

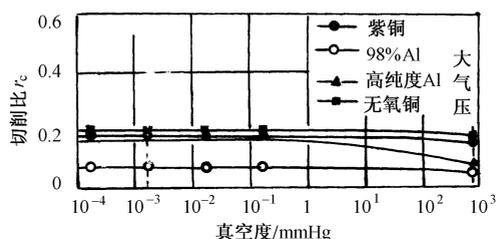
第 6 章 特殊切削加工方法

6.1 真空中切削

20 世纪 70 年代日本东洋大学的上原邦雄等对在真空中的切削加工进行了试验研究，发现了一些不同于在空气中切削的现象。主要表现在：真空度对不同工件材料的变形系数 A_h 、切削力 F 及表面粗糙度 Ry 有不同的影响规律。

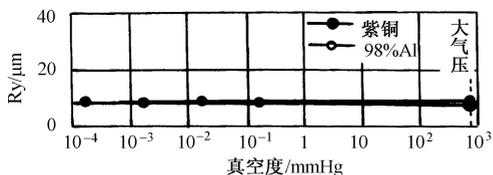
6.1.1 真空度对铜和铝切削的影响

真空度对切削铜、铝的变形系数 A_h 、切削力 F 及表面粗糙度 Ry 几乎无影响，如图 6.1、图 6.2 和图 6.3 所示。



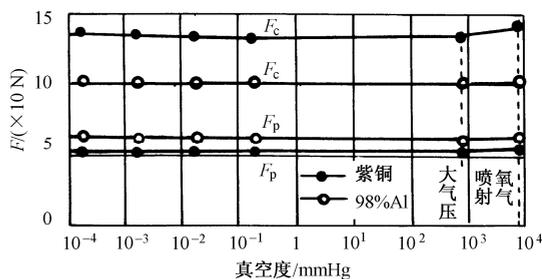
工件：紫铜，无氧铜，98%Al，纯 Al；
 刀具：高速钢 (0, 20, 5, 5, 5, 0, 0)；
 切削用量： $v_c = 40 \text{ m/min}$, $f = 0.067 \text{ mm/r}$, $a_p = 0.8 \text{ mm(Cu)}$ 、 0.6 mm(Al)

图 6.1 真空度与切削比 r_c 的关系^[51]



工件：无氧铜和 98%Al，其余同图 6.1

图 6.2 真空度与 Ry 的关系^[51]



工件：无氧铜和 98%Al，其余同图 6.1

图 6.3 真空度与 F 的关系^[51]

6.1.2 真空度对中碳钢和钛合金切削的影响

表 6-1 给出了不同真空度条件下切削中碳钢和钛 (Ti) 时的切削比 r_c 。

表 6-1 切削中碳钢与钛的切削比 r_c [52]

