型设计的优化方法、s—n设定系统、连轧流量控制系统以及稳定可靠的检测仪表。

参 考 文 献

- [1] 北京红冶钢厂编，《小型角钢、扁钢连轧生产技术1、2》，内部资料，1982年。
- [2] 北京红冶钢厂编，《型钢（扁、角）连轧技术讲义》，内部资料，1981年。
- [3] 北京红冶钢厂经济计划科，“一九八二年生产经营情况统计资料汇编”，内部资料，一九八三年二月
- [4] 包头钢铁设计研究院科研处编，“差动调速原理（1）”，全国中小型轧机改造学术会议论文，1982年3月。
- [5] 周福亮，《齿轮差速器及差动调速技术》，河北人民出版社，1981年石家庄。

A study of Load Distribution of Semi—Continuous Bar Mill By Differential Dual Drive

Su Fengxi, Jiang Jinmei, Chen shuwen,
Jiang shusheng, Wan guixin, Su Feng che

Abstract

Based on the investigation of experimental data in the differential dual drive semi—continuous bar mill $\phi 250\text{mm} \times 6$, the following works have been studied,

- 1, The D. D. D technique may be one effective way in reforming the old rolling mill in our country.
- 2, The load parameters which are needed for reinforcing the machinery design of the differential case have been proposed.
- 3, The rolling torque and power mathematical model for steel angles have been proposed.

It is denoted that the optimal roll pass design, the mill set-up system and the flow control system should be studied in order to further develop the continuous shape rolling technique.