

金属切削理论与实践

下 册

第二分册

北京市《金属切削理论与实践》编委会

INSHU QIEXIAO LILUN YU SHIJIAN

北 京 出 版 社

金属切削理论与实践

下 册

第 二 分 册

北京市《金属切削理论与实践》编委会



北 京 出 版 社

目 录

第二十章	拉 削	(657)
第一节	拉削过程特点和拉刀	(657)
第二节	切屑的形成及拉削方式	(662)
第三节	拉刀的几何参数	(669)
第四节	拉削力	(678)
第五节	拉刀的磨损、拉削用量和表面质量	(685)
第六节	难加工材料的拉削	(692)
第二十一章	螺纹加工	(701)
第一节	螺纹车削	(701)
第二节	旋风切削螺纹	(722)
第三节	攻丝	(755)
第四节	螺纹滚压加工	(783)
第二十二章	齿轮加工	(805)
第一节	摆线圆柱齿轮的啮合特点	(805)
第二节	铣齿	(815)
第三节	滚齿	(825)
第四节	插齿	(847)
第五节	圆柱齿轮的其他加工方法	(857)
第六节	锥齿轮加工	(878)
第二十三章	磨 削	(899)
第一节	磨削运动	(899)
第二节	砂轮	(903)
第三节	磨削过程	(915)
第四节	切削厚度	(930)

第五节	磨削力和控制力磨削	(940)
第六节	磨削热	(954)
第七节	磨削表面质量	(963)
第八节	磨削用量和冷却润滑	(973)
第九节	高效率磨削	(982)
第十节	高光洁度磨削	(1000)
第十一节	金刚石砂轮磨削	(1011)
第十二节	不锈钢和有色金属的磨削	(1021)
第二十四章	光整和精整	(1031)
第一节	珩磨	(1031)
第二节	超精加工	(1042)
第三节	研磨	(1063)
第四节	抛光	(1076)
附录:		(1089)
	国际标准 [ISO 3002/I-1977(E)] 关于金属切削的主要外文 术语与本书所用汉文术语对照表	(1089)
	参考书刊	(1102)

第二十章 拉 削

第一节 拉削过程特点和拉刀

拉削加工从切削性质上看,近似于插削和刨削。拉刀是一种多齿的金属切削刀具。拉削过程只有主运动,没有进给运动,借助后一刀齿对于前一刀齿增加齿宽或齿高来实现切削加工。被加工表面的形状和尺寸由拉刀最后几个校准刀齿来保证。因此,它是一种高精度、高效率的先进加工方法。拉削的运用范围很广,

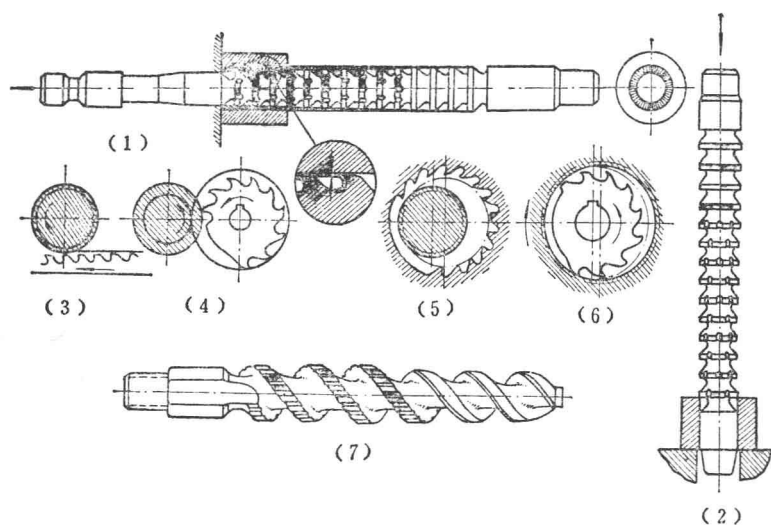


图 20-1 拉削示意图

它可以加工各种截面形状的通孔和各种特殊形状的外表面等，如表 20-2、3 所示。

由图 20-1 可看出拉刀有各种类型，按工作施力情况不同可分为拉刀(图 20-1₍₁₎)和推刀(或称压刀图 20-1₍₂₎)；按加工表面特征不同，可分为拉削各种形状的通孔(封闭廓形)的内拉刀(图 20-1₍₁₎、₍₂₎)和拉削外表面(非封闭廓形)的外拉刀(图 20-1₍₃₎、₍₄₎)；按拉削运动情况不同，可分为直线切削的拉刀和迴转切削的拉刀(图 20-1₍₃₎、₍₄₎、₍₅₎、₍₆₎)以及深孔拉刀(图 20-1₍₇₎)。

