

关于锻造比计算方法的探讨*

杨振恒

一、锻造比的意义

金属锻造加工量的大小,通常用锻造比表示。拔长时的锻造比等于坯料在变形前截面积与变形后截面积之比,镦粗时的锻造比等于坯料在变形后截面积与变形前截面积之比。

锻件的机械性能,特别是原始毛坯为铸锭时,在很大程度上取决于锻造比的大小。具有一定锻造比的锻件,意味着它在成形后改善了原来的铸造组织,晶粒变细,消除了原来的柱状晶、偏析、疏松等缺陷,组织均匀致密,提高了机械性能。

生产中在制订锻造工艺规程时,特别是对于大型锻件,要明确规定锻造比的大小,以保证经过一定锻造变形量的锻件能具有所需的机械性能。同时,根据锻件尺寸与锻比大小可求出原始坯料(钢锭等)尺寸与变形工序。

根据锻件材料、形状、尺寸的不同,以及原始坯料的不同,锻造变形工序也不一样。最基本的变形工序是拔长与镦粗。有时拔长与镦粗混合采用,这时总锻造比的计算方法就颇不一致了。例如取总锻比等于各分锻比之和或总锻比等于各分锻比之积;拔长锻比与镦粗锻比综合计算或分开计算等等。这样,往往总锻比相同,但由于计算方法的不同,各自的锻造变形量大小并不相等,所获得的锻件机械性能也不相同。由于锻比计算方法的不同,以致技术资料交流时,容易造成混乱,有时甚至不知人家的锻比是怎样计算出来的,所以手边虽有技术资料,却没法利用或参考。

*本文曾载在《金属材料及热加工工艺》1981年第2期。本文发表时,作者已作了修改。

工硬化⁽⁷⁾,其冷加工硬化能力类似18—8钢。

鉴于板的厚度变化均匀,故板是冲压成型的。为保证球顶工作部分冲压后的尺寸及硬度,应采用专用模具冲制。

参考文献

(1) Rupture port sleeves, United States Patent Office 3514 013, Patented, 1970, 5

(2) “沉淀硬化不锈钢Cr17Ni4Cu试验室试制小结”,
《广重科技简讯》,1973年第1期

(3) 《钢铁材料便览》,1967, 628~636

(4) Inconel Alloy 600, Henry Wiggin & Co. Ltd., 3269, C/7207

(5) Metals Handbook 8th Edition, Vol. 7, 313, 315

(6) Aerospace structural metals handbook, Vol. II, 4101, 1963

(7) Aerospace structural metals handbook, Vol. I, 1201, P. 9, 1963

二、锻造比的各种计算方法

1. 单纯连续拔长 (图 1)

$$\text{拔长锻比 } K = \frac{F_{\text{前}}}{F_{\text{后}}} = \frac{l_{\text{后}}}{l_{\text{前}}} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{前}}$ —变形前坯料的截面积;

$l_{\text{前}}$ —变形前坯料的长度。

$F_{\text{后}}$ —变形后坯料的截面积;

$l_{\text{后}}$ —变形后坯料的长度。

总锻比有不同的表示方法:

(1) 总锻比等于各个分锻比之积, 即

$$K_{\text{总}} = K_1 \cdot K_2 \cdots$$

(2) 总锻比等于各个分锻比之和, 即

$$K_{\text{总}} = K_1 + K_2 + \cdots$$

(3) 分锻比小于 2 时, 求总锻比用乘法, 大于 2 时用加法。

2. 单纯连续镦粗

$$\text{镦粗锻比 } P = \frac{F_{\text{后}}}{F_{\text{前}}} = \frac{H_{\text{前}}}{H_{\text{后}}} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{前}}$ —镦粗前坯料截面积;

$H_{\text{前}}$ —镦粗前坯料高度。

$F_{\text{后}}$ —镦粗后坯料截面积;

$H_{\text{后}}$ —镦粗后坯料高度。

(1) 总锻比等于各个分锻比之积, 即

$$P_{\text{总}} = P_1 \cdot P_2 \cdots$$

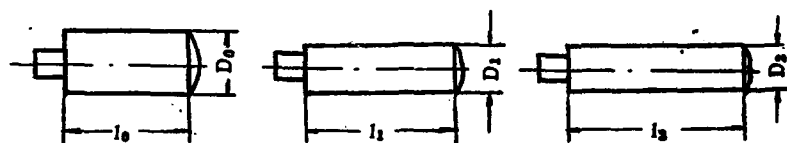


图 1 连续拔长

(2) 总锻比等于各个分锻比之和, 即 $P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + \cdots$ 。

