

内部资料

AD259022

强力旋压工艺研究

第五机械工业部第五设计院

一九七六年

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

洋为中用。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

出 版 说 明

强力旋压是综合了挤压、轧制等工艺特点，用滚轮沿芯模相对移动而使毛坯逐点成形为空心旋转另件的一种新工艺。

由于滚轮与毛坯近似于点接触，逐点变形，因此单位压力大，所需设备吨位小，变形率高，更有利于金属塑性变形；同时使产品的尺寸精度、表面质量和机械性能都有显著提高。

强力旋压工艺目前我国也正在试验研究，用于试制和生产国防、机械、化工、民用工业等所需的各种另件和产品。

冶金部有色金属研究院对强力旋压工艺，作了很多试验研究，这对我们采用这一新工艺有着重要的启示和影响，为适应当前试验研究工作的需要，现将冶金部有色金属研究院二〇五室从AD259022译制的《强力旋压工艺研究》一文予以出版，以供参考。

本文对强力旋压的基本内容和各种工艺参数对旋压力、产品尺寸精度的影响，均有叙述，因此有一定的参考意义。原文中的机床改装图纸十分模糊，故予以删去。

对有色金属研究院给予我们的大力支援，在此表示衷心谢意。

五机部第五设计院情报组

一九七六年三月

内 容 摘 要

本报告所叙述的研究工作，目的在于建立剪切旋压方法的基本知识。研究工作中使用了六种材料，对将近900个坯料作了试验。每个坯料及其旋压件都得到一组36个以上的内径和壁厚的数据。坯料合金包括：6061铝合金，Timken17—22A (S) 合金钢，321不锈钢，N—155和因科镍X 高温合金，以及6%Al—4%V—Ti合金。在报告中列出了合金坯料的尺寸，成份及冶金特性数据。同时，还对剪切旋压的试验术语以及本计划所用的旋压机的结构和设计作了介绍。

为了有序地安排试验计划，也为了便于叙述试验的结果，我们把试验工作分成四个部分。第一部分：着重确定旋压过程的各参数对于简单旋压件（即园筒体和锥体）的尺寸以及旋压操作中的滚轮力的影响。研究确定，过程参数中对园筒体尺寸有影响的有十四个，其中包括：坯料减壁率、坯料厚度、坯料直径、滚轮纵向进给、芯模速度、（滚轮压下量/滚轮台阶）比、滚轮接触角、滚轮压光带宽度、滚轮鼻尖半径、不经中间退火压到预定厚度所需旋压次数、经过中间退火压到预定厚度所需旋压次数、旋压方向、坯料温度和润滑剂。这些参数的影响分别用以下的名目加以讨论：园筒体壁厚的偏差、园筒体的内径偏差、园筒体内径的增量和减量、园筒体表面光洁度、园筒体剪切旋压时的滚轮力以及可以达到的最大减壁率。锥体剪切旋压的研究工作，目的在于评价各个因素对锥体壁厚偏差、内径偏差及其增减量的影响。这些因素包括：减壁率、坯料厚度、偏离正弦定律的程度、滚轮纵向进给、芯模速度和滚轮鼻尖半径。

在本计划的第二部分，我们利用金相技术以及旋压过程中的肉眼观察，并从旋压滚轮下金属流动的特性的角度来解释各旋压参数对于旋压园筒体及锥体的尺寸影响。在这方面，滚轮鼻尖下反向流动的金属的相对数量（与滚轮前面纵向的和径向的无益的正向流量比较）具有重大的意义。

在第三部分，我们把第一部分和第二部分中积累起来的知识用于制造复杂的旋压件，并且用它来解决制造过程中遇到的问题。这些旋压件包括：弹体、喇叭形锥体、带凹凸面的锥体。我们分别用二种不同的坯料来制造这些旋压件，一种是壁厚均匀的杯形坯料，旋压时，减壁率不变；另一种是平底坯料，它的壁厚是逐渐减小的，旋压时减壁率也变化。这些坯料形状对于剪切旋压的影响已用图表说明。同时，还讨论了偏离正弦定律的程度对于这些旋压件的尺寸的影响。除了上述三种形式的旋压件外，还介绍了一种由二个不同直径的园筒体加一个中间锥体构成的旋压件的生产方法。

最后一部分的目的，是要在辛辛那提1450×4075mm的液压旋压机上制造一个完整的火箭外壳。本计划的第一批三个部分的试验结果都在本报告中叙述了。关于1100mm火箭外壳剪切旋压的试验结果将在第二卷中叙述。

我们已尽可能把数据画成图形，这样，易于读者理解。同时，对于各个操作参数的影响，凡是能概括的地方，我们都已扼要地写入总结了。至于那些只适用于特殊旋压条件的数据，也摘录了很多，读者是不难从图形和讨论中去选用的。

目 录

I、目的	1
II、序言	1
III、技术资料	2
(A) 术语	2
(B) 剪切旋压机的设计和结构	2
(C) 坯料及坯料合金	2
(D) 园筒体试验方法	4
(E) 园筒体试验结果	6
1) 各参数对壁厚公差的影响	6
2) 各参数对内径公差的影响	8
3) 各参数对内径增量的影响	10
4) 各参数对表面光洁度的影响	13
5) 各参数对滚轮力的影响	13
6) 各参数对最大减壁率的影响	14
(F) 锥体试验方法	15
(G) 锥体试验结果	16
1) 各参数对壁厚公差的影响	16
2) 各参数对内径公差的影响	16
3) 各参数对内径增量的影响	17
(H) 剪切旋压时金属流动的金相研究	17
(I) 各参数对园筒体和锥体的尺寸特性的影响的讨论	18
1) 各参数对园筒体的影响	18
2) 各参数对锥体的影响	20
(J) 各参数对滚轮力的影响的讨论	20
(K) 复杂构件的旋压	21
1) 坯料壁厚与外形的计算	21
2) 弹体的旋压	22
3) 喇叭形锥体的旋压	22
4) 带凹凸面锥体的旋压	23
5) 带中间锥体的园筒体的旋压	23
IV、结论	23
V、建议	25
表 I 至表 VIII	26—37
图 1 至图 289 (其中图 7、9、10、15、16、22、23、24、25、26、288 删掉)	38—282
附录 A	283—284

