



高职高专规划教材

金属塑性变形技术应用

Metal Plastic Deformation Technology Application

孙颖 张慧云 郑留伟 赵晓青 主编

融媒体教材



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

能量小贴士	
模块4 轧制变形能力分析	
模块背景	
学习目标	
任务4.1 测定金属变形量及变形系数	
课程思政 Q460 高强度钢筑就鸟巢脊梁	
任务情境	
任务背景知识	
4.1.1 轧制变形的表示方法	
4.1.2 总延伸系数、部分延伸系数与平均延伸系数	
4.1.3 积累压下率与道次压下率的关系	
实验4-1 金属变形量与变形系数的测定	
知识拓展——长度测量工具的发展	
思考与练习	
能量小贴士	
任务4.2 分析变形区主要参数	
钢铁人物 河钢舞钢“轧钢状元”任亚强	
任务情境	
任务背景知识	
4.2.1 轧制过程基本概念	
4.2.2 变形区及其主要参数	
4.2.3 轧制速度与变形速度	
知识拓展——轧辊知识知多少	
思考与练习	
能量小贴士	
任务4.3 判断轧机咬入能力及分析改善咬入的措施	
钢铁材料 重器的钢铁脊梁：国产航母甲板用钢	
任务情境	
任务背景知识	
4.3.1 实现轧制过程的条件	
4.3.2 最大压下量的计算	
知识拓展——改善咬入的措施答疑	
思考与练习	
能量小贴士	
模块5 轧制时宽展和前滑后滑的分析	
模块背景	
学习目标	

任务 4.3 判断轧机咬入能力及分析改善咬入的措施



重器的钢铁脊梁：国产航母甲板用钢

航空母舰，被称为“浮动海上机场”，是一个国家海军装备和国防实力的象征。2012年，我国第一艘航空母舰辽宁舰正式入列中国海军。2017年，我国第二艘航母，也是我国真正意义上的第一艘国产航空母舰（自行改进研发而成），山东舰正式下水。我国国产航母的建造，迈入新的篇章。

甲板是航母舰体结构的关键部位，其功能和作用十分特殊。飞行甲板不但要承受重达二三十吨的舰载机在起飞和降落过程中产生的强烈冲击和高摩擦力，还要承受喷气式飞机高达几千度的高温灼烧。因性能要求极高，全世界仅有少数几个国家可以生产真正用于航母建造的甲板用钢，但这些国家拒绝给我国提供生产甲板钢的技术，并在技术上实施完全垄断。几经研发和努力，我国的鞍钢集团，终于具备了生产甲板钢的能力。鞍钢集团钢铁研究院军工产品研究所副所长、我国首艘国产航母甲板用钢的研发负责人赵刚说：“目前，鞍钢是国内唯一生产国产航母用甲板钢的生产基地，我们目前的生产水平已经达到世界领先。”

生产甲板钢所用设备为一重集团制造的世界首台 5000 毫米以上的宽厚板轧机，这样世界顶级的装备“利器”，为国产航母超宽甲板钢的生产提供了保障。然而，尽管具备生产能力，但要想真正生产出合格的产品，并不容易。航母超宽甲板钢要求研制超宽、超长、最厚规格的甲板用钢，面积是常规钢板的四倍。一艘航母的建造，1/3 的工作是进行钢板的焊接。因此，拼焊飞行甲板的钢板面积越大，不仅焊缝数量就越少，而且还能缩短建造周期，提高甲板整体质量。为提高航母的机动性，增加航速，需要减轻船体重量，降低重心，使船体更加平稳，钢板还要有足够的防弹能力，这就需要高强度高韧性的钢板进行保障。因为要同时满足如此多的苛刻要求，所以航母用甲板钢超过了任何一种军用舰船的钢材品质。

赵刚说：“它的力学性能要求特别特别严，它的头尾强度偏差，不会超过 10MPa，它所有的-84 度冲击韧性，都是在 250J 以上，所以说它的质量非常非常好。”

实际上，早在我国首艘国产航母建造之前，在对辽宁舰的前身“瓦良格号”进行修复的时候，鞍钢就已经开始了航母用钢的研制。鞍钢集团钢铁研究院军工所的研究员周丹，从事水面舰船用钢的研发已经 24 年。2008 年，周丹和她的团队接到一项特殊的科研任务——研制用于修复我国第一艘航母辽宁舰的前身“瓦良格”号所用的钢材。在周丹办公桌的笔筒里，保存着一块形状特殊的钢板实验样，这是周丹进行航母用钢科研攻关时保留下来的样品，对称球扁钢。