(3) 分锻比小于 2 时, 求总锻比用乘法, 大于 2 时用加法。

3. 反复镦粗和拔长

(1) 只计算拔长时锻比, 不计算镦粗锻比。求总锻比又分乘法与加法两种。

(2) 拔长锻比与镦粗锻比分开计算表示, 二者不混到一起。

1) 拔长总锻比 $K_{\text{总}}$ 等于各次拔长时分锻比之“积”或“和”。镦粗总锻比 $P_{\text{总}}$ 等于各次镦粗时分锻比之“积”或“和”。

2) 克尔柴柯托夫斯基 Krzekotowski 建议用钢锭原始截面 F_i 和锻件最终截面 F_k 之比值表示拔长总锻比 K , 再以钢锭镦粗后截面积 F_p 和钢锭原始截面积 F_i 之比值表示镦粗比 P (图 2 及 3) (3)。

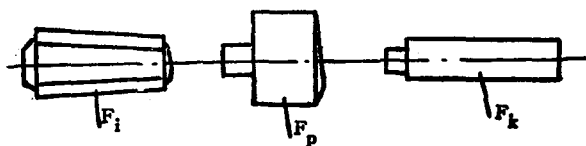


图 2 一次镦粗与一次拔长

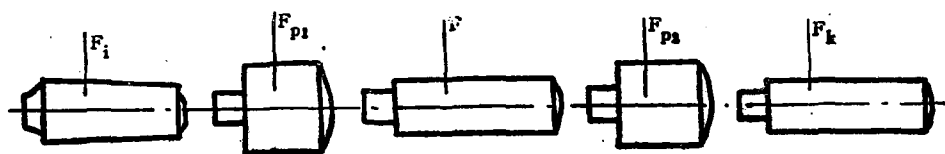


图 3 两次镦粗与两次拔长 (F_i 、 F_{p1} 、 F_1 、 F_{p2} 、 F_k 均为截面积)

$$K = n \cdot P \quad (3)$$

式中: $K = \frac{F_i}{F_k}$;

n —锻粗次数;

$$P = \frac{F_D}{F_i} \quad (\text{图 3, } F_D = F_{D1} = F_{D2})$$

(3) 拔长锻比与锻粗锻比综合并入总锻比之中, 又有不同并法:

1) 总锻比等于各分锻比之积。 $K_{\text{总}} = K_1 \cdot K_2 \cdots P_1 \cdot P_2 \cdots$ 。求积时, 又有不同的取法, 如图 2, 经一次锻粗和一次拔长时, F_i 、 F_D 、 F_k 均为截面积, 则

$$\textcircled{1} \text{总锻比 } K_{\text{总}} = \frac{F_D}{F_i} \cdot \frac{F_i}{F_k} = \frac{F_D}{F_k} \quad (4)$$

$$\textcircled{2} K_{\text{总}} = \frac{F_D}{F_i} \cdot \frac{F_D}{F_k} = \frac{F_D^2}{F_i F_k} \quad (5)$$

2) 总锻比等于各分锻比之和。 $K_{\text{总}} = K_1 + K_2 + \cdots P_1 + P_2 + \cdots$ 。

3) 兹拉特尼克 (Zladnik) 推荐下列公式^[3], 即当两次锻粗和两次拔长时 (图 3), 总锻比 $K_{\text{总}}$ 按下式来求:

$$K_{\text{总}} = P_1 - 1 + P_2 \cdot K \quad (6)$$

式中: 锻粗锻比 $P_1 = \frac{F_{D1}}{F_i}$, $P_2 = \frac{F_{D2}}{F}$;

$$\text{拔长锻比 } K = \frac{F_i}{F_k}。$$

4) 锻和拔的总锻比 $K_{\text{总}}$ 等于锻粗锻比乘以修正系数后, 再与拔长锻比相乘。这便是捷克 J. 艾尔夫马克提出的方法^[3], 如下式:

$$K_{\text{总}} = A^n \cdot P^n \cdot K \geq 3 \quad (7)$$

式中: A —考虑锻粗能影响锻比的当量修正系数, 因材料而异, 例如捷克的 16 251 钢钢锭锻造时 $A = 0.7$;

$$P \text{—每次锻粗锻比, } P = \frac{\text{锻后截面积}}{\text{锻前截面积}}$$

多次锻粗时取 $P_1 = P_2 = \cdots = P$;

n —锻粗次数;

$$K \text{—拔长锻比, } K = \frac{\text{钢锭截面积}}{\text{锻件截面积}}。$$

5) 苏联 Я. М. Охрименко 提出关于锻粗与拔长锻比折算为^[4]: 锻粗锻比 P 的开方值相当于拔长锻比 K 。如下式:

$$\sqrt{P} = K \quad (8)$$

式中: P —锻粗锻比, $P = \frac{\text{锻后截面积}}{\text{锻前截面积}}$;

$$\text{总锻比 } K_{\text{总}} = \sqrt{P_1} \cdot \sqrt{P_2} \cdots K_1 \cdot K_2 \cdots;$$

$$\text{或 } K_{\text{总}} = \sqrt{P_1} + \sqrt{P_2} + \cdots + K_1 + K_2 \cdots。$$

式 (8) 按下述推导出来:

如将长 l 、宽 b 、高 h 的平行六面体 (图 4) 变形, 按体积不变定律变形后尺寸为:

$$\text{长} = 1.41l, \text{宽} = 1.41b, \text{高} = \frac{1}{2}h。 \text{如看作}$$

$$\text{锻粗, 则锻粗锻比 } P = \frac{1.41b \times 1.41l}{b \times l} = 2;$$

$$\text{如看作拔长, 则拔长锻比 } K = \frac{l \times h}{1.41l \times \frac{1}{2}h}$$

$$= 1.41; \text{如要获得相同的锻比, 则应 } \sqrt{P} = K。$$

表 1 所示为不同锻造工序时, 锻比计算

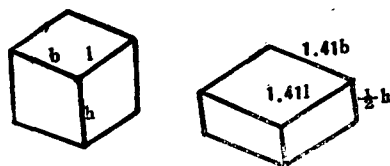
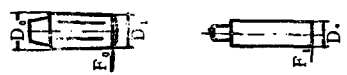
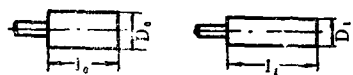
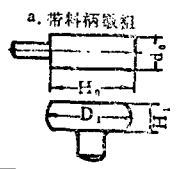
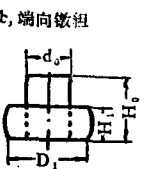
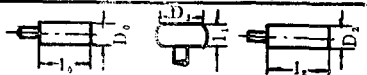
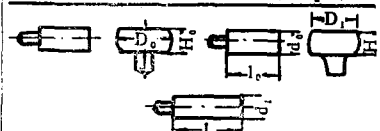
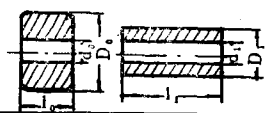
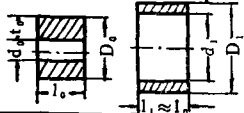
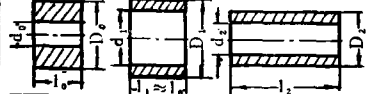
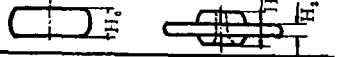



