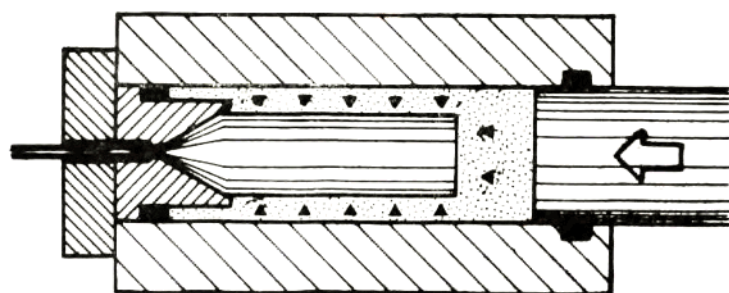


静液挤压

译文集



冶金部有色金属研究院

压 力、应 力 单 位 换 算 表

	托	微米汞柱	微 巴	大 气 压	公斤/厘米 ²	磅/吋 ²	牛顿/米 ²
1 托 = 1 毫米汞柱	1	10 ³	1.33322 × 10 ³	1.31579 × 10 ⁻³	1.35951 × 10 ⁻³	1.9337 × 10 ⁻²	1.33322 × 10 ²
1 毫米汞柱 = 10 ⁻³ 托	10 ⁻³	1	1.33322	1.31579 × 10 ⁻⁶	1.35951 × 10 ⁻⁶	1.9337 × 10 ⁻⁵	1.33322 × 10 ⁻¹
1 微巴 = 1 达因/厘米 ²	7.5006 × 10 ⁻⁶	7.5006 × 10 ⁻¹¹	1	9.8692 × 10 ⁻⁷	1.01972 × 10 ⁻⁶	1.4503 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹
1 大气压	760	7.60 × 10 ⁵	1.01325 × 10 ⁵	1	1.03323	1.4695 × 10	1.01325 × 10 ⁵
1 公斤力/厘米 ²	7.3556 × 10 ²	7.3556 × 10 ⁵	9.80665 × 10 ⁵	9.6784 × 10 ⁻¹	1	1.4223 × 10	9.80665 × 10 ⁴
1 磅/吋 ²	5.1715 × 10	5.1715 × 10 ⁴	6.8948 × 10 ⁴	6.8046 × 10 ⁻²	7.0307 × 10 ⁻²	1	6.894 8 × 10 ³
1 牛顿/米 ²	7.5006 × 10 ⁻³	7.5006	10	9.8692 × 10 ⁻⁶	1.01972 × 10 ⁻⁵	1.4503 × 10 ⁻⁴	1

前 言

静液挤压工艺是最近十几年来迅速发展起来的一种金属加工新方法。它在许多方面比普通挤压工艺优越，采用这种工艺不仅工艺过程短，节省动能，而且加工效率比较高，例如经过一次挤压能将坯锭直接加工成直径为0.015毫米的细丝。使用这种工艺还能较容易地制造薄壁管材、复合材料和各种异形制品等。

目前，静液挤压工艺已开始工业中使用。

从发展趋势看，这种加工新工艺为难加工金属、复杂形状制品的生产开辟了一个新途径，因而受到国内外金属压力加工领域的广泛重视。

遵照伟大领袖和导师毛主席“洋为中用”的教导，我们从国外文献中选译了静液挤压中一部分有代表性的文章，内容包括：静液挤压的发展历史、应用、设备、新工艺和发展趋势等。可供从事这方面工作的同志们参考。由于我们的水平有限，错误之处，敬希读者批评指正！

本书在编译过程中，曾得到我院二〇五室金其坚和石力开两同志的大力协助，在此表示感谢！

目 录

静液挤压技术.....	1
静液挤压.....	19
静液挤压的工业化.....	48
静液挤压及其应用.....	55
静液挤压机.....	64
高压容器设计的评论.....	76
静液挤压拉伸的润滑与摩擦.....	90
关于静液挤压的若干实际问题.....	98
普通挤压法和静液挤压法的冷、温和热挤压的比 较	111
温静液挤压——生产铜半成品的一种新方法	131
高温静液挤压	135
厚膜静液挤压工 艺	153
连续静液挤压评 论	159
线材的静液挤压	165
线材的静液挤压	168
管状制品的静液挤压	191
铜包铝——一种用于工业上加工复合导体的新材 料	198
Ti-6Al-4V 钛合金的静液挤压	203
静液挤压对 Nb_3Sn 化合物组成的影响	210

静液挤压技术

西原正夫等

序 言

利用高压来进行塑性加工决不是新的方法,从罗伯逊(Robertson)于1893年提出的专利〔1〕中就可以发现这种概念。在该专利中,高压液体所产生的润滑作用曾作为预期的效果而得到强调。此外,在实验研究方面,布里奇曼(Bridgman)在20世纪40年代后半期到50年代所进行的工作则可认为是最早的实验研究。布里奇曼通过对金属材料在高静液压力下的塑性行为进行有关研究发现:多数场合下金属在高静液压力下的延性破坏增大,并且其残余延性也较之未在高静液压力下预变形时要大一些。这些研究虽然在实质上是失败的,但毕竟是对通过高压液体而进行的挤压(即静液挤压)以及高压下的拉丝实验进行了尝试〔2〕。此后,有关静液挤压的研究从20世纪后半期开始在苏、英、美等国活跃起来,并逐步弄清了这种方法的优越的基本特性。〔3、4、5〕然后又经过一个长时期的实验研究,到70年代才迎来了工业化的时代。静液挤压技术的工业化进展缓慢可以认为是由于:发展能够对于10,000—20,000公斤/厘米²这样的超高压进行随意控制的超高压装置技术需要时间;在当初因过分关心在难加工材料上的应用,所以虽具有优越的基本特性也未能十分努力使之发展成为

