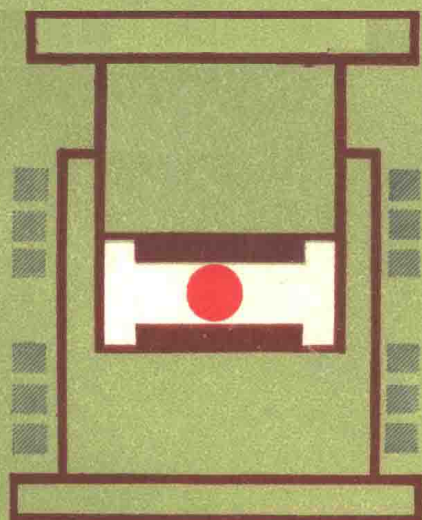


金属等温变形工艺

〔苏〕C.3.菲格林 等著

薛永春 译 刘建宇 校



国防工业出版社

金属等温变形工艺

〔苏〕 C.3.菲格林 等著

薛永春 译

刘建宇 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了金属压力加工的新方法——在加热到变形温度的模具内进行等温变形；阐明了工艺参数的计算方法、工艺特点、模具设计和设备选择的基本原则；列举了用各种不同结构材料制造形状复杂精密锻件的实例和等温变形过程的经济效果计算。本书可供从事金属压力加工专业的工程技术人员使用。

Изотермическое деформирование металлов

С. З. Фиглин 等

Москва «Машиностроение» 1978

*

金 属 等 温 变 形 工 艺

〔苏〕 С. З. 菲格林 等著

薛永春 译

刘建宇 校

*

国防工业出版社出版

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 8 202 千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷 印数：0,001—6,900册

统一书号：15034·2430 定价：1.05元

译者的话

本书系统地介绍了金属压力加工的新工艺——等温变形工艺（包括等温模锻和等温挤压）和超塑性理论，阐述了工艺参数的计算方法、工艺特点、模具设计和设备选择的基本原则，列举了用各种不同结构材料制造形状复杂精密锻件的实例和等温变形过程的经济效果计算。本书介绍的是近些年来国外发展的新工艺和新方法，参考价值较大，可供从事金属压力加工专业的工程技术人员、科研人员和高等院校师生参考使用。

在翻译过程中，将原书中明显的谬误作了修正和注释，在文字上力求通俗易懂，但因译者水平有限，书中错误和缺点在所难免，请读者批评指正。

序 言

金属热变形过程的成功与否，与正确选择和遵守变形热力规范（即变形温度、变形速度和变形程度等因素）有关。通常在冷模或稍加预热模内变形时，要保持最佳的变形热力规范是不可能的，因为热毛坯从炉中移到设备装入模内进行变形时必然有些冷却。毛坯变冷后，所锻金属的变形抗力、变形力和变形功都会增加，于是产生不均匀的温度场，使锻件的强度性能变得不均匀，并使变形金属的塑性降低。毛坯的表面积与体积之比越大，冷却的程度亦越大。模锻带有宽薄腹板和高窄肋条的锻件时，遇到了极大的困难。毛坯变冷能明显地改变挤压金属的流动特性，并在挤压筒和挤压模夹角处形成不希望有的冷硬区。

为了防止或减少热毛坯的冷却就必须在模具的高速度运动下变形。然而，变形速度的提高缩短了软化过程的流动时间，增加了变形抗力。高速度变形的热效应局限于毛坯最大变形区，因此增加了金属流动的不均匀性。金属和模具相接触处的热传导使模具表面温度升高，从而降低了模具的耐用性。

为了补偿毛坯的温降，把它加热到超过变形所要求的温度。这样，就加剧了金属和它周围介质的作用，于是生成氧化皮，使表面层的合金元素贫化，有害杂质渗入表面层中。

现代机器制造业中使用得越来越广的高合金钢和合金在热变形时保持其毛坯的温度是非常重要的。钛合金、镍基高温合金和许多高合金钢的特点是变形温度范围窄，塑性低于传统的结构材料，因此以普通热压力加工方法把它们加工成质量高而成本低的锻件是困难的，甚至是不可能的。

毛坯保温的办法是预热锻模；加涂玻璃或金属涂层；用专门

保温箱把毛坯从炉中移到压力机上；把加热器装在模具装置上。防止热毛坯传热的最简单而有效的方法是给模具直接加热。提高模具的加热温度，降低变形力，增加变形的均匀性，金属就容易流入狭窄的模腔内。模锻或挤压钛合金和高温合金时，必须把模具加热到 $200\sim 480^{\circ}\text{C}$ 。