图 4 平行六面体变形前后

表 1 不同锻造工序常用的锻比计算方法

锻造工序	常用计算方法举例	锻造工序
1. 钢锭开坯	$K = F_0/F_1 = D_1^2/D_2^2$	
2. 坯料拔长	$K = D_0^2/D_1^2 = l_1/l_0$	
3. 锻粗	锻粗锻比 $P = D_1^2/d_0^2 = H_0/H_1$	a. 带料柄锻粗  b. 端向锻粗 
4. 锻后拔长	只计拔长锻比 $K = D_1^2/D_2^2 = l_2/l_1$	
5. 反复锻拔	只计K拔, K总用加法 $K = D_0^2/d_0^2 + D_1^2/d_1^2$ 或 $K = l_0/H_0 + l_1/H_1$	
6. 芯棒拔长	$K = F_0/F_1 = (D_0^2 - d_0^2)/(D_1^2 - d_1^2) = l_1/l_0$	
7. 芯棒扩孔	$K = (D_0 - d_0)/(D_1 - d_1) = t_0/t_1$	
8. 芯棒扩孔后再芯棒拔长	K总用乘法 $K_{总} = ((D_0 - d_0)/(D_1 - p_1)) l_2/l_1$	
9. 扩展轮缘	$K_{轮} = H_0/H_1$; $K_{缘} = H_0/H_2$	
10. 空心锻件穿孔	K总用乘法 $K = (D_0/(D_1 - d_1)) (D_0^2/(D_1^2 - d_1^2))$	

的常用方法。

三、对锻比各种计算方法的看法

1. 总锻比等于各个分锻比之和与积的问题

锻比是表示锻造加工量的大小，也反映了锻后金属机械性能的高低。例如表 2 所

示，用 1.1、1.5、1.8……3.5 等不同锻比来拔长 A、B、C……H 等锻件，假设每个锻件都是经两次拔长锻成，每次锻比 K_1 、 K_2 相等，试用乘法及加法求总锻比的变化规律：

若分锻比是 1.1，按乘法计算，总锻比是 1.21，按加法是 2.2；若分锻比为 3，按乘法计算，总锻比是 9，按加法是 6。虽是

受到同一变形的锻件，所得总锻比数值不一样。由表 2 可以看出，当分锻比小于 2 时，用加法比乘法所得总锻比数值较大；当分锻比大于 2 时，用加法比乘法所得总锻比数值较小。而金属的机械性能随锻比增加而改变的规律是怎样的呢？一般都是如图 5 所示，锻比小时，机械性能随着锻比增加而较快的增长，曲线较陡。锻比大时，机械性能随着锻比增大而较缓慢的变化，曲线变化较平缓。那末总锻比随着分锻比积累而增长的规律，也应该小时增长快，大时增长慢。从这一观点出发，用加法计算总锻比较合适。或者说，分锻比在 2 以下用乘法，在 2 以上用加法计算总锻比也是合理的。

表 2 用乘法及加法求总锻比的比较

锻件号	分 锻 比		总 锻 比		
	K ₁	K ₂	乘 法	加 法	对 比
A	1.1	1.1	1.21	2.2	加大于乘
B	1.5	1.5	2.25	3.0	
C	1.8	1.8	3.24	3.6	
D	2.0	2.0	4.00	4.0	相等
E	2.1	2.1	4.41	4.2	加小于乘
F	2.5	2.5	6.25	5.0	
G	3.0	3.0	9.00	6.0	
H	3.5	3.5	12.25	7.0	

但是用加法计算时，在运算的连贯性上不如乘法方便。例如在水压机上经多次拔长钢锭，其截面积变化是 $F_0 \rightarrow F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow \dots \rightarrow F_n$ ，如图 6 所示，各分锻比为：

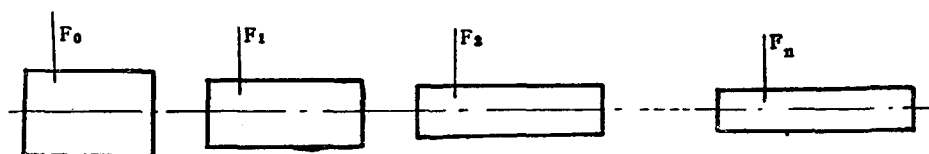


图 6 连续拔长

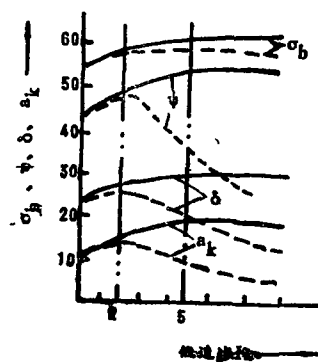


图 5 碳钢钢锭锻造时锻比对机械性能的影响

$$K_1 = \frac{F_0}{F_1}, K_2 = \frac{F_1}{F_2}, \dots,$$

$$K_n = \frac{F_{n-1}}{F_n}.$$

按乘法计算总锻比为：

$$K_{\text{总}} = \frac{F_0}{F_1} \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{F_2}{F_3} \dots \frac{F_{n-1}}{F_n} = \frac{F_0}{F_n} \quad (9)$$

