

# TC4钛合金超塑性条件的初步研究

六二一所TC4课题组

## 前言

等温锻造是近期来国外发展的一种新工艺。它通常利用合金在一定条件下的超塑性状态完成其锻造过程。美国普拉特·惠特尼公司已采用称为“Gatorizing”的等温锻造工艺制成了F100发动机（用于F-15战斗机的新型涡轮风扇发动机）的压气机盘。由于这种新工艺能获得形状复杂的高精度锻件，而且可用较小吨位的液压机锻造大型锻件，因此该公司认为用“Gatorizing”法锻制钛合金件在经济上是合算的。

合金的超塑性状态还可应用于板材成形等其它领域。例如美国洛克威尔飞机公司采用超塑性成形的新工艺研制了B-1轰炸机的短舱隔板，使原来的二十二道主要工序减少至五道，成本降低55%，重量减轻33%。

当前，我们刚开始进行钛合金的等温锻造的研究工作，为了提供等温锻造所需要的数据，有必要摸索一下钛合金超塑性的具体条件。

超塑性通常易于在 $\alpha + \beta$ 型钛合金中获得，这是由于这种类型的钛合金能在广阔的温度范围内同时存在两个相（ $\alpha$ 和 $\beta$ ），从而有利于获得和保持超细晶粒。然而，即使是 $\alpha + \beta$ 型钛合金，也只是在一定条件下才能获得超塑性。本试验的目的就是以典型的 $\alpha + \beta$ 型钛合金Ti-6Al-4V（国内牌号为TC4）为对象，初步研究其超塑性的具体条件：原材料晶粒大小、形变温度和形变速率。

## 一、试验方法

原材料为同一炉号的 $\phi 20$ 毫米TC4棒材。该棒材系由 $\phi 43$ 毫米坯料加热至 $940^\circ\text{C}$ 后轧成。其 $\beta$ 相变点测得为 $985^\circ\text{C}$ 左右。由于采用了 $\beta$ 相变点以下的 $\alpha + \beta$ 轧制方法和“ $800^\circ\text{C}$ 保温1小时后空冷”的退火制度，棒材的原始组织为超细晶粒的等轴组织，其中初生 $\alpha$ 约占80%， $\beta$ 转变组织约占20%，初生 $\alpha$ 晶粒的平均直径约5微米， $\beta$ 转变组织的平均晶粒直径约1.5微米。其高倍组织与图1（a）相似。不同形变温度和形变速率的试验均直接采用此棒材加工成拉伸试样后进行。较大晶粒的原材料则利用该棒材重新加热至 $1100^\circ\text{C}$ 保温1小时后分别炉冷和空冷获得。

拉伸试样工作部份的直径均为5毫米。试验是在一台ZDM型5吨高温拉伸试验机上进行的。所有试样均在试验温度下保温20分钟后开始拉伸形变。

## 二、试验结果及讨论

试验结果见表1~3及图1~7。

试验结果表明，超塑性的前提是必须使原材料具有细小的晶粒。这一点从表1和图3中可清楚地看出，在同样的形变温度（ $925^\circ\text{C}$ ）和形变速率（2.5毫米/分）下，较大晶粒的拉伸塑性显著低于超细晶粒。拉伸强度 $\sigma_b$ 的差异也可看出，较大晶粒的变形抗力也大于超细晶粒。从 $1100^\circ\text{C}$ 炉冷和 $1100^\circ\text{C}$ 空冷这两种材料金

相组织（见图2）的对比又可看出，虽然由于某种因素促使“炉冷”的原始 $\beta$ 晶粒小于“空冷”的，但由于“炉冷”的条状 $\alpha$ 较“空冷”粗大得多，因此“炉冷”的拉伸塑性并不高于“空冷”。