一、拉削特点

1. 拉削属于封闭式切削，在切削过程中，切屑不可能从拉刀的齿槽中排出，而是全部或大部容纳在齿槽中，当刀齿切离工件表面后，切屑才能排除。

2. 拉刀是多刃刀具，同时参加切削的刀刃长度较长，切下金属多，一次拉削可完成粗、精加工，因此，它是一种高效率的加工方法。拉削孔径范围在 3~400 毫米，一般拉削加工孔径为

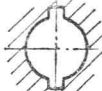
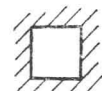
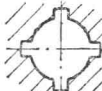
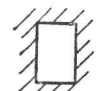
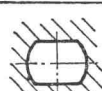
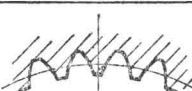
表 20-1 拉削能达到的精度与光洁度

加工面 加工条件		圆 孔	键 槽	花 键 孔	齿轮齿形	平 面
一 般	精度(级)	2~4	5	4~5	7~8	7~8
	光 洁 度	▽6~▽7	▽4~▽5	▽5~▽6	▽5~▽6	▽4~▽6
特 殊	精度(级)	1	4	3	5~6	5~6
	光 洁 度	▽8~▽10	▽6~▽7	▽6~▽8	▽6~▽8	▽6~▽7
备 注		拉刀带挤压环或采用螺旋齿拉刀	拉刀带侧刃	整形拉刀	整形拉刀	采用斜齿拉刀或高速拉削

10~100 毫米；孔深一般不超过孔径的 3~5 倍，但深孔拉削可达 10 米；拉削键槽宽度 1.5~100 毫米。

3. 拉削速度较低，一般为 2~8 米/分，拉削过程平稳，切削层的厚度很薄，因此可得到较高加工精度(一般可达 2 级)和光洁度(一般可达 $\nabla 5 \sim \nabla 7$)。若拉刀尾部装有挤压环进行复合拉

表 20-2 拉削各种内孔形状图例

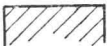
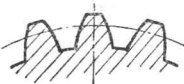
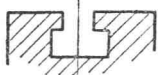
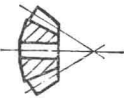
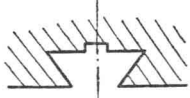
内 孔 截 形	名 称	内 孔 截 形	名 称
	圆 孔		键 槽 孔
	三 角 孔		双 键 孔
	方 孔		四 键 孔
	长 方 孔		花 键 孔
	六 角 孔		花 键 孔
	多 边 孔		尖齿花键孔
	鼓 形 孔		渐开线花键孔、内齿轮

削时,甚至可达1级精度和 $\nabla 8 \sim \nabla 10$ 的光洁度。由于硬质合金、新型高速钢在拉刀上的采用,高速拉削(v 可达到50米/分)也日益得到推广。

几种典型的拉削加工所能达到的精度及表面光洁度如表20-1所列。

4. 内拉削可加工各种形状孔形,如表20-2所示;外拉削也可加工各种特形表面,如表20-3所示,特别是对航空发动机涡轮盘上的榫槽和叶片榫头,以及汽车拖拉机的发动机汽缸体、连杆等平面和成形面的加工,采用拉削方式,无论在精度和生产效率上都可得到良好的效果。

表 20-3 拉削各种外表面形状图例

外表面形状	名称	外表面形状	名称
	平面		叶片榫头
	成形曲面		圆柱齿轮
	T型槽		直齿锥齿轮
	榫槽		螺旋锥齿轮 ($i \geq 3$ 大齿轮)
	燕尾槽		燕尾头

二、拉刀的组成

以内孔拉刀为例，一般可分如下几个部分，如图 20-2 所示。

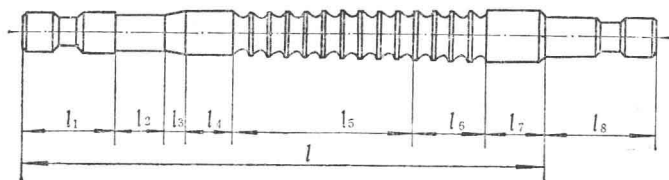


图 20-2 内孔拉刀的组成

1. 柄部 l_1 柄部是拉刀与拉床连接部分，用以夹持拉刀，传递动力。

2. 颈部 l_2 颈部的直径尺寸通常较其它部位小些，如果拉刀折断时，希望断在这个部位，以便修复。但实际上往往并不在此折断，因此颈部也可与柄部直径相同。

3. 过渡锥 l_3 过渡锥的作用是使拉刀容易进入工件的孔内。

4. 前导部 l_4 其断面形状与予制孔截形相同，尺寸略小，保证工作时工件能平稳地、不发生歪斜地过渡到切削部分，并可检查拉前孔径的大小，以免第一个刀齿负载过大，使拉刀损坏。

