

金属 压力加工 力能参数 计算手册



A·赫因泽利 著
【德】 T·施彼杰利

王尔德 宋正芳 译

霍文灿 校

黑龙江科学技术出版社

金属压力加工 力能参数计算手册

【德】A. 赫因泽利 著
T. 施彼夫利

王尔德 译
宋正芳
霍文灿 校

Handwritten signature or mark

黑龙江科学技术出版社

1987年·哈尔滨



B 462473

内 容 简 介

考虑到各种因素对力能参数计算结果的影响,本书着重论述了在金属压力加工过程中各种力能参数的计算方法,验证了各种方法的计算值与实测结果之间的差异,分析了形成误差的原因,给出了各自的应用范围和应用实例,因而对制定实际生产工艺、设计和建立新的生产过程具有重要的指导作用。本书内容丰富,充分反映了70年代末期的科研成果。书中给出了大量的参考数据和文献,可供研究材料变形抗力时参考。

本手册适于从事金属压力加工工作的工程技术人员及高等院校有关专业的师生阅读、使用。

责 任 编 辑:王正维

封 面 设 计:李忠民

金 属 压 力 加 工

力能参数计算手册

[德] A·赫因泽利 著
T·施彼杰利

王尔德 宋正芳 译 霍文灿校

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街35号)

哈尔滨印刷二厂印刷·黑龙江省新华书店发行

787 X 1092 毫米 16 开本 17 印张 378 千字

1987年1月第1次·1987年11月第1次印刷

印数: 1— 00 册

书号: 15217·220

定价: 4.06元

译者序

正确确定压力加工过程中的力能参数，对制定压力加工工艺、设计和建立新的压力加工过程都是非常重要的。不同的计算方法和试验方法会得出不同的结果，有时甚至相差很大。对各文献资料中的数据如何评价和选取，也影响着结果的准确性。

这本手册的优点，就在于它介绍和比较了现代各种计算方法和公式，将各种方法的计算值与实测数据作了比较，分析了形成误差原因，给出了各自的应用范围。本书内容丰富、涉及的金属材料范围广泛，对制定金属压力加工工艺和设计压力加工过程，有很强的指导作用。在压力加工领域中，本书堪称为一部难得的实用工具书。

原书是德文版。本书是根据俄文版翻译的。为使本书更具实用性和手册特点，在翻译过程中，译者作了适当的删节：将俄文版中的第1章塑性力学，第2章中的一部分（2.1.热变形和冷变形、2.3.测定变形抗力的试验机、2.4.影响热变形抗力的因素、2.6.影响冷变形抗力的因素）删去，因为这几部分是压力加工书籍中最常见的基本内容。其它章节均保持俄文版原貌。原版及俄文版序言请见原文。

由于译者水平有限，书中难免有误译之处，望读者指正。本书经霍文灿教授校对，在此谨致衷心的感谢。

译者

一九八五年三月

目 录

1. 金属压力加工时的变形抗力

1. 1. 测定变形抗力的方法	1
1. 1. 1. 在不同变形程度的试样上测定变形抗力	1
1. 1. 2. 在不稳定变形过程中同时测定应力和应变	2
1. 1. 2. 1. 拉伸试验	2
1. 1. 2. 2. 扭转试验	2
1. 1. 2. 3. 扭转试验	8
1. 1. 2. 4. 弯曲、胀形及内压力试验	10
1. 1. 3. 根据平辊轧制的结果确定平均变形抗力	10
1. 1. 4. 选择试验方法的准则	12
1. 2. 热加工时变形抗力的计算	12
1. 2. 1. 计算方程式	12
1. 2. 2. 用各种方程式计算的 R_f 和 R_{fm} 值的比较	16
1. 2. 3. 各种金属和合金的变形抗力	21
1. 2. 3. 1. 计算的一般原理	21
1. 2. 3. 2. 热力学系数与变形条件和材料性质的关系	22
1. 2. 3. 3. 热变形的屈服曲线图表	28
1. 2. 3. 4. 热态下屈服曲线的外推法	50
1. 3. 冷加工时变形抗力的计算方法	53
1. 3. 1. 计算方法的条件	53
1. 3. 1. 1. 材料性质影响的计算	53
1. 3. 1. 2. 温度影响的计算	54
1. 3. 1. 3. 变形程度影响的计算	54
1. 3. 1. 4. 变形速度影响的计算	57
1. 3. 2. 不同计算方法的比较	60
1. 3. 3. 无加热变形时屈服曲线计算表	62

