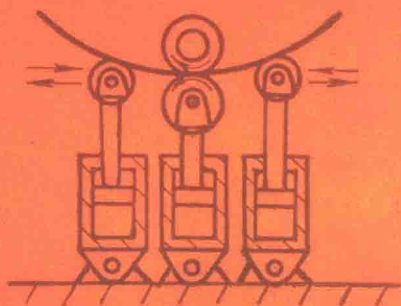




栗 枯 主编

钛板成形工艺

徐君长 应家骊 韩宝成 编著



国防工业出版社

机械制造实用新技术丛书之五

钛板成形工艺

栗 枯 主编

徐君长 应家骊 韩宝成 编著

国防工业出版社

作者的话

现代航空发动机制造是机械制造工业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造行业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝 MK202 发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；

2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；

3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将是对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由栗枯同志主编。参加审校工作的主要有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等同志提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖治、陈少中、任家耕和贾克琴、张汉生等

同志。

本书介绍钛板冲压成形技术，着重于实际生产过程中的典型成形工艺，并对有关工艺问题作了简要说明。

参加本书编写工作的有应家骊、徐君长、韩宝成等同志。应家骊编写热成形及辅助工序部分，徐君长编写滚压成形部分，韩宝成编写短路加热、聚氯乙烯软阳模成形部分，由徐君长汇总改写。唐宏霞审校，栗祐终审定稿。

最后对给予本书出版和编写工作以支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

作者于西安国营红旗机械厂

目 录

一、概述	1
二、现代航空发动机中的钛板冲压件	4
(一) 材料	4
(二) 零件结构特点	7
三、钛合金板件成形	8
(一) 冶金特性	8
(二) 成形特性	10
(三) 成形方法	10
(四) 加热手段	11
(五) 成形模具	12
(六) 成形机床	15
四、钛合金的板料成形	20
(一) 热成形	20
(二) 冷成形	30
五、辅助工序	45
(一) 热处理	45
(二) 去氧化皮	46
(三) 润滑及热保护层	47
(四) 防止污染问题	48

一、概 述

早在 1791 年人们就发现了钛元素，但直到 1964 年才用真空法炼出第一块海绵钛。美国于 1948 年制造出航空用的钛材，五十年代开始陆续在航空工业上使用。当时加工费用还很昂贵，如 1954 年钛板零件的成形费用为铝合金的五倍。五十年代起国外对钛板成形进行了大量研究，到六十年代工艺基本过关，设备形成系列，钛合金成形工艺建立了正规的生产线，成形费用大大降低，因此，六十年代中期，钛大量被用作飞机的结构材料，同时逐步推广到化工、冶金、电力等工业领域。以后又对钛合金的锻造、机械加工以及大型整体壁板的成形等问题进行研究。七十年代开始了钛板成形技术的研究，如钛合金的扩散连接技术、超塑性成形等，有的已在产品中试用。

我国从五十年代末开始研制钛材。1965 年开始在飞机结构上应用，六十年代末开始研制专用的钛合金件热成形机床，七十年

表5-1 钛与几种常用材料物理性能的比较

项 目 \ 材 料	纯 钛	镁	铝	铁	铜	不 锈 钢
密度 (20°C, 克/厘米 ³)	4.5	1.7	2.7	7.8	8.96	7.9
熔点 (°C)	1668	650	660	1535	1083	1400~1425
比热 (卡/克·°C)	0.126	0.24	0.214 (20°C)	0.11	0.092 (20°C)	0.12
电阻系数 (微欧·厘米)	42	4.3	2.83 (0°C)	9.7	1.72	72
导热系数 (卡/厘米·秒·°C)	0.41 (25°C)	3.5	0.52 (25°C)	2	0.94	0.039 (100°C)
热膨胀系数 ($\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.5 (25°C)	26	22.4 (25°C)	11.7	16.5	16.6 (20~100°C)
弹性模数 E (公斤/毫米 ²)	10850	4360	7210	20000	11200	20300
磁化率 ($\alpha \times 10^{-6}$ 厘米·克·秒)	3.2		-0.086 (18°C)			

代已在航空发动机上采用了钛合金。对钛合金加工工艺的研究普遍展开，研制了几种改装或专用的热成形设备。

钛的蕴藏量比较丰富，在元素周期表中为第 22 号元素，属第四周期副族即 IV B 族，具有同素异形态，当温度低于 882.5°C 时非合金钛为密排六方晶格（即 $\alpha\text{-Ti}$ ），温度升至 882.5°C 直至熔点时，则具有体心立方晶格。钛在高温下化学性质极为活泼，能与氧、氢、氮、碳及许多别的元素起作用。钛与其它材料物理性能的比较，见表 5-1。

