

目 录

第一章 被加工材料和刀具材料	1
耐热钢和高温合金	2
高强度钢和钛合金	4
刀具材料	7
第二章 高效率切削刀具	11
车刀和硬质合金圆盘锯	11
小直径四刃带麻花钻	15
加工淬火高强度钢用的硬质合金铰刀和在异种材料的工件上 对孔进行精加工用的铰刀	21
按螺纹牙形角修正的丝锥及其在加工淬火钢、高温合金和钛 合金时的效果	28
加工高温合金和钛合金的槽铣刀和圆柱形铣刀	39
第三章 切削过程物理现象的研究结果	42
切屑收缩和相对剪移	42
单元切屑形成时的应力变形状态	52
变形、应力和切削力	58
第四章 金刚石-立方氮化硼加工	67
高速钢和硬质合金刀具的刃磨和精磨	67
车刀的电化学金刚石刃磨	73
金刚石-立方氮化硼磨削时砂轮的选择和合理切削用量的制 定	80
金刚石-立方氮化硼磨削时的表面质量、效率和切削力	84
磨削时的残余应力及其对疲劳极限的影响	91
工件的金刚石抛光	96

35375

IV

金刚石抛光零件的使用性能	105
第五章 合理的切削用量	110
钛合金工件的车削	110
钛合金毛坯的切断	114
端面铣削	117
铣槽和平铣	119
钛合金工件的钻孔	121
钛合金工件的扩孔和铰孔	125
加工大型工件时的切削用量	131
用电子计算机确定最佳切削用量	136
第六章 已加工表面和表面层的质量	141
已加工表面的微观和宏观几何形状	141
残余应力	143
切向和轴向残余应力的测定方法	148
残余应力符号和大小的调整	155
残余应力对疲劳极限的影响	159
超声波强化时零件表面层的形成	163
第七章 改进可加工性的方法	171
丝锥攻螺纹时超声波振荡的效果	171
电接触加热车削和切断钛合金棒料及锭料	176
钻孔时应用弱电流的效果	182
第八章 可加工性及其与机床-夹具-工件弹性系统的刚 性和耐振性的关系	188
金属切削机床的精度和效率与刚性的关系	188
接触刚性	196
研究切削动力学和振动的仪器及方法	204
刀具耐用度和已加工表面质量与振动强度的关系	209
切削参数对振动强度的影响	213

第一章 被加工材料和刀具材料

机械制造中采用的材料,既要有抗腐蚀性、热强性和热稳定性,也要有高的强度极限和良好的可切削加工性。

按照基本性能的不同,我们把钢及其合金分为抗腐蚀性的、热稳定性的和热强性的几类(ГОСТ 5632-61)。表 1 列出

表 1 被加工材料

组 号	名 称	牌 号
一	变形马氏体不锈钢耐酸钢	2X13, 3X13, 1X17H2(ЭИ268), 1X12H2BMΦ(ЭИ961), ЭИ736
二	变形奥氏体-马氏体耐热钢	X15H9Ю(ЭИ904), 2X17H2, 1X21H5T(ЭИ811), X15H5Д2(ЭП410)
三	变形奥氏体耐热钢和热强钢	X18H9T(ЭЯ1Т), X18H10T, X18H12T, X12H20T3P(ЭИ696), ЭП222, ЭИ654Ш, 4X12H81'8MΦБ(ЭИ481), 4X14H14B2M(ЭИ69), X25H16I'7AP(ЭИ835)
四	变形铁镍基高温合金	XH25BTЮ(ЭИ787)
五	变形镍基高温合金	XH77TЮP(ЭИ437Б), XH70MBTЮБ(ЭИ598), XH67BMТЮ(ЭП202, ЭИ445P), XH70Ю(ЭИ652), ЭИ766

(续)

组号	名 称	牌 号
六	镍基铸造高温合金	ЖС6К, ЖС3ДК
七	马氏体高强度钢(热处理后)	30ХГСА, 30ХГСАА, ЭИ257, ЭИ643, ВКС210(ЭИ637)
八	变形钛合金: 高塑性类, $\sigma_b \leq 60$ 公斤/毫米 ²	OT4 1—— $(\alpha + \beta)$ 合金
	中强度类, $\sigma_b = 60 \sim 100$ 公斤/毫米 ²	OT4, BT4 和 BT6—— $(\alpha + \beta)$ 合金 BT5—— α 合金
	高强度类, $\sigma_b = 100$ 公斤/毫米 ² (到 150 公斤/毫米 ²)	BT20—— α 合金 BT22—— $(\alpha + \beta)$ 合金 BT14—— $(\alpha + \beta)$ 合金 BT15—— β 合金
	热强类, $\sigma_b = 95 \sim 125$ 公斤/毫米 ²	BT3-1, BT8, BT9—— $(\alpha + \beta)$ 合金
	多组份变形钛合金	AT3, AT4, AT6, AT8, AT9, AT10, AT12

注: В—钒, В—钨, Г—锰, Д—铜, М—钼, Н—镍, Р—硼, С—硅, Т—钛,
Ф—钼, Ю—铝。

了作者研究时利用的一些材料。

耐热钢和高温合金

第一组材料(表1)的主要合金成分是12~17%的铬,使材料具有抗腐蚀性。除铬外,这一组的钢还含有镍、钨、钼和少量的(1~2%)钒,使材料在600°C以下的温度下具有热稳定性和热强性。在热处理状态下,这一组的所有钢都具有相当高的断裂强度极限: $\sigma_b = 95 \sim 115$ 公斤/毫米²; 其相对延伸

率 $\delta=7\sim 14\%$ ，硬度为 HB 300~400。

第二组材料的含铬量为 15~20%，含镍量也比第一组的大。因此它们在低温或高温下都具有抗腐蚀性（或热稳定性）。在热处理状态下，这一组钢的塑性比第一组的大，因此具有良好的可加工性（除 X15H5A2T 钢外），但强度极限值低：当 $\delta=8\sim 35\%$ 和 HB 220~240 时， $\sigma_b=70\sim 100$ 公斤/毫米²。这组钢的工作温度 $t_{\text{工作}}=400\sim 500^\circ\text{C}$ 。

第三组是含铬和含镍量高的钢 ($\text{Ni}>9\sim 10\%$)，它们不仅具有热稳定性，而且具有热强性，即能长时间在高温下负载工作。热强性与合金内原子的扩散位移有关，而扩散位移又取决于自扩散系数。自扩散系数减小后，随着加入合金内的一些物质的激活能（疏散热）的增加，热强性就提高了。几种最重要的合金元素的激活能 $E_a=58\sim 142$ 千卡/克原子（前一个数字是钛的，后一个数字是钨的，两者之间的是镍，钴，铬，铌，钽，钼）。热强性最低的是 X18H10T 钢和 X18H12T 钢 ($t_{\text{工作}}=600^\circ\text{C}$)，热强性较高的复杂合金钢是 4X12H818MΦB ($t_{\text{工作}}=600\sim 630^\circ\text{C}$)，4X14H14B2M ($t_{\text{工作}}=600\sim 650^\circ\text{C}$) 和 X25H1617AP ($t_{\text{工作}}=800\sim 950^\circ\text{C}$)。加入炉料内的硼能与金属形成难熔化合物，从而提高钢的热强性。9H222 和 9M654H 钢在热强性方面接近 X18H10T 钢。

第四组是铁镍基 (45%Fe, 35%Ni) 高温合金 XH35BT10，有时称这种合金为热强钢。这种合金含有大量铬 ($\sim 15\%$)、镍和钨 (2.8~3.5%W)，因此具有良好的热强性和热稳定性，它可用来代替 XH77T10P 合金。它在热处理状态下的机械性能为 $\sigma_b=95\sim 100$ 公斤/毫米²， $\delta=6\sim 8\%$ ，HB 300~360。可见，它的塑性较低，而且切削加工性也不好。它的工作温度 $t_{\text{工作}}=750^\circ\text{C}$ 。

第五组包括各种变形镍基高温合金。XH77TiP 合金含 20% 左右的铬、77% 镍、2.5% 钛、0.75% 左右的铝和少量的硼(不超过 0.01%), 在热处理状态下, 它的 $\sigma_b=95\sim110$ 公斤/毫米², $\delta=15\sim30\%$, HB 270~320, $t_{\text{工作}}=750^\circ\text{C}$ 。XH70-MBTiB 合金与 XH77TiP 合金的区别是它含有钨、钼和铌, 这使它的热强性提高到 $t_{\text{工作}}=800\sim850^\circ\text{C}$; 在热处理状态下, 它的 $\sigma_b=100\sim110$ 公斤/毫米², $\delta=12\sim25\%$, HB 280~350。XH67BMTiO 合金的化学成分和性能接近 XH70MBTiB 合金 ($t_{\text{工作}}=750\sim850^\circ\text{C}$)。XH70K 合金含有 26~29% 铬和大量的镍, 这就保证了它有很高的热强性 ($t_{\text{工作}}=850\sim1000^\circ\text{C}$), 但强度不高 ($\sigma_b=75$ 公斤/毫米², $\delta=30\%$)。9M766 合金是高度合金化的, 在热处理状态下, 它的 $\sigma_b=100\sim115$ 公斤/毫米², $\delta=13\sim28\%$, HB 270~350, $t_{\text{工作}}=800^\circ\text{C}$ 。这种合金的切削加工性与 XH77TiP 合金大致相同。

第六组是镍基铸造高温合金, 它的合金成分复杂, 塑性差。在热处理状态下, $\sigma_b=90\sim110$ 公斤/毫米², $\delta=1.5\sim5\%$, HB 330~380, $t_{\text{工作}}=800\sim1000^\circ\text{C}$ 。

高强度钢和钛合金

第七组是结构钢。这一组钢由于所含高激活能的物质较少, 所以不具备热强性和热稳定性, 但在淬火或时效后具有高的强度指标, 因此适用于大负荷、非高温下工作的结构。这一组钢的机械性能列于表 2。

断裂强度极限的提高是因为钢内具有合金化的镍, 含铬量较高, 并有钨、钼和钒添加剂。表中列出的某些钢需要双重热处理。例如, BKC210 钢要进行淬火和时效, 淬火后它的 $\sigma_b=100\sim110$ 公斤/毫米², $\delta=14\%$, 塑性较大, 在这种状态下可

表 2 高强度钢的机械性能

钢 号	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)	钢 号	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)
30XГСА	110~130	8	ЭИ643	190~215	8~9
30XГЧНА	140~160	8	ВКС210 (时效后)	210~220	6~8
ЭП257	180~195	6			

以进行机械加工。

第八组钛合金能抗侵蚀性介质的腐蚀，且具有高的强度极限，加上它们的密度较小($\gamma_0=4.5$)，因此可以制造出单位强度($U=\frac{\sigma_b}{\gamma_0}$)大而质轻的产品。苏联成批生产的变形钛合金可以分为四类：前三类是按强度的大小($\sigma_b=60\sim150$ 公斤/毫米²)划分的，第四类是 $t_{\text{工}}=700\sim800^\circ\text{C}$ 和 $\sigma_b=95\sim125$ 公斤/毫米²的高温合金。

钛合金的强度和工艺性能取决于它的化学成分、金相组织和热处理。铝是必需的元素，在各种钛合金中的含量为2~7%。增加铝含量能提高钛合金的热强性，但会降低它的塑性。铝能促使 α 组织的形成，这种组织的特点是热稳定性高而塑性低，热稳定性的提高与钛的同素异晶转变温度的升高有关。BT5合金是只加有铝的钛合金的一个例子。锡和锆也有助于获得 α 组织，但作为 α 稳定剂(与铝不同)，它们不降低合金的塑性性能，而是赋予合金以很高的热稳定性、良好的抗蠕变性、抗低温脆化性和可焊性。这类合金的例子是TC5(Ti-Al-Sn-Zr-V, HB 280)和BT20(Ti-Al-Mo-Zr-V, $\sigma_b=95\sim115$ 公斤/毫米², $\delta=6\sim12\%$, HB 250~260)。钒、铬、钼和锰都能提高钛合金的强度，但它们对塑性的影响是不同的：钒能降低塑性，铬是中性的，钼和锰能提高塑性。铬、钼、钒和