最佳的变形条件是把模具加热到变形温度。此时，热毛坯在整个变形过程中不会冷却。这种变形条件可以看作是近似等温的。轻合金（如铝合金）的这类热变形条件早已熟知。在这种情况下，应把模具加热到 450°C 以下。

用作高温下工作的模具材料——新的高温合金的研制成功，使金属高温等温变形的实现成为可能。等温变形工艺是苏联和其他国家在六十年代同时开始研究和实验的。1969 年在美国拉斯-佛加斯城召开了第二届航空冶金师工艺会议，在会上把钛合金和超高强度钢的等温模锻列入了金属压力加工最有展望的新工艺之中。

金属等温变形比其它加工方法优越，其详细情况见第一章第三节。等温条件扩大了热变形的可能性。

无模锻斜度和少切削余量的复杂锻件的精密模锻工艺得到了推广和应用。棒材无挤压残料的穿通挤压（сквозное прессование）法也获得了良好的结果。此外，还有初露锋芒的新工艺——熔融盐、玻璃或金属的热静液挤压和模锻用的《超塑性》效应等方法。

本书包括作者自己的理论和实验研究成果、生产数据和国外研究的成果。金属高温等温变形工艺论述得这样详细还是第一次。作者对于那些对本书提出了改进意见的专家们表示感谢。

目 录

第一章 等温变形的实质与可能	1
1. 常规热变形方法的不足	1
2. 毛坯在变形过程中的保温方法	8
3. 等温变形方法的实质与可能性	15
第二章 等温变形用的设备	24
1. 锻模加热装置	24
2. 设备	46
3. 模具	52
第三章 等温条件下的金属可变形性	60
1. 变形抗力	60
2. 塑性	79
第四章 毛坯表面的润滑和保护	85
1. 等温模锻和挤压用的润滑剂	85
2. 玻璃润滑剂的防护性能	97
3. 有关玻璃润滑剂的应用工艺问题	103
第五章 模锻	112
1. 工艺参数计算	112
2. 开式模模锻的某些工艺过程	156
3. 无毛边模锻	176
第六章 挤压	187
1. 金属流动的特点	187
2. 工艺参数计算	192
3. 某些工艺过程	225
第七章 等温变形过程的技术-经济指标和劳动保险	237
1. 技术-经济指标	237
2. 劳动保险	243
参考文献	246

第一章 等温变形的实质与可能

1. 常规热变形方法的不足

热模锻时，多数金属随加热温度升高而提高塑性，降低变形抗力。此时，因为模具的预热温度较低，所以它的强度相当高。加热和模锻温度取决于多种因素，而且主要决定于变形温度范围。模具预热温度取决于模具材料的最佳综合性能（硬度、冲击韧性和温度稳定性等）。模具与毛坯的温度差能引起不良的现象，即毛坯在变形当中变冷或者模具受热。

在规定变形温度范围时，必须考虑到毛坯从加热炉内移到模锻装置上以及在变形过程中的变冷因素。例如直径 20 毫米的钢坯，加热到 1300°C ，从加热炉内移到压力机或锻锤上，在空气中的平均温降为 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。模锻件在模锻过程中的冷却程度与模锻件的形状、尺寸以及模锻道次有关。碳素钢和低碳钢的温降范围为 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ ，某些高合金钢的温降范围不超过 300°C ，而钛合金的温降范围为 $50\sim 250^{\circ}\text{C}$ 。所以加工道次多，会给毛坯带来补充加热，这样提高了加工费用，降低了模锻件质量。

由于上述原因使毛坯变冷，因此加工时必须把毛坯加热到超过实际加工所需要的温度，这样就得多消耗电，增加毛坯的加热时间、轮廓尺寸和加热炉的成本，同时使金属组织变坏，塑性和强度性能降低，锻件表面的氧化层、脱碳层或缺陷层加厚。当加热温度由 1150°C 提高到 1200°C 时，碳素钢的晶粒长大到 1.5 倍，铬镍钢的晶粒长大到 6 倍。从 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ 开始加热，钢的氧化速度急剧增加。如果取这个温度的氧化速度为 1，则 1000°C 时为 2， 1200°C 时为 5， 1300°C 时为 7。