钛在高温时会发生严重的氧化，生成硬而脆的富氧层，对性能产生十分有害的影响。但钛在温度较低时形成的薄氧化膜则是一种很致密的组织，具有良好的保护作用，抗腐蚀性能极好。钛在中性、碱性溶液以及氧化性酸中具有优良的耐蚀性，对多数有机酸有很好的稳定性，特别是对海水的抗蚀性能超过所有不锈钢和镍基合金。但氢氟酸对钛的腐蚀十分迅速，硫酸、高浓度盐酸也能溶解钛。

纯钛在工业上应用还不够理想。但钛合金的综合性能比较优越。多元钛合金强度已大大超过 100 公斤/毫米²，某些钛合金还具有优良的高、低温性能，在 550°C 条件下仍能保持一定的机械性能，个别材料甚至可以在 600°C 以上短期使用；一些钛合金如 $\text{TC}_{10}(\text{Ti-5Al-4V})$ 、 $\text{TA}_{17}(\text{Ti-5Al-2.5Sn})$ 在超低温 -253°C 时仍具有较高的强度和韧性。加入了大量铝及少量钽或微量钼可以大大提高钛在硫酸、盐酸等还原介质中的耐蚀性能。

钛及钛合金的拉伸强度和屈服强度数值比较接近，即屈服极限对强度极限的比值大，延伸率低，因而塑性变形区范围窄，稍有塑性变形便能达到强度极限，发生破坏。此外，反映冲压回弹大小的 σ_s/E （屈服强度/弹性模量）比值比钢和不锈钢大几倍，回弹量较大。钛材冷成形时硬化比较严重，摩擦系数大，与其它金属的亲合力强，成形中容易粘模、划伤，钛材的冲压性能较差。表 5-2 列出了钛合金与几种常用材料的屈强比和 σ_s/E 的比值。

为了改善材料的冲压成形性能，一般在加工过程中要退火，以

表5-2 钛合金和铝及钢几种材料 σ_s/σ_b 及 σ_s/E 的比值

材 料		项 目	σ_s/σ_b	σ_s/E
铝 合 金		LF ₂	0.35	0.1
		LF ₂₁	0.38	0.07
钛 合 金	国 产 材 料	TC1	0.78	0.78
		TC4	0.89	0.84
		TA7	0.81	0.62
		TB1	0.77	0.9
	英 国 材 料	T/Cu	0.79	0.49
		T/CP	0.75	0.44
钢		45	0.5	0.18
		1Cr18Ni9Ti	0.36	0.11

消除冷作硬化和应力。常常采用加热成形工艺以减小回弹，提高贴模效果。因为在高温下，不但屈服比及 σ_s/E 都减小了，塑性提高，在一定温度、变形速度和压力条件下还能进行蠕变成形，减小零件回弹，产品尺寸精度较高。图5-1表示在一定应变量条件下冷成形和热成形回弹量的比较。很明显，热态条件下的回弹量 A_2 比冷态下的回弹量 A_1 小得多。

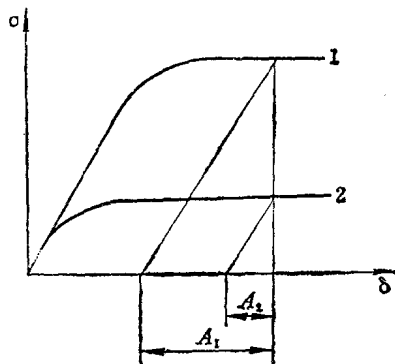


图5-1 冷热成形时不同的回弹情况

1—冷成形；2—热成形。

实践证明：除工业纯钛及某些塑性较好的钛合金可在冷态下冲压成形外，一般钛合金冷态成形比较困难，故通常采用冷态预成形，然后用热校形或直接热成形的方法来加工。只有一些要求不高、形状简单的零件（如单曲度的小冲压钣金件、单曲度蒙皮等）可在冷态下加工。有的材料在冷态下无法成形。

