

绪 论

塑性加工是一种能耗高、载荷大的生产技术。随着塑性加工技术的发展,节能与省力已成为该技术创新的重要动力,从下面所列的近几十年来出现的部分成形新技术可以看出,它们主要是沿着节能省力的发展方向“应运而生”的。

1. 节能省力轧制技术

20 世纪中期,冶金厂的轧制是以铸锭为原料的,将铸锭经过加热后初轧,然后再轧制成材。初轧机采用一对直径约 1 200 mm 或更大的轧辊,进行可逆式轧制,其轧制力大,传动功率高,生产效率低。此后,轧制技术的不断创新主要是沿着节能省力的方向^[1]。

连铸连轧是轧钢生产中的一项重大技术革新,其特别突出的优点是节能和生产连续化。据统计,每吨钢的熔化需要消耗约 2 000~3 000 kW·h 的电能,钢锭与钢坯的加热能量折合成电能为每吨 400~700 kW·h,轧制时每吨耗电约 120~140 kW·h。采用连铸连轧技术不仅取消了轧制过程中钢锭和钢坯的加热工艺,还取消了大直径的初轧机,从而使轧制力下降很多,变形也很均匀。但是由于结晶的技术限制,1980 年以前所能获得的连续铸造钢坯厚度一般在 250 mm 左右,需要通过大量后续的热轧和冷轧才能获得 1 mm 左右厚的薄板。直到 1980 年,一种新的连续铸造工艺才使得连铸坯的厚度减小至 40~100 mm,从而缩短了整个热轧生产线。近年来,已将先连铸后连轧的技术改进为铸轧薄坯再进行轧制的形式^[2],即先通过边凝固边轧制得到约 1~3 mm 厚的铸轧坯,紧接

着再通过后续轧制过程成材，这样所需的总变形量可以大幅度地减小，后续轧制生产线可以得到大幅的简化。图 0-1 为不同厚度连铸坯的轧制生产线示意图，由该图可以看出采用铸轧薄坯法所需的能量仅为连铸坯法的 43%。

2. 大型模锻件省力均匀成形

在大型模锻件生产方面需要重型模锻液压机，前苏联在 1961—1962 年分别在古比雪夫等三个城市各建造了一台 3 万吨模锻液压机，1961 年在乌拉尔卡明斯克锻造厂又建立了一台世界上最大的 7.5 万吨模锻液压机^[3]，1967 年又为法国建造了一台 6.5 万吨模锻液压机。这些重型液压机主要是解决航空用大型模锻件的生产问题。

1967 年美国当时最大的模锻液压机为 5 万吨，航空界曾经提出建造 20 万吨大型模锻液压机的建议书，这在美国金属学会编的“Metals Handbook”^[4]中曾有生动的描述，建造大液压机是基于以下考虑：

- (1) 未来所使用的材料强度将会提高；
- (2) 锻件的尺寸精度提高，加工余量减少；
- (3) 锻件的尺寸将增大；
- (4) 为了减轻重量，锻件的结构要采用薄腹板窄高筋。

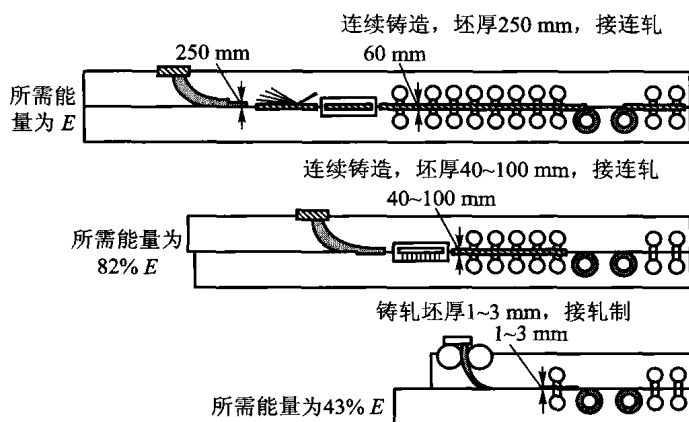


图 0-1 用不同厚度坯料轧制时的能耗对比

对于液压机，当时的设计遇到两个难以解决的问题^[5]：① 需要有足够数量的大液压缸以实现 20 万吨的总压力；② 要有足够大的横梁，其面积足以支撑数量众多的液压缸。在所有的设计方案中，横梁高度都相当于 10 层楼高，对于如此超大尺寸的横梁，只能采用板框式结构，构件的运输与现场的组装都是相当困难的，于是暂被搁置。有趣的是，此后的四五十年，上述国家并未建造更大吨位的模锻液压机，时至今日，欧洲的空客 A380 已经投入运营，美国的波音 787 也已试飞，美国、俄罗斯两国五代战机相继问世，为什么模锻件

的尺寸在增加,所用材料的高温变形抗力也大幅度地增加,而模锻液压机的吨位却未增加呢,原因是人们寻找到了降低变形所需载荷的新方法,这就是等温模锻与超塑性模锻。

俗话说“趁热打铁”,也就是说,即使工件的出炉温度很高,也要抓紧时间高温下成形,否则降温后变形抗力就很大。对于模锻,传统工艺是将模具加热到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而热工件进入模具必将迅速降温。对于薄腹板窄高筋锻件,温度势必大幅度下降,材料的流动应力也相应地迅速增加,同时由于贴近模具附近的金属温度低于其他部位,该处变形困难,所以从总体上看变形很不均匀。等温锻时,模具自身是带加热器的而且温度保持在锻造温度下,液压机横梁位移速度很低,有时甚至是一种保压成形,工件的流动应力很低,变形也很均匀。图 0-2 为等温锻造的工艺装备示意图。等温锻造的缺点是生产效率低,模具成本高,所以仅适用于小批量生产价值比较高的宇航用锻件,如航空发动机钛合金压气机盘、大型叶片、飞机结构件和粉末高温合金涡轮盘等。