不同形变温度的试验结果表明，在不高于925℃的条件下，随着形变温度的提高，试样仍能保持超细的晶粒，因此温度的提高是有利于形变塑性的。然而，当形变温度进一步提高至950℃以上时，随着初生 $\alpha$ 比例的减小， $\beta$ 转变组织的晶粒迅速长大，它对形变塑性所带来的不利影响已大大超过了提高温度本身所带来的有利影响，因而使拉伸塑性迅速下降。由此可见，在形变温度下能否保持超细晶粒仍然是能否获得超塑性的基本条件。其具体数据又表明，当晶粒直径在形变过程中始终保持超细等级（如5微米左右）时，则尽可能高的温度（如925℃）将能获得较理想的超塑性和低的变形抗力。当形变温度进一步提高至950℃时， $\beta$ 转变组织的平均晶粒直径已增大至9微米左右，塑性已显著下降，但延伸率 $\delta_5$ 仍能达到200%左右，一般地仍能满足等温锻造的要求。当形变温度提高至975℃时， $\beta$ 转变组织的平均晶粒直径已长大至36微米，超塑性的条件就完

全消失了，而其形变抗力与925℃相比，却并未显著降低。因此，过高的温度对等温锻造来说是利少害多的。普拉特·惠特尼公司曾指出超塑性的理想晶粒直径为1~10微米，从这个数据来看，和我们的试验结果是基本吻合的。

不同形变速率的试验结果又表明，当形变速率低于10毫米/分时，形变速率越小，拉伸塑性越高。当形变速率进一步从10毫米/分提高至20毫米/分时，拉伸塑性并不下降，本次试验的数据反而稍有提高，这一现象由于数据尚不充分，还不能作出最后结论。

### 三、初步结论

1. 为了获得比较理想的超塑性，TC4合金原材料本身以及形变温度下仍能保持的晶粒平均直径应为5微米左右或更小。

2. TC4合金较理想的超塑性形变温度为 $\beta$ 相变点以下60℃左右。对等温锻造来说，较合适的形变温度范围为 $\beta$ 相变点以下40~110℃。

3. 对于标距长度为25毫米的本拉伸试样来说，TC4合金较理想的超塑性形变速率应低于2.5毫米/分。

表1 原材料不同晶粒尺寸的影响\*

热处理 度	原始 $\beta$ 晶粒平均直径 微米	条状 $\alpha$ 晶粒平均宽度 微米	试样号	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta_5$ %	$\Psi$ %
800℃ 1小时，空冷	1.5**		7	1.40	568	99
			72	1.72	576	99
			73	1.85	347	99
			667	2.10	420	99
			平均	1.77	478	99
1100℃ 1小时，空冷	600	2.0	1—1	3.48	186	99
			1—2	4.10	104	99
			平均	3.79	145	99
1100℃ 1小时，炉冷	300	7.0	1—4	2.39	164	99
			1—5	3.80	110	99
			平均	3.10	137	99

\*形变温度均为925℃，形变速率均为2.5毫米/分。

\*\*等轴初生 $\alpha$ 晶粒平均直径为5微米。

表 2 不同形变温度的影响\*

形变温度 °C	形变结束后的晶粒平均直径 微米		试样号	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta_s$ %	$\Psi$ %
	初生 $\alpha$	$\beta$ 转变组织				
500	5	1.5	51	61.4	27.5	69
			52	61.8	23.2	71
			53	61.7	26.6	71
			平 均	61.6	25.8	70
600	5	1.5	56	45.4	42.8	81
			57	45.1	38.0	80
			平 均	45.3	40.4	81
700	5	1.5	58	24.7	103	97
			61	24.2	110	98
			平 均	24.5	107	98
800	5	1.5	62	10.3	210	99
			63	11.1	185	99
			平 均	10.7	198	99
875	5	1.5	66	4.24	338	99
			67	4.23	320	99
			平 均	4.20	329	99
900	5	4	68	2.69	522	99
			71	4.00	216	99
			664	2.50	303	99
			平 均	3.06	347	99
925	5.5	5.5	72	1.72	576	99
			73	1.85	347	99
			667	2.10	420	99
			7	1.40	568	99
			平 均	1.77	478	99

