

第十九章 軋鋼機中力的影響及主要機列基本

零件和機械的計算

作用於軋鋼機軋輥上的力

軋製時表示軋件變形過程和形狀變化的數值

軋件通過軋鋼機的軋輥間時，爲了表明軋件本身的變形過程和形狀變化，通常使用下列的數值。

線壓縮量或絕對壓縮量

$$\Delta h = h_0 - h_1 \text{ 公厘,}$$

式中 h_0 和 h_1 ——軋製前後軋件截面高度。

相對壓縮量通常以百分數表示，

$$\frac{\Delta h}{h_0} 100\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} 100\%$$

延伸

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{Q_0}{Q_1},$$

式中 l_0 和 l_1 , Q_0 和 Q_1 ——軋製前後軋件長度和截面面積。每軋製一道平均延伸等於 $\lambda = 1.1 \sim 1.6$ ，而在某些情況下高度壓縮時，延伸達到 $2 \sim 2.5$ 。

經過軋輥中心線的平面與通過 A 點的半徑(圖 1)之間所形成的嚙入角 α ，按下式計算：

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{2r}$$

或

$$\sin \frac{\alpha}{2} \approx 0.5 \sqrt{\frac{\Delta h}{r}},$$

式中 r ——軋輥半徑。

爲了保證軋件能進入軋輥，必須使嚙入角不大於摩擦角，

或 $\tan \alpha \leq \mu_s$,

式中 μ_s ——軋件與軋輥間的摩擦係數。表 8 中所示爲最常用的最大嚙入角。

接觸弧 AB (圖 1) 確定軋輥和軋件接觸的區域，這弧的長度通常按下式計算：

$$l = \sqrt{r \Delta h}.$$

前滑 s 表示軋件出軋速度大於軋輥的圓周速度，並用下列的比值表示

$$s = \frac{v_1 - v_R}{v_R},$$

式中 v_1 ——軋件出軋輥時的速度， v_R ——軋輥的圓

周速度。

用於計算前滑的公式：

$$s \approx \frac{r}{h_1} \gamma^2,$$

式中 γ ——中性角或稱臨角(圖 1)，所指示的中性截面位置，在此位置軋件運動速度等於軋輥圓周速度水平方向的成分。

角 γ 由下列方程式求得[12]

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2\mu}.$$

假如當軋件進入軋輥或出自軋輥時受到張力，則中性角按下列方程式確定[19]：

$$\sin \gamma = \frac{h_1}{\sqrt{r \Delta h}} \left(\frac{h_R}{h_1} - 1 \right);$$

$$\frac{h_R}{h_1} = \left\{ \frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0 \delta - 1)(\xi_1 \delta + 1) \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\xi_1 \delta + 1} \right\} \frac{1}{\delta};$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{1.15 k_1}; \quad \xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{1.15 k_1};$$

$$\delta = 2\mu \sqrt{\frac{r}{\Delta h}},$$

式中 k_1 ——單向張力下的塑性抗力(屈服點); σ_0 和 σ_1 ——軋件進入軋輥和出自軋輥時由其張力在軋件內引起的張應力。

當軋件在軋輥間通過時軋件的寬度

$$\Delta b = b_1 - b_0,$$

式中 b_0 和 b_1 ——軋製前後軋件截面的寬度。

此數值視許多因素而定，理論上僅能引用下列三個經驗公式中之一來暫定其數值：

$$1) \Delta b = C l \frac{\Delta h}{h_0}$$

$$= C \frac{\Delta h}{h_0} \sqrt{r \Delta h},$$

式中 C ——係數，視軋件性質和溫度而不同(參看表 1)；

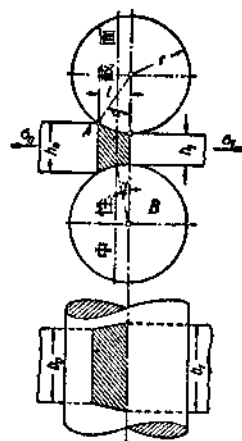


圖 1 軋件在軋輥間的變形圖。

$$2) \quad \Delta b = \frac{\Delta h}{b} \cdot \frac{1}{\frac{r}{h_0}}$$

$$3) \quad b_1 = -2m(h_0 + h_1) \frac{l}{b_0} + \sqrt{\left[2m(h_0 + h_1) \frac{l}{b_0}\right]^2 + 4m'(3h_0 - h_1) + b_0^2},$$

式中

$$m = \frac{1.6\mu l - 1.2(h_0 - h_1)}{h_0 + h_1}; \quad l = \sqrt{r \Delta h};$$

μ ——軋件和軋輥間的摩擦係數[26]。

表 1

軋件	軋製溫度(°C)	係數 C
低碳鋼	1000~1150	0.31~0.35
鋼	700~800	0.36
鋁	450	0.45
鉛	20	0.33

軋件的塑性變形和應力

當塑性變形時，應力超過彈性極限，則不再遵守古克定律(Закон Гука)，此種金屬變形的情况稱為可塑性。

實驗指出，處於塑性狀態中的金屬的每一點，其最大切線應力為常數，代表該金屬的特性。

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{k_1}{2}, \quad (1)$$

式中 σ_1 和 σ_3 ——主法線應力； k_1 ——單向張力下的塑性變形抗力(塑性抗力)。

在靜力下變形和沒有冷加工硬化的情況下：

$$k_1 = \sigma_s,$$

當物體變形時，按最大切線應力理論，塑性變形為以下三個不等式所決定，缺一不可：

$$\tau_1 \leq \frac{k_1}{2}; \quad \tau_2 \leq \frac{k_1}{2} \text{ 和 } \tau_3 \leq \frac{k_1}{2}; \quad (2)$$

τ_1, τ_2 和 τ_3 ——主切線應力，等於：

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \quad \tau_2 = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \text{ 和 } \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad (3)$$

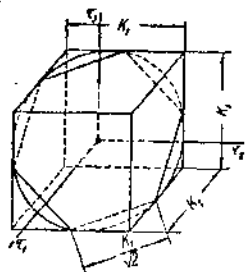


圖 2 說明塑性狀態的極限表面。

式中 σ_1, σ_2 和 σ_3 ——主法線應力。

在直角座標系 τ_1, τ_2 及 τ_3 中，不等式(2)用立方體(圖2)來說明，立方體的中心位於座標的起點，其邊等於 $k_1/2$ 。這立方體的表面叫做極限表面，這表明當它達到切線應力值時，呈現塑性狀態。

因為

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0, \quad (4)$$

這極限表面用一六邊形極限外形來代替，這六邊形是由於平面 $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0$ 與立方體橫截相交的結果所形成。

為了消除極限表面的不連續性，以球形體來代替立方體，而六邊形則以其邊為半徑的外接圓來代替(圖2)；

$$r = \frac{1}{\sqrt{2}} k_1.$$

這球形體的方程式是：

$$\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 = \frac{1}{2} k_1^2 \quad (5)$$

或

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = k_1 \quad (6)$$

這公式提供了近代塑性理論的數學公式。

由這方程式的分析指出，按照這一塑性理論的公式，只有在彈性變形改變形狀而體積不變的勢能達到某一定數值後，塑性變形才開始。這理論的特點和最大切線應力相比較，乃是在其中不僅考慮到最大和最小主法線應力的影響，而且也考慮到中間主法線應力的影響。

假如用下列數值來表示在 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 範圍內的中間主法線應力 σ_2 ，

$$\xi = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}},$$

方程式(6)可寫成下式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{\xi^2 + 3}} k_1 \quad (7)$$

ξ 的值可在 $-1 \sim +1$ 的範圍內變化。當 $\sigma_2 = \sigma_1$ 或 $\sigma_2 = \sigma_3$ 時，

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_1.$$

當變形狀態限於一平面內，其時 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ ，相當於 $\xi = 0$ ，

則

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} k_1 \approx 1.15 k_1. \quad (8)$$

因此塑性狀態發生在主法線應力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的差等於由 k_1 至 $1.15 k_1$ 之間時，準確數值依據中間主法線應力 σ_2 的數值而定。將承受內壓力的薄壁管進行張力實驗時，就足夠證明這論點。

接觸弧上單位壓力的分佈

在軋製帶材的變形區域裏，割取微分體積 $abcd$ ，用力平衡條件(圖3)，可以衍出下列方程式：

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{p_x - \sigma_x}{y} + \frac{d\tau_y}{dx} \pm \frac{\tau_x}{y} = 0, \quad (9)$$

式中 p_x ——軋輥在軋件上的單位壓力； σ_x ——軋件 ba 截面上的平均法線壓應力， ba 距通過軋輥中心線的平面的距離為 x ； τ_x ——軋輥表面與軋件間的單位摩擦力； y —— ba 截面高度的一半。

這個方程式中的正號適用於後滑區域，而負號適

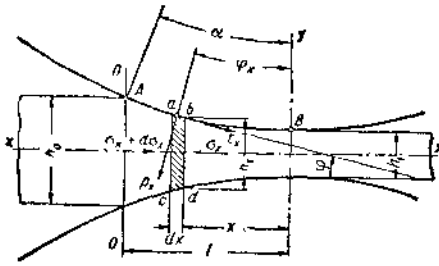


圖3 後滑區域內作用於軋件微分體積上的力。

用於前滑區域，其時軋件與軋軋接觸的質點沿着軋軋表面，在軋軋轉動的方向上趨於滑動。

要解方程式(9)必須從方程式(6)找出單位壓力和應力 σ_x 之間的關係。

軋製寬軋件時應用：

$$\sigma_1 = p_x, \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 和 } \sigma_3 = \sigma_x$$

