

实验 1 $P-h$ 图的测定：塑性曲线

一、实验目的

实验教学是本门课程的重要教学环节，其目的是使学生了解实际生产中的控制数学模型的运行方法，为将来从事相关技术工作和科学研究奠定基础。

本门课程实验课的内容为测定轧机轧制时的轧件塑性变形曲线，并与相关课程上已进行的轧机自然刚度变形曲线合成，绘制 $P-h$ 图， $P-h$ 图是板厚控制的基础。

- 1、了解数学模型在实际生产中的使用。
- 2、了解轧制监控与轧制数学模型控制功能。
- 3、掌握轧机板厚控制的 $P-h$ 图知识。

二、实验原理

1、轧件的塑性变形曲线

轧制压力方程是关于轧后轧件厚度 h 的非线性方程，当把除 h 以外的所有变量视为常量时，可以得到轧制压力 P 和轧后轧件厚度 h 的关系曲线，称为轧件的塑性变形曲线。

轧件的塑性变形曲线的关系式表示为 $P = f(h)$ ，轧件塑性变形曲线的斜率，称为轧件的塑性刚度系数，表示为 $W = -\partial P / \partial h$ 。

轧件塑性变形曲线是非线性的，但在一般轧机使用的压下量范围内基本是线性的，因此轧件的塑性方程可近似地表示为

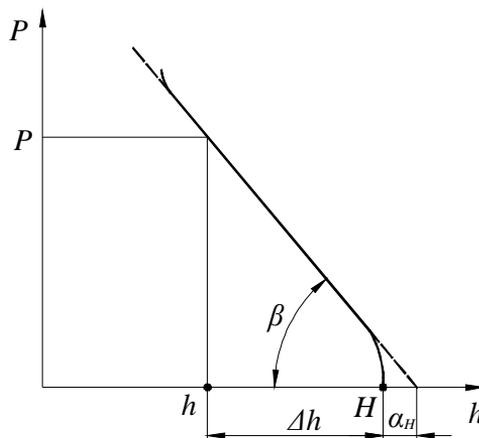
$$P = W(\Delta h + \alpha_H)$$

式中 Δh —— 压下量， $\Delta h = H - h$ ；

α_H —— 轧件塑性变形曲线直线段延长线与横坐标的交点离曲线原点的距离。

轧件塑性刚度系数 W 反映了轧件变形的难易程度，即轧件的软硬程度，它与一系列因素有关，在塑性曲线的近似直线段范围内，表示为

$$W = W(H, T_f, T_b, \mu, \sigma_s) = \operatorname{tg} \beta$$



轧件的塑性变形曲线

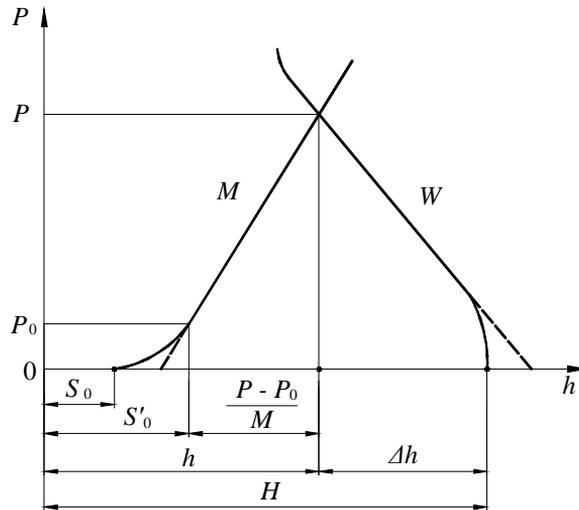
2、塑性曲线的测定方法

在轧件轧前厚度、张力、摩擦系数及变形抗力等不变的条件下，改变轧件轧后厚度 h ，可测得一系列相对应的轧制压力 P 。根据测得的数据，即可绘制出轧件塑性变形曲线，进而得到轧件塑性刚度系数。

3、 $P-h$ 图

轧机的弹跳曲线与轧件的塑性曲线及其方程从不同的方面反映了轧制压力 P 与轧件厚度 h 的关系。采用图解法，将轧机弹跳曲线和轧件的塑性曲线进行合并绘制在同一图上，得到轧机具体轧制条件下的弹塑性曲线，又称 $P-h$ 图。

$P-h$ 图直观地表示了机座弹性变形和轧件塑性变形的耦合情况,可用于综合研究变形区轧辊与轧件间的相互作用力与变形的关系,是目前分析板厚差和板厚控制问题的有力工具和板带材厚度控制的理论基础。



轧机弹塑性曲线 ($P-h$ 图)