转下表

接上表

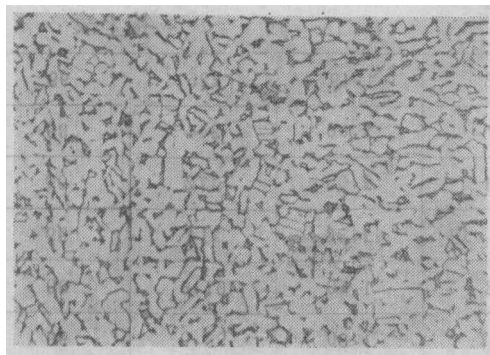
950	6	9	76	1.49	225	99
			77	2.00	244	99
			1	2.00	172	99
			平 均	1.83	214	99
975	7	36	78	1.50	67.6	99
			647	1.80	96.0	99
			2	1.50	120	99
			平 均	1.60	94.5	99

\*形变速率均为2.5毫米/分，原材料均为超细晶粒。

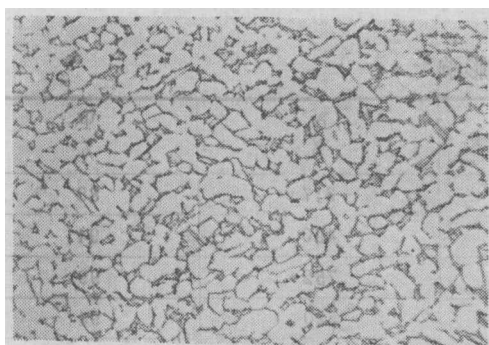
表3 不同形变速率的影响\*

形 变 速 率 毫米/分	试 样 号	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta_5$ %	$\Psi$ %
1.5	652	1.18	317	88
	653	1.15	490	94
	3	1.90	752	99
	平 均	1.41	520	94
2.5	72	1.72	576	99
	73	1.85	347	99
	667	2.10	420	99
	7	1.40	568	99
	平 均	1.77	478	99
5	654	1.44	428	90
	657	1.70	330	99
	4	2.40	324	99
	平 均	1.85	361	96
10	658	4.04	188	94
	659	4.60	209	99
	5	4.20	168	99
	平 均	4.28	188	97
20	663	4.58	208	94
	662	4.50	289	99
	6	4.30	209	99
	平 均	4.46	235	97

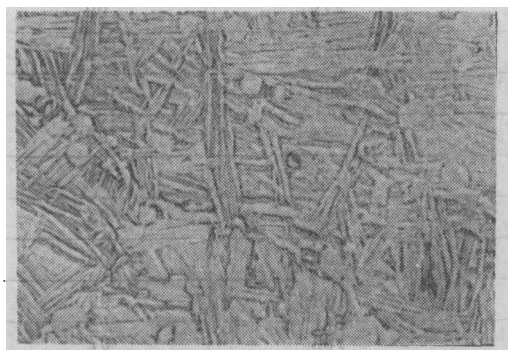
\*形变温度均为925°C，原材料均为超细晶粒。



a



b



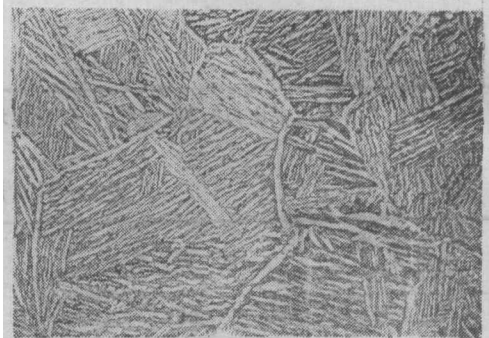
c

图 1 不同温度下形变结束后拉伸试样  
夹头部位的高倍组织 ×500  
(a)876°C; (b)925°C;  
(c)975°C



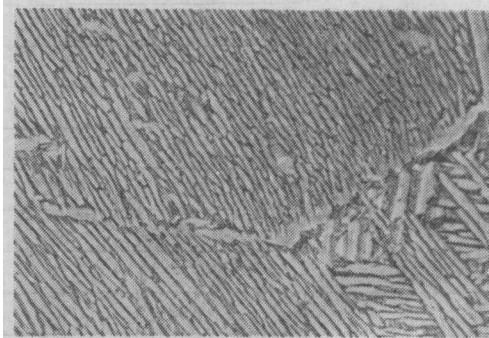
a

×100



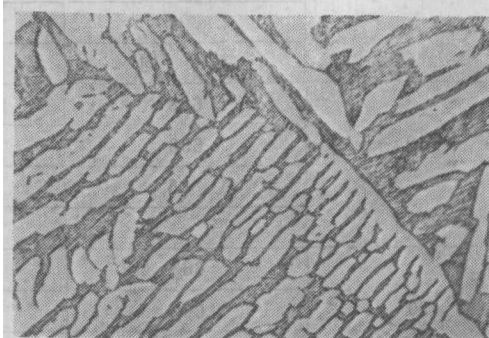
b

×100



c

×500



d

×500

图 2 两种较大晶粒的原材料的高倍组织  
a和c系“1100°C, 1小时, 空冷”, b  
和d系“1100°C, 1小时, 炉冷”

