



### 1.1 封闭式成型模具设计

在成型 TC11 合金模锻件时,为了减少原材料损耗,达到精锻的目的,一般采用封闭式模具成型。为此设计了封闭式成型模具(见图 2(a)),并进行成型试验。

封闭式模具成型效果很不理想,主要是由于 TC11 合金在挤压成形过程中产生的变形抗力很大,为使变形坯料能够顺利充满模腔,施加很大的成型压力,成型模具和设备受到了严重的损耗。经成型试验后成型下模完全开裂报废,油压机底座也出现明显的凹坑,并且由于对变形坯料施加了很大的成型压力,TC11 成型毛坯表面裂纹很多,甚至部分毛坯开裂报废。

### 1.2 开放式成型模具设计

为了最大限度地降低成型压力,提高压机及模具的使用寿命,减少法兰毛坯表面裂纹,设计了开放式成型模具(见图 2(b)),并进行成型试验。

开放式成型模具在 TC11 毛坯成型过程中虽能显著降低设备的成型压力,但无法限制法兰底盘毛坯的径向流动。由于法兰毛坯底盘上、下端面接触成型模具,热量损失很快,坯料相邻处温度上的差异造成金属流动时产生很大速度差异,从而形成底盘上、下端面机加工余量不足;而相邻处金属无约束径向流动过快,机加工余量很大,材料利用率低(图 2(b))。为保证毛坯的顺利机加工,需增加自由锻校型工序,从而降低生产效率。

### 1.3 口部开放式成型模具设计

因为毛坯在变形过程中产生轴向和径向流动,轴向流动变形抗力较大,大部分坯料朝径向流动,因此,从限制坯料的径向流动及减小挤压力角度考虑,重新设计了口部开放式成型模具(见图 2(c)),并进行了成型试验。

口部开放式成型模具对比开放式模具有个显著的特点,即在下底板上固定 1 个控制毛坯径向流动的限流套(图 2(c))。加装限流套后,可以精确地限制法兰底盘毛坯的径向流动,最大限度地减少原材料损耗。对比开放式模具成型的毛坯单件质量可减少 1.6 kg,同时简化了自由锻校型工序。法兰口部采用开放式模具设计后,该部分毛坯挤压成型时无模具约束,同样可以降低设备压力,大大降低模具及设备损耗,提高法兰毛坯的成型质量。