试件	真空度	
	大气压	2×10^{-4} mmHg
30 钢	0.4	0.28
钛 (Ti)	0.6	0.3

图 6.4、图 6.5 和图 6.6 给出了切削中碳钢与钛时，真空度对 F 及 R_y 的影响关系曲线。

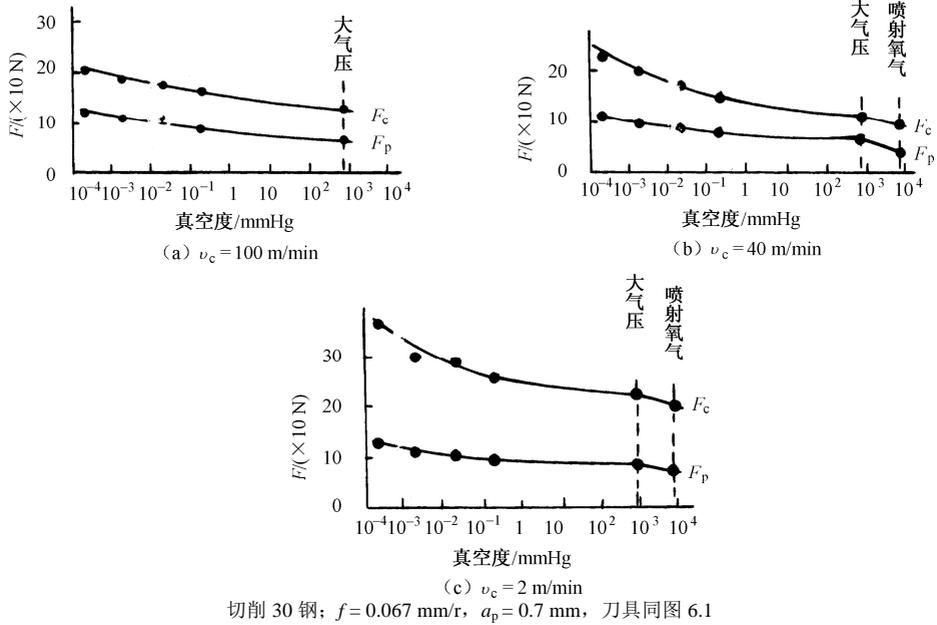


图 6.4 真空度与 F 的关系 [52]

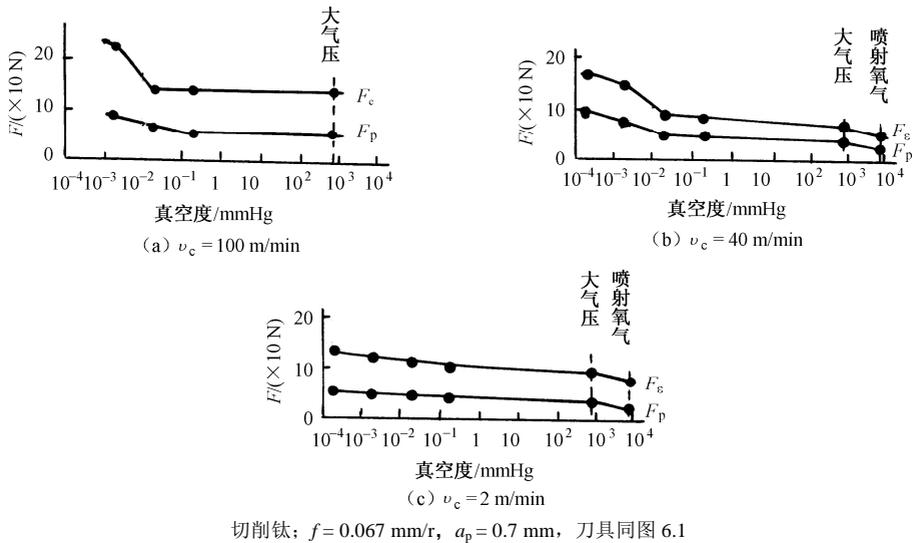
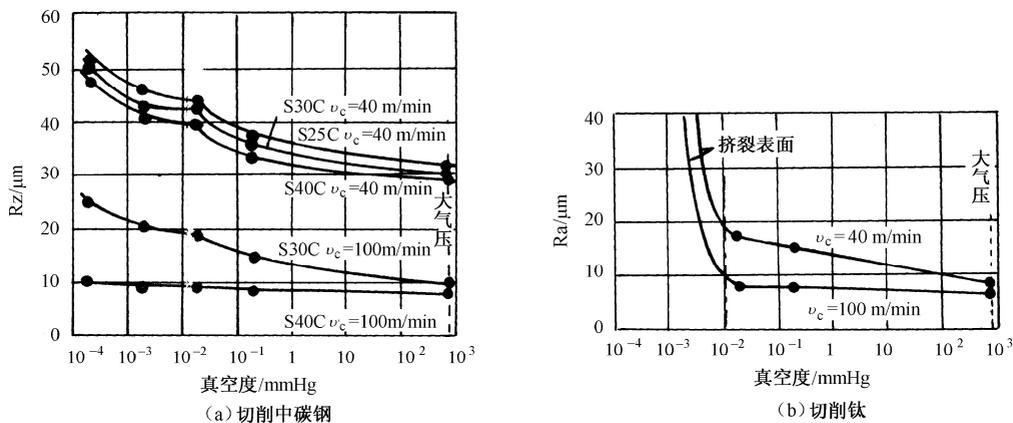


