

难加工材料的性能特点决定 高效加工的有效途径

Effective Way for High-Performance Machining Dependent on Property of
Difficult-to-Machine Material

哈尔滨工业大学机电工程学院 韩荣第



韩荣第

哈尔滨工业大学教授, 博士生导师。主持和参加国家自然科学基金、863 重点项目、省市重点攻关项目等 30 余项, 获部科技进步奖 3 项, 成功应用某型号通讯卫星自展天线 1 项, 发表高水平论文 130 余篇; 获国家发明专利 2 项, 待审 2 项; 主编教材 7 部, 其中参编 4 部, 主审 3 部。研究方向: 难加工材料高效与绿色加工技术、切削过程仿真及特种刀具技术。

随着科学技术的快速发展, 对工程材料性能的要求越来越高, 特别是在航空、航天、兵器、舰船和核工业领域, 由于产品工作环境的特殊性, 急需具有特殊高性能的新型结构材料

众所周知, 难加工材料的切削和磨削加工技术水平的高低是衡量一个国家机械加工技术水平的重要组成部分, 为此, 航空航天技术发达的国家都十分重视航空航天新材料的开发与应用, 应用又是不能离开切削和磨削加工的, 故工业发达国家无一不重视难加工材料的切削和磨削加工技术的研究, 并不断提高其水平。可见, 研究难加工材料高效加工技术已成为当今的重要课题。

和功能材料, 但这些材料是难于切削和磨削加工的, 切削加工性差, 故称其为难加工材料。

然而, 要实现飞机、航天器及导弹等的高性能及高可靠性, 不仅需要采用新材料, 而且还在不断地提高其零部件的加工精度和加工表面质量的要求, 切削和磨削加工几乎是满足这一技术要求的唯一手段。众所周知, 难加工材料的切削和磨削加工技术水平的高低是衡量一个国家机械加工技术水平的重要组成部分, 为此, 航空航天技术发达的国家都十分重视航空航天新材料的开发与应用, 应用又是不能离开切削和磨削加工的, 故工业发达国家无一不重视难加工材料的切削和磨削加工技术的研

究, 并不断提高其水平。可见, 研究难加工材料高效加工技术已成为当今的重要课题。

工件材料的分级归类是前提

难加工材料的品种牌号成千上万, 不可能逐一进行切削试验确定其切削加工性。但可以根据其具有的特殊物理力学性能进行切削加工性的分级, 然后归纳成类。物理力学性能包括: 抗拉强度 σ_b (屈服强度 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$)、硬度 HB、伸长率 δ 、冲击韧性 a_k (或断裂韧性 K_{IC})、导热系数 k 、线膨胀系数 α 、弹性模量 E 等。可按表 1 对其进行切削加工性分级, 还可用表 2、3 判断其相对切削加工性 K_v , 通常以 45 钢(正火, 229HBS,

表1 工件材料的切削加工性分级

切削加工性		易切削			较易切削		较难切削			难切削			
等级代号		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9 _a	9 _b
硬度	HBS	≤ 50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~350	350~400	400~480	480~635	>635	
	HRC					14~24.8	24.8~32.3	32.3~38.1	38.1~43	43~50	50~60	>60	
抗拉强度 σ_b /GPa		≤ 0.196	0.196~0.44	0.44~0.598	0.598~0.785	0.785~0.981	0.981~1.18	1.18~1.37	1.37~1.57	1.57~1.77	1.77~1.96	1.96~2.45	>2.45
伸长率 δ /%		≤ 10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~50	50~60	60~100	>100	
冲击韧性 a_k /(MJ·m ⁻²)		≤ 0.196	0.196~0.392	0.392~0.598	0.598~0.785	0.785~0.981	0.981~1.37	1.37~1.77	1.77~1.96	1.96~2.45	2.45~2.94	2.94~3.92	
导热系数 k /(w·m ⁻¹ ·°C)		419~293	293~167	167~83.7	83.7~62.8	62.8~41.9	41.9~33.5	33.5~25.1	25.1~16.7	16.7~8.37	<8.37		