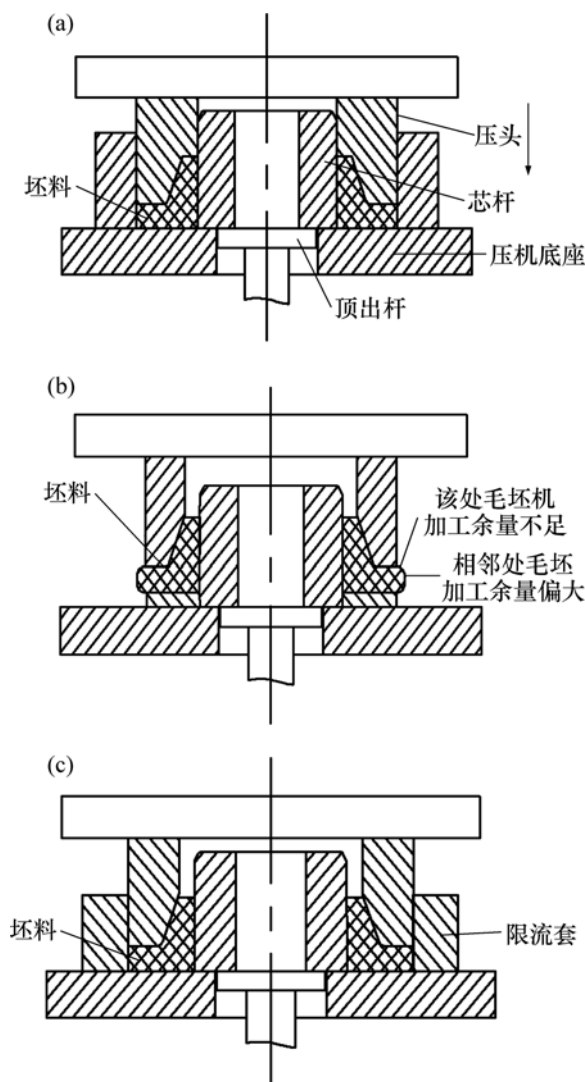


图 2 成型模具示意图

Fig.2 Schematic diagram of forming dies: (a) Closed forming die; (b) Open forming die; (c) Open mouth forming die

## 2 成型工艺

### 2.1 成型对 TC11 合金变形抗力的影响

为保证 TC11 变形坯料能顺利充满模腔、减少坯料表面缺陷,在很大程度上取决于 TC11 变形抗力的降低,因此研究成型工艺参数对 TC11 合金变形抗力的影响规律。

#### 2.1.1 成型速率对 TC11 合金变形抗力的影响

将  $d\ 245\ \text{mm}/d\ 138\ \text{mm} \times 80\ \text{mm}$  预制毛坯在 2 500 t 四柱油压机上于 970 $^{\circ}\text{C}$  进行等温成型试验,压机下行速率分别为 3、7、10 和 15 mm/s。在成型过程中,通过压机的微机处理系统自动采集数据,试验结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:随着压机下行速率的增加,成

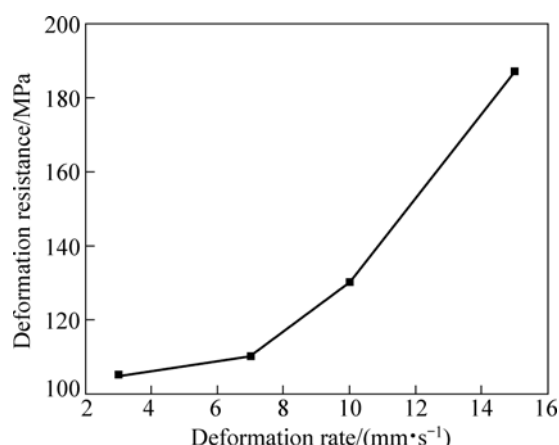


图3 成型速率对TC11合金变形抗力的影响

Fig.3 Effect of deformation rate on deformation resistance of TC11

形毛坯所需的设备压力单调增加,而且随着下行速率的增大,设备压力的增幅也越来越大。这是由于金属塑性变形本质上就是位错运动的结果,随着应变速率的增加,变形时间缩短,单位时间内塑性变形量增加,促使更多的位错同时发生,速度也增大,致使金属内部的畸变程度加剧,位错交滑移、扩散和攀移更加困难,并出现位错塞积,使得继续变形困难。同时,TC11合金来不及进行回复和再结晶或进行得不充分,这些都会造成TC11毛坯变形抗力的增加。

当压机下行速率为3 mm/s时,个别的成形法兰毛坯底部有一条直径为240~250 mm的环状褶皱,环状褶皱的直径与预制毛坯的外径尺寸相同。这是因为TC11合金随着变形温度的降低,塑性急剧的下降,预制毛坯在模腔内成型时,端部外圆最先接触到模腔,冷却速度很快;由于变型速度过慢,使该处的金属冷却而不能径向流动,而温度高的部分继续径向流动;由于坯料相邻处温度的差异造成坯料径向流速的差异,从而形成环状褶皱。因此,为了降低设备的成型压力及减少环状褶皱缺陷的产生,压机最佳下行速率为7 mm/s。

### 2.1.2 成型温度对TC11合金变形抗力的影响

TC11合金的挤压温度以 $\beta$ 相变点为基准,一般在低于 $\beta$ 相变点30~100 °C的温度区域内进行挤压。TC11合金相变点为998~1010 °C,因此,在加热温度为900、950、970 °C,压机下行速率为7 mm/s时,测试不同挤压温度所需设备的成型压力(图4)。可以看出:随着成型温度的升高,金属流动所需的设备压力明显降低。这是因为温度升高,原子的热运动加剧,原子间结合力减弱,从而导致流动应力降低。因此,为减小TC11