2. 流动压力

2. 1. 流动压力的确定	81
2. 2. 压力加工过程的分类	82
2. 3. 影响流动压力的因素	84

3. 轧制过程原理

3.1. 轧制过程的本质	89
3.2. 一般原理	89
3.2.1. 变形区长度和接触面积	89
3.2.2. 变形的特征	90
3.2.3. 变形速度	90
3.2.4. 几何参数	92
3.2.5. 宽展	93
3.2.6. 轧辊与被轧金属接触面上的摩擦系数	100
3.2.7. 温度的变化特征	104
3.2.7.1. 热轧时温度的变化特征	104
3.2.7.2. 冷轧时温度的变化特征	107
3.3. 法向应力和切向应力图	108
3.3.1. 平辊轧制	109
3.3.2. 孔型轧制	111
3.3.2.1. 菱形孔型轧制	112
3.3.2.2. 椭圆形孔型轧制	114
3.3.2.3. 影响法向应力和切向应力变化特征的因素	115

4. 平 辊 热 轧

4.1. 压力的计算 (按卡尔曼和西贝尔)	117
4.2. 轧制压力、轧制力和轧制力矩	119
4.3. 轧制压力 (按特林柯斯)	121
4.4. 轧制压力和轧制力 (按奥罗万和帕斯科)	121
4.5. 轧制力和轧制力矩 (按埃克隆德)	122
4.6. 轧制压力、轧制力矩和轧制功率 (按普列依)	123
4.7. 轧制压力和轧制力 (按采里柯夫)	124
4.8. 轧制压力、轧制力和轧制力矩 (按西姆斯)	126
4.9. 轧制压力 (按埃得利契克)	128
4.10. 轧制压力 (按奥罗万和恰吉诺夫)	128
4.11. 计算数据与试验数据的比较	129
4.12. 利用曲线图来计算轧制能	133

5. 孔 型 热 轧

5.1. 孔型轧制时, 力能参数计算方法概述	136
5.2. 接触表面积确定	137
5.2.1. 计算方法	137

5.2.1.1. 转换成与其面积相等的矩形	138
5.2.1.2. 曹哈尔方法	138
5.2.1.3. 盖列依方法	141
5.2.1.4. 型材轧制时的接触面积	142
5.2.2. 用试验方法确定接触表面积	144
5.3. 平均变形速度	145
5.4. 孔型轧制时的宽展	145
5.4.1. 基本原理	145
5.4.2. 在延伸孔型中轧制时的总宽展及其分布	146
5.5. 轧制压力、轧制力、轧制转矩和轧制功率	149
5.5.1. 在箱形孔型中轧制	150
5.5.2. 在延伸孔型中的轧制	151
5.5.2.1. 轧制压力和轧制力	151
5.5.2.2. 轧制力矩	159
5.5.2.3. 轧制功	160
5.5.3. 型材轧制	161
5.5.3.1. 流动压力、轧制力和变形力矩	162
5.5.3.2. 计算例题和与试验数据的比较	166
5.5.3.3. 轧制功率	168

6. 冷 轧 板 带 材

6.1. 轧制力的计算原理	173
6.1.1. 影响轧制力的因素	178
6.1.2. 变形抗力	174
6.1.3. 轧制压力	174
6.1.4. 变形效率	175
6.1.5. 纵向张力的计算	176
6.1.6. 轧辊压扁	176
6.2. 轧制力和轧制力矩 (按布兰德和福特、采里柯夫、考劳列乌、斯托文、埃克隆德和特林柯斯)	177
6.3. 理论数据和试验数据的比较	179
6.4. 轧制力对变形区几何形状的影响	183

7. 热 轧 管

7.1. 管坯的轧制	185
7.2. 横螺旋轧制管坯时的力能参数	186
7.2.1. 轧制力和轧制功率 (按盖列依)	186
7.2.2. 轧制力和轧制功率 (按采里柯夫)	190

7. 2. 3. 轧制力和轧制功率 (按契克马廖夫)	194
7. 3. 计算数据与试验数据的比较	198
7. 4. 用心棒轧制管材	210

8. 冷 轧 管

8. 1. 轧制力	216
8. 1. 1. 轧制力的计算 (按盖列依)	216
8. 1. 2. 轧制力的计算 (按纽曼和西贝尔)	218
8. 1. 3. 轧制力的计算 (按塞瓦肯)	219
8. 1. 4. 在轧制过程中, 轧制力变化的特征	220
8. 1. 5. 进给量对轧制力的影响	220
8. 2. 作用于管坯和心棒上的力	221
8. 3. 负载和拖动功率	221
8. 4. 实测轧制力和计算轧制力的比较	223
附录 1 书中各符号的意义	227
附录 2 ГOCT(苏联)标准中与ГДП(东德)标准中相类似的金属材料	242
附录 3 在苏联标准中, 没有类似的金属材料的化学成份[按质量(%)]	244
参考文献	247

