

轧辊的磨损

A. П. 契克瑪辽夫 合著
P. A. 馬什科夫采夫

李 裕 芳 譯

冶金工业出版社

軋 輥 的 磨 損

A. П. 契克瑪辽夫 合著

P. A. 馬什科夫采夫

李裕芳 譯 姚由 校閱

冶金工業出版社

А.П.Чекмарев Р.А.Машковцев
ИЗНОС ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ
Металлургиздат Харьков 1955
軋輥的磨損 李裕芳 譯

編輯：孫文俊 設計：周廣 韓晶石 校對：楊維琴

冶金工业出版社出版 (北京市灯市口甲45号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第093号

中央民族印刷厂印 新华書店发行

1959年5月第一版

1959年5月北京第一次印刷

印数 3,710 册

開本850×1168. 1/32. 120,000字。印張4 $\frac{22}{32}$.

統一書号15062·1532 定价 0.60 元

簡 介

本书探討了有关提高軋輥寿命的各种問題。叙述了引起軋輥較大磨損的基本原因及提高軋輥耐磨性的方法，並且分析了軋制过程中軋輥磨損的各种实验研究資料。进行分析时考慮到温度、压力、压缩的不均匀性、軋輥（孔型）的表面层硬度，以及金属沿軋輥滑动所产生的一切因素。闡明了测量和确定各种孔型磨損的方法。指出了借澆注軋輥用鑄铁的变性处理及进行輥身表面淬火而強化軋輥、采用鑄铁和鑄鋼孔型、軋輥的电焊焊补和軋輥滚压強化等提高軋輥耐磨性的方法。

对于了解軋輥的工作所必需的軋制原理和軋輥孔型設計問題，也作了介紹。

本书适用于制造和使用軋輥的工程技術人員閱讀。

目 录

緒 論	1
第一章 軋制过程和軋輥	2
1. 軋制过程	2
2. 简单鋼材和異型鋼材的孔型設計及其軋制	14
3. 軋輥	28
4. 影响軋輥磨損的因素	35
5. 进行軋輥磨損測定的 550 軋鋼机	49
第二章 軋制扁鋼时軋輥的磨損	42
1. 軋件的溫度	42
2. 軋輥的硬度	42
3. 軋制扁鋼时的变形不均匀性	43
4. 軋制扁鋼时軋輥磨損的数据	44
5. 考虑到磨損的軋輥孔型設計	48
第三章 軋制角鋼时孔型的磨損	50
1. 角鋼孔型中金屬的滑动	50
2. 角鋼孔型表面的軋輥硬度	59
3. 所軋角鋼的溫度	60
4. 角鋼孔型中金屬变形的不均匀性	61
5. 角鋼孔型磨損的数据	63
6. 考虑角鋼孔型磨損的軋輥孔型設計	70
第四章 異型孔型的磨損	72
1. 金屬滑动对磨損的影响	72
2. 軋輥表面硬度不均所引起的孔型磨損	80
3. 所軋槽鋼和工字鋼的溫度不均匀性	81
4. 金屬变形的不均匀性	83
5. 異型孔型的磨損数据	86
6. 考虑異形孔型磨損的軋輥孔型設計	96
第五章 軋制鋼板、鋼坯、圓鋼、方鋼、鋼管、鋼軌和其他鋼材时軋輥的磨損	99

1. 軋板軋輥	99
2. 矩形孔型	102
3. 方孔型	105
4. 圓孔型和橢圓孔型	108
5. 鋼軌孔型	112
6 鋼窗孔型	113
7. 孔型磨損所引起的軋件的缺陷	116
第六章 軋輥耐磨性的提高	120
1. 帶鑄造軋槽的軋輥	120
2. 軋輥金屬的合金處理和變性處理	123
3. 利用氣體火焰的軋輥表面淬火	127
4. 在環形加熱爐中的軋輥淬火	132
5. 軋輥的電焊焊補	136
6. 軋輥的滾壓強化	142
參考文獻	145