将钛合金的加热温度由 950°C 提高到 1200°C ，晶粒的平均直

径由 0.06 增至 0.8 毫米。

当提高钛合金的加热温度， α 缺陷层迅速加厚：850°C 保温 5 分钟为 0.005 毫米；950°C 为 0.025 毫米；1000°C 为 0.05 毫米和 1200°C 为 0.11 毫米^[40]。

毛坯与冷模接触时的迅速变冷是大大增加变形力的原因之一，特别在生产表面积与体积比大的薄壁锻件时更是如此，在毛坯冷却的同时，降低了金属的塑性。变形力的增加要求增设大功率的设备。这样，由于模具的弹性变形和锻模的不稳定而降低了锻件的精度。锻件较薄部位的冷却给充填模膛带来了困难，因此在个别情况下不得不放大余量。例如在钛合金锻件上冲盲孔时，连皮的体积为冲孔体积的 10~20%，所以钛合金锻件的肋高与肋厚之比不得大于 10^[8]。与冷模相接触的钢锻坯的表面温度为 500~750°C。在此温度下要获得薄壁的钢锻件是极为困难的。

在冷模或稍加预热模内进行模锻时，毛坯中产生不均匀的温度场，从而形成了难变形区或局部变形区。将直径和高度均为 300 毫米的圆柱形毛坯放在两个没有润滑的粗糙表面的锤头之间，以相对变形量为 50% 和变形速度 15 毫米/秒进行镦粗，其接触面（整个接触面是一个粘附区）的温度要比毛坯中心多降 300°C。全部镦粗的时间为 33 秒，经过 5 秒钟的镦粗后，距接触面 10 毫米深处的毛坯温度已降到 880°C，而毛坯中心层的温度却为 1110°C^[56]。

尤其在模锻钛合金时，温度场显得更加不均匀，因为钛合金的导热性仅为钢的 1/5~1/6。由于金属的冷却及其难变形的结果，沿锻件周围形成机械性能较低的粗晶环^[8]。挤压变形的不均匀性有时会引起挤压件表面的破裂。镦粗时温度场的不均匀使锻件形成“鼓肚”（бочкообразность）。

在压力机的同一条件下镦粗 BT 3-1 钛合金试样和 CT 3 钢试样所得的鼓肚尺寸和形状是不一样的。钛合金试样的局部展览表现得很明显，同时钛合金试样的最大直径也显得较大。与模具

相接触的未变形区的深度也比钢试样大。用两块冷平模以 0.05 s^{-1} 的应变速率来锻造钛合金毛坯时, 1000°C 的毛坯表面温度, 在 10 秒内降至 890°C , 而中心降至 990°C 。

挤压钛合金时, 金属流动的不均匀是与热毛坯出炉后装入挤压筒和在挤压过程中激冷有关。毛坯在挤压过程中的温度场越不均匀, 则毛坯在炉内的加热温度就需越高, 因为在高温下热量散得快。图 1 所示的是用平模挤压的带有坐标网格的试样, 其挤压比

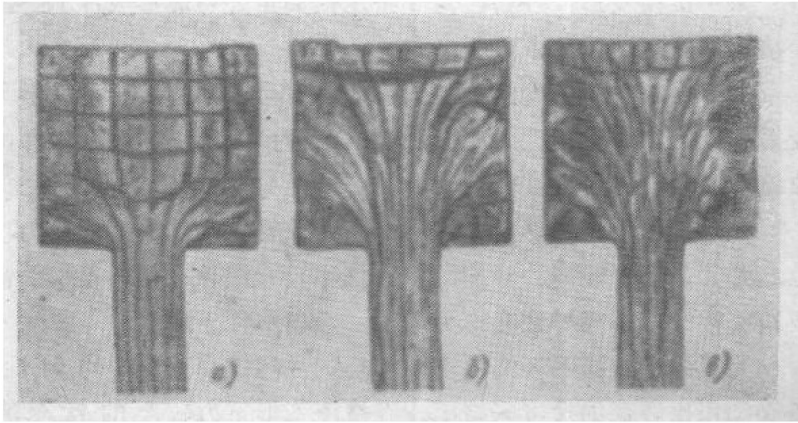


图 1 挤压钛合金时金属的流动特征⁽¹⁰⁾;

a— 850°C , 含10%石墨+10%膨润土+10%二硫化钼的滑油润滑剂; б— 950°C , 含10%石墨的滑油润滑剂; в— 1050°C , 含10%石墨的滑油润滑剂。

