

# 合金铸铁 切削原理与技术

王耀华 傅佑同 彭泽民  
著

江苏省金陵科技著作出版基金  
Jiangsu Science and Technology Publishing House



# 合金铸铁 切削原理与技术

王耀华 傅佑同 彭泽民

著

# 合金铸铁切削原理与技术

王耀华 傅佑同 彭泽民 著

---

出版发行：江苏科学技术出版社

经 销：江苏省新华书店

印 刷：无锡春远印刷厂

---

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 11 插页 5 字数 268,000

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—800 册

---

ISBN 7—5345—2248—X

---

TH·61

定价：18.70 元

责任编辑 钱 亮

我社图书如有印装质量问题，可随时向承印厂调换

## 致 读 者

社会主义的根本任务是发展生产力，而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代，科学技术的进步不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素，也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步，推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策，进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科技兴省”的决定，江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下，经省政府批准，由省科学技术委员会、省出版总社和江苏科学技术出版社共同筹集，于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”，用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立，能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件，以通过出版工作这一“中介”，充分发挥科学技术作为第一生产力的作用，更好地为我国社会主义现代化建设和“科技兴省”服务；并能带动我省科技图书提高质量，促进科技出版事业的发展和繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物，期待得到各方面给予热情扶持，在实践中不断总结经验，使它

逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金,以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世,还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持,特此表示衷心的感谢!

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

## 编 者 的 话

本书是在一篇博士论文的基础上整理而成的。我国金属切削界的许多专家、学者,如刘培德、张幼桢、周泽华、陈日曜、陈鼎昌、汤铭权等教授,都曾对博士论文提出过宝贵的指导意见。天津大学的张景仕、李天基等教授曾为本书的问世付出了巨大的辛劳。天津大学机械制造工程系、材料系、热物理系,南开大学分析测试中心,核工业部第三研究院,中国第二汽车制造厂及天津手表厂等单位的有关教授、研究人员、工程师、工人均对作者的研究工作予以指导和协助。“江苏金陵科技著作出版基金”资助了本书出版,在此谨一并致谢。

作 者

一九九六年三月

## 本书常用的名词、术语及符号

| 符号    | 中文名称       | 英文名称                                 | 单位               |
|-------|------------|--------------------------------------|------------------|
| $a_c$ | 切削厚度       | undeformed chip thickness            | mm               |
| ACE   | 粘附刃        | adhensive cutting edge               |                  |
| $a_k$ | 冲击值        | impact value                         | J/m <sup>2</sup> |
| $a_0$ | 切屑厚度       | chip thickness                       | mm               |
| $a_p$ | 切削深(宽)度    | back engagement                      | mm               |
| $b_1$ | 粘附刃前刀面宽度   | width of ACE on tool face            | mm               |
| $b_2$ | 粘附刃后刀面厚度   | thickness of ACE on tool flank       | mm               |
| $b_3$ | 粘附刃副后刀面厚度  | thickness of ACE on tool minor flank | mm               |
| $b_r$ | 倒棱宽度       | land width of the first face         | mm               |
| $b_e$ | 过渡刃长度      | chamfered corner length              | mm               |
| $D$   | 损伤因子       | damage variable                      |                  |
| $d$   | 球墨直径       | diameter of spherical graphite       | mm               |
| $F_f$ | 前刀面摩擦力     | frictional force on tool face        | N                |
| $F_n$ | 剪切面法向力     | normal force on the shear plane      | N                |
| $F_t$ | 剪切面切向力     | tangential force on the shear plane  | N                |
| $F_x$ | 走刀(轴向进给)抗力 | axial thrust force                   | N                |

(续 表)

| 符 号   | 中 文 名 称   | 英 文 名 称                                   | 单 位  |
|-------|-----------|-------------------------------------------|------|
| $F_y$ | 吃刀(径向)抗力  | radial thrust force                       | N    |
| $F_z$ | 主切削力      | cutting component of resultant tool force | N    |
| $f$   | 每转进给量     | feed per revolution                       | mm/r |
| $h_1$ | 粘附刃前刀面高度  | height of ACE on tool face                | mm   |
| $h_2$ | 粘附刃后刀面高度  | height of ACE on tool flank               | mm   |
| $h_3$ | 粘附刃副后刀面高度 | height of ACE on tool minor flank         | mm   |
| $h_c$ | 粘附刃刀尖高度   | height of ACE of tool corner              | mm   |
| HB    | 布氏硬度值     | Brinell hardness number                   |      |
| HV    | 维氏显微硬度值   | Vickers hardness or micro-hardness number |      |
| $H_c$ | 切屑的硬度值    | hardness number of chip                   |      |
| $H_w$ | 工件的硬度值    | hardness number of work-piece             |      |
| $H'$  | 切削硬化率     | work hardened ratio<br>( $=H_w/H_c$ )     |      |
| $k$   | 损伤修正系数    | correction factor for damage variable     |      |
| $KT$  | 月牙洼磨损深度   | depth of crater                           |      |
| $l_1$ | 粘附刃前刀面长度  | length of ACE on tool face                | mm   |
| $l_2$ | 粘附刃后刀面长度  | length of ACE on tool flank               | mm   |
| $l_3$ | 粘附刃副后刀面长度 | length of ACE on tool minor flank         | mm   |