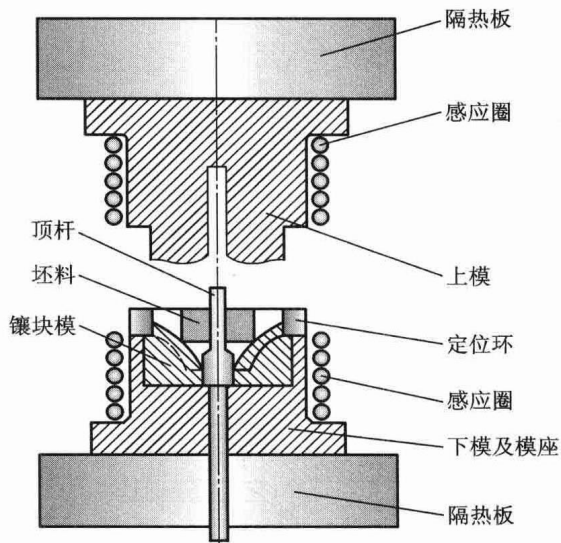


图 0-2 等温锻造的工艺装备示意图^[6]

所谓超塑性锻造,不仅模具具有加热与控温装置,还要求工件的晶粒非常细(一般小于 $10\text{ }\mu\text{m}$),上模的压下速度很慢,换算成应变速率应小于 0.01 s^{-1} ,温度控制也很严格。该工艺的优点是锻造力仅是常规锻造力的 $20\%\sim 30\%$,而且变形均匀,各处的组织与性能一致性好。为了获得超细晶粒,通常采用两种办法:① 形变与热处理;② 用液态金属喷雾法直接形成细小颗粒,然后通过热等静压制成坯料再进行超塑性锻造。20 世纪 70 年代美国成功地开发了粉末高温合金涡轮盘超塑性锻造工艺^[7],虽然材料制备工艺复杂,成本高,但产

品没有因为应用铸锭而引起严重偏析，并且组织性能均匀，受到军工部门的欢迎，于是 20 万吨模锻液压机建造的迫切性也就被淡化了。我国第一台 3 万吨模锻液压机在 1969 年投入运行，目前正在建造 8 万吨模锻液压机，至此我国已经步入大型模锻液压机吨位国际领先的行列，如果再配上省力成形的方法，我国将成为大型模锻件制造的强国。

3. 省力增量成形

所谓增量成形是以局部的微小成形(增量)累积起来完成整体变形，由于其瞬时作用面积小，变形力要比整体变形时小很多，旋压、摆动辗压和楔横轧都属于增量成形，以下以大型封头制造为例进行对比分析。

大型封头是用于锅炉和压力容器的重要部件，属于厚板成形。传统的成形方法是拉深法，如图 0-3 所示，在压力机的一次行程中完成对封头的球形底部及直边的制作，生产效率低，对于直径大于 3 m 的封头，热成形的载荷一般要大于 30 MN。

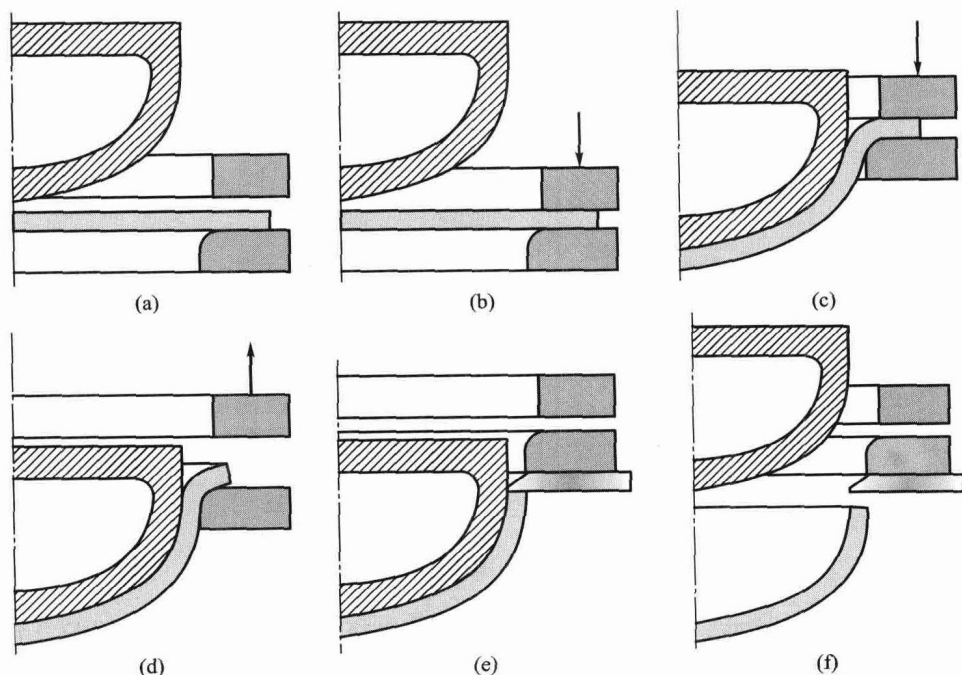


图 0-3 用拉深法制造封头的成形过程示意图^[8]

压鼓—翻边旋压是制造封头的省力成形方法，它是分两步的增量成形。第一步是在压鼓机上压出封头的球形底部，目前用 5 000 kN 可以压制直径为 6.5 m、厚度为 32 mm 的球形底部，如图 0-4 所示。上模作上下运动，下模固