1. 金属压力加工时的变形抗力

1.1. 测定变形抗力的方法

金属的变形抗力，在本书里是指材料的屈服应力（或称流动应力）。屈服曲线的绘制，可采用如下的方法：

- (1) 在具有不同变形程度的试样上测定变形抗力；
- (2) 在不稳定的变形过程中，同时测定应力和应变数值。例如，拉伸试验或锻造试验。
- (3) 在压力加工过程中，使试样通过具有一定几何尺寸的变形区，将测得的应力和应变换算成单向应力和应变数值。

为了绘制屈服曲线，在选择试验方法时，应考虑到试验时载荷和变形的变化，使之尽量与所研究的实际过程的变化特征接近。这对于绘制多阶段热变形时的屈服曲线是非常重要的。试验方法应该能够适应广泛的变形程度、变形温度和变形速度范围。没有准确地掌握工具与材料之间摩擦力的特点，这是目前许多测定变形抗力方法的不足之处。

1.1.1. 在不同变形程度的试样上测定变形抗力

在进行材料性能试验时，常使用这种方法。例如，将宽度与厚度比为 $b/s > 10$ 的材料变成不同厚度的冷轧带材。为了确保沿整个横截面的变形均匀，应遵守如下的变形比例：

$$h_c/h_1 > 3$$

从轧制的带材制取片状试样、进行拉伸试验，此时测得的屈服极限 σ_T 或 $\sigma_{0.2}$ ，即认为是变形抗力 k_f 。

在预先进行过冷变形（如变形程度 $\varphi \approx 0.4$ ）的试样上，不可能测得材料的屈服极限 σ_T 或条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ ，此时 k_f 与瞬时的变形程度下的抗力相符。

根据米赛斯(1.10)条件，在均匀变形条件下，轧制时的变形程度可由下式表示：

$$\varphi_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_1}{h_0}; \quad (1.1)$$

根据特雷斯卡条件，其变形程度用下式表示：

$$\varphi_0 = \ln \frac{h_1}{h_0}. \quad (1.2)$$

如果在拉伸时，测得的数值不是屈服极限，而仅仅是某变形程度下的瞬时变形抗力，就把它视为变形抗力，那么在小变形情况下，会产生相当大的误差。

这种试验方法，不能反映变形温度和变形速度的影响。因此这种方法只能是在温度和速度对变形抗力影响不大时，即在冷变形时可以使用。

1.1.2. 在不稳定变形过程中同时测定应力和应变

在变形过程中，应力和应变随时间而变化的过程称为不稳定变形过程。拉伸试验、微粗试验、扭转试验和胀形试验均属于这一范畴。

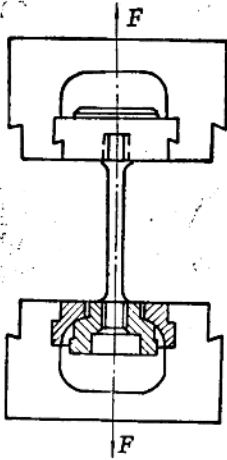


图 1.1 拉伸试验简图

1.1.2.1. 拉伸试验

由于拉伸试验（图 1.1）比较简单，所以这一方法广泛应用于绘制冷变形和热变形时的屈服曲线。由于单向应力状态只存在于均匀延伸阶段，所以试验只限制在小变形程度的范围内。而在热变形时，往往会出现较大的均匀延伸阶段。

如果进行冷变形，对于大多数材料，在变形程度 $\varphi_{q1} \approx \ln(1 + \epsilon_{q1}) = 0.2 \sim 0.3$ 时，试样就开始产生缩颈。在拉伸试样缩颈区域内，应力状态已经不是单向应力了。

变形速度低，是这种方法的另一个缺点，因为在各种标准试验机上，平均变形速度都不超过 $0.1s^{-1}$ 。可以选用各种特制的水压机进行拉伸试验，可以进行恒定的高速变形的研究。在均匀延伸区域内，沿着试样的轴向应力与屈服应力的比例关系如下：

$$k_f = \frac{F}{A} = \frac{F l_1}{A_0 l_0} = \frac{F}{A_0} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) = \frac{F}{A_0} (1 + \epsilon). \quad (1.3)$$