锰都是 β 稳定剂，能促进 $\alpha+\beta$ 双相合金和单相 β 合金的形成，这两种合金在退火和淬火状态下的塑性比单相 α 合金的高。

在工业中获得广泛应用的合金(如表1所列)都是属于 $\alpha+\beta$ 合金这一类的。OT4和OT4-1合金是利用锰获得 $\alpha+\beta$ 组织的，因为成分中不含其他合金元素，所以它们的机械强度偏低($\sigma_b=60\sim90$ 公斤/毫米²)，而塑性较高($\delta=20\sim40\%$)。表1所列的其他合金是利用铬、钼、钒等 β 稳定剂获得 $\alpha+\beta$ 组织的。在这些合金中，BT14合金(Ti-Al-Mo-V)特别令人感兴趣：它在 $760\sim800^\circ\text{C}$ 温度下，淬火后具有良好的塑性，比较容易加工，而在 $450\sim480^\circ\text{C}$ 下时效后能增强到 $\sigma_b=115\sim140$ 公斤/毫米²，在这种状态下主要是进行磨削和抛光等精加工。BT9合金热强性最好，它的 $t_{\text{工作}}=700\sim800^\circ\text{C}$ 。

BT15合金(Ti-Al-Mo-Cr)属于单相 β 合金类，它含铝最少，而含钼和铬最多。这使 β 稳定剂的影响增加，结果合金成了单相的，而且在退火和淬火状态下具有塑性。这种合金与BT14合金相类似，时效后发生强化，且断裂强度极限更高($\sigma_b=130\sim150$ 公斤/毫米²)。

在多组份钛合金中利用硅、铁、铝、铬等非稀缺元素以后，炉料价格比批生产合金便宜了一半，而合金的强度和热强性反而更高了。AT3-AT8合金是六种组份的，它们的性能指标是 $\sigma_b=100$ 公斤/毫米²， $\delta=15\%$ ，HB 325；AT9和AT10合金是七~八种组份的，它们的 $\sigma_b=120\sim130$ 公斤/毫米²， $\delta=8\sim10\%$ ，HB 350~370；在 600°C 下 $\sigma_b=73$ 公斤/毫米²， $\delta=15\%$ 。这些合金都属于 α 组织合金，是热稳定性的，容易锻造和轧制，有良好的焊接性能和切削加工性(除AT12外)。

钛合金的切削加工性较差，影响可加工性的主要因素是：

1. 化学成分。大多数钛合金含有复杂的合金元素——包括具有高激活能的元素(钛、铬、钼和钒)，它们能提高合金的强度极限，但因此也就降低了合金的可加工性。例如，BT22 钛合金(Ti-Al-Mo-Cr，它的 $\sigma_b=112\sim115$ 公斤/毫米²， $\delta=8\sim12\%$ ，HB320~340)就是最难加工的一种钛合金。

2. 由化学成分和金相组织决定的低塑性。某些元素能促使 α 组织的形成，这种组织具有密排六方晶格，使加工变得困难。塑性的下降还与钛合金吸收氢、氧和氮的性能有关。

3. 单元切屑是主要的屑型，这也同钛合金的特点，即低塑性和大的挤裂角有关，它取决于某几个机械性能指标的比例关系以及刀具与材料之间的摩擦系数。在许多场合下，上述特点会导致所谓“负收缩率”($k_{\phi}<1.0$)，从而对加工过程产生不利的影响。

4. 导热系数低： $\lambda=0.02\sim0.025$ 卡/(厘米·秒·度)左右，比40号钢和BK8硬质合金低4/5~5/6。这不利于热平衡，并且在切削区造成高温，因而影响刀具的耐用度；在磨削时还会产生很高的残余拉应力。

5. 钛合金与含钛和钽的TK类和TTK类硬质合金的化学亲和性。在刀具前面上产生粘附并形成月牙洼，从而加速了刀具的损坏。

刀 具 材 料

加工不锈钢、耐热钢、高温合金、高强度钢和钛合金工件时，建议主要采用硬质合金刀具。

加工铬钢(表1中一组)必须用T15K6和T5K10类的二元碳化物硬质合金刀具，而加工2X13钢应使用BK8硬质合金刀具。

在加工耐热钢、高温合金和钛合金时，推荐采用 BK 类单一碳化物硬质合金(BK6M, BK8, BK15M)刀具。

在车削和铰孔时，用 BK6M 硬质合金刀具可取得最好的效果；而在铣沟槽、铣端面以及车外皮时，最好用 BK8 硬质合金刀具。在断续加工(例如加工带沟槽的工件)时，用韧性较大的 BK15M 硬质合金刀具，虽然低的碳化钨含量必然引起切削速度的下降，但能取得最好的效果。

用 TTK 类钨钛钽三元碳化物硬质合金，在有冲击或无冲击条件下加工高温合金和钛合金时，没有得出肯定的结果，看来这是由于钛和钽同上述两种合金成分中的钛有亲和力的缘故，其表现是切屑在刀尖上粘附，最后导致崩刃。

用这种硬质合金对碳钢和合金结构钢(其中包括高强度钢)进行断续切削，可获得良好的效果。例如，在端面铣削 45 号钢和 34XH3MΦA 钢工件时，用 TT20K9 硬质合金刀具(含 8%TiC、12%TaC 和 NbC、9%Co，其余为 WC)得到的结果比用 T5K10 和 T14K8 硬质合金为好。加工上述材料的切削用量是： $B=4$ 毫米， $t=150$ 毫米(铣削宽度)， $s_z=0.2\sim0.4$ 毫米/齿， $v=120\sim180$ 米/分。

镍基铸造高温合金(ЖС6К, ЖС3ДК 等)由于强度大、硬度高、塑性小($\sigma_b=90\sim110$ 公斤/毫米²， $\delta=1.5\sim5\%$ ，HB 330~380)和金属间化合物对刀具的磨损作用大，加工非常困难。上述性能将引起切削力增大、切削温度升高和刀具磨损加剧。用 BK8 硬质合金车刀车削 ЖС6К 合金时，切削温度比加工 40 号钢时高 2~3 倍，在 $t=1$ 毫米、 $s=0.2$ 毫米/转、 $v=20$ 米/分时，温度可达 1000°C。

影响刀具磨损和磨钝的径向力 P_y 超过车削 40 号钢时 P_y 力的 2 倍，其大小接近于 P_z 力。

加工铸造高温合金，应当采用硬质合金和高速钢两种刀具材料，加工时进给量和切削速度不能大。在5~10米/分的速度下车削、端铣、立铣和钻孔时，一般采用BK6M和BK8硬质合金刀具，但作者建议使用KyAI结构的BK8硬质合金螺旋齿圆柱铣刀，并采用下述切削用量： $t=0.5\sim1.5$ 毫米， $s_z=0.15\sim0.3$ 毫米/齿， $v=12\sim15$ 米/分。

加工30X1CA和30X1CHA高强度钢时，必须采用二元碳化物硬质合金T15K6，若在这两种钢件上铰孔时，也推荐采用二元碳化物硬质合金T15K6和T30K4（后者主要用于加工ЭИ643和BK210钢）。由于高温合金和钛合金的机械性能很高，在许多情况下必须用抗弯强度比硬质合金高1~2倍的高速钢刀具进行加工。在ЖС6K、BT14和BT15合金工件上钻孔和攻螺纹时，在现有的高速钢中应当优先选用最大抗弯强度 $\sigma_{bb}=315\sim340$ 公斤/毫米²的P18高速钢。

在用高速钢刀具（成形刀具和齿轮刀具）加工其他热强材料时，通常采用加钴和加钒的高速钢（P9K5，P9K10，P9Φ2，P9Φ5，P18K5Φ2）。同P9和P18高速钢相比，使用这些热处理后硬度（HRC 64~67）、红硬性较高的高速钢时，刀具耐用度可以提高50~100%。

在X18H10T钢、XH77TЮP高温合金、BT6和BT8钛合金工件上攻丝时，P9K5高速钢丝锥（HRC 65~67）比P18、P18Φ2和P9Φ5高速钢丝锥要好些。用P18、P9Φ5和P9K5高速钢钻头、铰钻和铰刀加工各种钛合金时，也得到了同样效果。用P18、P9K5和P9Φ5高速钢钻头在淬火状态的BK210钢工件和退火状态的BT22难加工钛合金工件上钻孔时，P9Φ5高速钢钻头看来是最好的，它的耐用度比其他钻头高。这是因为P9Φ5高速钢中的碳化钒具有很高的硬度。

研制了几种除钨、钴和钒外还含有1~6% 钼的高速钢。研究结果证明了这些添加剂的有效性。例如，按照 Я. И. 阿达姆等人的资料，在加工淬火 40X 钢齿轮齿时，用 P9M4K5 高速钢齿轮滚刀比用 P18 高速钢齿轮滚刀可提高耐用度 2~3 倍，而用 P18Φ2K8M 高速钢齿轮滚刀可提高耐用度 1 倍。

按作者的资料，在铣削 XH67BMTЮ 高温合金工件时，P18Φ2M 高速钢铣刀盘的耐用度比 P9K5 高速钢提高 1~1.5 倍，而 P18Φ2K8M 高速钢刀具的耐用度又比 P18Φ2M 高速钢提高 50%。P12Φ5M 高速钢刀具的耐用度也比 P18 高速钢提高 1 倍。

在用 P6M6K8 和 P6M3K8 高速钢车刀车削淬火的 XBT 钢工件(HRC45~49)时，刀具的耐用度比 P18 高速钢提高 1.25~1.5 倍。

含钒和含钼量高的刀具不易刃磨，刃磨时会产生显微裂纹和烧伤。这些缺点可用下面两个方法消除：在磨削和刃磨时选择相应的磨料和磨削用量，还可采用金刚石砂轮磨削或刃磨-研磨。在这两种情况下都必须减小残余拉应力，或者把拉应力变为压应力。



第二章 高效率切削刀具

车刀和硬质合金圆盘锯

在车床上粗车铸造钛铎的外皮和把它切断是两道非常费力的加工工序。为了提高这两道工序的劳动生产率，提出了几种新结构的粗车刀和切断刀(图1和图2)。

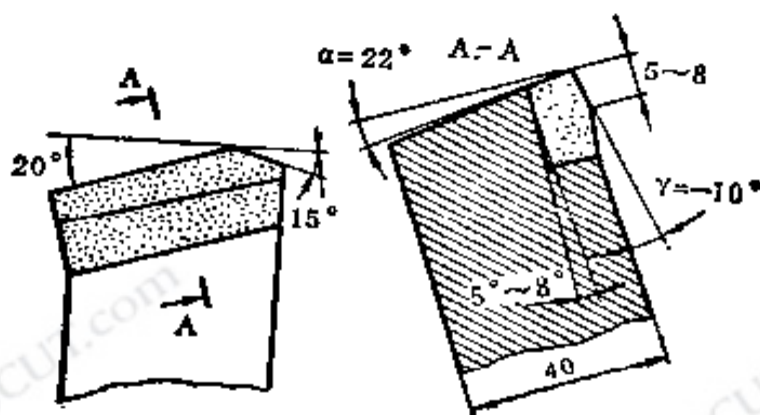


图1 粗车铸造钛铎外皮用的车刀

镶 BK8 硬质合金刀片的粗车刀,其合理几何参数为: $\gamma = -10^\circ$, $\varphi = 20^\circ$, $\lambda = 7^\circ$, $\alpha = 22^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $r = 0.5$ 。这把刀同 KBEK 型车刀一样,都是以小偏角和提高切削部分强度为特征;所不同的是它采用了大后角和负前角。由于切削刃的长度增加,改善了散热条件,降低了切削温度。因此,使用这种车刀工作时,不会出现硬质合金刀片断裂和脱焊现象。在正常的生产条件下,用上述结构的粗车刀同另一把车刀(几何参数为 $\gamma = -10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $r = 3 \sim 6$ 毫米)做了耐用度比较。切削速度是工厂常用的 1.5~2 倍,