5. 切削部 l_5 切削部刀齿(包括粗切齿、精切齿)担负切去全部加工余量的工作。

6. 校准部 l_6 其刀齿较少，起到刮光、校正的作用，从而提高尺寸精度和光洁度。当切削齿经过多次刃磨尺寸变小后，前几个校准齿依次变成切削齿，故它具有切削部分后备的作用。

7. 后导部 l_7 它用来保持拉刀刀齿切离工件后，刀具与工件之间的正确位置，防止工件由于自重而一端下垂，刮伤被加工表面和损坏刀齿。

8. 后柄部 l_8 只用于直径较大或长度过长的拉刀，为防止拉

刀因自重下垂，增加一个固定支承部，工作时它支承在滑动托架上，这样可减轻操作时的劳动强度和便于实现上下料自动化。

第二节 切屑的形成及拉削方式

一、切屑的形成^①

拉削通常是封闭式切削过程，排屑及冷却比较困难。因此，有必要深入地研究拉削过程中切屑形成的特点，以便合理确定拉刀几何参数，保证正常切削。

1. 切屑的卷曲对拉削的影响 切屑平稳而圆滑地卷曲是保证工件表面质量、降低刀具磨损、提高刀具耐用度的主要因素之一。

拉削时形成的切屑不能排出而留在容屑槽内，待该刀齿拉削完毕后才能去除。如切屑形成不规则的形状，会使拉削力发生突变；另外，如容屑槽不够大，则切屑挤压过紧，拉削力增大，严重时甚至会使拉刀折断。

拉削塑性材料，切屑最好是呈紧密的小细卷状，占的容积较小，能容纳在容屑槽内。铸铁切屑呈碎片，无卷曲问题。

2. 切屑卷曲过程的两种状态 在拉削过程中，可以看到有两种基本形式的切屑。

(1) 卷曲半径逐渐增大 如图20-3₍₁₎所示，切削层被切离工件以后，切屑沿着前刀面流动一段距离后即自由地卷曲成发条状，并由里向外卷曲，半径由小逐渐增大，当切屑填满容屑槽后，与整个前刀面和工件表面发生滑动摩擦，且切屑越卷越紧，直到挤扁、破碎。这时会引起切削力突然变大，对拉刀工作是不利的。

^① 此处参考北京内燃机总厂、首都机械厂、三机部625所、西北工业大学试验资料

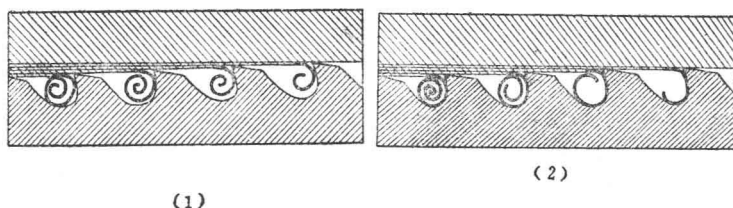


图 20-3 切屑型式与切除图形

(2) 卷曲半径逐渐减小 如图 20-3₍₂₎所示, 当切削层被切离工件后, 切屑沿着刀齿的前刀面流动, 当它碰到槽底受阻则顺着槽底圆弧卷曲并向被加工表面延伸, 而被加工表面迫使切屑由外向里弯曲, 其卷曲半径逐渐减小。这种卷屑的形成与第一种不同的是, 切屑在槽内的运动是不自由的, 切屑由外圈向里紧缩, 是在较困难的条件下进行的, 容易产生切屑堵塞现象, 使拉刀损坏。这种切屑, 在拉削終了、拉刀离开工件时, 往往有弹性回复, 会自动“伸直”一些。

