



难加工材料 切削加工

韩荣第 于启勋 主编



机械工业出版社

难加工材料切削加工

主编 韩荣第 于启勋

主审 袁哲俊



机械工业出版社

2007/36

本书内容主要介绍各种金属和非金属难加工材料的切削加工机理与应用技术；还对难加工材料的磨削和非常规切削方法（如振动切削、加热切削等）进行了较系统的介绍。本书资料丰富，数据齐全，实用性强。

由于本书内容新、数据多，可供生产第一线从事难加工材料机械加工的广大工程技术人员阅读参考，也可供机械制造工艺及设备专业本科和大专、中专相应专业的师生作为选修教材选用。

图书在版编目 (CIP) 数据

难加工材料切削加工/韩荣第, 于启勋主编. —北京: 机械工业出版社, 1996.9

ISBN 7-111-05161-0

I. 难… I. ①韩…②于… 难加工材料切削加工 IV TG506.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 05430 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑: 高文龙 版式设计: 霍永明 责任校对: 樊中英
封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光
北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年11月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·15.75印张·381千字
0 001-4 000 册
定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

随着机械制造、宇航、航空、兵器、汽车、化工、能源、船舶及医疗等工业的迅猛发展，对结构材料性能的要求越来越高。具有不同性能的新材料，如：高强度钢、超高强度钢、高锰钢、淬硬钢、耐磨合金铸铁、不锈钢、高温合金、钛合金、热喷涂材料及高熔点材料等不断涌现。近年，复合材料及精细陶瓷等也逐渐用于现代工业中。上述材料都是不易或很难进行切削加工的难加工材料。

对于难加工材料的切削技术，国内外都已进行了大量的卓有成效的研究工作，并已部分用于生产实际。

近来，国内也出版过这方面的参考书，但多限于金属类难加工材料的切削加工，非金属类难加工材料尚很少涉及。特别是关于精细陶瓷材料、树脂基和金属基复合材料的切削加工技术更少介绍，多数尚属空白。

本书共分四篇十八章，除了对难加工材料切削加工的共性问题作了介绍外，还分别对前述各种难加工材料的切削加工特点及机理，特别是对尚未为人们所熟知的精细陶瓷材料、复合材料的切削加工技术，作了较详尽的阐述，并给出了加工实例。此外，还对难加工材料的磨削加工、振动切削、加热切削、低温切削及带磁切削等非常规切削加工方法作了较系统的介绍。全书内容丰富，联系实际，对从事难加工材料切削加工的理论研究与工程应用都有指导意义。

本书可供从事难加工材料机械加工的广大工程技术人员阅读使用，也可供机械制造工艺及设备专业本科和大专、中专相应专业的师生作为选修教材选用。

本书由哈尔滨工业大学韩荣第和北京理工大学于启勋主编，由哈尔滨工业大学袁哲俊主审。各章作者分工如下：第一、三、四章由北京理工大学于启勋编写；第二、五、六、十一、十二、十三、十四、十六、十七、十八章由哈尔滨工业大学韩荣第编写；第七、八、九、十、十五章由西北工业大学何琼儒与韩荣第合编。哈尔滨工业大学杨荣福对编写工作曾给予指导，发挥了重大作用。全书由韩荣第和于启勋统稿、定稿。

因水平所限，书中不当之处在所难免，恳请读者指正。

主 编
1996年1月

目 录

前言

第一篇 难加工材料切削加工的基础知识

第一章 被加工材料的切削加工性	1	加工特点	14
第一节 材料切削加工性的含义	1	第一节 难加工材料的分类	14
第二节 衡量切削加工性的指标	2	第二节 难加工材料的切削加工特点	15
第三节 工件材料方面诸因素对切削加工性的影响	7	第三章 改善难加工材料切削加工性的途径	17
第四节 工件材料切削加工性的综合分析	12	第一节 改善材料本身的切削加工性	17
第二章 难加工材料的分类及切削		第二节 合理选用刀具材料	18
		第三节 合理使用切削液	33

第二篇 难加工金属材料的切削加工

第四章 高强度钢和超高强度钢的切削加工	35	加工	69
第一节 概述	35	第四节 不锈钢、高温合金的其它切削加工	77
第二节 高强度钢和超高强度钢的切削加工特点	37	第八章 钛合金的切削加工	87
第三节 切削高强度钢和超高强度钢的有效途径	41	第一节 概述	87
第五章 高锰钢的切削加工	48	第二节 钛合金的切削加工特点	90
第一节 概述	48	第三节 钛合金的车削加工	92
第二节 切削高锰钢的有效途径	49	第四节 钛合金的其它切削加工	94
第六章 淬硬钢与冷硬铸铁、耐磨合金铸铁的切削加工	53	第九章 热喷焊(涂)材料的切削加工	106
第一节 概述	53	第一节 概述	106
第二节 淬硬钢与冷硬铸铁、耐磨合金铸铁的切削加工特点	54	第二节 喷焊(涂)材料的切削加工特点	109
第三节 淬硬钢与冷硬铸铁、耐磨合金铸铁的切削加工途径	54	第三节 喷焊(涂)材料的切削加工	110
第七章 不锈钢及高温合金的切削加工	61	第十章 稀有难熔金属及合金的切削加工	113
第一节 概述	61	第一节 钨(W)及其合金的切削加工	113
第二节 不锈钢、高温合金的切削加工特点	66	第二节 钼(Mo)及其合金的切削加工	114
第三节 不锈钢、高温合金的车削		第三节 钽(Ta)、铌(Nb)的切削加工	115
		第四节 锆(Zr)的切削加工	116

