

强力旋压及其应用

陈适先 編



国防工业出版社

强力旋压及其应用

(国外文献综述)

陈适先 編

唐念萱 校



国防工业出版社

强力旋压是一种借助于金属的塑性变形而成形的先进工艺方法。这种工艺方法早先在国外民用工业中被采用，而近十年来，又在国外航空工业中得到了广泛应用。本书是根据有关国外文献编写而成的，内容共包括概述、基本理论、机床、工艺装备、加工过程及实例等六章。在第二章中侧重于介绍强力旋压的基本塑性理论；在第五章中则侧重于实际应用并汇集了可资参考的经验数据。在第三章与第六章中分别列出了三十一台强力旋压机床与三十六种用强力旋压加工的航空零件和民用产品的实例作为参考。

在编写过程中，承北京航空学院唐荣锡，冯厚植等同志提供资料并校阅指正，特此表示感谢。

强力旋压及其应用

陈适先 编

唐念萱 校

•

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

•

850×1168 $1/32$ 印张 $5\frac{1}{2}$ 140 千字

1966 年 3 月第一版 1966 年 3 月第一次印刷 印数：0,001—2,700 册

统一书号：15034·1102 定价：(科六) 0.85 元

目 录

第一章 概述	5
§ 1.1 发展简史与基本过程	5
§ 1.2 特点与应用	7
第二章 理论分析与试验研究	15
§ 2.1 模型试验	15
§ 2.2 变形力	17
§ 2.3 材料的可旋性	44
第三章 机床设备	51
§ 3.1 工艺要求与机床特点	51
§ 3.2 机床的性能与构造	52
第四章 工艺装备	89
§ 4.1 主要装备	89
§ 4.2 机床附件	93
第五章 工艺过程	95
§ 5.1 毛坯	95
§ 5.2 强力旋压过程	100
§ 5.3 工件质量	112
第六章 加工实例	119
参考文献	173

主要符号索引

A ——面积	t_i ——轧压深度
B ——宽度	V ——速度
C ——常数	V_0 ——体积
D ——工件直径	W ——功
D_p ——旋輪直径	$\dot{W}$ ——功率
e ——实际应变	α ——工件錐角
F ——旋压力	α_0 ——預成形錐角
f ——沿工件母綫的进給	α_p ——旋輪后角
h ——高度	β ——旋輪安裝角
I ——应变速度偏斜張量第二不变量	γ ——剪应变
J ——应力偏斜張量第二不变量	$\dot{\gamma}$ ——剪应变速度
K ——系数	γ_p ——旋輪前角
L ——长度	ϵ ——延伸应变
m ——系数	$\dot{\epsilon}$ ——延伸应变速度
n ——主軸轉速	η ——效率
n_i ——旋轉圈数	μ ——系数
p ——单位接触压力	ρ ——圆弧曲率半徑
R ——工件半徑	σ ——拉应力
R_p ——旋輪半徑	σ_b ——强度极限
r_p ——旋輪圓角半徑	$\sigma_{0.2}$ ——屈服极限
s ——軸向进給	τ ——剪应力
S_{ij} ——应力偏斜張量	τ_0 ——屈服点剪应力
T ——时间	ψ ——相对收縮率
t ——工件壁厚	ψ_t ——厚度收縮率
t_0 ——毛坯壁厚	Δ ——偏离正弦律程度

第一章 概 述

§ 1.1 发展簡史与基本过程

一、发展簡史

在噴气式飞机与火箭導彈制造业中，各种旋轉体零件的加工劳动量占有很大的比重。这些零件有噴气发动机的支承錐体、渦輪軸、尾噴口、机匣以及火箭发动机的鼻錐、儲油箱封头、环状壳体以及拉瓦尔噴管等零件。在其它軍事工业与民用工业中类似的产品也很多。

上述零件的傳統加工方法有，利用鍛鑄毛坯进行机械加工，利用板材毛坯进行弯曲、焊接与成形或进行拉深等等。但是，这些傳統方法在不同程度上都存在着过多消耗原材料及加工工时的缺点。

