

工艺优化设计

身管径向精密锻造的塑性应变分析与锻造比研究

樊黎霞, 赵轲, 董雪花

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要: **目的** 研究身管径向精密锻造中,不同变形阶段的锻造比与塑性应变的关系,以及内膛成形的条件。**方法** 提出了局部锻造比的概念,推导了整体锻造比和局部锻造比的关系。基于局部锻造比,给出了单次锻打所产生的塑性应变增量,求出了径向锻造过程的全场塑性应变的解析解。将弹线膛同时锻造成形的过程分为下沉段和锻造段,探讨了下沉段和锻造段的锻造比对各自塑性变形的影响,提出了内膛成形的必要条件,并用实际身管锻打进行了试验验证。**结果** 每个截面沿轴向的变形都是均匀的拉应变,其值和锻造比成正比;径向和周向应变随着径向位置而变化,且和半径的平方成反比。**结论** 下沉段的锻造比过大对内膛成形不利,增大锻造段的锻造比有利于内膛的成形。

关键词: 身管径向锻造; 锻造比; 塑性应变; 内膛成形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.01.001

中图分类号: TG316.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)01-0001-08

Study on Plastic Strain and Forging Ratio in Radial Forging Process of Barrel

FAN Li-xia, ZHAO Ke, DONG Xue-hua

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the relation of plastic strain and forging ratios in different deformation stages and the requirements for bore forming in the process of radial precise forging of barrel. **Methods** The concept of local forging ratio was proposed, and the relationship of local and whole forging ratios was derived. The increment strain of single forging was derived from whole forging ratio, and the whole strains of radial forging were obtained. The sinking stage and forging stage were proposed in the radial forging process of a barrel's bore, and the effects of their forging ratios on plastic strain were studied. The requirement of bore forming was proposed, and the actual example of forging was used to prove the requirement. **Results** The calculation results indicated that the axial strain was uniform tension strain and was proportional to the forging ratio; the radial and circumferential strains changed with the radial position and were inverse proportional to the square of forging ratio. **Conclusion** Too large a forging ratio of sinking stage is bad for bore's forming and a large forging ratio of forging stage is good for bore forming.

KEY WORDS: radial forging of barrel; forging ratio; plastic strain; bore forming

收稿日期: 2013-12-07

作者简介: 樊黎霞(1965—),女,浙江缙云人,博士,教授,主要研究方向为先进工艺及装备、加工模拟及模具、工艺参数化设计、CAE及应用,曾获部级科技进步三等奖2项。

轻武器的身管径向锻造是一个复杂的成形过程,本文以枪管冷径向锻造为研究对象。国内外很多学者对身管内膛径向锻造进行了研究,G. D. Lahoti^[1],Ghaei^[2],Sanjari^[3]利用主应力法和上限法,分析了身管径向锻造过程,给出了径向锻造过程中的应力、应变分布状况,并分析了锻造比、摩擦因数等对锻造载荷和应力的影响。身管内膛径向锻造过程中涉及到的工艺参数很多,Abbas Ghaei^[4]利用有限元法分析了各工艺参数对锻打力的影响,Ameili^[5]利用 ABAQUS 分析了工艺参数对锻件残余应力和锻打力的影响。国内部分学者^[6-8]对实心轴类零件的径向锻造过程做了一系列研究,但均没有考虑不同变形阶段的锻造比之间的区别。樊黎霞^[9-10]利用有限元模拟了身管内膛径向锻造成形过程,并分析了各工艺参数对内膛成形效果的影响,刘力^[11-13]研究了各工艺参数对身管残余应力的影响及应力分布。其中锻造比是身管内膛在锻造成形过程中很重要的一个参数,通常定义为:

$$\Phi = \frac{A_{\text{初始面积}} - A_{\text{锻后面积}}}{A_{\text{初始面积}}}$$

锻造比过大会产生很大的锻打力,锻造比过小则容易引起身管锻不透、膛线无法成形等致命缺陷。南京理工大学的王志刚^[14]和王贺^[15]研究了锻造比对加工中锻打力和膛线成形的影响,但目前的文献中,通常仅仅只对整体锻造比进行研究。

身管内膛径向锻造是一种多次局部锻打的过程,变形是逐渐累积的,并且在弹线膛同时锻造成形过程中,有两段典型的过程:下沉段和锻造段,见图2。两段的变形形式并不相同,因此提出了局部锻造比的概念,建立了整体锻造比与局部锻造比的关系,并将锻造过程分为下沉段和锻造段2个阶段,分别研究2个阶段的锻造比对身管内膛径向锻造结果的影响。

1 身管径向锻造过程的几何分析

身管弹线膛同时成形的径向锻造过程见图1,身管四周对称分布的4个锤头对毛坯进行高频率径向同步锻打,锻打的同时毛坯一边旋转一边做轴向进给运动,内有芯棒,其具有线膛和弹膛的特征,用以身管内膛的成形。研究的变形部分是属于弹线膛同时成形加工中的线膛成形部分,按照变形过程可以分为2个阶段,第1个阶段:毛坯内外径减小,但单边的厚度 h_0 仍保持不变,直至毛坯内径与芯棒外径相等,此时由于毛坯的单边厚度不变,所以身管膛线并没有成形,该阶段定义为下沉段。第2个阶段:身管毛坯的材料随着锤头的继续下压流入芯棒的膛线槽内,形成身管膛线,同时身管毛坯外径减小,此过程主要是身管内膛成形,身管单边厚度由 h_0 减小到 h ,定义为锻造段,见图2。