生产率高的工艺过程;与上述原因有关,在掌握工业上意义重大的对象方面也要花费很多时间等等。

本文拟叙述静液挤压的基本特点,并对此工艺过程的工业应用加以考察。

静液挤压的基本特点

1. 静液挤压法的特点

在塑性加工过程中,所希望的重要事项之一是当材料变形时积极地形成压缩应力,从而消除裂纹等缺陷;第二是造成良好的润滑状态以便降低加工所必需的作功量,同时增大加工极限。静液挤压如图1所示,在坯锭的周围有高压液体,并利用

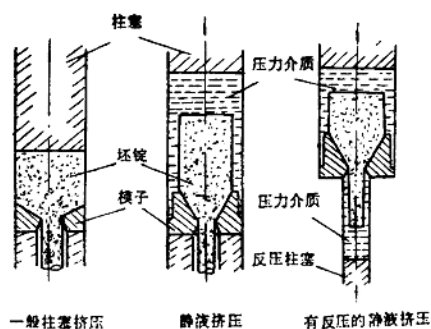


图1 静液挤压和活塞挤压

该液体的压力对坯锭进行挤压,因此它具有

有下述特点,是从根本上解决上述问题的有希望的方法。

首先,第一个特点是坯锭和挤压筒壁之间毫无摩擦,并且由于高压液体的润滑作用而使模子和坯锭之间的摩擦阻力降低,所以挤压压力也降低。在以前的直接挤压过程中坯锭与挤压筒壁之间产生摩擦,其挤压压力 P_{RF} 可近似地用下式表示:

$$P_{RF} = (P_0 + \sigma_0) e^{\frac{4\mu L}{D}} - \sigma_0 \quad (1)$$

式中: P_0 :通过模子时的阻力

μ :坯锭与挤压筒的摩擦系数

L :坯锭长度

D :挤压筒内径

σ_0 :加工材料的变形阻力

消除挤压筒壁与坯锭之间的摩擦项的方法为逆向挤压,但在这种情况下其挤压压力 P_{RB} 为:

$$P_{RF} = P_0 \quad (2)$$

如果是静液挤压,则可以用与式(2)相同的式子表示,但是此时模子变形区域的润滑是良好的,因此其挤压压力要比逆向挤压的压力 P_0 更低。从概念上比较了上述三种挤压方法的压力——时间关系,比较的结果示于图2。在直接挤压的情况

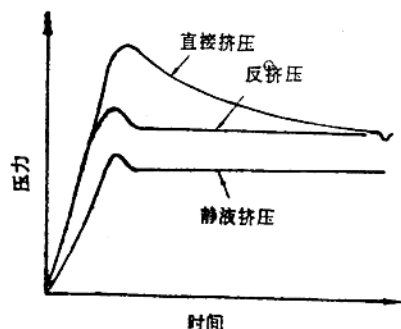


图2 挤压方法和压力—时间曲线

下,正如式(1)所表明的那样,其挤压压力在相当大的程度上为坯锭细长比(L/D)的大小所支配,工业上 L/D 值以2—3为限度,热活塞挤压的时候,其 μ 值为0.02—0.05,所以即使 L/D 值等于3,挤压压力 P_{RF} 也会达到1.24~1.6 P_0 。与此相反,在静液挤压过程中,挤压筒与坯锭之间毫无摩擦,因而能够挤压长尺寸的坯锭,并且在挤压筒内径和有效长度都不受限制的范围内也可以用同一挤压筒来挤压螺旋状、异形断面等各种不同形状和尺寸的坯锭。

第二个特点是:在模子周围有液体压力的作用,因此可以使用薄壁模子,另外润滑良好又使得模子的磨损很小,从而可获得高精度的挤压材料。

第三个特点是:由于模壁和材料之间的润滑良好,所以在一般情况下变形是均匀的,并且也能加工用以前的活塞挤压或拉制难以加工的那些材料(例如钛之类易热粘结材料和高速工具钢之类的高抗变形材料)。图3表示挤压制品横断面上的硬度分布情况^[6]:活塞挤压材料的外周比中心硬,而静液挤压材料的硬度分布则大致均匀。

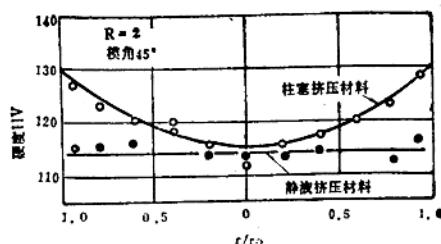


图3 挤压材料横断面上的硬度分布(铜)

第四个特点是对于异形断面材料、薄壁材料、复合材料等容易进行加工。例如,能够挤压钻头材料和带内翅的管材,也能够将铜包铝线等各种复合材料按坯锭

制成时的断面积比挤压成制品。

此外，作为第五个特点而提出的是：通过加反向压力或者改变模子的形状，使铝、镁等脆性材料的挤压成为可能。在静液挤压研究的初期，对附加反向压力的方法曾进行过探讨，它作为一种对于过去认为是无法冷加工的材料进行加工的方法而受到重视，然而在工业上由于装置的复杂性和制品长度受限制等而使其应用范围不得不缩小。虽然如此，弄清了下述情况的意义仍然是重大的，即：即使是脆性材料，若使之在压缩应力状态下变形，也能得到与延性材料同样的效果。最近也有不通过加反向压力、而借助于改变模子形状以顺利产生加反向压力的效果，同时降低挤压时制品中产生的拉伸剩余应力，从而成功地对铝和铍进行静液挤压的实例。〔7〕

2. 静液挤压中的润滑

正如已经在静液挤压的特点中介绍过的，因使用液体作压力介质，所以就在模子和坯锭之间造成强制润滑，因此而产生了各种优点。本节对静液挤压中的润滑状态加以说明。

图4表示在流体润滑状态下进行静液挤压的状态，通过对压力介质的行为作流体力学处理可以求得流体润滑模的形成条件〔8、9〕。在这种情况下，为避免计算的复杂性，将压力介质流当作牛顿流体的二维流考虑，同时假定横断面上的压力是均匀的，压力介质与挤压筒壁、模壁及坯锭表面之间不发生滑移。

在两平面的间隙为 h 、相对速度为 U 的情况下，位于两平面之间的流体中就产生由下式给出的压力梯度。

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12\eta U}{h^3} \left(\frac{h}{2} - q \right) \quad (3)$$