球扁钢，由球状的头部和扁平的腹板组成的特殊型材，一般用作船舶的龙骨（纵骨）和加强筋，是建造大型船舶的关键材料。而修复瓦良格号所用的是形状特殊的对称球扁

钢。2008年之前我国没有任何一家钢铁企业具备生产对称球扁钢的经验和条件。由于对称球扁钢外形特殊,尺寸差异大,再加上金属流动和孔型设计的因素,因此仅轧制成型就十分困难。由于没有专用的生产线,热处理的效果也不理想,周丹他们只好把球扁钢一个根固定在热处理架上,防止变形,终于保证了产品的生产。

2009年5月,鞍钢为辽宁舰修复生产的200t航母用钢顺利交付。三年后,辽宁舰正式入列中国海军。2013年8月,鞍钢完成了建造首艘国产航母所需的甲板钢、球扁钢等关键型号钢材的生产,为国产航母建造提供了70%的航母专用钢材。2017年4月,我国首艘国产航母,顺利下水。

任务情境

轧制是塑性加工中最重要的一种加工方法,通过轧制可以生产各种板材、型材。轧制的第一个环节也是最重要的一个环节就是咬入,在这一环节中,轧件受到轧辊的摩擦力被带进辊缝中。在实际生产中,有时轧制很顺利,但有时轧件就轧不入,一般称不能咬入。例如,某钢铁企业轧钢厂在粗轧钢坯时偶尔会出现连铸坯头部咬入打滑的情况,如果你是这个轧钢厂的一名技术人员,请你分析可能原因并设想若干解决的办法。



任务引领



任务背景知识

4.3.1 实现轧制过程的条件

为了便于研究轧制过程的各种规律,从最简单的轧制条件开始研究实现轧制过程的条件。

4.3.1.1 咬入条件

在生产实践中可以发现,有时轧制很顺利,但也有时压下量大了,轧件就轧不入。轧件轧不入,一般称为不能咬入。咬入是依靠回转的轧辊与轧件之间的摩擦力,将轧件拖入轧辊之间的现象。轧制过程能否建立,决定于轧件能否被旋转的轧辊咬入。

当轧件接触到旋转的轧辊时,在接触点(实际上是一条沿辊身长度的线)上轧件以一力 P 压向轧辊,如图 4-15 所示。旋转的轧辊即以与作用力 P 大小相同方向相反的力作用到轧件上,为径向的正压力。同时旋转的轧辊与轧件之间有摩擦力,与轧辊旋转方向一致,是切线方向的,与 P 垂直。

因此,对轧件来说,其受 P 及 T 两个力的作用(见图 4-16),按阿蒙顿-库仑定律,摩擦系数 f 为

$$\frac{T}{P} = f$$

$$T = fP \quad (4-36)$$

即

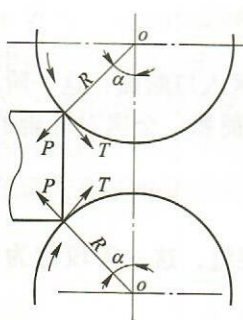


图 4-15 咬入时轧件受力分析

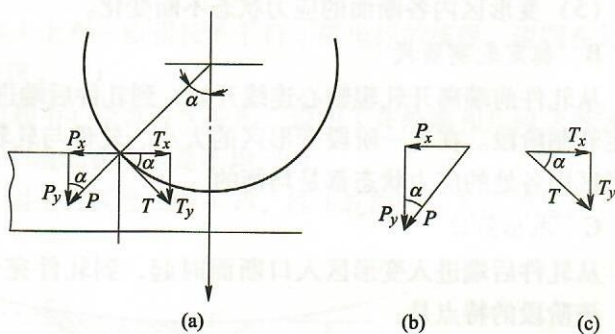


图 4-16 P 和 T 力的分解

由图 4-16 可以看出, P 是外推力,而 T 是拉入力,轧件能否咬入由它们谁占优势来决定。以把 P 和 T 分解成水平方向的分力 P_x 和 T_x ,垂直方向的分力 P_y 和 T_y ,如图 4-16 (b) 和 (c) 所示。垂直分力 P_y 和 T_y 是压缩轧件的,使轧件产生塑性变形,轧件才可咬入。水平分力 P_x 和 T_x 直接影响咬入。显然,当 $P_x > T_x$ 时,不能咬入。当 $P_x < T_x$ 时,能够咬入。所以, $P_x = T_x$ 是咬入的临界条件。