定, 工件由操作机带动实现水平移动、升降和倾斜, 在不同位置时分别由起动机、垂直起动机和驱动辊带动工件旋转, 可压制工件的不同部位。第二步是将压鼓机上压出的球冠(对于椭圆形封头)移动到旋压翻边机(图 0-5a)上完成封头直边部分的成形。此时坯料由上顶块、下顶块压紧, 并且由成形辊带动其旋转, 成形辊的轮廓形状是按照封头口部形状(含直边)适当考虑厚板成形的弹复现象设计的。最后, 利用翻边旋轮边进给边提升式地增量成形, 完成直边部分的加工, 如图 0-5b 所示。

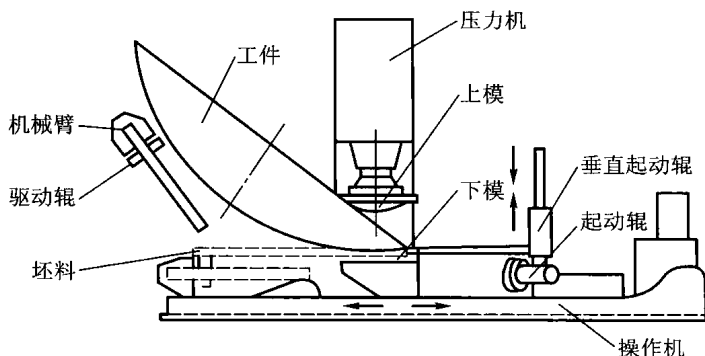


图 0-4 封头球形底部在压鼓机上增量成形的示意图^[8]

应该指出的是, 用增量成形法制造封头还有以下优点: ① 不需要加热; ② 不易形成起皱; ③ 不用拉深模具, 便于加工不同直径、不同厚度的产品。

4. 球形壳体省力成形

球形壳体由于其耐压能力比同直径及厚度的圆筒高一倍, 在压力容器中的应用较多。对于球形或近球形容器, 传统的制造方法是在压力机上用模具压制球瓣, 所用压力机的公称压力多在 15 MN 以上, 然后将瓣片组装焊接在一起, 构成球体。王仲仁发明的无模液压胀球法^[9]是一种不用模具、不用压力机制造球体的方法。该技术已在压力容器、球形水塔及大型建筑装饰等制品的建造中得到应用(详见 6.1 节)。图 0-6 为用此法制成的 200 m³ 液化气储罐, 材料为 16 MnR, 其直径为 7.1 m, 壁厚为 24 mm, 该液化气储罐已正常运行了 18 年。

以上仅举例说明了塑性加工领域近几十年来出现的新技术, 可以说省力成形是其共同的特点, 但是必须“另辟蹊径”, 才能有重大创新。

应该指出的是, 省力成形不一定是近均匀成形, 但可以肯定的是, 降低摩擦既可省力又可使变形均匀, 采用包套镦粗、包套挤压都是起既降低摩擦力又降低变形力的作用。这些在本书的相关章节中都有阐述。

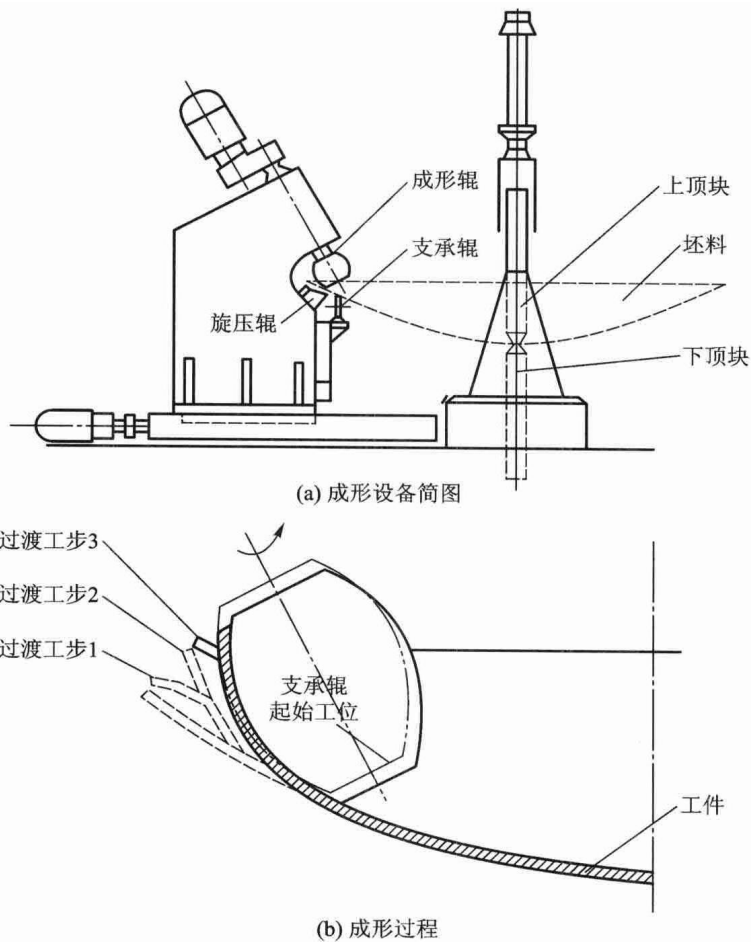


图 0—5 在旋压翻边机上成形封头直边部分的设备和成形过程示意图^[8]