合金的变形抗力,使金属流动顺利充满模腔,应适当提高TC11高颈法兰毛坯成型温度。

### 2.2 成型温度对TC11合金组织性能的影响

在挤压TC11高颈法兰的过程中,成型温度是影响法兰显微组织及力学性能的关键因素。将 $d245\text{ mm}/d138\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 圆柱毛坯在不同的成型温度及压机下行速率为7 mm/s的条件下进行成型试验。在经过不同成型温度成型的毛坯上截取金相试样及力学试样,用OLYMPUS GX71金相显微镜观察其显微组织,并对试样进行室温拉伸及U型冲击试验。

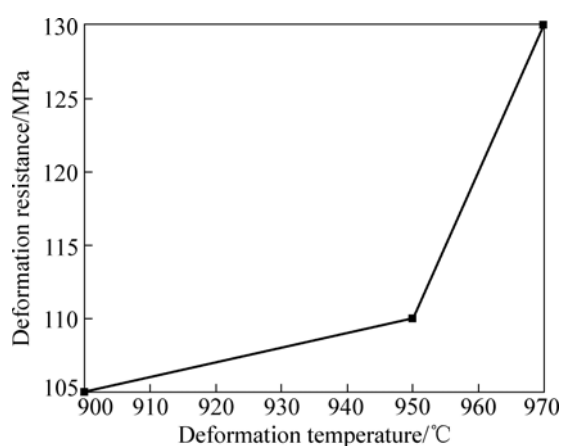


图4 成型温度对TC11合金变形抗力的影响

Fig.4 Effect of deformation temperature on deformation resistance of TC11 alloy

图5(a)所示为成型温度900 °C时TC11合金的显微组织。可以看出:由于成型温度较低,组织有大量初生片条状 $\alpha$ 相及球状 $\alpha$ 相, $\alpha$ 相周围分布着少量晶间 $\beta$ 相。随着成型温度的升高,片层状组织结构破碎和球化的程度提高,初生片条状 $\alpha$ 组织减少;经950及970

成型的显微组织均为等轴初生 $\alpha+\beta$ 组织,且都比较均匀(图5(b)、(c));经970 °C高温成型的显微组织中 $\beta$ 组织略有增加,初生 $\alpha$ 相含量略有减少,且 $\alpha+\beta$ 组织都有体积增大及球化趋势;当进一步提高成型温度到1020 °C时(图5(d)),因已处于 $\beta$ 相区,组织呈现典型的片状魏氏组织,具有完整原始的 $\beta$ 晶界, $\beta$ 晶粒非常粗大,晶内针状 $\alpha$ 相按一定位向排列。

组织形态的变化对应着合金力学性能的变化。表1所列TC11合金在不同成型温度下的力学性能。由表1可以看出:在 $\beta$ 相变点以下成型TC11高颈法兰时,随着成型温度的升高及固溶强化效果的增强,TC11合金的强度明显增加,由于 $\alpha$ 相在高温作用下的合并长大, $\alpha$ 相聚集球化为等轴晶,塑性并不降低。