由图 4-16 可知:

$$P_x = P \sin \alpha, \quad T_x = T \cos \alpha$$

当 $P_x = T_x$ 时,则有:

$$P \sin \alpha = T \cos \alpha$$

改写成

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{T}{P}$$

代入式 (4-36), 有:

$$f = \tan \alpha \quad (4-37)$$

$$\begin{cases} \tan \alpha < f & \text{能咬入} \\ \tan \alpha > f & \text{不能咬入} \\ \tan \alpha = f & \text{临界状态} \end{cases}$$

根据物理概念, 摩擦系数可以用摩擦角 β 来表示, 亦即摩擦角 $\tan \beta$ 就是摩擦系数 f , 将 $f = \tan \beta$ 代入式 (4-37) 得出:

$$\begin{cases} \alpha < \beta & \text{能咬入} \\ \alpha > \beta & \text{不能咬入} \\ \alpha = \beta & \text{临界状态} \end{cases}$$

4.3.1.2 轧制过程的三个阶段

A 咬入阶段

轧件前端与轧辊接触的瞬间起, 到前端达到变形区的出口断面, 这一阶段称为咬入阶段。该阶段的特点是:

- (1) 轧件的前端在变形区有三个自由端, 仅有后面有不参与变形的后端。
- (2) 变形区的长度 $0 \rightarrow l = \sqrt{R\Delta h}$ 。
- (3) 变形区内的合力作用点, 力矩均不断变化。
- (4) 轧件对轧辊的压力由 $0 \rightarrow \max$ 。
- (5) 变形区内各断面的应力状态不断变化。

B 稳定轧制阶段

从轧件前端离开轧辊轴心连线开始, 到轧件后端进入变形区入口断面, 这一阶段称为稳定轧制阶段。在这一阶段变形区的大小、轧件与轧辊的接触面积、金属对轧辊的压力、变形区内各处的应力状态都是均衡的。

C 甩出阶段

从轧件后端进入变形区入口断面时起, 到轧件完全通过辊缝, 这一阶段称为甩出阶段。该阶段的特点是:

- (1) 轧件的后端在变形区有三个自由端, 仅前面有不参与变形的后端。
- (2) 变形区的长度 $l = \sqrt{R\Delta h} \rightarrow 0$ 。
- (3) 变形区内的合力作用点, 力矩均不断变化。
- (4) 轧件对轧辊的压力由 $\max \rightarrow 0$ 。
- (5) 变形区内各断面的应力状态不断变化。

4.3.1.3 金属在变形区内的流动规律

A 沿轧件断面高向上变形的分布

轧制时变形分布的理论有均匀变形理论、不均匀变形理论。

均匀变形理论是指由于未发生塑性变形的后端强制作用, 沿轧件断面高度方向上的变形、应力和金属流动的分布都均匀, 因此又称为刚端理论。

不均匀变形理论是指沿轧件断面高度方向上的变形、应力和金属流动的分布都是不均匀的。

(1) 沿轧件断面高度方向上的变形、应力和金属流动都是不均匀的。

(2) 在几何变形区内, 在轧件与轧辊接触表面上, 不但有相对滑动, 而且还有黏着。所谓黏着是指轧件与轧辊间无相对滑动。

(3) 变形不但发生在几何变形区内, 而且也发生在几何变形区以外, 其变形分布都是不均匀的。这样轧制变形区可分为变形过渡区、前滑区、后滑区和黏着区。

(4) 在黏着区内有一个临界面, 在这个面上金属的流动速度分布均匀, 并且等于该处轧辊的水平速度。

大量实验证明, 不均匀变形理论是比较正确的, 即沿轧件断面高度方向上的变形分布都是不均匀的。其中塔尔诺夫斯基的研究结果如图 4-17 所示。图中曲线 1 所示为轧件表面层各个单元体的变形沿变形区长度 l 上的变化情况; 曲线 2 所示为中层各个单元体的变形沿变形区长度 l 上的变化情况; 图中的纵坐标是以自然对数表示的相对变形。由图 4-17 可以得出:

(1) 在变形区开始处靠近接触表面的单元体的变形, 比轧件中心层的单元体变形要大。

(2) 表面层的金属流动速度比中间层的快。

(3) 曲线 1 和曲线 2 的交点是临界面的位置, 在这个面上金属变形和流动速度是均匀的。在出辊方向出现了相反的现象。

(4) 在变形区的中间部分, 曲线 1 上有一段很长的平行于横坐标的线段, 说明在轧件与轧辊相接处的表面上确实存在黏着区。

(5) 入辊前和出辊后轧件表面层和中心层都发生变形, 说明了在外端和几何变形区之间有变形过渡区, 在这个区域内变形和流动速度也是不均匀的。

塔尔诺夫斯基根据实验研究把轧制变形区绘成图 4-18, 描述轧制时的变形情况。

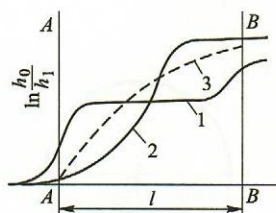


图 4-17 沿轧件断面高度向上变形分布

1—表面层; 2—中心层;
3—均匀变形; A—A—入辊平面; B—B—出辊平面

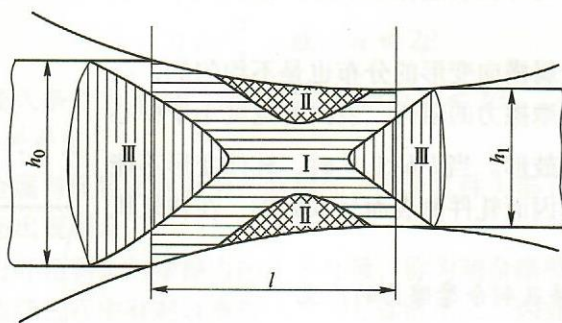


图 4-18 轧制变形区 ($l/\bar{h} > 0.8$)

I—易变形区; II—难变形区; III—自由变形区

当变形区形状系数 $l/\bar{h} > 0.5 \sim 1.0$ 时, 即轧件断面高度相对于变形区长度不大时, 压缩变形完全深入到轧件内部, 中心层变形比表面层变形要大; 当变形区形状系数 $l/\bar{h} < 0.5 \sim 1.0$ 时, 随着变形区形状系数的减小, 外端对变形过程影响变得更为突出, 压缩变形不能

深入到轧件内部，只限于表面层附近的区域。

B 沿轧件宽度方向上的流动规律

根据最小阻力定律，变形区受纵向和横向的摩擦阻力 σ_3 和 σ_2 的作用如图 4-19 所示。

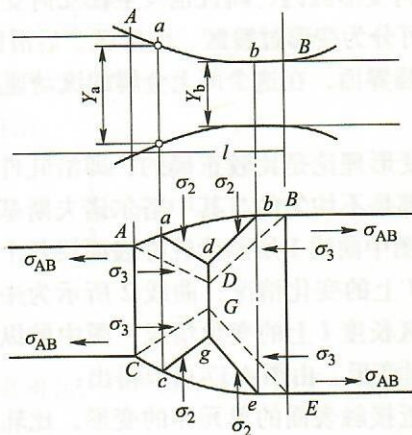


图 4-19 轧件在变形区的横向流动

ADB、CGE 区域：金属沿横向流动增加宽展；

ADGC、BDGE 区域：金属沿纵向流动增加延伸。

外端对变形区金属流动的分布产生一定的影响作用，前后外端对变形区产生张应力。

变形区长度 l 小于宽度 \bar{b} ，故延伸大于宽展。

在纵向延伸区中心部分的金属只有延伸而无宽展，因而其延伸大于两侧，结果在两侧引起张应力。这两种张应力引起的应力以 σ_{AB} 表示，它与延伸阻力 σ_3 方向相反，削弱了延伸阻力，引起形成宽展的区域 ADB 及 CGE 收缩为 adb 和 cge。