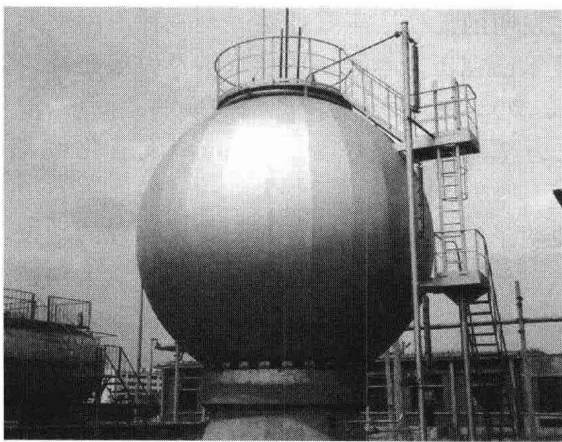


图 0—6 无模液压胀球法制成的 200 m³ 液化气储罐

参考文献

- [1] 王仲仁, 滕步刚, 汤泽军. 塑性加工技术新进展[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 108-112.
- [2] Kopp R. Innovations in metal forming in the world [C] // Proc. of 9th International Conference on Technology of Plasticity. Gyeongju, Korea, 2008.
- [3] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册 3: 锻压车间设备[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] ASM handbook committee. Metals handbook: Vol. 6 forging and casting[M]. 8th ed. Ohio: American Society for Metals, 1970.
- [5] Boulger F. W., Byzer T. C., Sabrof A. M. Requirements for a giant forging press [J]. Battelle Technical Review, 1967.
- [6] 中国锻压协会. 特种合金及其锻造[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [7] 阿尔坦. 现代锻压设备、材料和工艺[M]. 陆索, 译. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [8] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册 2: 冲压卷[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 王仲仁, 苑世剑, 曾元松. 无模胀球技术原理与应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35(6): 64-66.

第一章

塑性成形力学基础

1.1 塑性成形过程受力分析

塑性成形过程是利用被加工材料的塑性在一定的力的作用下进行的。显然,弄清楚受力情况对于正确设计模具、控制工件尺寸和保证内部质量具有重要意义。

塑性成形过程中对力的分析不能完全照搬理论力学及材料力学中所阐述的方法,因为塑性加工时,工件处于塑性变形状态,变形较大且有宏观流动。然而理论力学中力的平衡概念及材料力学中的截面法仍然适用。不过,由于塑性变形过程中变形体不断地产生新的表面,工件尺寸和形状变化剧烈,所以工具与工件间作用力的分布与传播不仅受到工具形状的影响,而且也受工件几何形状、尺寸的影响。另外,由于变形的不均匀性及变形产生的不同时性,工件的各相邻部分之间也存在内力约束。因此,塑性成形过程的受力分析比弹性力学要复杂得多。

在进行定量分析以前,本节先定性介绍塑性成形过程的受力分析要点,目的在于说明分析实际生产中力学问题的主要思路,侧重定性地说明问题。由于现有教材中尚未在这方面作系统的论述,且问题本身又是从解决大量实际问题过程中抽象而来,所以本节与其他章节不同,不是从公式推证着手,而是结合实例进行叙述并归纳,其目的不在于说明实例本身,而是动态地考虑和分析解决问题的方法,且特别注重与理论力学和材料力学的不同之处^[1]。

1.1.1 外力分析

外力是指外部施加在物体表面上的力。按照外力作用方向与物体表面的关系又可分为正压力、剪切力或摩擦力等。下面着重对正压力和摩擦力进行介绍。

1. 正压力

正压力是指工具与工件接触面的垂直作用力。但需要注意塑性变形过程中接触面的变化以及约束面上存在着的反压力。

图 1-1a 为反挤压杯形件的示意图。作用在冲头上的力为 P ，其方向为轴向，凹模的侧壁限制金属变形，给金属施加径向约束力 Q 。 Q 并不参与平衡外力 P ，但它是设计凹模的依据。还应说明的是合力的作用点有时是变化的。例如，当挤压毛坯两端面不平行时，在开始阶段，冲头只是单边先与坯料接触（如图 1-1b），这时工件作用在冲头上的力与冲头轴线不重合，将会引起冲头的偏载，并可能导致冲头弯曲或折断^[2]。所以，生产中常常在反挤压前采用顶镦粗平面工序。

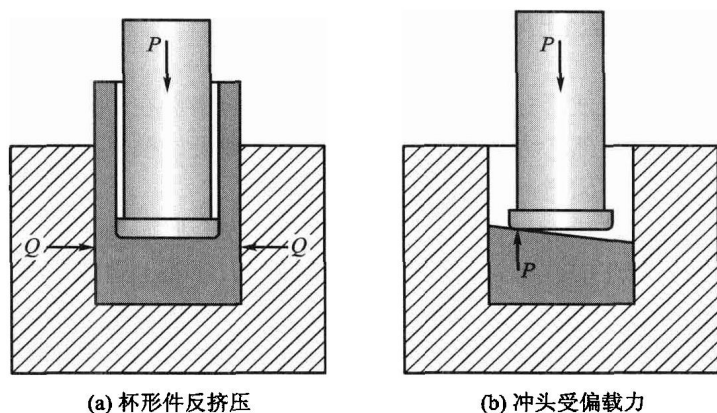


图 1-1 反挤压成形受力图

图 1-2 表示剪切过程。在开始阶段，上下剪刀压入坯料，由于作用在上下刃口上的力 P 不是在同一直线上（设两力作用线间距为 a ），所以形成力偶 Pa ，它使坯料旋转，继而形成上下两剪刀侧表面对坯料施加的一水平正压力 F （设两力作用线间距为 c ），产生力偶 Fc ，阻碍坯料转动。在平衡时，两个力偶应该满足以下关系：