I、目的

- a、确定各操作参数对于滚轮力和对于旋压园筒体及锥体的尺寸精确度的影响。
- b、确定剪切旋压时滚轮下金属流动的特性。
- c、确定生产结构复杂而尺寸偏差最小的旋压件的复杂性，其中包括各种带有过渡带的园筒体和锥体，以及各种包含凹凸面和（或）变壁厚的锥体。
- d、应用上述资料在一台辛辛那提1450×4075mm液压旋压机上制造一个火箭外壳（将在第二卷中报导）。

II、序言

现在，剪切旋压过程的机构人们已很熟悉。它是利用一个芯模和一个或二个成形滚轮，坯料放在芯模上，硬化滚轮在旋转芯模上沿着螺旋形轨道走动，使坯料产生塑性变形，使它的壁厚减小，长度增加，并且形成芯模的形状。剪切旋压可分成三大类：园筒体的反向旋压、园筒体的正向旋压和锥体的旋压。基本原理请看图1。这个过程有好几个名称，其中包括液压旋压、流动旋压、旋转锻造、旋转挤压、滚轧成形等等。在本文中，我们采用剪切旋压这个名称，这是因为这个名称适用面较广，而且，事实上，至少有一部分金属流是发生剪切形变的。

过去，在制造金属容器的古老的试验中，只得到一些粗浅的认识和琐碎的资料，对于剪切旋压过程的应用范围及其潜力还是不够了解的。当人们把剪切旋压过程用于生产新设计的部件时，就显得资料不足，以致难以确定旋压过程的最佳的尺寸公差，即在生产规模，旋压法所能达到的最窄的公差范围。旋压中还产生种种畸形，如喇叭口、不圆、起皱、内径扩大和弯曲等。因此必须在剪切旋压后对旋压件进行机械加工或定径，借以消除以上缺陷。关于这些畸形的产生原因及其校正方法，还不十分了解。

这方面的资料现在特别需要，因为近来重点放在火箭上，要求用大直径、薄壁而且尺寸精密的管子做火箭发动机的外壳。这种外壳的加工方法中，有用金属板焊接然后滚轧成园筒体的方法。还有对园筒体锻件进行机械加工的方法。这些方法的缺点，前者是公差范围相当宽，而且焊接处强度有限，后者是车削损失很大。剪切旋压没有其他方法的那些缺点，它是一种能够生产又大又长的管材的加工技术。

航空工业已经感到需要旋压过程的基础资料。但是，生产规模的剪切旋压机显然是不可能提供基础资料的。因而，美国空军航空材料管理局（AMC）主办这个计划，目的在于获得旋压过程的基础知识。计划的前面部分是确定过程参数对剪切旋压力的影响以及对园筒体和锥体的尺寸特性的影响，并且以旋压滚轮下的金属流动的名义来解释这些影响。计划的后一部分是研究复杂构件旋压的复杂性，同时生产一个大型的旋压件。

在报导这些研究工作的成果时，我们竭力压缩对方法及术语的叙述，力求减少对金属容器生产的一般化讨论。因为这些在近几年发表的许多技术性和半技术性的论文中，已经见过很多。与此相反，我们通过大量的实验项目，对旋压过程的最基本的方面进行了研究。

II, 技术资料

(A) 术语

目前, 剪切旋压还没有标准的术语。图 2、3、4, 说明了一些术语, 可以相信它们是能说明问题的。在今天的工业中还有一些用处。在本报告中, 通篇都用这些术语。即使有别的术语可用的地方也是为此。

(B) 剪切旋压机的设计和构造

我们认为, 大型生产的剪切旋压机对于本计划是不适用的。在一些生产用的旋压机上, 横向进给和纵向进给(或其中之一)是液压传动的。因此, 进给及芯模与滚轮的间隙将受坯料对滚轮的阻力的影响而变化。此外, 为得到大量的数据。将要在原型旋压件的生产中付出极高的代价, 而且必须排除生产计划对本计划的干扰。

因此, 我们将一台摆度为750mm的美国车床改装成旋压机。我们把普通装在车床上的复合刀架换成一个刚性机架, 在它上面装两个滚轮。旋压园筒体时, 二个滚轮可用导螺杆进行机械传动。它的纵向和横向进给是不变的。而在旋压复杂构件时, 滚轮可用液压传动。这台旋压机能旋直径12.5mm—300mm的工件。它的芯模速度范围很宽(6—260 RPM), 纵向进给是每转0.1—6 mm。机床上有二个空气—煤气喷射燃烧器。高温旋压时用来供热。图5和图6是这台旋压机的全视图和局部放大图, 机上装的是旋园筒体用的机械传动滚轮。

