

# 钛合金锻造与模锻

手 册



国外航空编辑部

1974

230579

国外航空技术专题资料  
**钛合金的锻造与模锻手册**

\*

国外航空编辑部

北京市 1652 号信箱

\*

· 内部发行 ·

1974 年 9 月 书号(外)025

# 目 录

前 言 .....	1
<b>第一章 钛及钛合金</b>	
第一节 钛及钛合金的分类 .....	3
第二节 钛及钛合金的化学成分、物理性能与 机械性能 .....	5
第三节 钛及钛合金的压力加工性能 .....	35
<b>第二章 锻造与模锻的方法及热力学参数</b>	
第一节 锻造与模锻方法 .....	49
§1 锻造与模锻方法的分类 .....	49
§2 各类方法的特点及用途 .....	50
第二节 锻造与模锻的热力学参数 .....	69
§1 制定参数的依据 .....	69
§2 变形温度、变形程度与变形速度 .....	74
§3 坯料加热 .....	82
§4 锻件冷却 .....	84
<b>第三章 钛合金锻造</b>	
第一节 锻 粗 .....	88
§1 锻粗的用途 .....	88
§2 锻粗的参数与方法 .....	88

第二节	拔 长	92
§1	拔长的主要参数	92
§2	拔长规则	93
§3	压力机与锻锤的选择	95
§4	拔长的主要工序	98
§5	拔长的辅助工序	99
第三节	冲 孔	100
§1	无垫环冲孔	100
§2	垫环冲孔	102
第四节	切 割	102
第五节	弯 曲	103
第六节	锻造坯料图的制定	103
第七节	锻造工艺流程的制定	105
第四章	钛合金模锻	
第一节	开式模锻	106
§1	模锻件设计参数	106
§2	余量与公差	140
§3	模锻压力的确定	155
§4	模具设计	159
第二节	卧式锻机模锻	165
§1	顶锻工序计算规则	165
§2	冲孔基本型式	168
§3	模锻件图的制定	170

§4 顶锻压力的确定 .....	174
<b>第三节 校正</b> .....	174
§1 校正时的变形特点 .....	174
§2 对于所校正坯料的要求 .....	177
§3 校正压力的确定 .....	185
§4 校正用模具与固定校正模的夹具 .....	186
<b>第五章 钛合金的锻造与模锻工艺</b>	
<b>第一节 原材料</b> .....	189
<b>第二节 坯料切割</b> .....	194
§1 圆盘锯切割 .....	194
§2 阳极切割 .....	194
§3 压力机与锻锤切割 .....	195
§4 铸锭与棒材的车床切割 .....	197
§5 坯料扒皮 .....	198
<b>第三节 坯料加热</b> .....	199
§1 坯料加热要求 .....	199
§2 坯料加热炉 .....	200
<b>第四节 钛合金锻造工艺过程</b> .....	215
<b>第五节 钛合金模锻工艺过程</b> .....	227
§1 锻锤模锻 .....	228
§2 压力机模锻 .....	228
§3 卧式锻机模锻 .....	235
§4 高温热机械处理模锻 .....	237

