

难加工钢和合金及其切削加工

难加工钢和合金按切削加工性的分类

技术的发展常常是同创造特殊物理-机械性能的钢和合金并掌握其加工工艺联系在一起的。这些特殊物理-机械性能包括:在各种介质中的抗腐蚀性、热强性和高强度。在许多情况下,要求材料综合具备上述各种性能。改进材料的综合性能,就有可能制造出高性能的机器。

高温钢在 700°C 时仍具有足够的强度。而镍基合金可达 1100°C , 钼和铌基合金可达 1500°C , 钨基合金可达 2000°C , 仍都具有足够的强度。

比强度高的材料得到了广泛的应用。在难加工材料类型中,比强度高的材料有钛合金和高强度钢。钛合金在大多数侵蚀性介质中还具有高的抗腐蚀能力,因此是很有发展前景的材料。

但是,加工高温钢、高强度钢和高温合金时,必须降低切削速度,因为它们的切削加工性较差*。由表1可以看出,加工高温钢的切削力将达加工45钢时的1.2—1.5倍,而加工变形高温合金的切削力将达加工45钢时的2倍以上。钛合

* 这里及其后所说的材料切削加工性是指:用合理结构的刀具加工该材料时,对应于一定刀具耐用度的切削速度。当切削速度与刀具耐用度之间存在非单一性关系时,则用最大切削速度代表其切削加工性。

金的切削力与 45 钢大致相同。加工高强度钢时的切削力将达 45 钢的 2—3 倍。难加工钢和合金的切削力大, 导致切削区产生的热量也多。由于大多数难加工材料的导热性均较低, 所以切削区的温度就较高。加工难加工钢和合金的切削温度将达加工一般结构钢时的 2—3 倍。

表 1 在切深 $t=1\text{mm}$ 、走刀量 $S=0.1\text{mm/r}$ 下, 车削各类材料时的垂直单位切削分力 P_z 和接触温度 θ

被加工材料	σ_b	P_z	$\theta(^{\circ}\text{C})$	
	Mpa		$v=20\text{m/min}$	$v=60\text{m/min}$
45 钢	750	2000	200	300
12X18H10T	600	2500	560	800
XH62MBKЮ	1100	4000	720	1000
ЖС6-K	900	3500	750	1050
BT5	900	2000	520	750
38X5MCΦA	1700	7000	700	1000

加工钛合金时切屑收缩甚小, 在某些条件下切屑甚至没有收缩而有伸长。钛合金切屑收缩小的原因是塑性低。切屑收缩小导致切屑和前刀面的接触面积也小, 使切屑沿前刀面的流动速度增大, 接触应力和温度上升。

加工难加工钢和合金时由于切削力大, 所以机床-夹具-刀具-工件系统的刚性要好。接触温度高是刀具耐用度低的主要原因。为避免接触温度过高, 应采用较低的切削速度。

在苏联研制成功了大量牌号的特殊性能钢和合金。在表 2 中按其切削加工性类别列举了最常用的若干品种。分类的根据是材料化学成分, 因为根据化学成分基本上可确定高温

钢和合金的切削加工性。按表中的分类方法，本手册所涉及的钢和合金区分成 8 大类。每类钢和合金均具有大致相同的化学成分和机械性能，其切削加工性也相近。对每类材料均列出了用硬质合金和高速钢加工时的大致切削速度值和切削速度(切削加工性)系数。当出现难加工钢或合金的新品种时，可按化学成分将其归并到相应的类别中去，不必再通过费力的实验研究就可制订出刀具的几何参数和大致的切削用量。由此并可近似地确定这类新材料零件的加工工作量，有根据地制订出它们的生产作业计划。

当有必要更精确地确定按化学成分属于第Ⅲ—Ⅵ类材料的切削速度时，可按 Н.И.Ташлицкий 推荐的计算公式来计算，其精度对生产实际已足够了。

被加工材料的切削速度同基准材料的切削速度之比值
为：

$$K_v = [(1 + i/100) | \Delta Q |]^{1.4Q1/Q}$$

式中： i ——合金元素对切削加工性的影响强度；

Q ——合金元素的含量。

各种合金元素的 i 值如下：

元素	C	Al	Ti	Si	Mo	Co	Mn	Cr	W	Ni	Nb	B
i	150	120	40	25	5	3.5	3	2	1.5	0	0	0

各种强度新牌号钛合金(第Ⅶ类)的相对切削速度可按下列公式计算：

$$v = C / \sigma_b^{1.5}$$

C 为常数。

各种高强度钢(第Ⅶ类 A)的相对切削加工性可按下列公式计算：

$$v = C_1 / \sigma_b^2$$

表 2 难加工钢和合金按切削加工性的分类

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削加工性系数	
			硬质合金	高 速 钢	45	12X18H10T