从这两种切屑的形成过程来看, 第一种形状切屑较第二种形状切屑能更紧实地填充在拉刀齿间的容屑槽内, 故对于第一种形状切屑, 容屑槽容积可小些。

图 20-4 是利用高速摄影拍摄的单齿拉削照片, 从图中可清楚地看到切屑卷曲的过程。

3. 影响切屑卷曲的因素 影响切屑卷曲的主要因素有工件材料、切削厚度和前角等。

(1) 工件材料 由于工件材料的加工性能不同, 在拉削过程中的切屑卷曲情况也不同。例如加工塑性低的材料(灰铸铁、铅黄铜), 拉削时不容易形成卷屑; 在拉削塑性好的材料(如退火的铬钼钢以及调质的铬镍钼钢)时, 切屑易形成弹性发条状卷屑, 一般只形成第二种形式卷屑。

拉削普通碳钢时, 切屑卷曲半径都是由小逐渐增大; 拉削合

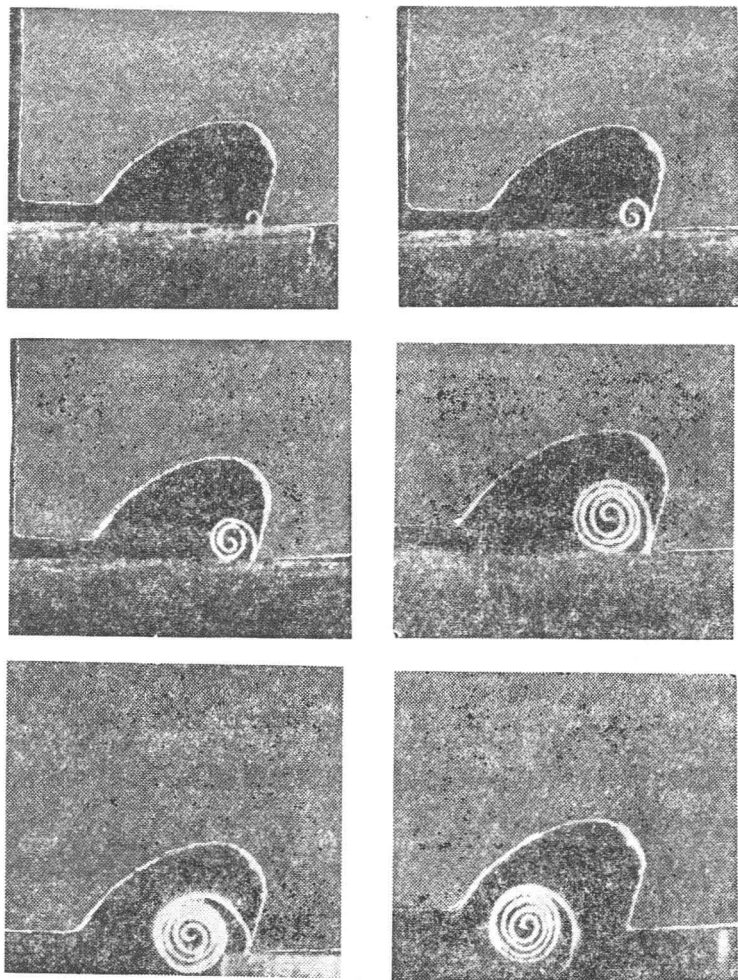


图 20-4 拉削 45 钢时切屑的形成过程

刀具：高速钢单齿刀具 $\gamma_o=15^\circ$, $\alpha_o=2^\circ30'$ ；机床：B 690 液压刨床；切削用量：
 $v=3$ 米/分，齿升量 $a_f=0.05$ 毫米/齿；工件材料：45 钢

金钢时切屑卷曲半径一般多是由大变小。

(2) 切削厚度 切削厚度对卷曲直径影响较大，从图 20-5

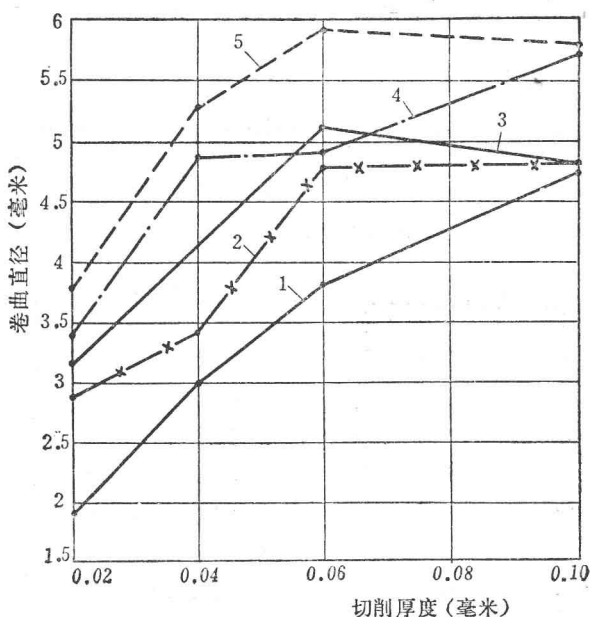


图 20-5 切削厚度对切屑卷曲直径的影响

1—40 钢 $\sigma_b=560\sim590$ 兆帕 (57~60 公斤力/毫米²);