二、现代航空发动机中的钛板冲压件

(一) 材料

随着钛及钛合金在航空与宇航工业中广泛应用,新合金的不断涌现,钛及钛合金的应用比例有显著增加,航空发动机上常用的钛及钛合金见表 5-3。

表 5-3

合 金 牌 号	合金类型	室温拉伸			用 途
		σ_b 公斤/ 毫米 ²	δ %	ψ %	
TA ₁ (Ti99.5)	α	30	25	50	} 用于要求低强度、高塑性的板材零件以及耐腐蚀的结构件
TA ₂ (Ti99.2)	α	40	20	40	
TA ₃ (Ti99.0)	α	55	15	30	
TA ₇ (Ti-5Al-2.5Sn)	α	85	10	30	用于中等强度的焊接零件如机匣等。
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.2Si	近 α	100	10	20	400°C下工作的压气机盘、叶片等
Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.25Si	近 α	98	10	20	发动机用热强钛合金(500°C以下)
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Cb-0.25Mo-0.3Si	近 α	98	15	30	550°C下长时工作的发动机零件
Ti-6Al-11Zr-1Mo-0.5Si	近 α	100	8	25	550°C下长时工作的发动机零件
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	近 α	100	6	15	500°C下长时工作,可焊性好
Ti-6Al-2Sn-1.5Zr-1Mo-0.35Bi-0.1Si	近 α	100	15	25	550°C下长时工作的发动机零件
Ti-8Al-1Mo-1V	近 α	95	10	20	450°C下工作的压气机盘、叶片
Ti-2Cu	α 化合物	60	27	45	350°C下工作的零件,可焊性好
Ti ₆₁ (Ti-2Al-2Mn)	$\alpha + \beta$	65	15	30	用于壳体等焊接板材构件
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	$\alpha + \beta$	105	10	20	350~400°C下工作的发动机构件

(续)

合 金 牌 号	合金类型	室温拉伸			用 途
		σ_b 公斤/ 毫米 ²	δ %	ψ %	
Ti-4Al-3Mo-1V	$\alpha + \beta$	100	8	20	400°C下工作的结构件
Tc ₃ (Ti-5Al-4V)	$\alpha + \beta$	90	10	25	中等强度的板材零件
Tc ₄ (Ti-6Al-4V)	$\alpha + \beta$	95	10	30	350°C下工作, 综合性能好
Tc ₈ (Ti-6Al-2 Mo-2Cr-1Fe-0.25Si)	$\alpha + \beta$	100	9	25	400°C下长时工作的压气机盘、叶片
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	$\alpha + \beta$	95	10	25	450°C下工作的压气机盘、叶片
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	$\alpha + \beta$	112	10	25	400°C下工作的压气机盘、叶片
Ti-6Al-6V-2Sn	$\alpha + \beta$	115	8	20	用于要求高比强度的结构件
Tc ₈ (Ti-6.5Al-3.5Mo-2Zr(Sn)-0.25Si)	$\alpha + \beta$	105	10	25	500°C下工作的压气机盘、叶片
Ti-7Al-4Mo-(0.25Si)	$\alpha + \beta$	112	10	20	用于要求淬透性好的结构件
Ti-8Mn	$\alpha + \beta$	88	10		中等强度的板材构件
Ti-3Al-10V-2Fe	近 β	126①	10	20	300°C下工作的高强度、高韧性、高淬透性零件
Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe	近 β	140①	5	20	350°C下工作的高强度结构件
Ti-11.5Mo-4.5Sn-6Zr	近 β	126①	8	22	冷加工性能好, 作铆钉、紧固件
Ti-3Al-13V-11Cr	β	120①	6	10	250°C下工作的框架、蜂窝结构等
Tb ₁ (Ti-3Al-8Mo-11Cr)	β	135①	3	15	250°C下工作的高强度结构件
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	β	133	8	15	用于高压管材等大应力构件
Ti-3Al-8Mo-8V-2Fe-(1Cr)	β	126	8	16	300°C下工作的板材结构件(蜂窝结构)
Ti-32Mo	β	83	10	28	用于耐腐蚀的结构件

① 固溶时效状态, 其余为退火状态。

现代航空发动机上均有一定数量的钛及钛合金冲压件。比较

典型的零件是引射机匣（见图 5-2），其中有许多钛冲压件。主要材料是钛铜合金（T/Cu）及工业纯钛（T/Cp）两类，厚度有 1.22 毫米、0.91 毫米及 0.71 毫米三种规格。