$$Pa = Fc \quad (1-1)$$

如果设剪刀端面及侧面与坯料的接触面长度分别为 x 及 z ，并设端面与侧面上的平均单位力相等，则有

1.1 塑性成形过程受力分析

$$\frac{F}{P} = \frac{z}{x} = \operatorname{tg} \gamma \quad (1-2)$$

所以自由剪切时切头总是斜的，斜角为 γ 。为了限制坯料转动而造成切口的倾斜，通常在下剪刀的上方加一压板，以限制坯料转动。

又如在闭式镦粗时，开始阶段(图 1-3a)模具的侧壁并不受力，但到终了状态时(图 1-3b)，侧壁会受很大的正压力，常导致凹模开裂。

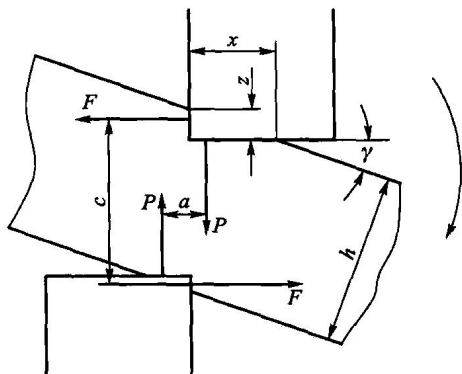


图 1-2 剪切过程坯料受力图

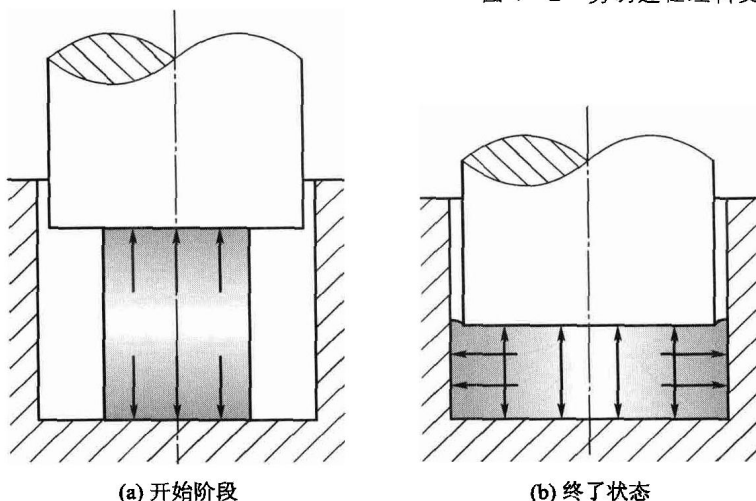


图 1-3 闭式镦粗时模具所受的正压力示意图

以上几个例子皆说明：考虑正压力时，不能仅考虑变形的某一瞬时，还要考虑在整个过程中的变化；不仅要考虑沿作用力方向的正压力(包括反作用力)，还要考虑侧壁因约束变形流动而引起的正压力。

2. 摩擦力

两个互相接触的物体，当它们发生相对运动或有相对运动趋势时，在两物体的接触面之间有阻碍它们相对运动的作用力，这个力叫摩擦力。伴随着金属成形过程的进行，在模具和工件的接触面上，会出现摩擦力。

刚体之间相对运动时，摩擦力与运动方向相反(图 1-4)，其大小服从库仑定律 $T = \mu P$ ，

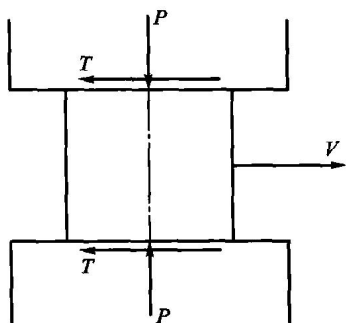


图 1-4 刚体运动时所受摩擦力方向的示意图

μ 为摩擦系数, P 为接触面上的法向作用力。塑性成形时工具与工件的接触面处于变化之中, 工具作用在工件上的摩擦力与各部分质点的相对运动方向相反, 如图 1-5 所示, 也就是说各处的摩擦力方向可能不同, 这是塑性成形中摩擦的一个特点。由图 1-5 可见由于摩擦力的存在, 导致镦粗工件呈鼓形, 引起变形不均匀, 甚至在外表面形成开裂。