表2 难加工材料的相对切削加工性

材料	牌号举例	用途举例	影响因素							
			硬度	高温强度	高硬质点	加工硬化	与刀具粘结	化学亲和性	导热性能	相对切削加工性 K_v
高锰钢	ZGMn13 40Mn18Cr3	耐磨零件,如掘土机铲斗、拖拉机履带板、电机中无磁高锰钢	1~2	1	1~2	4	2	1	4	0.2~0.4
高强度钢	低合金 30CrMnSiNi2A 18CrMn2MoBA	高强度零件,如轴、高强度螺栓、起落架	3~4	1	1	2	1	1	2	0.2~0.5
	中合金 4Cr5MoSiV	高强度构件、模具	2~3	2	2~3	2	1	1	2	0.2~0.45
	马氏体时效钢	高强度结构零件	4	2	1	1	1	1	2	0.1~0.25
不锈钢	析出硬化 0Cr17Ni7Al 0Cr15Ni7Mo2Al	高强度结构零件	1~3	1	1	2	1~2	1	3	0.3~0.4
	奥氏体 1Cr18Ni9Ti Cr14Mn14Ni3Ti	耐蚀高强度高温(550°C以下)工作的零件	1~2	1~2	1	3	3	2	3	0.5~0.6
	马氏体 2Cr13 Cr17Ni2	弱腐蚀介质中工作的高强度零件	2~3	1	1	2	1	2	2	0.5~0.7
	铁素体 0Cr13 Cr17	强腐蚀介质中工作的零件	1	1	1	1	1	2	2	0.5~0.8
高温合金	钛基 GH2036、GH2135 K213、K214	燃气轮机涡轮盘、涡轮叶片与导向叶片、燃烧室及其他高温承力件与紧固件	2	2~3	2~3	3	3	2	3~4	0.15~0.3
	镍基 GH4033、GH4049 K403、K405		2~3	3	3	3~4	3~4	3	3~4	0.08~0.2
钛合金	α 相 TA7、TA8、TA2	比强度高、热强度高、耐蚀,在航空、造船、化工及医药工业中应用	2	1	1	2	1	4	4	0.4~0.6
	$\alpha+\beta$ 相 TC4、TC6、TC9									0.24~0.28
	β 相 TB1、TB2									0.24~0.3

注:各项因素恶化切削加工性的程度按次序为1→2→3→4。

$\sigma_b=0.598\text{GPa}$, $\delta=16\%$, $a_k=0.49\text{MJ}/\text{m}^2$, $k=50.2\text{w}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)为基准 $K_v=1.0$ 。

例1:奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti(水淬、时效),硬度为229HBS,抗拉强度 σ_b 为0.642GPa,伸长率 δ 为55%,冲击韧性 a_k 为2.15MJ/m²、导热系数 k 为16.3w/m·°C。由表1查得:等级分别为4、3、8、8、8,HB和 σ_b

虽不在难切削加工范围,但 δ 、 a_k 和 k 已属难切削加工范围。

由表3可判断 $K_v=0.5\sim 0.6$,为较难切削材料。

例2:镍基高温合金GH4169,314HBS, $\sigma_b=1.43\text{GPa}$, $\delta=24\%$, $a_k=0.56\text{MJ}/\text{m}^2$, $k=14.6\text{w}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 。由表1查得:等级分别为6、7、3、6、2,除 δ 、

a_k 不在难切削范围外,其余均为难切削加工范围。但加工硬化十分严重,可高达150%,硬化层深度达0.3mm,故二者综合起来,认为应属很难加工范围。用表2判断其 $K_v=0.08\sim 0.2$,为很难切削材料。