按加法计算总锻比为：

$$K_{\text{总}} = \frac{F_0}{F_1} + \frac{F_1}{F_2} + \frac{F_2}{F_3} + \dots + \frac{F_{n-1}}{F_n} \neq \frac{F_0}{F_n} \quad (10)$$

可见用加法计算总锻比时，必须按各分锻比逐次相加，不能以开始变形前截面积与变形最后锻件截面积之比值 F_0/F_n 来简化替代，而乘法却可这样简化替代。如果认为由某一几何尺寸的毛坯，锻成一定几何尺寸的

锻件,经多次锻成与一次锻成所得锻件的机械性能相同的话;则加法计算总锻比便存在有问题了,而乘法没有问题。但实际上一次锻成与多次锻成的效果是不一样的。正因为这样,可以说,用加法计算就更为合理些了。

然而在生产运用中,用加法不如乘法简便,如根据总锻比求钢锭尺寸,用乘法时根据式(9),已知总锻比 K_{Σ} 及锻件截面积 F_n ,则钢锭截面积 $F_0 = F_n \cdot K_{\Sigma}$,可以很快求出。而用加法则麻烦些,从式(10)可以看出,已知 K_{Σ} 、 F_n ,还不能直接求出 F_0 ,而且在锻造操作过程中,要严格控制分锻比 K_1 、 K_2 ……等,才能符合总锻比的要求。

从以上分析可见用加法计算总锻比要确切些、麻烦些,用乘法要概略些,简便些。

2. 拔长锻比与锻粗锻比的关系及分并问题

(1) 粗锻时,坯料不翻转,坯料侧壁周围向外凸出,金属的难变形区及局部变形区相对位置自始至终没有改变。变形量大时,较之拔长更能击碎坯料中心部分的树枝晶及偏析等缺陷。

而拔长时,单就压一下来看,和粗锻本质相同,只是展宽方向侧壁外凸,而拔长方向受到抑制,展宽方向变形部分与非变形部分交接处,也受到部分抑制,并且拔长时,锻件每压一下以后,要翻转 90° 再压,金属变形不均匀性减小。所以拔长的效果较锻粗透而均匀,亦即拔长的锻比效果较锻粗为大。

(2) 拔长一般是对轴类锻件的锻造,锻后获得纤维组织,顺纤维方向的机械性能优于横向,特别是塑性指标 δ 、 ψ 、 a_k 等,更为明显,而强度指标 σ_b 、 σ_s ,在顺纤维方向及横纤维方向差别不大(图5)。

锻粗是对圆饼类锻件采用的变形工序。也可在轴类锻件的拔长过程中,穿插一些锻粗工序。锻粗能改善锻件的横向性能。

$$(3) \text{拔长锻比 } K = \frac{F_{\text{前}}}{F_{\text{后}}}, \text{ 这里的变}$$

形前后截面积,是平行于作用力方向的。而锻粗时的锻比 $P = \frac{F_{\text{后}}}{F_{\text{前}}}$,这时的变形前后截面积是垂直于作用力方向的,不同方向上的面积对比,是不能说明同样问题的,所以要把拔长锻比与锻粗锻比统一到一起来是有问题的。

由以上(1)、(2)、(3)点的分析,可见拔长与锻粗的锻造效果,并不完全一样,因而企图将拔长锻比与锻粗锻比混合到一起是勉强的、不够科学的。当有反复锻拔工序时,将拔长锻比与锻粗锻比分开计算表示,是有道理的,能更正确反映生产工艺,在作生产技术资料交流时,意义明确,但是锻拔的综合效果没有反映出来。