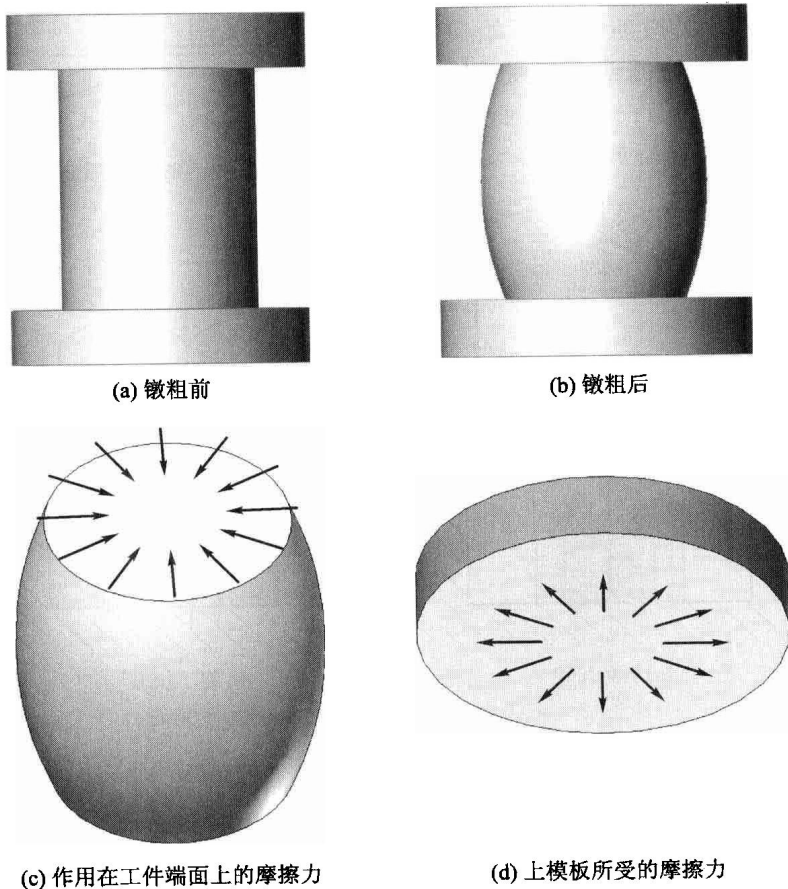


图 1-5 圆柱体镦粗时的摩擦力分析

摩擦力的存在引起变形力增加的最明显的例子是, 正挤压长坯料时(图 1-6a)侧壁摩擦力的数值有时可以超过金属经过凹模时的变形力^[3]。所以, 在同样的变形条件下, 正挤压的挤压力 P_1 比反挤压(图 1-6b)的挤压力 P_2 要大。

塑性成形时的摩擦力对充填过程也很有影响, 图 1-7a 为在定模中顶镦(即所谓“凹模中顶镦”), a 处的截面上几乎承受了全部的凸模作用力 P , 而在

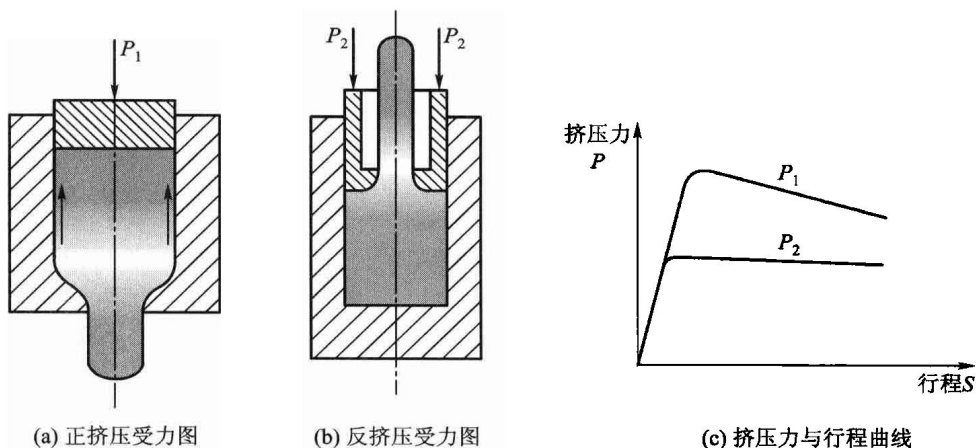


图 1-6 正反挤压受力对比

b 附近的截面上只承受克服侧壁摩擦力 T 后剩下的力，即 P 与 T 之差 $P - T$ ，所以 a 处优先得到充分的变形，容易产生筒形飞边。图 1-7b 为在动模中顶镦（即所谓“凸模中顶镦”），这时易出现环形飞边，其原因也是在 a 及 b 截面上承受了不等的压力，在 a 截面上仅承受冲头压力 P ，在 b 截面上承受的压力是 $P + T$ ，所以后者优先得到充分的变形。

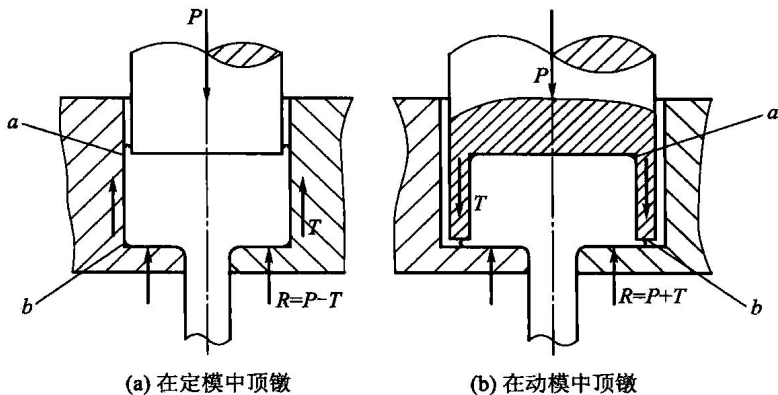


图 1-7 顶镦过程受力图

但是应当指出，摩擦力不一定总是起阻碍作用，如果设计合理，可以消除摩擦的不利影响，甚至还可以利用摩擦力来改善金属的成形。如图 1-8 所示，在正挤压过程中，冲头移动速度为 V_2 ，挤压筒移动速度为 V_1 ，使 V_1 略大于 V_2 ，这时筒壁对工件的摩擦力 T 已经起积极作用，可使挤压力 P 下降，更重要的是可以使变形较均匀，避免与筒壁接触的金属产生剧烈剪切，对于提高制

品的组织均匀性起到很好的作用。当然,这时机器及模具的结构要作相应的改动^[4]。最后还应指出,挤压筒移动是实现积极摩擦的关键,这不仅仅局限于挤压,在其他成形工序中也有应用^[5]。