在均匀延伸区域内，变形程度与试样纵向变形程度是一致的，可用下式表示：

$$\varphi_v = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) = \ln \frac{A_0}{A_1}. \quad (1.4)$$

在形成的缩颈区中，要想准确地测定出变形程度，只有在考虑存在三个应变分量的条件下才有可能。根据变形的能量假设：

$$\varphi_v = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)}. \quad (1.5)$$

为了计算变形抗力，以及与其相应的缩颈区中的变形程度，西贝尔(1.12)提出如下方程式来计算：

$$k_f = \frac{F}{A_{m'n}(1 + \gamma/4\rho)}, \quad (1.6)$$

$$\varphi_v = \ln \frac{A_0}{A_{m'n}}. \quad (1.7)$$

这里假设，在缩颈区域内，试样的横截面保持圆形。当试验机的夹具以恒速运动时，在缩颈区域内，变形速度却激烈地增加。因为在这种情况下，变形区受着不变形区的限制(1.13)。

1.1.2.2. 微粗试验

要想绘制冷变形和热变形时的屈服曲线，也可采用微粗试验方法。为了模拟实际生产过程，通常采用多阶段变形。近来精制出的凸轮塑性计，除能做到恒速变形试验外，

表 1.1 微程试验时, 常选用的润滑油剂的分

试验温度 °C	油															
20	聚四氟乙烯															
20	二硫化铅															
100—300	胶体石墨															
100—600	锌															
400	AlZn50合金															
500	玻璃成份 % (按质量)															
	SiO ₂	B ₂ O ₃	BaO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	PbO	PbO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Zr ₂ O ₃	SrO	Li ₂ O	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	ZnO
450—600	—	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
600	—	—	—	12	—	—	—	—	32	—	—	—	—	—	52.0	4.0
600—750	27.5	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5	—	—	—	—	—	—
500—800	24.8	10.4	14.0	3.3	10.7	—	—	—	11.5	13.8	2.5	3.6	5.3	—	—	—
800—900	—	16.9	—	20.2	—	—	32.4	—	23.8	—	—	—	—	6.7	—	—
850—1000	69.2	1.2	—	3.4	6.1	3.2	—	—	16.2	0.7	—	—	—	—	—	—
850—1000	49.0	—	5.6	3.0	4.1	—	—	—	35.2	3.1	—	—	—	—	—	—
1000—11000	80.7	12.0	—	3.0	—	—	—	—	4.0	—	—	—	—	—	—	—
	53.0	8.0	4.6	5.6	4.1	—	—	—	21.6	3.1	—	—	—	—	—	—
	53.0	—	5.3	3.0	4.1	—	—	—	31.2	3.1	—	—	—	—	—	—
1100—1200	55.0	7.0	3.0	21.0	14.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	58.5	—	5.8	3.0	4.1	—	—	—	25.7	3.1	—	—	—	—	—	—
1000—1300	42.8	9.7 ^{*1}	3.0 ^{*2}	25.0 ^{*3}	19.5 ^{*4}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*1 H₂BO₃; *2 BaCO₃; *3 Al(OH)₃; *4 CaCO₃

还可进行多阶段间断变形试验。

在锻粗试验时，不利的因素就在于不可能精确估算出变形材料与工具之间的摩擦力的大小。尽管有良好的润滑剂和特殊加工的试样端面，也常常做不到使试样侧面不出现鼓肚，因而不能实现理想的单向应力状态。有关各种润滑的资料[1.14,1.15,1.16]列在表1.1中。

当锻粗变形温度超过 600℃时，采用玻璃润滑剂，能够取得良好的效果。

锻粗试验时，应尽可能地选用高的试样，因为在这种情况下，可减小摩擦力的影响。通常，试样的高径比 h/d 应为 1.6~2.0。但试样过高，变形时会发生失稳。

如果应力状态是单向的，那么屈服应力和变形程度可分别由下式表示：

$$k_f = \frac{F}{A} = \frac{F(l_0 - \Delta l)}{A_0 l_0} = \frac{F}{A_0} e^{\varphi_0} \quad (1.8)$$

$$\varphi_0 = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (1.9)$$

锻粗试验可以连续不间断地进行，将测得的结果用来绘制屈服曲线。在这种条件下，试样虽然发生变形，但不破坏。在变形结束前，变形能量几乎完全保持在试样内，并转换成热能（得到绝热屈服曲线）。与此相类似的现象，在一些诸如挤压，冲压等的压力加工中也会发生。在锻造和多道次连续轧制条件下，变形才具有多阶段式的特点。