事实证明，张应力的存在引起宽展下降，甚至在宽展方向上发生收缩产生所谓“负宽展”。

沿轧件高度方向金属横向变形的分布也是不均匀的，一般情况下接触表面由于摩擦力的阻碍，表面的宽度小于中心层，因而轧件侧面呈单鼓形。当 $l/\bar{h} < 0.5$ 时，轧件变形不能渗透到整个断面高度，因而轧件侧表面呈双鼓形，在初轧机上可以观察到。

4.3.1.4 稳定轧制条件及剩余摩擦力的产生

A 稳定轧制条件

a 金属进入变形区的情况

在咬入过程中，金属和轧辊的接触表面，一直是连续地增加的，如图 4-20 所示。图中 θ' 为轧件咬入后其前端与中心线所成的夹角。从图中可以看出：

$$\begin{cases} \theta' = \alpha & \text{开始咬入} \\ \theta' = 0 & \text{金属完全充满辊隙} \end{cases}$$

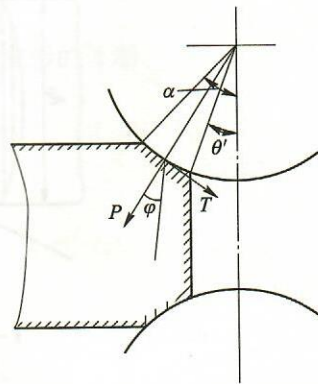


图 4-20 金属进入变形区情况

随着金属逐渐充填变形区, 合力 P 的作用角由原来的 α 变成 φ 角, 如设压力沿接触弧分布均匀, 则 φ 角的大小为

$$\varphi = \frac{\alpha - \theta'}{2} + \theta'$$

即

$$\varphi = \frac{\alpha + \theta'}{2} \quad (4-38)$$

显然, 随 θ' 由 α 变至 0, φ 将由 α 变化至 $\alpha/2$ 。当 $\varphi = \alpha$ 时, 为金属开始咬入; 而当 $\varphi = \frac{\alpha}{2}$ 时, 金属充填整个变形区, 此时一般称作轧制过程建成。

b 建成过程咬入条件

轧制过程建成后, 继续进行轧制的条件仍然应当是水平轧入力 T_x 不小于水平推出力 P_x , $T_x \geq P_x$ 。由图 4-21 有:

$$T_x = T \cos \frac{\alpha}{2}, \quad P_x = P \sin \frac{\alpha}{2}$$

那么, $T_x \geq P_x$ 可写为:

$$T \cos \frac{\alpha}{2} \geq P \sin \frac{\alpha}{2}$$

或

$$T/P \geq \tan \frac{\alpha}{2}$$

亦即

$$\tan \beta = f = \frac{T}{P} \geq \tan \frac{\alpha}{2}$$

由此得出建成阶段的咬入条件:

$$\beta \geq \frac{\alpha}{2} \quad \text{或} \quad \alpha \leq 2\beta \quad (4-39)$$

开始咬入时的咬入条件为 $\alpha \leq \beta$, 而建成过程则为 $\alpha \leq 2\beta$ 。

B 剩余摩擦力的产生

轧件咬入后, 金属与轧辊接触表面不断增加, 随着轧件头部充填辊缝, 水平方向摩擦力克服推出力外, 还出现剩余。

用于克服推出力外还剩余的摩擦力的水平分量, 称为剩余摩擦力。

由于轧件充填辊缝过程中有剩余摩擦力产生并逐渐增大, 因此轧件只要一经咬入, 继续填充辊缝就更容易。

$$N_x = T_x - P_x = T \cos \frac{\alpha}{2} - P \sin \frac{\alpha}{2}$$

从上式可以看出, 摩擦系数越大, 剩余摩擦力越大; 而当摩擦系数为定值时, 随咬入角减小, 剩余摩擦力增大。

C 影响咬入的因素

$$\Delta h = D(1 - \cos \alpha)$$

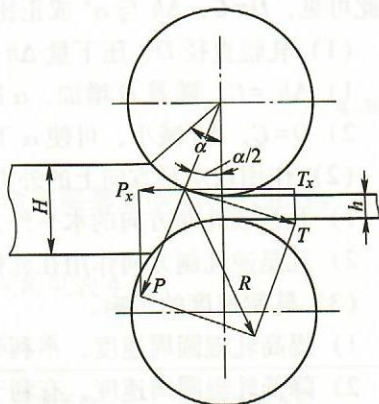


图 4-21 建成过程咬入条件

式中 D ——轧辊直径;