2—铬钼钢 $\sigma_b=930$ 兆帕 (95 公斤力/毫米²);

3—铬镍钼钢 $\sigma_b=1030$ 兆帕 (105 公斤力/毫米²);

4—铬镍钼钢 $\sigma_b=785$ 兆帕 (80 公斤力/毫米²);

5—铬钼钢 $\sigma_b=740$ 兆帕 (75 公斤力/毫米²)

可以看出,当拉削 40 钢,切削厚度为 0.02 毫米时,卷曲直径为 1.9 毫米;当切削厚度增加到 0.1 毫米时,卷曲直径则变为 4.8 毫米。可见在普通材料拉削中,当切削厚度加大,卷曲半径也加大,使切屑卷曲松散。因此,如果切削厚度选择合适,可使切屑卷曲流畅、紧密。

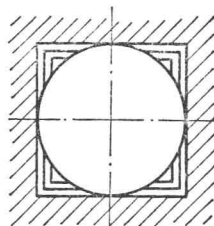
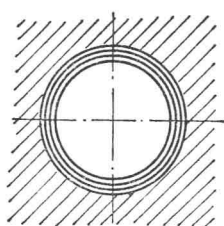
(3) 前角 γ 。当拉刀前角由 10° 增加到 30° ,在拉削 40 钢时,切屑的卷曲半径增加约 20%,在拉削合金钢时,约增加 38~40%。影响切屑卷曲的其它因素,还有切削速度、切削刃宽度和工作条

件(指封闭式内孔拉刀、半封闭式外拉刀)等,在此不一一叙述。

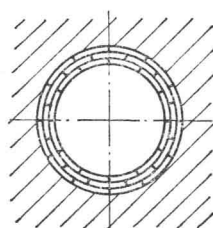
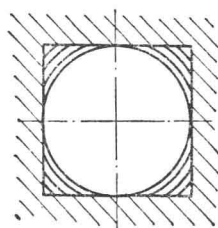
二、拉削方式

拉刀切削图形的确定(即拉削方式的选择),是拉刀设计的一个重要问题,它将关系到生产效率、拉刀耐用度和加工经济性。

1. 拉削方式 如图 20-6 所示,有几种形式:

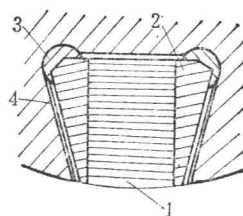
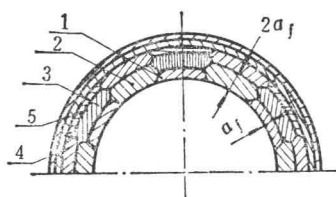


(1) 成型法



(2) 渐成法

(3) 轮切法



(4) 综合轮切法

(5) 综合渐成法

图 20-6 拉削方式与切削图形

(1) 成型法 拉刀的齿形与工件最终表面形状相同, 齿升递增, 每个刀齿切去整个(成形孔)周长上的一层余量, 切削厚度小而切削宽度大。

(2) 渐成法 齿形做成圆形或直齿形, 齿升递增, 工件最终表面是由拉刀刀齿的副切削刃切削逐渐成形的。

(3) 轮切法 拉削每一层加工余量时, 不是由一个齿切去而是由一组几个开有弧形槽的刀齿先后切去, 每组刀齿位置互相错开如图 20-6₍₃₎所示。当用直线棱面代替圆弧槽则称为多边形拉削。

(4) 综合轮切法 此法特点是粗切齿采用不分组的轮切法拉削方式, 而每圈刀齿均有齿升量 a_f , 前后刀齿(1、2、3、4)的弧形槽互相错开, 槽宽与刃宽大致相等, 如图 20-6₍₄₎所示。每齿的切削厚度大, 是齿升量的二倍, $a_c = 2a_f$ 。其精切齿采用成型法。