锻粗试验也可以分阶段的方式进行，并且将试件间断地锻粗到所要求的变形程度。试件获得不大的变形之后，就会变热，因而要将锻粗变形间断一段时间，使试件冷却到原始温度。可是这种方法的一个极其重要的缺点就是在停歇时间内，材料会发生软化（回复或再结晶）。随着软化的发生，必会引起 k_f 值的改变。同时，间断的分阶段锻粗试验，有可能测出一些金属压力加工过程中的 k_f 值，并模拟连续的线材、带材轧制，锻造的真实变形程度变化的规律，这是必要的条件。

根据所采用试样的形状、锻粗试验可用西贝尔方法和巴维利克方法加以区别。具有锥形顶端面的试样，用西贝尔方法进行锻粗试验；空心圆柱试样[1.17]和扁平试样用巴维利克方法进行锻粗试验（图 1.2）。

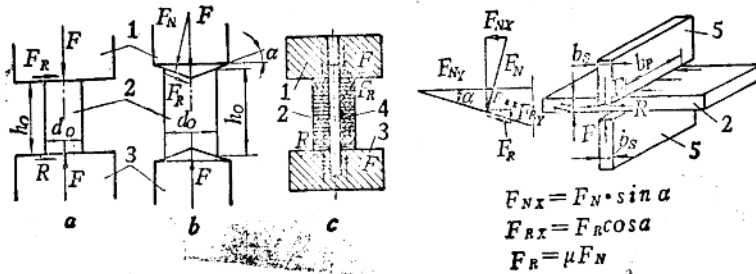


图 1.2. 不同锻粗试验方案的简图

a—圆柱形试样； b—带有锥形顶端面试样； c—空心圆柱试样

1—上压头； 2—试样； 3—下压头； 4—起导向作用的芯棒； 5—压头

用西贝尔方法进行试验，工具与试样圆锥顶端表面接触。为了测得热变形时的屈服

曲线, 利用这种形状试样的可行性, 已被卡特纳[1.18]所证明。此时变形产生的径向应力足以抵消摩擦引起的剪应力。这是发生在锥角如下情形,

$$\alpha = \arctg \mu. \quad (1.10)$$

在使用良好润滑剂的条件下, α 角是不大的(约为 $3 \sim 6^\circ$)。如果摩擦系数随着变形而变化, 那么伴随镦粗过程, 试样将会产生鼓肚现象。因为此时径向应力不能抵消摩擦引起的剪应力。在热变形条件下, 当摩擦力是温度和局部表面(例如形成表面氧化皮)状态的函数时, 这一点尤为重要, 因为温度和表面状态影响着摩擦特性。

采用小角度锥形表面的优点是在一定的变形程度条件下, 其误差较小。在用西贝尔方法进行试验时, 变形抗力的大小受变形不均匀性的影响程度有所降低, 试样的圆柱形状, 仅能保持到变形程度为 $\varphi = 0.45$ [1.19, 1.20]。

由于用西贝尔方法试验, 可能引起误差, 故近来广泛采用平端面的圆柱试样。为了应用这些热变形和冷变形的试验资料, 需采用润滑剂和适当的加工方法(如: 磨光、抛光或研磨)来加工工具表面。在变形温度接近 400°C 时, 采用二硫化钨和聚四氟乙烯作润滑剂; 当温度介于 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 时, 采用磷酸盐粘料、石墨或磷酸盐玻璃作润滑剂; 而当温度超过 700°C 时, 则采用不同化学成份的玻璃作润滑剂。冷变形时, 试样端面大多需要进行精细抛光, 而热变形时, 只需大致地进行抛光。因为在不平的试样表面上积存着一些润滑物质, 在变形过程中, 能够获得较好的润滑效果。

在平面变形条件下, 为了获得屈服曲线, 可利用扁平试样进行镦粗。这种情况下, 是以两个相互对应的窄条形刚性压头(工作表面是平面)来压缩扁平试样。平面镦粗试验与拉伸试验不同, 其应力状态是三向的, 而应变状态是平面的, 这与平面轧制过程相符合。

在这种试验中, 试样的宽度应是厚度的8倍多, 以防止较大的宽展。工具的宽度应比试样大一些。试验时还应在工具(压头)的表面涂敷一层碳化钨的薄层, 以保证工具表面具有必要的硬度和不大的摩擦系数。

希尔[1.23]对上述条件下开始屈服的瞬间作了理论分析。虽然格林[1.24]研究了 $h/b, \leq 1$ 的范围, 而前者却对 $h/b, \geq 1$ 范围内的试样厚度与压头宽度之比值的影晌进行了研究。当 $h/b, > 1$ 时, 变形区内的平均压力大于临界屈服应力。