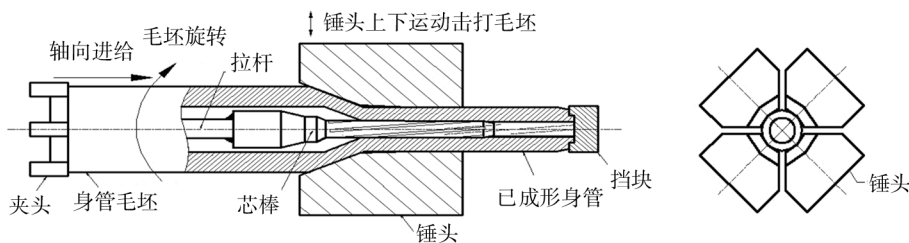


图1 身管径向锻造工艺示意

Fig. 1 Sketch of radial forging process of barrel

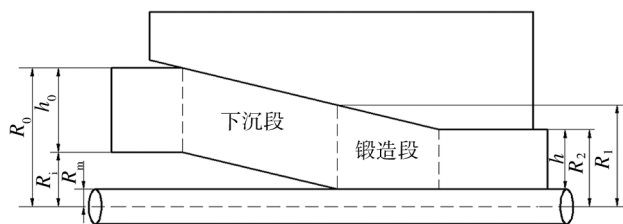


图2 身管径向锻造过程的变形示意

Fig. 2 Sketch of deformation in radial forging process

身管内膛径向锻造是一种多次局部锻打变形累积的过程,设工件的进给速度为 v ,则两次相邻锻打之间锤头和工件相对距离移动为 vT ,见图3,其中 T 为锤头锻打工件时往复运动的周期。根据锤头的形状,可以得出锤头每次下压工件时径向的压下量为: $s = vT \tan \alpha$,从图2可以看出,下沉段径向总的变形量为 $R_1 - R_m$,锻造段径向总的变形量为 $h_0 - h$ 。可以得出下沉段和锻造段完成锻造分别所需的次数 M ,

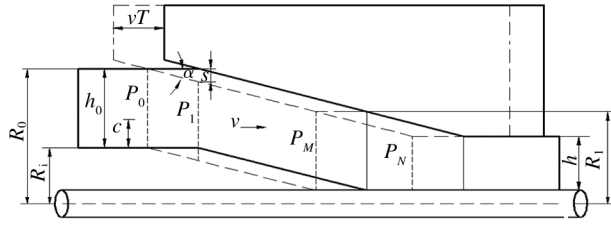


图3 两次锻打之间锤头和工件之间相对位置

Fig. 3 The relative position between hammer and workpiece during two-step forging

N 为:

$$M = \frac{R_i - R_m}{s}, N = \frac{h_0 - h}{s}$$

从图3可以看出,经过一次锻打后,初始截面 P_0 的变形状态,就变成了 P_1 的变形状态,经过 M 次锻打后下沉段结束,变形成为截面 P_M 的变形状态,进入锻造段变形阶段,直至截面 P_N ,锻造段结束。为了分析单次锻打与整体变形之间的关系,引入能够表示身管单次锻打过程中变形程度的局部锻造比 φ ,将第 n 次锻打过程中的局部锻造比定义为: $\varphi_n = \frac{A_{n-1} - A_n}{A_{n-1}}$,而将从初始状态到第 n 次锻打的整体锻造

比定义为: $\Phi_n = \frac{A_0 - A_n}{A_0}$,通过简单的几何计算,可以得出整体锻造比和局部锻造比的关系式如下:

$$\Phi_n = \Phi_{n-1} + \varphi_n(1 - \Phi_{n-1}) \quad (1 \leq n \leq M+N) \quad (1)$$

根据身管变形的几何关系,可以写出下沉段内局部锻造比:

$$\varphi_n = \frac{A_{n-1} - A_n}{A_{n-1}} = \frac{2s}{2(R_i - n + 1)s + h_0} \quad (1 \leq n \leq M) \quad (2)$$

锻造段内局部锻造比:

$$\varphi_n = \frac{A_{n-1} - A_n}{A_{n-1}} = \frac{s(2R_m - ns + h_0 + s)}{[2R_m - (n-1)s + h_0](h_0 - ns + s)} \quad (M \leq n \leq N) \quad (3)$$

其中2个变形阶段的整体锻造比 Φ_1, Φ_2 为:

$$\Phi_1 = \frac{A_0 - A_M}{A_0} = \frac{(R_0^2 - R_i^2) - (R_1^2 - R_m^2)}{R_0^2 - R_i^2} = 1 - \frac{2R_m + h_0}{2R_i + h_0} \quad (4)$$

$$\Phi_2 = \frac{A_M - A_N}{A_M} = \frac{(R_1^2 - R_m^2) - (R_2^2 - R_m^2)}{R_1^2 - R_m^2} = 1 -$$

$$\frac{h(2R_m + h)}{h_0(2R_m + h_0)} \quad (5)$$

整个变形过程的总锻造比如下:

$$\Phi_{\text{总}} = \frac{A_0 - A_N}{A_0} = \frac{R_0^2 - R_2^2}{R_0^2} = 1 - \frac{(R_m + h)^2}{(R_i + h)^2} \quad (6)$$