第三篇 难加工非金属和复合材料的切削加工

第十一章	工程塑料的切削加工	119	第一节	概述	158
第一节	概述	119	第二节	聚合物基纤维增强复合材	
第二节	工程塑料的切削加工特点	120	料 (FRP) 简介	160	
第三节	工程塑料的切削加工实例	121	第三节	聚合物基纤维增强复合材	
第十二章	工程陶瓷材料的切削		料 (FRP) 的切削加工	164	
加工	126		第四节	金属基纤维增强复合材料	
第一节	概述	126	(FRM) 的切削加工	179	
第二节	工程陶瓷材料的特性及脆		第十四章	其它非金属材料的切削	
性破坏机理探讨	128		加工	190	
第三节	工程陶瓷材料的切削加工	130	第一节	工程橡胶的切削加工	190
第四节	工程陶瓷材料的磨削	146	第二节	工业搪瓷的加工	191
第十三章	复合材料的切削加工	158	第三节	石材的加工	193

第四篇 难加工材料的其它机械加工方法

第十五章	难加工材料的磨削加工	197	第十七章	加热切削	227
第一节	不锈钢的磨削加工	197	第一节	概述	227
第二节	高温合金的磨削加工	201	第二节	加热切削中的加热方法	228
第三节	喷焊(涂)层的磨削加工	203	第三节	加热切削机理探讨	230
第四节	钛合金的磨削加工	205	第四节	难加工材料加热切削举例	232
第十六章	振动切削	210	第十八章	难加工材料的其它切削	
第一节	概述	210	加工方法	234	
第二节	振动切削过程解析	215	第一节	带磁切削	234
第三节	振动切削装置及在难加工材料		第二节	低温切削	239
加工中的应用	222		参考文献	241	

第一篇 难加工材料切削加工 的基础知识

第一章 被加工材料的切削加工性

随着航空航天工业、核工业、兵器工业、化学工业、电子工业及现代机械工业的发展，对产品零部件材料的性能提出了各种各样的新的和特殊的要求。有的要在高温、高应力状态下工作，有的要耐腐蚀、耐磨损，有的要能绝缘，有的则需有高导电率。对这些材料进行切削加工，一般均较困难。故在现代工程材料中出现了许多难加工材料，如：高强度与超高强度钢、高锰钢、不锈钢、高温合金、钛合金、冷硬铸铁、合金耐磨铸铁及淬硬钢等。此外，还有许多非金属材料，如石材、陶瓷、工程塑料和复合材料等。上述材料之所以难加工或较难加工，原因在于1) 高硬度；2) 高强度；3) 高塑性和高韧性；4) 低塑性和高脆性；5) 低导热性；6) 有微观的硬质点或硬夹杂物；7) 化学性能过于活泼。工件材料的这些特性常使切削过程中的切削力加大，切削温度升高，刀具耐用度降低，有时还将使已加工表面质量恶化，切屑难以控制，最终则将使加工效率和加工质量下降。

研究难加工材料的切削加工性，掌握切削规律，寻求技术措施，是当前切削加工技术中的重要课题。

第一节 材料切削加工性的含义

材料的切削加工性，英文叫 Machinability，它是指对某种材料进行切削加工的难易程度。但这种定义有局限性，因为只考虑了材料本身的性质（如物理、力学性能等）对于加工的影响，没有考虑由材料转变为零件的过程中应考虑的其他因素。实践表明，零件的技术条件和加工条件，对加工性影响很大。对于同一种被加工材料，如零件的技术条件和加工条件不同，则其加工的难易程度有着很大的差异。

例如：毛坯的制造质量对零件的加工性影响很大，形状不够规整且表面带有硬皮的铸件、锻件常给加工带来困难；

同一种材料但结构、尺寸不同的零件，其加工性也有着很大的差异，如特大、特小的零件、弱刚性零件或形状特别复杂的零件，都比较难加工；

尺寸精度和表面质量要求高的零件较难加工，要求低的零件较易加工；

用某种切削性能较差的刀具加工高硬度、高强度材料，显得很困难，甚至根本不能加工，如换一种切削性能好的刀具，却能使加工顺利进行；

在普通机床上使用通用夹具，加工某一零件非常困难，如改用专门机床和专用夹具，则加工并不难解决；

采用新型的极压切削液，可以改善加工性；选用合理的切削用量，也可以使加工进行得顺利一些。

由此可见，在研究材料加工性的同时，还应当有针对性地研究零件的加工性。二者结合起来，对生产就有更大的指导意义。

生产批量对加工性也有影响。在相同条件下加工同一材料的零件，批量小的比较容易解决；批量大的对生产率有更高要求，加工难度较大。

加工性好坏的概念具有相对性。某种材料的加工性，系相对于另一种材料而言。一般，在讨论钢料的加工性时，习惯地以中碳结构钢 45 钢为基准。如称高强度钢比较难加工，是相对于 45 钢而言的。刀具的切削性能与加工性的关系最为密切。不能脱离刀具一方的具体情况，孤立地讨论或研究被加工材料（或零件）一方的加工性。因此，应当将被加工材料（或零件）的加工性与刀具的切削性能结合起来进行研究。

第二节 衡量切削加工性的指标

比较材料的切削加工性，应当有一个数量的概念。在不同情况下，可以用不同参数作为指标来衡量加工性。有时衡量加工性只用一项主要的指标，有时则兼用几项指标。

一、以刀具耐用度 T 或一定耐用度下的切削速度 v_T 衡量切削加工性

在相同的切削条件下加工不同材料，显然，刀具耐用度 T 较长或一定耐用度下切削速度 v_T 较高的那一种材料，其加工性较好；反之， T 较短或 v_T 较低的材料，其加工性较差。例如，用 YT15 车刀加工 45 钢， $T=60\text{min}$ ；加工 30CrMnSiA 钢， $T=20\text{min}$ 。则 30CrMnSiA 钢的加工性次于 45 钢。

经常用某一材料的 v_T 与基准材料的 $v_{T(45)}$ 的比值，作为某一材料的相对加工性 (K_r) 即

$$K_r = v_T / v_{T(45)}$$

如表 1-1 所示，以 45 钢为基准，耐用度 T 取为 60min。凡 K_r 大于 1 的材料，加工性优于 45 钢； K_r 小于 1 的材料，加工性次于 45 钢。