I. 珠光体、马氏体-铁素体和马氏体类型的耐热铬钢、镍铬钢和铬钼钢

34XH3M 34XH3MΦ	退火	600—800	250—300	50—70	1	2
	淬火及回火,	900—1300	120—150	20—30	0.5	1.0
20X3MBΦ						
15X5M 15X6CЮ	退火	≥650	200—250	45—60	0.9	1.8

II. 铁素体、马氏体-铁素体和马氏体类型的铬不锈钢和多种合金元素不锈钢

12X13	淬火及回火	≥600	180—220	35—50	0.7	1.4
25X13H2	退火	700—1000	200—250	45—60	0.9	1.8

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数	
			硬质合金	高 速 钢	45	12X18H10T
11X11H2BMΦ 1X12H2BMΦ	淬火及回火	≥750	170—200	30—40	0.65	1.3
20X13 30X13		1100—1400	80—100	15—20	0.3	0.6
40X13	退火	≈900	120—150	25—35	0.5	1.0
00X16H4B	淬火及回火	1700 >1000 >1300	30—40 130—160 70—90	— 28—38 15—20	0.15 0.55 0.3	0.30 1.1 0.6
14X17H2		>1100	120—150	25—35	0.5	1.0
20X17H2	退火	≈900	90—120	20—30	0.45	0.9
95X18		≥1900	20—30	—	0.12	0.24

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数	
			硬质合金	高速钢	45	12X18H10T

Ⅲ. 奥氏体、奥氏体-铁素体和奥氏体-马氏体类型的不锈、耐酸、耐高温铬镍钢

12X18H10T	奥氏体化	>550	120—150	25—35	0.5	1.0
10X23H18 20X23H18			140—180	30—40	0.6	1.2
12X21H5T 09X15H9O		>700	110—130	20—30	0.45	0.9
08X17H5M3	正火	850—1100				
07X16H6	正火及回火	≥1100	120—150	25—35	0.5	1.0

Ⅳ. 奥氏体和奥氏体-铁素体类型的热强、耐高温、耐酸铬镍钢、铬镍锰钢和多种合金元素钢

10X11H20T3MP 10X11H23T3MP 37X12H18Г8MΦБ	奥氏体化及时效	>900	50—60	12—20	0.23	0.45
45X14H14B2M		>700	100—120	20—28	0.40	0.80

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数	
			硬质合金	高 速 钢	45	12X18H10T
08X15H24B4TP	时效	>700	70—90	15—25	0.30	0.60
15X18H12C4T10P 07X21T7AH5	奥氏体化	700—900	50—60	12—20	0.23	0.45
12X25H16T7AP	奥氏体化及时效	800—1000	80—100	15—25	0.30	0.60

V. 铁镍基和镍基变形高温合金

36HXT10	奥氏体化及时效	1200				
XH60BT XH38BT XH77T10P	奥氏体化	800	40—50	8—12	0.16	0.32
	奥氏体化及时效	1000				
XH35BT10	奥氏体化及时效	>950	22—28	8—12	0.12	0.24

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数
			硬质合金	高 速 钢	
XH56BMTIO	奥氏体化	900			45
XH67BMTIO XH70BMTIO XH75BMTIO	奥氏体化及时效	>1000	20—25	6—10	0.20
XH62MKBTIO		1250			
XH60MBTIO		1150	18—20	5—10	0.15
XH82TTIOM5		1350			

VI. 镍基和铬基铸造高温不起皮合金

ВЖ36-Ж2	奥氏体化及时效	800	18—20	—	0.05
АЖВ-300		850			
ЖС6-К		1000			

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数	
			硬 质 合 金	高 速 钢	45	12X18H10T
ЖСЗ-ЛК XH67BMТЮЛ	奥氏体化及时效	750	18—20	—	0.05	0.10
BX4-Л	退火	1100	20—25	6—10	0.10	0.20

Ⅷ. 钛合金

BT1-0, BT1, BT1-1, BT1-2	退火	450—700	100—150	30—40	0.50	1.00
		950—1200	50—70	18—25	0.28	0.56
BT3, BT3-1		600—850	70—100	25—35	0.40	0.80
OT4, OT4-1		700—950				
BT5, BT5-1						

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数	
			硬质合金	高 速 钢	45	12X18H10T
BT6, BT6C	退火	900—1000	60—80	20—30	0.32	0.65
BT14, BT15, BT22		1000—1100	50—75	20—28	0.30	0.60
BT14, BT15	淬火及时效	1150—1300				
BT3-1, BT22	淬火, 时效, 热机械加工	1300—1500	45—60	15—20	0.24	0.48