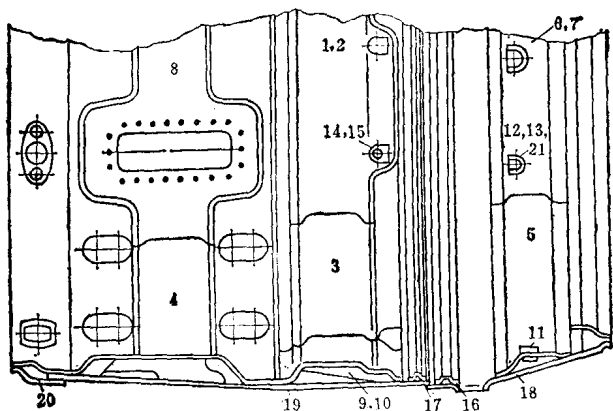


图5-2 引射机匣示意图

钛铜合金（T/Cu，Ti-230，材料代码 TAN）是英国帝国金属工业公司研制的一种钛-铜二元合金，焊接性能冲压成形性能、机械性能都比较好，可以在 350°C 以下的工作条件下使用。从 1959 年起以板材、锻件及挤压型材形式供应，使用状态为退火状态，组织为 α 和非共晶的 Ti_2Cu ，这种材料还能够进行强化处理。固溶时效处理后强化相为细化弥散分布的 Ti_2Cu 沉淀。 Ti_2Cu 在 400°C 左右成核，分布均匀，然后在 475°C 长大。热处理制度规定：805°C/30 分钟空冷 + 400°C/8 小时空冷 + 475°C/8 小时空冷。热处理后材料室温强度最高可达 86.5 公斤/毫米²，比退火后的强度提高约 20~25%，比 200°C 蠕变高温强度提高约 1 倍，而延伸率稍有下降。钛铜合金还具有良好的焊接性能。

另一种钛板材料为工业纯钛 T/Cp，相当于 TA₃，具有较好的冲压成形性，能冷成形。两种材料的化学成份见表 5-4，钛铜合金的机械性能见表 5-5。

工业纯钛 T/Cp 的机械性能： $\sigma_b = 29.4 \sim 41.5$ 公斤/毫米²，

表5-4 钛铜合金及工业纯钛化学成份 (%)

材 料	钛铜合金 (T/Cu)				工业纯钛 (T/Cp)
	英国标准 B. S. TA58		国产板	英国板料实测	英国航空工业部标准
元 素	最 少	最 多	料实测	(批号 T 5186)	DTD5063
Cu	2.0	3.0	2.5	2.34	
Fe		0.02		0.02	≤ 0.2
H		0.01	0.0066	0.002	0.015
Ti		余量	余量	余量	余量
C			0.08		≤ 0.1

注：按MS304标准，N及O的含量要以机械性能为依据。

表5-5 钛铜合金主要机械性能

标准 试验温度 (°C)	英国标准B. S. 2TA21①			英国板料实测② (炉批 T 5186)			九〇二厂 国产材料			抚顺钢厂 国产材料		
	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ
20	47~55.1	55~71.3	18	48.9	56.3	24	43~45	58~60	35	48.5~58	55~70.5	30~39
100	56.5	72	23					46	50.5		55~55.7	38
200	48	64.5	26					38	55.5		49.2~49.6	37
300	46.5	62	23					34.5	51.3		46.8~48.6	31.7~34
400	44	58.5	19					34	52.8		46.3~47.2	34.3~37.9
500	36.4	47.8	21					29.5	69.7		40.6~41.5	32.8~34.3

注：1. 材料状态：790°C退火30分钟，空冷。

2. 性能单位： σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 为公斤/毫米²， δ %。

① 取样厚度 1.3毫米，

② 取样厚度 1.22毫米。

$\sigma_{0.2} = 14.06 \sim 20.38$ 公斤/毫米²， $\delta = 22\%$ 。

(二) 零件结构特点

图 5-2 是典型零件引射机匣的结构示意图。以图 2 为例，分

析钛板冲压零件的结构特点。

1. 封闭式环形件和筒形件

由于零件具有封闭形状、尺寸较大（直径在1米以上）的截面，在加工过程中变形、受力及回弹需要均匀一致，又因为尺寸太大，所以难以采用热成形。对于这类零件（如图5-2中18、19、20所示）只能用PVC（聚氯乙烯）软阳模在液压机上成形或用滚压方法（如图5-2中零件16、17所示）冷成形。

上述这些零件尺寸精度要求较严，直径公差为0.25毫米，曲面度为1.02毫米。

2. 开口式零件

多为筒体件或环形件的一部分，通常由几个形状相近但截面不同的零件组合焊接而成一个环形组件。这类零件两端敞开，半径大（圆弧半径约500毫米），回弹较大，难以用冷成形来达到图纸精度要求，应用热成形方法加工，组合后常常需要热校形。