图 6.5 真空度与 F 的关系 [52]

由表 6-1 和图 6.4、图 6.5、图 6.6 不难看出，切削中碳钢和钛时，真空度越大，切削比

r_c 越小, 即变形系数 A_h 越大 ($A_h = 1/r_c$), F 及 R_y 也越大, 原因在于有黏附现象。

研究认为: 在真空中切削时, 刀-屑界面处不能生成减摩的氧化膜, 这样对钢材的切削并无好处, 但对钛及其合金的切削大有好处, 因为这样可避免钛及其合金在高温下与空气中的 O、N、H、CO、CO₂ 等发生化学反应生成硬脆层。



$f = 0.067 \text{ mm/r}$ $a_p = 0.7 \text{ mm}$; 刀具同图 6.1

图 6.6 真空度与 Ra (Rz) 的关系^[52]

6.1.3 真空中的高速与超高速切削

日本千葉大学的小林博文先生等在真空模型中用单晶金刚石刀具对工业纯铝 A1050 进行了高速与超高速铣削试验, 结果表明:

① 真空中的切削力 F 要比在空气中的切削力大, 如图 6.7 所示。

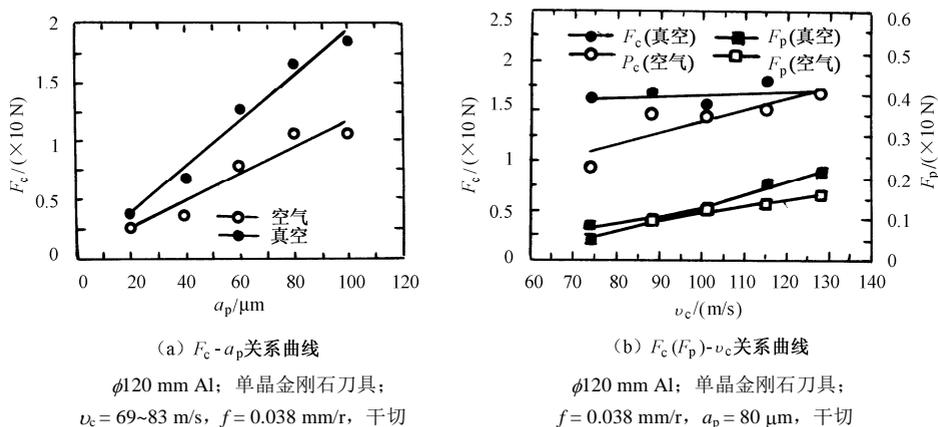


图 6.7 真空中与空气中的切削力 F 对比^[53]

② 真空中切削的加工表面上有明显的切屑附着物, 而在空气中切削则没有; 真空中切削在刀具前刀面上没有切屑黏附, 但在空气中切削则有切屑黏附。

6.1.4 在氧气和氩气气氛中的高速与超高速切削

图 6.8 为在不同压强下的氧气和氩气气氛中切削力 F 与压强 P 的关系曲线。

图 6.9 为在不同压强下的氧气中高速超高速切削时切削力 F 的对比情况。

由图 6.8 和图 6.9 不难看出：

① 在氧气和氩气气氛中切削时，气体压强 P 对切削力 F 有较大影响，约在 $10^2 \sim 10^3$ Pa 时主切削力 F_c 最小，然后随着 P 的增大 F_c 逐渐增大至 10^5 Pa 处，且在氩气中切削力 F_c 大于氧气中的 F_c ，切深分力 F_p 与进给分力 F_f 也有相似规律，但气体压强的影响程度不如对 F_c 影响那么大；