图7表示旋压机的内部结构, 它的滚轮是利用导螺杆进行机械传动。

图8、9、10表示一台旋制锥体和形状更复杂的构件的旋压机, 它有液压传动滚轮和液压仿形装置。

在二个滚轮上装有Baldwin—Lima—Hamilton SR4ABD7应变片, 用来测定作用于滚轮上的三个分力。这几个分力定名为垂直分力、轴向分力和径向分力, 并在图11中表示出来。垂直分力就是芯模旋转产生的力, 它促使滚轮在球轴承上转动。二个滚轮上的垂直分力取向相反, 就是说, 在一个滚轮上是向上的, 在另一个滚轮上是向下的。径向力是由滚轮的横向进给引起的, 它倾向于把滚轮从芯模上水平地推开。轴向分力是滚轮纵向进给引起的, 它与滚轮及芯模的轴线平行, 在滚轮上造成一个水平的弯曲负荷。为了测定这三个力, 在每个滚轮上都装上了三组(每组4片)SR4应变片。每组应变片都连接成韦氏电桥, 如图12、13、14所示。应变片都在滚轮上用垂直、径向、轴向三个已知负荷校正。同时, 用李诺电位计测定韦氏电桥器路中产生的不平衡电量。

图15、16和图22—26分别表示本项研究工作所用的园柱形和锥形芯模。园筒体和锥体旋压所用的滚轮分别用图17、18和图21表示。

(C) 坯料和坯料合金

图19和20分别表示反旋和正旋用的园筒形坯料。锥体旋压用的坯料是简单的平板, 板上有一个直径28.6mm的中心孔把板装在旋压机尾架定位器上。

在关于操作参数对园筒体尺寸的影响的研究中, 我们用了六种合金, 其中包括: AMS 4080 (6061铝合金)、AMS6302 (17—22A(S)低合金钢)、AMS5768 (N—155)、AMS 5667 (因科镍尔X) 和AMS4928 (6%Al—4%V—Ti合金)。在锥体的旋压研究中, 只用了一种合金, 即AMS4025 (6061—0 铝合金)。各种合金的确切的数据列表如下:

AMS 牌 号	其 他 牌 号	公 称 成 分 (%)	条 件	微 观 结 构	硬 度
AMS4080	6061铝合金	Mg 0.8—1.2 Cu 0.15—0.4 Al 余量	387°C退火二小时	图 27, 28 29, 30, 31	RB 85—88
AMS6302	TimKen 17—22A (S) 低合金钢	C 0.28—0.33 Si 0.55—0.75 V 0.20—0.30	650°C退火二小时	图 32, 33 34, 35, 36	RB 88—94
AMS5645	AISI 321 不锈钢	C 0.08 (最大) Ni 8—12	815°C退火二小时	图 37, 38 39, 40, 41	RB 79—83
AMS5768	N—155 高温合金	C 0.08—0.16 Ni 19.0—21.0 Mo 2.5—3.5	溶解和沉淀热处理	图 42, 43 44, 45, 46	RB 96—97
AMS5667	因科镍X 高温合金	C 0.08 (最大) Ni+Co 70.0 (最小) Ti 2.25—2.75 Fe 5—9.0	885°C平衡24小时 空气冷却	图 47, 48 49, 50, 51	RC 32—36
AMS4928	6%Al—4%V 钛合金	Al 5.5—6.75 V 3.5—4.5	700°C退火二小时 空气冷却	图 52, 53, 54	RC 29—33

(D) 操作参数对旋压园筒体的影响的试验方法

为了确定操作参数对剪切旋压园筒体的尺寸的影响以及对旋制这些园筒体所需的滚轮力的影响,我们用各种材料车削成若干坯料,外形如图19、20所示。这些试验园筒体,分别用不同的坯料壁厚减薄率(8—85%)进行旋压,从此评价坯料壁厚、坯料减壁率、滚轮进给、芯模速度、多次旋压和正向旋压等参数的影响。在每次旋压中,我们对所研究的参数采用几个不同的数值,同时所有别的参数都保持不变。剪切旋压时,我们测量了滚轮力的三个分力。剪切旋压以后,我们测量了园筒体的尺寸。我们还用相似的方法评价(滚轮压下量/滚轮台阶)比、滚轮接触角、滚轮鼻尖半径和压光带宽度的影响。不过只用单一的减壁率即40%进行研究。

除了(滚轮压下/滚轮台阶)比的研究以外,在所有的例子中,计算滚轮压下都已把滚轮回跳考虑进去。因此,实际压下与滚轮台阶是相等的。请看解释这些术语的图2和图3。坯料内外表面用埃索公司的NEBULA 2 #滑润脂作滑润剂。这种滑润剂对各种材料及各种操作条件都适用。用Micromul50 #乳化液作为冷却剂。在反旋时,旋压操作结束后,在筒体的靠近床头座一端,留下一圈未旋部分,这是由于滚轮轮和床头座之间的矛盾使坯料无法整个旋完。在对旋后的园筒体测定尺寸时,也测定了这一部分的尺寸。

在评价多次旋压对园筒体的尺寸特性影响时,旋压次数有一次、二次、三次,有时达到四次。园筒体旋压次数多于一次时,它的减壁量已与滚轮压下量相等。这些多次旋压试验,有的有中间退火,有的没有。退火周期如下:

6061铝合金坯料	345°C	二小时
AMS6302低合金钢坯料	650°C	二小时
AMS5645不锈钢坯料	835°C	二小时
AMS5667因科镍X	885°C	四小时
AMS5768N-155坯料	835°C	二小时
AMS4928 6Al-4V钛合金	705°C	二小时
	或980°C	二小时

下列表中列出的是剪切旋压操作参数的一些数值。在对各种材料进行各个参数的影响的试验时,都用到它们。我们用表中左边一行的“标准条件”旋压的园筒体作为比较的基础。表中右边一行的数字,称为“非标准条件”,以这些条件旋压的园筒体的尺寸特性,是用来说明过程参数变化的影响的。