那麼根據方程式(8)

$$p_x - \sigma_x = \frac{2}{\sqrt{3}} k_1 \approx 1.15 k_1. \quad (10)$$

將這 $p_x - \sigma_x$ 的數值代入(9)式中，得到軋製時單位壓力的基本微分方程式：

$$\frac{d(p_x - k)}{dx} - \frac{k}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0, \quad (11)$$

式中

$$k = \frac{2}{\sqrt{3}} k_1.$$

這個方程式積分中所得的常數，由起始條件決定。根據方程式(10)在A與B兩點上的單位壓力(圖1)為：在A點：

$$p_0 = k - \sigma_0 = \xi_0 k$$

在B點：

$$p_1 = k - \sigma_1 = \xi_1 k,$$

式中 σ_0 和 σ_1 ——在進軋口(在 $x = l$ 處)和出軋口(在 $x = 0$ 處)軋件內的張應力。

由於 p_x 與 t_x 之間的關係不明確，提供上式正確的一般解答有很大的困難。在方程式(11)的解答中，大半採取 k 的數值在接觸弧上不變，而 t_x 的數值則根據軋件和軋軋表面間假定的摩擦力特性而定。

方程式(11)，在下列三種不同的摩擦力情形下進行原則性的解答：

在乾摩擦(乾摩擦的理論)[27]的情況下滑動，其時 $t_x = \mu p_x$ ， μ 為摩擦係數；

在有部分滑動(摩擦力不變的理論)[8]的情況

下，採取 $t_x = \text{常數}$ ；

在有滑動和液體摩擦[29]的情況下，其時

$$t_x = \eta \frac{dv}{dy},$$

式中 η ——潤滑材料的黏度； $\frac{dv}{dy}$ ——垂直於滑動面方向的速度梯度。

表2(a, 6, B)中所示為單位壓力方程式解答的結果並表示單位壓力和摩擦力沿接觸弧分佈的曲線。為了簡化方程式(11)的解答，以拋物線弧作接觸弧和以弦作接觸弧。由此假設在計算中所產生的誤差很小。

按前兩個理論，最大單位壓力在後滑區域與前滑區域交界處，這交界截面叫做中性截面或臨界截面。

按液體摩擦的理論，中性截面的位置決定於摩擦力等於零的一點。

以上所舉三個單位壓力的理論都是根據一個假設，即在整個接觸弧上軋件沿着軋軋面滑動。在後滑區域內，此滑動在軋軋轉動的反方向進行，而在前滑區域內則在軋軋轉動方向進行。

在前滑和後滑兩個區域之間還有一個區域(黏着區域)存在，在此區域內軋件無滑動，這個假定是有根據的。在這種情況下，摩擦力以乾摩擦方式由一個滑動區域過渡到另一個滑動區域無跳動變化(表2)，如按乾摩擦和摩擦力不變的理論中所存在的一樣(見表2a和6)。

在滑動區域內，單位壓力圖解只限於凹形曲線，像按乾摩擦理論一樣，而在黏着區域內則為凸形曲線，並在與中性截面靠近處有一圓頂。單位壓力圖解這個特性為接觸弧上單位壓力分佈的實驗研究所證實[4, 20]。

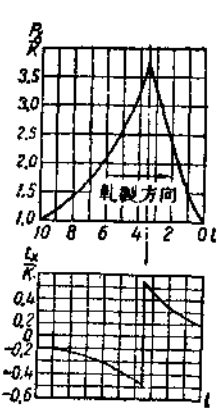
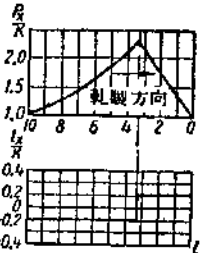
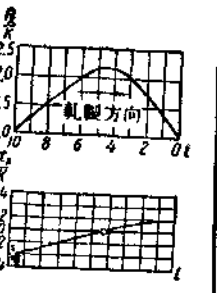
軋製時作用於軋軋上的力的方向

自軋件加到軋軋上的力由垂直壓力和摩擦力所組成。這些力的合力方向根據軋製的方法和條件而不同，在每一個別情況下，合力的方向能以利用這樣的規則確定；就是軋軋在軋件上的合成力必須在所有的情況下使軋件處於平衡狀態。

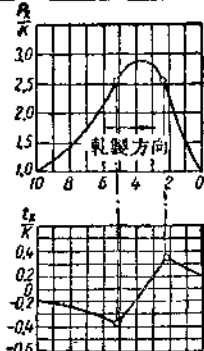
最流行的軋製情況叫做簡單軋製過程，軋件加於軋軋上一切壓力的合力，也就是垂直壓力和摩擦力的合力，應平行於二軋中心的聯線，而在一般水平裝置的軋軋，即為垂直(表3a)。

在軋軋上的合壓力的方向僅在保持下列的條件時是垂直方向：1)兩個軋軋都是傳動的，並且有相同的直徑和圓週速度；2)在機械性質方面軋件是均勻的；3)軋

表 2 接觸弧上單位壓力的分佈

計算摩擦力和單位壓力的公式	接觸弧上摩擦力和單位壓力分佈圖
а) 乾摩擦的理論 $\ell_x = \mu p_x \quad (12)$ 以拋物線弧作接觸弧 用於後滑區域 $p_x = k \left\{ \left[\xi_0 + \frac{2}{m^2} (1 - m u_0) \right] e^{m(u_0 - u)} - \frac{2}{m^2} (1 - m u) \right\}$ 用於前滑區域 $p_x = k \left[\left(\xi_1 + \frac{2}{m^2} \right) e^{m u} - \frac{2}{m^2} (1 + m u) \right], \text{ 式中 } m = \frac{2\mu l}{\sqrt{h_1 \Delta h}};$ $u_0 = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}; \quad u = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \times \frac{x}{l} \right)$ 以弦作接觸弧 (作者的公式) 用於後滑區域 $p_x = \frac{k}{\delta} \left[\left(\xi_0 \delta - 1 \right) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right] \quad (13)$ 用於前滑區域 $p_x = \frac{k}{\delta} \left[\left(\xi_1 \delta + 1 \right) \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \quad (14)$ $\delta = \frac{2\mu l}{\Delta h};$ h_0, h_x 及 h_1—軋製前軋件截面的高度, 由軋軋中心連線的距離 x 和軋製後軋件截面的高度; Δh—線壓縮量	
б) 摩擦力不變的理論 $\ell_x = \text{常數} \approx \mu k \quad (15)$ 以拋物線弧作接觸弧 用於後滑區域 $p_x = k \left[\xi_0 - \ln \frac{x_0^2 + 1}{x^2 + 1} \right] + 2\ell \sqrt{\frac{r}{h_1}} \operatorname{arctg} \frac{x_0 - x}{1 + x x_0}$ 用於前滑區域 $p_x = k (\xi_1 + \ln(x^2 + 1)) + 2\ell \sqrt{\frac{r}{h_1}} \operatorname{arctg} x$ 當 $x = \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \times \frac{x}{l} \text{ 和 } x_0 = \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}},$ 式中 r—軋軋半徑	
в) 液體摩擦的理論 $\ell_x = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (16)$ 式中 η—潤滑材料的黏度 以拋物線弧作接觸弧 用於後滑區域和前滑區域 $p_x = k (\xi_1 + \ln(1 + x^2)) + \frac{A\tau}{2} \left(\frac{x}{1 + x^2} - B \operatorname{arctg} x \right)$ 當 $A = 2\ell \sqrt{\frac{1}{h_1 \Delta h}}; \quad \tau = \eta \frac{v_1}{\Delta},$ 式中 v_1—軋件自軋軋出口的速度, Δ—油膜層的厚度 $B = \frac{\frac{2k}{A\tau} \left[\xi_1 - \xi_0 + \ln(1 + x_0^2) \right] + \frac{x_0}{1 + x_0^2}}{\operatorname{arctg} x_0}$ 當 $x = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} x; \quad x_0 = \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \quad \text{時}$	

(續)

計算摩擦力和單位壓力的公式	接觸弧上摩擦力和單位壓力分佈圖
г) 滑動-黏着的理論 (作者的建議) 在滑動區域內摩擦力按方程式(12)確定,而單位壓力按方程式(13)和(14)確定 在黏着區域內 $t_x \approx \frac{2\eta_1 \Delta v}{y}; \quad (17)$ $p_x = k \ln y - \frac{6\eta_1 v_0 d}{\Delta h} \left(\frac{\gamma n}{2y^2} - \frac{1}{y} \right) + C; \quad (18)$ 式中 Δv—接觸面上速度和截面中心速度的差; v_0—軋軋圓週速度; η_1—軋件的黏性係數; γn—在中性截面上接觸弧的座標	

件運動均勻,除來自軋軋上的力而外,無其他任何力作用於軋件。

可是,實際上不總是保持所有這些條件,那麼軋件在軋軋上的合壓力不是垂直方向。表3中所示的合力方向是這些軋製情況中最有代表性的。

軋製中影響軋件對軋軋壓力的基本因素

決定軋製中軋件對軋軋的總壓力,是要解決兩個基本問題:1)計算軋件與軋軋相接觸的面積,此面積在與軋軋上合壓力垂直平面內的投影叫做接觸面積,和2)決定軋軋上的單位壓力。

軋件對軋軋的總壓力

$$P = F p_{cp}, \quad (21)$$

式中 F ——與一個軋軋相接觸的面積; p_{cp} ——平均單位壓力。在大多數情況下, F 的數值可以很簡單的求出,因為此數值視軋軋與軋件在入軋前和出軋後的幾何尺寸而定。決定 p_{cp} 的數值在一系列的情況下有相當的困難。

影響單位壓力數值的有兩個基本因素:軋件機械性質(k_1 或 σ_s)和軋件在軋製中應力狀態的特性,同時軋件的機械性質應表示為單向靜張力下的屈服點 σ_s ,應變硬化和變形速度的函數。