$\lambda \approx 10$ 。BT1 钛合金毛坯的加热温度为 $850 \sim 1080^\circ\text{C}$, OT4 钛合金毛坯的加热温度为 $900 \sim 1000^\circ\text{C}$ 和 BT3-1 钛合金毛坯的加热温度为 $950 \sim 1100^\circ\text{C}$, 挤压筒的加热温度为 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 。所采用的润滑剂是玻璃和含各种添加剂 (10 和 25% 片状石墨; 35% 膨润土; 35% 二硫化钼; 10% 石墨+10% 膨润土+10% 二硫化钼等) 的机器滑油。

业已确定, 滑油润滑剂和含添加剂 (10% 石墨) 的润滑剂, 不能保证金属的均匀流动。

当采用其它滑油润滑剂时, 按 С. И. 古布金 (Губкин) 的分类第一类润滑油的流动性, 只可用在 875°C 和 875°C 以下, 也就

是用于 α 区(图1a)。金属流动的不均匀性随毛坯加热温度的升高而增大(二类流动性,图1b和图1c)。在挤压OT4和BT3-1钛合金时也发现相同的规律^[10]。

由于金属流动的极不均匀及塑性差的原因,在挤压毛坯中常出现裂纹、破裂、缩孔和其它缺陷等。慢速挤压因冷却而降低金属表层的塑性。高速挤压则由于变形区发生高温相变而降低金属塑性。

采用冷模变形,在挤压筒和挤压模夹角处可能形成冷硬区,使挤压件的表面质量下降。

由于毛坯在锻模内的冷却,终锻温度是不同的,于是变形力变得不稳定,并由于设备构件和模具的弹性变形不同以及锻件的收缩程度使锻件的精度降低了。

在毛坯和锻模加热温度的不同,无法得到最佳的变形热力规范,尤其是变形速度。锻件,特别是小尺寸锻件冷却得很快,需要快速模锻,结果导致变形力增加,金属塑性下降。

为了减少挤压毛坯温度场的不均匀性和提高变形的均匀性,就必须用比较高的速度来挤压。在挤压变形抗力较大的钛合金时,会散发出大量的热。由于钛合金的导热性低,变形过程接近于绝热过程。

变形热效应对制件的组织和性能有不良的影响。在应变速率 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{秒}^{-1}$ 的情况下,会出现减少变形力的超塑性效应。如取毛坯厚度为10毫米,用能出现超塑性状态的模具在运动速度 $0.001 \sim 0.1 \text{毫米/秒}$ 下锻粗它,则整个模锻周期仅为几分钟。这种工艺过程不仅用常规方法不能实现,即使用无挤压残料的穿通挤压法以及变形时脉冲加压或毛坯在压力下保压以减小模具的单位压力和提高变形均匀性的办法也不能达到。

用冷模模锻时,润滑剂是在不稳定的温度条件下工作的,因此用比传统润滑剂(例如石墨基的)更具有一系列工艺和使用性能优点的玻璃润滑剂、珐琅及其他润滑剂进行工作是相当困难的。

从锻模内取出成品锻件后，残余玻璃润滑剂凝固在模膛内，有时候密密麻麻地粘在模膛的表面上，对下一模锻周期起着磨料的作用，导致模具遭到迅速破坏。凝结在挤压模上的润滑剂能使挤压铜坯、高温合金和钛合金半成品表面状态变坏。

玻璃润滑剂的粘度与温度有关，因此很难选出这样的成分，使玻璃润滑剂在变形时一定能够保证得到最小的摩擦系数。结果在模具与毛坯接触面处形成干摩擦区，从而使毛坯金属与模具材料产生沾粘（схватывание）。这种沾粘现象特别在变形金属沿模具激烈滑动即挤压时，显得更为突出。有些金属，如钛合金具有很高的沾粘倾向。提高挤压时的变形量，就会提高变形力和静液压力，这样就大大地促进了沾粘性。挤压温度的提高，是由于变形热效应引起的，也能产生沾粘性。挤压时在挤压筒和挤压模之间出现未变形区，即在挤压开始阶段模具与未氧化的新金属相接触时沾粘性也会增加^[8]。