緒 論

国民經济的各个部門，特别是重工业部門每年都需要几百万吨鋼材。軋鋼生产最重要的任务是生产和掌握新型鋼材。现在鋼材断面的种类有几百种，而不同的断面和尺寸則有几千种。

用軋制的方法制造产品必須有大量各种不同的軋輥。此外，在生产过程中由于磨損和断輥，每年有几万个軋輥报废而成为废料。

这些情况迫使人們寻找提高軋輥耐磨性的方法，改善軋輥質量来满足工业上的需要。

耐磨的軋輥才可能軋制尺寸公差严格的产品，并且可以軋出很清洁的、表面質量高的产品。同时，軋輥工作期限增长就能减少因換輥所需的停隙時間（換輥時間占軋鋼机工作的总時間的5 ~ 10%），可以提高鋼材生产量。

考虑到解决提高軋輥耐磨性問題的急迫性，本書作者根据在生产实践中得出的实验数据提出了达到这一目的的各种方法和措施。

这些方法是：借軋輥軋身表面火焰淬火以提高硬度和耐磨性，修理軋輥时进行电焊焊补，軋輥金屬的合金处理和变性处理，在环形爐中进行軋輥淬火，滾压强化等。

普遍推行已經通用的，以及上述提高軋輥耐磨性的各种方法，可以使每吨鋼材的軋輥平均消耗量从3 ~ 5公斤降低到1 ~ 1.5公斤，也就是减少三分之二。

第一章 軋制过程和軋輥

1. 軋制过程

軋制过程分三个阶段（图1）。

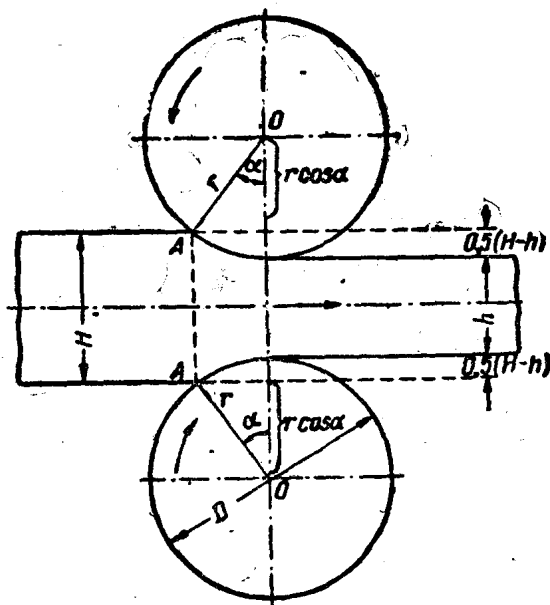


图1 軋制图

第一阶段是金屬充填迴轉軋輥間的孔隙的阶段。这个阶段从金屬与軋輥在A点接触后开始到軋件头端与軋輥中心綫 OO 重合时結束。由于在不同的時間，金屬軋入軋輥的程度也不同，所以这个軋制阶段是可变的，也可以称作未稳定軋制过程的阶段。从保証金屬軋入軋輥的观点来看，第一阶段是軋制过程中最重要的阶段。

第二阶段从軋件头端出 OO 綫开始到軋件末端与 AA 綫重合时結束。第二阶段的时间最长。在这个阶段中軋制条件是不变的，所以它又叫做稳定阶段。

在軋制原理中已經确定了第一阶段和第二阶段間的一定的关系。

軋件末端出 AA' 綫到軋制結束，也就是軋件末端出 OO' 綫这是第三阶段。这个未稳定軋制过程的阶段沒有实际的或是理論的意义，所以不再进行研究。

现在来研究軋制过程的第一未稳定阶段。为实现軋制必須將軋件送入轉动着的軋輥，并且在軋件上加一定的力。沒有这个力，在接触部分不能产生摩擦力，显然也就不能分析軋制过程。將金屬推向軋輥所必須的力可能由于軋鋼工用夹鉗將金屬送入軋輥而产生，也可能由輥道和其他机械化送料設備的作用而产生。在上述两种情况下，推力都使軋件的上下邊緣产生某些压扁的现象。軋件送入軋輥的推力愈大，軋件的宽度和硬度愈小，那么这种压扁也愈大。当軋件有一定的速度送入軋輥时（机械化送料时），在接触的时刻軋件发生停頓，并且軋件撞击軋輥，这种停頓的結果使軋件失去动能，也引起軋件邊緣的压扁，軋件的速度和重量愈大，宽度和硬度愈小，那么产生的压扁也愈大。