軋製中的單位壓力可用下列一般形式的公式表示:

$$p_{cp} = n_\sigma n_v n_n \sigma_s, \quad (22)$$

式中 n_σ ——應力狀態係數,顧及外摩擦力與張力對單位壓力的影響; n_v ——速度係數,顧及軋製速度對單位壓力的影響; n_n ——應變硬化係數,顧及軋件在軋製中由於硬化而使屈服點增高。

除 n_σ 而外,這三個係數都大於一,在有些張力高而外摩擦低的情況下, n_σ 可能達到 0.7~0.8。實際上,這一係數對單位壓力影響最大,而且根據軋製條件與外摩擦的變化,此係數可能在很大範圍內發生變化,平均 $n_\sigma = 0.8 \sim 8$ 。

如張力不存在而外摩擦影響低到可以忽略時(即 $\sigma_s = 0$ 時),則在此種情況下,應力狀態係數為:

$$n_\sigma = 1.15.$$

軋製速度對單位壓力的影響遠低於應力狀態因素的影響。速度係數的數值,根據實驗研究或軋件黏性係數與變形速度之間的關係決定。在冷軋中,變形速度係數的數值實際上可取為一。

在熱軋中,即在高於再結晶溫度時的軋製中,應變硬化係數實際上等於一。在冷軋中,這一係數一般是這樣考慮的,即將軋製前後屈服點的平均數值代入(22)式中。

決定軋件和軋軋的接觸面積

接觸面積因軋軋和軋件在入軋前及出軋後的幾何尺寸而不同。

在板材、帶材和普通正方截面型材的軋製中,軋軋和軋件只在軋軋的柱面接觸,接觸面積(一個軋軋)可按下列方程式估計:

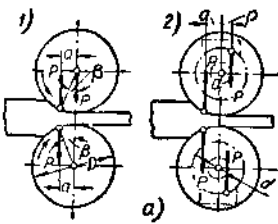
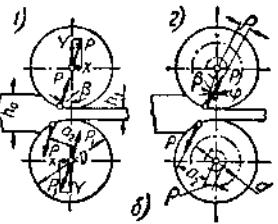
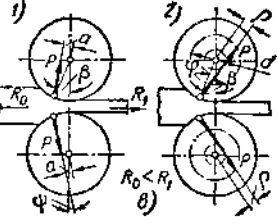
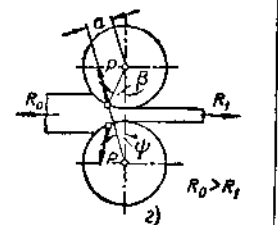
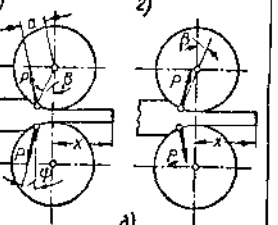
$$F = l \frac{b_0 + b_1}{2}, \quad (23)$$

式中 l ——軋軋和軋件接觸區域的長度(圖1); b_0 和 b_1 ——軋件在入軋前和出軋後的寬度。

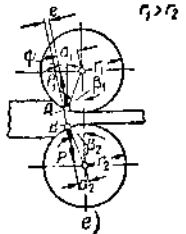
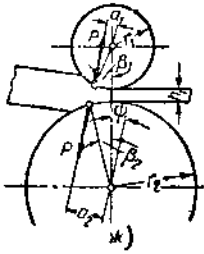
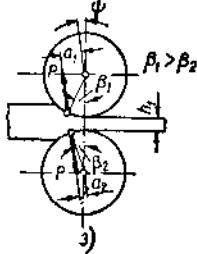
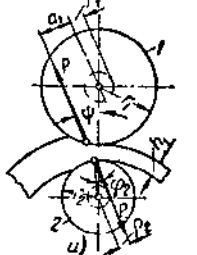
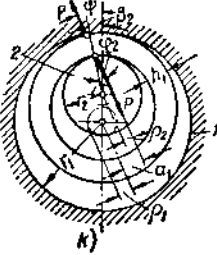
l 的數值可以由下列的關係求得

$$l = \sqrt{r \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}. \quad (24)$$

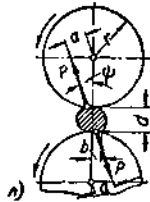
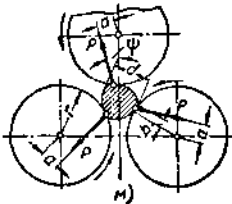
表3 各種軋製過程軋輥上力的作用方向

軋製過程	作用於軋輥上的力的方向	確定傳動軋輥轉動所需力矩 M 和作用在軸承上的側壓力 X 的公式
兩個軋輥是傳動的，有相同的直徑和圓周速度，軋件按機械性能是均勻的，運動均勻，除來自軋輥上的力外，無其他任何力作用於軋件（簡單軋製過程） 1) 不計算軸承中的摩擦損失 2) 計算軸承中的摩擦損失		1) $M = Pa = Pr \sin \beta \approx P \cdot 0.5 \sqrt{r \Delta h}$ (19) 2) $M = P(a + \rho) = P \left(r \sin \beta + \frac{d \mu_1}{2} \right)$ (20) 式中 Δh—線壓縮量；d—軋頭直徑；μ_1—在軸承中軋頭摩擦係數；ρ—軋輥軋頭摩擦圓的半徑
一個軋輥是傳動的（例如，下軋輥），另一軋輥的轉動是由於軋件和傳動軋輥之間的摩擦而發生。所有其他條件相當於簡單軋製過程 1. 不計算軸承中的摩擦損失 2. 計算軸承中的摩擦損失		1) $M_2 = Pa_2 = P(D + h_1) \sin \beta$; $X = P \sin \beta$; 2) $M_2 = P(a_2 + \rho) = P(D + h_1) \sin(\beta + \varphi)$; 式中 $\sin \varphi = \frac{d \mu_1}{D}$
軋製進行的一切條件和簡單軋製過程情形相同，只是軋件在進出口軋口處由於其 R_0 與 R_1 二力的影響而受到張力 $R_0 < R_1$ 1) 不計算軸承中的摩擦損失 2) 有一空轉軋的機床並計算軸承中的摩擦損失		1) $M = Pa = Pr \sin(\beta - \psi)$; $X = \frac{R_1 - R_0}{2}$; $\sin \psi = \frac{R_1 - R_0}{2P}$. $\beta = \psi$ 時，軋製是依靠軋件的前張力進行。 2) 軋件拉過空轉軋輥所需的力，等於： $R_1 - R_0 = 2P \sin(\beta + \varphi)$; $\sin \varphi = \frac{2\rho}{D} = \frac{d \mu_1}{D}$
同上，$R_0 > R_1$ 時（不計算軸承中的摩擦損失）		$M = Pa = Pr \sin(\beta + \psi)$; $X = \frac{R_1 - R_0}{2}$; $\sin \psi = \frac{R_1 - R_0}{2P}$
軋輥轉動不均勻，軋件出軋時有加速度，所有其他條件與簡單軋製過程相同： 1) 運動加速時， 2) 運動減速時		$M = Pa = Pr \sin(\beta \pm \psi)$; $X = \frac{U}{2} = \frac{1}{2} \frac{Gf}{g} \left[\frac{1}{\lambda} + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \right]$; $\sin \psi = U : 2P$; G—軋件重量；λ—延伸；l—軋件長度；g—自由降落加速度；f—軋件出軋時的加速度；U—慣性力

(續)

軋製過程	作用於軋輥上的力的方向	確定傳動軋輥轉動所需力矩 M , 和作用在軸承上的側壓力 X 的公式
軋輥有不同的圓周速度和不同的直徑。所有其他條件與簡單軋製過程相同 (有上壓力或下壓力的軋製情況)		$M_1 = P a_1 = P r_1 \sin(\beta_1 + \psi);$ $M_2 = P a_2 = P r_2 \sin(\beta_2 - \psi);$ $X = P \sin \psi,$ 式中 $\sin \psi = \frac{e}{h_{AB}}$
兩個軋輥的圓周速度相等，而一軋直徑大於另一軋的直徑很多。所有其他條件與簡單軋製過程相同		$M_1 = P a_1 = P r_1 \sin(\beta_1 - \psi);$ $M_2 = P a_2 = P r_2 \sin(\beta_2 + \psi);$ $\operatorname{tg} \psi = \frac{r_2 \sin \beta_2 - r_1 \sin \beta_1}{h_1 + r_1(1 - \cos \beta_1) + r_2(1 - \cos \beta_2)}$
所有的軋製條件與簡單軋製過程相同，只是軋件上層加熱溫度高於下層 (軋件機械性能不均勻)		$M_1 = P a_1 = P r \sin(\beta_1 + \psi);$ $M_2 = P a_2 = P r \sin(\beta_2 - \psi);$ $\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta_1 - \sin \beta_2}{\frac{h_1}{r} + 2 - \cos \beta_1 - \cos \beta_2}$
軋製輪箍或圓材圓環；第一個軋輥一傳動的，第二個軋輥一空轉的		$M = P(a_1 - \rho_1) = P[(r_1 + r_2 + h_1) \sin \psi + \rho_1 - \rho_2];$ $X = P \sin \psi, \quad \psi = \beta_2 + \varphi_2$ 軋輥的裝置為懸桁式時 $\rho_1 = \frac{A \rho_A + B \rho_B}{P};$ $\rho_2 = \frac{C \rho_C + E \rho_E}{P};$ A 和 B—在外軋輥軸承上的負荷; C 和 E—在內軋輥軸承上的負荷; ρ_A, ρ_B, ρ_C 和 ρ_E—軸承摩擦圓半徑
在圈狀模中軋製車輪 (圈狀模 1—傳動的，軋輥 2—空轉的)		$M = P(a_1 + \rho_1) = P[(r_1 - r_2 - h_1) \sin \psi + \rho_1 + \rho_2];$ 式中 $\psi = \beta_2 + \varphi_2;$ $\sin \varphi_2 = \frac{\rho_2}{r_2}$