式中：

$$q = - \frac{Q}{2\pi r_i U}$$

η ：压力介质的粘性系数

Q ：流量

在图4的区域I内假定 $h = h_0$ 而 η 为常数，如果考虑到当 $x = X$ 时 $P = P_0$ （挤压压力），则：

$$p = p_e + \frac{12\eta U}{h_0^3} \left(\frac{h_0}{2} - q \right) (X - x) \quad (4)$$

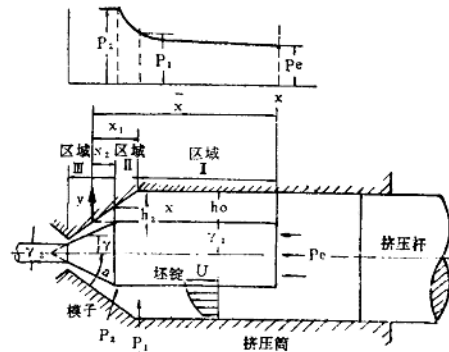


图4 流体润滑状态的静液挤压

其次，在模子的引道部分（图4的区域II）的压力上升，若将 $h = X \tan \alpha$ 代入式（3）并进行积分，则得到：

$$p = - \frac{6\eta U}{\tan^3 \alpha} \left(- \frac{\tan \alpha}{X} + \frac{q}{X^2} \right) + C \quad (5)$$

在式（5）中，当 $x = x_1$ 时， $p = p_1$ ， $x = x_2$ 时， $p = p_2$ ；从区域II过渡到区域III的压力变化状态虽然还不清楚，但是若假定其压力分布如图4所示，则在 $x = x_2$ 的条件下 $dp/dx = 0$ 。根据这些条件和式（5）可以求得下式：

$$p_2 = p_1 + \frac{6\eta U}{\tan \alpha} \left(\frac{1}{2h_2} - \frac{1}{h_0} + \frac{h_2}{2h_0^2} \right) \quad (6)$$

式中 p_1 可以从式（4）求得，将求得的 p_1 值代入式（6）则得到：

$$p_2 = p_e + \frac{6\eta U}{\tan\alpha} \left\{ \frac{1}{2h_2} - \frac{1}{h_0} + \frac{h_2}{2h_0^2} \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{h_0^2} - \frac{h_2}{h_0^3} \right) (X - x_1) \tan\alpha \right\} \quad (7)$$

假如式(7)所表示的压力 p_2 比模子入口处的坯锭和模子接触压力 σ_t 大,则压力介质就会流入坯锭和模子之间。因此,使流体润滑膜连续生成的必要条件是 $p_2 \geq \sigma_t$ 。根据初等分析,其接触压力 $\sigma_t = p_e + \sigma_0$ (其中 σ_0 为坯锭的变形阻力),从而流体润滑的必要条件式就变为下述公式:

$$p_2 \geq p_e + \sigma_0$$

根据式(7)和式(8),形成流体润滑所必需的坯锭移动速度 U 可用下式表示:

$$U \geq \frac{\sigma_0 \tan\alpha}{6\eta} \left\{ \frac{1}{2h_2} - \frac{1}{h_0} + \frac{h_2}{2h_0^2} \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{h_0^2} - \frac{h_2}{h_0^3} \right) (X - x_1) \tan\alpha \right\}^{-1} \quad (9)$$

式(9)是在没有考虑压力和温度对

粘性系数 η 的影响情况下求得的,但在挤压中所使用的压力介质的粘性系数实际上受温度及压力的影响,所以都认为有必要进行包括这些因素的探讨。为此,对各种压力介质的粘性系数与压力的关系以及在挤压过程中因坯锭变形而产生的发热量和温度分布进行妥当的评价是有必要的,这可以说是今后研究的课题。

式(9)还表明:当坯锭移动速度达到某一数值以上时,就可以造成流体润滑,这个速度受坯锭的变形阻力 σ_0 、模子半角 α 以及压力介质的粘性系数 η 的影响。图5是为了掌握静液挤压时的润滑状态而使模子和坯锭之间形成电气回路所得接触电阻的测量结果。在升压开始以后,随着压力的升高,接触电阻缓慢增大,当压力从挤压初期的最高值开始急剧降低的时刻,接触电阻呈现最大值,到稳定挤压以后,则大致成为恒定值,而在蠕动状态下进行挤压时,接触电阻根据坯锭的移动

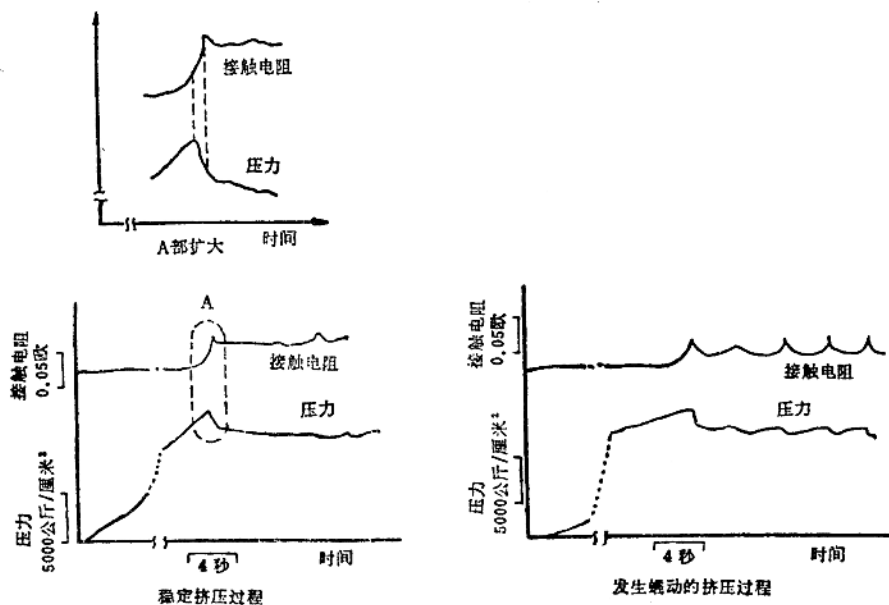


图5 接触电阻的变化

而发生变化。接触电阻的这种变化情况表明：介于模子和坯锭之间的润滑膜厚度取决于坯锭的移动速度。这也就是说，在升压开始以后，随着液体压力的升高，坯锭头部开始慢慢地变形，坯锭的速度渐渐增大，而接触电阻也随之增大。此外，在坯锭速度大的情况（例如产生滑动）下，其接触电阻也增大