近十年来，在国外航空工业中发展了一种效用卓著的利用金屬塑性变形成形的工艺方法——“强力旋压”，用这种方法可以較經濟地制造出优质的旋轉体零件。

普通旋压工艺是十世紀时在我国发明的，于十四世紀才傳入欧美。与普通旋压有某些相似的强力旋压工艺則最早是在欧洲(瑞典、德国)被用于民用工业。1952年美国普拉特惠特尼(Pratt Whitney)航空发动机公司从一件瑞典出品的小型民用产品得到启发，与洛奇西普来(Lodge Shipley)机床公司合作在1953年制成首批三台专用强力旋压机床，初次成功地将这种方法推行到航空产品的制造中。此后，这种方法就在美国各航空工厂得到了广泛的采用。

这种工艺方法的称呼較多。各家公司都給以不同的商业称呼，如洛奇西普来公司称之为“流动旋压”(Floturning)、辛辛納特

(Cincinnati) 公司称之为“液力旋压”(Hydrospinning)、赫福特(Hufford)公司称之为“旋轉鍛压”(Spinforging), 还有从加工的原理出发称之为“旋轉挤压”(Rotary Extrusion)、“滾軋成形”(Roll Forming)、“剪切旋压”(Shear Spinning)或“变薄旋压”(Выдавливание с утонением)的。本文中采用在国内已较为通行的称呼——“强力旋压”。

二、基本过程

强力旋压的基本过程如图 1.1 所示。尾架的頂块 3 将毛坯 2 在心模 1 的頂端夹紧。心模、毛坯与頂块一起随机床主軸旋轉。旋輪 5 按靠模板或導軌的預定軌迹移动, 它与心模間保持着一定的間隙。旋輪施 250~350 公斤/毫米²的高压于毛坯, 使其逐点产生变形, 靠紧心模(反旋时离开心模)而成为零件 4。

在錐形件强力旋压时, 每点的变形对其它未变形部分的影响很小, 变形后的工件突緣基本上保持变形前的原状, 而工件壁厚变化則遵循对于强力旋压来讲是极为重要的一条基本規律——正弦律。正弦律的内容如下: 在錐形件强力旋压中, 变形后的工件材料厚度等于变形前的毛坯板材厚度与工件半錐角正弦值的乘积, 即:

$$t = t_0 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1.1)$$

在毛坯設計与机床調整中, 只有

很好遵循这个規律, 才能获得滿意的結果, 关于它的推导詳見 § 2.1 所述。

按变形方式, 强力旋压可分为正旋与反旋两种。正旋时, 材料流动方向与旋輪前进方向相同, 反旋时則相反。根据零件的形

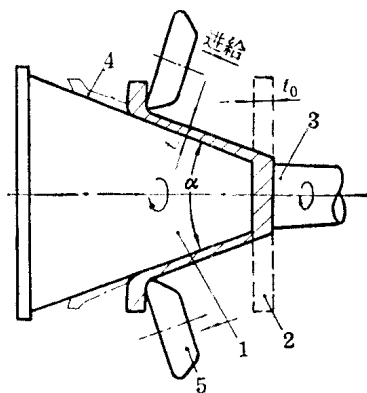


图1.1 强力旋压基本过程简图

1—心模; 2—毛坯; 3—尾頂块;
4—零件; 5—旋輪。

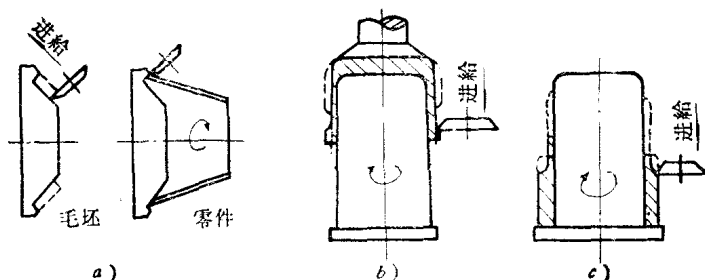


图1.2 正旋与反旋简图

a—锥形件反旋；*b*—筒形件正旋；*c*—筒形件反旋。

状，强力旋压可分为锥形件旋压、筒形件旋压和复合零件旋压三种。

锥形件的正旋与反旋见图 1.1 及 1.2 *a*。筒形件的正旋与反旋见图 1.2 *b*、*c*。

§ 1.2 特点与应用

一、优点

与其它工艺方法相比较，强力旋压具有许多独特的优点。

1. 与普通旋压相比较 加工过程的区别在于：1) 强力旋压时，毛坯突缘不产生收缩变形，因而不产生突缘起皱的现象，也就没有对毛坯几何尺寸（直径与厚度比）的相应限制；2) 强力旋压时，零件厚度的变薄沿母线长度是有规律的和可以控制的；3) 强力旋压时，旋轮是沿零件外形作单向移动而不象普通旋压那样需作双向摆动，因此可以减少手工劳动而采用半自动工作循环。这样，普通旋压的方法通常局限于有色金属零件及变形程度较小的钢零件的制造，而强力旋压则不受此限，可以一次旋出相对深度较大的钢零件，所需工人技术水平较低，并大大减轻了手工劳动量。

2. 与冷冲挤相比较 加工过程的区别在于，强力旋压时变形是沿圆周方向逐点进行的，而冷冲挤时则是沿工件外形的整个截面上进行的。因此，冷冲挤时所需的变形力和零件径向截面的面

积成正比，所需挤压力很大，通常局限于有色金属及软钢的小零件制造，而强力旋压则不受此限。

3. 与鍛鑄毛坯的机械加工工件相比較 1) 强力旋压作为一种无切屑加工，可以大大节省材料消耗（有时达 80%）；2) 由于强力旋压后可以获得較高的内外表面光滑度和准确度，因而可减少鏜、磨等工序。表 1.1 所示是英国不列斯托席德勒 (Bristol Siddley) 公司用普通鍛造后机械加工及用强力旋压两种方法加工四种典型零件的成本比較。

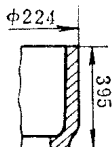
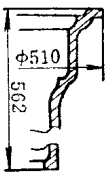
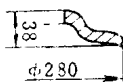
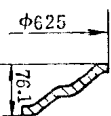
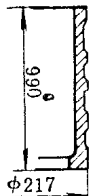
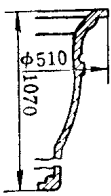
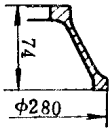
4. 与板材毛坯弯曲焊接成形相比較 强力旋压时：1) 加工工时可大为减少，可节省焊前准备、焊后打磨、焊缝檢查等許多工序；2) 可以获得不带焊缝的整体零件。

5. 与板材深拉深相比較 在强力旋压时：1) 工艺装备可大为简化，一些原需 6~7 次拉深的零件可一次旋出，对于用高强度材料制造的，直径在 1 米以上，深度直径比在 3 以上的复杂零件，有时根本不可能用拉深法制造，但却可以很方便的用强力旋压制造出来；2) 强力旋压机床比能力相同的深拉深机床价格約便宜一半，其构造大为简化，维护也較容易；3) 旋压心模的成本只有拉深模的十分之一，而且心模使用寿命也比較长。

美国某公司曾就这两种方法进行了成本比較：在制造某直径为 305 毫米的软钢零件时，若用拉深方法制造 5 个零件，单件成本合 381.25 美元；制造 1000 件，合 3.21 美元；用强力旋压时，則分別为 54.65 及 5.15 美元；在零件数量为 300 件时，价格相等。又在制造某不銹鋼錐形件时，用拉深法制 5 件，单件成本为 1522.5 美元；制 5000 件，为 3.16 美元；采用强力旋压，則分別为 78.17 及 2.10 美元。由此可見，在一定的批量下，强力旋压在成本上比深拉深是大为有利的。

6. 强力旋压所制成的产品质量較好 1) 可以获得壁厚均一，不带焊缝或带有被强化了了的焊缝的整体空心结构，从而使零件（特别是承力零件）的工作更为可靠。在美国 JT-3D 型喷气发动

表 1.1 強力旋压与普通方法加工的成本比較 (46)

四种典型零件用普通方法和強力旋压加工时的成本比較		隔 板	軸	軸	軸 承 隔 板
半成品 毛坯	材料和机械 加工成本(英磅)				
		205	120	340	92
強力旋压成品	材料、机械 加工和強力旋 压成本(英磅)				
		208	126	350	94
普通製造	初試成本 (英磅)	600	250	1500	168
	生产成本 (英磅)	—	250	1100	156
由于降低了机械加工余量进一步 节省的机械加工时间(小时)		5	6	14	25