操作参数	标准条件	非标准条件
坯料厚度	~ 4 mm	2.5 - 5.0 mm
坯料内径	100 mm	200 mm
纵向进给	0.1 mm/转	0.17 - 0.22 mm/转
	(AMS6302是0.25 mm/转)	(AMS6302是0.1 - 0.4 mm/转)
芯模速度	61 米/分	30.5 - 45 米/分
(表面线速度)		(AMS6302是30 - 90 米/分)
(滚轮压下/滚轮台阶)比	1.0	0.50 - 0.60 - 0.66 - 0.75
滚轮接触角	30°	15 - 45°

滚轮压光带宽度	1.1mm	0 - 2.2mm
滚轮鼻尖半径	1.9mm	1.0 - 2.5mm
达到预定减壁率	1	2 - 3 - 4
所需旋压次数		(有或没有中间退火)
旋压方向	反	正
坯料温度	室温	AMS6302} 315° AMS4928}
		AMS5768 480°

润滑剂 Nebula - 2 * 润滑脂 所有试验都用Nebula2*润滑脂

下面，以壁厚公差(与平均壁厚的最大偏差)、内径公差(与平均内径的最大偏差)和内径增量(或减量)的名义，来叙述这些操作参数对园筒体尺寸的影响。同时，在表面光洁度中，叙述滚轮压光带宽度这个参数的影响。

壁厚用精确度为0.0025mm的游标千分尺测定。园筒体的内径，用一个精确度为0.0025mm的内径规预定。

现将旋压园筒体的尺寸特性的测定方法叙述如下：

与平均壁厚的最大偏差(壁厚公差)

从园筒体的尾座端算起(位于床头端的那圈未旋部分除外)，在其长度的 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{7}{8}$ 三处的横截面上，各取三个相隔120°的点，测量壁厚，得到九个读数，取其平均值，得平均壁厚。再从这九个读数中选出与平均壁厚的最大正偏差和最大负偏差。图55表示测量壁厚偏差的方法。

与平均内径的最大偏差(内径公差)

从园筒体的尾座端算起(不包括位于床头端的那圈未旋部分)，在其长度的 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{7}{8}$ 三处的横截面上，各取四个相隔45°的测点，测得12个直径数值，取其平均值，得到平均直径。再从这12个数值中，选出最大正偏差和最大负偏差。图56表示测量内径的方法。

平均内径增量(或减量)

简单地说，这就是旋压园筒体平均内径与坯料平均内径的差。园筒体的平均内径的求法已在上面介绍，请看图56。坯料的内径平均值，按规定是坯料长度上 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{7}{8}$ 三处所测六个最大和最小直径的平均值。

在研究过程中，遇到的各种主要的内径缺陷，都可以用内径增量和内径公差加以说明。这些缺陷，包括不园和喇叭口。后者是指园筒体头部的内径扩大或变形。在第一批旋压园筒体上，我们打算测量既无喇叭口也没有另外二种缺陷即扭曲和弯曲的园筒体的不园情况(图57)。但是，我们发现这样做没有实际意义。原来，每个旋压园筒体上，不园度变化很大，而且，与任何一个操作参数都没有确定的联系。因为用“与平均内径的最大偏差”这个术语已能说明这个缺陷。因此，没有把不园度作为一个独立的缺陷列出数据。平直度偏差(参看图58)，在大部分旋压园筒体上都没有方法检查。在本研究工作中，我们观察过多次旋压所成的比较长的园筒体，发现在某些地方显得不园。但是，不能利用简单的方法测量。另外，我们在筒体内外表面划上与轴线平行的直线，它的变形情况说明，对于我们所用的坯料及操作条件来说，实际上不存在扭曲。图59—60表示其中一个园筒体的扭曲情况。

(E) 园筒体的试验结果

1) 剪切旋压操作参数对旋压园筒体壁厚公差的影响。

a) 一次减壁率对旋压园筒体壁厚公差的影响。

关于一次反旋园筒体的坯料壁厚减薄率和壁厚公差的关系的数据已在图 61—73 和 图 74—80中表示。这些数据说明二个趋势。从最低的一次减壁率到将近30%时,壁厚公差变动很小,或者随着减壁率的增大而稍微减小,减壁率超过30%时,壁厚公差就随着减壁率的增大而增加,而且减壁率越大,公差的增量也越大。显然,如果要提高减壁率又要保持小的壁厚公差,多次旋压是比较合适的。

一般园筒体的壁厚公差都小于0.025mm,而千分尺读数的精确度可能只有0.0075mm。虽然这样,我们确信上述趋势是正确的。因为这些数据都是每个园筒体的九个壁厚读数的平均值。但是,这些趋势的实际意义,仍然难以肯定。因为在大多数的场合,这些读数都在所要求的壁厚公差范围以内。

b) 坯料壁厚对旋压园筒体壁厚公差的影响。

如图61—65所示,在一次反旋中,坯料壁厚与旋压园筒体壁厚公差没有关系。

c) 坯料直径对旋压园筒体壁厚公差的影响。

如图66、67、68所示,坯料直径对旋压园筒体的壁厚公差没有影响。

d) 滚轮纵向进给对旋压园筒体壁厚公差的影响

滚轮纵向进给与壁厚公差的关系用图69—75表示。图70表示AMS6302的壁厚公差与减壁率的关系。只有这个图形说明进给有显著的影响。在这个例子中看到,减壁率大于25%时,进给加大,将使壁厚偏差变大。