Ⅷ. 高强度钢

A. 合金钢

28X3CHMBΦA 30X2ΓCH2BM	淬火及回火	≥1600	40—65	5—10	0.22	0.44
--------------------------	-------	-------	-------	------	------	------

续表 2

牌 号	热处理状态	σ_b (MPa)	用下列刀具加工时的大 致切削速度(m/min)		相对于下列钢种的切削 加工性系数	
			硬质合金	高 速 钢	45	12X18H10T
33X3CHMBΦA 38X3CHMBΦA	淬火及回火	1700	40—50	4—5	0.18	0.36
42X2ΓCHM 38X5MCΦA 43X3CHMBΦA	淬火	1900 1950 2100	28—38 25—35 20—30	2—3 1—2 —	0.14 0.13 0.12	0.28 0.25 0.24

B. 弥散硬化钢

H18K9M5T	淬火	1000—1100	100—120	20—30	0.5	1.0
	淬火及时效	2100—2200	40—60	—	0.24	0.43

注：1. 表中所列的切削速度和切削加工性比值是针对难加工钢及合金在该热处理状态下进行精加工和半精加工的。
加工工序为车削、端面铣削和立铣。各工序更精确的切削速度值及其修正系数详见各相应的章节。

2. 与表列切削速度相对应的刀具耐用度值：车刀 $T=45-60$ 分，铣刀 $T=60-120$ 分。

计算时, 作为基准材料应选按化学成分分类的切削加工性相近似的钢。例如, 计算高强度碳素钢的切削速度, 基准材料也应选高强度碳素钢。上列公式不适用于不含碳的弥散硬化高强度钢(第Ⅷ类 B)。

本手册对各类特殊钢和合金的定义如下:

1. 耐热钢是指在温度 550°C 以下仍具有抵抗机械负荷变形和破坏的能力, 并且不存在急剧起皮危险性的钢种;

2. 不锈钢具有抗电化学腐蚀的性能(包括大气、土壤、碱、酸、盐、海水腐蚀等);

3. 耐热(不起皮)钢和合金在温度 550°C 以上的气体介质中仍具有抗化学损坏的能力, 它一般在不承受负载或承受轻微负载条件下工作;

4. 高温钢或高温合金在高于 700°C 的高温下仍能承受负载并工作一段时间, 且具有足够的抗起皮能力;

5. 高强度钢是指 $\sigma_s \geq 1600 \text{ MPa}$ 的钢种。

属于第 I 类的钢, 其化学成分为铬 $\leq 6\%$, 镍 $\leq 3\%$, 钼及钒各 $\leq 1\%$, 硅 $\leq 2\%$ 。它们属于耐热钢品种, 用于制造工作温度为 $500-600^{\circ}\text{C}$ 的发动机进气和排气阀、汽轮机叶片和涡轮盘以及锅炉零件。

第 I 类钢的切削加工性较好, 与同强度的碳钢和低合金结构钢相近。

第 II 类钢含高铬 ($>10-12\%$) 及少量其它合金元素 ($\leq 4\%$)。它们主要用于制造工作温度为 $500-550^{\circ}\text{C}$ 的附件、机架、汽轮机叶片和涡轮盘(12X13, 20X13, 1X12H2BMΦ, 11X11H2B2MΦ 等)、外科手术器械、滚动轴承(30X13, 40X13)以及其它抗腐蚀性高的零件。该类钢中还包含淬火及回火后强度大于 1900 MPa 的 95X18 高铬钢。这种钢在

上述状态的切削加工性与第Ⅳ类高强度钢相当。但是，加工这种钢时主要余量是在退火状态被切除的，此时它的切削加工性与第Ⅱ类 $\sigma_s = 900—1000$ MPa的高铬钢相似。

第Ⅱ类钢有在退火后加工的(如12X13, 20X13, 14X17H2等)，也有在淬火回火到 $\sigma_s = 1000—1500$ MPa后加工的(如11X11H2B2MΦ, 1X12H2BMΦ等)。退火状态下加工时，这类钢的切削加工性较好，其切削速度可采用加工45钢的切削速度乘以2/3。高铬钢经热处理增大强度后，切削加工性显著下降。当热处理到 $\sigma_s > 1200$ MPa后，尽可能用硬质合金刀具加工。

第Ⅲ类钢在退火状态下加工时很难得到小的表面粗糙度，尤其在切削螺纹、拉削、圆柱铣刀铣削以及其它用刀具刃口间断形成加工表面的工序中更是如此。随着钢强度的提高，已加工表面的粗糙度将会减小。