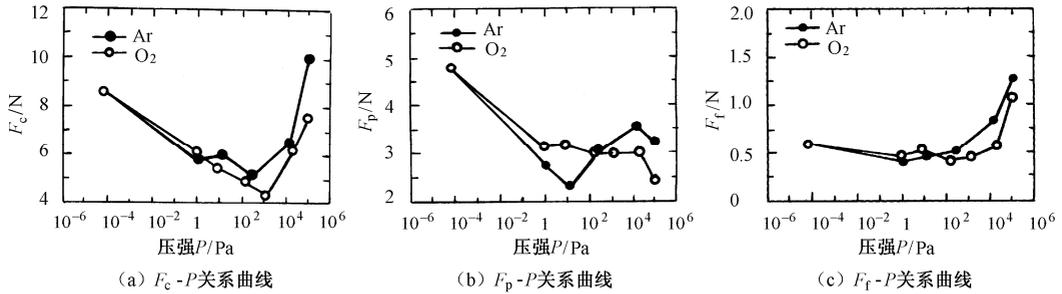


图 6.8 在 O_2 和 Ar 气氛中切削力 F 与气体压强 P 间的关系曲线^[54]

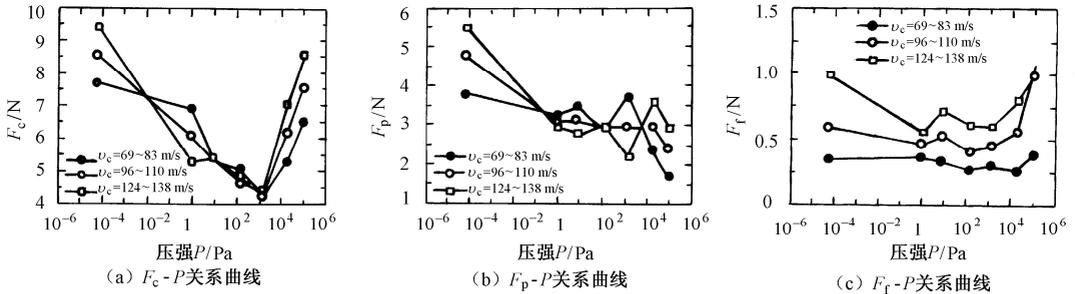


图 6.9 在 O_2 气氛中的 F - P 关系曲线^[54]

② 在氧气 (O_2) 气氛中切削时， v_c 越高， F 越大；

③ 在氩气 (Ar) 气氛中或在小于 10^2 Pa 的氧气气氛中切削时，加工表面上有切屑的附着物；

④ 压强为 $10 \sim 10^2$ Pa 时在刀具前刀面上开始生成切屑的附着物，且随着压强的增大附着物增多。

产生上述特异现象的原因可能有以下几点：

① 在无氧化膜形成的前刀面与刀屑间有固相黏结；

② 切削热引起的氧化反应是前刀面黏结的决定因素；

③ F_c 增大显著是刀-屑界面上摩擦力增大造成的；

④ 在 O_2 气氛中切削时，前刀面上的黏着促使 F_c 增大。

6.2 惰性气体保护切削

这也是针对钛合金切削时在高温条件下易生成硬脆层而采取的一种保护性措施。南京航空航天大学曾在钛合金切削区喷射氩气，使得切削区的钛合金与空气隔绝，这样钛合金就不会与空气中的 O、N、H、CO、CO₂ 等发生化学反应生成硬脆化合物层，从而改善了钛合金的切削加工性。

但此法不适用于对有色金属的切削，如铝及其合金的切削。日本学者在氩气氛中高速与超高速切削纯铝（A1050）时，切削力 F 反比在 O₂ 气氛中的还大（见图 6.8）。

6.3 绝缘切削

在切削金属材料的过程中，如果将工件与刀具（导电材料）连成回路，在该回路中将会有热电流（热电势）产生，刀具会因热电流而产生热电磨损。要将工件（或刀具）与机床绝缘，如用塑料锥套代替原钢制锥套实现与钻床主轴孔间的绝缘，就可使钻头使用寿命有所提高。西北工业大学曾用此法实现铸造高温合金 K214 的钻孔，西安黄河机器厂也用此原理车削过不锈钢 1Cr13 和 2Cr13，均收到了良好效果。

6.4 电熔爆“切削”