由此再根据共同的切削加工特点将其归类,看属于哪类难加工材

表3 工件材料的相对切削加工性

加工等级	名称及种类		相对加工性 Kv	代表性工件材料
1	很容易切削材料	一般有色金属	>3.0	5-5-5 钢铜合金、9-4 铝铜合金、铝镁合金
2	容易切削材料	易削钢	2.5~3.0	退火 14Cr $\sigma_b=0.373\sim0.441\text{GPa}$ 自动机钢 $\sigma_b=0.391\sim0.490\text{GPa}$
3		较易削钢	1.6~2.5	正火 30 钢 $\sigma_b=0.441\sim0.549\text{GPa}$
4	普通材料	一般钢及铸铁	1.0~1.6	45 钢、灰铸铁、结构钢
5		稍难切削材料	0.65~1.0	2Cr13 调质 $\sigma_b=0.834\text{GPa}$ 85 钢轧制 $\sigma_b=0.883\text{GPa}$
6	难切削材料	较难切削材料	0.5~0.65	45Cr 调质 $\sigma_b=1.03\text{GPa}$ 65Mn 调质 $\sigma_b=0.932\sim0.981\text{GPa}$
7		难切削材料	0.15~0.5	50CrV 调质、1Cr18Ni9Ti 未淬火、 α 相钛合金
8		很难切削材料	<0.15	β 相钛合金、镍基高温合金

料,然后再选择合适的高效加工途径。

尽管难加工材料性能千差万别,但它们之间是有共性的,可归纳为:

(1) 高硬度脆性大材料,如淬硬钢、金属间化合物、金属基复合材料、精细陶瓷等;

(2) 高强度材料,如高温合金、高强度($\sigma_b>1\text{GPa}$) 超高强度钢($\sigma_b>1.5\text{GPa}$);

(3) 加工硬化严重材料,如奥氏体不锈钢、高温合金、钛合金、高锰钢等;

(4) 化学活性大材料,如钛合金、锆合金;

(5) 导热性差材料,如不锈钢、高温合金、钛合金、Ni-Ti 形状记忆合金、金属间化合物;

(6) 高熔点材料,熔点高于 1700℃ 的镍、钨、钽、铌、锆及其合金。

此外,还可根据切削加工特点归纳为:

(1) 切削力大材料;

(2) 切削温度高材料;

(3) 刀具磨损严重、刀具寿命短材料;

(4) 加工表面粗糙度大、精度难达到材料;

(5) 切屑难处理材料等。

归类之后即可按类选择合适的刀具材料、合理的几何参数等。

选择合适的刀具材料是关键

刀具材料的性能直接影响工件材料能否实现高效切削加工,即刀具材料选择的合适与否是解决难加工材料高效切削加工的关键所在。切削难加工材料必须尽可能选用高性能的刀具材料。当今应用最为普遍的高速钢和硬质合金两大类刀具材料中,硬质合金的耐磨性和耐热性能优于高速钢,因而应尽可能选用硬质合金及其涂层,但必须注意在物理化学性能方面与工件材料间的合理匹配问题。如:

(1) 含 TiC 的 P 类硬质合金及其涂层刀具不宜切削含 Ti 的工件材料,(如含 Ti 的不锈钢和高温合金以及钛合金等),因为二者中均含有 Ti,在高温下的亲和作用容易造成刀具的粘结磨损。

(2) 选用陶瓷作为切削镍基高温合金的刀具时,应选用 Sialon($\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{YO}_2$) 陶瓷,而不宜选用 Al_2O_3 系陶瓷,因为后者的硬度虽高,但强度、冲击(断裂)韧性较差。

CBN 则是除金刚石外耐磨性最好的刀具材料,但它不适合切削硬度低于 50HRC 的淬硬材料,且 PCBN 中的 CBN 含量,晶粒大小及结合剂的种类、含量、烧结工艺均影响其切削性能,金刚石刀具也是如此。也就是说,PCBN、PCD 及硬质合金、陶瓷等这些烧结类的刀具材料,在选作为难加工材料的刀具时,必须“对号入座”,绝没有“万能(通用)”之说。

高速钢刀具虽在性能上与难加工材料之间无匹配问题,但也必须选用高性能高速钢(如高 C 高速钢、高 V 高速钢、Co 高速钢、Al 高速钢,甚至粉末冶金高速钢),否则不可能实现高效切削。当然,也必须解决它们的刃磨问题。