(續)

軋製過程	作用於軋輥上的力的方向	確定傳動軋輥轉動所需力矩 M , 和作用在軸承上的側壓力 X 的公式
在二軋式軋鋼機中橫向和螺旋軋製		$M = Pa = P \left(r + \frac{a}{2} \right) \frac{b}{a};$ $X = P \sin \psi,$ 式中 $\sin \psi \approx \frac{b}{a}$
同上, 在三軋式軋鋼機中		$M = Pa = P \left(r + \frac{a}{2} \right) \frac{b}{a},$ 式中 $\sin \psi \approx \frac{b}{a}$

由於在實際中所用接觸角, 上式根號下的第二項與第一項相較極為微小, F 的數值可取為下式, 用於實際計算仍充分準確:

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{r \Delta h}, \quad (25)$$

式中 b_0 和 b_1 ——軋製前後型材的寬度; r ——軋輥半徑; Δh ——線壓縮量。

假設兩個軋輥直徑基本上彼此不同, 例如在三軋式鋼板軋鋼機中往往如此(表 3), 則每一軋輥的接觸面積可以按下列方程式計算:

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{\frac{2r_1 r_2}{r_1 + r_2} \Delta h}, \quad (26)$$

式中 r_1 和 r_2 ——兩個軋輥的半徑。

在非柱面孔型中軋製型材時, 例如圓材、橢圓材、角材的軋製和方材的側立軋製等, 接觸面積一般用圖解法決定, 因為此種情況下的分析計算較為複雜。為要決定接觸面積, 將孔型與其中的軋件繪在三個投影上, 並繪出軋輥與所軋軋件(圖 4)的相交線來決定接觸面積。

在非正方孔型的型材軋製中, 近似的接觸面積也可按方程式(26)決定, 取 Δh 等於沿着型材寬度上的平均線壓縮量即:

$$\Delta h = \frac{Q_0}{b_0} - \frac{Q_1}{b_1}, \quad (27)$$

式中 Q_0 和 Q_1 ——軋製前後的型材截面面積。

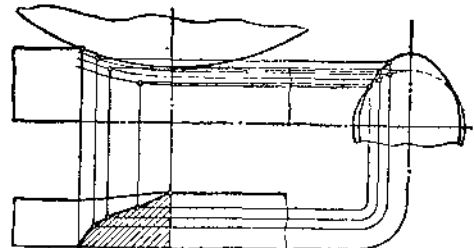


圖 4 用圖解法決定接觸面積。

上述所引用的公式是理想的, 即不變形的軋輥所作出的接觸面計算公式。在板材和帶材的冷軋中, 應考慮到軋輥區域性的彈性壓縮變形, 這種彈性壓縮變形能引起接觸弧長度的某些增加。

計算接觸弧真實長度的近似值並顧及軋輥的彈性壓縮可以按下列的公式進行:

$$l = x_0 + \sqrt{r \Delta h + x_0^2}. \quad (28)$$

在這個公式中所引用 x_0 的數值乃是接觸弧在軋製方向自軋輥中心聯線長度的增加, 並以下列公式確定:

$$x_0 = \frac{8(1-\mu^2)}{\pi E} r p_{cp}, \quad (29)$$

式中 μ ——軋輥材料的波桑比(Коэффициент Пуассона); E ——軋輥材料的彈性模數; r ——軋輥半徑; p_{cp} ——平均單位壓力。

用於鋼製軋輥，採取 $E = 2.2 \cdot 10^4$ 公斤/公厘² 和 $\mu = 0.3$, x_0 的數值是：

$$x_0 \approx \frac{p_{cp} r}{9500} \text{ 公厘,}$$

式中 p_{cp} 以公斤/公厘² 表示，而 r 以公厘表示。

在軋輥間軋製長方形截面的圈材時，按表 3 中 μ 所示的圖，接觸面積按下列方程式計算：

$$F = \frac{b_0 + h_1}{2} \sqrt{\frac{2\Delta h}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_n}}}, \quad (30)$$

式中 Δh ——線壓縮量； r_1 和 r_2 ——內和外軋輥半徑； r_n 及 r_b ——圈材的外半徑和內半徑。

假如在模 (Матрица) 中軋製圈材的情況時 (見表 3, μ)，則在這公式中外軋輥的曲度 $\frac{1}{r_2}$ 的符號，必須變反過來，則 F 的表示為：

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{\frac{2\Delta h}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_n}}}. \quad (31)$$

橫向或螺旋軋製時 (表 3, A)，面積按下列方程式求得：

$$F = \sum \Delta x b_1 = \sum \Delta x \sqrt{\frac{r_b r_{as} \Delta r_{as}}{r_b + r_{as}}},$$

式中 Δx ——所軋製鋼坯一部分的長度，其上接觸面積的寬度等於 b_1 ； r_b ——軋輥半徑； r_{as} ——鋼坯半徑； Δr_{as} ——鋼坯被一個軋輥壓縮的線壓縮量，即鋼坯的半徑或鋼坯的壁厚在鋼坯轉半轉時 (見表 3) 或轉三分之一轉時 (見表 3, μ) 的減小量。

變形速度和應變硬化對軋輥上

軋件壓力的影響

單位變形的時間導數叫做變形速度 u ，即：

$$u = \frac{d\epsilon}{dt}, \quad (32)$$

變形速度也可用下式表示：

$$u = \frac{v_h}{h}, \quad (33)$$

式中 v_h ——線壓縮速度，即工具在變形方向上前進的速度； h ——變形體的臨時高度。

軋製中變形速度的平均數值，視軋輥的圓周速度而定，可以按下列方程式確定：

$$u \approx \frac{2v \sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{h_0 + h_1}{2}} \approx 2v \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}, \quad (34)$$

式中 v ——軋輥的圓周速度； α ——接觸角； $\frac{h_0 + h_1}{2}$ ——

——變形區域內軋件的平均高度； r ——軋輥的半徑。

軋製中的變形速度一般平均在以下範圍以內：

$$u = 1 \sim 10^3 \frac{1}{\text{秒}}.$$

軋製中變形速度如何影響軋件在軋輥上的壓力，這問題仍然很少研究。只知道變形抗力隨變形速度的增加而增加。

關於變形速度對變形抗力的影響，以低碳鋼實驗研究的結果提供了某些概念，實驗的結果如圖 (圖 5) 所示。該圖表示在不同溫度下強度極限與變形速度間的關係 [30]。

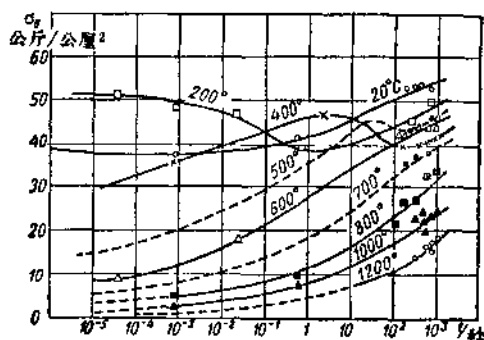


圖 5 在不同溫度下變形速度對低碳鋼強度極限的影響。

只有在再結晶溫度以上軋製時，變形抗力才隨變形速度的增加而增高。在冷狀態中軋製時變形速度對變形抗力的影響極小，而且根據最近的資料，高速軋製時隨着速度的增加，而呈現冷軋變形抗力還有些降低。

速度對軋輥上軋件壓力的影響也可以用方程式 (22) 中的係數 n_v 計算。當然軋時速度係數 n_v 的暫定值視軋製速度對軋輥直徑的比值而定：

$$\text{軋製速度對軋輥直徑的比值} \frac{\text{公尺/秒}}{\text{公尺}} \dots\dots\dots$$

1~2 2~5 5~10 10~20 20~50

速度係數 n_v 1.0 1.1 1.2 1.35 1.5

應變硬化對軋輥上軋件壓力的影響按照方程式 (22) 以硬化係數計算，等於：

$$n_H = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{s1}}{2\sigma_s},$$

式中 σ_{s0} 和 σ_{s1} ——軋製前後單向靜張力時的屈服點。

這些屈服點的數值根據實驗資料選定。圖 6 中所示是碳鋼和黃銅的資料。

計算平均單位壓力的公式

在軋輥上軋件平均單位壓力可按照在接觸弧上單位壓力分佈曲線的平均縱標值而確定 (見表 2)。

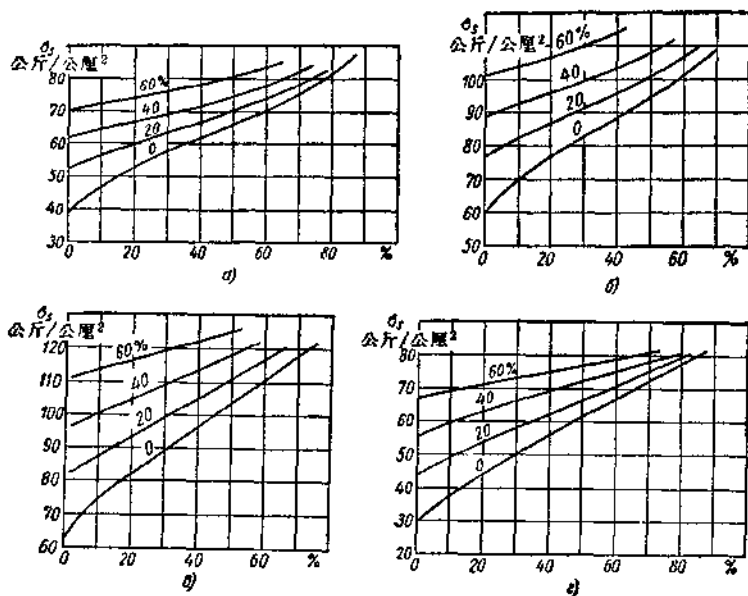


圖6 壓縮率對屈服點的影響：

a—鋼, C 0.10%; Mn 0.45%; б—鋼, C 0.63%; Mn 0.62%; в—鋼, C 0.93%; Mn 0.26%; г—Л73黃銅。

$$p_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l p_x dx.$$

根據公式(13)和(14)將 p_x 的數值代入, 即求得下列作者的公式:

$$p_{cp} = k \frac{2h_1}{\Delta h (\delta - 1)} \left(\frac{h_n}{h_1} \right) \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (35)$$