3. 锻粗锻比与拔长锻比之间的折算当量问题

上面分析到拔长效果优于锻粗,如果两者锻比都以金属变形前后截面积的比值来表示,则锻粗锻比值应小于拔长锻比。

按 Я. М. Охрименко 意见⁽¹⁾,锻粗锻比的开方值相当于拔长锻比,即前面提到过的式(8) $-\sqrt{P} = K$ 。

按 J. 艾尔夫马克计算总锻比的方法,在前面式(7)中已经介绍,从中可以看出:锻粗锻比 P 乘以系数 A ,相当于拔长锻比 K ,即

$$AP = K \quad (11)$$

现本文作者提出:锻粗锻比 P 的 γ 次方相当于拔长锻比 K ,即:

$$\left. \begin{aligned} PY &= K \\ 0 < \gamma &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)可按下述推导而得:

设 M 表示锻件的机械性能,如 σ_b 、 σ_s 、 δ 、 ψ 、 a_k 等, M_0 为初始状态之值,即尚未

进行锻造时坯料的机械性能, M_1 为拔长后锻件的机械性能, M_2 为锻粗后锻件的机械性能。按锻造比的意义, M_1 取决于拔长锻比 K 的大小, M_2 取决于锻粗锻比 P 的大小, 有下列函数关系:

$$M_1 = f_1(K) \quad (13)$$

$$M_2 = f_2(P) \quad (14)$$

假设拔长与锻粗获得同样锻造效果, 则 $M_1 = M_2$ (图 7), 即 $f_1(K) = f_2(P)$ 。这就有可能 $K = \varphi(P)$ 。

K 是 P 的函数, 可能存在下列解:

$$\left. \begin{aligned} K &= P^\gamma \\ 0 < \gamma &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式 (15):

$$\gamma = \frac{\lg K}{\lg P} \quad (16)$$

γ 值按图 7 方法实验, 根据式 (16) 确定。根据实验结果, 作出拔长锻比与机械性能的关系曲线 A 及锻粗锻比与机械性能的关系曲线 B, 再任取等值机械性能 $M_1 = M_2$ 时, 作水平线交 A、B 曲线于 c、d 两点, 自 c、d 向下作垂线, 找出相应的拔长锻比为 K , 锻粗锻比为 P , 得 $\gamma = \frac{\lg K}{\lg P}$ 。

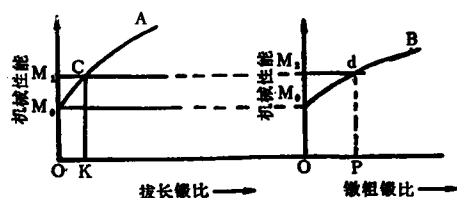


图 7 拔长锻比与锻粗锻比对机械性能的影响

式 (15) 通过下列事实验证后, 应该说是成立的。

1) 当 $\gamma = 0$, 则 $K = 1$ 。即尚未进行锻造, 坯料截面积没有变化。

2) 当 $\gamma = 1$, 则 $K = P$ 。即锻粗和拔长效果一样, 两者锻比相等。

3) 当 $\gamma = \frac{1}{2}$, 则 $K = P^{\frac{1}{2}} = \sqrt{P}$ 。锻粗锻比开方值相当于拔长锻比, 这便是 Я. М. Охрименко 公式。

将式 (15) 代入式 (11):

$$P^\gamma = AP$$

$$\gamma = \log_p A + 1 \quad (17)$$

也就是说, 当 $\gamma = \log_p A + 1$, 则 $K = AP$ 这便是 J. 艾尔夫马克公式⁽³⁾。

按 J. 艾尔夫马克对 16 251 钢进行实验的结果, $A = 0.7$, 现在假设锻粗锻比 $P = 3$, 代入式 (17), 得 $\gamma = \log_3 0.7 + 1 = 0.67$ 。 γ 值是在 $0 \rightarrow 1$ 之间, 说明式 (15) 适用于 J. 艾氏公式是对的。

Я. М. Охрименко 公式 $\sqrt{P} = K$ 是单纯从坯料几何尺寸关系推导出来的, 没有联系锻比对机械性能影响这一因素; 而 J. 艾氏公式 $AP = K$ 只是从一种材料作一种试验 (冲击) 然后对比锻造比对冲击韧性影响而获得的公式, 该公式是直线关系方程, 还不能说明是否具有普遍意义。