三、实验器材

实验轧机成套设备	1 台
塞尺	1 支
游标卡尺	1 支
相同厚度铝板带原料轧件	15 个

四、实验内容及步骤

- 1、检查实验轧机,保证轧机正常运转。
- 2、调整好轧制力测试系统。
- 3、准备好相同厚度的原料铝板带轧件。

4、设定轧机空载辊缝数初始值，使轧机初道次压下量为 0.1mm(可根据实际情况调整)，以塞尺保证测量辊缝。轧制三块原料铝板轧件，记录轧制力数据和轧件出口厚度。

5、调整轧机空载辊缝数值，增加 0.1mm 压下量。再轧制三块新的原料铝板轧件，记录轧制力数据和轧件出口厚度。

6、重复第 5 步，将 15 块铝板带轧件轧制完毕。

7、整理数据，绘制此参数的铝板带轧件的塑性变形曲线。

8、结合已有的轧机自然刚度变形曲线，绘制弹塑性变形曲线 ($P-h$ 图)。

五、实验要求

- 1、将实验原理和过程写入实验报告。
- 2、将每次轧制的轧制力数据和轧件出口厚度数据写入实验报告。
- 3、绘制轧件的弹塑性变形曲线 ($P-h$ 图)。

实验2 $P-h$ 图的应用：来料板厚引起的板厚偏差

一、实验目的

实验教学是本门课程的重要教学环节，其目的是使学生了解实际生产中的控制数学模型的运行方法，为将来从事相关技术工作和科学研究奠定基础。

本门课程实验课的内容为观察来料板厚波动对轧件出口板厚偏差的影响。

- 1、了解数学模型在实际生产中的使用。
- 2、了解轧制监控与轧制数学模型控制功能。
- 3、掌握不同轧件入口厚度对轧后板厚偏差的影响。

二、实验原理

1、造成轧件厚度波动的原因

(1) 由轧件本身工艺参数波动造成。包括来料头尾温度不均、水印、来料厚度不均、化学成分偏析造成的硬度（变形阻力）不均等。

(2) 由轧机参数变动造成。包括支撑辊偏心、轧辊热膨胀、轧辊磨损、轴承油膜厚度变化等。这些将在后续部分详细讲解。

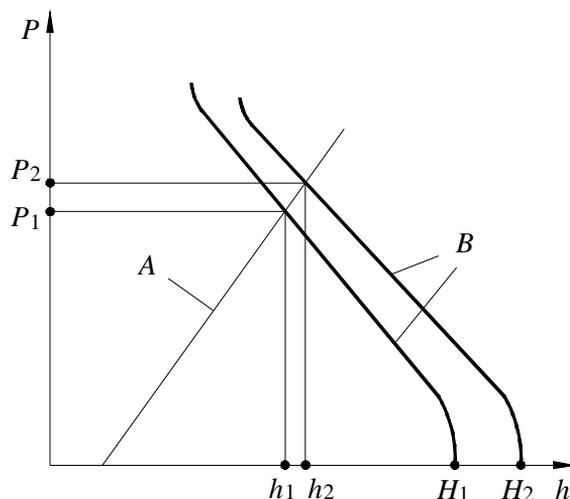
(3) 由于工艺等其他原因造成的厚差。

2、来料板厚对轧件出口板厚偏差的影响

轧制压力波动是造成轧件厚度波动的主要因素。所有影响轧制压力的因素都会影响轧件塑性变形曲线的相对位置和斜率，通过改变弹跳曲线和塑性曲线的交点位置而影响轧件的实际轧出厚度。

当来料厚度 H 增大时，塑性曲线 B 的起始位置右移，轧制压力增

大，轧出厚度 h 也增大；反之，塑性曲线 B 的起始位置左移，轧制压力减小，轧出厚度 h 也减小。所以，当来料厚度不均匀时，轧件的轧出厚度就会出现相应的波动。



来料板厚对对轧出厚度的影响

在设定辊缝不变条件下， $H_2 > H_1$ ， $h_2 > h_1$ ， $\Delta h_2 > \Delta h_1$ ， $P_2 > P_1$ 。

三、实验器材

实验轧机成套设备	1 台
塞尺	1 支
游标卡尺	1 支
不同厚度铝板带试件	15 个

四、实验内容及步骤

- 1、检查实验轧机，保证轧机正常运转。
- 2、调整好轧制力测试系统。
- 3、准备好上次实验轧出的 15 块不同厚度的铝板轧件作为本次实

验的轧件原料。

4、以所有原料铝板带中最薄的为准，设定轧机空载辊缝数值比最薄的板带小 0.2 mm（可根据实际情况调整），为恒定值，以塞尺测量辊缝。

5、将铝板轧件按照厚度不同排序，从最厚的轧件开始，依次进行轧制。每次轧制记录原料铝板轧件的厚度、轧制力数据和轧件出口厚度。

6、整理数据，在 $P-h$ 图上示意不同厚度的铝板轧件的弹塑性变形曲线，并分析。

五、实验要求

- 1、将实验原理和过程写入实验报告。
- 2、将每次轧制的轧制力数据和轧件出口厚度数据写入实验报告。
- 3、在 $P-h$ 图上示意不同厚度的铝板轧件的弹塑性变形曲线。
- 4、分析铝板轧件来料厚度对出口板厚的影响。