由于这种表示数据的方法不适用于说明进给的影响,我们又旋压了另外几个AMS6302和AMS5645坯料,并测量了尺寸。将所得数据以壁厚公差对纵向进给作图,为图74、75所示。为消去坯料壁厚这个参数,各个园筒体都用40%的减壁率旋压。对于这二种材料,不管芯模速度多大,壁厚公差都随着进给的增大而增大。在此范围以外的一些数据(见附录A),也证明上述趋势,而且表明,存在一个最佳进给。若低于它,壁厚公差依然增大。

e) 芯模速度对旋压园筒体壁厚公差的影响

有关数据见图74—80。这些数据表明,芯模速度与壁厚公差没有任何关系。

在6061铝合金剪切旋压时,在260RPM(表面速度90米/分)和0.125mm/转条件下试旋了内径100mm园筒体。机器剧烈震动,并发出震耳欲聋的噪音。振动使旋压机无法继续工作。同时在旋压铝园筒体的外表面上,形成螺旋沟,如图81所示。振动的原因还不能确定。不过,我们确信,剪切旋压时,坯料是在芯模上振动的。这种振动,不是本设备所特有的。据报导,别的设备在不同的速度下也有这种情况。但是,用别的材料的坯料或者改变芯模速度时,这种振动和螺旋沟就没有了。

f) (滚轮压下/滚轮台阶)比对旋压园筒体壁厚公差的影响

图82—84表示(滚轮压下/滚轮台阶)比与壁厚公差的关系。AMS6302低合金钢和AMS5645不锈钢园筒体的壁厚公差,当滚轮压下与滚轮台阶的比值大于0.5时,不受它的影响。AMS4080铝合金就不同了,它的壁厚公差随着滚轮压下与滚轮台阶的比值的降低(从1.0降到0.5)而渐渐增大。我们将在下面一节说明,当滚轮接触面前面翻出粗边接着又在

滚轮鼻尖下面形成反常的金属流动时，上述影响就更明显。对于AMS6302和AMS5645 园筒体的旋压来说，这种影响的实际意义在于，允许使用减壁范围大的滚轮，它的压下量只占滚轮台阶的50%左右。很明显，这样将使储备滚轮的数量大为减少，工具费用也大大节约了。不过，在大量旋压易压延的软性材料（如铝合金）而且壁厚公差要求很严时，这种好处就没有了。

g) 滚轮接触角对旋压园筒体壁厚公差的影响

图85—87表示滚轮接触角与壁厚公差的关系。

对AMS4080铝合金和AMS6302低合金钢这二种园筒体来说，滚轮接触角在我们所研究范围内，与壁厚公差没有什么关系。但是AMS5645不锈钢园筒体则不同，它的壁厚公差在滚轮接触角 30° 时比较小，这种例外情况的原因不清楚。

h) 滚轮压光带宽度对旋压园筒体壁厚公差的影响

图88—90表明，滚轮压光带宽度对壁厚公差没有影响。即使把滚轮压光带完全取消，这个结论依然正确。

i) 滚轮鼻尖半径对旋压园筒体壁厚公差的影响

图91—93包含滚轮鼻尖半径对壁厚公差影响的数据。如同滚轮接触角对壁厚公差的影响一样（参看图85—87），AMS4080铝合金和AMS6302低合金钢的壁厚公差不受滚轮鼻尖半径的影响。而AMS5645不锈钢园筒体的壁厚公差却在鼻尖半径的中值时（2 mm）比较小。同前，这一例外的原因不清楚。

j) 旋压次数对旋压园筒体壁厚公差的影响

图94—102表示旋压次数对壁厚公差的影响。这些图形中的多次旋压的数据，有的是经过中间退火的，有的是不经过中间退火的。AMS5667因科镍X和AMS5768N—155的数据表明，当坯料减壁率增大时，壁厚公差一般是缩小的，但在某一确定的减壁率，随着达到这一减壁率所需的旋压次数的增加，壁厚公差也增大。铝合金AMS 4080，低合金钢AMS6302和不锈钢AMS5645的数据很少，而且很不规则，对这些数据可以作不同的解释。因此，在图形中都用点线表示，没有把它们连成平滑的曲线。

各园筒体旋压过程中，有的经过中间退火，有的没有，它们的壁厚公差没有重大区别。

k) 正旋对旋压园筒体壁厚公差的影响

图103—107中包含正旋园筒体的尺寸数据。AMS6302和AMS5645园筒体的壁厚公差随着减壁率的增大而增大。AMS5667和AMS5768园筒体，当减壁率在20%以上时有上述趋势。减壁率在20%以下时，随着减壁率的增加，壁厚公差趋向稍稍缩小。不过后一趋势不像前一趋势那样稳定。

以上几种材料的园筒体的壁厚公差还随着坯料壁厚的增大而增大。不过AMS 4080是个例外。在所有例子中，正旋园筒体的壁厚公差都比反旋的大得多。

1) 坯料温度对旋压园筒体壁厚公差的影响

AMS6302低合金钢坯料的数据表示于图108。不出所料，在 315°C 时旋压的园筒体的壁厚公差是室温下旋压时的二倍。我们认为，这种情况主要由二方面造成：一方面，用二个丙烷——空气燃烧器加热时，芯模受热不均匀；因此，另一方面必然是芯模与滚轮之间的间隙的变化。

2) 剪切旋压参数对旋压园筒体内径公差的影响

α) 一次减壁率对旋压园筒体内径公差的影响

图109—121和124—128表示一次反旋园筒体的减壁率与内径公差之间的关系。从图形看来,减壁率对内径公差的影响有二种情况:从一次减壁率的最低数值起,到将近30%这个范围内,当减壁率增大时,园筒体的内径公差大致保持不变,或实际有所缩小。当减壁率大于30%时,内径公差也增大,其增量也随着减壁率的增大而上升。在内径公差迅速变化的区域以外,存在一个最佳减壁率,因此,对于园筒体的一次旋压来说,减壁率显然应保持一个最小值。可是,这样一种限制就要求人们使用比较长的坯料,当然费用也就更大了。看来,这个问题只能通过多次旋压来解决,而把每次的减壁率限制在30%左右。同时注意选择最佳进给和转速(参看ⅢE2d)。