可见，在研究軋入条件时必须采用这样的簡图，在簡图上金屬与軋輥的接触是宽度为 B （軋件宽度）的接触面，其长度为压扁弧长 AA' ，且有推力 Q （图2）。

如果没有压扁，那么 A 点的压力与垂綫成 α 角。压扁的存在使压力 P 的作用角减小压扁角 θ 的二分之一而为 α' 。

为使金屬軋入軋輥，必須使軋制方向上軋輥作用在軋件上的各个力之和等于零或大于零（順軋制方向的力为正）。这些力在

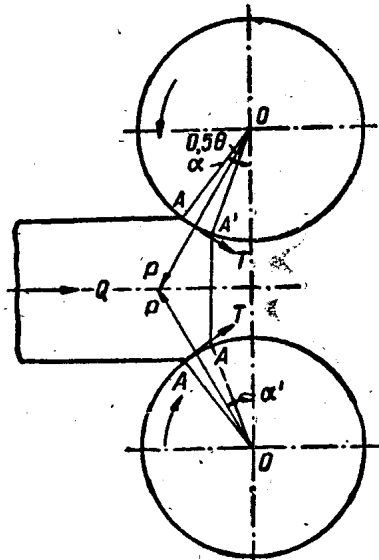


图 2 金屬軋入軋輥

水平方向的投影(在軋制軸上)等于: $P_x = P \sin \alpha'$; $T_x = T \cdot \cos \alpha'$;
 $Q_x = Q$ (設推力为水平方向)。

軋入时的接触摩擦系数用 f_0 表示, 得:

$$T = f_0 \cdot P; \quad T_x = f_0 \cdot P \cos \alpha'. \quad (1)$$

接触时可能存在以下的条件:

$$f_0 P \cos \alpha' + 0.5Q \geq P \cdot \sin \alpha'. \quad (2)$$

$$f_0 P \cos \alpha' + 0.5Q \leq P \cdot \sin \alpha'. \quad (3)$$

在 (2) 式的条件下可以軋入, 在 (3) 式的条件下不能軋入。我們来分析在临界值的情况下 (2) 式和 (3) 式的条件:

$$f_0 P \cos \alpha' + 0.5Q = P \sin \alpha'.$$

以摩擦角 β_0 代替摩擦系数 f_0 。因为摩擦系数等于摩擦角的正切值, 也就是:

$$\operatorname{tg} \beta_0 = f_0.$$

所以

$$\operatorname{tg} \beta_0 P \cos \alpha' + 0.5Q = P \cdot \sin \alpha',$$

由此

$$\operatorname{tg} \alpha' = \operatorname{tg} \beta_0 + \frac{Q}{2P \cdot \cos \alpha'}.$$

因为 $\alpha' = \alpha - 0.5\theta$, 則:

$$\operatorname{tg}(\alpha - 0.5\theta) = \operatorname{tg} \beta_0 + \frac{Q}{2P \cdot \cos(\alpha - 0.5\theta)}. \quad (4)$$

得到的方程式表示出在軋入的撞击时刻軋入角与摩擦角、压扁角、以及压力和推力之間的关系。压扁角、摩擦角和推力增大时, 軋入角的最大值也增大。

如果忽略上述方程式中的压扁角和推力 (数值很小时), 那么可以得到簡化的式子:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta_0, \quad (5)$$

由此, $\alpha = \beta_0$ 。

从方程式 (5) 可以看出, 边缘沒有压扁和沒有把金屬送入軋軋的推力时, 如果軋入角大于摩擦角, 那么金屬就不可能軋入軋軋。

现在来找出轧制过程第二稳定阶段的最大轧入角的表示式。为了简化问题，假设接触表面的所有各点上压力都相等，那么总压力 P 将作用在角度为 $\frac{\alpha}{2}$ 的地方（图3）。显然，当总压力 P 和摩擦力 T 的水平投影相等时，也就是这两个力的合力 R 为垂直方向时轧入角为极限值。这时，

$$\beta_y = \frac{\alpha}{2}, \quad \text{或} \quad \alpha = 2\beta_y, \quad (6)$$