粗车 BT15、BT3-1、OT4-2、BT8 和 OT4 钛合金锭。结果表明：新结构的车刀耐用度，比工厂常用的车刀要高得多(见表 3)。

表 3 具有合理几何参数的粗车刀和工厂
常用车刀的耐用度

钛合金锭料	$t=6$ 毫米时的切削 用 量		车刀的耐用度 T' (分)		允许磨钝 值 $h_{\text{后}}$ (毫米)
	v (米/分)	s (毫米/转)	工厂常用 车 刀	合理几何 参数车刀	
OT4-2	80	0.5	1.2	10	1.5
	39	0.5	4.5	29	1.5
	25	0.5	5.0	40	1.5
OT4	84	0.7	4.0	21	1.5
BT8	40	0.7	4.0	32	3
BT3-1	35	0.5	6.5	12	3
BT15	20	0.5	1.5	10	2

镶 BK8 硬质合金刀片的三面刃切断刀(图 2)有三段主切削刃：宽度 $b_1=1/3b$ 的横切削刃和两个 $\varphi=135^\circ$ 角的侧切削刃。根据计算和经验(包括切断直径 360 和 420 毫米的锭料的经验)，建议在刀杆截面 $BH=6 \times 120$ 毫米²和切断刀伸出长度为 200~250 毫米时，采用 $b=8$ 毫米的切削宽度。三面刃切断刀与同样几何参数的普通单面刃切断刀以及工厂目前采用的尖头切断刀($\gamma=0^\circ$ ， $\alpha=10^\circ$ ， $\varphi_1=2^\circ$ ，两侧刃成 $\varphi=105^\circ$ 角，刀尖半径 $r=2$ 毫米)相比，在切断 BT3-1、TC5 和 OT4-2 钛合金锭时，耐用度提高 2~3 倍，在同样的耐用度下可提高切削速度 50%，同时减小径向力 25~30%。

钛管通常是在切断机上用低效率和低耐用度的高速钢圆盘锯切断。采用硬质合金锯可以显著提高切断效率和刀具耐用度。圆盘锯(图 3)各个切削齿的形状和尺寸是相同的，它有

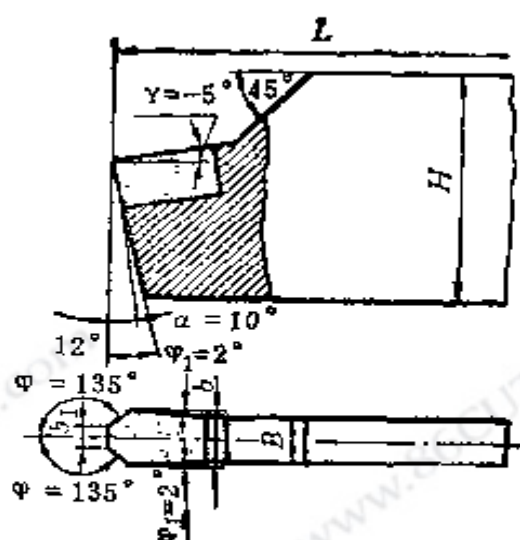


图2 切断钛合金锭料用的三面刃切断刀

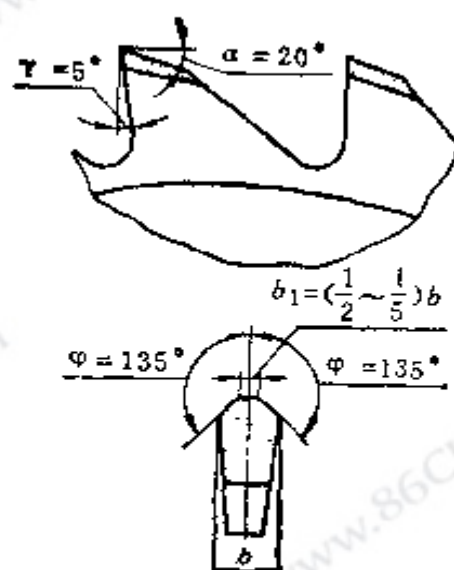


图3 三面刃圆盘锯切削部分的几何参数

三段主切削刃：宽度 $b_1 = (1/2 \sim 1.5)b$ 的横切削刃和偏角 $\varphi = 135^\circ$ 的两个侧切削刃。圆盘的其余尺寸是标准的（按ГОСТ 4047-52）。

图4分别列出了图3所示圆盘锯和标准刃磨圆盘锯的磨损和耐用度。标准刃磨就是预先把锯齿磨成直径相差0.2毫米的切槽齿和修整齿。标准锯在进给量 $s_z = 0.02$ 毫米/齿时，耐用度 $T = 102$ 分钟；而图3所示的圆盘锯，在 $s_z = 0.04$ 毫米/齿时，耐用度 $T = 223$ 分钟。根据关系式(1)，在同样条件下，硬质合金圆盘锯的耐用度比标准锯提高了4倍，在同样耐用度下可提高切削速度1.2倍，与高速钢锯相比可提高切削速度3~5倍。

经过研究，得出了用硬质合金三面刃圆盘锯 ($h_B = 0.45$ 毫米) 切断TC5合金棒料时计算切削速度的公式：

⊖ 原文为 $(\frac{1}{2} : \frac{1}{5})b$ ——译者。

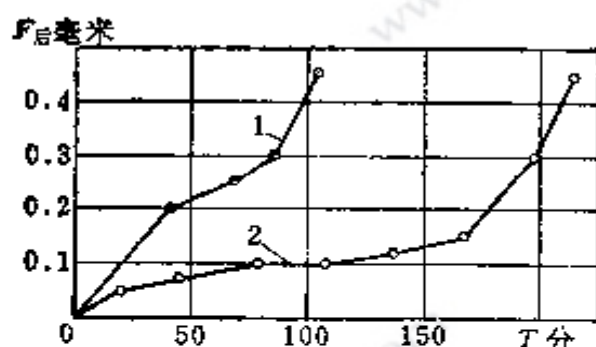


图4 BK8 硬质合金圆盘锯的磨损曲线 (TC5 合金, 直径 126 毫米; $D_n=330$ 毫米; $v=35$ 米/分)

1—标准结构的圆盘锯 ($\gamma=5^\circ$, $\alpha=20^\circ$, $\varphi=90^\circ$, $\varphi_1=2^\circ$, $b=8$ 毫米, $s_z=0.02$ 毫米/齿) 2—三面刃圆盘锯 ($\gamma=5^\circ$, $\alpha=20^\circ$, $\varphi=135^\circ$, $\varphi_1=2^\circ$, $b=8$ 毫米, $b_1=2.6$ 毫米, $s_z=0.04$ 毫米/齿)

$$v = \frac{104 \left(\frac{D}{d} \right)^{0.75}}{T^{0.5} s_z^{0.65} z^{0.75}} \quad (1)$$

式中 D ——锯的直径;
 d ——棒料直径;
 z ——锯的齿数。

特别是在切削难加工材料时采用自旋转圆切刀 (КСВР) 和强制旋转圆切刀 (КПВР) 可以大大提高生产率。把切刀安装成 λ 角时 (图 5), КСВР 切刀在切削力作用下旋转。 λ 角的大

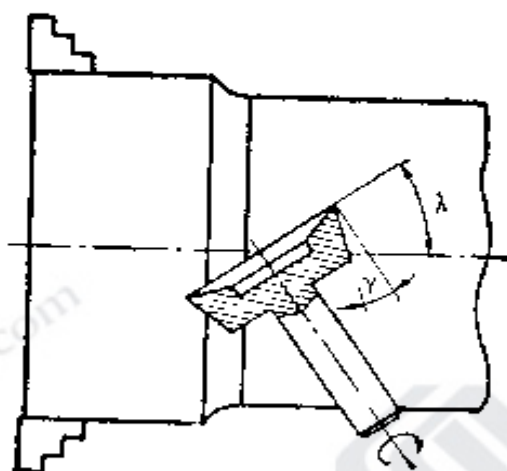


图5 自旋转圆切刀

小与切削速度和 t/s 比值有关。在切削过程中，切刀不断旋转，新的切削刃不断投入工作。加长切削刃的长度和良好的散热条件有利于提高刀具的耐用度和效率。

在精切以及车削和刨削中采用 KCBP 和 K11BP 切刀，刀具的耐用度和效率可显著提高。

小直径四刃带麻花钻

在高温合金和钛合金工件上钻小直径孔时，钻头常常没有足够的强度和刚性。

改变钻头的截面形式，特别是在合理的排屑槽形与尺寸下，增大钻头截面的惯性矩，可以提高钻头的强度和刚性。

四刃带钻头有四条导向刃带（每个瓣上两条），并有两供冷却的辅助槽和增大的钻芯（图 6）。

四刃带钻头的横截面面积和极惯矩比标准钻头大（表 4），这就决定了它有较大的刚性，因而在同样的扭矩下变形较小。

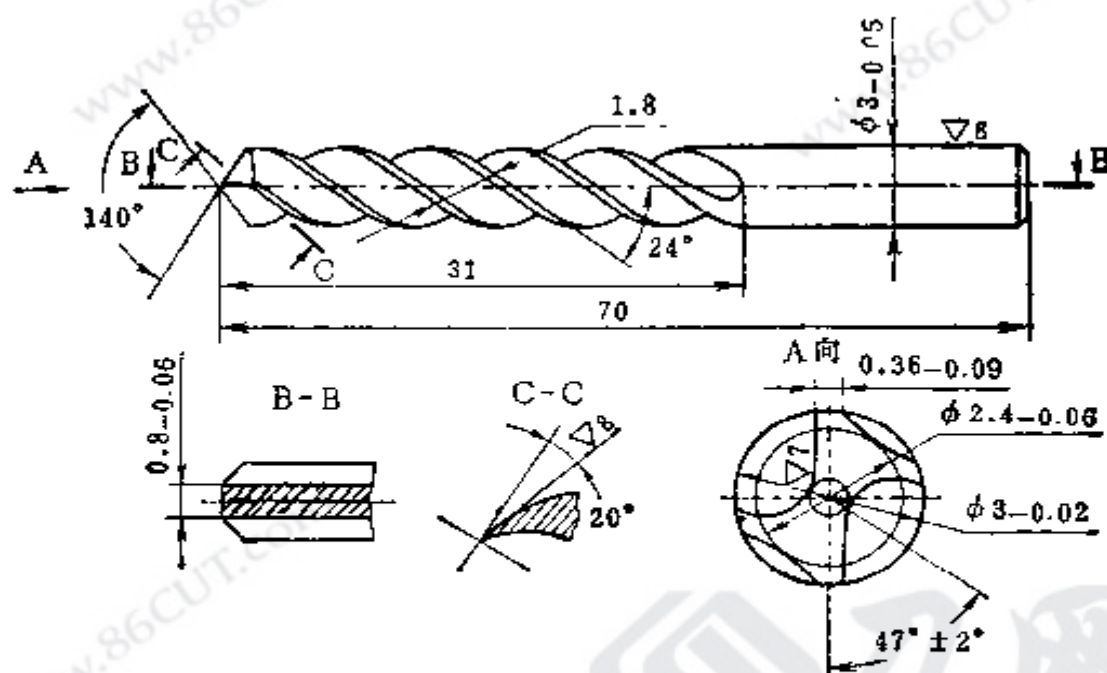


图 6 四刃带麻花钻的结构

表 4 直径 3 毫米的钻头的横截面面积和惯性矩

钻 头	S 毫米 ²	J_x 毫米 ⁴	J_y 毫米 ⁴	J_p 毫米 ⁴
标准钻头	2.75	0.23	0.73	0.96
四刃带钻头	3.01	0.51	0.64	1.15