开口式零件按结构可分为三种，即一般弯曲件（如图5-2零件11）、弯曲型材（如图5-2零件3、4等）以及复杂件（如图5-2零件1、2、8等）。这些零件的技术要求如下：

型面公差带 ± 0.51 毫米

角度公差 $\pm 15'$

变薄量允许不超过材料厚度的百分之二十（统计数字）。

弯曲及成形圆角半径不小于 $3t$ （ t 为板材厚度）。

三、钛合金板件成形

（一）冶金特性

钛是一种同素异形金属，是一种多晶体组织。纯钛在室温下

为密排六方晶格，称之为 α 钛。若温度提高到 882.5°C 以后，就会发生相变，成为体心立方晶格，称之为 β 钛。某些合金元素对钛的相变转变点具有一定的影响。能提高其 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 转变点，扩大其 α 相区的称之为 α 稳定元素。反之，降低其 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 转变点，扩大其 β 相区的，称之为 β 稳定元素。前者有铝、锡、锆等；后者有钼、铬、钒、锰、铁、铜、硅等。因此，工业用钛按其主相的不同，可分为 α 合金、 β 合金和 $\alpha + \beta$ 合金。合金元素的相对数量将决定合金微观组织是单相 α ，还是混合相 α 与 β ，或单相 β 。机械性能既取决于晶体组织，又取决于合金元素的数量与形式。

α 钛合金

α 型合金内主要含有少量的氧、碳、氮和稳定 α 相的元素，在室温时为 α 单相组织。这种工业 α 合金的特点在于强度比较低，相对比重较小，延展性较好，在高温时具有足够强度，但不能通过热处理强化，加热成形的温度如超过转变点，晶粒就会急剧粗化，产生脆性。一般只进行退火处理，如TA₇等。这些合金虽是密排六方晶格，但并不具有理想的六方组织，因此与其它密排六方组织的金属比较，它具有较好的成形性，一般焊接性能也较好。

$\alpha - \beta$ 钛合金

$\alpha - \beta$ 合金，如Tc₄ (Ti-6Al-4V)，Tc₁₀ (Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe)等退火后的组织由 $\alpha + \beta$ 相组成。因为合金元素的含量多具有较高的强度。还能应用热处理方法强化，能够用控制加热、淬火和时效处理方法来控制其微观组织。这类合金具有良好的压力加工性能，但焊接性能及高温强度稍差，是目前在航空工业中应用最广的一类钛合金。

β 钛合金

利用增加 β 稳定剂数量（特别是钒、铬和钼）的方法能生产在室温下主要由 β 单相组成的合金。这类合金的缺点是由于附加有钼、铬和钒，故比重较大。有些合金可通过固溶和时效处理强化，强度可达到 130 公斤/毫米^2 以上。这类合金因为具有体心立方

结晶组织，在延展性方面有所增加，冷成形性及断裂韧性较好，各向异性小，但不宜在高温下长期工作。这类合金如TB₁ (Ti-3Al-8Mo-11Cr) 和 Ti-3Al-13V-11Cr。

(二) 成形特性

钛零件的成形涉及到塑性变形，特别是剪切变形。这种变形包含沿着滑移平面滑动。在一个多晶体中，立方晶系的金属在室温下有较大的滑移平面。因此，立方晶系金属比六方晶系金属在室温下能经受较大的塑性变形。但是在六方晶系金属中钛就是一个例外，在室温下具有多个滑移面。在钛合金中，滑移系统是受合金的成分影响的。

在高温下有较多的滑移系统能起作用，提高了成形性。钛最难在 593~816°C 范围内成形，因为在这种温度区会显著地减小弯曲半径。钛合金常常用提高温度和增加保温时间的方法来降低弹性回复或回弹，成形质量也比室温下更佳。

(三) 成形方法

由于钛的屈服强度高，弹性模量小，缺口敏感性高，纵横性能不均匀，成形后容易产生回弹、变形和起皱，给成形加工带来了较大的困难。成形钛或钛合金钣金件很大程度取决于材料的成形极限、厚度和弯曲半径。一般来说，形状比较简单的零件可以在滚床、液压机，闸压床或落锤上冷成形至最终尺寸。零件越复杂，冷成形就越困难。这样就需要把时间、高温和压力结合起来，以便消除残余应力和回弹，控制零件尺寸。外形变化剧烈，但具有明显母线的角形或槽形零件，可用预成形方法改善金属的流动，为最终成形创造条件。例如：在闸压床，滚弯机，液压床上冷成形，然后在热压床上热校形。