式中 β_y —— 轧制的稳定过程中的摩擦角。

这样，轧制的未稳定过程的轧入条件（如果忽略撞击和压扁）将为：

$$\alpha \leq \beta_s, \quad (7)$$

而稳定过程为

$$\alpha \leq 2\beta_y, \quad (8)$$

试验证明 $\beta_s \approx \beta_y$ 。通常 $\beta_y = (0.7-0.8) \beta_s$ ，对于轧制的稳定过程：

$$\alpha \leq (1.4 \sim 1.6) \beta_s. \quad (9)$$

可见稳定过程中的轧入条件可以称做“变容易了”的条件。为此就企图在 $\alpha > \beta_s$ 的条件下实现轧入，因此需要创设在轧入开始时的一些特殊条件。这些条件就是采用撞击（加速）和将轧件推向轧辊。实际中也采用提高在开始轧入时的摩擦系数（也就是 β_s 增大）的方法，例如降低这时的轧辊转速，以及在轧件头端撒上砂粒。为了提高摩擦系数 β_s ，

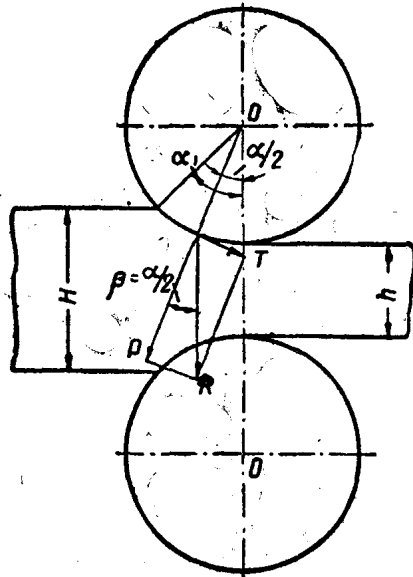


图3 轧入角最大时的稳定过程简图

軋軋的表面制成不光滑的，并且在某些情况下在軋軋表面上还有專門的刻痕和焊痕。上述各种措施的目的是为了在軋入角 α 接近于两倍的 β 的情况下保証金屬軋入軋軋，这就可以充分利用稳定过程所許可的最大軋入角 $\alpha = 2\beta$ 的条件。

目前在实际条件下将金屬推入軋軋的方法应用比較少（例如在自动軋管机上軋制鋼管）。但是如果考虑到軋入角超过 β ，每一度都能大大提高压下量，就会清楚地理解这一因素对提高軋鋼

机生产率，特別对提高軋制大断面鋼材（初軋坯、鋼坯、型钢等）的軋鋼机的生产率具有巨大意义。

然而并不是在所有的情况下都能利用最大軋入角。时常在决定性因素是断面的精确度或金屬对軋軋的压力时（特别是在軋制鋼板和带鋼时），所用的压下量小于最大压下量，而在 $\alpha < \beta$ 的条件下金屬軋入軋軋并无困难。在这种情况下，摩擦力大于实现軋制的稳定过程所需的数值，并且只有产生前滑才能保持变形区中力的平衡。