式中 $k = 1.15 n_v n_n \sigma_s$;

$$\delta = \mu \frac{2l}{\Delta h} = 2\mu \sqrt{\frac{r}{\Delta h}},$$

式中 h_n ——軋件在中性截面上的高度; μ ——軋件與軋輥之間的摩擦係數; r ——軋輥的半徑。

比值 $\frac{h_n}{h_1}$ 是將公式(13)和(14)中所表示的中性截面內 p_x 的值相等而確定

$$\frac{h_n}{h_1} = \left\{ \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right\}^{\frac{1}{\delta}}. \quad (36)$$

圖7所示的圖解是根據公式(35)所構成, 用以簡化平均單位壓力的計算。

在有張力的軋製中軋件對軋輥的壓力比無張力時為小。在這種情況下, 平均單位壓力可按作者的第二簡化公式確定。

$$p_{cp} = \frac{\xi_1 k_1}{m} \left[\left(\frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \right)^{\frac{h_0}{h_0 + h_1}} \epsilon^m - \frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \right] \times \left[\frac{h_0}{h_0 + h_1} - \frac{h_1}{h_0 + h_1} \right], \quad (37)$$

式中 $\xi_0 = \frac{k_0 - \sigma_0}{k_0}$; $\xi_1 = \frac{k_1 - \sigma_1}{k_1}$; $m = \frac{2\mu l}{h_0 + h_1}$;

k_0 和 k_1 ——在一定變形條件下軋製前後的屈服點, 乘以係數 1.15; σ_0 和 σ_1 ——進軋口和出軋口處由張力所引起的應力。

在無張力熱軋時鋼的平均單位壓力也可以按公式(38)計算:

$$p_{cp} = \left[1 + \frac{1.6\mu \sqrt{r \Delta h} - 1.2\Delta h}{h_0 + h_1} \right] \times \left[k + \frac{2\eta v \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}}{h_0 + h_1} \right] \text{公斤/公厘}^2, \quad (38)$$

式中 v ——軋輥圓周速度(公厘/秒); r ——軋輥的半徑(公厘); k ——靜壓力下的單位抗力(公斤/公厘²); η ——軋件黏性係數(公斤秒/公厘²)。

熱鋼的 k 和 η 的數值, 按下列實驗公式確定:

$$k = (14 - 0.01t)(1.4 + C + Mn + 0.3Cr) \text{公斤/公厘}^2;$$

$$\eta = 0.01(14 - 0.01t) \alpha \text{ 公斤秒/公厘}^2,$$

式中 t ——軋製溫度(°C); C, Mn 和 Cr——含碳量、含錳量和含鉻量(%); α ——係數, 視軋製速度而定。

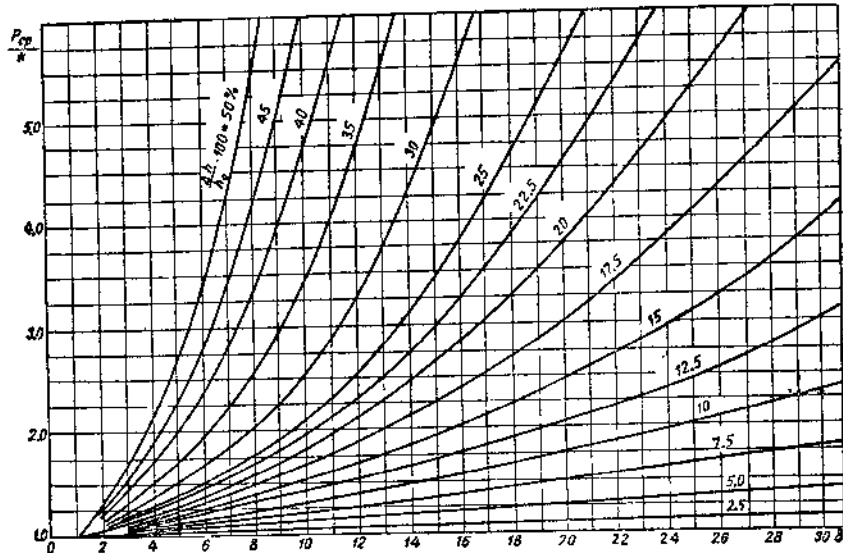


圖 7 在2.5~50%間的各種壓縮率下,平均單位壓力與張力情況(外摩擦力)之間的關係。

係數 α 的數值:

軋製速度(公尺/秒)6以下, 6~10 10~15 15~20

係數 α 1 0.8 0.65 0.60

上述的公式在溫度 $\geq 800^\circ\text{C}$, 與含錳量 $\leq 1\%$ 和含鉻量約不大於 2~3% 時通用。

圖 8 所示是軋製碳鋼和合金鋼時單位壓力的實驗資料(見表 4)以及不同的壓縮量和溫度的關係[31]。

表 4 實驗時所軋製鋼的化學成分(%) (圖 8)

圖 8 曲線的標記	碳	矽	錳	磷	硫	鉻	鎳	鈷	鋁
1	0.11	0.22	0.50	0.020	0.018	—	—	—	—
2	0.88	0.18	0.63	0.014	0.016	—	—	—	—
3	0.06	1.19	0.29	0.010	0.002	22.5	0.14	—	2.23
4	0.11	0.63	0.64	0.015	0.026	18.4	9.1	—	—
5	0.14	1.90	0.69	0.015	0.010	25.0	20.5	—	—
6	0.45	1.98	0.85	0.015	0.010	15.4	13.7	1.95	—

軋件和軋輥之間的摩擦係數

軋件和軋輥之間的摩擦係數決定於許多因素,而主要是決定於軋輥表面的狀態、軋件質量、軋製溫度、氧化物(鱗片)的存在、潤滑油、軋製速度等。有幾種決定軋件和軋輥間摩擦係數的方法:由極限接觸角決定;由滑動時的力決定,此力用巴甫洛夫(И.М.Павлов)[12]的鉗狀儀器測出;由軋製中的前滑決定;由軋件對

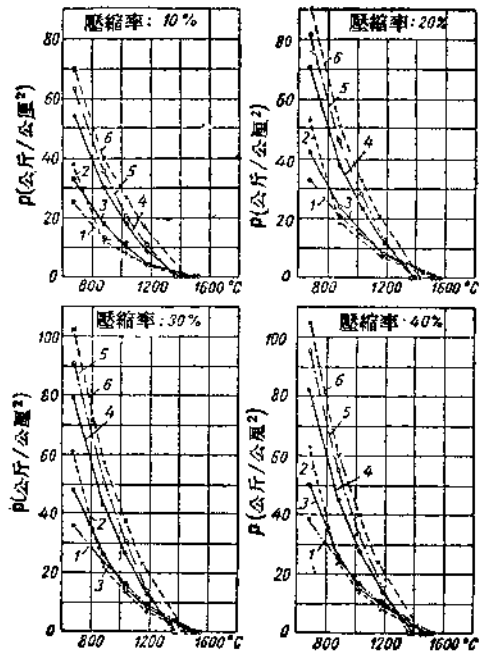


圖 8 在 $\frac{\Delta h}{h_0} = 10; 20; 30; 40\%$ 之各種壓縮率下,軋製碳鋼和合金鋼時,平均單位壓力與溫度的關係: $h_0 = 5.56; 6.25; 7.14$ 和 8.34 公厘; $h_1 = 5$ 公厘; $b_0 = 20$ 公厘; $D = 180$ 公厘。

軋輥的壓力決定等。但是這一切方法都不夠準確,因此軋件和軋輥之間的摩擦係數,現在仍未能準確決定。

鋼在熱軋時,軋製溫度對摩擦係數有很大的影響,

顯然,這主要是由鱗片的不同狀態來解釋。鋼在熱軋時(在溫度不低於 700°C 時)[26] 摩擦係數可按下列方程式來確定:

用於鋼製軋輥

$$\mu = 1.05 - 0.0005t \quad (39)$$

用於硬面生鐵製軋輥

$$\mu = 0.8(1.05 - 0.0005t), \quad (40)$$

式中 t ——溫度(°C)。

但是這些公式所供摩擦係數有點過高。按照巴甫洛夫[12]及其他的實驗者[13]所進行的研究,得到的摩擦係數大概等於:

$$\mu \approx 0.55 - 0.00024t. \quad (41)$$

鋁合金在熱軋時 $\mu \approx 0.3$ 。表 5 中所示是各種金屬在冷軋時的摩擦係數資料[13]。

表 5 金屬在冷軋時的摩擦係數
[按羅柯田 Б.Рокотьян 的資料]