第Ⅲ类奥氏体钢含有大量的铬($>15\%$)和镍($>5\%$)以及少量的其它合金元素(钛、硅等)。这一类中也包括奥氏体-铁素体和奥氏体-马氏体钢。12X21H5T奥氏体-铁素体钢的切削加工性接近于12X18H10T钢。奥氏体-马氏体钢(09X15H8Ю, 08X17H5M3)的工艺特性接近于奥氏体钢，而强度则接近于马氏体钢。奥氏体-马氏体钢的切削加工性，退火后与12X18H10T相接近，淬火回火后与同强度的第Ⅱ类钢相接近。第Ⅲ类钢作为耐酸、耐腐蚀和耐高温材料得到了广泛的应用。它们几乎在所有的工业领域中均被用来制造在腐蚀条件下或在 800°C 高温下工作的零件，如焊接机零件、压缩机叶片和铆钉、高温管道零件等。加工第Ⅲ类钢的切削速度可取加工45钢时的1/2。

第Ⅳ类是奥氏体类型的多种合金元素钢，它含有大量的

铬(12—15%)、镍(>10%)以及略为少量的锰、钼、钛、钨、钒等元素。有一些钢(37X12H8Г8MΦБ, 07X21Г7AH5等)用增加价格较廉且不太稀缺的锰来减少镍的含量。这类钢用于制造燃气轮机叶片和涡轮盘、燃气输送系统的零件和紧固件等。这些零件一般可在650—750℃温度下工作,当应力较小时则工作温度可达800—950℃。第Ⅳ类钢的切削加工性仅为45钢的1/3—1/4。

第Ⅴ类是铁镍基和镍基变形高温合金,它含有大量的铬(10—20%),以及略为少量的钛、铝、钨、钼、钴及其它合金元素。主要用于制造在重载和高温(750—950℃)下工作的零件,如燃气轮机涡轮盘、工作和诱导叶片及燃气轮机其它零件。第Ⅴ类高温合金的切削加工性仅为45钢的1/6—1/12。

第Ⅵ类铸造高温合金广泛地应用于制造燃气轮机喷射叶片、整体铸造转子及其它零件。由于在化学成分中添加了更多的合金元素,所以它比变形高温合金具有更高的热强性。由于铸造组织的不均匀性,它们的机械性能也差异甚大。铸造高温合金的切削加工性也与第Ⅴ类合金不同。铸造合金同变形合金切削加工性的差别可用以下理由来解释:铸造合金塑性较小,切削力也比变形合金要小。铸造合金中含有大量金属间的或碳化物的夹杂物,使高速钢刀具产生急速磨损。硬质合金刀具的工作条件要比高速钢刀具好得多。

几乎所有加工铸造高温合金的工序都采用硬质合金刀具。而加工变形高温合金时,只有连续切削才用硬质合金刀具。在很多断续切削条件下(端面铣削及立铣),用高速钢刀具加工变形高温合金比用硬质合金刀具更为合适。断续切削变形高温合金时,硬质合金刀具急速磨损并崩损的一个主要原因是:当刀刃离开工件时,刃口上粘有工件材料的微粒,在

下一次切入工件时, 粘结物将从刀口被撕掉, 同时也带走了部分硬质合金的微粒。加工铸造高温合金时, 由于其强度和塑性都较低, 所以上述粘结现象较为不显著。加工铸造高温合金的切削速度仅为加工 45 钢时的 $1/12-1/20$ 。

第Ⅶ类钛合金已广泛应用于各个工业领域。在不少设计中, 它正在替代铝合金和不锈钢。目前应用的钛合金已有 30 多个牌号, 其切削加工性随合金的强度而异。对 $\sigma_b \leq 1000\text{MPa}$ 且无鳞皮、硬化层及 α 转变层(由气体形成的饱和层)的钛合金, 可以较易地用高速钢和硬质合金刀具加工。当钛合金的强度 $\sigma_b > 1000\text{MPa}$ 后, 用高速钢刀具加工就困难了。加工带鳞皮及 α 转变层的钛合金, 只能采用硬质合金刀具。

钛合金的车削、铣削及钻削并不难。但由于这类合金的弹性较大, 当用丝锥切削螺纹、铰孔和拉孔时, 将会发生困难。因为刀具的后刀面和副后刀面将受到钳制。所以加工钛合金的刀具, 其后角和副后角应比加工结构钢时增大 $3-5^\circ$ 。定径刀具的实际尺寸应制成处于公差带的上限。