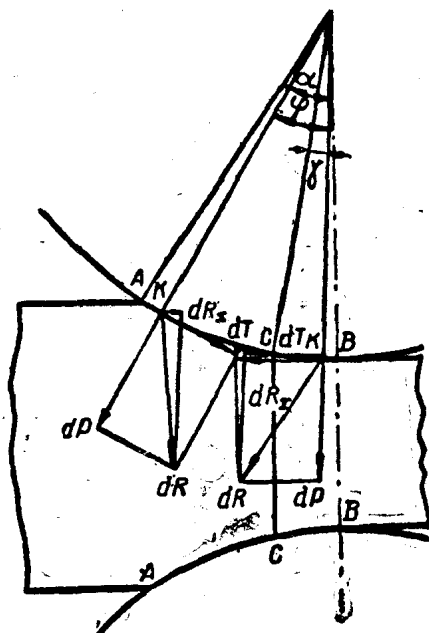


图 4 有前滑的軋制图

衡，也就是在出口处某一軋入弧长度上的金屬沿軋軋向前滑动。

在 $\alpha < \beta$ 条件下*的軋制图如图 4 所示。

流动界綫（临界面）CC 把变形区分为两部分：从 A 到 C 为后滑区，从 C 到 B 为前滑区。在后滑区金屬落后于軋軋；在前滑区金屬的运动比軋軋快，而在临界面內金屬和軋軋的水平速度

* 以下得出的結論在 $\beta_s < \alpha < \beta$ 条件下同样是正确的。

相等。由上所述可知軋輥作用在金屬上的摩擦力在后滑区方向与軋制方向相同，而在前滑区却与軋制方向相反。

在每个区的接触面上任取一点 K ，并取无限小压力 dP ，摩擦力 dT 和合力 dR 等向量。

合力 dR 在水平方向的投影等于：

在后滑区

$$dR_x = dR \cdot \sin(\beta_y - \varphi), \quad (10)$$

在前滑区

$$dR_x = dR \cdot \sin(\beta_y + \varphi). \quad (11)$$

由于軋制在一定的速度下进行，并且作用力都平衡，所有各力之和等于零（力 dR 消去），得：

$$\int_r^{\alpha} \sin(\beta_y - \varphi) d\varphi - \int_0^r \sin(\beta_y + \varphi) d\varphi = 0. \quad (12)$$

积分，得：

$$\cos(\beta_y - \alpha) - \cos(\beta_y - r) + \cos(\beta_y + r) - \cos\beta_y = 0;$$

$$\cos(\beta_y - \alpha) - \cos\beta_y \cos r - \sin\beta_y \sin r + \cos\beta_y \cos r$$

$$- \sin\beta_y \sin r - \cos\beta_y = 0;$$

$$\sin r = \frac{\sin\alpha \sin\beta_y + \cos\alpha \cos\beta_y - \cos\beta_y}{2\sin\beta_y}.$$

以 $\cos\beta_y$ 除分子和分母，得：

$$\sin r = \frac{\sin\alpha \operatorname{tg}\beta_y + \cos\alpha - 1}{2\operatorname{tg}\beta_y} = \frac{\sin\alpha \operatorname{tg}\beta_y - 2\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{2\operatorname{tg}\beta_y}. \quad (13)$$

化簡并取 $\sin r \approx r$ 和 $\operatorname{tg}\beta_y \approx \beta_y$ ，得：

$$r = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\beta_y} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 \quad \text{或} \quad r = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta_y} \right)^*. \quad (14)$$

从 (14) 式可以看出，临界角 r 在 $\alpha = \beta_y$ 时为最大值，它等于 $0.25\beta_y$ ，而在 $\alpha = 2\beta_y$ 时等于零。在 $\beta_y < \alpha < 2\beta_y$ 时 $0.25\beta_y > r > 0$ ，而在 $0 < \alpha < \beta_y$ 时得 $0 < r < 0.25\beta_y$ 。这样，在 $\alpha = \beta_y$ 时前滑最大。在实际中这种条件是常有的。

* (14) 式叫做巴甫洛夫公式。

从确定临界角 r 可以容易地确定前滑的数值。为此必须应用轧件的体积 V_r 方程式， v_r 是根据临界面计算的体积，在临界面内金属的速度 v_r 和轧辊速度的水平投影 $v \cos r$ 相等。

$$V_r = v \cdot \cos r \cdot h_r \cdot b_r. \quad (15)$$

用作图的方法可得：

$$h_r = h + D(1 - \cos r). \quad (15a)$$

$D(1 - \cos r)$ 表示从临界面到金属出辊的压下量。

由此可以演算出轧制一道的总压下量（参看图1）：

$$H - h = D(1 - \cos \alpha). \quad (15b)$$

这个金属体积用速度 v_h 和出辊截面的尺寸 h 和 b 表示，得：

$$V_h = v_h \cdot h \cdot b. \quad (16)$$

(15) 和 (16) 相等，得：

$$v \cos r [h + D(1 - \cos r)] b_r = v_h \cdot h \cdot b. \quad (17)$$

以 $h \cdot b$ 除 (17) 式的两边，得：

$$v_h = v \frac{h + D(1 - \cos r)}{h} \cos r \frac{b_r}{b}.$$

前滑系数 S 等于：

$$S = \frac{v_h}{v} = \frac{h + D(1 - \cos r)}{h} \cos r \frac{b_r}{b}. \quad (18)$$