Δh ——压下量;

α ——咬入角。

$$1 - \cos\alpha = 2\sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

当 α 较小时, $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$

$$\Delta h = D \left(2\sin^2 \frac{\alpha}{2} \right) \approx R\alpha^2$$

由此可见, $D=C$, Δh 与 α^2 成正比; $\alpha=C$, Δh 与 D 成正比; $\Delta h=C$, D 与 α 成反比。

(1) 轧辊直径 D 、压下量 Δh 对咬入的影响。

1) $\Delta h = C$, 随着 D 增加, α 减小, 有利于咬入;

2) $D=C$, Δh 减小, 可使 α 下降, 有利于咬入。

(2) 作用在水平方向上的外力对咬入的影响。

1) 凡是顺轧制方向的水平外力, 一般都有利于咬入;

2) 凡是逆轧制方向作用在轧件上的外力, 都不利于咬入。

(3) 轧制速度的影响。

1) 提高轧辊圆周速度, 不利于咬入;

2) 降低轧辊圆周速度, 有利于咬入。

一方面, 提高轧辊圆周速度, 当速度足够大时, 会降低轧辊与轧件之间的摩擦力, 而咬入是靠轧辊与轧件之间的摩擦力进行的, 所以降低摩擦力不利于咬入; 另一方面, 由于轧辊速度较大, 因此相对于轧件来说, 轧件的惯性滞后作用将妨碍轧件咬入。

(4) 轧辊表面状态的影响。轧辊表面越粗糙, 摩擦系数越大, 越有利于咬入。

(5) 轧件形状对咬入的影响。轧件前端与轧辊接触面越大, 轧件越容易咬入, 轧制钢锭时采用小头进钢。

(6) 孔型形状对咬入的影响。

1) 型钢轧机: 有较小的孔型侧壁斜度时, 有利于咬入。

2) 菱形轧件: 入方孔容易咬入, 因为轧件前端容易被孔型侧壁夹持。

3) 椭圆形轧件: 入圆孔不容易咬入, 因为不易被孔型侧壁夹持。

D 改善咬入的措施

(1) 提高摩擦系数。

1) 轧辊刻痕、堆焊或用多边形轧辊。

2) 合理使用润滑剂。

3) 清除炉尘和氧化铁皮。

4) 在现场不能自然咬入的情况下, 撒一把沙子或冷氧化铁皮。

5) 当轧件温度过高, 引起咬入困难时, 可将轧件在辊道上搁置一段时间, 使钢温适当下降后再喂入轧机。

6) 增大孔型侧壁对轧件的支持力可改善轧件的咬入。

7) 合理调整轧制速度。

(2) 降低咬入角。

1) 使用合理形状的连铸坯, 可以把轧件前端制成楔形或锥形。

2) 强迫咬入, 用外力将轧件顶入轧辊中, 由于外力的作用, 轧件前端压扁, 合理作用点内移, 从而改善了咬入条件。

3) 减小本道次的压下量可改善咬入条件。

4.3.2 最大压下量的计算

压下量是限制轧制咬入的关键因素, 压下量过大轧件将不能咬入。为保证轧件能顺利咬入, 某道次压下量一般不超过该道次咬入条件所允许的最大压下量。最大压下量可按最大咬入角计算, 也可按摩擦系数计算。

(1) 按最大咬入角 α_{\max} 计算最大压下量。

$$\Delta h_{\max} = D_g (1 - \cos \alpha_{\max}) \quad (4-40)$$

式中 Δh_{\max} ——最大压下量;

D_g ——轧辊工作直径, 为了保证在轧辊整个寿命周期都能顺利咬入轧件, 一般取旧辊时的最小工作直径;

α_{\max} ——最大咬入角, 不同轧制条件下的最大咬入角见表 4-1。

表 4-1 不同轧制条件下的最大咬入角

轧制条件	摩擦系数	最大咬入角/(°)
在有刻痕或堆焊的轧辊上热轧钢坯	0.45~0.62	24~32
热轧型钢	0.36~0.47	20~25
热轧钢板或扁钢	0.27~0.36	15~20
在一般光面轧辊上冷轧钢板或带钢	0.09~0.18	5~10
在镜面光泽轧辊(粗糙度达 $\frac{0.05}{\sqrt{}}$)上冷轧板带钢	0.05~0.08	3~5
辊面同上, 用蓖麻油、棉籽油、棕榈油润滑	0.03~0.06	2~4