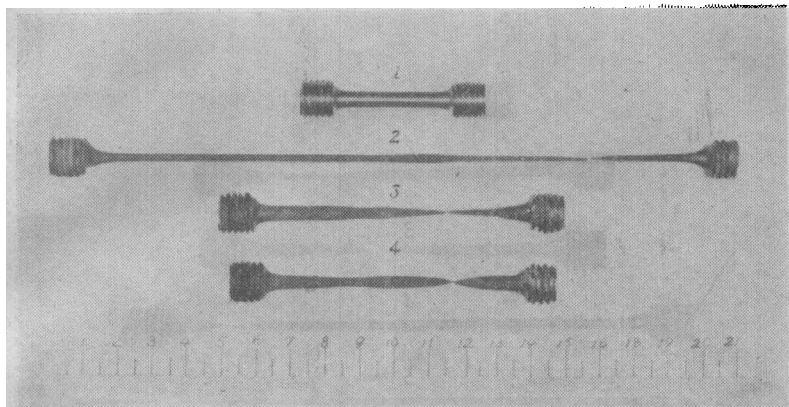


图 3 不同原材料晶粒尺寸的试样在925°C下拉伸(形变速率2.5毫米/分)后的外观(1)拉伸前;(2)超细晶粒;(3)重经“1100°C, 1小时, 空冷”处理, 晶粒较大;(4)重经“1100°C, 1小时, 炉冷”处理, 晶粒较大

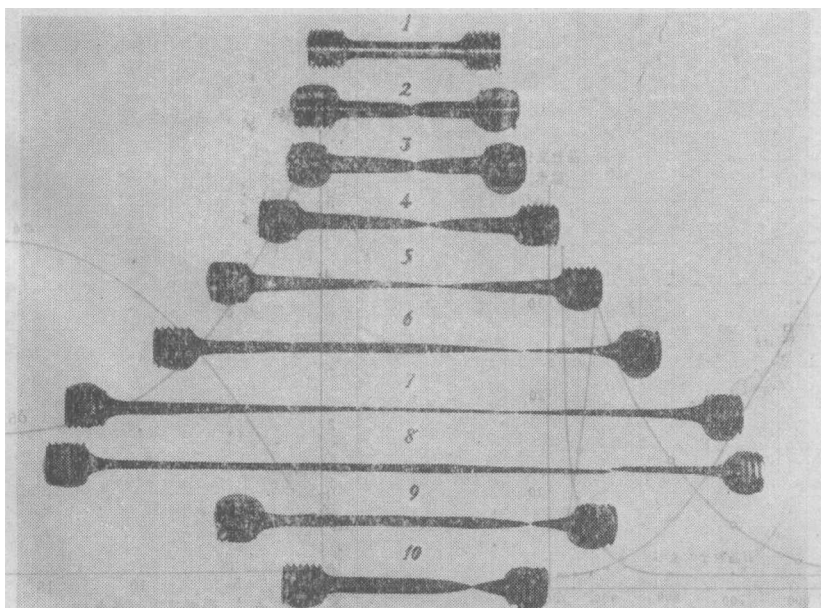


图 4 不同温度下拉伸(形变速率均为2.5毫米/分)后的试样外观(原材料均为超细晶粒)(1)拉伸前;(2)500°C;(3)600°C;(4)700°C;(5)800°C;(6)875°C;(7)900°C;(8)925°C;(9)950°C;(10)975°C