如果能够正常地形成稳定的润滑膜，则蠕动等不稳定现象是不应该发生的。根据这种想法，将模角及坯锭速度对于有无蠕动的影响表示于图 6。正如此图所表明的，使蠕动现象消失的坯锭速度随模角的增加而变大。这与根据式（9）所求得的 U 的模角依存关系是很一致的。在不产生蠕动现象的场合，虽然还不能确证在整个坯锭变形区域内生成了流体润滑膜，但是可以认为，在蠕动现象的有无与流体润滑生成条件之间，存在着极为密切的相互关系。

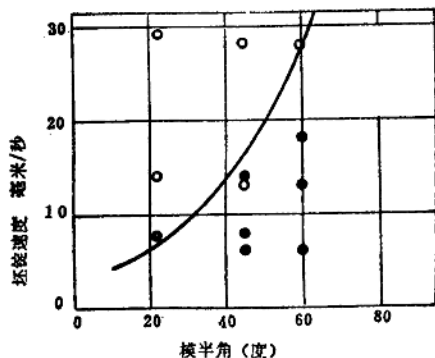


图 6 坯锭速度和模角对有无蠕动的影响

○ 未发生蠕动 铜
● 发生蠕动根 $R = 4$

当坯锭以比式（9）所示的速度 U 为小的速度移动的时候，可以认为在整个变形区域内尚未生成流体润滑膜。这种情况据推测是所谓混合润滑状态：金属间接触

部分或者夹入分子层润滑膜的金属间接触部分与流体膜的夹入部分共存。这种状态可以在实验室性质的低速静液挤压和挤压初期的头部变形时经常发现。所以，即使是静液挤压，也正在研究为使挤压开始压力降低的各种因素（如：坯锭头部的形状、坯锭的表面状态、润滑剂的种类和压力介质的种类等）。

利用静液挤压来挤压带锥形头部的坯锭时，坯锭的头部随着压力的上升而被缓慢地挤压，当压力达到挤压初期的最大值时已经压出了某一长度。这种情况下的润滑状态可以看成是从以往的塑性加工中所遇到的润滑状态向上述那种以流体润滑为主的状态转化的过程。所以在静液挤压过程中，对于从头部变形过渡到平行部分变形的期间如何更迅速地达到稳定的润滑状态将成为重要问题。在这个观点上，坯锭的头部形状具有重要的意义。也就是说，将头部的形状作成完全的锥形要比作成部分锥形其挤压开始压力为低，另外若使头部的锥角小于模角或者作成二段头部，则润滑剂就能多量地夹在模子和坯锭之间，因而挤压开始压力也较低。

在论述润滑状态时，表面状态的差异也是重要因素之一。假如从过去有关塑性加工机理的研究来看〔10〕，则由于被加工材料表面的凹凸处捕获润滑剂而形成混合润滑状态。同样的机理在静液挤压中也是适用的。在静液挤压中，当坯锭表面粗糙度大到某种程度时，摩擦应力（单位面积上的摩擦力）反而降低。这可以作如下的说明。若将图 7 所示的三角形突起当作坯锭表面的凹凸考虑，则材料和工具之间的润滑剂随着突起部变形的增加而体积受到压缩，润滑剂的压力就升至 $P + \Delta P$ 。由于 $P + \Delta P$ 的值随变形的增大而增大，所以有润滑剂存在的那部分材料就不与工具直

接接触,从而使工具和材料之间的摩擦系数变小。在不使用高压的一般拉制和挤压中,工具与材料的间隙内所保存的润滑剂在加工前的压力等于大气压,因变形而升高 ΔP 可承担一部分表面压力,但在 使用高压时,加工条件是封闭着高压力的润滑剂,后者形成了良好的润滑状态。假如表面粗糙度大到某种程度,则高压润滑剂被大量地封闭,可以认为这是改善坯锭与模子之间的润滑状态的原因。

对于静液挤压中的压力介质,在希望其压力传输特性良好的同时,具有良好的润滑特性也是必要的。表1为静液挤压SAE1045钢时的挤压压力,它是在使头部角度与模角一致、并使用30号宾夕尔法尼亚油和200号石墨粉的混合物(按 $\frac{2}{3}$:

表1 压力介质、润滑剂、头部角度对挤压压力的影响

(坯锭材料:SAE1045钢,模角:40°,挤压比:1.43)

压 力 介 质 和 润 滑 剂	锥头角度 (度)	压 力 (%)
$\frac{2}{3}$ —宾夕尔法尼亚发动机油* 30 + $\frac{1}{3}$ —石墨粉 No.200	40	100
石墨粉No.200	"	200
宾夕尔法尼亚发动机油*30	"	78
"	30	67
"	20	75
宾夕尔法尼亚发动机油*10W	40	72
$\frac{2}{3}$ —变压器油 + $\frac{1}{3}$ —煤油	"	255
" (用极高压级润滑脂* ¹ 涂坯锭)	"	155
" (用极高压级润滑脂* ² 涂坯锭)	"	175
" (聚四氟乙烯涂层)	"	285
宾夕尔法尼亚油*10W	180	94
微酸性乳	40	72

如果是抗变形能力大的材料则有这样的情况:仅在工业挤压装置的可能范围内加快挤压速度是难于实现流体润滑的。在

的比例)作压力介质时的挤压压力作为100、而对用其它压力介质及润滑剂时的挤压压力所进行的比较^[11]。由此表看出,根据压力介质和润滑剂种类的不同,挤压压力发生各种各样的变化。