b) 坯料壁厚对旋压园筒体内径公差的影响

如图109—113所示,坯料壁厚与旋压园筒体的内径公差没有关系。粗看起来,AMS 5667园筒体的数据似乎是个例外,可是,数据那样分散,这就足以说明,这条曲线的正确性是可疑的了。

c) 坯料直径对旋压园筒体内径公差的影响

图114—116的数据说明,在任何给定的减壁率,旋压园筒体的内径公差都随着园筒体直径的增大而增大。由于数据不足,旋压园筒体的内径公差和直径的定量关系尚未能确定。

d) 滚轮纵向进给对旋压园筒体内径公差的影响

图117—123表示园筒体内径公差与滚轮纵向进给的关系。研究滚轮纵向进给对园筒体内径公差的影响的初期试验中,决定在整个减壁率范围内用三个进给值对旋压园筒体的内径公差作图,结果如图117—121所示。这些图形表明,并非所有关于进给对内径公差的影响的结论都能在图形上得出。唯有AMS4080铝合金和AMS6302低合金钢例外。它们的内径公差在很大减壁率范围内随着进给的提高而增大。

由于操作特性的关系,对每个减壁率都可能存在一个最佳的(速度/进给)比,这种看法似乎是合乎逻辑的。如果真的如此,那末以内径公差对减壁率作图时,滚轮进给的影响就不明显了。因此,余下的AMS6302低合金钢和AMS5645不锈钢坯料是在减壁率保持不变(40%)的情况下,在整个滚轮进给范围内进行旋压的,结果见图122—123。果然,在旋压AMS6302时,对于各个芯模转速,都有一个最佳(速度/进给)比。在此比值,内径公差最小。当进给高于和低于这个最佳值时,园筒体的内径公差就迅速增大。AMS 5645不锈钢与此不同,它没有一个与最小内径公差相适应的最佳(速度/进给)比,相反,它的内径公差在整个进给范围内都是随着进给的增加而增大的。

由于坯料直径和旋压机芯模转速的限制,我们这些试验中,未能提高芯模速度。不过,在本计划以外完成的Inco300M低合金钢的试验(见附录A)已经证明上述趋势。这些试验是在下述条件下进行的:减壁率54%,芯模速度130—282米/分,滚轮进给0.02—0.7mm/转。在这个试验中,内径公差最小时的最佳(速度/进给)比表现得比图122明显得多了。

由于没有更多的坯料可供旋压,因此在减壁率不变时,内径公差与进给的关系的曲线中,有关AMS4080, AMS5667和AMS5768的数据只好告缺。

e) 芯模速度对旋压园筒体内径公差的影响

有关这一操作参数影响的数据，表示在图124—128和122—123中。从这些图中看不出芯模速度对园筒体的内径公差有什么影响。不过，要记住，在任何给定的减壁率和芯模速度，都存在一个与最小内径公差相适应的最佳（速度/进给）比，它对内径公差的影响很大，要注意调整，请看附录A。

f)（滚轮压下/滚轮台阶）比对旋压园筒体内径公差的影响

图129—131表示这些数据。

当此比值从1.0降到0.5时，AMS6302低合金钢和AMS5645不锈钢园筒体的内径公差 不受此比值的影响。在此相同的情况下，AMS4080铝合金园筒体的内径公差逐渐增大。我们将在后面说明，当滚轮接触面前面翻出粗边并在滚轮鼻尖下形成反常的金属流动时，上述影响是很明显的。

这一影响对于AMS6302和AMS5645园筒体剪切旋压的实际意义在于，可以使用减壁范围大的滚轮，从而使它的压下降低到滚轮台阶的50%。这样，自然就可以减少 储备 滚轮，而且工具费用也大大节约了。不过在旋压软性金属如铝合金时，由于内径公差要求较严，以上好处就没有了。

g) 滚轮接触角对旋压园筒体内径公差的影响

说明滚轮接触角对园筒体公差的影响的数据表示在图132—134。滚轮接触角 对 AMS 6302低合金钢园筒体的内径公差看来没有任何影响。但是，AMS4080铝合金和AMS 5645 不锈钢园筒体则不同，它们的内径公差在滚轮接触角30°时最小，这种差别的原因不清楚。

h) 滚轮压光带宽度对旋压园筒体内径公差的影响

本试验中有关这一部份的数据用图135—137表示。点数不多而且分散，因而从这些数据得出的结论是可疑的。但是，压光带宽度降到1.1mm以下时，AMS4080铝合金和 AMS 6302低合金钢园筒体的内径公差却明显也增大了；大于这一最小值时，压光带宽度对内径公差没有影响。另一方面，AMS5645不锈钢园筒体的内径公差在压光带宽度1.1mm 时 最小，大于或小于这个宽度，内径公差都增大，这些趋势的原因不清楚。

i) 滚轮鼻尖半径对旋压园筒体内径公差的影响

有关数据表示在图138—140。

和前一节一样，关于园筒体内径公差和滚轮鼻尖半径的关系的数据很分散，因此，难以从中引出任何正确的结论。通过各点可以画成曲线，但是，似乎有更多的数据将说明滚轮鼻尖半径并不影响园筒体的内径公差，而且，在整个滚轮鼻尖半径范围内，可以把所画曲线看作是水平的直线。

j) 旋压次数对旋压园筒体内径公差的影响

旋压次数对园筒体内径公差的影响的数据表示于图141—149。经过一次或几次反旋而成的这些园筒体，它们的内径公差都随减壁率的增加而增大；而与达到这些减壁率所需的旋压次数无关。当减壁率低于最佳值时，随着减壁率的上升，内径公差保持不变或减小，这种趋势在多次旋压时表现得不像一次旋压那样明显（参看Ⅲ、E 2 a）。这种情况的一个明显原因就是，多次旋压的总减壁率总是大于最佳值而在较高的水平上。