其中: A_0 为毛坯的横截面积; A_M 为下沉段与锻造段交界处的横截面面积; A_N 为锻件成品的横截面面积; R_0 为身管毛坯外壁半径; R_i 为身管毛坯内壁半径; R_m 为芯轴半径; h_0 是毛坯单边厚度; h 为成形后锻件单边厚度; R_1 是下沉段和锻造段交界处的半径; R_2 为身管成形后锻件的半径。几何关系如下:

$$h_0 = R_0 - R_i, h = R_2 - R_m, R_1 = R_0 - R_i + R_m$$

将 Φ_1 和 Φ_2 看作2个局部锻造比,把 $\Phi_{\text{总}}$ 看作整体锻造比,由式(1)可得三者之间的关系:

$$\Phi_{\text{总}} = \Phi_1 + \Phi_2(1 - \Phi_1) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,2个阶段的锻造比和总的锻造比之间存在着简单的数学关系,为研究两部分的锻造比对锻造过程的影响提供了方便。

2 身管径向锻造过程中塑性应变的解析分析

2.1 塑性力学分析模型

由于身管径向锻造属于局部加载成形,每次加载的成形载荷和变形都很小,根据塑性力学知识,对于轴对称小变形的问题有:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

其中: u 为某一质点的位移; r 为该质点与中心轴线的距离; ε_r 为径向应变; ε_θ 为周向应变。又根据塑性力学中的体积不变原理得 $\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0$, 即 $\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} + \varepsilon_z = 0$ 。

假设身管毛坯在径向锻打过程中,每个横截面的材料轴向流动都是均匀的,轴向应变 ε_z 并不随着径向位置的变化而变化,所以假设 ε_z 为与 r 无关的常量。解上面的微分方程可以得到:

$$u = \frac{r}{2}(Br^{-2} - \varepsilon_z) \quad (8)$$

其中: B, ε_z 与 r 无关。

2.1.1 下沉段的塑性应变分析

根据几何分析可知,按照实际生产中锻打频率和锤头几何形状,把下沉段的变形分成 M 次局部变形过程,每次的应变增量累加后可得整体的塑性应变。

选择下沉段中的第 n ($1 \leq n \leq M$) 个截面的变形进行研究,此次锻打产生的是该截面的应变增量,记为 $\Delta \varepsilon_n$ 。对于轴向应变来说,主要跟材料的轴向伸长有关。设 l_n 为第 n 锤后的材料长度, l_{n-1} 为前一锤时的材料长度,结合材料体积不变原则,可以推导出:

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{l_n - l_{n-1}}{l_{n-1}} = \frac{\varphi_n}{1 - \varphi_n} = \frac{2s}{2(R_i - ns) + h_0} \quad (9)$$

其中: φ_n 为第 n 锤的局部锻造比; $\Delta \varepsilon_n$ 为第 n 锤产生的轴向应变增量。

内表面的边界条件为: $r = R_i - ns, u = -s$ 。代入式(8)得:

$$-s = \frac{R_i - ns}{2} [B_n (R_i - ns)^{-2} - \Delta \varepsilon_n] \quad (10)$$

$$\text{即: } \Delta \varepsilon_n = B_n (R_i - ns)^{-2} + \frac{2s}{R_i - ns} \quad (11)$$

式(9)和(11)联立可得:

$$B_n = -\frac{2s(R_i - ns + h_0)(R_i - ns)}{2(R_i - ns) + h_0} \quad (12)$$

对于身管径向位置任一点的半径为:

$$r = R_i - ns + c$$

式中: c 为该点到毛坯内表面的径向距离。

由式(8)可得:

$$\Delta \varepsilon_{rn} = \frac{du}{dr} = -\frac{1}{2} [B_n (R_i - ns + c)^{-2} + \Delta \varepsilon_n] \quad (13)$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta n} = u/r = \frac{1}{2} [B_n (R_i - ns + c)^{-2} - \Delta \varepsilon_n] \quad (14)$$

$$\Delta \varepsilon_{zn} = \frac{2s}{2(R_i - ns) + h_0} \quad (15)$$

由以上结果可以求出截面 n 的各向应变增量,各向的累积应变可通过式(16)求得:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n+1} + \Delta \varepsilon_n \quad (16)$$

式(16)可以求出下沉段任意截面的累积应变,下沉段结束位置的累积应变就是: $\varepsilon_{rM}, \varepsilon_{zM}, \varepsilon_{\theta M}$ 。

2.1.2 锻造段的塑性应变分析

根据几何分析,锻造段的变形可以分为 N 次局部变形,每次变形所产生的应变增量累加后可得到整体应变。

设锻造段中的第 n ($M \leq n \leq N$) 个截面的变形产生的应变增量为 $\Delta \varepsilon_n$ 。同 2.1.1 章节,该截面轴向应变增量为:

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{\varphi_n}{1 - \varphi_n} = \frac{s^2 + 2sR_m + h_0 - ns}{2R_m + h_0 - ns(h_0 - ns)} \quad (17)$$

内表面的边界条件为: $r = R_m, u = 0$ 。代入式(8)得:

$$0 = \frac{R_m}{2} (B_n R_m^{-2} - \Delta \varepsilon_n) \quad (18)$$

$$\text{即: } \Delta \varepsilon_n = B_n R_m^{-2} \quad (19)$$

式(17)和(19)联立可得:

$$B_n = \frac{(s^2 + 2sR_m + h_0 - ns) R_m^2}{2R_m + h_0 - ns(h_0 - ns)} \quad (20)$$

对于身管径向任一点的半径为:

$$r = R_m + h_0 - nsc/h_0$$

由式(8)可得:

$$\Delta \varepsilon_{rn} = \frac{du}{dr} = -\frac{1}{2} B_n \left[R_m + \frac{(h_0 - ns)c}{h_0} \right]^{-2} - \frac{1}{2} \Delta \varepsilon_n \quad (21)$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta n} = \frac{u}{r} = \frac{1}{2} B_n \left[R_m + \frac{(h_0 - ns)c}{h_0} \right]^{-2} - \frac{1}{2} \Delta \varepsilon_n \quad (22)$$

$$\Delta \varepsilon_{zn} = \frac{s^2 + 2sR_m + h_0 - ns}{2R_m + h_0 - ns(h_0 - ns)} \quad (23)$$

同理锻造段的每个截面的累积应变就可以通过式(24)求出:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n-1} + \Delta \varepsilon_n \quad (24)$$

所以下沉段最终的累积应变就是 $\varepsilon_{rN}, \varepsilon_{zN}, \varepsilon_{\theta N}$ 。

身管锻造过程中总的应变为:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rM} + \varepsilon_{rN}; \varepsilon_z = \varepsilon_{zM} + \varepsilon_{zN}; \varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta M} + \varepsilon_{\theta N} \quad (25)$$

2.2 解析结果分析

结合 2.1.1 和 2.1.2 章节可以求出身管径向锻造过程中整个应变场的塑性应变,可以较方便地研究塑性应变的问题。

2.2.1 锻打次数与累积应变

选择某一型号身管研究锻打次数与累积应变的关系,其中锤头锻造压入角 $\alpha = 8.75^\circ$,芯棒的半径 $R_m = 3.02 \text{ mm}$;身管毛坯外径、毛坯内径、锻件外径、锻件内径分别为 14.5, 5.75, 10.08, 3.02 mm。锻造工艺参数:身管轴向进给速度为 200 mm/min;锤头与毛坯之间的摩擦因数为 0.2;芯棒与毛坯之间的摩擦因数为 0.05;锻打频率为每分钟 1200 次。

将参数代入公式,得下沉段的锻打次数 $M=106$,锻造段的锻打次数 $N=26$ 。将每次锻打的局部应变求解后,得到的累积应变与锻打次数的数据,绘成曲线,见图4。

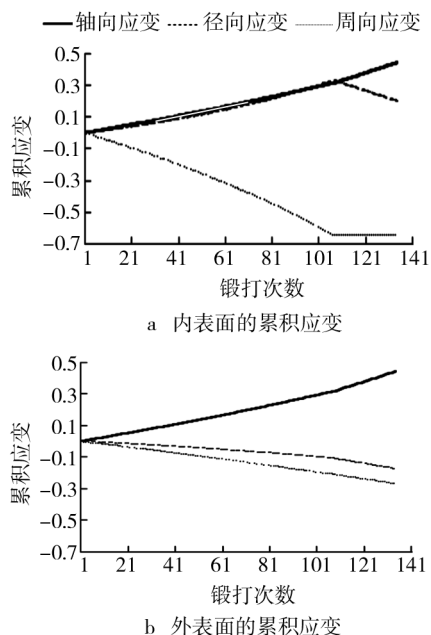


图4 身管累积应变随锻打次数的变化

Fig. 4 Changes of accumulated strain of barrel with forging time

从图4可以看出下沉段和锻造段的分界位置。图4a中,在内表面,下沉段的轴向和径向应变均为拉应变,周向应变为压应变,且随着锻打次数呈近似线性增大,说明在下沉段各次锻打产生的应变是均匀的。在锻造段,轴向应变继续线性增大,但斜率比下沉段大,说明在锻造段每次锻打产生的轴向应变增量比较大。由于在锻造段,内径不再减少,所以内表面的周向应变不再变化,而径向应变增量为压应变,所以总的径向应变在变小。从图4b中可以看出,外表面的轴向应变一直为拉应变,大小和内表面一致;周向和径向应变都为压应变,二者均随着锻打次数的增加而线性增大,其中周向应变在下沉段和锻造段都以一个斜率变化,而径向应变在锻造段斜率较大,说明该段的应变增量较大。