T 、 v_T 或 K_r 是最常用的加工性指标。刀具耐用度不仅用加工时间表示，也可以用零件加工件数或进给（走刀）长度来表示。

表 1-1 几种金属材料的
相对加工性

被加工材料	$K_r = v_{60} / v_{60(45)}$
铜、铝合金	≥ 3
45 钢 (正火)	1
2Cr13 (调质)	0.65~1
45Cr (调质)	0.5~0.65
钛合金	0.15~0.5

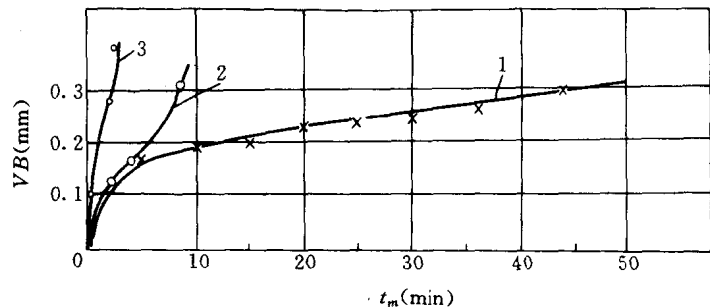


图 1-1 切削不锈钢时的刀具磨损曲线^[8]

1—0 Cr12Ni12Mo+S 2—0 Cr12Ni12Mo 3—0 Cr18Ni9

$v_c = 180\text{m/min}$ $a_p = 0.5\text{mm}$ $f = 0.39\text{mm/r}$

$\gamma_o = 20^\circ$ $\alpha_o = 6^\circ$ $\lambda_s = -5^\circ 30'$ $\kappa_r = 90^\circ$ 干切

除此之外,有时还可以用切削路程 l_m 、金属切除量 V 或金属切除率 Q 作为衡量切削加工性的指标。计算公式如下:

$$l_m = v_T T \tag{1-1}$$

$$V = 1000 l_m a_p f \tag{1-2}$$

$$Q = V/T = 1000 v_T a_p f \tag{1-3}$$

式中 v_T ——切削速度 (m/min), 该速度下的刀具耐用度为 T ;

a_p ——切削深度[⊙] (mm);

f ——进给量 (mm/r)。

凡 l_m 、 V 、 Q 大者, 切削加工性较好; 反之, 切削加工性较差。

从刀具磨损曲线或 $T-v$ 曲线图中, 可以直观地观察不同材料的切削加工性的优劣。图 1-1 和图 1-2 为用 798 合金(自贡硬质合金厂牌号)加工三种奥氏体不锈钢的磨损曲线和 $T-v_c$ 曲线。由图 1-1、图 1-2 可以看出, 0Cr12Ni12Mo+S 易切不锈钢的加工性最好, 0Cr12Ni12Mo 次之, 0Cr18Ni9 又次之。

二、以切削力和切削温度衡量切削加工性

在相同切削条件下, 凡切削力大、切削温度高的材料较难加工, 即切削加工性差; 反之, 则切削加工性好。表 1-2 为几种高强度钢与 45 钢的切削力对比。高强度调质钢的切削力比 45 钢高出 20%~30%, 高锰钢的切削力则比 45 钢高出 60%。图 1-3 和图 1-4 为不同切削速度下各种材料切削温度的对比。由图 1-3 看出, 45 钢经调质后其切削温度高于正火, 经淬火后又高于调质。T10A (退火) 的切削温度高于 45 钢 (正火)。由图 1-4 看出, 灰铸铁 HT200 的切削温度低于 45 钢, 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的切削温度高于 45 钢甚多, 而高温合金 GH131 的切削温度更高。

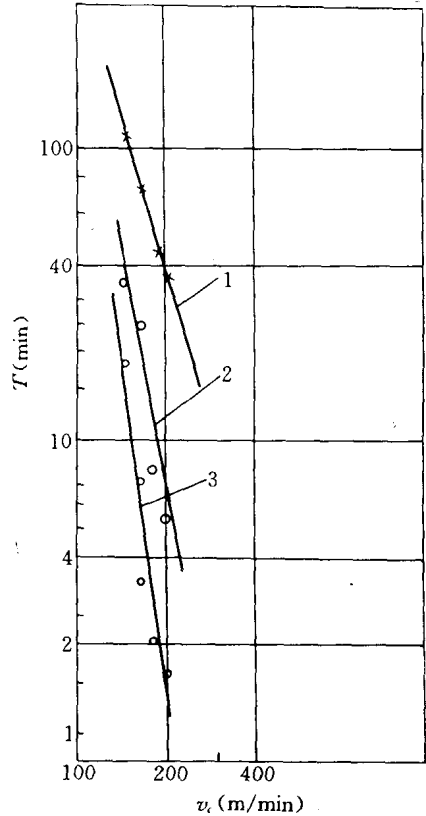


图 1-2 切削不锈钢时的 $T-v_c$ 曲线^[8]

$VB=0.3\text{mm}$, 其余条件同图 1-1

$$1-vT^{0.31}=587 \quad 2-vT^{0.18}=269$$

$$3-vT^{0.14}=208$$

表 1-2 几种钢材的车削力对比^[1]

材料牌号	热处理状态	硬度 HRC	单位切削力比值	备注
45	正火	18~20	1	刀具几何参数 $\gamma_o=5^\circ$ $\alpha_o=8^\circ$
60	正火	23	1.06~1.1	
38 CrNi3MoVA	调质	32~34	1.15~1.2	$\kappa_r=45^\circ$ $\lambda_s=-5^\circ$ $r_e=0.5\text{mm}$
30 CrMnSiA	调质	35~40	1.2	
35 CrMnSiA	调质	42~47	1.25	
ZGMn13	水韧	170~207HBS	1.60	45 钢的单位切削力 为 $k_c=2270\text{MPa}$