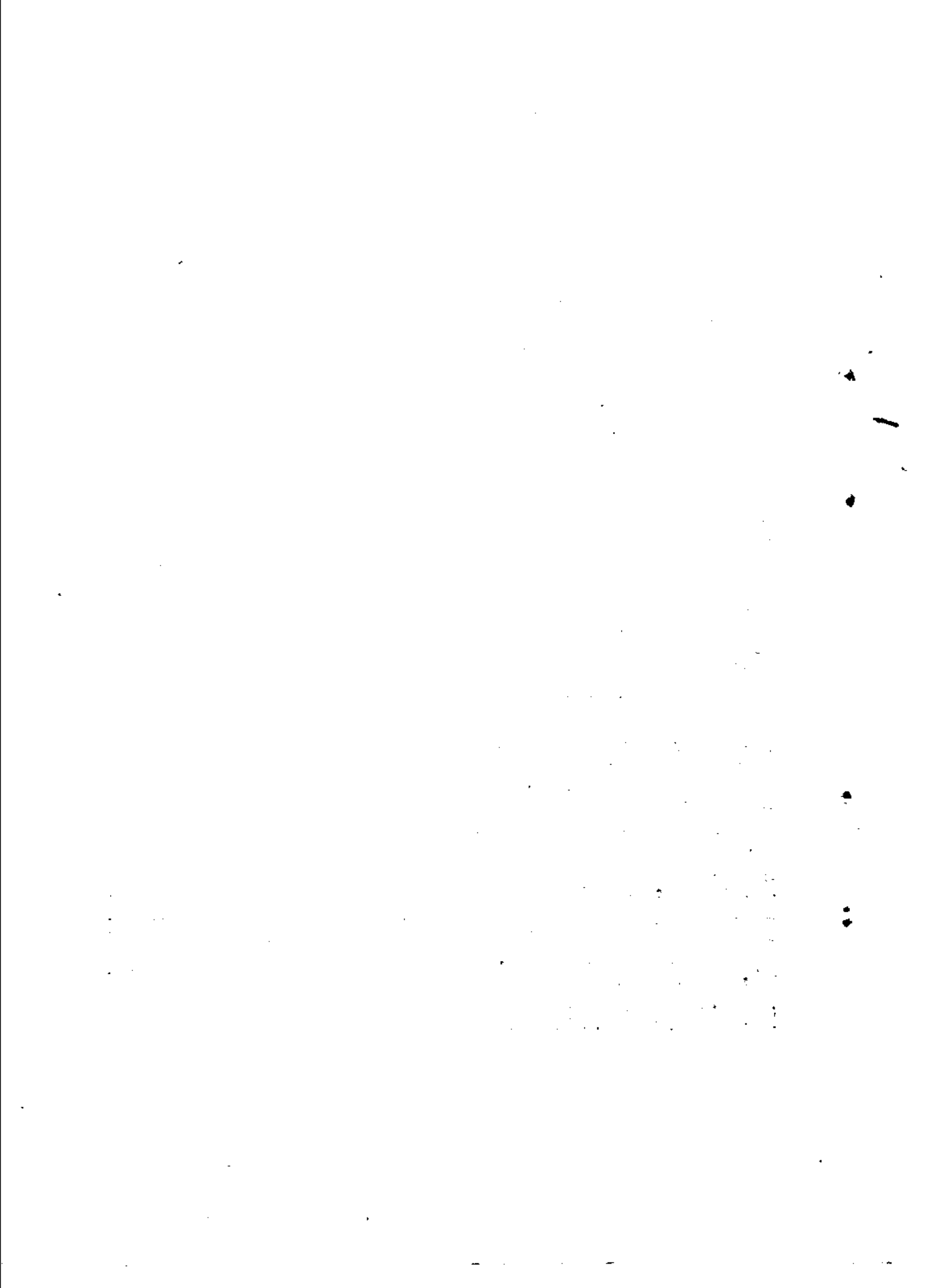
§5 典型模锻工艺过程 .....	239
第六节 校 正 .....	244
第七节 模锻件表面清理 .....	245
第八节 模锻件的主要缺陷及其清除方法 ...	246

## 前 言

我国人民在伟大领袖毛主席的英明领导下，取得了无产阶级文化大革命的伟大胜利，社会主义到处都在胜利地前进，祖国各地欣欣向荣，国防工业战线的形势也是一派大好。为适应国防工业发展的需要，我们遵照毛主席的“洋为中用”的教导，编译了《钛合金的锻造与模锻手册》。

本手册是根据一九七二年莫斯科版《有色金属的锻造与模锻手册》(КОВКА И ШТАМПОВКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ) 编译而成的一份参考资料。书中介绍了钛合金的化学成份、物理性能与机械性能，并主要地介绍了钛合金锻造与模锻的热力学参数与工艺过程。可供参考使用。

对于外国的东西应采取借鉴的态度，取其精华，去其糟粕，达到为我所用的目的。在本手册的编译过程中，我们把原书中的一些不妥之处做了必要的删改，但是由于我们的水平所限，尚难免存在缺点错误，恳请读者批评指正。





# 第一章 钛及钛合金

## 第一节 钛及钛合金的分类

钛及钛合金按其用途与室温强度可划分为下列四种类型：

一、低强度变形合金 ( $>60$ 公斤/毫米<sup>2</sup>)：工业钛 BT1-0, BT1-1, BT1-00 和低合金化的 OT4-1。这些合金可用于制造受力不大的复杂零件。适于板材冲压。

二、中等强度变形合金 (60—100公斤/毫米<sup>2</sup>)：中等合金化的 OT4, BT4, BT6, BT6C 和  $\alpha$ -合金 BT5 及 BT5-1。这些合金具有足够的工艺塑性，所制造的各种构件不要热处理强化。OT4 合金广泛应用于制造锻件与模锻件。当要求焊接性足够好而对热强性要求不高时，采用 BT5 与 BT6 合金。