2.2.2 下沉段和锻造段应变随身管径向位置的变化

按照2.2.1章节中的身管几何尺寸,分别作下沉段和锻造段结束截面的各向应变随身管径向位置的变化趋势图,数值由径向方向从内表面到外表面均匀取8个点计算得到。

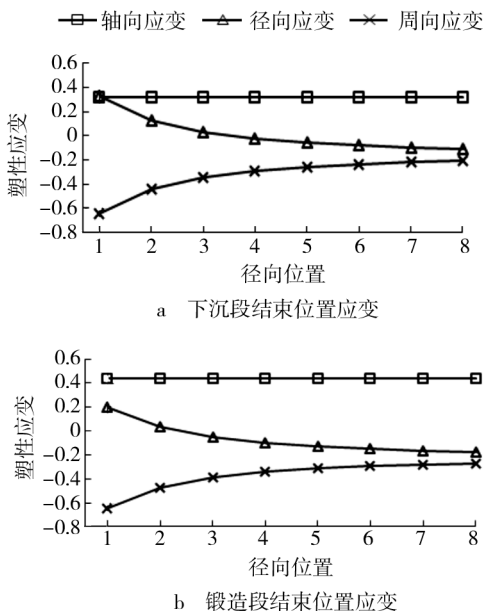


图5 下沉段和锻造段的应变随径向位置的变化

Fig. 5 Changes of strains of sinking and forging stages with radial direction

从图5可以看出,轴向应变不随径向位置变化,即在工件同一横截面上,轴向应变保持常量。径向应变和周向应变都随着径向位置而变化,且和半径的平方成反比。无论在内表面还是外表面,周向应变均为压应变,且从内表面到外表面逐渐上升。从内表面到外表面径向应变曲线逐渐下降。

3 锻造比对塑性应变的影响

3.1 下沉段锻造比对塑性应变的影响

从式(4)和(5)可以看出,在影响锻造比的参数中只改变 R_i 时,只有下沉段的锻造比改变,而锻造段的锻造比不会变化,由此可以分析出下沉段锻造比的改变对塑性应变的影响。

以2.2.1章节中的身管为例,只改变毛坯内径 R_i ,研究其对塑性应变的影响,具体方案见表1。

通过公式计算出表1中各组的累积应变,在径向方向平均选8个取值点,结果见图6。

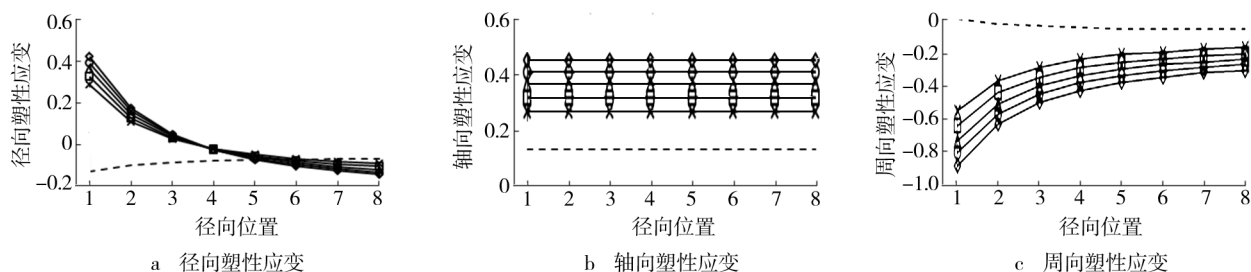
从图6可以看出,下沉段的径向应变在身管内表面为拉应变,在身管外表面为压应变,且随着锻造比的增加而增大;轴向应变为拉应变,表明身管轴向

表 1 下沉段锻造比对塑性应变影响的计算分组方案

Table 1 Grouping scheme for researching the effect of sinking stage's forging ratio on plastic strain

方案 编号	毛坯内径 R_i/mm	毛坯厚度 h_0/mm	锻件内径 R_m/mm	锻件厚度 h/mm	下沉段锻 造比 Φ_1	锻造段锻 造比 Φ_2	总锻造 比 Φ
1 [#]	5.25	8.75	3.02	8.06	0.232	0.122	0.325
2 [#]	5.75	8.75	3.02	8.06	0.270	0.122	0.359
3 [#]	6.25	8.75	3.02	8.06	0.304	0.122	0.389
4 [#]	6.75	8.75	3.02	8.06	0.335	0.122	0.416
5 [#]	7.25	8.75	3.02	8.06	0.363	0.122	0.433

— 下沉段应变 -- 锻造段应变 $\times \Phi=0.325(\Phi_1=0.232)$ $\square \Phi=0.359(\Phi_1=0.270)$ $\triangle \Phi=0.389(\Phi_1=0.304)$ $\diamond \Phi=0.416(\Phi_1=0.335)$ $\circ \Phi=0.433(\Phi_1=0.363)$

图 6 $\Phi_2=0.122$ 时各塑性应变随锻造比的变化Fig. 6 Changes of kinds of plastic strain with forging ratio when $\Phi_2=0.122$

伸长,其数值大小与锻造比成正比;周向应变为压应变,身管内表面数值最大,外表面最小。整个下沉段的应变表现为:径向在内表面拉伸、外表面压缩,周向压缩,轴向拉伸,且径向和周向应变数值和半径的平方成反比。由于锻造段的锻造比固定,所以该段的各向应变均不变。