利用高速电影摄影对钻头变形进行研究的结果证实了这一点。

图 7 为钻头扭转角测定装置的示意图。在直径 3 毫米的钻头上距顶部 10 毫米处固定一个直径 38 毫米、用 B95 铝合金制造的轻圆盘 1 (质量为 5 克)。一个与弹性夹头牢固连接的套筒, 其凸边的直径与固定在钻头上的圆盘直径相同。套筒尺寸要这样选择: 在钻头伸出长度 $l=30$ 毫米时, 凸边 2 和圆盘 1 相距应是 0.5~0.8 毫米。借助带回转台的工具显微镜, 用刚玉针在圆盘和套筒的表面上每隔 10° 刻一条刻线。把电影摄影机的物镜 3 对准凸边和圆盘的表面。

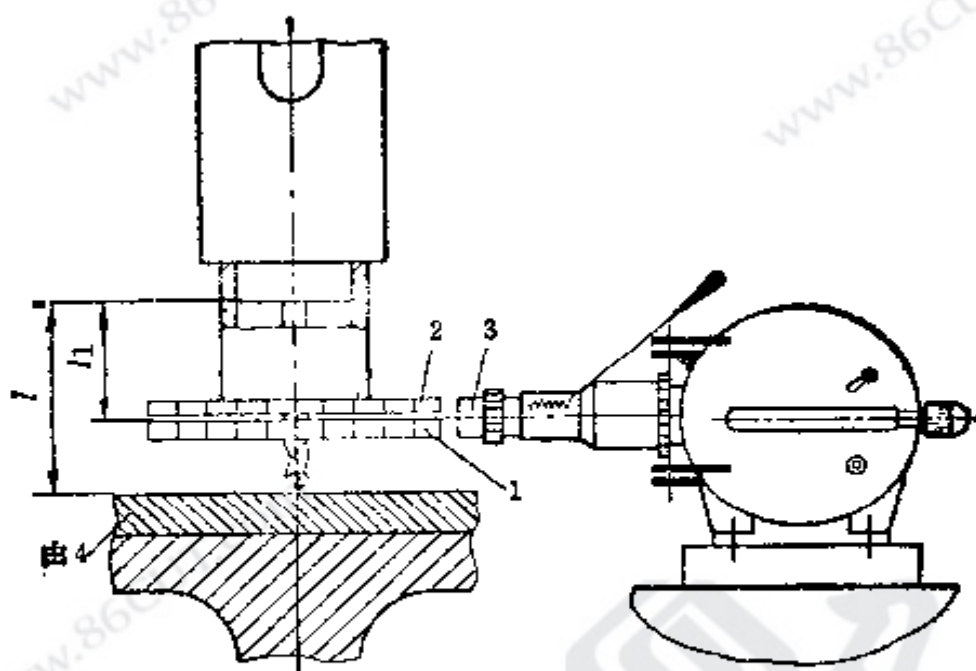


图 7 研究切削过程中钻头扭转的装置示意图

钻孔时钻头在扭转力矩作用下变形，同时圆盘相对于凸边转动，这个过程由 CKC1M 电影摄影机以每秒 4300 片的速度记录下来。扭转角的大小按照片上的刻度位移确定。为了获得钻头扭转角的最大值，按长度 $\frac{l}{l_1}$ 之比对测量结果进行了换算，式中 l 为钻头伸出长度，等于 30 毫米； l_1 为钻头固定部位到圆盘的距离，等于 20 毫米。表 5 列出了测出的某些扭转角值，图 8 示出了标准钻头和四刃带钻头扭转角的变化。

表 5 标准钻头和四刃带钻头扭转角的变化

钻头转角 (度)	钻头	钻 头 扭 转 角 (分)									
		钻头转角在 10° 范围内的胶片号									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0~10	标准 钻头	413	420	450	480	503	495	488	473	435	405
80~90		135	112	135	165	180	225	240	270	255	225
150~160		225	262	300	330	360	345	307	277	232	195
850~360		292	307	315	337	352	360	360	337	322	307
0~10	四刃带 钻头	165	172	165	150	135	127	120	135	150	172
80~90		165	165	150	135	112	105	112	135	165	187
150~160		187	180	165	142	135	120	120	135	150	157
850~360		90	97	112	142	150	157	150	127	112	97

钻头在工作过程中按正弦规律发生周期性的扭转振动，振动频率 $f=300\sim500$ 赫。标准钻头的双幅振动平均为 $1^{\circ}50'\sim3^{\circ}$ ，四刃带钻头的平均为 $1^{\circ}\sim1^{\circ}30'$ 。此外还发生 $f=10\sim26$ 赫的低频振动，标准钻头低频振动的振幅是极大的。四刃带钻头由于扭转刚性大，振幅减小 $1/2$ ，并有较小的扭转角，这是它耐用度高的一个原因（图 9）。在加工 OT4 钛合金时，四刃钻头的耐用度比标准钻头的高 $2.5\sim3$ 倍，同时可减

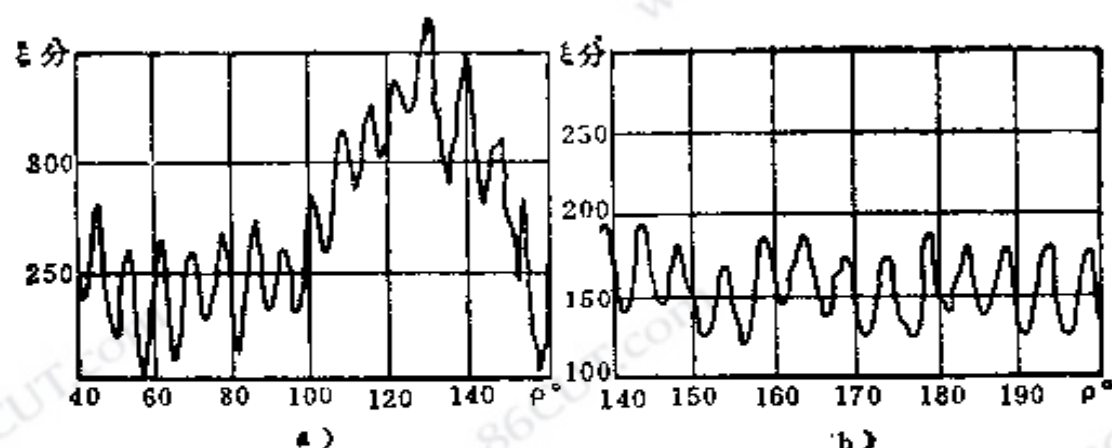


图8 直径3毫米的标准钻头(a)和四刃带钻头(b)扭转振动的振动曲线图(OT4合金, $v=3.8$ 米/分, $s=0.06$ 毫米/转)

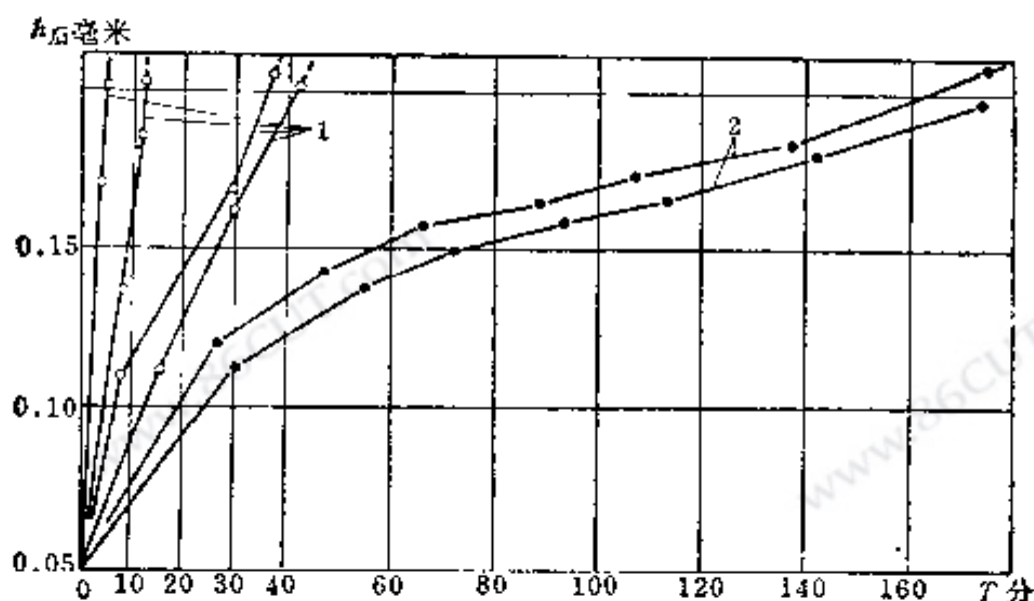


图9 标准钻头和四刃带钻头的磨损与工作时间关系曲线(OT4合金; P18 高速钢钻头, 直径3毫米; $2\varphi=140^\circ$, $\alpha=20^\circ$, $\omega=24^\circ$, $\psi=47^\circ$; 钻头伸出长度30毫米; $v=7$ 米/分, $s=0.06$ 毫米/转; 不通孔 $L=7d$; 用表压 $p=4\sim5$ 公斤/厘米² 的空气冷却)

少折断次数。此外, 用四刃带钻头工作时(曲线2)比用标准钻头工作时(曲线1)更加稳定。四刃带钻头在加工45号、11X15、18X2H4BA、X18H10T和X12H20T3P钢、BT3合金和CЧ18-36铸铁等材料时也显示出很高的耐用度。

供给润滑冷却液的辅助冷却槽(不容纳切屑), 也有助于提高四刃带钻头的耐用度。因有这种冷却槽, 切削区的温度比用标准钻头工作时低 15~20%。图 10 的切削温度波形图可以证明这一点, 这些图是在 OT4 钛合金工件上钻直径 3 毫米的孔时得到的。最大的温度差别出现在第二和第三次走刀时, 这时由于润滑冷却液从排屑槽通过的条件变坏了, 四刃带钻头的辅助冷却槽的效果便最充分地表现出来。



图 10 用标准钻头 (a) 和四刃带钻头 (b) 工作时的切削温度波形图(条件同图 8)

四刃带钻头能使孔径增大减小, 例如在 OT4 钛合金工件上钻直径 3 毫米的深孔时, 用四刃带钻头工作时孔径增大为 0.03~0.04 毫米, 而用标准钻头工作时为 0.05~0.06 毫米。

制造四刃钻头没有特殊困难。排屑槽和辅助冷却槽要在一次装卡后用一组铣刀铣出, 这样可保证在钻头全长上刃带宽度和槽深的均匀性。

小直径钻头应进行特别精确地刃磨。理论上钻头几何参数在垂直于钻头轴线的平面上的投影应如图 11 所示。这时钻头的旋转轴应通过横刃 ab 的投影中心, 横刃与平行于钻头切削刃 bc 和 ad 投影的轴线应成 $\psi = 55^\circ$ 的倾角。两个切削刃