粗看起来，多次旋压的数据似乎说明，以多次旋压代替一次旋压来缩小内径公差，收效甚微。因为园筒体的内径公差似乎主要决定于减壁率，而与达到这一减壁率所用的旋压次数无关。然而，在说明这些数据时，要注意这样一点：多次旋压所用的各次滚轮压下量

是保持不变的, 这个方法是任意选择的。根据Ⅲ E2a所述数据看来, 可以确信, 虽然内径公差随着坯料减壁率的增加而增大, 但是只要在每次旋压时选用比较小的滚轮压下量, 就可以把内径公差缩小。因此, 每次旋压都应保持最佳减壁率, 即30%左右。这样, 内径公差就可能降到最小。并能提供一个用既短又便宜的坯料生产内径公差相当小的长圆筒体的方法。

图141—144和图145—148表示多次旋压对内径公差的影响。其中有的是经过中间退火的, 有的没有。比较起来, 在退火对内径公差的影响方面, 这二组曲线没有重大差别。再比较这二组数据, 可以看到, AMS4080铝合金的减壁率在有中间退火时只达到60%; 而在没有中间退火时, 都高达80%。这种现象的原因是: 减壁率很高时, 减壁作用很激烈。为消除冷加工强化效应而进行的退火, 此时促使圆筒体的金属在滚轮前面堆积, 因而使第四次和最后一次旋压无法进行。这种情况表示在图246, 这一组曲线中缺少AMS5768圆筒体不经中间退火进行多次旋压时与内径公差的关系的数据。因为这种材料缺乏足够的延性, 减壁率要在50%以上, 不经过中间退火是不行的。

k) 正旋对旋压圆筒体内径公差的影响

图150—154包含正旋圆筒体的尺寸数据。如同一次反旋圆筒体那样(参看Ⅲ、E、2a), 坯料减壁率增大时, 内径公差也增大。不过有一点与反旋圆筒体不同, 当减壁率小于某一数值时, 反旋圆筒体的内径公差随着减壁率的增大而保持不变或缩小, 正旋圆筒体没有这种趋势。

除了少数例外, 用厚壁坯料旋压的圆筒体的内径公差总是比那些用较薄的坯料旋压的圆筒体的大。

反旋和正旋圆筒体之间的最显著的差别是: 后者的内径公差比前者大得多。我们认为, 用旋压方法加工圆筒体时, 如果内径公差要求很小, 则用反旋比较合适。

l) 坯料温度对旋压圆筒体内径公差的影响

这些数据表示在图155中。AMS6302低合金钢坯料在315℃旋压, 虽然数据很少, 不过已可以看出对内径公差的影响比较小。

3) 旋压参数对旋压圆筒体内径平均增量的影响

a) 一次减壁率对旋压圆筒体内径平均增量的影响

说明这一影响的数据表示于图156—168和图171—175。与壁厚公差及内径公差一样, 旋压圆筒体的内径平均增量随着坯料减壁率的增大而增加。除了AMS5768圆筒体以外, 内径平均增量在低减壁率范围内随着减壁率的增加而缓慢地上升; 到中减壁率, 通常是30—40%, 出现一个突变。这说明减壁率继续增加时, 内径增量将急剧地增大。

对于具有壁厚不等的相邻部分的圆筒体来说, 这一点很重要。很明显, 由一个等厚的坯料旋制的圆筒体, 它的厚壁和薄壁部分将相应地具有各不相同的较小的和较大的内径, 为了缩小旋压圆筒体的薄壁和厚壁部分的内径差异, 所用坯料应按下述要求设计: 要使它的薄壁部分和厚壁部分的减壁率都比较低, 即30%左右。在减壁率比较小时, 对同一圆筒体的各部分应用不同的减壁率, 这样产生的内径增量的差异就相当小了。要压低减壁率, 就必须用长的成本高的坯料, 因此多次旋压就成为更实用的方法了。用这个方法就可以用比较短的坯料, 经过头几次旋压先做成一个壁厚均匀的圆筒体, 使其壁厚与成品的最厚部分相等。在最后一次旋压才将坯料旋到成品圆筒体的最薄部分。用这个方法, 第一次和最

后一次减壁率都比较小，因此，可将成品园筒体的厚薄二部分的内径增量的差缩到最小。

b) 坯料壁厚对旋压园筒体内径平均增量的影响

图156—160说明坯料壁厚对一次反旋压园筒体的内径平均增量的影响，除了AMS5667和AMS5768旋压园筒体中有些例外，一般最厚的坯料旋制的园筒体，它的内径增量也最大。

c) 坯料直径对旋压园筒体内径平均增量的影响

有关数据表示在图161—163。虽然数据不多，而且在AMS4080铝合金曲线中还有矛盾，但是，剪切旋压园筒体的内径平均增量，不管减壁率多大，基本上是与坯料直径成比例变化的。

d) 滚轮纵向进给对旋压园筒体内径平均增量的影响

滚轮纵向进给与内径平均增量的关系的数据表示在图164—170。这些图形中，把进给对内径增量的影响的数据用二种形式来表示。在图164至168中，用三个进给值，把这些数据画成内径增量与减壁率的关系曲线。在图169—170中，是用三个芯模速度，把数据画成内径增量与进给的关系曲线。当我们观察前一种方式表示的数据时，未能发现内径增量与进给的关系。因此，剩下的AMS6302低合金钢和AMS5645不锈钢坯料就在减壁率保持40%的情况下，在整个滚轮进给范围内进行旋压，AMS6302园筒体的尺寸数据（图169）说明，芯模速度不同时，有一个最佳的进给值，在这个最佳值，AMS6302低合金钢园筒体的内径增量最小。进给大于或小于这个最佳值时，内径平均增量都变大。