实验3 $P-h$ 图的应用：调压下

一、实验目的

实验教学是本门课程的重要教学环节，其目的是使学生了解实际生产中的控制数学模型的运行方法，为将来从事相关技术工作和科学研究奠定基础。

本门课程实验课的内容为通过调压下实现对来料板厚波动引起的轧件出口板厚偏差进行控制，并在 $P-h$ 图中理解其计算方法和预期效果。

- 1、了解数学模型在实际生产中的使用。
- 2、了解轧制监控与轧制数学模型控制功能。
- 3、掌握应用 $P-h$ 图调压下进行板厚控制的知识。

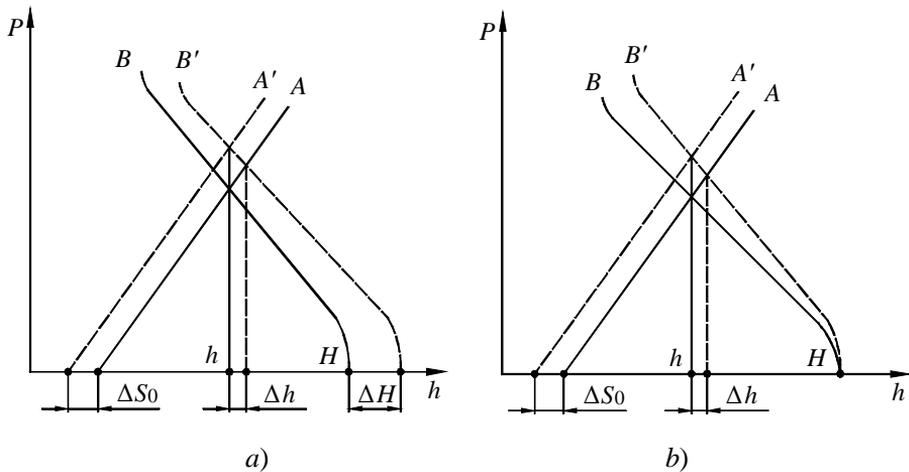
二、实验原理

常用的厚度控制方式包括调整压下、调整张力和调整速度等，其原理都可以通过 $P-h$ 图加以阐明。

调整压下是厚度控制最主要和最有效的方式，它是通过改变空载辊缝的大小来消除各种因素的变化对轧机厚度的影响。

图中 $a)$ 为消除来料厚度变化影响的厚度控制原理图。当来料厚度为 H 时，弹跳曲线为 A ，塑性曲线为 B ，轧件轧出厚度为 h 。如果来料厚度有一个变化量 ΔH ，则塑性曲线由 B 移动到 B' ，轧件轧出厚度也就相应有一个偏差 Δh 。为了消除这个偏差，就要调整压下，使空载辊缝 S_0 减小一个调整量 ΔS_0 ，则弹跳曲线由 A 变为 A' ，此时 A' 与 B' 的交点横坐标回到 h ，即保证了轧件的轧出厚度不变。

图中 b) 为消除张力、摩擦系数和变形抗力变化影响的厚度控制原理图。当由于这些因素的影响（单独作用或联合作用），使塑性曲线斜率发生改变，由 B 移动到 B' ，轧件轧出厚度产生偏差 Δh 。同样，通过调整压下，使空载辊缝 S_0 减小一个调整量 ΔS_0 ，弹跳曲线由 A 变为 A' ， A' 与 B' 的交点横坐标回到 h ，也保证了轧件的轧出厚度不变。



调整压下进行厚度控制的原理图

三、实验器材

实验轧机成套设备	1 台
塞尺	1 支
游标卡尺	1 支
不同厚度铝板带试件	15 个

四、实验内容及步骤

- 1、检查实验轧机，保证轧机正常运转。
- 2、调整好轧制力测试系统。

3、准备好上次实验轧出的 15 块不同厚度的铝板轧件作为本次实验的轧件原料。

4、设定所有轧件轧出厚度均为 h ，以所有原料铝板带中最薄的为准， h 比最薄的板带厚度值小 0.1 mm（可根据实际情况调整）。

5、将铝板轧件按照厚度不同排序，从最厚的轧件开始，根据 $P-h$ 图计算轧件轧出厚度为 h 所需要的空载辊缝值，调整轧机空载辊缝数至计算值，以塞尺测量辊缝。进行铝板轧制，记录原料铝板轧件的厚度、空载辊缝实际设定值、轧制力数据和轧件实际出口厚度。