电熔爆是一种采用低电压（最低 3 V）、大电流（最大 3 000 A）直流脉冲电源的非接触强电加工。工件接电源正极，安装在机床卡盘或顶尖上，刀盘接电源负极，二者之间保持一定间隙（见图 6.10）。加工过程中，工件和刀盘在动力源和传动系统驱动下，以一定转速和圆周进给速度实现相对运动，工作液自始至终充分浇注在工件与刀盘之间，通电后在间隙处会产生剧烈放电，放电产生的高温使工件表面的金属局部熔化，在工作液的冲击下会产生剧烈熔爆，并伴随爆裂声迅速爆离工件表面，从而完成对工件表层金属的无接触“切削”加工。工具电极一般为低碳钢，放电介质为加入少量添加剂的自来水，加工时“切削力”接近于零。该方法比各种电加工方法能耗低，材料去除率大（见表 6-2）。

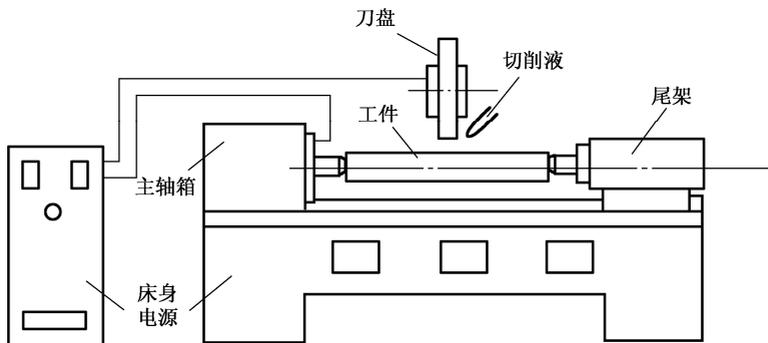


图 6.10 电熔爆加工原理^[113]

表 6-2 各种电加工方法比较^[113]

加工方法	平均/最高金属去除率/(mm ³ /min)	能耗/(kW·h/kg)
电解加工	100/10 000	11~19
电解磨削	10/50	10~15
阳极机械加工	20/898	3~5
电火花	40/4 000	20~40
电熔爆	5 000/125 000	1~2.2

该项技术有完全自主知识产权，自 20 世纪 80 年代问世以来，已在难加工材料加工方面显示了独特优势，可加工一切导电材料，尤其可对高硬、高韧、特软、特脆等材料进行高效、无“切削力”的加工。例如，可一次进给加工 $m=5\text{ mm}$ 高速钢齿轮滚刀；取代无缝钢管轧顶的加热车削，使高达 50% 的废品率变为 90% 以上的正品率；可很好地完成等离子喷涂硬质合金的石油钻机钻杆管接头的加工；美国成功加工深埋核废料的铅罐用不锈钢匣、多种超硬焊丝修补的活塞及轧钢机轧辊。可广泛用于航空、航天、冶金、机械、船舶、铁路、石油、矿山等各个行业。但它的加工质量及噪声问题急需解决。现已开发出数控电熔爆轧辊加工机床、数控电熔爆蜂窝密封材料加工机床及数控电熔爆切割机床等^[114]。

6.5 射流加工技术

利用高压水为人们的生产服务始于 19 世纪 70 年代，用来开采金矿、剥落树皮等。直到 20 世纪 50 年代，前苏联人开始进行高压水射流切割技术的研究。1968 年美国密苏里大学林学教授诺曼·弗兰兹博士申请并获得第一项高压水射流切割技术专利。高压水射流（Water Jet, WJ）作为一项独立而完整的加工技术产生于 20 世纪 70 年代。在最近二十多年里，水射流切割技术和设备有了很大进步。目前，已有 3 000 多套水射流切割设备在数十个国家几十个行业应用，尤其是在航空航天、舰船、军工、核能等的高、尖、难设备加工上更显优势。高压水射流现可切割 500 余种材料，其设备年增长率超过 20%。