沾粘能使挤压件的表面质量变坏，并缩短模具的寿命。因此，与铝合金表面上的缺陷比较，允许钛合金挤压件表面上的缺陷深一些。对钛合金棒材和型材的尺寸规定较高的公差，例如直径30毫米的钛合金棒材的横向尺寸公差为 ± 2 毫米。

热模锻通常采用5XHM、3X2BΦ、4X5B-2ΦC合金钢和退火温度不高于620°C的其它钢种制造的模具。但是模膛的表面层有时热到700~800°C，如在高速锤上锻造时。则模膛的表面层能热至950°C。这会导致模膛部分，首先是凸起、棱角和穿孔针等部分退火和压伤。例如，穿3ИЛ-131汽车转向十字头销锻件用的穿孔器的寿命为400~500件。由于模具零件的迅速退火，不允许加工打圆角较小的锻件，同时也限制了穿孔的尺寸（例如，认为不适宜穿直径小于30毫米的孔）。

挤压钛合金用的模具寿命特别低。甚至3X2B8、4X2BC高质量工具钢及其它钢种均不适用于制造这种模具（寿命仅为1~2件）。P18高钨钢制造的模具，虽硬度较大，也只能挤压

3~5件。尽管用铸造高温合金ЖС6-К、Л-114制造模具能挤压钢型材120件，但是用作钛合金模具的效率不高。因此，成批生产采用5ХВБ、3Х2В8钢制造的挤压模，其工作表面上熔铸硬质合金。用这种挤压模能挤压20~30件BT1钛合金型材，15~20件BT3-1和BT5钛合金型材。有时采用BK-15、BK-20和BK-25硬质合金做镶块-挤压模，所得的结果也不错。用这种挤压模挤压钛合金圆形棒材可达45件。但上述材料对热冲击具有较高的敏感性和脆性，因此在热挤压的一般条件下使用不得超出实验的范围⁽¹⁰⁾。

由于热毛坯与模具表面接触，模具表面温度波动很大而出现引起模具磨损的烧损裂纹（разгарные трещины）。例如在高速锤上模锻钢毛坯时，模膛表面加热速度达20000~40000℃/秒，距模膛表面0.5毫米深处的加热速度为700~1500℃/秒，而在距模膛表面3毫米深处的加热速度为80~100℃/秒。经过第一批模锻后，就可看到模膛的烧损裂纹。这些裂纹的扩展速度很快，导致锻模迅速破坏（有时甚至崩溃）。

分析热模锻用的模具寿命表明，热模锻曲柄压力机上模具磨损所具有的形状是烧损裂纹和模膛部分轻度的压伤，锤上锻模磨损的形状是压伤。

热模锻用的锻模在工作过程中承受沿截面温度场的不均匀性和工作载荷所引起的应力。作用在热模锻曲柄压力机模膛较薄表面层上的温度应力一般大于工作载荷所引起的应力。

在变形时间（0.1~0.2秒）内，温度波被传送到锻模深处1.5~2毫米，并迅速消失。特别在锻件金属流动性最强的地方，发现沿锻模截面的温度梯度为最大。在变形过程中温度升至780~880℃的模膛表面层，在挤压变形条件下极力扩大，并受压应力作用。处在深处的受热较轻的层受拉应力作用。在采用冷却表面的润滑剂时，应力符号改变，即锻模表面层受拉应力作用，而表面层下面的一层受压应力作用。如果在加热时模具表面层受

压塑性变形，则冷却时就会产生上述的应力。在使用过程中，锻模局部体积的塑性变形是逐步积累起来的。锻模破坏，一般是模具材料达到某一临界变形量时才开始的。锻模寿命随弹塑性变形振幅的减小而延长。

锻模破坏通常在模膛表面上形成小的和显微的裂纹网，而这些裂纹多半垂直于最大的温度应力和随后扩展的烧损裂纹。分析表明：模膛表面上的烧损裂纹主要是由温度应力引起的。模膛的硬度、合金化程度和加工光洁度对裂纹的形成有轻度的影响。

在模锻操作过程中顶出机构上出现凹陷和其它毛病时，锻件粘贴在模膛上是非常危险的。随毛坯与锻模接触的时间延长，传递给锻模的热量也在增加。短时间加热（甚至到 $900 \sim 980^{\circ}\text{C}$ ），锻模表面的薄层的组织来不及发生变化，因此锻模仍然保持原来的硬度。如果锻件粘在模膛内，则向锻模传热的时间要比原来增加 10 倍，这样模具材料逐步发生组织转变，从而降低了锻模金属的硬度。