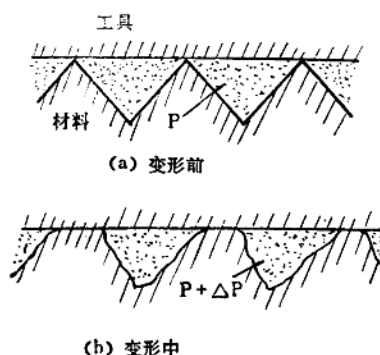


图7 润滑剂的封闭

这种情况下,为了使挤压稳定的进行就必须对坯锭进行表面处理,最适宜于传统冷加工的润滑处理方法是很有用处的。图

8表示对弹簧钢(SUP9)进行静液挤压时的压力变化,施加磷酸盐保护膜处理的能够形成稳定的挤压,而未预处理的就只能挤压出坯锭开始的这一端,之后发生热粘结现象而使挤压压力升高。

图9表示挤压时的压力—活塞位移线图的各种形态[12]。根据这类线图能够在某种程度上推断润滑的好坏。A类表示正在进行在挤压初期无压力峰值的稳定挤压。一般说来,B类表示在挤压初期产生压力峰值,以后再变为恒定的挤压压力。另外,C类和D类所表示的是成为在蠕动状态下挤压时的情况,但是如果增加挤压速度就如式(9)所表示的那样更易于达成流体润滑,有接近于A类或B类的倾向。

图10表示升压速度对挤压的开始压

力的影响,挤压的开始压力由于压力介质种类的不同、润滑剂的有无以及头部形状

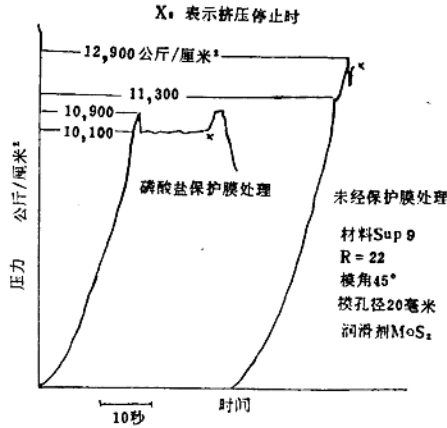


图8 坯锭的表面处理对挤压压力的影响

分类	恒压特性	降压特性	升压特性	特殊类型
A类 最好的润滑	优异润滑 Pb Pr 液体压 黏曲线 A ₁ 类	Pb (平均值) Pr A ₂ 类	br (平均值) Pb A ₃ 类	Pr Pb 润滑被轻 微破坏 A ₄ 类
B类 出现压力峰值 之后无蠕动	Pb 峰值 Pb Pr B ₁ 类	Pb Pr (平均值) B ₂ 类	Pb Pr (平均值) B ₃ 类	Pr Pb 润滑被破坏 B ₄ 类
C类 在挤出期间蠕动的 严重性减弱	Pb Pr C ₁ 类	Pb Pr “Pr” C ₂ 类	Pb “Pr” C ₃ 类	Pr Pb 润滑被严 重破坏 C ₄ 类
D类 严重的蠕动	Pb “Pr” D ₁ 类	Pb “Pr” D ₂ 类	Pb “Pr” D ₃ 类	Pr Pb 蠕动的严 重性增加 D ₄ 类

图9 各种压力—活塞位移线图

的差异而有所不同，但不论在 哪种 情况下，升压速度越大，（挤压速度越大），其挤压压力越低。

如前所述，由于在挤压初期边界润滑状态所占的比例大，所以挤压的开始压力比稳定挤压的压力高，但是必须使它们的差尽可能地减小。其解决办法之一就是如图（10）所示的那样，将挤压速度增大。假如将头部角度作得比模角小或者挤压带两段头部的坯锭时，那么由于在挤压初期模子与坯锭之间存在着夹有润滑剂的楔形区域，同时也由于在升压过程的某一压力下坯锭移动量要比挤压其头部角度等于模角的坯锭时为大，致使由楔形作用产生的润滑效果更容易发挥而形成较低的挤

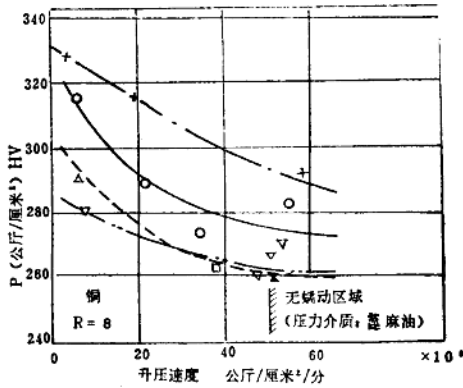


图10 升压速度对挤压压力的影响

压压力。此外，在活塞移动速度一定的条件下，缩小压力介质的容积就使升压速度增大，结果引起坯锭移动速度增大，由楔形作用产生的润滑效果得到发挥，而形成低的挤压开始压力。

3. 附加外力的静液挤压及其特点

在静液挤压中有这样一种方法，即除液体压力之外，还在制品侧或坯锭侧作用一个轴向的力。前者被称为挤压——拉制^[13]，后者被称为坯锭增压挤压^[14]。

图11从概念上表示这两种方法。除液体压

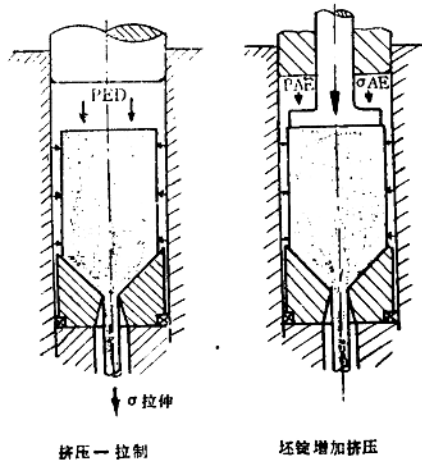


图11 附加外力的静液挤压

力以外还附加外力的主要目的，在于降低挤压过程中所必须的液体压力以及消除蠕动等不稳定现象，但是在挤压——拉制法中制品的平直度得到改善，同时因为模子表面压力降低而产生增长挤压模寿命等优点。