金 屬	潤 滑		
	無 潤 滑	以煤油潤滑	以礦物油潤滑
10號鋼	0.20~0.30	0.15~0.17	0.10~0.13
鋼	0.20~0.25	0.13~0.15	0.10~0.13
鋁	0.20~0.30	0.10~0.15	0.08~0.09
黃銅	0.12~0.15	0.06	0.05
鋅	0.25~0.30	0.12~0.15	—

由軋輥頸的強度決定

軋輥上的壓力

在許多情況下,軋鋼機設計中所制定的工藝規程,在軋鋼機工作時可能發生某種改變。在大多數情況下,軋輥頸的強度將為軋件對軋輥壓力增加的最大極限。因此,在軋鋼機操作過程中,軋輥頸上的許用力在某種程度內,可用作判斷標準以決定在使用過程中軋件在軋上的最大許可壓力。

此力對軋輥頸尺寸的正常比例大致按下列公式確定:

$$P \approx 0.22d^2 R_n, \quad (42)$$

式中 R_n ——彎曲容許應力; d ——軋輥直徑。

對於鐵製軋輥,當 $R_n = 700$ 公斤/公分²,此力為 $P \approx 0.16d^2$ 噸,對於鑄鋼軋輥,當 $R_n = 1200$ 公斤/公分², $P \approx 0.27d^2$ 噸,式中 d 以公分來表示。

軋輥傳動所需的力矩

軋鋼機軋輥所需電動機軸上的力矩,由下列四個基本數值所組成:

$$M_{\Sigma} = M_{np} + M_{mp} + M_{xoA} + M_{\Sigma \text{ 其他}}, \quad (43)$$

式中 M_{np} ——傳到電動機軸的軋製力矩,即克服軋件變形抗力和變形中發生在軋面上的軋件摩擦力所需力矩; M_{mp} ——附加摩擦力矩,此摩擦力是指軋件通過軋輥間時,發生於軸承中,傳動機械中和軋鋼機其他部分中的摩擦力,但附加摩擦力矩中,不包括軋鋼機空轉時所需的轉動力矩; M_{xoA} ——空轉力矩,即空轉時軋鋼機傳動所需力矩; $M_{\Sigma \text{ 其他}}$ ——動力矩,即克服軋輥的不均勻轉動中所生慣性力所需的力矩。

組成軋輥傳動負荷之前三項數值是靜力矩的和,任何軋鋼機中必然有此三項。在傳動負荷組成中,一般是軋製力矩數值為最大,只在很少的情況下,特別是在二輥式薄鋼板軋鋼機中,由於軋輥軸承中的損失巨大,附加摩擦力矩有時大於軋製力矩。

在靜負荷組成中,軋製力矩乃是有效力矩,而其中又包括軋件在軋輥面上的摩擦損失,此摩擦損失是軋製過程不可避免的伴隨現象。而力矩 M_{mp} 和 M_{xoA} 是由軋鋼機的機械和機件不完善所引起的有害力矩。軋製力矩和總靜力矩的比將是軋鋼機的效率:

$$\eta_{cm} = \frac{M_{np}}{M_{np} + M_{mp} + M_{xoA}}. \quad (44)$$

此效率可能在很寬限度內變化,視軋製方式與軋鋼機構造而定,主要視軋輥軸承的構造而定,平均為:

$$\eta_{cm} = 0.3 \sim 0.9$$

動力矩只發生在軋輥不均勻轉動進行工作的幾種軋鋼機中:帶飛輪的軋鋼機中,軋製過程中須調整軋製速度的軋鋼機中,這包括可逆式軋鋼機在內。動力矩的數值:

$$M_{\Sigma \text{ 其他}} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (45)$$

式中 GD^2 ——軋鋼機轉動部分傳到電動機軸的環動力矩; $\frac{dn}{dt}$ ——角加速度(轉數/分秒)。

軋製力矩的決定是按軋輥上的壓力或按軋製時功量消耗。第一種計算方法較為準確,特別是在方形截面的軋件軋製中是這樣,這些軋件如:板材、帶材、鍛材、初軋方坯、初軋板坯等。

在每一個別情況下,轉動力矩的計算,可按照表 3 中所示的方程式,視軋製時軋輥上作用力的方向而定。

這些方程式中的矩臂 α 或 β 角,必須根據一距離來選定,此距離即由軋件對軋輥合成壓力作用點到經過兩軋輥軸中心的平面間的距離。合力作用點相當於接觸面積上單位壓力分佈圖的重心(參看表 2)。

在實際計算中， β 角與 α 接觸角之間的關係採用如下等式已夠準確：

$$1) \text{ 在熱軋中 } \frac{\beta}{\alpha} = 0.5;$$

2) 在冷軋中，由於作用點向軋輥中心連線移動較多，

$$\frac{\beta}{\alpha} = 0.35 \sim 0.45。$$

在簡單軋製的情況下，即軋件對軋輥合壓力的方向是垂直方向的情況下

$$\frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{\alpha}{l},$$

式中 α ——軋件在軋輥上合壓力的矩臂； l ——軋件和軋輥接觸區域的長度。

在簡單軋製過程中，使兩軋輥轉動所需力矩等於：

$$M_{np} = 2P \frac{\beta}{\alpha} l = 2P \frac{\beta}{\alpha} \sqrt{r \Delta h}。 \quad (46)$$

係數 $\frac{\beta}{\alpha}$ 的數值，即軋輥上合成壓力的位置，在熱

軋中取為：1) 方形截面鋼坯——0.5；2) 圓型材——0.6；3) 在封閉式孔型中——0.7；4) 連續式板材軋鋼機列中，在第一架機座——0.48；在以後的機座中——0.39 [28]。

在軋製板、帶材與其他方形截面型材時，接觸面積為方程式(25)所決定，軋製力矩也可用平均單位壓力表示：

$$M_{np} = P_{cp} \frac{\beta}{\alpha} (b_0 + b_1) r \Delta h_0。 \quad (47)$$

由於軋輥的彈性變形，接觸弧的增加，在軋件自軋輥的出口端較在入口端為大，因此合壓力作用點隨着軋輥的變形將同時向軋製方向移動[20]。

在簡單軋製過程中，軋輥上合成壓力的方向是垂直的，兩個軋輥所需力矩，考慮到兩軋輥彈性壓縮影響，採取 $\frac{\beta}{\alpha} = 0.5$ ，用下式來表示

$$M_{np} = P \left(\sqrt{r \Delta h + x_0^2} - x_0 \right), \quad (48)$$

式中 x_0 按方程式(29)確定。

軋輥的彈性壓縮引起軋製力矩的增加，只是由於單位壓力的增加。此時軋製功量消耗也增加，因為軋製力矩增加，並因為軋輥軸承上的壓力增大而其中的摩擦損失也增加。

決定軋製力矩的第二個方法，即由軋製中的功量消耗來決定，大多用於非方形截面的型材軋製中，此時接觸面積與軋輥上壓力的決定，較在板、帶材和一般

方形截面型材的軋製中更為複雜。

軋製長度是 L_1 的鋼坯時，軋製力矩和功量消耗 V 之間的關係可表示為：

$$M_{np} = W \frac{r}{L_1}, \quad (49)$$

式中 r ——軋輥半徑

軋製中理論功量消耗按芬克(Финк)的公式等於：

a) 在無中間翻轉的軋製情況下，即 $b_0 \leq b_1$ 時，

$$W = p V \ln \frac{h_0}{h_1}; \quad (50)$$

б) 在有翻轉的軋製中， $b_0 \geq b_1$ 時，

$$W = p V \ln \frac{L_1}{L_0}, \quad (51)$$

式中 p ——根據實驗資料計算的變形抗力； V ——軋件體積； L_0 和 L_1 ——軋製前後軋件的長度。

按照這公式功量消耗和移位體積成正比；移位體積的表示是軋件總體積和變形的自然對數之間的乘積，即：

$$V_{cm} = V \ln \frac{h_0}{h_1} \text{ 或 } V_{cm} = V \ln \frac{L_1}{L_0}。$$

用圖表示，這移位體積是圖 9, a 中的陰影部分。

根據齊蒙(Тимо)公式，軋製中的功量消耗為：

$$W = G \Delta \left(\frac{L_1}{L_0} - 1 \right) \quad (52)$$

式中 G ——軋件重量(噸)； Δ ——單位功量消耗，根據實驗資料決定。按照此式，功量消耗與圖 9, б 中所示體積成正比。

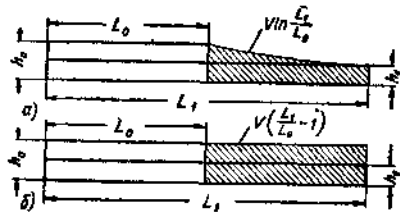


圖 9 軋製功量消耗與具成正比的體積：

a — 按芬克公式；б — 按齊蒙公式。

在各種製品的軋製中，影響功量消耗的一切因素計算複雜，因此，關於某一軋件軋製中，個別軋次功量消耗的分佈與延伸之間的關係，上述公式(50)、(51)和(52)只能提供一個近似概念。