烧损裂纹的产生是热挤压杆（特别是氮化挤压杆）破坏的主要原因。氮化的 3 X 2B8 钢挤压杆经过 $m = 1 \sim 25$ 次后出现第一批裂纹（ m ——热交变循环次数）。这些裂纹开始集中出现在离工作端的轴心线附近。已经在 $m \approx 100$ 次或更早时（ $m \approx 25$ 次），在挤压杆端头上就出现了径向裂纹，而在轴向部位上形成了裂纹网，裂纹的深度不超过 0.3 毫米。未氮化的挤压杆经过 $m \approx 300 \sim 400$ 次之后，才发现有烧损裂纹。未氮化接触层的强烈软化体基中所出现的裂纹分支网，也能使模膛发生压伤。

传播在模具深处裂纹交界上的氧化过程，对锻模的工作性能有影响。裂纹起了把氧化剂传送到模具深处的通道作用。氧化过程也蔓延到与裂纹相邻的部位，这就减小了接触部位对塑性移动和破坏的阻力^[45]。

在 BK20、BK25 及其它硬质合金锻模中发现烧损裂纹和随后的表面剥落。

2. 毛坯在变形过程中的保温方法

、 毛坯从炉内送往变形设备和在模锻过程中采用保温涂层，或者升高锻模预热温度来保持模锻毛坯的温度，这样就可以提高模锻工艺的效率。

锻造时金属的热绝缘能减慢待锻的另一部分毛坯的冷却，同时防止毛坯的锻过部分在锻其它部分时不至于冷至低于所容许的范围。热绝缘对锻造大型长轴式合金钢锻件效果最好。热绝缘采用石棉包层（镶钢板的石棉布）或悬挂式石棉外壳，它能把金属冷却速度减少到 66~20%。模锻金属的温度越低，毛坯和外壳之间的空隙越小，热绝缘的效果越高。

毛坯在变形过程中的保温方法之一是在它表面上涂玻璃、石墨基的保温润滑层。为了减少 T 形钢型材在压力为 7.5 兆牛顿的水压机上挤压时所消耗的热量，将直径 80 和长度 350 毫米的挤压坯装在保温金属套里加热并运送到水压机上，并把钻合金挤压筒和挤压模加热到 $450^{\circ}\text{C}^{[71]}$ 。

在挤压高温金属件时，采用加热到 $700\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 的钢垫或加热到 1500°C 的石墨垫能获得良好的结果。把这种垫圈放在挤压坯上以补偿挤压坯损耗的热量，并减少挤压力^[74]。

对于模锻变形温度范围窄的金属，保持毛坯的温度显得特别重要。例如在模锻铬镍钢坯时，可以用煤气灯在水压机上直接加热毛坯，并将锻模加热到 $500^{\circ}\text{C}^{[77]}$ 。在液态动力挤压高速切削钢钻坯时，将原始挤压坯装入石墨包套中，该包套不仅起润滑材料的作用而且也是良好的热绝缘。

研制了一种挤压工艺，使挤压坯的加热温度不均匀：轴心区的温度低于圆周区。因此，挤压坯圆周区的金属流动得快一些。这样就提高了变形的均匀性。

利用玻璃润滑剂进行热液体挤压时就可得到接近于等温的条件。此时，在挤压坯上涂一层厚 1~2 毫米的玻璃润滑剂，此后，

把挤压坯装在一个高温合金厚壁包套内，放到炉里加热至热挤压温度。为了减少热损耗，把挤压筒预热至 $400\sim 450^{\circ}\text{C}$ ，倒入液体（ $50\sim 70\%$ 沥青和 $30\sim 50\%$ 石墨），然后把带有熔化玻璃润滑剂和挤压坯的包套从炉里移到挤压筒里。该过程的持续时间为 $3\sim 5$ 秒，因此挤压坯的温度实际上是不变的。挤压筒和挤压模在热液体挤压之前，就用装在锻模内的工频感应器加热至 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，将液体倒入专用罐里加热至沸点。挤压坯可在挤压筒内用感应器加热。