⊙ 在国家推荐性标准 GB/T12204-90 中, a_p 称为背吃刀量。

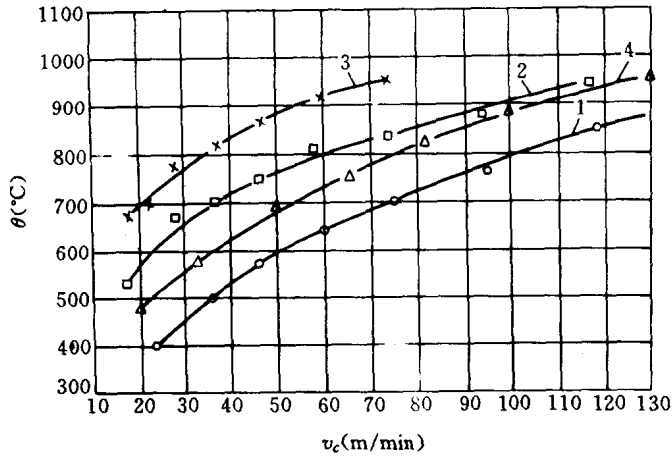


图 1-3 不同切削速度下 T10A 和各种状态下 45 钢的切削温度^[10]

工件材料：1—45 钢（正火），187HBS 2—45 钢（调质），229HBS

3—45 钢（淬火），44HRC 4—T10A（退火），189HBS

刀具材料：YT15 刀具结构：机夹可转位外圆车刀

刀具几何参数： $\gamma_o=15^\circ$ $\alpha_o=6^\circ\sim 8^\circ$ $\kappa_r=75^\circ$ $\lambda_s=0^\circ$ $r_e=0.2\text{mm}$

切削用量： $a_p=3\text{mm}$ $f=0.1\text{mm/r}$

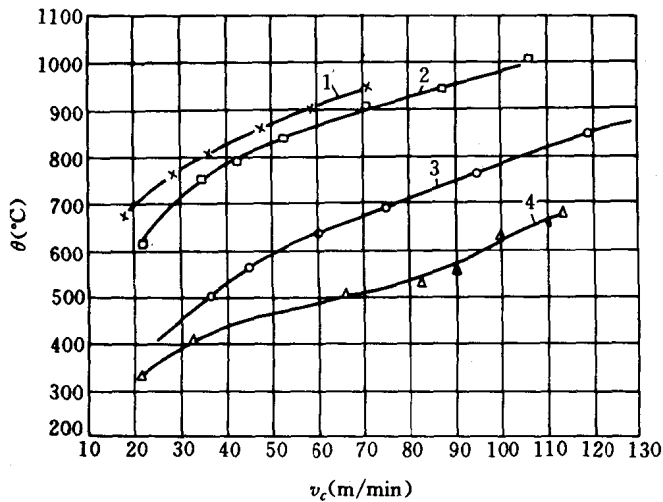


图 1-4 不同切削速度下各种材料的切削温度曲线^[10]

1—GH131 2—1Cr18Ni9Ti 3—45 钢（正火） 4—HT200

刀具与工件材料：YT15-45 钢 YG8-GH131 1Cr18Ni9Ti HT200

刀具几何参数： $\gamma_o=15^\circ$ $\alpha_o=6^\circ\sim 8^\circ$ $\kappa_r=75^\circ$ $\lambda_s=0^\circ$ $r_e=0.2\text{mm}$

切削用量： $a_p=3\text{mm}$ $f=0.1\text{mm/r}$

切削力大，则消耗功率多。在粗加工时，可用切削力或切削功率作为切削加工性指标。切削温度不易测量和标定，故这个指标用得较少。

三、以已加工表面质量衡量切削加工性

零件在精加工时，常以此作为切削加工性的指标。凡容易获得好的已加工表面质量的材

料，其切削加工性较好；反之，则较差。已加工表面质量的内容又有表面粗糙度和表面残余应力等。图 1-5 和图 1-6 为加工奥氏体不锈钢时表面粗糙度 R_a 值的比较曲线。由图可见，用表面粗糙度来衡量，1Cr18Ni9Ti 的切削加工性最好，0Cr12Ni12Mo+S 次之，0Cr12Ni12Mo 又次之。

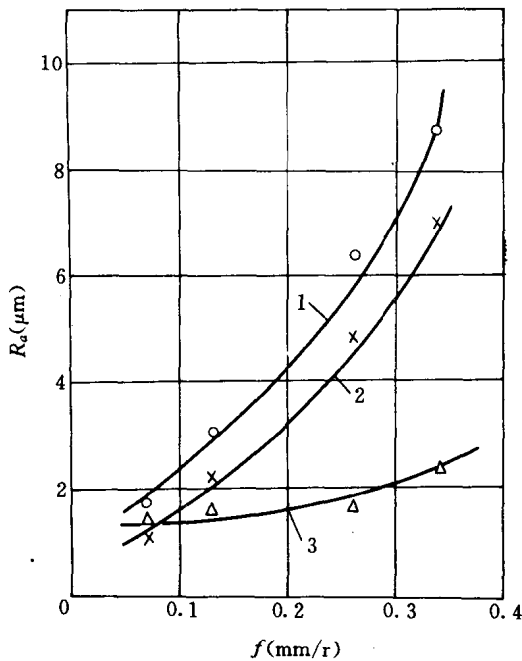


图 1-5 车削奥氏体不锈钢时的 R_a-f 曲线^[8]
1—0Cr12Ni12Mo 2—0Cr12Ni12Mo+S 3—1Cr18Ni9Ti
 $v_c=60\text{m/min}$ $a_p=0.5\text{mm}$