其次，试求因附加外力而引起的液体压力降低量^[15]。如图12所示，材料流向上的应力 σ_n 、模壁压力 σ_t 和圆周方向上的应力 σ_θ 是主应力，假定 $\sigma_t \approx \sigma_\theta$ ，又假定材料变形时的米塞斯（Mises）屈服条件式能成立，则对于在X处具有n次方硬化特性（ $\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n$ ）的材料的部分发生作用的应力 σ 可以用下式表示：

$$\sigma_n = \frac{\sigma_0}{n+1} (\varepsilon^{n+1} - \varepsilon_0^{n+1}) - \sigma_{\text{拉伸}} \quad (10)$$

$$\text{其中: } \bar{\varepsilon} = 2 \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad \varepsilon = 2 \ln \frac{r_1}{X}$$

由此，材料均匀变形时所必需的（纯功） P_n 为：

$$p_n = \frac{\sigma_0}{n+1} \bar{\varepsilon}^{n+1} - \sigma_{\text{拉伸}} \quad (11)$$

作摩擦功 P_f 的表面压力 σ_t 根据式 (10) 和屈服条件式得到,

$$\sigma_t = \sigma_n + \sigma_0 \bar{\varepsilon}^n = \sigma_0 \bar{\varepsilon}^n + \frac{\sigma_0}{n+1} (\bar{\varepsilon}^{n+1} - \bar{\varepsilon}^{n+1}) - \sigma_{\text{拉伸}} \quad (12)$$

而 P_f 可用下式求得:

$$P_f = \frac{1}{\pi r^2} \int_{r_2}^{r_1} \frac{2\pi\mu\sigma_t}{\sin\alpha} \cdot \frac{r_1^2}{X^2} dx$$

$$= \frac{\mu\sigma_0}{\sin\alpha} \left(\frac{\bar{\varepsilon}^{n+1}}{n+1} + \frac{\bar{\varepsilon}^{n+2}}{n+2} - \frac{\sigma_{\text{拉伸}}}{\sigma_0} \bar{\varepsilon} \right) \quad (13)$$

α : 模子的半角; μ : 摩擦系数 根据式 (13), 并假定 μ 是与表面压力 σ_t 无关的一个恒定值, 则可知, 如果 $\sigma_{\text{拉伸}}$ 增大, 摩擦功就减小。另外, 使材料流动方向改变而必需的剩余功 P_r 可用下式求得:

$$P_r = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} (\bar{\varepsilon}_0^n + \bar{\varepsilon}^{n+1}) \left(\frac{\alpha}{\sin\alpha} - \cot\alpha \right) \quad (14)$$

式中 $\bar{\varepsilon}_0$: 模子入口处材料已经受到的变形量

使拉伸力起作用时的挤压压力 P_{ED} 可以由式 (11) (13) 和 (14) 之和给出:

$$P_{ED} = \frac{\sigma_0}{n+1} \bar{\varepsilon}^{n+1} + \frac{\mu\sigma_0}{\sin\alpha} \left(\frac{\bar{\varepsilon}^{n+1}}{n+1} + \frac{\bar{\varepsilon}^{n+2}}{n+2} \right) + \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} (\bar{\varepsilon}_0^n + \bar{\varepsilon}^n)$$

$$\left(\frac{\alpha}{\sin\alpha} - \cot\alpha \right) - \sigma_{\text{拉伸}} \left(1 + \frac{\mu\bar{\varepsilon}}{\sin\alpha} \right) \quad (15)$$

在式 (15) 中, 右边的第一项到第三项给出不加拉伸力时的挤压压力, 加 $\sigma_{\text{拉伸}}$ 的作用只使挤压压力降低右边第四项所表示的数量。

图13表示附加了前方拉伸力而对铜进行挤压时的 P_{ED} 和 $\sigma_{\text{拉伸}}$ 的关系, 可以看出 $P_{ED} + \sigma_{\text{拉伸}} = \text{常数}$ 的关系大致是成立的。在挤压—拉伸法中, 因为 $\sigma_{\text{拉伸}}$ 的大小一定要低于制品的强度, 所以就有必要充分掌握挤压材料的强度与挤压条件的关连性, 以便适当地选择 $\sigma_{\text{拉伸}}$ 的大小。

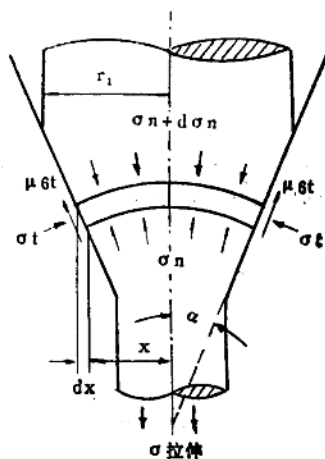


图12 变形区域的应力状态

另一方面, 在坯锭增压挤压法中式 (15) 中的 $\sigma_{\text{拉伸}} = 0$, 与式 (15) 右边第一项到第三项相当的作功量应当由液体压力 P_{AE} 与作用在坯锭后端的轴向压缩应力两者之和给出。由此都得到下列公式:

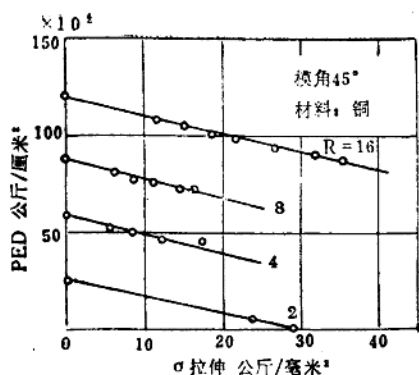


图13 前方拉伸力对挤压压力的影响

$$P_{AE} = \frac{\sigma_0}{n+1} \bar{\epsilon}^{n+1} + \frac{\mu \sigma_0}{\sin \alpha} \left(\bar{\epsilon}^{\frac{n+1}{n+1}} + \frac{\bar{\epsilon}^{\frac{n+2}{n+2}}}{n+2} \right) + \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(\bar{\epsilon}_0^n + \bar{\epsilon}^n \right) \left(-\frac{\alpha}{\sin \alpha} - \cot \alpha \right) - \sigma_{AE} \quad (16)$$