3.2 锻造段锻造比对塑性应变的影响

该部分只研究 Φ_2 对身管应变的影响,固定 Φ_1 增加 Φ_2 ,使得总锻造比分别与第 1 组的总锻造比一

一对应相等,从式(4)和(5)可以看出,只改变锻件厚度 h 时,可以使得 Φ_2 改变而 Φ_1 不变。具体分组见表 2。

与 3.1 章节同理,计算结果见图 7。从图 7 可以看到,锻造段的径向应变为压应变,轴向应变为拉应变,且二者数值均随着锻造比增大而增加。周向应变在内表面接近 0,在外表面为压应变,且随锻造比的增大而增大,但其变化程度不大,说明在锻造锻变形主要发生在径向和轴向方向。由于下沉段的锻造比固定,所以该段的各向应变均不变。

表 2 锻造段锻造比对塑性应变影响的计算分组方案

Table 2 Grouping scheme for researching the effect of forging stage's forging ratio on plastic strain

方案 编号	毛坯内径 R_i/mm	毛坯厚度 h_0/mm	锻件内径 R_m/mm	锻件厚度 h/mm	下沉段锻 造比 Φ_1	锻造段锻 造比 Φ_2	总锻造 比 Φ
1 [#]	5.75	8.75	3.02	8.32	0.27	0.076	0.325
2 [#]	5.75	8.75	3.02	8.06	0.27	0.122	0.359
3 [#]	5.75	8.75	3.02	7.82	0.27	0.162	0.389
4 [#]	5.75	8.75	3.02	7.58	0.27	0.201	0.416
5 [#]	5.75	8.75	3.02	7.36	0.27	0.237	0.433

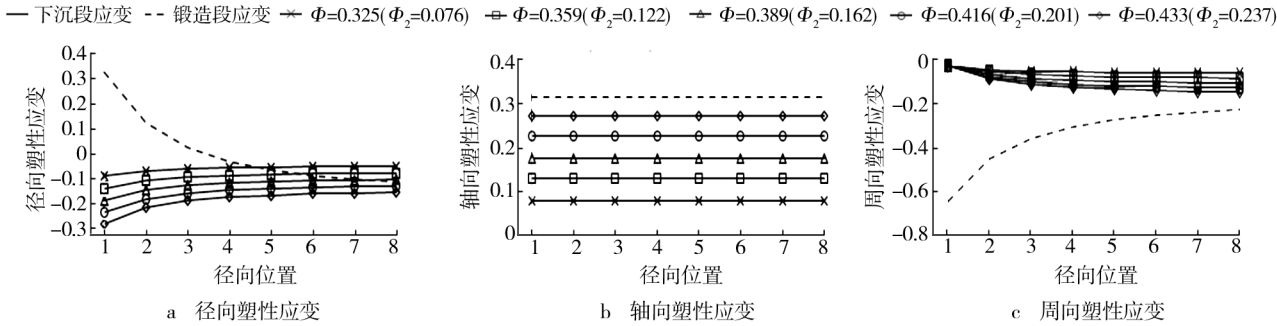


图7 $\Phi_1=0.27$ 时各塑性应变随锻造比的变化

Fig. 7 Changes of kinds of plastic strain with forging ratio when $\Phi_1=0.27$

3.3 改变锻造比的方式对内表面塑性应变的影响

按照表1和2的分组方案,分析在总锻造比对应相等的情况下,分别改变下沉段和锻造段的锻造比所引起的内表面塑性应变的变化。根据2.1章节所述的应变累积原则,身管整体应变就是下沉段和锻造段应变之和,所以将两段应变相加就可以得到整体应变,数据取自身管内表面,结果见图8。

从图8可以看出,虽然两组总的锻造比对应相等,但产生的整体应变并不相同。在图8a中,当 Φ_2 不变而增大 Φ_1 时,内表面总的径向应变随总锻造比增大而增大。因为锻造段径向应变为压应变且保持不变,下沉段径向应变为拉应变,且随 Φ_1 增大而增大,见图6a,所以两者对应相加后,总的径向应变随总锻造比增大而增大。当 Φ_1 不变而增大 Φ_2 时,内表面总的径向应变随总锻造比增大而减小。因为下沉段径向应变为拉应变且保持不变,锻造段径向应变为压应变,且随 Φ_2 增大而增大,见图7a,所以两者对应相加后,总的径向应变随总锻造比增大而减小。可见2个方案中,随着总锻造比的增加,径向应变的变化趋势完全不同;对轴向应变,下沉段锻造比和锻造段锻造比对其影响是一致的,见图8b。对周向应变,由于 Φ_2 几乎不引起内表面的周向应变,所以周向应变主要由 Φ_1 决定,当通过增加 Φ_2 来增加总锻造比时,其周向应变不随总锻造比增加而变化,而通过增加 Φ_1 来增加总锻造比时,内膛周向应变随着 Φ_1 增加,其压应变逐渐增大,见图8c所示。