取 $b_r = b^*$ 并且由于 r 角很小，可以取 $1 - \cos r \approx \frac{r^2}{2}$ 和 $\cos r \approx 1 - \frac{r^2}{2}$ 简化 (18) 式。

经过代换和化简，(18) 式变为：

$$S = \left(1 - \frac{r^2}{2}\right) \left(1 + \frac{D}{h} \frac{r^2}{2}\right). \quad (19)$$

数值 $1 - \frac{r^2}{2}$ 和 1 相差很少，所以 (19) 式又可简化，最后

$$\text{得到：} \quad S = 1 + \frac{r}{h} r^2. \quad (20)$$

前滑用与轧辊圆周速度的比值按百分比表示：

* 指接触面和金属宽展的宽度，参看下页。

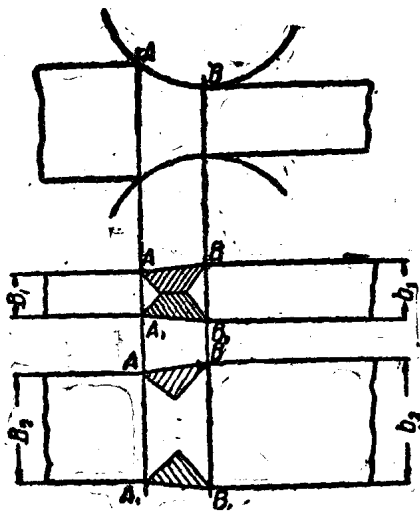
$$5\% = \frac{r}{h} r^2 100\% \quad (21)$$

- 軋制厚度不大的軋件时（鋼板、扁鋼以及其他）前滑为 10~15%，在一般情况下前滑为 3~5%。

軋制金屬时，压缩后不仅軋件伸长，而且发生宽展，也就是金屬在与軋制方向垂直的方向上流动，宽展用最終宽度 b 比原始宽度 B 的增量表示。

軋制时产生的宽展可以用力学中著名的最小周边原理或是塑性变形时的最小功原理来解释。

现在来比較在相同的軋軋中以相同的压下量軋制厚度相等宽度不等的軋件（图 5）。在长度相等的变形区中軋件的宽度是不同的。



作 A, A_1, B, B_1 各角的等分角綫，相交的分角綫把变形区分成两个梯形和两个三角形。

根据最小周边原理，塑性变形时质点将沿着出变形区的最短距离的方向流动。这说明图中划斜綫部分的金屬将趋向軋件宽度的方向流动，而无斜綫部分的金屬沿軋件縱向流动。虽然这个图示很簡略，因为連續物質的所有质点有相当复杂的相互

作用，但是这个图示不但揭示了宽展的性质，而且给出了計算宽展的一定的量的关系。

对窄的和宽的軋件，也就是对窄的和宽的变形区进行比較后，可以看出，在相同的压缩下，窄变形区中发生的相对宽展較大，也就是：

$$\frac{b_1 - B_1}{B_1} > \frac{b_2 - B_2}{B_2},$$

因为在这种情况下斜綫部分的面积所占 $A_1 ABB_1$ 梯形面积的百分率比宽变形区时的大。绝对宽展量 $b - B$ 和斜綫部分的面积大小有关，也和边缘的拉缩有关，因为宽度很大时，中部质点的延伸将使侧边部分大大伸长。大家知道，在轧件的宽度大于变形区长度时宽展减小（由于边缘拉缩），轧件宽度小于变形区长度时宽展也降低（因为斜綫部分的面积急剧下降）。因此，轧件的宽度接近变形区的长度时宽展为最大。