随着国内外钣金冲压技术的发展，目前钛合金钣金件的成形主要有以下几种方法：

1. 室温下在普通成形设备上预成形，而后在热压床上利用蠕变原理热校形。

2. 热成形 在热成形设备上直接由板料成形，也称“一次热

成形法”。

3. 热压延 在加热条件下利用拉深原理进行热压延成形。

4. 冷成形 当板材外表面纤维变形量不超过 1 % 时, 可利用此法。

5. 超塑性成形 它是七十年代发展起来的一种新的工艺方法, 即利用钛合金加热到 900°C 时延伸率可高达 1000 % 的特性, 来成形形状极其复杂的零件。钛合金在超塑性状态下变形抗力极小而延性极好, 成形非常方便。可以无模拉拔, 给型材、棒材、管材的改型以及某些零件 (如涡轮发动机的叶片) 的坯料制作提供方便; 可以深拉深; 可以用小的氩气压力吹塑成形, 成形形状极其复杂的零件; 特别对大型零件的成形, 不受机床尺寸的限制。采用这种方法, 可以把某些多零件的组合件制成一个整体件, 大大增加刚度和减轻结构重量, 大大简化成形和装配工艺。因此, 引起了航空与宇航工业的兴趣, 目前正在国内外继续深入研究、逐步推广应用。

6. 两步成形法 首先将钛及钛合金材料冷却到液态氮的温度进行初步成形, 其变形量至少等于材料所要求的总变形量的 10 %, 然后在 $18\sim 138^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内最终成形。这种成形法一方面不要求极高的成形温度, 可避免钛板氧化和变薄现象。由于模具加热温度极高, 因此模具寿命大大降低; 另一方面取消了中间退火工序, 既可以提高经济效益, 又不必长时间处于退火温度下, 零件不受污染。这种成形方法要求的载荷也比通常成形钛及钛合金时的载荷要小。

(四) 加热手段

钛合金的特殊性能决定了大多数钛板零件必须采用加热成形。因此, 加热手段在整个钛合金成形工艺中是一个十分重要的环节。热成形机床大都采用电热平台作为加热手段。用其它的加热手段与常规设备相配合, 也能达到良好的成形效果。采用何种加热方法要根据零件类型、设备条件以及经济技术指标综合考虑。目前常用的加热方法有:

1. 电热平台加热 电热平台大多用高温管状加热器作为热源,其优点是可以分区控制,使整个平台的温度均匀。较新的管状加热器本身还可以分段控制,使用方便。

2. 自阻加热 利用钛合金材料本身较高的电阻率,通以大电流,使钛板产生高热。采用这种加热方法可以在常规的成形设备上成形。

3. 辐射加热 常用的辐射源是石英灯,它是一种加热速率高、安全而易控制的加热方法。

4. 模具本身加热 模具内部装有电热元件,用来加热模具及钛板,这种方法可直接使用常规机床,无需在机床上装加温设施。常用的模具加热法有二种:(1)采用管状加热器加热;(2)采用电阻丝加热。前者多用于金属模,后者多用于陶瓷模。

5. 毛料在紧靠机床的电炉内加热,然后迅速地移至落锤或压床上成形。这是一种原始的、简便的加热方法,生产准备简单,模具也无须耐热材料。零件没有蠕变过程,但由于板料薄,散热面积大,零件由炉内取出放到模具上的时间虽然不长,但冷却快,质量不易控制,冬夏两季室温相差大,很难掌握规律,成形后,需要大量的钳工校正工序。目前英国的一些飞机和发动机制造厂仍采用这种方法。这种方法使用的液压锤,冲压速度快,类似气锤的冲击;在给定的压力下保持一定的时间;可以连续冲击,零件可以满足要求,但不如热成形机成形质量好。

6. 模具与毛料一起放在电炉内加热,待毛料软化后,依靠模具的自重对毛料加压成形。这种加热方法大多用于大型的、曲率变化不太大的零件,模具则多用铝酸钙溶凝硅石铸料制成,加热时间较长,只适用于小批生产或试生产。

上述加热方法在我国的一些工厂、科研单位、大专院校大都试用成功,积累了大量的试验数据,尤其是先进的电热平台加热法、自阻加热法已在飞机和发动机制造业中得到了应用。

(五) 成形模具

钛合金板材所用的成形模由于长期在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 的高温下