的投影长度是相等的($bc=ad$); 导向刃带 de 和 ch 具有相同的宽度。

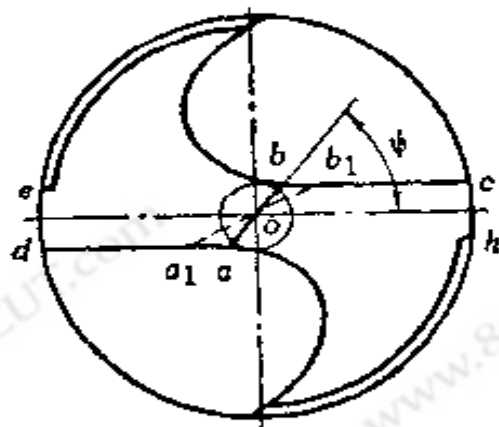


图 11 钻头切削部示意图

由于横刃或横刃中心相对于旋转轴的偏移而引起的钻头几何误差，会引起切削刃的不均匀工作和增加横刃的不利影响。在大负前角的情况下，横刃在旋转时将挤刮被加工材料，使钻头的负荷增大并发生

振动和折断。当把 ψ 角减小到 40° ，从而增加了横刃长度时，横刃的不利影响还要进一步增加。上述因素以及钻头硬度的明显变动(HRC 58~65)、钻心直径的变化和钻头装卡时产生的偏差，必然会引起钻头耐用度的显著变化。

当横刃中心相对于旋转轴偏移时，得到的结果特别令人不满意。例如，当 $e=0.08\sim0.15$ 毫米时，钻头是完全没有工作能力的。

为了消除误差和在刃磨时检查钻头的几何参数，设计和制造了图 12 所示的装置。这种装置利用了工具显微镜的一些部件：在立柱 1 上固定着显微镜台 2，在镜台上镗削的孔内固定显微镜的目镜 3 和物镜 4。利用工具显微镜的微调螺钉



图 12 安装在 3A64 型工具磨床上的装置图

可以很快把装置调整好并进行测量。镜头的清晰度是利用螺钉 6 沿底座 5 的导轨推移立柱并旋转物镜进行校正的。在显微镜的目镜内插有一张绘有钻头图(按照仪器放大倍数)的透明薄片, 因此可以迅速地确定钻头误差的性质并在可能时用刃磨消除它。由于放大 30 倍, 刃磨的检查就简易了。

由此可见, 采用精密刃磨的四刃带钻头, 钻小直径孔, 不仅可以显著地提高劳动生产率, 同时还可以提高钻头寿命和大大减少折断次数。

加工淬火高强度钢用的硬质合金铰刀和在异种材料的工件上对孔进行精加工用的铰刀

在淬火高强度钢(30XГCA, 30XГCHA, 9M643 和 BKC210 等)工件上加工精密孔时采用镶 T15K6 和 T30K4 硬质合金的铰刀。后一种硬质合金推荐用于 9M643 和 BKC210 钢件的加工。用 T30K4 硬质合金加工强度较低的钢($\sigma_b < 150$ 公斤/毫米²)是不合理的, 因为这种硬质合金在刀具磨削和刃磨时容易产生裂纹和崩刃。

只有钢的强度极限 $\sigma_b \leq 130$ 公斤/毫米²时, 才允许用高速钢刀具对精密孔进行精加工。这时得到的加工光洁度不超过 7 级。在选择刀具几何参数和切削用量时, 不仅要考虑被加工材料的物理机械性能, 而且要考虑具体的加工条件: 零件的尺寸和形状, 设备状态, 保证刀具冷却的可能性等。

图 13 所示为标准结构的硬质合金铰刀。在加工淬火钢工件时, 建议采用切削锥部刃磨成“锋利”刃口的铰刀。用环状刃磨铰刀加工淬火高强度钢是不适宜的, 因为工作时刀齿会折断。切削部的前角 γ 与被加工材料有关: 加工 30XГCA

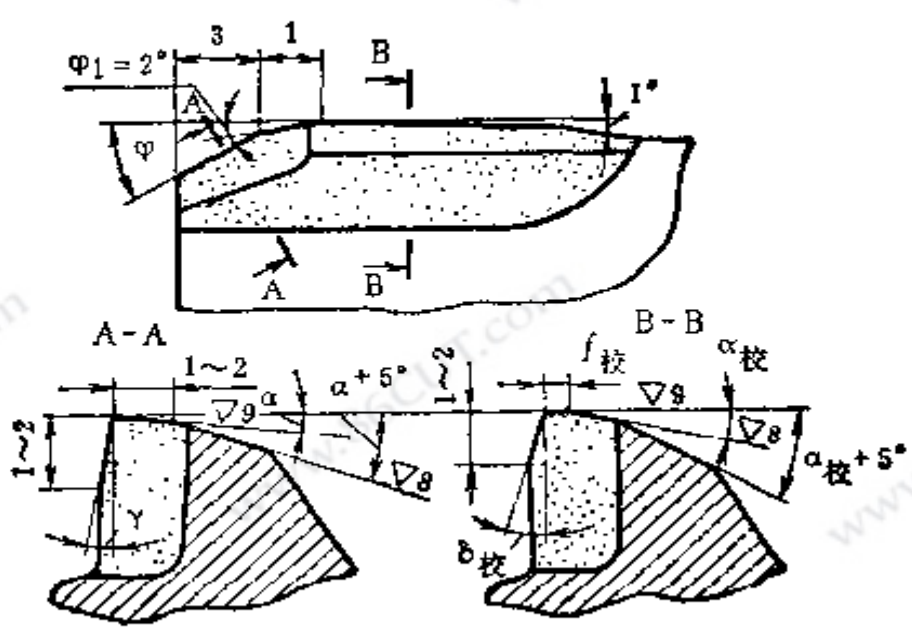


图 13 硬质合金铰刀的切削部分
(刀齿的跳动量在 $\varphi_1 = 2^\circ$ 的锥部和校准部不大于 0.01 毫米, 在偏角为 φ 的切削部不大于 0.02 毫米)

钢时 $\gamma = -5^\circ$, 加工 30XГЧА 钢时 $\gamma = -10^\circ \sim -15^\circ$, 加工 ЭИ643 和 БК210 钢时 $\gamma = -20^\circ$; 校准部的前角 $\gamma_{校} = -15^\circ \sim -25^\circ$ 。加大负前角可提高刀具的耐用度。后角 α 和 $\alpha_{校}$ 的大小主要与刀具的直径有关, 其对应关系为:

$\alpha = \alpha_{校}(\text{度})$	18	15	8
$D(\text{毫米})$	5	10	≥ 15

校准刃带的宽度 $f_{校}$ 应选择在 0.1~0.3 毫米范围内。减小刃带宽度会引起切削刃崩刃, 增加刃带宽度将导致表面粗糙度增加。

校准部反向锥度的大小对校准刃带的工作性能有影响。减小反向锥度, 将使校准部分的负荷增加, 即在形成已加工表面和表面层时的负荷值增加。但是, 在用硬质合金铰刀加工淬火钢工件时, 校准刃带的基本用途是在重磨时保持刀具的尺寸。假设在各次重磨时铰刀磨去部分的总长度 $l = 15$ 毫米,

那么,考虑到加工时直径的增加或减小,在100毫米长度上反向锥度的允许值就是:

$$\Delta_{k\max} = \frac{\delta_A - 5}{15} 100 \quad (\text{微米}) \quad (2)$$

$$\delta_A = 0.5a\sqrt[3]{d_{\Phi}}$$

式中 δ_A ——孔的制造公差;

a ——精度系数,二级精度时 $a=16$,三级精度时 $a=30$;

d_{Φ} ——在该尺寸所属尺寸范围内的中径。

二级精度铰刀的最大允许反向锥度:

$$\Delta_{k\max} = 53\sqrt[3]{d_{\Phi}} - 33 \quad (3)$$

三级精度铰刀的最大允许反向锥度:

$$\Delta_{k\max} = 100\sqrt[3]{d_{\Phi}} - 33 \quad (4)$$

按公式(3)和(4)的计算表明,在适当情况下,可以把每100毫米长度上 $\Delta_k=20\sim50$ 微米的反向锥度增加2~3倍。在 $D\leq 15$ 毫米的刀具和组合刀具上以及在加工浅孔时,推荐采用最大的反向锥度为:加工长工件时,在每100毫米长度上应为20~40微米。切削部分 φ 角的大小必须根据被加工孔的尺寸、工件壁厚、设备状态及其他条件选择。它不应小于下列某一最小允许值:

1. 以保证刀柄强度和切口最小允许厚度为条件的 φ 值 ($D\leq 10$ 毫米时):

$$M_{\text{切}} \leq M_{\text{允}} \quad (5)$$

$$a_s \geq \rho + \Delta_{\text{跳}} \quad (6)$$

式中 $M_{\text{允}}$ ——刀柄强度允许的力矩;

ρ ——刀齿切削刃刃口圆弧半径(为0.01毫米);

$\Delta_{\text{跳}}$ ——刀具切削部分刀齿的跳动量(为0.02毫米)。

根据上述数值可以把条件(6)写成:

$$s_z \sin \varphi \geq 0.03 \quad (7)$$

而把条件(5)写成:

$$\frac{C_{pz} s_z^{y_{pz}} t^{x_{pz}} \frac{D}{2} z}{0.1 d_0^3} \leq [\tau] \quad (8)$$

式中 d_0 ——刀柄直径。

取 $d_0 = kD$, $z = \frac{\pi D}{t_m}$, 用 s_z 在条件(7)中的值取代 s_z 并解方程(8)求 $\sin \varphi$, 这时得:

$$\sin \varphi \geq 0.03^{\frac{1}{y_{pz}}} \sqrt{\frac{C_{pz} \pi t^{x_{pz}}}{0.9 k^3 [\tau] t_m D}} \quad (9)$$

用 T15K6 硬质合金刀具(刀柄材料为 40X 钢)加工 30X-TCHA 钢工件($\sigma_b = 160$ 公斤/毫米²)时, 如取 $C_{pz} = 1.5$, $t_m = 6$ 毫米, $[\tau] = 30$ 公斤/毫米², $x_{pz} = 1.0$, $y_{pz} = 0.6$, $t = 0.1$ 毫米时 $k = 0.7$, 则 $D = 10$ 毫米时 $\varphi_{\min} \geq 6^\circ$, $D = 5$ 毫米时 $\varphi_{\min} \geq 20^\circ$ 。

2. 在加工深孔时以保证反进给方向排屑为条件确定的 φ 值。经验表明, 切屑排出的速度向量与刀具排屑槽的方向偏差越小, 排屑情况就越好。当刃倾角 $\lambda = 0^\circ$ 时, 切屑排出的速度 v_c 处在主截面内, 切屑被压向刀具排屑槽的表面。为了防止阻滞, 必须满足下面条件:

$$\lg \varphi \geq \mu \quad (10)$$

式中 μ ——切屑和刀具排屑槽之间的摩擦系数。

从条件(10)可知, 排屑槽没有抛光的刀具其 φ 角必须选得大些。

铰孔时的切削深度应根据预加工孔的形状偏差和表面硬化层的厚度确定。这时, 最好保证铰刀校准部分不在孔的硬化层上工作。

为此,应取切削深度 $t = B\sqrt[3]{d} \geq 0.05$ 毫米, 式中系数 $B \approx 0.04$ 。

进给量根据工件形状和尺寸确定。在加工孔径与工件外径之比 $k = \frac{d}{D_{\text{外}}} \geq 0.7$ 的薄壁工件时, 工件有相当大的弹性变形和孔径收缩。因此, 在加工这类工件时, 每个刀齿的进给量必须选得小些 ($s_z = 0.05 \sim 0.08$ 毫米)。在加工厚壁长工件 ($\frac{d}{D_{\text{外}}} \leq 0.6$) 时, 切削周期长, 建议把每个刀齿的进给量选得大些 ($s_z = 0.15 \sim 0.2$ 毫米)。在所有各种情况下都不宜把进给量减小到 0.05 毫米以下, 或把它增大到 0.30 毫米以上, 因为进给量太小加工时通常会发生振动, 而进给量太大将折断铰刀的切削齿。