(5) 综合渐成法 此法特点是粗切齿采用渐成法, 精切齿采用成型法, 如图 20-6₍₅₎所示。

2. 拉削方式的比较及选择

(1) 成型法 由于单位切削力大, 齿升量选用较小值, 因此加工精度与表面光洁度较高。可用于圆拉刀, 制造较简单。但由于齿升量小, 故拉刀长度较长。且由于切削宽度很大, 为了分屑, 在刀齿上需磨有窄的分屑槽, 前后齿的分屑槽互相错开。

成型法主要应用于当采用各种综合拉削方式时的精切刀齿, 可得到较高的加工质量。

(2) 渐成法 渐成法适用于拉削较复杂的加工表面, 如四方孔、六方孔、花键孔等, 拉刀制造较易, 工艺性好。但由于工件加工表面是拉刀刀齿的副切削刃逐渐形成的, 所以加工的表面光洁度较低, 适用于粗拉刀或拉刀的粗切齿。刀齿的副切削刃要有一定的侧后角, 以减小拉削过程中的噪音, 提高刀具耐用度。

(3) 轮切法 如图 20-7₍₁₎、₍₂₎所示，每一刀齿不是切去完整的一层余量，而是把加工余量分成若干部分由几个刀齿（2~5个）切削完成，这样就可以使切屑变成窄而厚，增加了切削厚度，减小了单位切削力。通常可减少拉刀长度约 25~50%，并可提高生产效率。

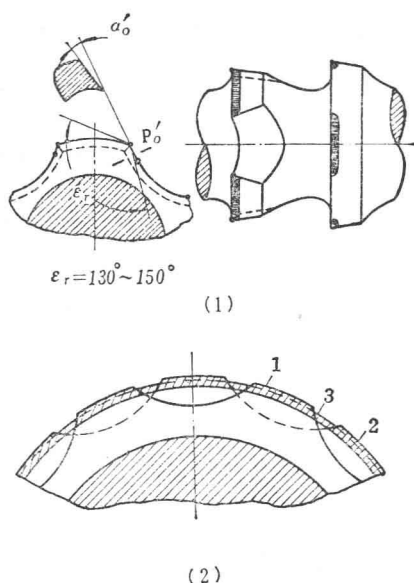


图 20-7 轮切式拉刀弧形齿

每组刀齿的前几个刀齿作成弧形槽交错分布，最后一个齿作成圆环形，如图 20-7₍₂₎ 中的 3 齿。为防止它在整圆周上切下切屑，造成切削困难，切削力增大，故应把圆环齿的直径比前一刀齿减小约 0.02~0.05 毫米。

这种弧形槽刀齿还具有下列优点：首先加大了刃尖转角处的刀尖角，一般 $\epsilon_r > 130^\circ$ ，使刀齿散热改善，并提高了刀齿强度。其次，沿弧形槽刀齿形成一定的后角，如图 20-7₍₁₎ 所示，一般可达

到 $\alpha'_0 = 6^\circ$ ，大大减小转角处的摩擦，使后刀面上的磨损比较均匀，显著提高了耐用度。另外，由于切屑上无凸筋，卷曲紧密，因此刀齿容屑槽容积可以减小，齿距可以缩短。

(4) 综合轮切法 它兼有轮切法和成型法的特点。粗切齿进行轮切拉削，具有轮切法的优点，切屑窄而厚，缩短了拉刀长度，制造较容易；精切齿进行成型拉削，提高了加工光洁度。这种拉削方式广泛用于圆孔拉削。

(5) 综合渐成法 粗切齿进行渐成拉削，具有渐成法的优点，齿形规则简单，制造容易；这种拉削方式适宜用于形状复杂的成型表面的拉削，如花键孔、燕尾榫槽和枞树形榫头、榫槽等。

第三节 拉刀的几何参数

一、前角 γ_0 和后角 α_0

拉刀前角和后角的大小直接影响到拉削过程中切削力的大小、切削温度的高低、刀具耐用度的长短、加工表面质量的好坏，以及生产效率的高低。因此，正确选择拉刀前角与后角是一个重要环节。

前角主要是根据工件材料的力学、物理性能来选择，见表 20-4。

直径较小的拉刀，要获得大的前角，制造较困难，对于直径小于 $\phi 18$ 毫米的拉刀，一般采用 $\gamma_0 = 10^\circ$ 。齿距较小时获得大的前角也较困难。表 20-5 所示为拉刀直径和齿距较小时，所能获得的前角值。

拉刀的后角 α_0 一般约为 $1^\circ \sim 3^\circ$ 如表 20-6。拉刀的后角对加工表面的光洁度有很大影响，后角过小，由于已加工表面的弹性恢