机試車中,曾发生过燃燒室外套与安装边对接焊縫处裂紋的問題,后来就是采用强力旋压的方法,从結構上消除了焊縫而使这个問題得到了解决。对火箭和導彈的高压容器,用强力旋压消除焊縫或提高其强度的优点就更为一些設計师所公认;2)在强力旋压时,金屬晶粒被延伸变长并大大細化,从而使材料的强度、硬度有显著提高。这样也就有可能使某些不能接受热处理强化的材料在經過强力旋压后,机械性能提高;这对于制造某些长而薄的零件也很有利,可以免去强化工序,从而避免零件的畸变。如果零件还需保持一定的延伸率,則可在强力旋压后进行退火处理,这时抗拉强度还保留百分之几十的增加量;3)經過軋压后,工件表面硬度增加,从而使疲劳强度得到提高,这个优点对于具有切口敏感性的材料尤为显著;4)各种难加工金屬(鈦、鋁、鎢等)可以用加热强力旋压的方法来加工,且其材料的高温性能通过强力旋压得到改善;5)通过强力旋压可达到較高的准确度和表面光滑度。在强力旋压后,錐体内表面紧紧靠胎,回彈很小,其尺寸与表面光滑度基本上与心模相一致。又由于工件厚度較均一,因而外徑准确度亦較高。外表面的光滑度是靠旋輪軋压而得,比用切削加工所得的表面光滑度亦有所提高。一般來說,所制錐形件可以达到4級精度和 $\nabla\nabla 6 \sim \nabla\nabla\nabla 8$ 的表面光洁度;6)在强力旋压时,通过材料逐点的剧烈变形,毛坯中的任何夹渣、杂质和夹层都会暴露出来,而不至带到产品中去造成危害。这样,加工过程本身就对毛坯材料进行了檢查。当毛坯为焊接件时,强力旋压除可改善焊縫质量外,还可起檢驗焊縫的作用,不合格的焊縫会在旋压过程中破裂;7)有时,用强力旋压代替了原有加工方法后还可以使复合构件变为整体零件,从而提高了强度、减少了零件数量,并減輕了产品重量。

二、缺点与限制

与任何加工方法一样,强力旋压工艺在应用中也有一定的局限性。

1. 对产品的形状尺寸有一定的限制,例如旋后要留下一厚底,对于板金件来说,如果底部尺寸太大,材料利用就不经济。

2. 对产品的批量有一定的限制,由于在强力旋压时需要一套保持协调的心模及靠模板,而且工序调整时间较长,因此用这种方法加工零件的生产成本在单件试制时就不如在小批和中批生产时那么有利。又由于旋压工时一般大于冲压工时,因此,在大量生产时,有时还是以采用深拉深的方法在经济上更为有利。

根据美国太阳(Solar)公司的统计,对于该公司当零件批量为50~50000件时,采用强力旋压是合算的。

三、应用情况

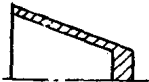
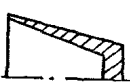
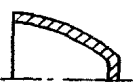
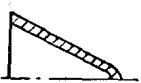
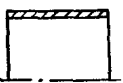
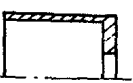
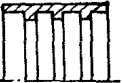
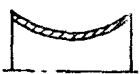
随着强力旋压工艺的发展,可用它制造的各种零件也越来越多。如前所述,强力旋压零件的外形可分为锥形、筒形以及复合形状三类。每类又包括以下各种不同的结构单元(见表1.2):

1. 壁厚沿母线均匀变化或保持不变;
2. 母线为直线或曲线;
3. 尾端带凸缘或不带凸缘;
4. 内表面带凸筋或不带凸筋;
5. 头部为平面或尖锥等等。

现在,几乎美国所有老牌航空公司,如普拉特惠特尼、福特(Ford)、莱康敏(Lycoming)、太阳、通用电气(General Electric)、马夸特(Marquardt)、波音(Boeing)等公司以及一些新兴的火箭导弹制造公司都已装备了强力旋压专用机床并用于生产。最先采用这种工艺的普拉特惠特尼公司在1956年就成立了独立的工段,并在60年以前就在8台专用机床上加工了22000件航空产品。在同时间内,洛奇西普来机床公司在其自己制造的强力旋压机床上生产了100万个零件。目前美国最大已生产出直径达3.9米的大型导弹零件,英国生产的达1.8米,法国生产的达2米。