因此為了要得到多少較為準確的數據，必須應用實驗資料，此種實驗資料不僅提供某一製品軋製中的總功量消耗，而且也提供每一軋次中此功量消耗按軋件變形的程度而變化。

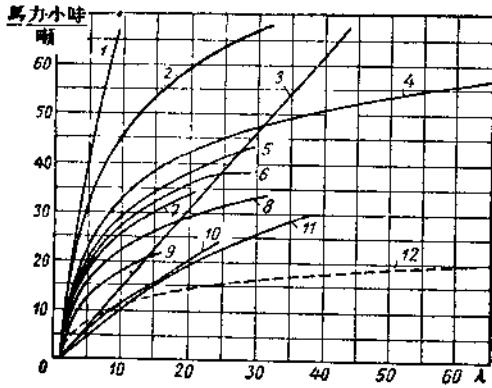


圖10 各種型鋼和鋼板熱軋中單位能量消耗與總伸長間的關係：

曲線 1—薄鋼板；2—鋼帶；3—線材；4—小型鋼材；5—工字鋼；6—鋼軌；7—槽鋼；8—薄板坯；9—圓鋼；10—厚鋼板；11—初軋方坯和鋼坯；12—按麥克公式。

一般以曲線的形式（圖10）提供種類相似的研究

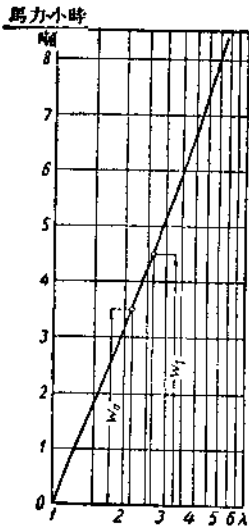


圖11 軋製初軋板坯（厚板坯）時單位能量消耗與伸長間的關係，在920公厘板坯機上將尺寸1830×1630×760公厘鋼錠，重量16.6噸，軋製道數21次軋製成斷面152×1473公厘的初軋板坯。

實驗資料，此曲線表示每噸產品的功量消耗與總伸長，即伸長的關係，或在板材與帶材軋製中，此曲線表示功量消耗與軋件厚度減低間的關係。按照這些曲線，軋件每通過軋軋一次的單位能量消耗，是二縱座標值 w_0 和 w_1 的差， w_0 和 w_1 是軋件在本次通過軋軋前後的長度與軋件在第一軋次以前的原來長度的比（圖11）。

在此單位能量消耗中一般也包括軋鋼機械中摩擦所引起的能量損失，但不包括軋鋼機空轉時的能量損失。這樣，由此功量消耗算出的力矩是 M_{np} 和 M_{mp} 兩力矩的和：

$$M_{np} + M_{mp} = 135 (w_1 - w_0) \gamma F D \text{ 噸公尺}, \quad (53)$$

式中 γ ——單位重量（噸/公尺³）； F ——軋件截面面積（公尺²）； D ——軋軋工作直徑（公尺）。

用於單位重量為7.8噸/公尺³的鋼：

$$M_{np} + M_{mp} = 1050 (w_1 - w_0) F D \text{ 噸公尺}. \quad (54)$$

以曲線計算能量消耗時，輸入能力的表示如下式：

$$N = \frac{3600 (w_1 - w_0)}{t} G, \quad (55)$$

式中 t ——軋件通過軋軋間的時間（秒）。

在每一情況下，按曲線計算功量消耗時，須得挑選在材料、軋件尺寸與截面形狀、軋鋼機類型等方面最接近於該軋製情況的曲線，同時在所有情況下，延伸應按其與截面面積的比例用相同的單位計算，在熱軋時用出爐時的截面面積，冷軋時用軋第一道時的截面面積。

圖12~18中所示是在各種軋製情況下單位能量消耗表現最具特性的曲線[2, 17, 20, 28]。

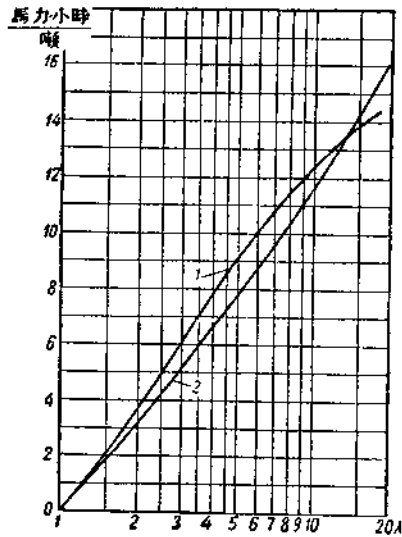


圖12 軋製中單位能量消耗與伸長的關係：

曲線1—在1100公厘初軋機上將截面652×652公厘的鋼錠，重量6.41噸，軋製道數24次，軋製成截面170×170公厘的初軋方坯；曲線2—在1000公厘初軋機上將截面635×762的鋼錠軋製成初軋方坯。

在板材與帶材軋製中，由於軋件厚度對單位能量消耗的影響很大，有時繪製的曲線視軋製厚度改變而不同，如圖19~23中所示。

附加摩擦力力矩是指克服軋件通過軋軋間時，在軋軋軸承中與軋鋼機傳動機械中摩擦力所產生的力矩，在此附加摩擦力矩的數值中，並不包括空轉時軋鋼機轉動所需力矩。

組成附加摩擦力力矩的主要部分是軋軋軸承中的摩擦力矩。兩個軋軋的此項力矩的數值為：

$$M_{mp1} = P d \mu_1, \quad (56)$$

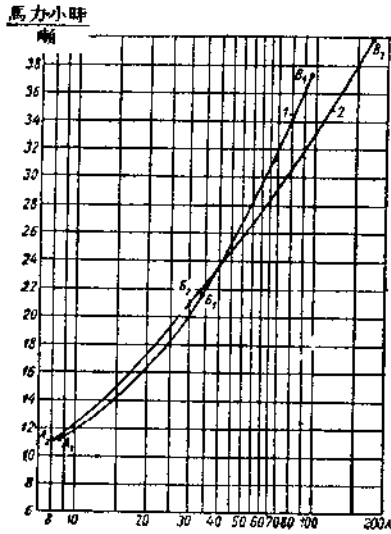


圖13 在連續式鋼坯軋鋼機上軋製中（在初軋機軋製後無加熱）單位能量消耗與伸長間的關係，連續式鋼坯軋鋼機具有兩個機組，每組六機座：

曲線1—在 630 公厘軋鋼機上，鋼坯截面 100×100 公厘（曲線 A_1-B_1 部分）；曲線 2—在 525 公厘軋鋼機上，鋼坯截面 102×102 公厘（曲線 A_2-B_2 部分）及在 450 公厘軋鋼機上，鋼坯截面 44×44 公厘。初軋方坯原有截面 200×200 公厘。

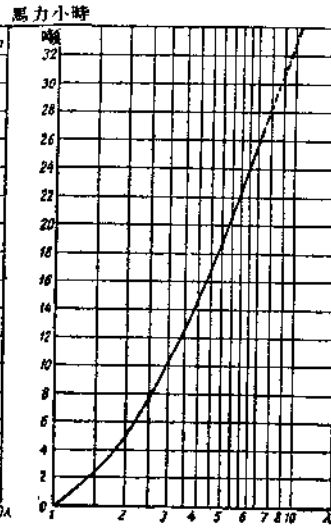


圖14 軋製鋼軌時單位能量消耗與伸長間的關係，在 760 公厘鋼軌軋鋼機上由截面 203×229 公厘的初軋方坯軋製成重量 46.3 公斤鋼軌。

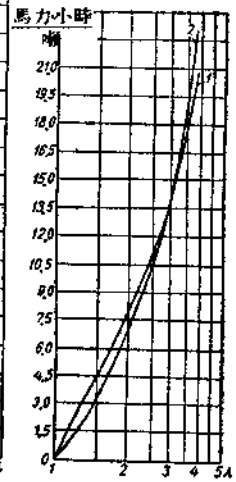


圖15 軋製槽鋼時單位能量消耗與伸長間的關係，在 500 公厘軋鋼機上由尺寸 $150 \times 150 \times 4800$ 公厘的初軋方坯軋製第18號槽鋼（曲線 1）及第16號槽鋼（曲線 2）。

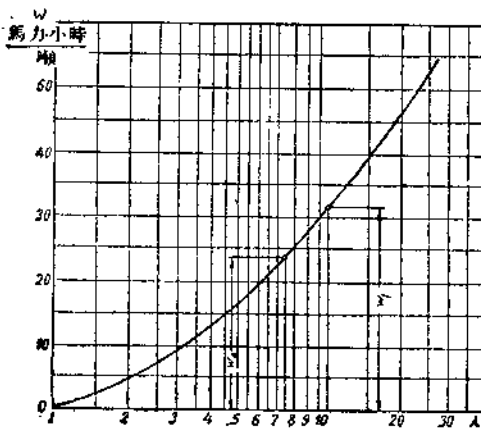


圖16 軋製角鋼時單位能量消耗與伸長間的關係，在 355 公厘軋鋼機上由截面 100×100 公厘，重量 120 公斤，軋製次數 9 次，軋製成截面 $75 \times 75 \times 3.2$ 公厘的角鋼。

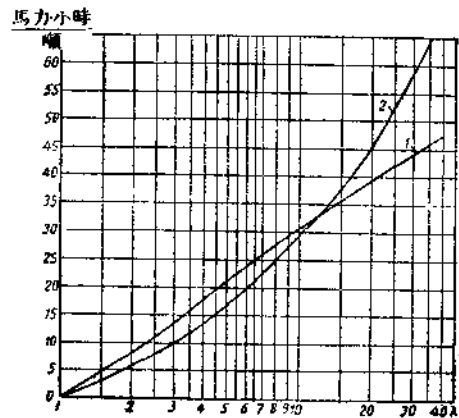


圖17 軋製托錫斯鋼時單位能量消耗與伸長間的關係：

曲線1—在 270 公厘半連續式軋鋼機上由截面 60×60 公厘的鋼坯，軋製次數 13 次，軋製成截面 30×2.2 公厘的托錫斯鋼；曲線 2—在 250 公厘半連續式軋鋼機上由截面 $51 \times 51 \times 9000$ 公厘的鋼坯，軋製次數 10 次，軋製成截面 30×1.47 公厘的托錫斯鋼。