瓦茨和福特[1.25]的试验研究表明, 扁平试样的镦粗, 可以很精确地测出材料开始屈服的应力。

在研究采用扁平试样测定屈服曲线可能性时, 作者曾选用压头宽度为2.5、3.0、4.0、5.0、6.0毫米的试验机进行镦粗试验。用低碳钢、铜和铝制作的试样作试验。对连续镦粗首先研究了 h/b 比值和具有润滑剂(MoS_2)的影响, 根据现有的资料可知, $h/b, = 1.0$ 和 $h/b, = 0.5$ 时的效果最好。虽然有无润滑剂存在对钢试样的影响并不明显, 但对铜和铝试样所测得的数据差异很大。当被压试样的原始粗糙程度越大时, 这种差异就越大。

变形量的大小和变形抗力, 可用下式进行计算(参看图1.2),

$$\Delta h = S - X; \quad (1.11)$$

$$e = (\Delta h/h_0) \cdot 100\%; \quad (1.12)$$

$$k_f = F/b_s b_p \quad (1.13)$$

图 1.3 是以钢(08KII)的屈服曲线作为实例, 该曲线是根据扁平试样的墩粗试验和预变形试样的拉伸试验测得的。用这两种方法测得的数据在理论上相差 15%, 故而绘制了 $1.15k_f$ 曲线。从图中可见, 直到 $\epsilon = 60\%$, 始终比较吻合, 最大差异为 20N/mm^2 。当变形量 ϵ 超过 65% 时, 差异有某些增加, 这是可以用润滑剂质量较差和受材料性质的影响来解释。

总之, 对于绘制冷变形的屈服曲线, 可以认为上述方法确是具有很高的精度。

对于绘制热变形屈服曲线, 上述方法可否采用, 可看如下情形:

用扁平试样进行热变形的墩粗试验, 能够获得较大的变形程度(1.27)。在变形速度 ($\dot{\varphi} = 4 \times 10^2 \sim 10^3 \text{S}^{-1}$) 很高时, 试样的几何尺寸和冷墩粗时一样, 工具与试样接触面上应有适当粘性的玻璃润滑剂。选用钢(X8CrTi17)试样(宽度与高度之比在 0.1~1.8 范围内, 温度在 $800 \sim 1200^\circ\text{C}$) 进行试验之后, 得出的结论是: 试样的宽度和平均高度之比在 0.5~0.8 之间是合理的。试验应该在恒温室中保持恒温的条件下进行, 否则试样与冷的工具接触会降低试样的温度, 引起变形抗力测量的误差。

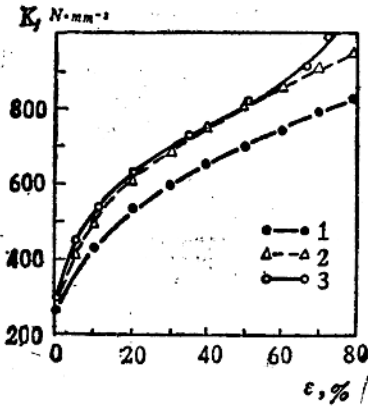


图 1.3. 钢(08KII)的屈服曲线
 $h_0 = 3.05\text{mm}; b = 4.08\text{mm};$
 1—预变形试样的拉伸试验;
 2—在 1 的拉伸曲线上乘以 1.15;
 3—扁平试样的墩粗试验(无润滑剂)

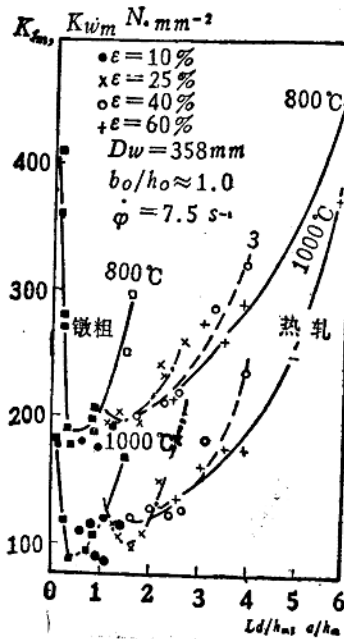


图 1.4. 钢(X8CrTi17)的屈服曲线
 (扁平试样的墩粗和热轧时测得的)。扁平试样墩粗时的几何变形区 $L_d/h_m; a/h_m$

图 1.4 给出了钢 (X8CrTi17) 在热轧和扁平试样热镦粗时的屈服应力和变形抗力对几何变形区的依从关系。当试样的宽度与平均高度之比控制在最小范围 ($a/h_m \approx 0.6$) 内时, 所测得的变形抗力与采用圆柱试样镦粗法的变形抗力是一致的。