刀具合理几何参数的选择是重点

20 世纪五六十年代,我国的机械工业战线出现了不少全国劳动模范,他们大都在切削刀具方面进行了大胆改革创新,为新中国的机械工业发展做出了很大贡献。

1 改进刀具几何参数

如:群钻的代表人物倪志福,为适应不同的工件材料、不同厚度板材钻孔需要,将标准麻花钻头进行修磨,使加工效率提高 3~5 倍以上,钻孔精度也有相应提高,孔表面粗糙度值也有所减小。其原因就在于修磨后钻头的几何角度比较合理,切削刃变得锋利了。钻钢时轴向力减小了 35%~50%,扭矩减小了 10%~30%。经过群钻小组几代人的努力,如今已形成了标准群钻、铸铁群钻、不锈钢群钻、薄板群钻等一系列先进钻型。这些钻型在难加工材料钻孔中也已得到了普遍应用,特别在高强度钢、高温合金材料上钻孔,如用 HSS 标准麻花钻头是不可能完成的,采用 HSS 群钻和将硬质合金钻头修磨成群钻结构就可迎刃而解。但是群钻的修磨比较复杂,不易掌握,国内已

有群钻刃磨机床生产,从而解决了标准麻花钻的刃磨难题。

根据经验,用标准麻花钻稍加修磨就可完成不锈钢、钛合金的钻孔,如能用细晶粒整体硬质合金钻头(YG6A、YG6X)对其横刃稍加磨窄、磨尖,加大钻心处前角,就可以更高效地完成钛合金钻孔。但对于高温合金、高强度超高强度钢,若用标准麻花钻很难钻孔,必须对其进行群钻修磨,用细晶粒整体硬质合金钻头修磨横刃和钻心前刀面,也可高效完成钻孔。当然采用内冷却钻头或振动钻孔工艺效果会更好。

2 可转位刀具的几何角度

现在数控车床、数控铣床及加工中心上广泛采用的高效刀具——可转位车刀和铣刀,其几何参数的设计往往都是按普通钢料加工选择的。对于难加工材料(高温合金、钛合金、高强度钢),由于其抗拉强度要比普通钢料高出1~2倍,根据刀具合理前角的选择原则,可转位车刀与铣刀的合理前角不应与加工普通钢料时相同,即用从刀具商手里买来的可转位车刀、铣刀加工难加工材料就不见得合理了,如加工普通钢料时硬质合金车刀合理前角为15~20°,加工高温合金时应为5~10°,因为工件材料强度高,若要保证切削刃有足够的强度和散热性能,合理前角应比切普通钢时选得小些。解决此类问题的办法有2种:一是询问刀具商该车刀或铣刀的前角值是多少,如果符合高温合金加工的要求值是最理想的情况;二是根据加工的工件材料自己设计,以满足合理几何角度的要求。

合理前角究竟是多少,尚需经过切削试验确定,这样才能保证可转位刀具几何角度的合理性。

3 研制新刀具——修正齿丝锥,解决难加工材料小孔攻丝难题

修正齿丝锥,即齿形角55°的丝锥,但它能攻制齿形角60°的标准螺纹,其成形原理如图1所示,M8修

正齿丝锥如图2所示。

由图1不难看出,修正齿丝锥的齿形角 $\alpha_0=55^\circ$,是小于螺纹齿形角 $\alpha_1=60^\circ$ 的,即在形成螺纹齿形的过程中,二者的齿侧形成了侧隙角(或称副偏角)

$$\kappa_r' = (60^\circ \sim 55^\circ) / 2 = 2^\circ 30'$$

且加工时丝锥齿侧只与正在切削的那层厚度相接触,其余部分根本不与正在加工的螺纹齿侧接触,这样大大减小了丝锥齿侧面与加工螺纹齿侧面的接触摩擦面积,即减小了摩擦扭矩。而标准丝锥($\alpha_1=60^\circ$)则不然,它的齿侧面与加工的螺纹齿侧面是全接触的,这种全接触产生的摩擦扭