确定切削速度, 应考虑保证加工表面光洁度不低于 7 级和保证刀具的规定耐用度。用 T15K6 硬质合金铰刀加工时的切削用量列于表 6。

表 6 铰孔时的切削用量

被加工材料	σ_b (公斤/毫米 ²)	s_z (毫米/齿)	v (米/分)
30X1CA	110~130	0.05~0.3	100~60
30X1CHA	140~160	0.05~0.2	50~30
ЭИ643	190~215	0.05~0.2	45~25
БКС210	210~220	0.05~0.2	45~20

在许多情况下, 在产品装配时, 必须在若干个用不同材料 (例如淬火高强度钢、钛合金和铝合金) 制造的零件上同时加工孔。在这种情况下, 不可能针对每种材料规定合理的切削用量和刀具几何参数。这时必须用手工或借助手提钻进行加工。

在不同材料(其中包括淬火高强度钢)的工件上加工孔的效率和质量都与刀具的结构和质量有很大关系。图14所示是在异种材料的工件上加工孔时使用的铰刀。这种铰刀具有前导部、后导部和小的切削锥角($\varphi=1^{\circ}\sim 2^{\circ}$),这样可以保证刀具工作时有良好的导向性能。在前、后引导部上都做有排屑槽,可保证切屑顺利排出,为刀具工作时的润滑提供了可能性,并可改善刀具前面的刃磨条件。

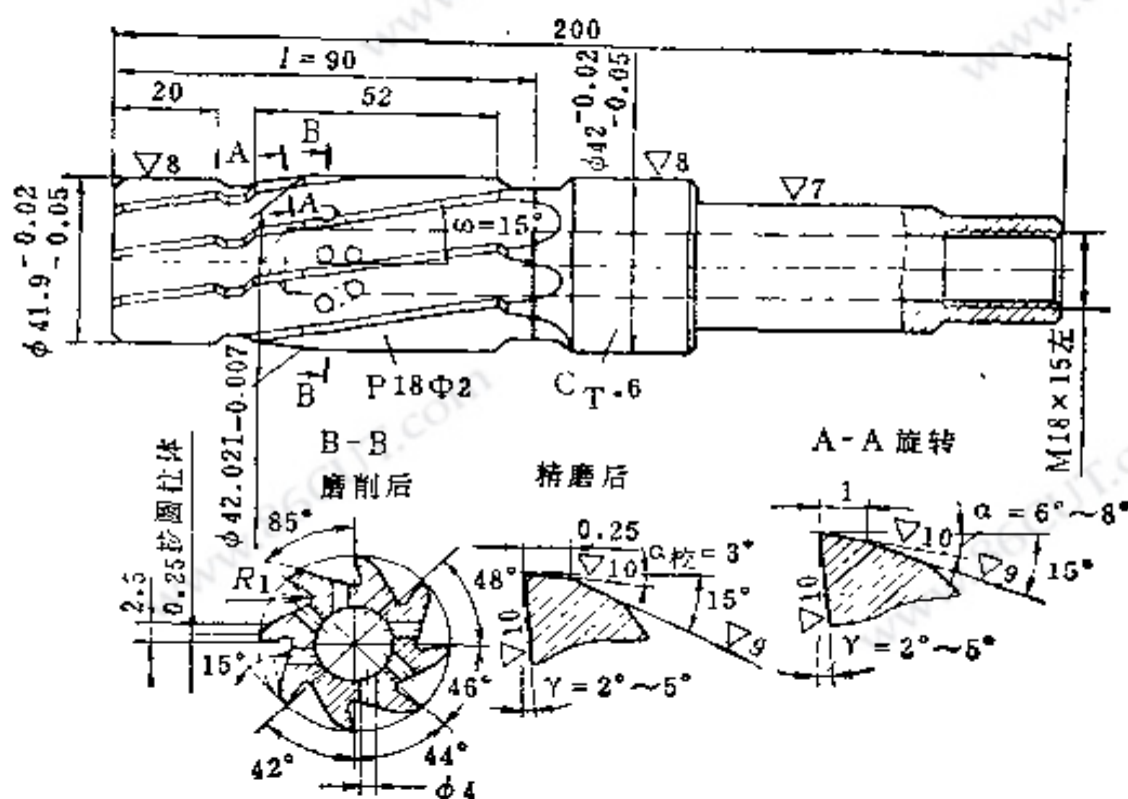


图14 在异种材料的工件上精铰孔用的手用铰刀

把校准部分刃磨成锋利的刃口,不要圆柱形的刃带,而用后角 $\alpha_{\text{后}}=2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 、宽度0.1~0.2毫米的后面代替它。这样可以减小切削力和在所有材料上获得高的加工光洁度等级,而且在孔内的异种金属对接处也不会形成台阶(用带圆柱形刃带的铰刀工作时就会形成台阶)。校准部分后角的最小允许值可按图15确定;

$$\sin \alpha_{\min} \approx \alpha_{\min} = \frac{b}{D}$$

$$b = b_1 + \frac{D_{\text{最大}} - D}{2} \operatorname{ctg} \alpha$$

$$D_{\text{最大}} - D = 0.04 \text{ 毫米}$$

式中 $D_{\text{最大}}$ ——磨锐前铰刀的直径；

$b = b_1 + 0.1$ 毫米；当 $b_1 = 0.1$ 毫米时 $b = 0.2$ 毫米。

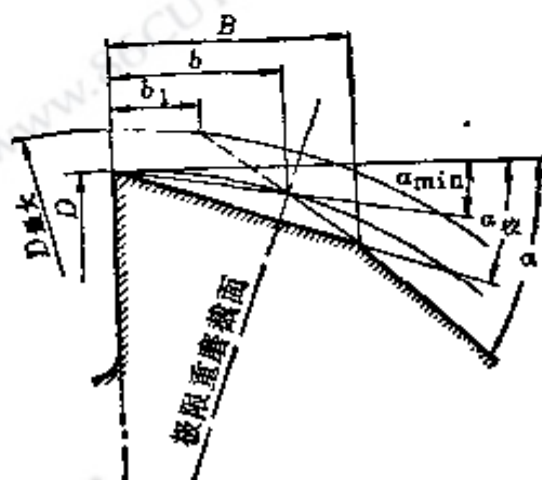


图 15 磨锐的铰刀校准部分后角的最佳值

$$\alpha_{\text{校}} \approx \sin \alpha_{\text{校}} = \frac{2b}{D}$$

铰刀的校准部分是沿前面刃磨的。如果磨去层厚度为 b ，则铰刀直径减小为

$$\Delta D = 2b(\alpha_{\text{校}} - \alpha_{\min}) \frac{2b^2}{D}$$

当 $b = 0.1$ 毫米和 $D = 10$ 毫米时， $\Delta D = 2$ 微米；当 $b = 0.2$ 毫米和 $D = 20$ 毫米时， $\Delta D = 4$ 微米。

从上述计算可知，磨锐的铰刀沿校准部分可以重磨一次。因此，就尺寸稳定性来说，校准部磨锐的铰刀不如标准几何参数的铰刀。

在加工淬火高强度钢工件时，提高刀具的耐用度具有头

等意义。刀具的磨损会导致已加工表面粗糙度增加。因此后面的允许磨损不应超过 0.4 毫米。用 P18 Φ 2 和 P9K5 高速钢制造铰刀可以保证铰刀有足够的耐用度。P18 高速钢刀具在 $t = -80^{\circ}\text{C}$ 下冷处理后也可以提高耐用度。在所有情况下都应保证构成铰刀切削刃的各个工作面的高质量。因此在刃磨铰刀的切削刃时,不允许存在烧伤和低硬度(HRC56)的脱碳层。为了消除脱碳层对刀具耐用度的影响,建议每面留 0.6 毫米的加工余量,并且沿着同切削刃毗邻的窄棱面进行刃磨。铰孔时的切削深度应大于硬化层的深度($\Delta_{\text{硬化}} = 0.05$ 毫米)。用高速钢刀具加工淬火钢时,速度不应超过 2 米/分。手工铰孔时的进给量应为每齿 0.5~1 毫米。

按螺纹牙形角修正的丝锥及其在加工淬火钢、高温合金和钛合金时的效果

加工高强度钢、高温合金和钛合金时,发生的困难最明显地表现在用丝锥攻螺纹时。

丝锥的工作条件(图 16)非常困难:有大量的刀齿同时参加工作;刀具与工件不仅在切削区接触,而且在不工作的侧面也要接触,这样,不论是单个切削齿还是整个丝锥强度都比较差,特别是在攻小直径和小螺距的螺纹时问题更大;此外,冷却润滑液也不易到达切削区,等等。

刀具与工件的接触面积增大,冷却润滑又不充分,再加上耐热材料的硬化倾向较高,这就必然会增加摩擦力矩和摩擦功,因而引起切削温度升高和丝锥的强烈磨损。此外,螺纹扣的弹性后效(特别是在加工弹性模数低的钛合金时)会产生相当大的法向力 N , 它能把丝锥齿夹在螺纹底部,并使总扭转力矩增大。其结果是,用丝锥在高温合金和钛合金上攻螺纹时,

丝锥的某些刀齿将发生碎裂和崩刃,甚至丝锥被折断。

攻螺纹时,提高刀具耐用度和劳动生产率的方法是采用 P9K5、P9L5、P10K5Φ5 和 P18Φ4K8M 等改进型高速钢(它们具有较高的硬度和红硬性)。也可采用硬质合金,用来制造小直径整体丝锥,或用于大直径丝锥的镶齿。此外,也应考虑改进丝锥的结构。

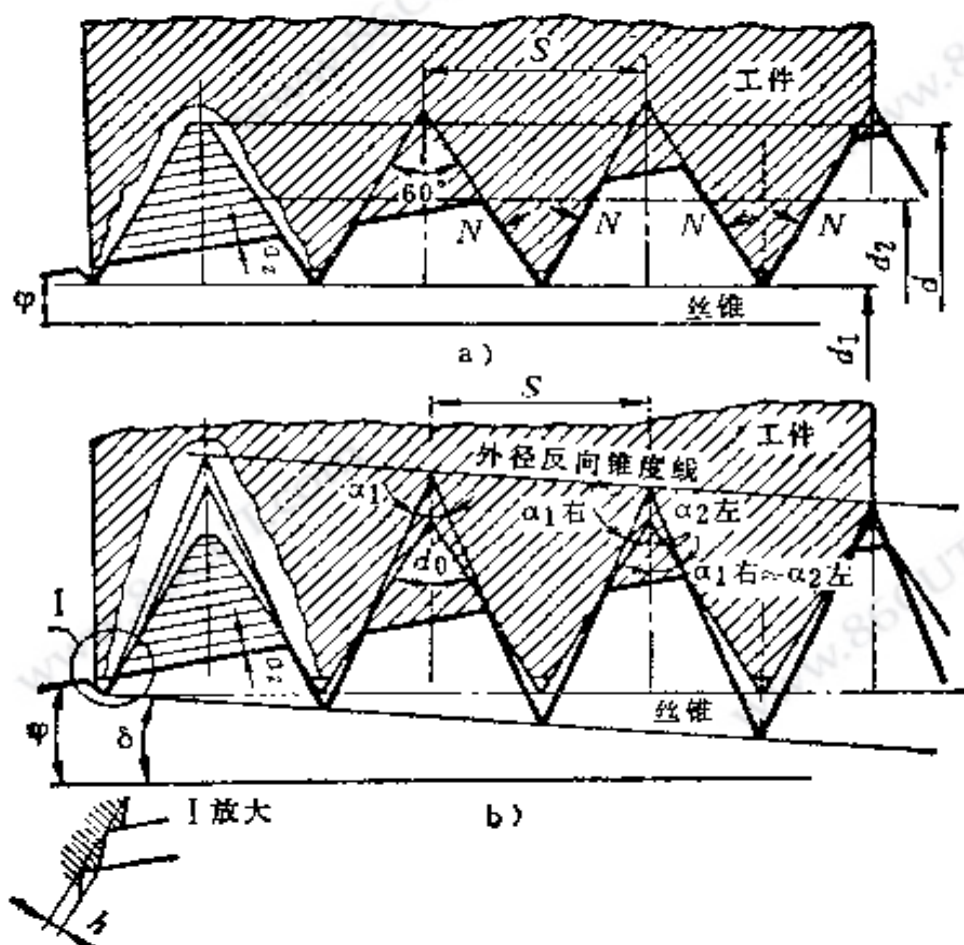


图 16 用标准丝锥 (a) 和修正齿丝锥 (b) 的切削图形

在淬火高强度钢、高温合金和钛合金工件上攻螺纹时,采用牙形角小于被切螺纹牙形角的修正齿丝锥,可以获得良好结果。这时在被加工材料和丝锥切削齿侧面之间形成间隙,从而可以减小摩擦力矩,使丝锥齿不致被夹在螺纹底部,并能