(续 表)

| 符 号                   | 中 文 名 称     | 英 文 名 称                                             | 单 位           |
|-----------------------|-------------|-----------------------------------------------------|---------------|
| $l_f$                 | 刀-屑接触长度     | contact length between tool face and chip           | mm            |
| $N$                   | 前刀面法向力      | normal force on tool face                           | N             |
| $NB$                  | 刀具径向磨损量     | wear on tool flank measured in the radial direction | mm            |
| $R$                   | 切削合力        | resultant tool force                                | N             |
| $R_a$                 | 表面不平度的平均高度  | average height of surface irregularities            | $\mu\text{m}$ |
| $r_n$                 | 切削刃纯圆半径     | rounded cutting edge radius                         | mm            |
| $r_c$                 | 刀尖圆弧半径      | corner radius                                       | mm            |
| $t$                   | 切削时间        | machining time                                      | s             |
| $T$                   | 刀具耐用度       | tool life                                           | s             |
| $T'$                  | 粘附刃寿命       | ACE life                                            | s             |
| $VB$                  | 后刀面磨损带部分    | average width of the flank                          |               |
|                       | 平均磨损宽度      | wear land                                           | mm            |
| $VC$                  | 刀尖上后刀面磨损带宽度 | width of the flank wear land at tool corner         | mm            |
| $v$                   | 切削速度        | cutting speed                                       | m/min         |
| $\alpha_o$            | 后角          | tool orthogonal clearance                           |               |
| $\alpha_{\text{oad}}$ | 粘附刃后角       | ACE orthogonal clearance on tool flank              | °             |
| $\beta$               | 前刀面的摩擦角     | mean angle of friction on tool face                 | °             |
| $\gamma_n$            | 法剖面前角       | tool normal rake                                    | °             |
| $\gamma_o$            | 前角          | tool orthogonal rake                                | °             |

(续 表)

| 符 号            | 中 文 名 称 | 英 文 名 称                             | 单 位     |
|----------------|---------|-------------------------------------|---------|
| $\gamma_{oe}$  | 工作前角    | working orthogonal rake             | °       |
| $\gamma_{oad}$ | 粘附刃前角   | orthogonal rake of ACE on tool face | °       |
| $\gamma_{opt}$ | 合理前角    | optimum orthogonal rake             | °       |
| $\gamma_{o1}$  | 倒棱前角    | orthogonal rake on the first face   | °       |
| $\delta$       | 延伸率     | specific elongation                 |         |
| $\theta$       | 切削温度    | cutting temperature                 | ℃       |
| $\kappa_r$     | 主偏角     | tool cutting edge angle             | °       |
| $\kappa'_r$    | 副偏角     | tool minor cutting edge angle       | °       |
| $\kappa_{re}$  | 过渡刃主偏角  | chamfer cutting edge angle          | °       |
| $\lambda$      | 导热系数    | thermal conductivity                | W/(m·℃) |
| $\lambda_s$    | 刃倾角     | tool cutting edge inclination       | °       |
| $\zeta$        | 变形系数    | shortening coefficient              |         |
| $\sigma_b$     | 抗拉强度    | tensile strength                    | Pa      |
| $\sigma_n$     | 前刀面法应力  | normal stress on tool face          | Pa      |
| $\sigma_s$     | 剪切面法应力  | normal stress on shear plane        | Pa      |
| $\eta_s$       | 剪切面切应力  | tangential stress on shear plane    | Pa      |
| $\phi$         | 剪切角     | angle of shear plane                | °       |