(2) 按摩擦系数 f 计算最大压下量。

$$\Delta h_{\max} = D_g \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right) \quad (4-41)$$

式中 D_g ——轧辊最小工作直径;

f ——摩擦系数, 不同轧制条件下的摩擦系数可按表 4-1 选取。

【例 4-1】假设热轧时轧辊直径 $D=800\text{mm}$, 摩擦系数 $f=0.3$, 求咬入条件所允许的最大压下量及建立稳定轧制过程后, 利用剩余摩擦力可以达到的最大压下量(其中, 咬入角的大小为摩擦角的 1.5 倍)。

解: (1) 计算咬入条件所允许的最大压下量。

$$\Delta h_{\max} = D \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} \right) = 800 \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+0.3^2}} \right) = 34\text{mm}$$

(2) 计算在建立稳定轧制过程后, 利用剩余摩擦力可以达到的最大压下量。

取 $\alpha = 1.5\beta = \arctan 0.3 = 1.5 \times 16.7 \approx 25^\circ$

则 $\Delta h'_{\max} = D(1 - \cos\alpha_{\max}) = 800 \times (1 - \cos 25^\circ) \approx 75\text{mm}$

利用剩余摩擦力可以增加的压下量为:

$$75 - 34 = 41\text{mm}$$



知识拓展——改善咬入的措施答疑

就改善咬入的措施，轧钢班学生在课后和企业王工进行了如下对话。

王老师您好，我们都知道咬入角和摩擦系数是影响轧辊咬入轧件的两个因素。当摩擦系数一定时，为使轧件顺利咬入，必须减小咬入角，那都有些什么方法呢？

学生

王工 当压下量一定时，我们可以更换大直径轧辊。当轧辊直径一定时，可以减小压下量。但是轧机一旦确定，轧辊直径一般改变不大，而减小压下量又对提高生产率不利，为了解决这一矛盾，我们可以采取以下措施：

(1) 当压下量超过允许数值时，把轧件端部加工成截锥形，以减小咬入角，初轧机轧制钢锭时采用小头（就是厚度较小的一端）进钢。

(2) 降低咬入时的轧制速度，增加摩擦系数，改变轧制速度，在直流电机驱动的轧机上，是容易做到的，而对大多数不可调速的轧钢机来说几乎是不可能的。

(3) 可以应用刻痕或堆焊的轧辊，增加轧辊的摩擦系数。但刻痕对轧件的表面质量产生有害影响，所以这种方法通常只在粗轧前几道次使用。

(4) 利用冲击改善咬入条件就是常说的强迫喂钢，实际上是在冲击力作用下轧件前端撞成锥形，减小咬入角来改善咬入。

我明白了，谢谢王老师详细的讲解。另外，我们老师在课上说改善咬入还可以将高温轧件在辊道上搁置一段时间，使钢温适当降低后再喂入轧机，为什么轧制温度过高轧件不容易咬入？

学生

王工 这是因为钢在加热时会产生粗而厚的氧化铁皮，使摩擦系数增大。

摩擦系数增大应该好咬入啊。学生

王工 但是这层铁皮会很快脱落，脱落后高温金属在空气中又会生成细而薄的氧化铁皮，使摩擦系数下降。另外，在高温条件下钢本身的摩擦系数会急剧下降，因此这两方面都使摩擦系数下降，因此轧件温度过高时不容易咬入。