三、高强度变形合金：

1. 强度极限  $>100$ 公斤/毫米<sup>2</sup>：BT14, BT20 和在热处理状态下使用的实验合金 BT15, BT16。

2. OT4-2 合金在退火状态  $\sigma_b = 95—120$ 公斤/毫米<sup>2</sup> (非热处理强化)。BT14 与 BT16 是两相合金，

而 BT15 和 BT20 是单相合金。BT14 合金在热压力加工时有足够的塑性。BT15 和 BT20 合金在压力加工时塑性比 BT14 差。OT4-2 合金压力加工时塑性和 BT14 相类似。

四、热强变形合金：BT3-1, BT8, BT9 和 BT18。前三个合金具有两相( $\alpha + \beta$ )—组织，而 BT18 合金是以  $\alpha$  为基的单相组织。BT9 和 B18 合金具有较高的热强性。BT3-1 合金应用最普遍，主要用于喷气发动机的压气机零件。工作温度高于  $400^{\circ}\text{C}$  的零件最好采用 BT8 合金，其强度和热稳定性都比 BT3-1 合金要好。BT3-1 和 BT8 合金在热压力加工时都有足够的塑性。

BT18 合金在热压力加工时的塑性比 BT3-1 和 BT8 要差。BT9 合金有足够的塑性，可以进行锻造、轧制、挤压等压力加工。

第二节 钛及钛合金的化学成分，物理性能与机械性能  
 (见表1-13和图1-3)

表1 某些钛合金的化学成分(%)

合金牌号	合金元素									
	Al	Mn	Sn	Mo	V	Cr	Zr			
OT4-0	0.2—1.4	0.2—1.3								
OT4-1	0.7—2.2	0.5—1.8								
OT4	3.0—4.5	0.8—2.0								0.5—2.5
OT4-2	5.5—7.0	1.0—2.3								
BT4	4.5—6.0	0.8—2.0								
BT5-1	4.0—6.0		2.0—3.0							
BT5	4.3—6.2									
BT6C	4.3—5.8				3.5—4.5					
BT6	5.5—7.0				4.0—5.8					
BT3-1	5.2—6.8			2.0—3.0		1.0—2.5				
BT8	5.8—7.0			2.8—3.8						
BT9	5.8—7.0			2.8—3.8						0.8—2.5
BT14	3.5—6.0			2.5—3.8	0.5—1.5					
BT15	2.3—3.6			6.8—8.0		9.5—11.0				
BT16	1.6—3.0			4.5—5.5	4.0—5.0					
BT18	7.2—8.2			0.2—1.0						10.0—12.0
BT20	6.0—7.5			0.5—2.0	1.5—2.5					

接表 1

合金牌号	合 金 元 素		杂 质 (不大于)									
	Si	Fe	Nb	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	其它	
OT4-0				0.10	0.30	0.15	0.30	0.15	0.05	0.012	0.30	
OT4-1				0.10	0.30	0.15	0.30	0.15	0.05	0.012	0.30	
OT4				0.10	0.30	0.15	0.30	0.15	0.05	0.012	0.30	
OT4-2				0.10	0.30	0.15		0.15	0.05	0.012	0.30	
BT4				0.10	0.30	0.15	0.30	0.15	0.05	0.015	0.30	
BT5-1				0.10	0.30	0.15	0.30	0.15	0.05	0.015	0.30	
BT5				0.10	0.30	0.15	0.30	0.20	0.05	0.015	0.30	
BT6C				0.08	0.25	0.15	0.30	0.15	0.05	0.015	0.30	
BT6				0.10	0.30	0.15		0.15	0.05	0.015	0.30	
BT3-1	0.15—0.4	0.2—0.7		0.10			0.50	0.18	0.05	0.015	0.30	
BT8	0.2 —0.4			0.10	0.30		0.50	0.15	0.05	0.015	0.30	
BT9	0.2 —0.35			0.10	0.25			0.15	0.05	0.015	0.30	
BT14				0.10		0.15	0.30	0.15	0.05	0.015	0.30	
BT15				0.10	0.30	0.15		0.12	0.05	0.012	0.30	
BT16				0.10	0.25	0.15	0.30	0.15	0.05	0.015	0.30	
BT18	0.05—0.18		0.5—1.5	0.10	0.20			0.15	0.05	0.015	0.30	
BT20				0.10	0.30	0.15		0.15	0.05	0.015	0.30	