由以上分析可知,塑性成形时摩擦力总是随工具与工件接触面相对运动而存在的,但各个部位的方向可能不同。所以,对于工具表面的摩擦力应有足够的重视,并合理地利用。

金属变形过程中的摩擦力是工具和金属表面相对运动时所产生的剪应力,它的主要数值计算依据有库仑摩擦准则和剪应力摩擦准则。

众所周知,若摩擦应力(单位面积上的摩擦力)与接触面上的正应力成正比,则符合库仑摩擦准则,其表达式为

$$\tau = \mu p \quad (1-3)$$

式中, τ 为摩擦应力; μ 为摩擦系数; p 为接触表面的正应力。

剪应力摩擦准则认为最大摩擦应力是常量,且不应超过材料的纯剪切应力 $Y/\sqrt{3}$,也就是说单位摩擦力只随材料的屈服应力而变化。采用库仑摩擦准则时,所计算的金属表面的摩擦应力随正压力及摩擦系数增加而增大,以至于有可能超过材料所能承受的纯剪切应力,这与某些实际情况不符,因此在摩擦应力较大的情况下应采用剪应力摩擦准则,其表达式为

$$\tau = mk = m \frac{Y}{\sqrt{3}} \quad (1-4)$$

式中, τ 为摩擦应力; m 为摩擦因子; Y 为材料的流动应力。

在接触表面压强大时,特别是金属变形剧烈的成形中应采用剪应力摩擦准则。当表面压强小时,采用库仑摩擦准则计算出的摩擦应力更准确。通常在板材成形过程中,采用库仑摩擦准则,而在热态体积成形中采用剪应力摩擦准则。同时,还可以将两种摩擦准则进行组合,形成组合摩擦准则(combined friction law),其公式如下:

$$\begin{cases} \tau = \mu p & (\mu p < mk) \\ \tau = mk = m \frac{Y}{\sqrt{3}} & (\mu p > mk) \end{cases} \quad (1-5)$$

在组合摩擦准则中,压强和摩擦应力之间的关系如图 1-9 所示,可以看

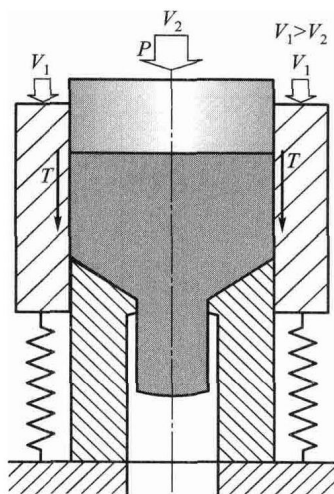


图 1-8 积极摩擦挤压受力图

1.1 塑性成形过程受力分析

出, 在接触压强大的情况下, 采用剪应力摩擦准则来计算摩擦应力; 压强小时, 采用库仑摩擦准则来计算摩擦应力。

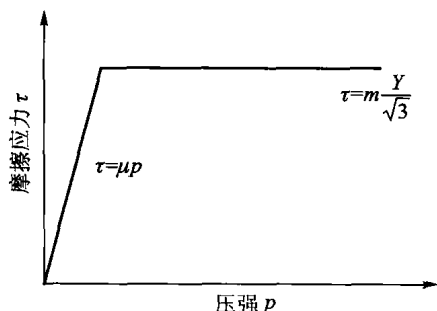


图 1-9 组合摩擦准则中压强和摩擦应力的关系

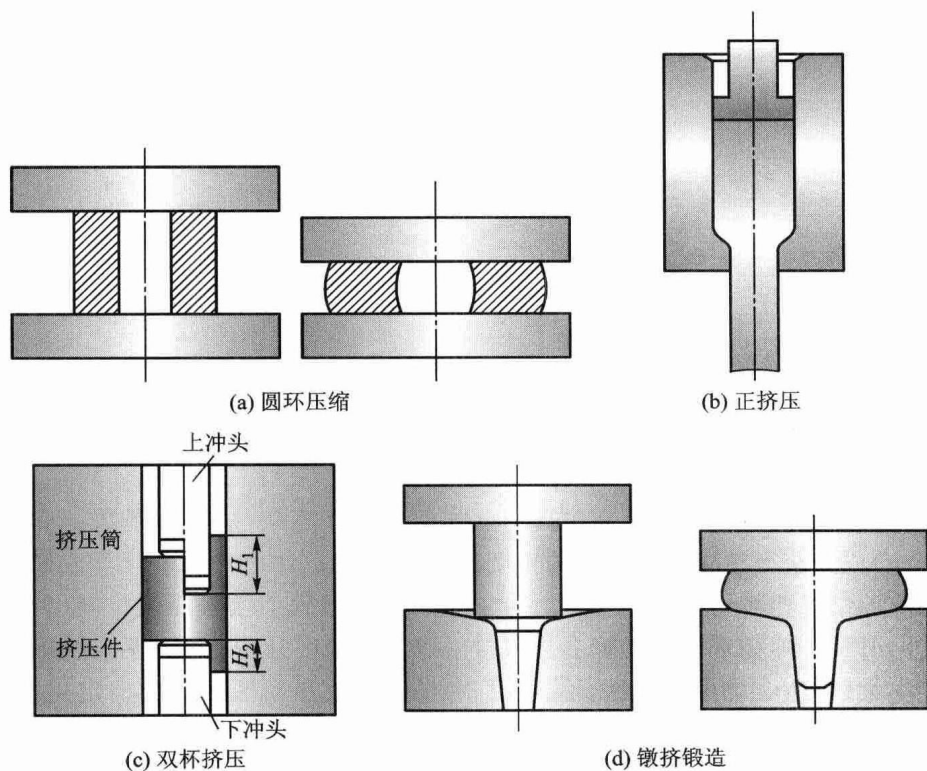
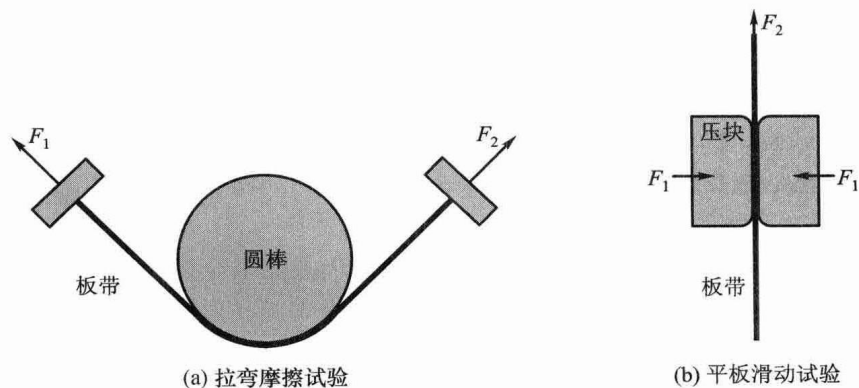
在实际的金属成形计算和仿真中, 如何确定摩擦条件(摩擦系数 μ 和摩擦因子 m)成为获得精确计算结果的重要因素。摩擦条件通常采用计算或模拟结果与实验结果相对比的方法确定。由于金属成形过程中接触压强很高(可达到 2 500 MPa), 摩擦和金属变形会导致接触表面的温度升高, 变形后工件的表面延伸率大(可达 3 000%), 因此, 为了使摩擦系数和摩擦因子的确定更准确, 一些类似金属成形的方法可以用来判定摩擦条件, 如圆环压缩、正挤压、双杯挤压和镦挤锻造等, 如图 1-10 所示。其中, 圆环压缩和双杯挤压通过变形后试件的尺寸来判定摩擦条件; 而正挤压采用成形力的方法来判定摩擦条件; 对于镦挤锻造方法, 成形力和成形工件的形状都受摩擦条件影响, 因此, 两者都可用来判断摩擦条件。需要说明的是, 双杯挤压是针对冷挤压的测试方法; 圆环压缩是判断热锻成型的主要测试手段^[6]。板材变形中摩擦系数的测定可采用平板滑动试验、拉弯摩擦试验等, 其测试原理是采用力传感器测出接触压力和摩擦力, 然后根据摩擦力公式, 求出摩擦系数^[7], 如图 1-11 所示。