促进润滑冷却液较好地渗入切削区。

按丝锥中径取反向锥度后就能得到规定的螺纹牙形。反向锥角可以按下式计算：

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \varphi \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} - 1 \right) \quad (11)$$

式中 δ ——反向锥角；

φ ——切削锥角；

α_0 和 α_1 ——分别为螺纹和丝锥的牙形角。

攻公制螺纹时($\alpha_0 = 60^\circ$)的丝锥牙形角 $\alpha_1 = 55^\circ$ ，这可以保证在丝锥齿和工件之间有充分的间隙，并允许用检查英制螺纹用的量具检查丝锥的中径。

图 17 所示为修正齿丝锥，其基本尺寸和适用范围列于表 7。

修正齿丝锥在加工高温合金和钛合金时的使用效果已为一些研究结果所证实。在 XH77TKOP 高温合金工件上攻

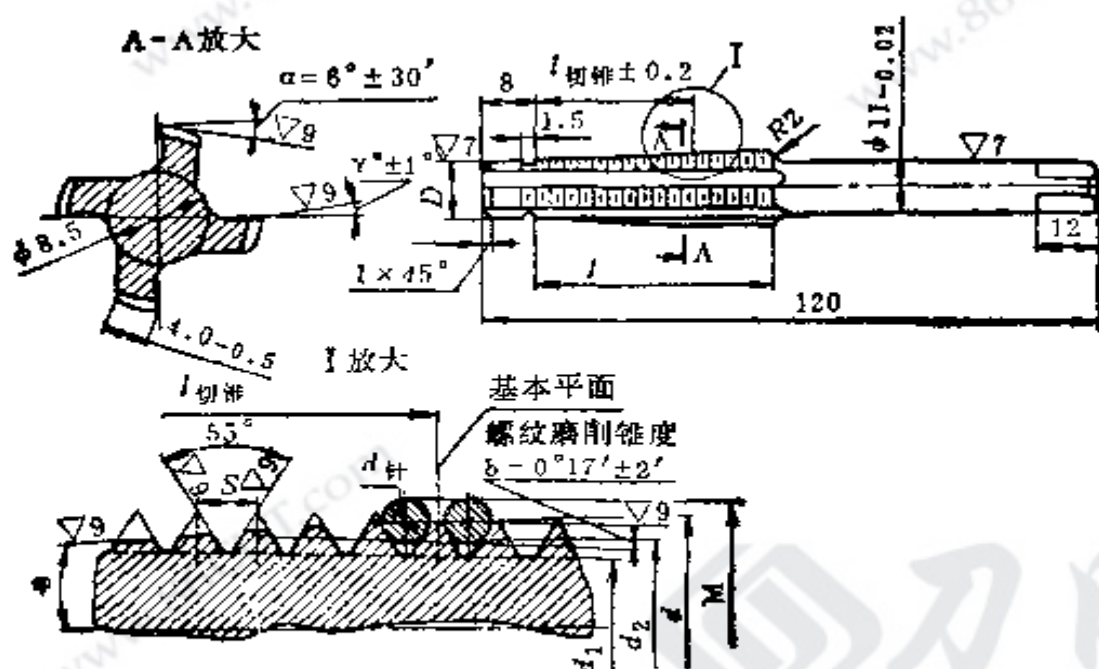


图 17 修正齿丝锥的结构

表7 修正齿丝锥的基本尺寸和适用范围

($d=6\sim42$ 毫米, $s=1\sim2$ 毫米, $z=3\sim4$)

切削锥角 φ	δ (分)	$l_{\text{切锥}}$ (毫米)	l (毫米)	被加工材料
$2^{\circ}30'\sim5^{\circ}$	17~33	10.5~7.5	25~15	耐热钢, 热强钢和淬火高强度钢
$5^{\circ}\sim7^{\circ}30'$	33~49	7.5~4.5	15~10	镍基高温合金和钛合金

注: 在攻 16×4 和 24×5 梯形螺纹时修正齿丝锥也得到了应用。

M14 \times 1.5 螺纹时得到的扭矩波形图如图 18 所示。修正齿丝锥与标准丝锥相比可降低扭转力矩 30~35%, 与交错齿丝锥相比可降低扭转力矩 20~25%。在用不同切削锥角 ($\varphi=2^{\circ}30'\sim9^{\circ}30'$) 的丝锥加工 X18H10T 耐热钢和 BT6 钛合金时也得到了类似结果。

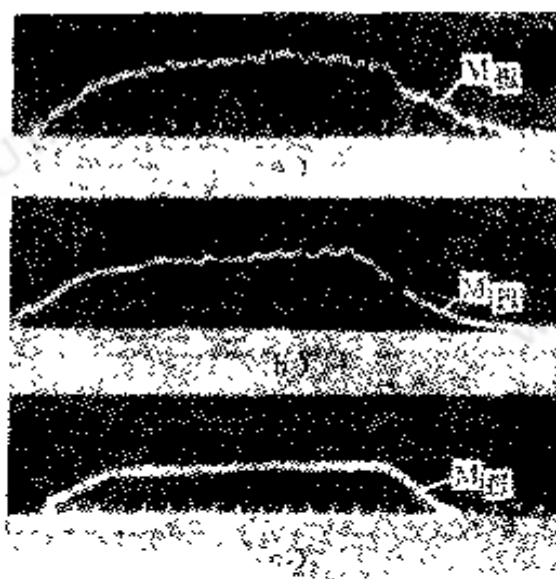


图 18 扭转力矩波形图(X18H10T, 丝锥 M14 \times 1.5;
 $\varphi=7^{\circ}30'$, $\gamma=7^{\circ}$, $\alpha=9^{\circ}$, $z=3$)

a) 标准丝锥 b) 交错齿丝锥 c) 修正齿丝锥

由于钛合金的弹性模数小, 屈服极限与强度极限的比值大, 攻丝时被攻螺纹扣和孔本身的弹性后效将产生相当大的

力。因此,使用修正齿丝锥加工钛合金非常有效。

齿侧面摩擦的减小和润滑冷却液效率的提高使修正齿丝锥的切削温度比标准丝锥的下降 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。用自然热电偶和切削热电偶测温时得到的结果证实了这一点。

减小扭转力矩和切削温度可以提高丝锥的耐用度。在研究耐用度时,用丝锥在长度 $l = (1.5 \sim 2)d$ 的通孔内攻制了二级精度的螺纹。磨钝标准采用后面磨损 $h_{\text{后}} = 0.2 \sim 0.25$ 毫米。丝锥用 P18、P18Φ2、P9K5 和 P9Φ5 高速钢制造,几何参数是: $\gamma = 0^{\circ} \sim 12^{\circ}$, $\alpha = 5^{\circ} \sim 12^{\circ}$, $\varphi = 1^{\circ}30' \sim 9^{\circ}30'$, $z = 3 \sim 4$ 。用 P9K5 高速钢 (HRC 65~67, 碳化物偏析不超过 2 级) 制造的丝锥具有最好的耐用度,丝锥的合理几何参数是: $\gamma = 7^{\circ}$, $\alpha = 8^{\circ} \sim 10^{\circ}$, $\varphi = 2^{\circ}30' \sim 7^{\circ}30'$ (较小值适用于耐热钢和热强钢,较大值适用于高温合金和钛合金)。

表 8 列出了不同结构的丝锥在加工 X18H10T 钢、XH77-TiOP 合金、BT6 和 BT8 钛合金以及 30X1C11A 淬火钢时的耐用度。

表 8 不同结构的丝锥的耐用度

(螺纹 M14×1.5, P9K5 高速钢丝锥, $z=3$, 硫化油, $Q=6 \sim 8$ 升/分)

被加工材料	丝锥 切削 锥角	切削 速度 v (米/分)	丝 锥					
			标准丝锥		交错齿丝锥		修正齿丝锥	
			T (分)	孔数	T (分)	孔数	T (分)	孔数
X18H10T	$2^{\circ}30'$	23.4	10	240	20	430	55	1320
XH77TiOP	5°	6.2	—	7~10	1.5	15	18.5	185
BT6	$7^{\circ}30'$	8.6	1.5	18	4.5	51	45	540
BT8	$2^{\circ}30'$	8.6	—	—	0.8	11	8	114
30X1C11A ($\sigma_b = 140 \sim 160$ 公斤/毫米 ²)	$2^{\circ}30'$	2.0	20	28	10	14	36	54

用修正齿丝锥在 X18H10T 钢工件上攻螺纹时的切削速度:

$$v = \frac{17.7d^{0.5}}{T^{0.44}s^{0.5}\sin^{0.2}\varphi} k_{u_v} k_{o_v} k_{z_v} k_{h_{\text{E}}v}$$

公式适用于 $d=6\sim 42$ 毫米和 $s=1.0\sim 2.0$ 毫米的螺纹。系数 k_{u_v} , k_{z_v} , $k_{h_{\text{E}}v}$ 考虑了工具材料、润滑冷却液、丝锥刃数和所采用磨钝标准的影响:

工具材料	P9K5	P18	P9Φ5	P18Φ2
k_{u_v}	1	0.84	0.86	0.9
允许磨损 h_{E} (毫米)	0.15	0.17	0.2	
$k_{h_{\text{E}}}$	0.9	1	1.3	

丝锥为三刃时 $k_{z_v}=1$, 丝锥为四刃时 $k_{z_v}=1.04$ 。

系数 k_{o_v} 根据润滑冷却液确定: 采用硫化油时 ($Q=6\sim 8$ 升/分) $k_{o_v}=1$; 采用 34% 蓖麻油、33% 阿利夫油和 33% 硫组成的混合液时 $k_{o_v}=0.96$; 采用 60% 硫化油、25% 煤油和 15% 油脂酸组成的混合液时 ($Q=6\sim 8$ 升/分) $k_{o_v}=0.74$; 用硫化油时 $k_{o_v}=0.45$; 用油脂酸时 $k_{o_v}=0.38$ 。

用 P9K5 高速钢修正齿丝锥在 X18H10T 钢工件上攻螺纹时 ($\varphi=2^\circ 30'$, $z=3$, $h_{\text{E}}=0.17$ 毫米, 硫化油, $Q=6\sim 8$ 升/分, $T=20$ 分), 推荐采用下列切削速度:

螺 纹	v (米/分)	螺 纹	v (米/分)
M6×1.0	20	M14×1.0	30
M8×1.25	19	M14×1.5	23
M10×1.5	20	M14×2.0	21

研究的其他几种材料的可加工性, 与 X18H10T 钢的可加工性相比, 可用系数 k_v 表示:

被加工材料 X18H10T ЭИ654 X12H20T3P XH77TKOP BT6 BT5

k_0 1.0 0.46 0.20 0.17 0.18 0.46

试验表明，在盲孔内攻螺纹时采用修正齿丝锥也是成功的。例如，图19列出了在ЖСЗДК高温合金壳体零件上攻紧固螺纹 M10×1.5 的成套修正齿丝锥。这套修正齿丝锥由二件组成(表9)，它们的中径是相同的，只是外径和切削锥角不同($\varphi_I = 5^\circ$, $\varphi_{II} = 7^\circ 30'$)。当丝锥牙形角 $\alpha_1 = 55^\circ$ 时，按公式(11)计算的反向锥角分别为 $0^\circ 33'$ 和 $0^\circ 50'$ 。

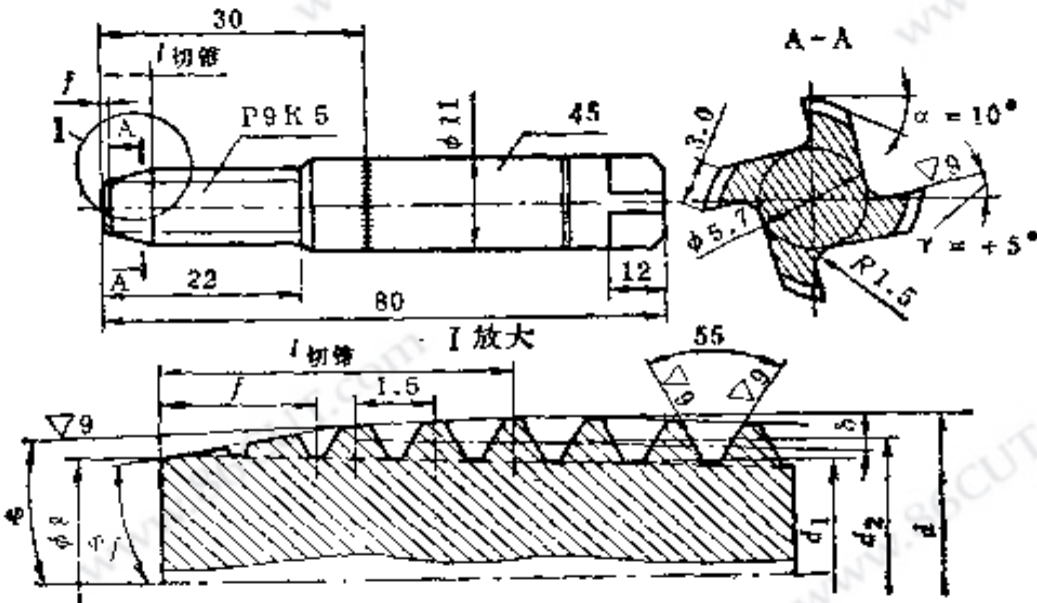


图 19 攻紧固螺纹用的成套修正齿丝锥

表 9 在盲孔内攻螺纹的丝锥几何参数

($d_1 = 8.1$ 毫米, $d_2 = 8.975$ 毫米)

成套丝锥	$d_{0.05}$ (毫米)	$l_{0.05}$ (毫米)	φ	φ_f	δ
I	9.5	5.1	5°	—	$0^\circ 33'$
II	10.07	4.1	$7^\circ 30'$	10°	$0^\circ 50'$

这套丝锥中的第二把具有双重切削锥，即偏角为 $7^\circ 30'$ 的主切削锥和 $\varphi_f = 10^\circ$ 的倒锥。而倒锥可使丝锥顺利地进入已攻出的螺纹内。双重切削锥可能减小精整丝锥的切削锥角，

这有助于减小切削厚度和降低切削齿的负荷。在 $v=1$ 米/分的速度下攻螺纹时, 这种丝锥的耐用度相当于攻 40 个孔, 锋刃锥背丝锥相当于攻 20 个孔, 而标准丝锥只能攻 2~3 个孔。

这种丝锥在 30X1CA 和 30X1CHA 淬火钢工件上攻盲孔螺纹时也获得了良好结果。为了攻 $M33 \times 1.5$ 的螺纹, 制造了由 4~5 件校正丝锥组成的成套丝锥。这套丝锥的外径和切削部分长度都不相同, 而且从第三把起所有丝锥都具有双重切削锥。

在攻盲孔螺纹时, 螺纹退刀扣的允许值决定了细牙丝锥的工作能力。在热强材料和高强度材料上攻螺纹时, 退刀扣的尺寸应根据丝锥的正常工作条件决定, 并可增大。

用修正齿丝锥攻出的螺纹牙形上仍有未切去的梳形刀痕, 其高度为:

$$h = \frac{S}{z} \sin \varphi \frac{\sin \theta}{\cos \delta} \quad (12)$$

式中 $\theta = \frac{\alpha_0}{2} - \frac{\alpha_1}{2}$; $\delta = \frac{\alpha_1}{2} + \varphi$ 。

因螺纹牙形角和丝锥牙形角不一致而产生的不平的高度是不大的, 它相当于 7~8 级光洁度。例如在用 $z=3$ 、 $\varphi=9^\circ 30'$ 和 $\alpha_1=55^\circ$ 的校正丝锥攻制螺距 $S=1.5$ 毫米的螺纹时, 不平度的计算高度等于 4.5 微米, 即相当于 7 级光洁度。

螺纹表面粗糙度是用 «ВЭИ-Калибр» 测表面光洁度轮廓图仪-表面光度仪测量的。记录了标准丝锥和修正齿丝锥攻制的螺纹表面的面型图(图 20)。对比这些面型图证实了理论计算的正确, 而且从中可以看出, 虽然丝锥牙形角和螺纹牙形角不同, 但采用修正齿丝锥并未增加表面粗糙度。

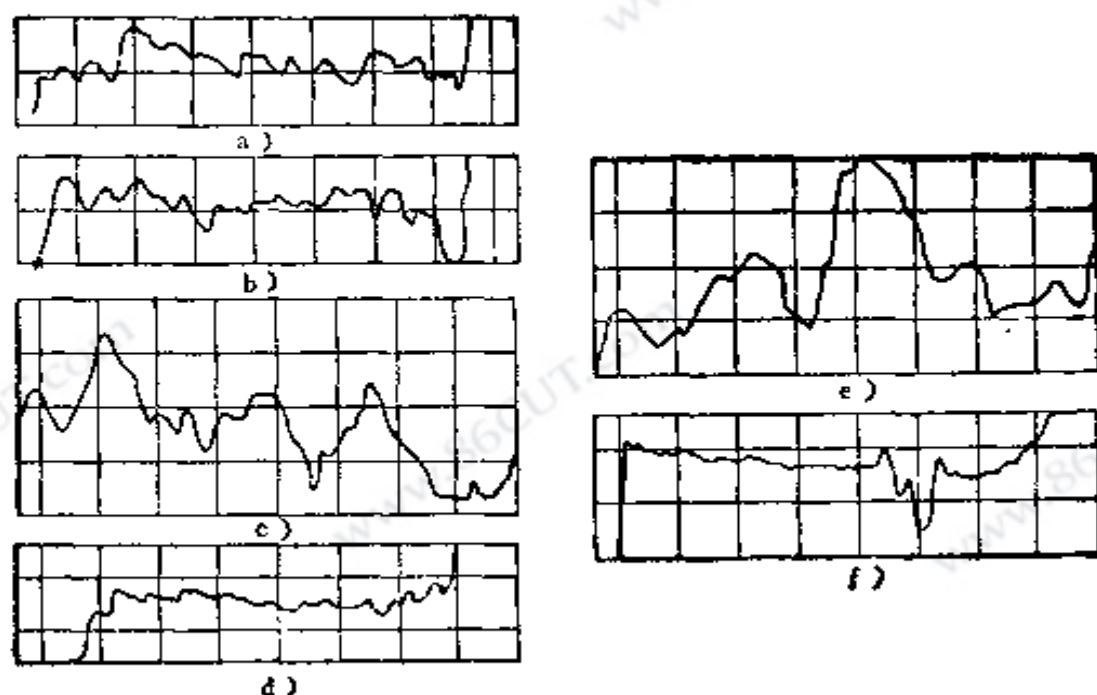


图 20 螺纹表面面型图(条件见表 10⊖)

- a) 标准丝锥, $v=8\sim6$ 米/分 b) 修正齿丝锥, $v=8\sim6$ 米/分
c) 标准丝锥, $v=12.1$ 米/分 d) 修正齿丝锥, $v=12.1$ 米/分
e) 标准丝锥, $v=23.4$ 米/分 f) 修正齿丝锥, $v=23.4$ 米/分

表 10 螺纹表面的微观不平度高度和光洁度等级

(X18H10T, 丝锥 $M14\times1.5$, $\varphi=2^\circ30'$, $\gamma=7^\circ$, $\alpha=9^\circ$, $z=3$,
 $h_R=0.1$ 毫米, 硫化油, $Q=6\sim8$ 升/分)

切削速度 v (米/分)	标准丝锥		修正齿丝锥	
	不平度高度 R_z (微米)	光 洁 度 等 级	不平度高度 R_z (微米)	光 洁 度 等 级
8.6	4.6	7	4.6	7
12.1	15.6	5	2.8	8
23.4	12.6	5	1.8	8

用 $\varphi=2^\circ30'$ 的修正齿丝锥在 X18H10T 钢工件上攻螺纹时, 表面粗糙度平均相当于 6~8 级光洁度。在 $v=12\sim23$ 米/分的切削速度下, 修正齿丝锥比标准丝锥能保证更高的光

⊖ 原文为表 13——译者。

光洁度等级(表 10)。在 XH77TiOP 合金和 BT6 钛合金工件上攻螺纹时,由于刀瘤形成比较缓慢,因此达到的表面光洁度等级比加工 X18H10T 钢时要高些。

用修正齿丝锥攻制的螺纹精度用界限螺纹量规在工具显微镜上进行检验。修正齿丝锥在齿后面磨损到 $h_{\text{后}}=0.25\sim 0.3$ 毫米以前能保证螺纹精度在 $2a\sim 1$ 级范围内,而且不会引起螺纹牙形角的附加误差:牙形半角的偏差不超过 $\pm 30'\sim 60'$,而且不管用什么丝锥攻螺纹,偏差都是一样的。牙形半角的偏差主要是由过程本身的误差(即切削部分切入时过大的轴向力、丝锥切削刃的扭曲和跳动以及生成刀瘤等)引起螺纹牙形畸变造成的。

转动螺纹磨床的工作台或移动后顶尖把修正齿丝锥上的螺纹磨成带反向锥度的;这时把砂轮修磨成 55° 角。如果由于移动后顶尖得到了反向锥度,那么,在反向锥角颇大($30'\sim 60'$)时,必须把砂轮修磨成不对称的:把左半边修磨成 $\alpha_{\text{左}}=27^\circ 30' - \delta$,把右半边修磨成 $\alpha_{\text{右}}=27^\circ 30' + \delta$ (δ 为反向锥角)。

丝锥外径、中径和内径的测量方法和检验锥形螺纹塞规时的方法一样。丝锥的中径可以在工具显微镜上用牙形角为 55° 的分划板测量,也可以用三针测量。攻公制螺纹的修正齿丝锥的中径为:

$$d_{2\text{修}} = d_2 - 0.0706S \quad (13)$$

式中 d_2 ——螺纹中径;

S ——螺距。

用三针测量的尺寸按英制螺纹的计算方法计算:

$$M = d_{2\text{修}} + \Delta \quad (14)$$

式中 $\Delta = 3.165d_{\text{针}} - 0.9605S$;

$d_{\text{针}}$ ——三针的直径(毫米)。

请通过连接下载全部：http://holybook.86cut.com/sj/djsj_index10.html