哦哦，原来是这样，太感谢王老师了。

学生

王工 不客气，有问题随时沟通。



思考与练习

1. 选择

(1) 咬入角指 ()。

A. 咬入弧对应的圆心角

B. 咬入弧

C. 轧辊圆弧切线与钢板表面的角

D. 轧辊与钢板接触点到轧辊中心连线

(2) 轧制咬入时降低轧制速度是为了 () 摩擦系数。

A. 增加

B. 减少

C. 不改变

D. 不能确定

(3) 咬入角，轧辊半径和压下量三者之间的关系是 ()。

A. $\Delta h = 2R(1 - \cos\alpha)$

B. $\Delta h = 2R(1 + \cos\alpha)$

C. $\Delta h = 2R(1 - \sin\alpha)$

D. $\Delta h = 2R(1 + \sin\alpha)$

(4) 关于改善咬入条件，下列说法正确的是 ()。

A. 压下量一定时，增大辊径，容易咬入

B. 减小轧辊摩擦系数，容易咬入



知识闯关
分析改善
咬入的措施

- C. 辊径一定时, 加大压下量, 容易咬入
D. 以上说法都不对
- (5) 摩擦角 () 咬入角时, 轧件才能被轧辊咬入。
A. 大于 B. 小于 C. 等于 D. 小于或等于
- (6) 在轧钢生产过程中, 当咬入角的正切值 () 轧辊与轧件间的摩擦系数时, 轧件才能被咬入。
A. 大于 B. 小于 C. 超过 D. 等于
- (7) 压下量与轧辊直径及咬入角之间存在的关系为 ()。
A. $\Delta h = D(1 - \cos\alpha)$ B. $\Delta h = D(1 - \sin\alpha)$
C. $\Delta h = D(1 - \tan\alpha)$ D. $\Delta h = D(1 + \tan\alpha)$
- (8) 轧辊咬入轧件的条件 () (μ 为轧辊与轧件之间的摩擦系数)。
A. $\mu > \tan\alpha$ B. $\mu < \tan\alpha$ C. $\mu = \tan\alpha$ D. $\tan\alpha$ 与 μ 无关
- (9) 轧件被轧辊咬入的力是轧辊与轧件之间的 ()。
A. 张力 B. 摩擦力 C. 轧制力 D. 弹力
- (10) 在其他条件不变的情况下, 增加轧辊工作直径将使咬入角的数值 ()。
A. 增加 B. 减少 C. 不变 D. 增加或不变
- (11) 在轧辊轧制情况下, 以下 () 情况导致轧件咬入的难度大。
A. 大压下量、低速轧制 B. 小压下量、高速轧制
C. 大压下量、高速轧制 D. 小压下量、低速轧制
- (12) 下面 () 不能改善咬入条件。
A. 高速咬入 B. 清除炉生氧化铁皮
C. 轧件头部作成楔形 D. 辊面刻痕或堆焊
- (13) 进行轧制时轧件被咬入需满足条件是 ()。
A. $\beta \geq \alpha$ B. $\beta \geq \alpha/2$ C. $\beta \leq \alpha$ D. $\beta \leq \alpha/2$

2. 判断

- () (1) 轧制的咬入角越小, 咬入越容易。
() (2) 轧制的速度加大, 不利于轧件咬入。
() (3) 轧辊表面越粗糙, 轧件越不容易咬入。
() (4) 当压下量一定时, 轧辊直径越大, 轧件越容易咬入。
() (5) 轧制时压下量越大, 则咬入角越大。
() (6) 增加摩擦系数是改善咬入的唯一方法。
() (7) 钢温越高越有利于咬入。
() (8) 压下量大, 轧件容易咬入。
() (9) 轧辊转速越低, 轧件越容易咬入。
() (10) 变形速度就是工具的运动速度。

3. 简答

在轧制过程中, 为了改善咬入通常可以采用增大摩擦系数和利用剩余摩擦力的方法。试述改善咬入的具体方法。

4. 计算

- (1) 假设热轧时轧辊直径 $D = 1000\text{mm}$ 的轧机上轧制钢锭, 摩擦系数 $f = 0.4$, 轧制前

厚度 $H=400\text{mm}$ 。求自然咬入时可能的最大咬入角和轧件轧后的厚度，以及利用剩余摩擦力可以达到的最大压下量。其中，利用剩余摩擦力可产生咬入角的大小为摩擦角的 1.5 倍。

(2) 厚度 $H=100\text{mm}$ 的轧件在 $D=500\text{mm}$ 的轧机上轧制，若最大允许咬入角 20° ，求出：

① 最大允许压下量；

② 若在 $D=500\text{mm}$ 轧机上以延伸系数等于 2 进行该道次轧制，咬入角应为多少才行？

③ 轧辊直径多大时才能以咬入角为 20° ，延伸系数等于 2 的情况下完成该道次轧制（设轧制时忽略宽展）。



能量小贴士

子曰：“不愤不启，不悱不发。举一隅不以三隅反，则不复也。”——《论语》