由于清洁和不发热，高压水射流加工主要用来切割软质有机材料，如木材、复合材料、蜂窝状材料和纺织品等。近十几年又发展起一项新技术——混合磨料射流加工技术（Abrasive Water Jet, AWJ）。该项技术的基本原理是通过一定的技术手段，将具有一定粒度的磨料粒子加入到高压水管路系统中，使磨料粒子与高压水进行充分混合后再经喷嘴喷出，从而形成具有极高速度的磨料粒子流——磨料射流。与纯水射流相比，磨料射流将纯水射流对物料的静压连续作用改变为磨料粒子流对物料的高频撞击与冲蚀作用，可成倍地提高切割力，拓宽了切割材料的范围，几乎可以切割一切硬质材料。

6.5.1 概述

1. 高压水射流加工原理

高压水射流也称为“水刀”，其加工是“软切削”、“冷能源切割”。它是运用液体增压原理，通过特定的装置（增压口或高压泵），将动力源（电动机）的机械能转换成压力能，具有巨大压力能的水再通过小孔喷嘴将压力能转变成动能，从而形成高速射流，因而又常称为高速水射流。

首先，用液压泵对经过过滤的自来水增压，使水压达到 400 MPa，由高压管道输送，并用具有精细小孔的蓝宝石作为喷嘴，喷嘴小孔的直径为 $\phi 0.07 \sim \phi 0.65$ mm。射流速度可达 900 m/s，可产生如头发丝细的射流，用其对被切割材料进行切割（见图 6.11）。

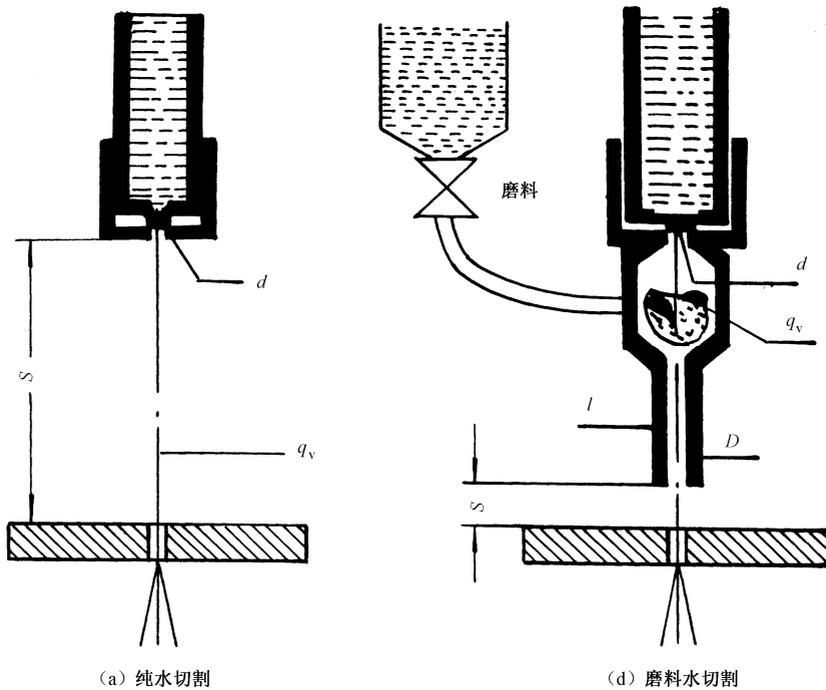


图 6.11 高压水切割工作原理图

根据不同需要，高压水射流切割有以下三种形式：

- ① 纯水射流。只用水作为介质，可切割软材料，如纸张、橡胶、塑料、毛毯、玻璃钢、石棉板、木材和纤维制品等，但切割力较小。
- ② 磨料水射流。向水中加入固体磨料颗粒，常用 60~100 目的石榴石、石英砂和氧化铝等，可成倍提高切割力，几乎可切割所有的硬质材料，如金属、非金属、金属基及陶瓷基复合材料等，是应用最广的射流切割方法。
- ③ 聚合物水射流。向水中加入少量高分子长链聚合物，如聚乙烯酰胺等，可提高射流密集度及射程，能切割较软或稍硬材料。

2. 高压水射流加工的特点^[63]