3. 工具形状的影响

以上分别分析了正压力及摩擦力的作用方向及其对金属成形的影响, 所举实例中的工具形状多是平直的, 但在实际生产中, 工具形状往往很复杂。这就需要综合考虑工具形状对正压力及摩擦力的影响。总的来说, 工具形状无非是内凹形、外凸形及平直形三类。

当工具为内凹形时(图 1-12a 上模), 正压力的水平分量方向和摩擦力的水平分量方向一致, 共同阻碍金属沿横向流动(为简化, 图中仅画出工件右侧的受力情况)。

当工具形状为外凸形时(图 1-12b), 正压力的水平分量与摩擦力的水平分量方向相反, 因此外凸形工具比内凹形工具更有利于横向变形。

图 1-10 体积成形中摩擦因子的测试方法^[6]图 1-11 板材成形中摩擦系数的测试方法^[7]

当工具为平直形时，摩擦力沿水平方向阻碍金属流动，正压力沿垂直方向而无水平分量(图 1-12a 下模)。这时的横向流动趋势介于上述两者之间。

由以上分析可以看出，塑性成形时，通过改变工具形状将引起正压力及摩擦力的合力方向的变化，相应地可以控制坯料的流动。

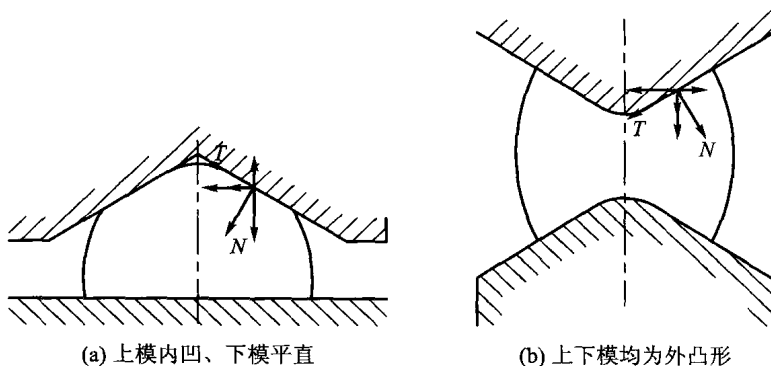


图 1-12 工具形状对横向变形的影响

1.1.2 内力分析

工件中的内力是以应力形式分布的。对工件中内应力分布规律的分析，主要是为了了解工件在不同区域内的变形特征。工件任意截面上的内应力之和（包括力与弯矩）与外力之间满足平衡关系。对工件中内应力分布特性的分析相对于对作用在工件上的外力分析要复杂得多。它包括工件中变形区与非变形区之间的相互作用，也涉及变形区各部位变形不均或速度不等所产生的相互制约等。此外，内应力是拉应力或是压应力，会对工件的实际成形产生不同的影响。以下将分别对几个典型的成形例子给出一些定性或半定量的分析。

1. 受拉与受压

对于刚体施加某一拉力或推力（压力），其效果是相同的（图 1-13）。而对于在塑性成形中的可变形工件来说，推与拉的差别是很大的。图 1-14 所示为生产空心件的实例，为了使外径及壁厚减小，可以用变薄拉深（图 1-14a）或挤压（图 1-14b）的方法。对于前者，变形力需经过已成形部分（传力区 A）传到变形区 B，这时许可变形程度主要受工件出口部分或筒底的强度限制。而对于后者，已通过模具的部分不受力，因而许可变形程度与该部分的强度无关，主要取决于模具强度及设备吨位。

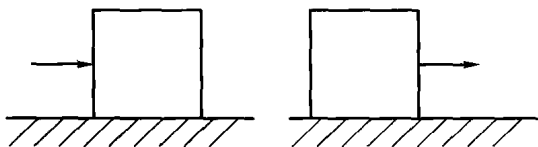


图 1-13 刚体受推或受拉