在变形程度 $\varphi = 0.15$, 应力状态系数 $n_\sigma = 1.187$ [1.28] 和变形温度在 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ 条件下, 用扁平试样镦粗测得的变形抗力和热轧所测得的变形抗力 (k_f 值) 没有出现本质上的差异。用 X8CrTi17 与 C15 钢的扁平试样和圆柱试样进行镦粗试验, 将所测得的平均变形抗力 (部分按文献资料) 进行比较表明, 采用扁平试样进行镦粗试验, 也可以用来测定热变形时的变形抗力 k_f , 其误差并不大 (见表 1.2)。

表 1.2 热变形时, 各种钢的平均变形抗力

钢的牌号	变形温度 °C	变形速度 s^{-1}	变形抗力 N/mm^2 (镦粗试验)					
			扁平试样		圆柱试样			
X8CrTi17	800	5.0	166		165			
		6.7	187		—			
	1000	5.0	125		—			
		6.7	—		138			
C15	900	10.0	124		试验数据			
					[1.29]	[1.32]	[1.31]	[1.32]
					133	135	122	130
					计算数据			
1200	10.0	65		58	72	54	60	

在一定条件下进行镦粗时, 随着变形速度的提高, 因变形引起的热效应也会使试样温度升高, 尽管在分阶段变形过程中, 这种温度升高是不明显的, 但也必须予以注意。

根据西贝尔[1.33]的分析, 因热效应引起的温度升高, 可由下式确定:

$$\Delta v = \varphi k_{f_m} / C_n C_d. \quad (1.14)$$

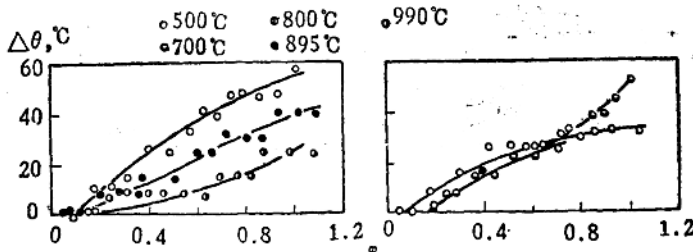


图 1.5. 不同温度下的 X10CrAl18 钢试样的镦粗试验时, 温度增高 $\Delta\theta$ 的曲线

图 1.5 给出了连续镦粗 ($\varphi = 6.9s^{-1}$) 含铬铁素体钢 (X10CrAl18) 试样时的温升实测数据。将其换算成等温屈服曲线, 可能对变形程度较高方向上的 k_f 最大值产生影响 (图 1.6), 但不会改变屈服曲线的特征。

按巴维利克方法, 采用内导向心棒的圆柱形试样进行镦粗试验, 也可测定变形抗力。若采用良好的润滑剂和选择合理的试件尺寸, 用这种方法测得的变形抗力 k_f 值与实心圆柱形试样测得的数据相比较, 其误差不超过 $\pm 4\%$ (对于含碳量为 0.1% 的钢)。内导向心棒仅在镦粗开始时对测量数据有影响。如果将几个圆环试样叠放在一起进行镦粗试验,

可以用来测定薄带材料的变形抗力。

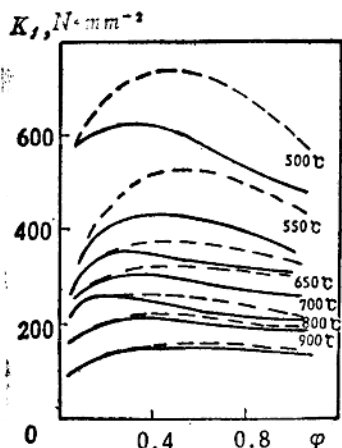


图 1.6. 在变形过程中、由于散发的热量引起屈服曲线的变化 (X10CrA118, $\dot{\varphi} = 6.9s^{-1}$; 图中虚线为等温过程的理论屈服曲线)