本文作者新提出的公式 $P^\gamma = K$, 是根据拔长锻比对锻件机械性能的影响关系而推导出来的, 具有概括性和普遍意义。Я. М. Охрименко 公式和 J. 艾氏公式都包括进去, 只是 γ 值没有定量确定, 但指出了确定的方法。即对一种锻造材料进行不同锻比的锻粗与拔长, 再取试件作机械性能试验, 然后取两者机械性能相等值时, 找 P 、 K 对应值 (图 7), 再代入新公式 (15), 即可求出 γ 值。但对不同材料, γ 值可能不一样, 即在同一锻造材料中, 作不同的机械性能试验 (如 σ_b 、 δ 、 a_k 等), 所得 γ 值也不会一样, 这时 γ 取平均值。可能工作量较大, 但只要明确了方法, 采用数理统计回归分析方法, 可以逐步积累完成。 γ 值确定后, 生产中使用起来就很方便, 特别对大型锻件的锻造, 尤其适用。

按式(15)进一步求总锻比时,如用乘法则写成: $K_{\text{总}} = \sum K_i \cdot \sum P_i^{\gamma}$; 如用加法则写成: $K_{\text{总}} = \sum K_i + \sum P_i^{\gamma}$ 。

4. 其它应该说明的问题

还应该指出, 锻造比是反映锻造加工量大小的一个重要参数, 它只是根据坯料及锻造尺寸而确定的参数, 没有考虑到锻造过程中对锻件性能有影响的其它许多因素, 如变形方案、坯料尺寸与体积、工具形状与尺寸, 变形温度、变形速度等不同, 虽锻比相同, 锻出的锻件机械性能也不会完全一样。不过由于其计算方便, 且可大致地反映锻件质量, 编制锻造工艺规程时, 需要根据锻比大小来选择钢锭或坯料尺寸, 并确定锻造工序, 故在生产技术中有广泛使用价值。

四、结 论

(1) 锻比计算方法不统一, 在生产中运用技术资料或经验交流中, 容易造成混乱, 需要作出统一规定。

(2) 单工序拔长时, 总锻比等于各分锻比之积, 计算方便, 但分锻比不确切, 锻造操作工序比较灵活。

总锻比等于各分锻比之和, 更能反映机械性能变化上的规律, 计算上麻烦些, 但确切些, 操作上需要严格控制分锻比。

目前有的采用: 分锻比在2以下用乘法, 2以上用加法。这有一定的合理性。

(3) 当有锻拔混合工序而计算总锻比时, 将锻粗锻比与拔长锻比分开计算表示, 能更确切地反映生产工艺, 作生产技术资料交流时, 内容明确具体, 但不如合并计算或只计算拔长锻比者简便。此外, 锻与拔的锻造综合效果没有反映出来。

(4) 锻粗锻比与拔长锻比的折算问题, 本文提出了新的公式: $P^{\gamma} = K$ 且 $0 < \gamma \leq 1$ 。该公式具有概括性, 目前国内外提出过的一些折算公式, 都包括在内。文中提出了 γ 值的确定方法。如折算问题得到解决, 则计算锻拔总锻比也就可以解决, 在生产中会带来许多方便。

参 考 文 献

- (1) Я. М. Охрименко, Кузнечно—штамповочное Производство 2 (1959)
- (2) П. Ф. Иваницкий и др. Кузнечно—штамповочное производство, 9 (1959)
- (3) J. 艾尔夫马克(捷克)《国外机械》2 (1964) 26

(上接第100页)

这样基本上可以得出, 凡超声波显示的组织结构变化确定不了准确位置的地方, 这里所表明淬硬层深度范围就更大。在这些情况下, 特别是在对测量精度要求很高时, 首先一关是应用的测试头必须具备最大可能精密的矫正特性曲线, 使其能通过包迹线和发送电脉冲的长度发生作用。为了保证对深度有较好的分辨能力, 脉冲不能太长, 斜向输入声波时振荡头的直径也不宜过大。

如果接收放大器的频带宽度有合适的选择, 发送脉冲频率、检测头传感器的固有振荡频率以及接收放大器滤波曲线的频率, 都准确地相互吻合, 就能在较困难的条件下进行精密的测量, 因为声波的散射和吸收都与频率有很大关系。这一简短的叙述表明, 本文所说的测量装置的测量精度, 在采取适当措施之后, 一定还有所提高。

张 敏 译自 Materialkrüf 14 (1972) Nr. 5