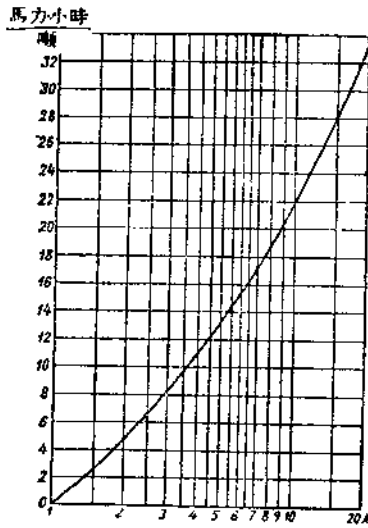


圖13 由100×100公厘鋼棒製直徑25公厘的圓鋼時單位能量消耗與伸長間的關係。

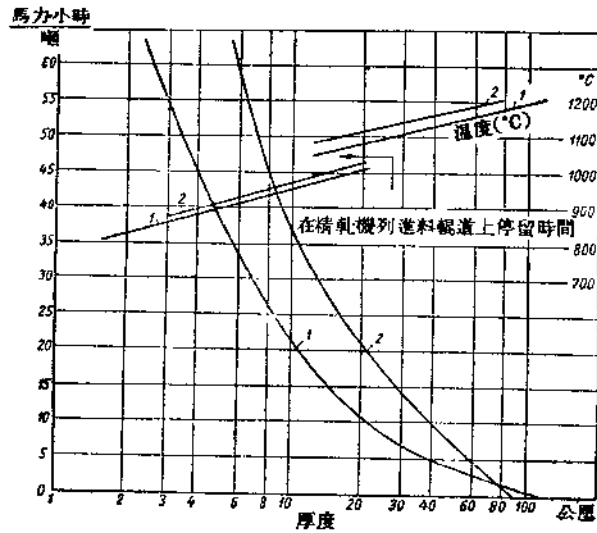


圖19 在連續式軋鋼機上熱軋鋼板時的單位能量消耗；
曲線1—由高碳鋼，出口速度7.7公尺/秒軋製時；
曲線2—由不銹鋼，出口速度6.1公尺/秒軋製時。

式中 P ——軸承負荷，在非懸桁式軋輥裝置中，等於軋件在軋輥上壓力（六棍式與多棍式軋鋼機除外）；
 α ——軋輥軸承軋頸直徑； μ_1 ——軋輥軸承中的摩擦係數。

摩擦係數的數值，根據軸承構造和工作條件大約採取：

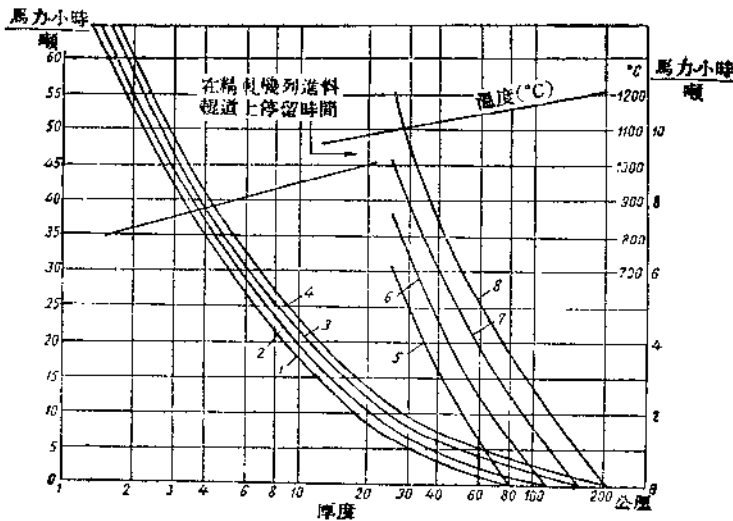


圖20 在連續式軋鋼機上由各種厚度熱軋板坯(1150~1200°C)熱軋低碳鋼板時的單位能量消耗；

曲線1與5—厚度80公厘時；曲線2與6—厚度125公厘時；曲線3與7—厚度160公厘時；曲線4與8—厚度200公厘時；左邊的單位壓力尺標用於曲線1,2,3與4；而右邊的單位壓力尺標用於曲線5,6,7與8；出口速度8.1公尺/秒。

1. 在滑動軸承中：a) 在熱軋軋鋼機上用金屬軸瓦時， $\mu_1=0.07\sim0.1$ ；b) 在冷軋軋鋼機上用金屬軸瓦時， $\mu_1=0.05\sim0.07$ ；c) 用塑性材料軸瓦時 $\mu_1=0.01\sim0.03$ ；r) 液體摩擦 $\mu\approx0.003$ 。

2. 在滾動軸承中 $\mu_1\approx0.003$ 。

組成附加摩擦力力矩的第二數值是軋鋼機傳動機械中的摩擦力，即在齒輪座中，減速器中等的摩擦力。

此數值通常由傳動效率按下列方程式決定：

$$M_{mp2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \frac{M_{np} + M_{mp1}}{i}, \quad (57)$$

式中 M_{mp2} ——傳到電動機軸上的傳動力矩損失； η ——由電動機到軋輥的傳動效率； i ——此傳動裝置中的傳動比； M_{np} 及 M_{mp1} ——軋製力矩和傳到軋輥的軸承摩擦力矩。

傳動效率通常採取：

- 1) 單級齒輪傳動 0.95~0.98；
- 2) 皮帶傳動 0.8~0.9；
- 3) 鋼絲繩傳動 0.8~0.85。

傳到電動機軸的總附加摩擦力力矩為：

表6 圖22和23中所示的單位能量消耗曲線關於軋製方式的資料

曲線號數, 圖的號數	所 軋 鋼 板 的 尺 寸 (公厘)			軋 製 速 度 (公尺/秒)	工作軋輥直徑 (公厘)	機 座 數	
	最 初 厚 度 (公厘)	最 終 厚 度 (公厘)	寬 度 (公厘)				
連 續 式 軋 鋼 機							
1	22	1.9~2.0	0.24	685	—	—	5
2		1.63	0.22~0.30	700~800	6.7~7.2	—	5
3		1.9	0.26~0.30	650~825	7.1	—	5
4		1.9	0.21~0.24	650~825	7.1	—	5
5		1.83	0.22~0.30	750~850	6.6~7.0	—	4
6		1.83	0.22~0.30	570~810	4.7~5.0	—	4
7	23	1.65	0.22~0.33	660~825	4.8~6.1	380~500	4
8		1.8	0.20~0.35	585~865	4.8~6.1	380~500	4
9		1.83~2.0	0.25~0.3	735~840	7.4~7.9	380~500	4
10		1.65~2.0	0.4~0.7	635~830	3.1~3.8	500	3
11		1.7~2.1	0.3~0.5	560~875	4.2~7.1	380~500	4
12		1.8	0.4	750	5.8	—	4
13		1.75~2.0	0.4~0.6	935	2.5~3.0	380~500	3
14		2.4~2.7	0.9~1.2	900~2000	—	500	3
15		2.3~2.7	0.9~1.1	900~1900	—	500	3
16		3.2	0.9~1.2	1000~1700	—	480	3
可 逆 式 軋 鋼 機							
17	22	1.8	0.37	750	—	400~450	1
18		3.0	0.90	1750	—	520	1
19		2.4	0.80	1750	—	520	1

$$M_{mp} = \frac{M_{mp1}}{i\eta} + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \frac{M_{rp}}{i}, \quad (58)$$

如軋鋼機上有空轉支撐軋輥, 則此方程式的第一項還須乘以工作軋輥和支撐軋輥的傳動比, 則得:

$$M_{mp} = \frac{M_{mp1}}{i\eta} \frac{D_{pa6}}{D_{on}} + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \frac{M_{rp}}{i}, \quad (59)$$

式中 D_{pa6} 和 D_{on} ——工作軋輥和支撐軋輥的直徑。

空轉力矩, 即在停歇時間內軋鋼機主要機列傳動所需力矩。在大型軋鋼機上, 一般是由轉動機件重量與轉動機件軸承中摩擦圓半徑計算。

在軋鋼機主要機列上有一系列的機件: 軋輥, 連接軸, 運軸器, 齒輪, 飛輪等, 各有不同的重量, 並在不同的摩擦係數, 不同軸頸直徑的軸承中以不同速度轉動, 空轉力矩用下列方程式表示:

$$M_{xoa} = \sum \frac{G_n \mu_n d_n}{2i_n}, \quad (60)$$

式中 G_n ——該機件的重量 (所指的是軸承上的負荷); μ_n ——軸承中的摩擦係數; d_n ——軸頸直徑;

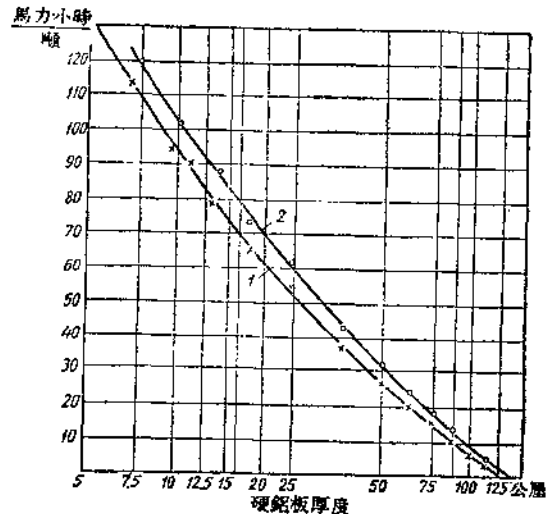


圖21 在四輥式可逆式軋鋼機上熱軋型號24S硬鋁板時的單位能量消耗。工作軋輥直徑—700公厘。軋製開始溫度 420°C , 最後溫度 350°C ; 曲線1—厚板坯最初厚度125公厘時, 曲線2—厚板坯最初厚度135公厘時。