大多数钛合金均是在退火状态下使用。但当制造关键的机器零件时, 越来越多的钛合金要经过淬火和时效强化处理, 也有经过热机械加工的(BT14, BT15, BT3-1, BT22)。经过上述方式强化处理的钛合金, 其切削加工性将比退火状态下下降 $20-25\%$ 。

钛合金在 600°C 以上的高温下, 将与气体产生活泼的作用。在这些会产生气体饱和作用的元素中, 最活跃的是氧。气体饱和作用产生的表层, 硬度将显著增高, 显微硬度可达基体硬度的 $3-5$ 倍。其中, 钛与氧结合层的显微硬度达 13000MPa ; 钛与氮以及钛与碳结合层的显微硬度达 20000MPa ; 而基体的显微硬度只有 $3000-3500\text{MPa}$ 。鳞皮层厚度和 α 转

变层深度取决于温度及其作用时间。所以加工带有硬皮的钛合金时，其切削加工性受到毛坯制造方法的影响。铸件的缺陷层厚度可达几毫米，而锻件则为1mm，轧制件只有0.5mm。锻造棒料的切削加工性比轧制棒料要低。加工不带氧化皮的钛合金时，根据其强度的不同，切削速度只能是加工45钢时的 $2/3$ — $1/4$ 。加工带氧化皮的毛坯时，切削速度还应降低一半。

第Ⅶ类是高强度钢。过去主要采用28X3CHMΦA、30X2ΓCH2BM、35X5MCΦA、42X2ΓCHM等合金钢作高强度钢。它们属于第Ⅶ类A。根据含碳量及热处理方法的不同，其强度可达1600—2300MPa。但由于这些钢的塑性低，所以它们抵抗裂纹产生和扩展的能力较差，不宜用来制作关键的机器零件。有鉴于此，近年来发展了新牌号的H18K9M5T弥散硬化钢，它属于第Ⅶ类B。弥散硬化钢具有较高的抗脆断能力，尤其具有较高的抗裂纹扩展的能力。它对应力集中（微裂纹、划痕等）的敏感性较低。用这种材料制成的零件具有较高的使用可靠性。

用高强度材料（高强度钢和钛合金）制成的零件，其耐久性在很大程度上受精加工方法和加工条件的影响。这些材料制成的试件在周期负载条件下的试验结果表明：热处理强化或热机械强化后磨削的试件，比强化前磨削的同样试件承受的负载次数要多很多；强化后车削的试件比强化后磨削的试件承受的负载次数也要多。

高强度合金钢在退火状态下的切削加工性同普通结构钢相仿。淬火回火后由于极限强度的增大，其切削加工性将下降 $4/5$ — $7/8$ 。因此，加工这类钢的工件时应在淬火回火前进行切削，留下的余量要尽可能小，只要留给热处理变形和精加

表3 难加工材料的化学成分(%)

牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe	S		其它元素
										P		
										不大于		
耐热钢(第 I 类)												
34XH3M	0.30— 0.40	0.17— 0.37	0.50— 0.80	0.7—1.1	2.75— 3.25	0.25— 0.40	—	—	基	0.035	0.030	Cu≤0.25
34XH3MΦ	0.30— 0.40	0.17— 0.37	0.50— 0.80	1.2—1.5	3.00— 3.50	0.25— 0.40	—	0.10— 0.20	基	0.035	0.030	—
20X3MBΦ	0.16— 0.24	0.17— 0.37	0.25— 0.50	2.8—3.3	—	0.35— 0.55	0.3— 0.5	0.60— 0.85	基	0.025	0.030	—
15X5M	≤0.15	≤0.5	≤0.5	4.5—6.0	—	0.45— 0.60	—	—	基	0.025	0.030	—
15X6CJO	≤0.15	1.2—1.8	≤0.5	5.5—7.0	—	—	—	—	基	0.025	0.030	Al 0.7— 1.1

铬不锈钢(第II类)

牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe	Ne	S	P
											不大于	
12X13	0.09— 0.15	0.60	0.60	12.0— 14.0	—	—	—	—	基	—	0.025	0.030
25X13H2	0.2—0.3	0.5	0.8— 1.2	12.0— 14.0	1.5—2.0	—	—	—	基	—	0.15— 0.25	0.03— 0.15
11X11H2BMΦ	0.9— 0.13	≤0.60	≤0.60	10.5— 12.0	1.5—1.8	0.35— 0.50	1.5—2.0	0.18— 0.30	基	—	0.025	0.030
1X12H2BMΦ	0.10— 0.16	≤0.60	≤0.60	10.5— 12.0	1.5—1.8	0.35— 0.50	1.6—2.0	0.18— 0.30	基	—	0.025	0.030