在这种情况下，液体压力 P_{AE} 根据 σ_{AE} 而相应地降低，但是模子的表面压

力与没有加 σ_{AE} 时的相同，而且摩擦功也比挤压—拉制法为大。 σ_{AE} 的大小取决于坯锭的压缩屈服应力和坯锭的弯曲应力两者中的任意一个，但在挤压长尺寸的坯锭时却主要是由坯锭的压曲应力决定。

静液挤压对于各种金属材料加工的适用性

1. 静液挤压技术的工业化

当在工业生产中应用静液挤压的时候，其前提是确定具备有能满足经济要求的可靠性、耐久性和操作性等特点的挤压装置。关于这方面的情况已在别的文章中进行详细的说明^[16]。如果能够提供在工业上耐用的装置，则第二重要的因素就是被加工材料的挤压特性和挤压材料的各种性质。

在研究发展静液挤压技术的初期阶段，兴趣主要是集中于对脆性材料之类难加工材料的适用性问题上，但是随着对静液挤压技术本身的理解加深以及静液挤压的压力机在工业上不断地得到改进而使其适用范围扩大，正在与以往的热轧和冷

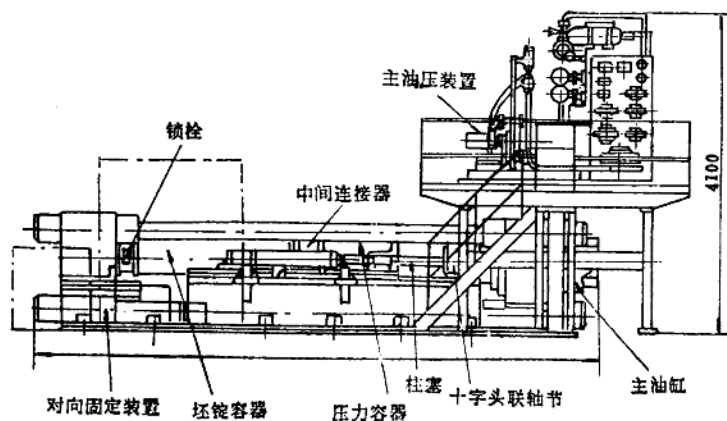


图14 500吨卧式静液挤压机

轧、热活塞挤压和冷活塞挤压、拉制、轧管以及型锻等加工工艺进行着竞争,从而定量地掌握各种材料的挤压特性就变得重要起来了。

下面拟用1970年研究试制的500吨卧式静液挤压机^[17](图14)对各种金属材料进行静液挤压的结果为中心,来叙述各种金属的挤压特性,并探讨此工艺对于它们的适用性。

2. 铝和铝合金

铝及铝合金的挤压,通常是用加热的直接挤压,但此时坯锭必须被加热到400°C以上,并且坯锭长度也被限制为直径的2—3倍范围内,即使是加工性能良好的坯锭,挤压速度也只有数十米/分,而如果是高强度铝合金等材料则因为产生表面缺陷而控制为1~2米/分的低速。另一方面,对于静液挤压则因为挤压筒与坯锭之间没有摩擦损失,而且坯锭与模子之间的摩擦也因由高压液体所产生的润滑效果而显著降低,所以能够以高挤压比对长尺寸的铝及铝合金进行高速挤压。

图15表示静液冷挤压纯铝(1100)、耐蚀铝合金(5052、6061、6063)和高强度铝合金时的挤压比与挤压压力的关系。如图所示,当挤压压力为15000公斤/厘米²

时,可以看出其最大挤压比非常大:对于纯铝为10000,即使是7075合金也高达100。而且也了解到,可以解除对7075合金等进行通常的热挤压时的挤压速度限制,甚至在超过100米/分的高速度下仍能从铸造材料进行完善的挤压加工。表2为目前生产工厂中使用的热活塞挤压的挤压比R、制品移动速度V和坯锭的细长比L/D与静液挤压实验中所得的相应结果之比较,静液挤压的挤压比是假定液体压力为15000公斤/厘米²时的数值,制品移动速度表示由实验所得到的实测值。当以

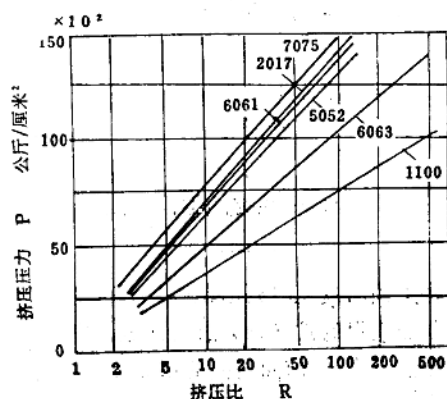


图15 铝合金静液挤压时的挤压比—挤压压力关系

表2 静液挤压与柱塞挤压的比较

材 料	柱 塞 挤 压				静 液 挤 压			
	挤压温度 (°C)	挤压比	制品速度 (米/分)	L/D	挤压温度 (°C)	挤压比**	制品速度 (米/分)	L/D
1100	420	25~150	60	约3	室温	~10000	4000	约10
6063	400	15~80	30	"	"	~800	350	"
5052	420	15~80	8	"	"	~150	"	"
2017	420	15~40	2	"	"	~130	130	"
7075	420	15~30	1.2	"	"	~90	"	"

注: * 坯锭长度, D坯锭直径。

** 最大挤压压力为15000公斤/厘米²

$R \times V$ 作为生产速度的指标时,显然用静液挤压可以得到有热活塞挤压 $10 \sim 10^3$ 倍那样大的生产速度。此外,制品移动速度由于受后面的卷线装置的限制,除挤压细线的情况而外在工业上按数百米/分的范围考虑将是妥当的。