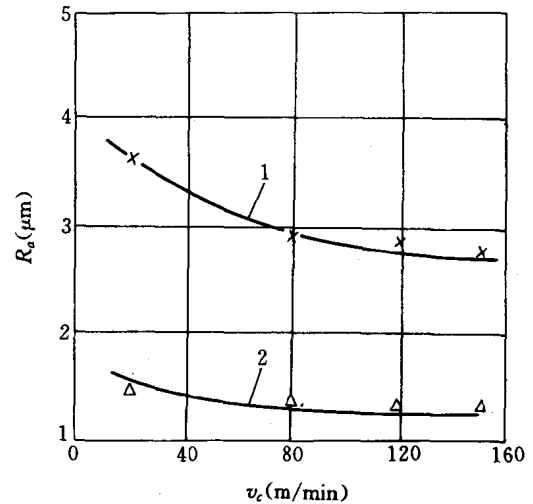


图 1-6 车削奥氏体不锈钢时的 R_a-v_c 曲线^[8]
1—0Cr12Ni12Mo+S 2—1Cr18Ni9Ti
 $a_p=0.5\text{mm}$ $f=0.15\text{mm/r}$

图 1-7 为车削三种奥氏体不锈钢的已加工表面残余应力的比较。由图可见，用表面残余应力的大小来衡量，0Cr12Ni12Mo+S 的切削加工性较好，另两种钢稍差。

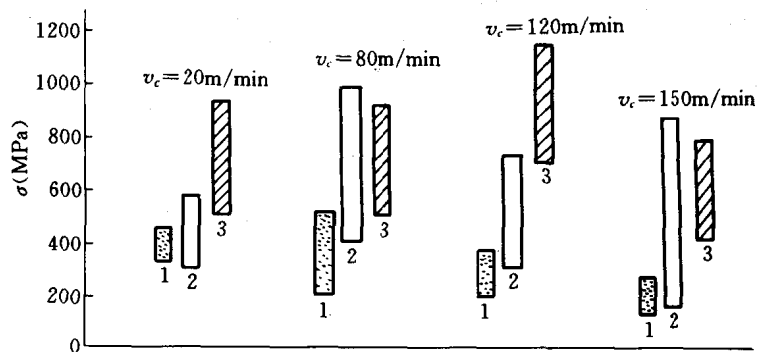


图 1-7 车削奥氏体不锈钢时表面残余应力的对比^[8]
1—0Cr12Ni12Mo+S 2—0Cr12Ni12Mo 3—1Cr18Ni9Ti

四、以切屑控制或断屑的难易衡量切削加工性

在数控机床、加工中心或现代制造系统中，高速切削塑性材料，常以此为切削加工性指标。凡切屑容易控制或容易断屑的材料，其切削加工性较好；反之，则较差。

图 1-8 为在相同条件下，车削 45 钢与高强度钢 60Si2Mn（调质，39~42HRC， $\sigma_b = 1.18\text{GPa}$ ），60Si2Mn 的断屑范围窄于 45 钢，故前者的切削加工性较差。

以上是常用的切削加工性指标。国外还有用零件的加工费用或加工工时作为切削加工性的综合指标。在生产中有实用价值。美国切削加工性数据中心编制的《切削数据手册》中介绍了各种金属材料零件的加工费用和加工工时的对比，如表 1-3、表 1-4 所示。显然，凡加工费用低、加工工时短的材料和零件，其切削加工性较好；反之，则较差。

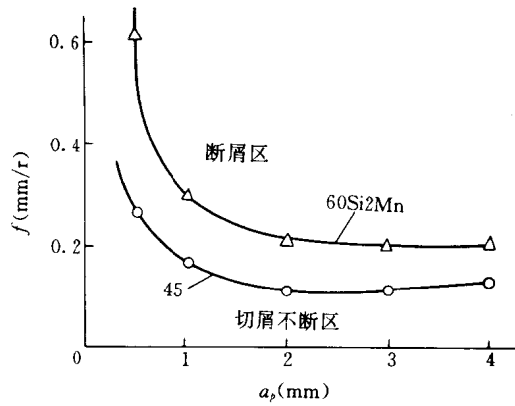


图 1-8 两种钢材车削断屑范围对比
 $v_c = 100\text{m/min}$ $\kappa_r = 90^\circ$ 刀片：CN25, 213V

表 1-3 各种金属材料零件的加工费用对比^[89]

材料种类	牌 号	加工费用 (\$)
铝合金	7075-T6	10
普通碳素钢	1020, 111HBS	25
低合金钢	4340, 调质, 332HBS	50
低合金钢	4340, 调质, 52HRC	100
铁基高温合金	A-286, 时效, 320HBS	120
钴基高温合金	HS25	138
镍基高温合金	Rene41, 时效, 350HBS	238
镍基高温合金	Inconel700, 时效, 400HBW	345

注：本表的加工费用系针对某一具体零件的车削加工，不反映材料费、刀具费和热处理费。

表 1-4 各种金属材料零件的加工工时对比^[89]

材料种类	牌 号	加工工时对比	
		高速钢	硬质合金
合金钢	4340, 调质, 300HBS	1.0	1.0
	4340, 调质, 500HBW	3.3	3.3
	4340, 退火, 210HBS	0.8	0.8
高强度钢	H11, 调质, 350HBS	1.7	2.0
奥氏体不锈钢	302, 304, 317, 321, 退火, 180HBS	0.8	0.9
钛合金	6Al-4V, 退火, 310HBS	1.7	2.0
镍基高温合金	Inconel718, 270HBS	5.0	5.0
铝合金	7075-T6, 75HBS	0.12	0.3

第三节 工件材料方面诸因素对切削加工性的影响

一、工件材料的物理、力学性能对切削加工性的影响^[1,3]

1. 硬度和强度

钢材的硬度和抗拉强度值有如下近似的关系：低碳钢， $\sigma_b \approx 3.6\text{HBS}$ ；中、高碳钢， $\sigma_b \approx 3.4\text{HBS}$ ；调质合金钢， $\sigma_b \approx 3.25\text{HBS}^\ominus$ 。一般，金属材料的硬度和强度越高，则切削力越大，切削温度越高，刀具磨损越快，故其切削加工性越差。例如，高强度钢比一般钢材难加工，冷硬铸铁比灰铸铁难加工。有些材料的室温强度并不太高，但高温下强度降低不多，则其加工性亦较差（切削是在高温下进行的）。例如 20CrMo 合金结构钢在室温下 σ_b 比 45 钢低 65MPa，而在 600℃ 时其 σ_b 反比 45 钢高 180MPa，故 20CrMo 的加工性比 45 钢差。