矩,而修正齿丝锥较好地解决了这个问题。

另外,为了减小丝锥顶刃后刀面的摩擦问题,需加大丝锥顶刃后角 $\alpha_r=12^\circ$ (一般丝锥 $\alpha_r=4^\circ$)。这二者的结合较全面地减小了钛合金攻丝时摩擦扭矩过大的问题,因此修正齿丝锥不失为钛合金攻丝的高效丝锥,这已为试验所证明。

该丝锥前角不必取 $\gamma_f=10^\circ$ (标准丝锥前角值),因为钛合金的塑性变形比中碳钢要小,故取 $\gamma_f=7^\circ$ 即可。

齿形角55°的修正齿丝锥能攻制出60°齿形角的标准螺纹,其原因在于:丝锥锥角 κ_r 、倒锥角 δ 与丝

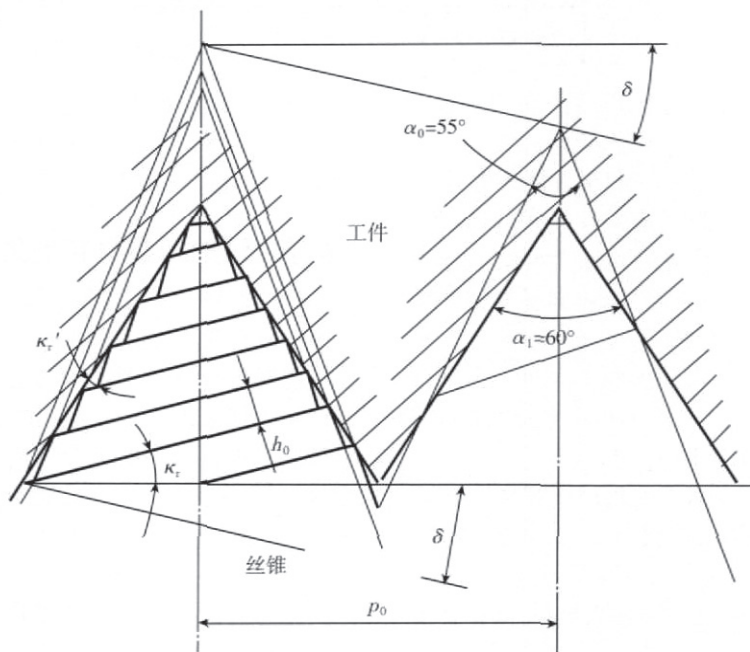


图1 修正齿丝锥的成形原理



图2 M8修正齿丝锥

矩在攻普通钢料时约占攻丝总扭矩的16%,而对于钛合金这种弹性恢复很大的材料其摩擦扭矩占总扭矩的65%,可见钛合金攻丝时摩擦扭矩占总扭矩的比例太大,极易造成丝锥扭断。最好的解决方法是减小齿侧接触摩擦产生的摩擦扭

锥齿形角 α_0 、螺纹齿形角 α_1 间必须保持公式

$$\tan \delta = \tan \kappa_r \left(\tan \frac{\alpha_1}{2} \cdot \cot \frac{\alpha_0}{2} - 1 \right)$$

中的关系。

从图 1 还可看出,理论上用修正齿丝锥攻制的螺纹齿侧会有不平度 R_{\max} ,经计算该 R_{\max} 值为 0.001mm 的数量级,根本不会加大螺纹齿侧表面粗糙度值,故加工表面粗糙度值实际上比要求的粗糙度值要小,完全达到了 $R_a=3.2\mu\text{m}$ 的要求,且用标准螺纹塞规检查尺寸精度完全合格。

该丝锥正在上海申利螺纹工具厂试制,不久将面市。

合理切削用量的选择是主线

当刀具材料、刀具结构、刀具几何参数确定后,切削用量选择是否合理决定了加工效率和成本的高低。因此,难加工材料高效加工必须始终以切削用量为主线来选用刀具材料、几何参数及冷却润滑途径等。

工件为常用普通结构材料时,可直接按切削用量手册或按经验选取;但是对于难加工材料,手册中尚无成熟数据可查,即便在某些资料中有相关推荐的数据也不一定能直接拿来用,因为切削加工所用的机床、刀具、工艺等均不一定相同,故还要通过切削试验确定,进行切削试验就一定会碰到用什么样的刀具材料、几何参数等问题。