- ① 加工时对材料无热影响，工件不会产生热变形和热损伤，对加工热敏感材料尤为有利；
- ② 切割力大，几乎可以切割任何材料；
- ③ 切缝窄（0.15~2 mm），切口质量好，几乎不产生飞边毛刺；
- ④ 切割时不产生粉尘、烟雾、火花和热气等，对环境无污染，且可在深水下进行切割作业；
- ⑤ 生产效率高，切割速度可达 0.5 m/s；
- ⑥ 可由计算机控制，实现 CAD/CAM 一体化；
- ⑦ 不损伤加工表面，特别适合工程塑料、复合材料和纺织品的切割。

6.5.2 高压水射流加工装置

高压水射流加工装置如图 6.12 所示，主要由增压系统、供水系统、增压恒压系统、喷嘴管路系统、数控工作台系统、集水系统和水循环处理系统等构成。如果是磨料射流加工装置，则还应有磨料与水的混合系统。

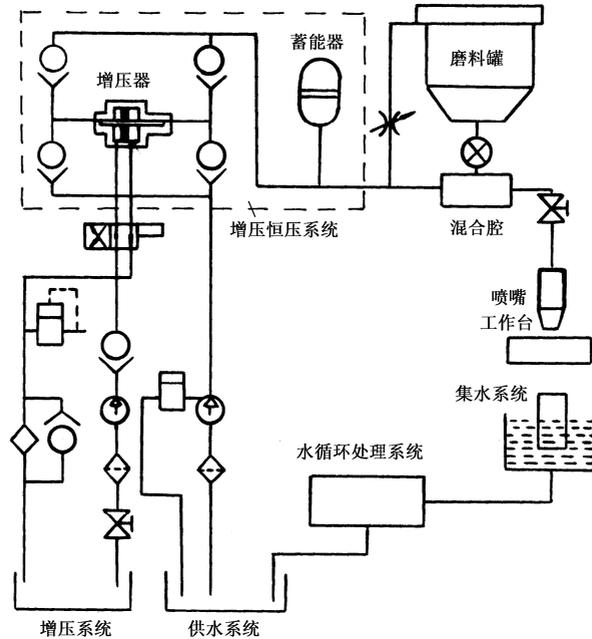


图 6.12 高压水射流加工装置图

图 6.12 中，增压系统中的压力油（10~30 MPa）推动大活塞往复移动，其方向由换向阀自动控制。供水系统先对水进行净化处理，并加入防锈添加剂，然后由供水泵打出低压水从单向阀进入高压缸。增压恒压系统包括增压器和蓄能器两部分，增压器获得高压的工作原理如图 6.13 所示，即利用大活塞与小活塞面积之差来实现。

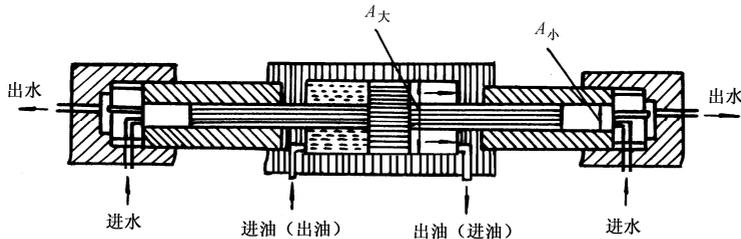


图 6.13 增压器工作原理图

理论上， $A_{\text{大}}P_{\text{油}} = A_{\text{小}}P_{\text{水}}$ ， $P_{\text{出水}} = A_{\text{大}} / A_{\text{小}}P_{\text{油}}$ （ P —压力； A —活塞面积），增压比即大活塞与小活塞面积之比，通常为 $A_{\text{大}} : A_{\text{小}} = (10\sim 25) : 1$ ，由此增压器输出高压水压力可达 100~750 MPa，由于水在 400 MPa 时其压缩率达 12%，因而活塞在走过其整个行程的八分之一后才会有高压水输出。活塞到达行程终端时，换向阀自动使油路改变方向，进而推动大活塞反向行进，此时高压水在另一端输出。如果将此高压水直接送到喷嘴，那么喷嘴出来的射流压力将会是脉动的（见图 6.14 中虚线所示），对管路系统产生周期性振荡。为获得稳定的高压水射