根据已公开的资料,用强力旋压制造的航空零件包括美国大

表1.2 用強力旋压制造的典型結構簡图

錐形件			
1 简单的 	2.壁厚不等的 	3.带凸緣的 	4 曲母綫的 
5.带尖錐的 	6.带凸筋的 	7.双向的 	8.有双凸緣的 
筒形件			
1.简单的 	2.带內凸緣的 	3.带凸緣的 	4.带凸筋的 
复合件			
			

量生产的主要噴气发动机 J57, J79 等机种的整流罩、燃燒室錐体、压气机外壳、压气机錐体、渦輪軸、尾噴口等零件；以及像北极星、鮑馬克、大力神、小約翰等導彈的壳体、噴管、貯箱封头等零件，在所制产品中还包括美国第一顆人造卫星探險者号的鼻錐。图1.3 与图 1.4 所列是已在文献上公开的一些航空零件的尺寸簡图。

強力旋压在舰艇、軍械、化学、无綫电通訊、汽車、日用品制造业中也有广泛应用。用強力旋压制造的产品还有潜水艇渗透密封环、魚雷外壳、軍械的錐头、波紋管的毛坯、电视錐、光学

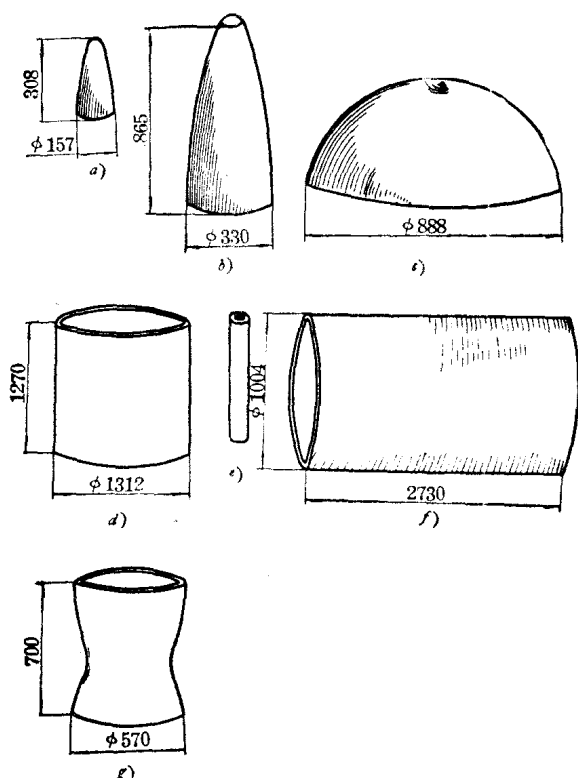


图1.3 几种火箭导弹的强力旋压零件（尺寸为毫米）

a—探险者1号卫星鼻锥；*b*—大力神导弹鼻锥；*c*—北极星导弹的封头；*d*—北极星导弹燃烧室；*e*—小约翰导弹发动机壳体；*f*—民兵导弹发动机匣；*g*—鲍马克导弹喷管。

透镜反射器、液压缸筒、汽车轮盘以及各种量杯、漏斗、餐具和各种容器等等。

用强力旋压还可以弥补板材轧制能力的不足，制造超宽度的板材，其方法是用强力旋压将圆筒形焊接毛坯旋长，然后沿母线方向切开展平即可。美国已用此法制成了宽7.5米、长9.1米的宽板。法国已用此法生产了宽6.2米、长2.4米的宽板。