当今世界各国都在追求高效加工,高速加工乃是高效加工的重要方面。难加工材料高速切削是 21 世纪的重要研究课题。我国十一五 863 计划中已将镍基合金大型零件、高强度钢淬硬钢大型零件、钛合金薄壁类零件、复合材料零件、光学功能材料自由曲面零件及精细陶瓷典型复杂型面零件等难加工材料的高效加工列为先进制造技术领域的重点研究课题。有人预言,难加工材料将是高速超高速切削技术的具体应用领域

之一。对于高速切削虽没有统一定义,但一般都认为 5 ~ 10 倍常规切削速度的切削为高速切削,这是个相对的概念,与过去书中提到的“高速”切削有本质区别。且对于不同工件材料、不同加工方法,高速切削的速度范围是不同的。高速切削除了必备的高速机床外,还应有与之配套的刀具刀柄系统、高速切削工艺等,能否进行高速切削的关键在于刀具材料能否满足高耐热性和耐磨性的要求。

我国很多国营大厂均配备了很多高速切削机床,且很多为贵重的进口高速机床,但现在所用的切削速度远没有达到常规切速 5 ~ 10 倍的要求,即没有充分发挥高速机床的切削性能与效益。其关键在于所用刀具:其一是刀具尚不能满足高速切削要求;其二是操作者不敢采用高速。为此,必须解决刀具材料及刀具几何参数等问题。

冷却润滑常相伴

切削难加工材料如采用一般的乳化液或切削油已远不能起到很好的冷却润滑作用,必须使用加入极压添加剂硫、氯、磷的极压乳化液或极压切削油。传统使用的都是室温的冷却润滑剂(液体或气体),甚至用零下几度乃至零下上百度的液氮、液体 CO_2 等,近年来在一些加工中心上多采用微量润滑技术(MQL)或低温 MQL 技术,该技术既起到了较好的冷却润滑作用,又大大减少了润滑油的用量,减少了对环境的污染和对人体健康的危害,故称之为准干式或准绿色冷却润滑技术。另外,还可使用喷雾冷却,但污染严重必须封闭使用。

前苏联学者 Podgorkov V.V. 提出了用水蒸汽作冷却润滑剂,并经 Godlivski V. A. 等人对 1Cr18Ni9Ti 等的切削试验证明有很好的效果。这是逆向思维的产物,水蒸汽温度虽在

80 ~ 90℃,但与切削区的几百度高温相比仍属低温,且研究证明,水蒸汽渗入毛细管比液态容易,因为室温的液态微滴遇到切削区高温会产生体积膨胀而阻碍后续液滴渗入。水蒸汽不仅有对流传热的直接冷却润滑作用,还有易渗入刀-屑间毛细管,与金属形成润滑膜以减小摩擦,从而起到间接冷却作用,故增强了冷却润滑作用效果。这已在多次镍基高温合金 GH4169、钛合金 TC4 等的切削试验中得到证明,为解决工件生锈问题及提高冷却润滑效果,我们使用的是 130℃ 的过热水蒸汽,效果很好,此项技术已获得国家发明专利。

特殊加工方法是辅助

上述途径仍得不到满意结果或者有提高精度等特殊要求时,可采用特殊加工方法,如振动切削、加热切削、低温切削、磁化切削、绝缘切削、惰性气体保护切削、电熔爆切削等,在此不再叙述。

特种加工方法是补充

难加工材料如果用前述的机械加工方法及辅助加工方法仍不能获得满意效果,就只有采用电火花、电火花线切割、电解等特殊加工方法及高能束(电子束、离子束、激光束)、高压射流切割法等加工方法。

结束语

综上所述,不论在加工中碰到什么样的难加工材料,只要知道它的组成及其物理力学性能信息,就可以对其切削加工性进行分级与归类,并初步了解其切削加工特点,然后采取上述有效切削加工途径,特别要掌握适用的刀具材料这一关键途径,辅以选择合理的刀具几何角度,再经过一定的切削试验,就一定能取得高效加工效果。

(责编 小颖)