流，常在增压器和喷嘴回路之间（压力脉动动态曲线间）设置一个蓄能（恒压）器以消除水压脉动，达到恒压的目的，脉动量常能控制在 5% 之内（见图 6.14 中实线）。

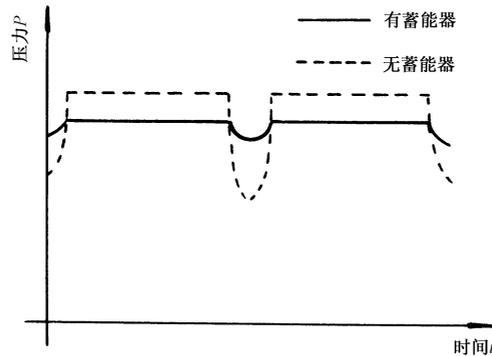


图 6.14 压力脉动动态曲线

6.5.3 高压水射流切除与切断机理

高速水射流本身具有较高刚性，在与靶物碰撞时将产生极高的冲击动压 ($P = \rho cV$) 和涡流。从微观上看，相对于射流平均速度高速射流中存在着超高速区和低速区（有时可能为负值），高压水射流表面虽为圆柱形，实际上内部存在刚性高的和刚性低的两部分。刚性高的部分产生的冲击动压使得传播的时间缩短，冲击强度增大，宏观上看起到了快速楔劈作用；而刚性低的部分相对于刚性高部分形成了柔性空间，起吸屑和排屑作用，这两者的结合正好使其切割材料时犹如一把轴向“锯刀”加工。高速水射流破坏材料的过程是一个动态断裂过程，对脆性材料（如岩石）主要是以裂纹破坏及扩散为主；而对塑性材料符合最大的拉应力瞬时断裂准则，即一旦材料中某点的法向拉应力达到或超过某一临界值 σ_y 时，该点即发生断裂。根据弹塑性力学，动态断裂强度与静态断裂强度相比要高出一个数量级左右，主要是因为动态应力作用时间短，材料中裂纹来不及扩展，因而这个动态断裂不仅与应力有关，还与拉伸应力的作用时间相关。

6.5.4 高压水射流（WJ、AWJ）切割应用范围

高压水射流切割是利用具有很高动能的高速水射流的冲击力进行的（有时，又称为高速水射流加工），与激光加工、离子束加工、电子束加工一样，属于高能束加工范畴。高压水射流切割作为一项高新特技术在某种意义上讲是切割领域的一次革命，有着十分广阔的应用前景。随着技术的成熟及某些局限的克服，高压水射流切割对其他切割工艺是一种完美的补充。目前，其用途和优势主要体现在难加工材料加工方面，如陶瓷、硬质合金、模具钢、淬硬钢、白口铸铁、钨钼钴合金、耐热合金、钛合金、耐蚀合金、复合材料（FRM、FRP 等）、锻烧陶瓷、高速钢（< 30HRC）、不锈钢、高锰钢、模具钢、马氏体钢（< 30HRC）、高硅铸铁及可锻铸铁等的加工。高压水射流除切割外，稍降低压力或增大靶距和流量还可用于对工件的清洗、破碎、表面毛化和强化处理。美国几乎所有的汽车和飞机制造厂都有应用，目前主要应用于以下行业：汽车制造与修理、航空航天、机械加工、国防、军工、兵器、电子电力、石油、采矿、轻工、建筑建材、核工业、化工、船舶、食品、医疗、林业、农业、市政工程等。

思 考 题

- 6.1 真空度对 Cu、Al 及中碳钢、Ti 的切削有何影响？
- 6.2 在真空中、O₂ 气氛和 Ar 气氛中切削各有何特点？
- 6.3 惰性气体保护切削、绝缘切削、电熔爆切削的原理是什么？
- 6.4 电熔爆切削原理是什么？
- 6.5 电熔爆切削与其他电加工方法相比有何优越性？
- 6.6 何谓高压水射流加工？高压水射流切割有哪几种形式？
- 6.7 高压水射流加工有何特点？有哪些应用？