并不是材料的硬度越低，越好加工。有些金属如低碳钢、纯铁、纯铜等硬度虽低，但塑性很高，也不好加工。硬度适中（如 160~200HBS）的钢材较好加工。此外，适当提高材料的硬度，有利于获得较好的已加工表面质量。

以上所说的硬度，是指材料的宏观硬度，未考虑局部的微观硬度。金属组织中常有细微的硬质夹杂物，如 SiO_2 、 Al_2O_3 、TiC 等，它们的显微硬度高。如有一定数量，则使刀具产生严重的磨料磨损，从而降低了材料的切削加工性。

在切削加工中，被切削层材料产生剧烈的塑性变形，从而发生硬化。材料经加工硬化后其硬度比原始硬度提高很多，使刀具发生磨损。故加工硬化现象越严重，则刀具耐用度越低，即材料的切削加工性越差。

2. 塑性

材料的塑性以伸长率和断面收缩率表示。一般，材料的塑性越高，越难加工。因为塑性高的材料，加工变形和硬化都比较严重，与刀具表面的粘着现象也较强，不易断屑，不易获得好的已加工表面质量。此外，切屑与前面的接触长度也将加大，使摩擦力增大。如 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的硬度与 45 钢相近，但其塑性很高（ $\delta \approx 40\%$ ），故加工难度比 45 钢大很多。

3. 韧性

韧性以冲击值表示。材料的韧性越高，则切削时消耗能量多，切削力和切削温度都较高，不易断屑，故切削加工性较差。有些合金结构钢不仅强度高于碳素结构钢，冲击值也较高，故较难加工。

4. 导热性

被加工材料的导热系数越大，则由切屑带走的热量越多，有利于降低切削区的温度，故切削加工性较好。如 45 钢的导热系数为 $50.2\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，而奥氏体不锈钢和高温合金的导热系数仅为 45 钢的 $1/3\sim 1/4$ ，这是其切削加工性低于 45 钢的重要原因之一。铜、铝及其合金的导热系数很大，为 45 钢的 2~8 倍，这是它们切削加工性好的原因之一。

5. 其它物理力学性能

其它物理力学性能对加工性也有一定影响。如线膨胀系数大的材料，加工时热胀冷缩，工件尺寸变化很大，故不易控制精度。弹性模量小的材料，在已加工表面形成过程中弹性恢复

⊖ 在这里的近似关系中， σ_b 值的单位取 MPa。

大，易与刀具后面发生强烈摩擦。

前苏联人曾提出计算碳素结构钢的相对加工性的公式^[7]：

$$K_r = (k/k_j)^{0.5} (\sigma_{bj}/\sigma_b)^{1.8} [(1 + \delta_j)/(1 + \delta)]^{1.8} \quad (1-4)$$

式中 σ_{bj} , δ_j , k_j ——分别为基准材料 45 钢的抗拉强度、伸长率和导热系数；

σ_b , δ , k ——分别为待计算材料的抗拉强度、伸长率和导热系数。

该公式反映了 σ_b , δ , k 等因素对加工性的综合影响。但影响切削加工性的因素比较复杂，故计算出的 K_r 仍是不够精确的。该公式可作定性或半定量分析之用。

6. 材料的化学性质

某些材料的化学性质也在一定程度上影响切削加工性。如切削镁合金时，粉末状的碎屑易与氧化合发生燃烧。切削钛合金时，高温下易从大气中吸收氧、氮，形成硬而脆的化合物，使切屑成为短碎片，切削力和切削热都集中在刃口附近，从而加速了刀具的磨损。

二、金属材料的化学成分对切削加工性的影响^[7,1,3]

前面已述，物理力学性能对材料的切削加工性影响很大。但物理、力学性能是由材料的化学成分决定的。下面主要分析钢料中各种元素对其切削加工性的影响。

1. 碳

含碳量小于 0.15% 的低碳钢，塑性和韧性很高；含碳量大于 0.5% 的高碳钢，强度和硬度又较高。在这两种情况下切削加工性都要降低。含碳量为 0.35%~0.45% 的中碳钢，切削加工性较好。这是对于一般正火或热轧状态下的碳素钢而言，对于加入合金元素并经过不同热处理的钢材，其切削加工性还有着更为复杂的情况。

2. 锰

增加含锰量，则钢的硬度、强度提高，韧性下降。当钢的含碳量小于 0.2% 时，锰含量在 1.5% 以下范围内增加，可改善切削加工性。当增加含碳量或锰含量大于 1.5%，则加工性变坏。一般，含锰量在 0.7%~1.0% 时加工性较好。

3. 硅

硅能在铁素体中固溶，故能提高钢的硬度。当含硅量小于 1% 时，钢在提高硬度的同时塑性下降很少，对切削加工性略有不利。此外，钢中含硅后导热系数有所下降。当在钢中形成硬质夹杂物 SiO_2 时，使刀具磨损加剧。

4. 铬

铬能在铁素体中固溶，又能形成碳化物。当含铬量小于 0.5% 时，对切削加工性的影响很小。含铬量进一步加多，则钢的硬度、强度提高，切削加工性有所下降。

5. 镍

镍能在铁素体中固溶，使钢的强度和韧性均有所提高，导热系数降低，使切削加工性变差。当含镍量大于 8% 后，形成了奥氏体钢，加工硬化严重，切削加工性就更差了。

6. 钼

钼能形成碳化物，能提高钢的硬度，降低塑性。含钼量在 0.15%~0.4% 范围内，切削加工性略有改善。大于 0.5% 后，切削加工性降低。

7. 钒

钒能形成碳化物，并能使钢的组织细密，提高硬度，降低塑性。当含量增多后使切削加工性变差，含量少时对切削加工性略有好处。

8. 铅

铅在钢中不固溶，而呈单相微粒均匀分布，破坏了铁素体的连续性，还有润滑作用，故能减轻刀具磨损，使切屑容易折断，从而有效地改善了切削加工性。

9. 硫

它能与钢中的锰化合生成非金属夹杂物 MnS ，呈微粒均匀分布， MnS 的塑性好，且有润滑作用。它破坏了铁素体的连续性而降低了钢的塑性，故能减小钢的加工变形，提高已加工表面质量，改善断屑，减小刀具磨损，从而使切削加工性得到显著提高。