图16表示坯锭硬度对于各种铝合金挤压压力的影响。纵轴采用挤压压力除以 $\ln R$ 所得的商作座标。由图看出,当挤压条件一定时,挤压压力和铝合金的种类几乎没有关系,和坯锭的硬度却大致成正比。如果根据图16来求挤压压力与坯锭硬度,挤压比之间的关系就得到下列关系式:

$$P = (39.4H_v + 920) \ln R \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (17)$$

式中: p —压力

H_v —坯锭的维氏硬度

R —挤压比

若将上式与皮尤[18]以范围广大的材料为对象而求得的式(18)进行比较,则很清楚在前者中 H_v 前面所附的系数相当小,这也就是说,对于挤压同一硬度坯料所必

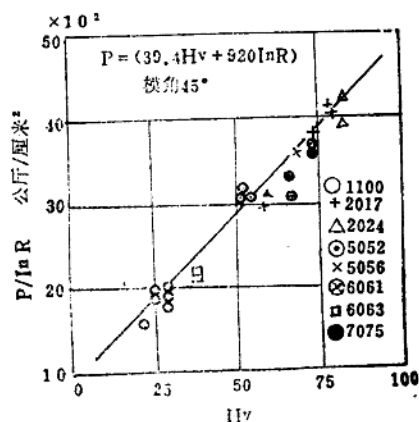


图16 坯锭硬度对铝合金挤压压力的影响

需的压力前者所给出的为低。

$$p = (58.1H_v + 920) \ln R \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (18)$$

这种倾向在铝合金的条件下可以认为是由于其 ρC (密度 $\times$ 比热)小使得在一定的挤压压力下温度上升大而恢复温度低的缘故。

图17表示挤压比和挤压速度对于静液冷挤压过的纯铝抗张强度的影响。很清楚,当挤压比大,挤压速度高时挤压材料的强度降低,加工热的产品给与了较大的影响。

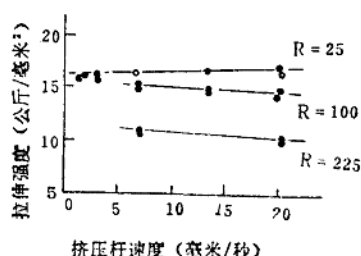


图17 挤压比、挤压速度对静液挤压铝材强度的影响

表3为以挤压比25进行热活塞挤压和静液冷挤压之后再分别作T6处理(淬火后人工时效处理)的铸造6063铝合金机械性质的检验结果。

从结果可以看出,虽然是在比较小的挤压比下,静液冷挤压材料中的铸造组织受到充分的破坏,延性也变好。

如上所述,静液冷挤压铝合金的性质往往要比用过去的工艺方法制造的材料优越,但是对其加工时的温度上升以及挤压后的热处理特性却必须针对每一种合金而加以研究。

静液挤压对于铝合金的适用性与其说是以单纯的线材、棒材为对象,不如说是以各种管材、异形材为对象似乎要更为有效。图18表示挤压材的实例。图19表示在

挤压纯铝的管材和各种断面材时的挤压比和挤压压力, 为了进行比较也一并列出了实心圆棒的数据, 但是根据形状的不同其压力必需比实心圆棒高5~30%。

3. 铜和铜合金

图20表示铜和各种铜合金在进行静液冷挤压时的挤压比与挤压压力的关系。当挤压压力为15000公斤/厘米²时, 可以采

表3 6063 (T6) 的机械性质

性 质	屈服强度	拉伸强度	延伸率*	收缩率
种 类	公斤/毫米 ²	公斤/毫米 ²	%	%
热活塞挤压材	18.9	21.0	5.8	44.4
静液挤压材	20.3	21.7	5.7	66.0

• JIS规格9号试验片

取的挤压比大致为: 纯铜——约35、铜镍合金——15、锌白铜——8、磷青铜——5~6。磷青铜和锌白铜之类合金在高温下加工困难多, 因而能够进行大断面减缩率冷加工的静液挤压技术就可以成为有力的加工手段。图21表示铜及铜合金的硬度与挤压压力的关系。式(19)为求得的铜合金硬度与挤压压力的关系式:

$$p = (75.0Hv + 1000) \ln R \quad (19)$$

(公斤/厘米²)

式(19)表明, 在铜合金的情况下要较之同一硬度水平铝合金和下述钢铁材料需要更高的挤压压力。可以认为造成这种现象是由于通常铜合金的加工硬化能大并且恢复温度高的缘故。

在制造铜合金管材、异形管材及异形材时应用静液挤压很有效。在纯铜的情况下, 因为利用300~350°C的静液温挤压使得以非常大的加工度进行挤压成为可能, 所以是有成效的。

4. 钢铁

静液挤压技术对于钢铁材料的适用性, 由于其变形阻力大而不能采取象铝铜那样大的挤压比, 所以似乎仅限于冷成形阶段。图22给出了对各种钢材进行静液挤

压时的挤压比与挤压压力的关系。图23表示钢铁材料的硬度与挤压压力的关系。如果要求两者的关系, 就得到式(20):

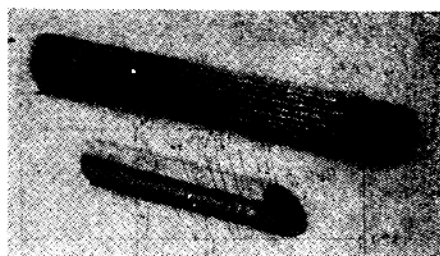


图18 静液挤压带翅管材实例

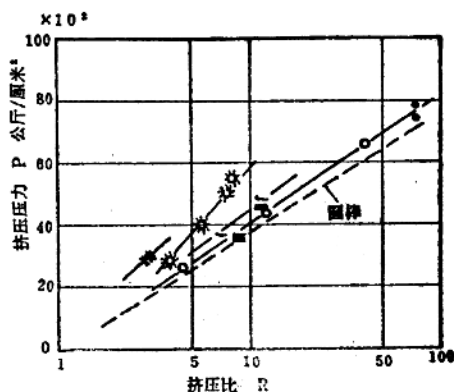


图19 铝异形断面材的挤压比——挤压压力关系
(图中的形状表示制品的形状)