综合上述分析,下沉段和锻造段所产生的应变方式和影响程度是完全不一样的,周向应变主要由

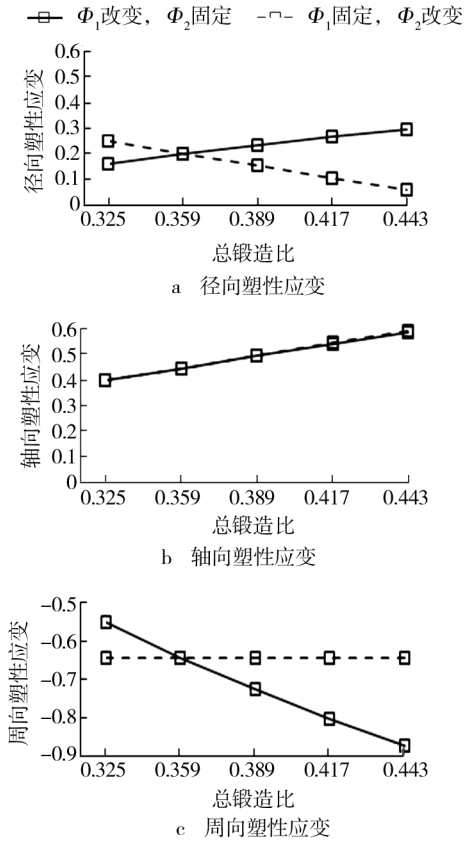


图8 2种方案中整体塑性应变随总锻造比的变化

Fig. 8 Changes of kinds of plastic strain with whole forging ratio by two schemes

下沉段锻造比决定,轴向应变由2个阶段的拉应变相加而成,而径向应变由下沉段的拉应变和锻造段的压应变叠加而成。从上述分析中得出:总的锻造比并不能反映变形状况,只有将总的锻造比分成下沉段锻造比和锻造段锻造比,对其分别进行分析,才能得出变形规律。

4 对内膛成形条件的探讨

根据加工过程的经验,身管内表面的径向塑性应变会影响内膛成形,只有身管内表面存在压应变才能促使材料完全充满膛线槽内,因此认为内膛成形的必要条件是:

$$\varepsilon_{r\text{总}} = \varepsilon_{r\text{下沉段}} + \varepsilon_{r\text{锻造段}} \leq 0 \quad (28)$$

按照分析,下沉段在内表面产生径向拉应变,且随下沉锻造比增大,内表面径向拉应变增大,因此对内膛成形不利。锻造段在内表面产生径向压应变,且随着锻造比增大,其内表面径向压应变也增大,所以锻造段的锻造比对内膛成形有利。

按照文中的解析法,根据身管具体的几何参数和锻造工艺参数,可以分别求出下沉段和锻造段在内表面的径向应变,然后判别内膛是否能够成形,为身管的设计和生產提供依据。

生产中身管的几何尺寸:毛坯外径、毛坯内径、锻件外径、锻件内径分别为 16.5, 5.5, 12.25, 3.02 mm。按照生产中的实际参数,可以计算出下沉段和锻造段的径向应变分别为: $\varepsilon_{r\text{下沉段}} = 0.3471$, $\varepsilon_{r\text{锻造段}} = -0.2827$, $\varepsilon_{r\text{总}} = 0.0644 \approx 0$, 所以该型号在实际锻打中可以顺利成形。图 9 是按照该实际参数锻打后,将身管剖开后的照片,图中膛线清晰可见。

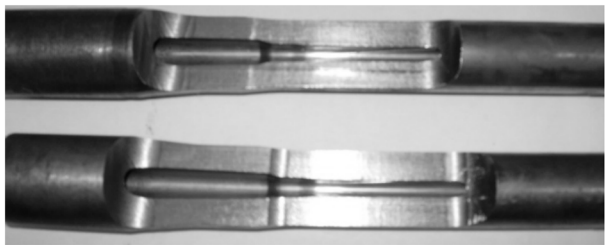


图 9 D33#身管内膛成形

Fig. 9 Forming graph of D33# barrel's bore

5 结论

根据身管变形过程的特点,提出了局部锻造比的概念,推导了局部锻造比和整体锻造比的关系。基于局部锻打的小变形理论、体积不变原理及工件截面轴向均匀变形假设,推导了一次锻打所生成的塑性应变增量,从而得出了径向锻造过程的全场塑性应变的解析解。得出以下结论。

1) 径向应变随着径向位置的变化而变化,且和半径的平方成反比;内表面径向应变在下沉锻为拉应变,而在锻造段为压应变,所以内表面总径向应变取决于下沉段和锻造段径向应变的和。

2) 对轴向应变,不论下沉锻还是锻造锻,每个截面沿轴向的变形是均匀的,且为拉应变,其值和锻造比成正比。

3) 周向应变随着径向位置的变化而变化,且和半径的平方成反比;周向应变在下沉段为压应变,而在锻造段,其内表面周向应变为 0,所以其内表面上的周向应变取决于下沉段。

4) 提出了内膛成形的必要条件,并用实际锻打进行了试验验证。可以得出,下沉段的锻造比过大对内膛成形不利,锻造段的锻造比增大有利于内膛的成形。

参考文献:

- [1] LAHOTI G D, ALTAN T. Analysis and Optimization of the Radial Forging Process for Manufacturing Gun Barrels[J]. Journal of Engineering for Industry, 1976(1): 265—271.
- [2] GHAEI A, KARIMI T A, MOVAHHEDY M R. A New Upper Bound Solution for Analysis of the Radial Forging Process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48(11): 1264—1272.
- [3] SANJARI M, KARIMI T A, GHAEI A. Prediction of Neutral Plane and Effects of the Process Parameters in Radial Forging Using an Upper Bound Solution[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1-3): 147—153.
- [4] GHAEI A, MOVAHHEDY M R. Die Design of the Radial Forging Process Using 3D FEM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1-2): 534—539.
- [5] AMELI A, MOVAHHEDY M R. A Parametric Study on Residual Stresses and Forging Load in Cold Radial Forging Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007(33): 7—17.
- [6] 董节功, 周旭东, 朱锦洪. 径向锻造三维成形锻造透性的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2007, 31(3): 76—78.
DONG Jie-gong, ZHOU Xu-dong, ZHU Jin-hong. FEM Simulation of Forging Penetration Efficiency of Radial Forging in 3D[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(3): 76—78.

- 67—70.
- YANG Ji-zhang, SUN Jian-jun, WANG Wei, et al. Die Forging Technology and Mold Design of High Hub Gear Blank [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 67—70.
- [7] HU C L. A Novel Cold Precision Forging Process of Spur Gear with Boss and Its Numerical Simulation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(9): 1494—1497.
- [8] ZHANG Q, CUI H, WANG Y. Process Design for Cold Precision Forging of Bevel Gear [C]. In 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2010 Changsha: IEEE Computer Society, 2010.
- [9] MAE Y, P POONNAYOM, A WONGKRAJANG. Wear Mechanism of Hot Forging Die from the Viewpoint of Diffusion [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 18(1): 16—20.
- [10] 万贤毅, 虞跃生, 唐忠杰. 汽车变速器齿轮整体精锻成形工艺研究[J]. 汽车工艺与材料, 2002(2): 6—8.
- WAN Xian-yi, YU Yue-sheng, TANG Zhong-jie. Study on the Precision Forging Process of Automotive Transmission Gear [J]. Automobile Technology & Material, 2002 (2): 6—8.
- [11] ZHANG C, X SHANG, R XIANG. Study on Cold Extrusion Process and Die for Vehicle Sleeve Gear with Spline [C]. In 2nd International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2011, April 9, 2011—April 11. Guilin: Trans Tech Publications, 2011.
- [12] LI F. Research of Metal Flow Behavior during Extrusion with Active Friction [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 17(1): 7—14.
- [13] WANG W, HAN F, LUO S. Study of the Precision Forging of an Impeller by Numerical Simulation and Test Forming [C]. In Semi-Solid Processing of Alloys and Composites 10—Selected, Peer Reviewed Papers from the 10th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloy and Composites, S2P200. Aachen, Germany: Trans Tech Publications Ltd, 2008.

(上接第8页)

- [7] 曹洋, 康凤, 赵祖德. 旋转锻造技术的数值模拟仿真 [J]. 锻压装备与制造技术, 2005, 40(6): 35—39.
- CAO Yang, KANG Feng, ZHAO Zu-de. The Simulation of the Rotation Forging of the Body Pipe [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2005, 40(6): 35—39.
- [8] 韩星会, 华林, 胡亚民. 轴类零件径向锻造压入量研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2006(6): 75—78.
- HAN Xing-hui, HUA Lin, HU Ya-min. Research on Radial Feed Quantity of Shaft Parts in Radial Forging [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2006(6): 75—78.
- [9] 樊黎霞, 刘力力, 刘庆东, 等. 身管线膛精锻加工过程的数值分析 [J]. 兵工学报, 2009, 30(8): 1098—1102.
- FAN Li-xia, LIU Li-li, LIU Qing-dong, et al. The Numerical Simulation of the Precision Radial Forging Processing of the Gun Barrel [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(8): 1098—1102.
- [10] 樊黎霞, 王贺, 王志刚. 身管膛线精锻成形金属流动与变形分析 [J]. 精密成形工程, 2013, 5(1): 20—24.
- FAN Li-xia, WANG He, WANG Zhi-gang. Analysis of Metal Flow in Radial Forging Process for Barrel Rifling [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(1): 20—24.
- [11] 刘力力, 樊黎霞, 徐诚. 身管冷径向锻造残余应力的模拟研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1291—1297.
- LIU Li-li, FAN Li-xia, XU Cheng. Simulation Study on Residual Stress in Cold Radial Forged Barrel [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(11): 1291—1297.
- [12] LIU Li-li, FAN Li-xia. Study of Residual Stresses in the Barrel Processed by the Radial Forging [C]. The second International Conference on Information and Computing Science, 2009, 4: 131—134.
- [13] LIU Li-li, FAN Li-xia, DONG Xue-hua. Experimental Study of the Mechanical Property of Barrel Processed by Cold Radial Forging [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 21(4): 453—459.
- [14] 王志刚. 身管径向锻造工艺解析分析与数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- WANG Zhi-gang. Analytical Method and Numerical Simulation on Radial Forging Process of Barrel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [15] 王贺. 身管内膛精锻加工过程解析模型建立及实验验证 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- WANG He. Establishment about the Analytic Model and Experimental Verification in the Precision Radial Forging Process of the Barrel Rifling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.