计算宽展可能以采用 A. П. 契克瑪辽夫 (Чекмаев) [50] 的公式较为合适：

$$b - B = \frac{2(H-h)b_0 k}{(H+h) \left[1 + (1+\alpha) \left(\frac{b_0}{r\alpha} \right)^n \right]}, \quad (22)$$

式中 $r\alpha$ ——轧入弧长度，约等于弦长 $\sqrt{r(H-h)}$ 。这个式子可以容易地用作图法得出。

$\frac{b_0}{r\alpha}$ 项考虑了变形区宽度与长度比值的影响（相当于图 5 斜綫部分的面积相对值）；指数 n 在 $b_0 \leq r\alpha$ 时取为 1， $b_0 \geq r\alpha$ 时取为 2。 $1+\alpha$ 项考虑了工具形状的影响，也就是轧辊的曲率，当曲率增大时（ α 角增大），延伸增加，宽展减小。 k 值为孔型侧壁引起的宽展限制系数。在光面轧辊上轧制时 $k=1$ ，在孔型中非自由宽展的情况下 k 值变动范围为 1~0（在后一种情况下，孔型宽度与送入轧件的宽度相同，宽展完全被限制）。为简化计算，轧制宽轧件时可取 B 代替 b_0 值。

从 (22) 式可以看出，宽展随着压下量的增大而增大，随厚度的增大而减小。 $\frac{2(H-h)}{H+h}$ 项叫做相对压下量。可见，宽展量并非与压下量和金属厚度有关，而与相对压下量的数值有关。这说明以小压下量轧制薄轧件时产生的宽展可能和以大压下量轧制厚

* $b_0 = 0.5 (B+b)$ — 变形区的平均宽度。

軋件时的寬展相同。这时 (22) 式的其余部分仍然不变。

寬展的現象与軋制的許多因素有关，目前仍然沒有充分的研究。許多人提出过計算寬展的各种公式，但是这些公式都不能得出精确的数据，其中有些公式是从不可靠的寬展图示导出的，因而是不适用的。

作为例子，我們来計算輓径 300 公厘軋鋼机上以压下量 4 公厘在孔型中軋制 $H \times B = 14 \times 50$ 公厘扁鋼的寬展。

已知： $H - h = 4$ 公厘， $h = 14 - 4 = 10$ 公厘； $H + h = 14 + 10 = 24$ 公厘； $r = 0.5 \cdot 300 = 150$ 公厘； $\alpha = \arccos \left(1 + \frac{H-h}{D} \right)^*$
 $= \arccos \left(1 - \frac{4}{300} \right) = \arccos 0.9367$ ； $\alpha = 9^\circ 20'$ 或 $\alpha = 0.163$ 弧度； $r\alpha = 150 \cdot 0.163 = 24.4$ 公厘。

取寬展的限制系数 $k = 0.7$ 。

将数值代入 (22) 式得到絕對寬展等于：

$$b - B = \frac{2 \cdot 4 \cdot 50 \cdot 0.7}{24 \left[1 + 1.163 \left(\frac{50}{24.4} \right)^2 \right]} = 2.3 \text{ 公厘。}$$

出孔型后扁鋼的寬度等于：

$$50 + 2.3 = 52.3 \text{ 公厘。}$$

相对寬展为：

$$\frac{b - B}{B} = \frac{2.3}{50} = 0.046 \text{ 或 } 4.6\%。$$

在光面軋輓中軋制时，自由寬展将等于 $\frac{2.3}{0.7} = 3.3$ 公厘，也就是大 1 公厘。

軋制的目的是延伸金屬和得到所需尺寸和形状的制品。所以减小延伸的寬展在多数情况下不希望产生，但是，寬展是不可避免的，这是軋制所具有的特点。限制寬展并非总是可能的，因为它会引起金屬进入孔型的輓縫而产生废品。在計算孔型，选择其形状，以及孔型在軋輓中的切入方法时必须考虑到金屬的寬展。

* 由公式： $H - h = D (1 - \cos \alpha)$ 导出。