强力旋压的发展趋势表现在所制造的产品上是，尺寸越来越

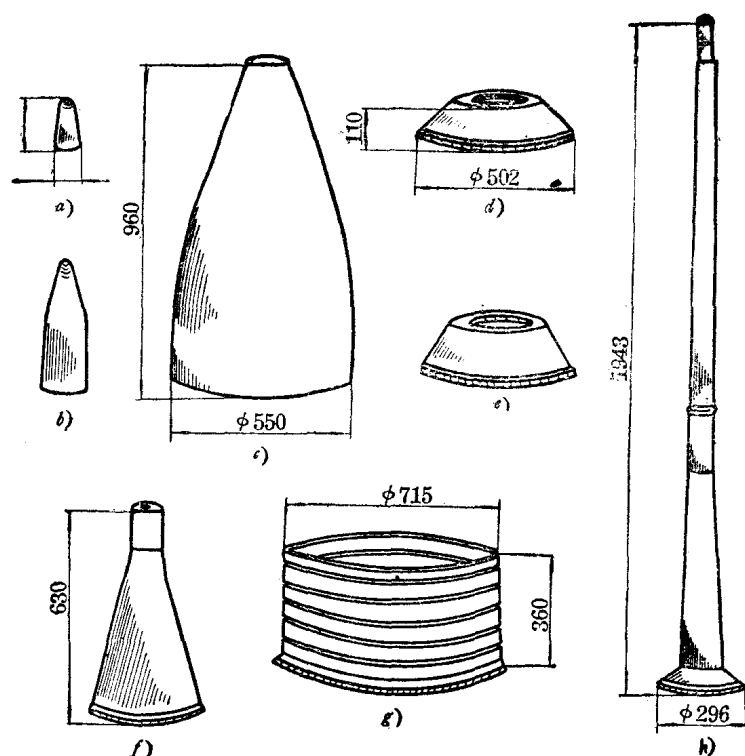


图1.4 几种喷气式飞机与发动机的强力旋压零件（尺寸为毫米）

- a*—某发动机燃烧室锥体；*b*—A4D、F105飞机炸弹头锥、尾锥；
c—B58飞机发动机罩；*d*—某发动机压气机锥体；*e*—某发动机
 压气机锥体；*f*—某发动机涡轮主轴；*g*—某发动机压气机机匣；
h—某发动机涡轮主轴。

大，形状愈来愈复杂，精度越来越高。美国正在准备制造旋压最大直径达6.5米的巨型强力旋压机。英国与法国的有关企业也纷纷准备添置更多的强力旋压设备。

总之，强力旋压这种有效的新工艺方法已经作为焊接、锻造、拉深、轧制等传统工艺的一种补充被肯定下来。

第二章 理論分析与試驗研究

§ 2.1 模型試驗

卡尔柏肖格路 (Kalpacioglu) 和阿維佐 (Avitzur) 等分别采用划坐标网法和填孔法进行了錐形件强力旋压的模型試驗并对变形过程进行了观察, 其方法如下。

一、划坐标网法

这个方法是把銅的平板毛坯沿直徑方向剖开。在其中一件的剖面上划上坐标网格, 然后把两半釐接复原, 进行强力旋压。旋压后, 在炉中熔去焊料, 把两半分开, 就可观察到坐标网格的变化 (图 2.1)。

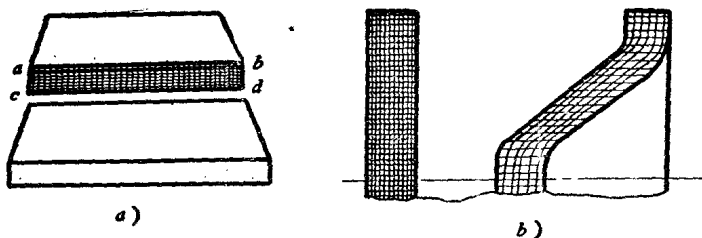


图2.1 用划坐标网法进行模型試驗

a—毛坯; *b*—毛坯与試件的剖面坐标网。

二、填孔法

这个方法是在毛坯上沿直徑方向钻一排直徑为 0.7 毫米的小孔, 其中填入材料与本体材料相同的許多小圆柱。在强力旋压后剖开試件, 去掉填充物, 就可观察到小孔的变形情况 (图 2.2)。

通过以上两种試驗, 观察到下列現象:

1. 在图 2.1 中, 在毛坯剖面上与旋轉軸綫平行的划綫在变形后, 除了靠近心模的内表面层有較大的歪扭外, 其余部分, 当工