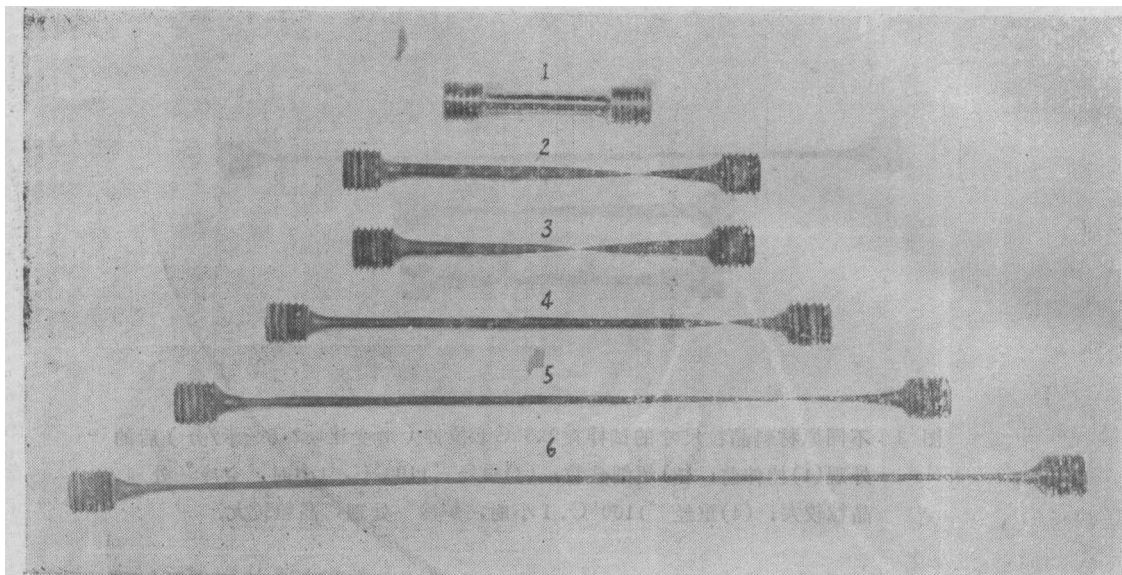


图 5 不同形变速率下拉伸(形变温度均为 925°C, 原材料均为超细晶粒)后的试样外观 (1) 拉伸前; (2) 20 毫米/分; (3) 10 毫米/分; (4) 5 毫米/分; (5) 2.5 毫米/分; (6) 1.5 毫米/分

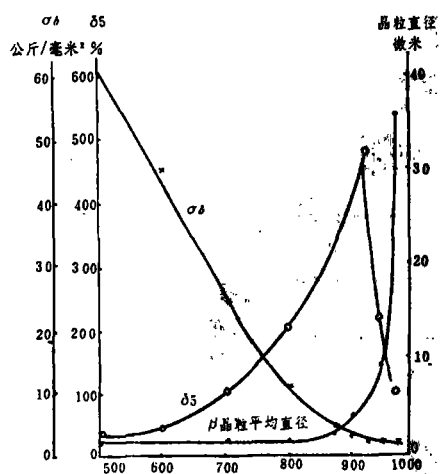


图 6 不同形变温度对 TC4 钛合金拉伸性能的影响 (形变速率均为 2.5 毫米/分, 原材料均为超细晶粒)

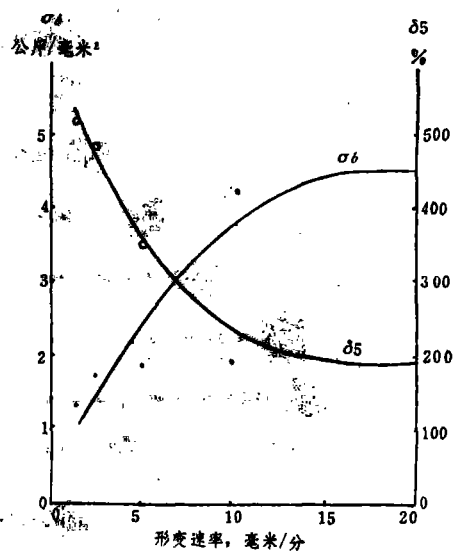


图 7 不同形变速率对 TC4 钛合金拉伸性能的影响 (形变温度均为 925°C, 原材料均为超细晶粒)