10. 磷

它存在于铁素体的固溶体内。钢中含磷量增加，使强度、硬度提高，塑性、韧性降低。当含磷量达到 0.25% 时，强度、硬度略有提高，伸长率降低不多，但冲击值显著下降，使钢变脆。故含磷量如控制在 0.15% 以下，可通过“加工脆性”而使钢的切削加工性改善。当含磷量大于 0.2% 时，脆性过大而使切削加工性变劣。

11. 氧

钢中含有微量的氧，能与其它合金元素化合生成硬质夹杂物，如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等，对刀具具有强烈擦伤作用，使刀具磨损加剧，从而降低了切削加工性。

12. 氮

它在钢中会形成硬而脆的氮化物，使切削加工性变差。

各种元素在小于 2% 的含量时对钢的切削加工性的影响，如图 1-9 所示。

美国人曾提出含碳量在 0.25%~1.0% 范围内各种钢材（热轧或退火状态）相对加工性的计算公式^[7]：

$$K_r = 1.57 - 0.666C - 0.151Mn - 0.111Si - 0.102Ni - 0.058Cr - 0.056Mo$$

公式中的化学元素符号代表各种元素的质量分数。这个公式仅能粗略估算一种热处理状态下的钢材的相对加工性，显然也是不够精确的。

含碳量大于 2% 的铁碳合金称为铸铁，除碳外还含有较多的硅、锰、硫、磷等杂质，有时为了满足性能上的要求，还加入钼、铬、镍、铜、铝等元素，制成合金铸铁。

铸铁的组织 and 性能，在很大程度上受碳元素存在形态的影响。碳可能以碳化物 (Fe_3C) 形态出现，也可能呈游离的石墨状态，或二者同时存在。

灰铸铁是 Fe_3C 和其它碳化物与片状石墨的混合物。它的硬度虽与中碳钢相近，但 σ_b 、 δ 、 a_k 均甚小，即脆性很大，故切削力较小，仅为 45 钢的 60% 左右。灰铸铁中的碳化物硬度很高，对刀具具有擦伤作用；且切屑呈崩碎状，应力与切削热都集中在刀刃上。因此刀具磨损率并不低，只能采用低于加工钢的切削速度。

石墨很软，具有润滑作用。铸铁中自由石墨越多，越容易切削。因此铸铁中含有硅、铝、镍、铜、钛等促进石墨化的元素，能提高其加工性；含有铬、钒、锰、钼、钴、硫、磷等阻碍石墨化的元素，会降低其加工性。

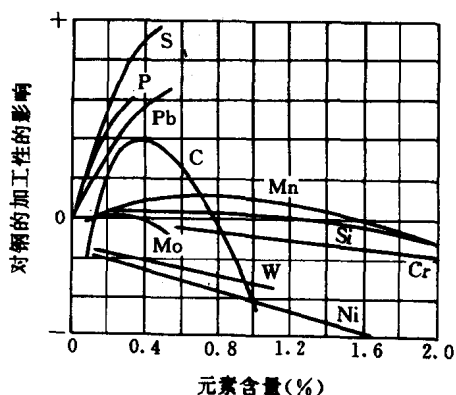


图 1-9 各种元素对结构钢切削加工性的影响示意图^[7]

+ 表示切削加工性改善 - 表示切削加工性变差

在各种含合金的灰铸铁中,以 $\sigma_b=180\text{MPa}$ 、 $\sigma_{bc}=360\text{MPa}$ 、190HBS 的灰铸铁为基准,前苏联人曾提出计算相对加工性的公式^[7]:

$$K_r = \left(\frac{0.8}{C_e} \right)^{1.3} \left(\frac{700}{\sigma_{bc}} \right)^{1.35} \quad (1-5)$$

式中 σ_{bc} ——铸铁的抗压强度;

C_e ——合金元素的折合当量, C_e 可计算如下:

$$C_e = C_c + 0.75\text{Mo} + 0.25\text{Mn} + 0.33\text{P} + 1.66\text{Cr} - 0.1\text{Ni}$$

式中 C_c ——化合碳含量百分率。

此公式可粗略估算合金灰铸铁的切削加工性。

三、热处理状态和金相组织对切削加工性的影响^[3]

钢的金相组织有:铁素体、渗碳体、索氏体、托氏体、奥氏体、马氏体等,其物理力学性能列于表 1-5。

表 1-5 钢的各种金相组织的物理、力学性能^[1,3]

金相组织	硬度	σ_b , GPa	δ (%)	k , W/(m·°C)
铁素体	60~80HBS	0.25~0.29	30~50	77.03
渗碳体	700~800HBW	0.029~0.034	极小	7.12
珠光体	160~260HBS	0.78~1.28	15~20	50.24
索氏体	250~320HBS	0.65~1.37	10~20	
托氏体	400~500HBW	1.37~1.67	5~10	
奥氏体	170~220HBS	0.83~1.03	40~50	
马氏体	520~760HBW	1.72~2.06	2.8	