6、重复第 5 步，完成全部 15 块轧件的轧制。整理数据并填表。

五、实验要求

- 1、将实验原理和过程写入实验报告。
- 2、将每次轧制的来料厚度、轧制力数据和出口厚度写入实验报告。
- 3、理解调压下控制出口板厚偏差的原理和操作。

实验 4 板凸度的测定及比例凸度

一、实验目的

实验教学是本门课程的重要教学环节，其目的是使学生了解实际生产中的控制数学模型的运行方法，为将来从事相关技术工作和科学研究奠定基础。

本门课程实验课的内容为通过观察板带轧制板凸度和轧制前后轧件比例凸度变化。

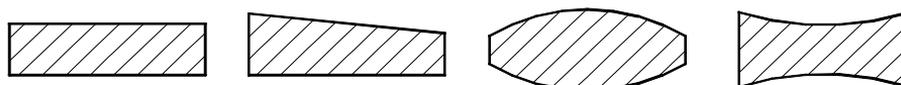
- 1、了解数学模型在实际生产中的使用。
- 2、了解轧制监控与轧制数学模型控制功能。
- 3、掌握板带轧制板凸度的知识。

二、实验原理

板厚、凸度以及板形被称为衡量板带材轧制产品的三大指标。

近年来，随着对具有高尺寸精度且具有良好平直度产品需求的日益增加，产品凸度控制技术以及平直度控制技术的研究已经成为世界冶金技术研究热点。在传统的生产当中，板带材不良的平直度可以通过轧制以后的一些措施加以纠正。比如，矫直或切边等。但是，矫直并不十分有效，往往会为了得到最终产品而融合了大量的附加加工成本。而切边在很大程度上又引起了产量损失（即成材率降低）。随着现代轧制理论的创新以及控制技术的不断提高，附加成本小，在轧制过程中对产品的平直度进行有效控制，已经成为新的发展方向。

板带材的凸度是指板带材的横向（宽度方向）厚度差，它决定于板带材的断面形状。如图所示。



a) 矩形

b) 楔形

c) 凸形

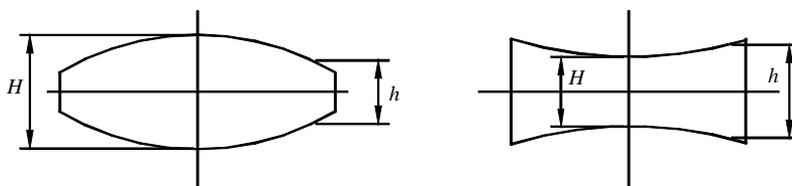
d) 凹形

板带材的截面形状

凸度的大小表示为：

$$\Delta H = H - h$$

当板带材中部的厚度大于边部时为正凸度，反之为负凸度。如图所示。



a) 正凸度

b) 负凸度

凸度的表示方法

目前，关于边部厚度 h 测量点的位置确定，不同的厂家有不同的要求，具体情况具体分析。对于在具有良好的尺寸公差和最大的轧机产量情况下，要求产品的凸度值为 0。然而一个较小的正凸度是保证轧件顺利通过辊缝所必需的。

在生产实际中，要保持轧件的最小凸度值是十分困难的。主要有两个原因：

(1) 工作辊由于磨损和不均匀的热凸度而持续变化。

(2) 由于轧制载荷的不断变化，轧辊弯曲也在不断变化。各种因素对凸度值影响的定量计算是实现凸度控制的首要条件。当前从离线的角度可以得到复杂的解析式，而从实时在线的控制角度出发，却需要在生产中进行长期的数据统计和经验积累，从而为生产中的凸度控

制提供依据。

三、实验器材

实验轧机成套设备	1 台
塞尺	1 支
游标卡尺	1 支
不同厚度铝板带试件	10 个

四、实验内容及步骤

1、检查实验轧机，保证轧机正常运转。

2、准备好上次实验轧出的 10 块不同厚度的铝板轧件作为本次实验的轧件原料。

3、以所有原料铝板带中最薄的为准，设定轧机空载辊缝数值比最薄的板带小 0.2 mm（可根据实际情况调整），为恒定值，以塞尺测量辊缝。

4、将铝板轧件按照厚度不同排序，从最厚的轧件开始，测量轧件纵向中部的厚度值，横向测量 5 个数据点，计算原始板凸度值。

5、将铝板轧件按照厚度不同排序，从最厚的轧件开始，进行轧制。轧制完毕后测量轧件出口纵向中部的厚度值，横向测量 5 个数据点，计算出口板凸度值。

6、重复第 5 步，完成全部 10 块轧件的轧制。整理数据并填表。

五、实验要求

1、将实验原理和过程写入实验报告。

2、将每次轧制的来料厚度、轧制力数据和出口厚度写入实验报告。

3、理解调压下控制出口板厚偏差的原理和操作。