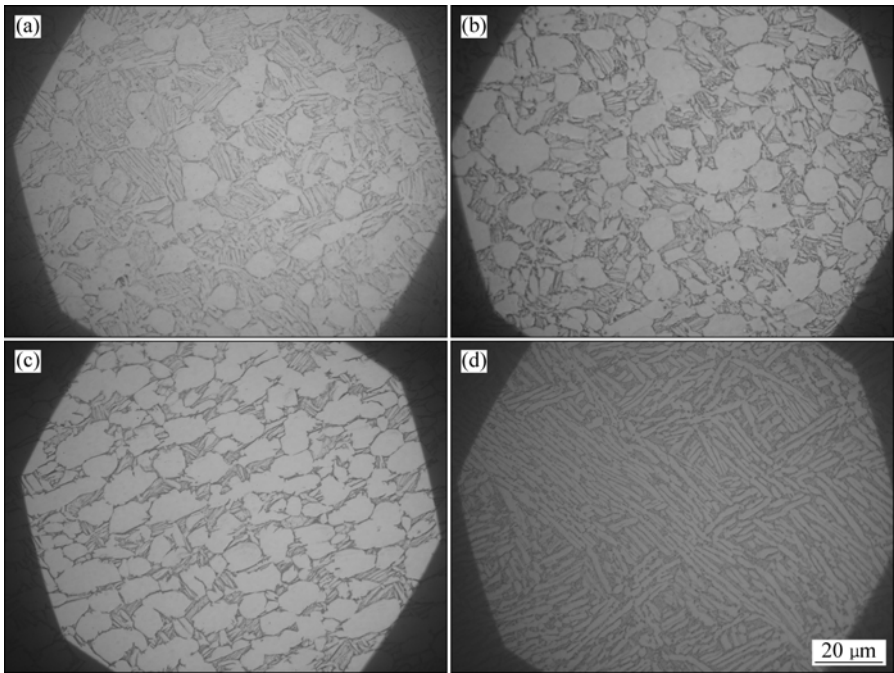


图 5 不同成型温度下 TC11 合金的显微组织

Fig.5 Microstructures of TC11 alloy at different deformation temperatures: (a) 900 °C ; (b) 950 °C ; (c) 970 °C ; (d) 1020 °C

表 1 不同成型温度下 TC11 合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of TC11 alloy at different deformation temperatures

No.	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$A_{KV}/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$
1	890	1 020	17	60
2	910	1 040	16	63
3	920	1 050	16	62
4	918	1 060	11	58

当成型温度超过 $\beta$ 相变点时,得到魏氏组织,即粗大的原始 $\beta$ 晶界+针状 $\alpha$ 相,该组织抗拉强度高,但拉伸塑性及冲击韧性极差。综上所述,在温度为 970 °C ,压机下行速率为 7 mm/s 下成型所得的组织的强度指标和塑性指标具有较佳的配合。

3 结论

- 1) 根据 TC11 高颈法兰加工图纸确定了法兰成型模具。采用口部开放式成型模具,反挤压坯料时,可有效降低设备成型压力,减少原材料损耗。
- 2) 成型 TC11 高颈法兰时,成型工艺随着成型速率的降低及加热温度的升高,可有效降低 TC11 合金的变形抗力。

3) TC11 高颈法兰可采用 970 °C ,压机下行速率为 7 mm/s 的成型工艺,成型后的显微组织为等轴初生 $\alpha+\beta$ 组织,具有较好的综合力学性能。

REFERENCES

[1] 李晓芹. 锻造加热温度对 TC11 合金组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 1999(3): 30-32.  
LI Xiao-qin. Influence of heat-temperature of forging on the microstructure property of TC11[J]. Hot Working Technology, 1999(3): 30-32.

[2] 魏志坚. TC11 钛合金压气机盘等温锻造工艺研究[J]. 机械工人, 2003(3): 45-48.  
WEI Zhi-jian. The research of TC11 alloy compressor's isothermal forging technology[J]. Machist Metal Forming, 2003(3): 45-48.

[3] 陈慧琴, 林好转, 郭 灵. TC11 高温流变行为及组织演变[J]. 航空材料学报, 2007, 27(3): 1-5.  
CHEN Hui-qin, LIN Hao-zhuan, GUO Ling. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC11 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(3): 1-5.

[4] 董长升, 李渭清, 蔡建明. 精锻及热处理工艺对 TC11 钛合金棒材显微组织的影响[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 286-288.  
DONG Chang-sheng, LI Wei-qing, CAI Jian-ming. Effect of finish forge and heat-treatment on microstructure of TC11 alloy bars[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 286-288.

(编辑 陈卫萍)