1. 铁素体

碳溶解于 $\alpha\text{-Fe}$ 中所形成的固溶体为铁素体。铁素体中溶解碳的数量很少,在 910°C 以下, 723°C 时溶解量最高,约为 0.02%。铁素体中还可以含有硅、锰、磷等元素。由于铁素体含碳很少,故其性能接近于纯铁,是一种很软而又很韧的组织。在切削铁素体时,虽然刀具不易被擦伤,但与刀面冷焊现象严重,使刀具产生冷焊磨损。又容易产生积屑瘤,使加工表面质量恶化。故铁素体的切削加工性并不好。通过热处理(如正火)或冷作变形,提高其硬度,降低其韧性,可使其切削加工性得到改善。

2. 渗碳体

碳与铁互相作用形成的化合物 Fe_3C 称为渗碳体。渗碳体的含碳量为 6.67%。渗碳体的晶体结构很复杂,硬度很高,塑性极低,强度也很低。如钢中渗碳体含量较多,则刀具被擦伤和磨钝很严重,使切削加工性恶化。通过球化退火,使网状、片状的渗碳体变为小而圆的球形组织混在软基体中,使切削变得容易,从而可以改善钢的切削加工性。

3. 珠光体

由铁素体和渗碳体组成的共析物称为珠光体。它是由一种固溶体中同时析出的另两种晶体所组成的机械混合物。珠光体的组织是由铁素体片层和渗碳体片层交替组成。在几乎不含杂质的铁碳合金中当含碳量为 0.8% 时,可以得到全部珠光组织。在含有硅、锰等元素的钢中,当含碳量较低时也能得到全部珠光体。通过热处理(如退火、调质),可将层片状珠光体转变为球状珠光体。后者的强度比前者降低,塑性比前者增高。由于珠光体的硬度、强度和塑性都比较适中,当钢中珠光体与铁素体数量相近时,其切削加工性良好。

4. 索氏体和托氏体

索氏体和托氏体也是铁素体和渗碳体的混合物，不过比珠光体要细得多。钢经正火或淬火后再在 450~600℃ 下进行回火，均可得到索氏体组织；淬硬钢在 300~450℃ 下进行回火，可得到托氏体。索氏体是细珠光体组织，硬度和强度比一般珠光体高，而塑性有所降低。托氏体是最细的珠光体组织，硬度和强度进一步提高，塑性进一步降低。这两种组织中，渗碳体高度弥散，塑性较低，在精加工时可得到良好的已加工表面质量。但其硬度较高，故切削速度必须适当降低。

5. 马氏体

碳在 α -Fe 中的过饱和固溶体称马氏体，它是奥氏体组织以极快的速度冷却时形成的。若将淬火马氏体在低温 (100~250℃) 下进行回火，使细小的碳化物沿马氏体晶格析出，并附在马氏体晶格上，这种马氏体称为回火马氏体。马氏体的特点是呈针状分布，各针叶之间互成 60° 或 120° 的角度，具有很高的硬度和抗拉强度，但塑性和韧性很低。

马氏体切削加工性很差。具有马氏体组织的淬火钢用普通刀具进行切削加工比较困难，一般采用磨削。

6. 奥氏体

碳在 γ -Fe 中的固溶体称为奥氏体。在合金钢中奥氏体中除有碳外，也含有铬、钼、钨等元素。对于一般碳素钢，奥氏体只有在高温下才是稳定的。当钢中含有较高的碳和较多的合金元素 (如镍、铬、锰) 时，奥氏体组织可以在常温下保存下来，即所谓奥氏体钢。

奥氏体的硬度并不高，但塑性和韧性很高，切削时变形、加工硬化以及与刀面之间的冷焊都很严重，因此切削加工性较差。

总结以上内容，画成图 1-10。从中可以直观地看出材料切削加工性的指标、影响因素以

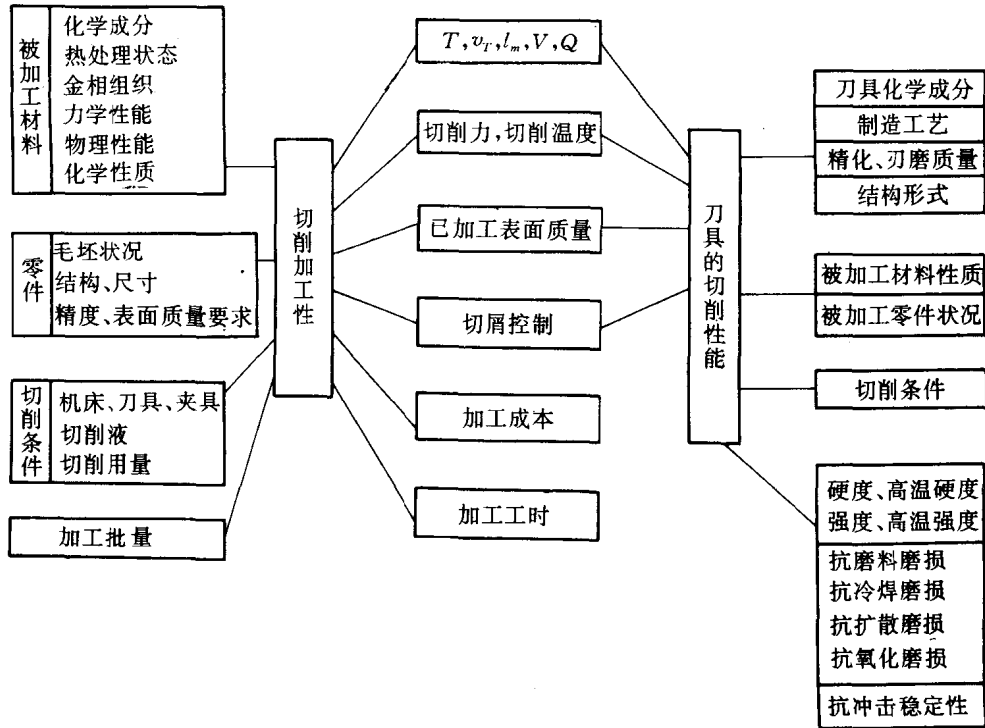


图 1-10 材料切削加工性和刀具切削性能的衡量指标与影响因素