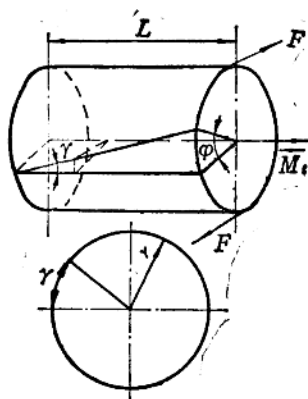


图 1.7. 扭转试验简图

1.1.2.3. 扭转试验

扭转试验 (见图 1.7) 主要用来模拟热变形过程, 以便测定变形 [1.35, 1.36] 和绘制屈服曲线。

扭转试验的优点就在于变形金属与工具之间不存在摩擦, 变形程度和变形速度的变化范围广, 能够进行连续变形, 多阶段变形和间歇变形, 并能模拟热加工。

扭转试验的缺点是沿试样横断面的变形程度不同, 应力分布不均匀。

屈服极限 k_f , 可根据扭矩来确定。变形程度 ϕ 与剪变形 γ 相符, 而变形速度 $\dot{\phi}$ 与剪变形速度 $\dot{\gamma}$ 相符合。但是在一定变形条件下, 由于试样选择的特征不同, 要使用所得到的公式去计算剪应力是有一定困难的。其根本原因就在于沿试样的横断面, 从表面到轴心其应力分布是不均匀的。菲尔德和贝克芬 [1.37] 提出了根据剪变形速度和大小计算剪应力的方程。

当选择中空的管状试样进行扭转试验时, 问题就简化了。并且壁厚与直径之比不大, 可以认为沿壁厚方向的应力, 变形和变形速度是不变的。可按菲尔德 [1.37] 的公式计算,

$$\tau = \frac{3M_d}{2\pi(r_o^2 - r_i^2)} \quad (1.15)$$

$$\gamma = \frac{r_m}{l} \theta \quad (1.16)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R_m}{l} \omega. \quad (1.17)$$

韦伯 [1.35] 证明了, 用表 1.3 中的 τ_K 方程式, 来确定热变形的扭矩—扭角关系曲线, 不可能得到不变的 m 值。在小变形时, 指数 m 为正值; 当变形量 γ 从 0.3 到

表 1.3

在各种试验条件下, 应力, 应变及变形速度的计算

试验状态	应力和应变状态	测量值或计算值	引 用 的 参 数 值			
			按 米 赛 斯			
			按特雷斯卡	按米赛斯	按米赛斯	按米赛斯
圆柱试样的 微组试验	$\sigma_1 = \sigma_d \neq 0$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (拉伸方向) 如果忽略试样的鼓肚, 可认为是单向应力状态	$\sigma_d = F(\varphi)/A(\varphi)$ $\varphi = \ln(h_1/h_0)$ $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$	σ_v	φ_v	φ_v	$\dot{\varphi}_v$
扁平试样的 微组试验	$\sigma_1 = p$ $\sigma_2 = p/2$ $\sigma_3 = 0$ $\varphi_1 = -\varphi$ $\varphi_2 = 0$ $\varphi_3 = \varphi$ 如果忽略宽度增加(在2方向上)和厚度力(在3方向上), 可认为是平面应力和变形状态。	$\sigma_d = F(\varphi)/A_0$ $\varphi = \ln(h_0/h)$ $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$	p	φ	$\frac{2}{\sqrt{3}}\varphi$	$\frac{2}{\sqrt{3}}\dot{\varphi}$
拉伸试验	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq 0$ $\sigma_3 = \sigma_3 = 0$ (拉伸方向) 在产生颈缩之前是单向应力状态	$\sigma_2 = F(\varphi)/A(\varphi)$ $\varphi = \ln(A_0/A)$ $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$	σ_2	φ	φ	$\dot{\varphi}$
扭转试验	$\tau_{xy} = \tau_R$ $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$ $\tau_{yz} = \tau_{yx} = 0$ $\tau_{zx} = \tau_{xz} = 0$ $\tau_{xy} = \tau_R$ $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$ 如果试样在轴方向自由移动, 实际关系应假设试样轴与Z轴方向一致。	$\tau_R = \frac{(p_{\text{轴}})M_d}{\pi R^3}$ $Y_R = \theta R/L$ $\dot{Y}_R = R\dot{\omega}/L$	$2\tau_R$	$\frac{Y_R}{2}$	$\frac{Y_R}{\sqrt{3}}$	$\frac{\dot{Y}_R}{\sqrt{3}}$
弯曲试验	平面变形状态	表面层应力 $\sigma_H =$ $= \frac{2}{bh^2} \left(2M_b + \frac{e_0 d M_b}{d\alpha} \right)$ 确定表面层的变形 $e_H = dh/H$ $\varphi_H = \ln \frac{1}{1 - e_H}$ $\dot{\varphi}_H = d\varphi_H/dt$	σ_H	φ_H	$\frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_H$	$\frac{2}{\sqrt{3}}\dot{\varphi}_H$