表 2 钛的物理性能

名 称	单 位	指 标
密 度.....	克/厘米 <sup>3</sup>	4.507
熔 点.....	°C	1690
沸 点.....	°C	3535
升华热(25°C).....	千 卡	106.5
比热(0—500°C).....	卡/克·°C	0.1386
熵值(25°C).....	卡/克分子·°C	7.24
线膨胀系数(25°C) $\alpha \cdot 10^{-6}$ .....	1/°C	8.5
导热系数(25°C).....	卡/厘米·秒·°C	0.41
比电阻(20°C).....	微欧·厘米	47.8
同素异晶转变点.....	°C	882
$\alpha$ -钛晶格常数(25°C).....	Å	$a = 2.9504$
$\beta$ -钛晶格常数(900°C).....	Å	$a = 3.3065$

表3 钛合金的物理性能

合金	密度 $\gamma$ 克/厘米 <sup>3</sup>	线膨胀系数 $\alpha \cdot 10^{-6} \quad 1/^\circ\text{C}$	导热系数 卡/厘米·秒· $^\circ\text{C}$	比电阻 $\rho$ 欧姆·厘米 <sup>2</sup> /米	热容量 C 卡/克· $^\circ\text{C}$
OT4-1	4.55	8.0(20—100)	0.023(20)	—	—
		8.6(100—200)	0.025(100)		
		9.4(200—300)	0.029(300)		
		9.6(300—400)	0.032(400)		
		9.6(400—500)	0.035(500)		
OT4	4.55	8.0(20—100)	0.023(20)	—	—
		8.6(100—200)			
		9.1(200—300)			
		9.6(300—400)			
		9.4(400—500)			
	9.8(500—600)				

BT4	4.6	8.4(20) 9.0(100—200) 9.0(200—300) 9.0(300—400)	0.020(25) 0.022(100) 0.025(200) 0.028(300) 0.031(400)	—	0.125(100)
					0.135(200)
					0.145(300)
					0.160(400)
BT5	4.4	8.3(20—100) 8.9(100—200) 9.5(200—300) 10.4(300—400) 10.6(400—500) 10.8(500—600)	0.021(25) 0.023(100) 0.025(200) 0.027(300) 0.030(400) 0.034(500) 0.037(600) 0.040(700) 0.043(800) 0.047(900)	1.08(20) 1.15(200) 1.18(300) 1.20(500)	0.13(100)
					0.14(200)
					0.15(300)
					0.16(400)
					0.17(500)
					0.18(600)

续表

合金	密度 $\gamma$ 克/厘米 <sup>3</sup>	线膨胀系数 $\alpha \cdot 10^{-6} \quad 1/^\circ\text{C}$	导热系数 卡/厘米·秒· $^\circ\text{C}$	比电阻 $\rho$ 欧姆·厘米 <sup>2</sup> /米	热容量 C 卡/克· $^\circ\text{C}$
BT5-1	4.42	8.3(20—100)	0.021(25)	1.38(20)	0.12(100)
		8.9(20—200)	0.023(100)		0.13(200)
		9.1(20—300)	0.026(200)		0.135(300)
		9.3(20—400)	0.029(300)		0.14(400)
		9.5(20—500)	0.032(400)		0.15(500)
		9.6(20—600)	0.035(500)		0.16(600)
		9.8(20—700)	0.038(600)		0.17(700)
		10.1(20—800)	0.041(700)		0.19(800)
		10.5(20—900)	0.044(800)		
		BT3-1	4.5		8.6(20—100)
11.6(400—500)	0.020(100)			0.12(200)	
	0.024(200)			0.13(300)	



				0.027(300) 0.037(600) 0.040(700)		0.15(400) 0.16(500) 0.17(600)
BT8	4.48	8.3(20—100)	0.017(25)	1.61(25)	0.12(100)	
		8.6(20—200)	0.020(100)			
		8.7(20—300)	0.023(200)			
		8.8(20—400)	0.027(300)			
		9.0(20—500)	0.030(400)			
		9.1(20—600)	0.034(500)			
			0.037(600)			
BT9	4.51	8.3(20—100)	0.018(25)	1.61(20)	0.13(100)	
		8.9(20—200)	0.020(100)			
		9.1(20—300)	0.023(200)			
		9.3(20—400)	0.026(300)			
		9.5(20—500)	0.029(400)			
		9.6(20—600)	0.033(500)			