附录A所列本合同外的关于Inco300M低合金钢园筒体的数据说明，内径增量随着进给的增加而增加。所用操作条件如下：减壁率54%，芯模速度128—283米/分，进给0.025~0.7mm/转。

AMS5645不锈钢的情形如图170所示。它的内径平均增量也随着进给的增加而增加，但是增量不大。

如果有一个与最小内径增量相对应的最佳进给，它应该略低于0.1mm/转。但是，旋压机的进给最低是0.1mm/转，因此进给低于最佳值时的内径增量在图形中没有画出来。

由此可见，在各种旋压机操作中，必须使进给和芯模转速很好地配合，以便获得最佳的内径增量，并能同前面Ⅲ、E、2d所述的那样，使内径公差降到最小。

e) 芯模转速对旋压园筒体内径增量的影响

图171—175和图169—170表示芯模速度对内径平均增量的影响。在那些图形中，有的是固定芯模速度，以内径平均增量对减壁率作图，在这类图形中，看不出芯模速度与内径平均增量有什么关系。还有一些图形是固定芯模速度，以内径平均增量对进给作图，以此方式来表示芯模速度的影响，如图169—170所示。在最佳（速度/进给）比时，芯模速度越高，内径平均增量越小。附录A所列本合同外的关于300M低合金钢园筒体的数据也证明这一点。它的操作条件如下：减壁率54%，芯模速度128—283米/分，进给0.025—0.7mm/转。

图169的曲线和附录A的数据说明，提高转速时，为保持最佳（速度/进给）比，必须相应加大进给，结果园筒体将不是扩径而是缩径。虽然，本试验所用的坯料直径很小，容易提高芯模的表面速度，不过，大直径园筒体的生产经验也证明了这一点。

在生产壁厚不均匀的园筒体时，以上情况具有重大意义。此时，壁厚较薄部分与较厚

部分比较, 由于它的减壁率较高, 因而它的内径增量也比较大。由此可见, 只要在旋压薄壁部分时, 选用较高速度和相应的进给, 使它保持最佳(速度/进给)比, 这样, 就能使内径公差变小。对于园筒体的相邻部分, 即厚壁部分, 我们选用较低的速度并配合相应的进给, 使它保持最佳(速度/进给)比, 这样能稍稍增大它的内径, 或者细心选用一个速度或进给, 使它形成非最佳(速度/进给)比, 这样, 也能达到增大内径的目的, 结果, 整个园筒体的内径就变得比较均匀了。

f) (滚轮压下/滚轮台阶) 比对旋压园筒体内径平均增量的影响

图176—178表示(滚轮压下/滚轮台阶)比对园筒体内径平均增量的影响。当此比值在0.5以上时, 无论是AMS6302低合金钢或是AMS5645不锈钢园筒体, 对它们的内径平均增量都没有显著的影响。AMS4080铝合金园筒体的内径平均增量则随着这个比值从1.0降到0.5而逐渐增大。(滚轮压下/滚轮台阶)比对内径平均增量的影响不大。这种特性从以下观点看来是有利的, 那就是可以用一种对许多减壁率都适用的固定台阶的滚轮, 它的压下量可以降到台阶的50%, 结果, 工具费用就降低了。

g) 滚轮接触角对旋压园筒体内径增量的影响

滚轮接触角对旋压园筒体内径平均增量的影响的数据表示在图179—181。在我们所用的AMS4080、AMS6302、AMS5645这三种材料中, 滚轮接触角 30° 时, 园筒体的内径平均增量最小; 而且在 15° 或 45° 时, 内径平均增量就比较大。

h) 滚轮压光带宽度对旋压园筒体内径平均增量的影响

有关数据表示在图182—184。虽然通过图上各点已画出了曲线, 不过, 数据太少太分散, 还不足以表明明显的趋势。作者认为, 滚轮压光带宽度对于内径平均增量没有影响, 其他数据将说明在整个滚轮压光带范围内, 内径平均增量是不变的。

i) 滚轮鼻尖半径对旋压园筒体内径平均增量的影响

有关数据表示在图185—187。这些曲线表明, 当鼻尖半径1.9mm时, 内径平均增量最小; 鼻尖半径更小(1mm)或更大(2.5mm)时, 内径平均增量在各种场合都略有增大。这一影响, 虽然小, 都是令人惊奇的。因为滚轮鼻尖半径看来并非主要特性, 由于在三种材料中都出现相同的结果, 我们认为这个影响是不能忽视的。

j) 旋压次数对旋压园筒体内径平均增量的影响

旋压次数对内径平均增量的影响的数据表示在图188—196。

在任何减壁率, 园筒体的内径平均增量一般是随着达到这一减壁率所需的旋压次数的增加而增大。只有一次和两次旋压减壁率就提得相当高的少数情况例外。在这些实例中, 有一个交点, 在这点之上, 一次或两次旋压的园筒体的平均内径增量比旋压次数更多的即二次和三次的园筒体的平均内径增量要大。如果旋压次数更多, 是否常常遇到这种交点, 还不能肯定。

中间退火对园筒体平均内径增量的影响决定于园筒体的材料。对AMS4080铝合金来说, 经过中间退火的园筒体的平均内径增量要比未经中间退火的多次旋压园筒体的大。AMS6302合金钢园筒体恰恰相反, 中间退火却使它的平均内径增量缩小了。对于AMS5645和AMS5667二种园筒体, 中间退火没有影响。未退火的AMS6768园筒体则没有数据, 因为它不经过中间退火不可能减壁到50%以上。

k) 正旋对旋压园筒体平均内径增量的影响