有时用热液体挤压时，挤压坯的截面加热的不均匀能得到很好的效果。例如，用 70% 沥青、 20% 石墨和 10% 二硫化钼组成的液体挤压时，均匀加热到 1150°C 的ЖС6-КП合金挤压坯就会完全龟裂。在一个工艺周期时间（15秒）内，挤压坯的平均温度降至 1000°C ，而圆周层和中心层的温度差为 150°C 。这样大的温度差，对ЖС6-КП合金是不允许的。在强力加热时，挤压坯的圆周层温度过热 150°C ，在挤压坯截面的温度通过变形区时就可使挤压坯截面温度达到均匀化，从而即可得到高质量的棒材。

研究了一种用石墨粉电阻强力加热挤压坯的挤压方法。从加热装置中取出的挤压坯表面上留有一层厚 $5\sim 8$ 毫米的炽热烧结石墨粉。把带有这样一层石墨粉的挤压坯放入挤压筒里进行挤压。石墨粉层类似液介质，起着润滑剂的作用。用强力加热直径60毫米的ЖС6-КП合金挤压坯时，挤压坯的圆周层的温度要比其 1100°C 中心层的温度高出 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，这就使金属能够从加热到 400°C 的挤压筒中均匀地流出^[17]。

研究了一种把镍基合金挤压坯装在钢包套中并用润滑剂进行挤压的方法。采用 70% 沥青和 30% 石墨组成的润滑剂能保证挤压所需的单位压力为最小。与挤压坯一起挤压的包套具有均匀的厚度。如果包套与挤压坯贴得不紧，则包套留在挤压筒内继续起着它的作用，致使挤压筒的温度接近于变形金属的温度。

在变形低导热性合金时，采用玻璃保护涂层效果较好。

无保护层锻粗的试样比有保护层锻粗的试样有较大的鼓肚。试样的下端与冷模长时间的接触,使金属温度下降,于是没有涂层的试样下端就不能变形。有保护层锻粗的试样,几乎所有变形区都没有遇到困难,而且沿整个截面的组织都比较均匀。玻璃薄膜的绝热和润滑作用,可从 D_6/D_T (D_6 和 D_T 相应为试样的最大和最小直径) 与相对变形量 ψ (图 2) 的关系曲线中看出。

OT4-1 钛合金毛坯经过锻造后 (加热温度为 1000°C), 有保护涂层的锻件温度比没有保护涂层的锻件温度大约要高出 80°C [32]。采用玻璃润滑剂模锻零件, 特别是模锻类似叶片这样薄零件, 能够大大地降低模锻压力 [20]。

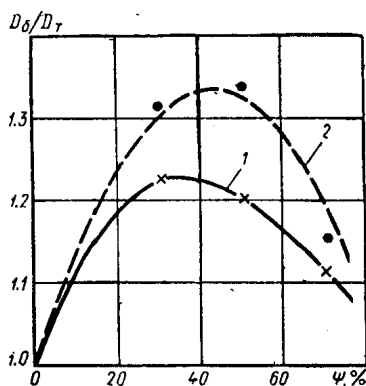


图 2 D_6/D_T 与变形量的关系 [32];

1—有保护涂层的; 2—无保护涂层的。

采用玻璃润滑剂挤压时, 挤压模受热较小。在挤压加热到 $1180\sim 1200^\circ\text{C}$ 的 Y8 和 X18H10 钢坯 (挤压筒直径 80 和 120 毫米、挤压比 7.1 和速度 200 毫米/秒) 时, 曾测量了挤压筒的锥形挤压模的温度 T_1 、挤压模锥体部分的温度 T_2 、由挤压模锥体过渡到模孔上的温度 T_3 、深入挤压模内部几毫米处的温度 T_4 。图 3 所列的是涂有润滑剂的各种不同方案的典型示波曲线。在挤压侧表面滚涂润滑剂和加润滑垫圈或者只加润滑垫圈的挤压坯时, 发现挤压模受热最小。

前两种挤压情况下所测得的温度是一样的 ($T_3=500^\circ\text{C}$)。挤压模表面特点和受热温度 T_1 和 T_2 也是相同的。如果只用挤压坯侧表面的一种润滑剂进行挤压, 则挤压模受热的情况就会有明显的变化。此时, 温度 $T_3=900^\circ\text{C}$, $T_1=680^\circ\text{C}$ 和 $T_2=650^\circ\text{C}$ 。不加润滑剂挤压时, 挤压模受热较小。这是因为在后两种情况下挤压时, 在挤压模上形成了阻止金属移动区。在不加润滑剂挤压时所