注：未注符号见书中有关说明。

# 目 录

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪 论</b> .....               | 1   |
| § 1.1 合金铸铁及其重要性 .....              | 1   |
| § 1.2 合金铸铁切削加工及其研究工作的重要地位 .....    | 3   |
| § 1.3 合金铸铁切削机理研究的历史及意义 .....       | 4   |
| <b>第二章 合金铸铁有关性能的实验分析</b> .....     | 8   |
| § 2.1 合金铸铁的成分、组织、结构和基本性能 .....     | 8   |
| § 2.2 合金铸铁拉伸变形的本质及温度对拉伸变形的影响 ..... | 13  |
| § 2.3 变温度单向拉伸变形的机理分析 .....         | 20  |
| <b>第三章 合金铸铁切削变形的特点</b> .....       | 26  |
| § 3.1 研究合金铸铁切削变形规律的重要性 .....       | 26  |
| § 3.2 合金铸铁切削变形的特点 .....            | 27  |
| § 3.3 合金铸铁切削变形区的应力和应变状态 .....      | 39  |
| § 3.4 切屑中石墨的形状及分布 .....            | 51  |
| § 3.5 切屑的显微硬度分析 .....              | 53  |
| § 3.6 刀具粘结现象 .....                 | 61  |
| § 3.7 合金铸铁切削变形机理 .....             | 61  |
| <b>第四章 影响切削变形的主要因素分析</b> .....     | 65  |
| § 4.1 工件材料的组织结构与性质的影响 .....        | 65  |
| § 4.2 合金铸铁切削中的摩擦 .....             | 89  |
| § 4.3 切削用量与切削变形的关系 .....           | 101 |
| § 4.4 刀具材料与切削变形 .....              | 129 |
| § 4.5 刀具几何结构与切削变形 .....            | 147 |
| § 4.6 切削液与切削变形 .....               | 154 |
| § 4.7 本章结论 .....                   | 158 |
| <b>第五章 合金铸铁的切削力</b> .....          | 161 |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| § 5.1      | 金属切削力的一般原理 .....             | 161        |
| § 5.2      | 制定切削力实验方案的几种方法 .....         | 165        |
| § 5.3      | 合金铸铁切削力经验公式 .....            | 170        |
| § 5.4      | 合金铸铁切削力的变化规律 .....           | 171        |
| § 5.5      | 本章小结 .....                   | 184        |
| <b>第六章</b> | <b>合金铸铁的切削温度 .....</b>       | <b>186</b> |
| § 6.1      | 切削温度及其确定方法 .....             | 186        |
| § 6.2      | 合金铸铁切削温度的基本特点 .....          | 197        |
| <b>第七章</b> | <b>刀具粘结现象及粘附刃 .....</b>      | <b>203</b> |
| § 7.1      | 金属切削中刀具粘附现象的普遍性 .....        | 203        |
| § 7.2      | 合金铸铁切削刀具粘附物的形状及物性 .....      | 210        |
| § 7.3      | 合金铸铁切削刀具粘附物的稳定性及粘附刃的概念 ..... | 216        |
| <b>第八章</b> | <b>粘附刃的切削机理 .....</b>        | <b>224</b> |
| § 8.1      | 粘附刃与切削力 .....                | 224        |
| § 8.2      | 粘附刃与刀具磨损 .....               | 229        |
| § 8.3      | 粘附刃与工件加工质量 .....             | 250        |
| <b>第九章</b> | <b>粘附刃的变化规律 .....</b>        | <b>257</b> |
| § 9.1      | 工件材料性质与粘附刃 .....             | 257        |
| § 9.2      | 刀具材料性质与粘附刃 .....             | 260        |
| § 9.3      | 刀具表面性能及其与刀具粘附现象的关系 .....     | 265        |
| § 9.4      | 刀具几何结构参数与粘附刃 .....           | 289        |
| § 9.5      | 切削用量对粘附刃的影响 .....            | 295        |
| § 9.6      | 切削液在合金铸铁切削中的特殊作用 .....       | 299        |
| <b>第十章</b> | <b>合金铸铁切削力学 .....</b>        | <b>305</b> |
| § 10.1     | 切削力学的经典理论 .....              | 305        |
| § 10.2     | 损伤力学与合金铸铁切削中损伤变量的选取 .....    | 317        |
| § 10.3     | 第一变形区的损伤发展 .....             | 323        |
| § 10.4     | 切屑与前刀面之间的摩擦角 .....           | 325        |
| § 10.5     | 切削方程式 .....                  | 327        |
| § 10.6     | 切削条件与损伤演变过程的关系 .....         | 329        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第十一章 合金铸铁切削技术的若干问题 .....</b> | <b>333</b> |
| § 11.1 确定合金铸铁切削技术的一般原则 .....    | 333        |
| § 11.2 刀具材料的选择 .....            | 334        |
| § 11.3 刀具几何结构的优化 .....          | 335        |
| § 11.4 切削用量的选择原则 .....          | 338        |
| § 11.5 切削液 .....                | 338        |
| <b>参考文献 .....</b>               | <b>340</b> |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 合金铸铁及其重要性

### 1.1.1 合金铸铁的定义

据有关资料称<sup>[1]</sup>,合金铸铁是指钛(Ti)、钒(V)、钼(Mo)含量超过 0.1%,或镍(Ni)、铬(Cr)、铜(Cu)含量大于 0.3%,或锰含量大于 2.0%,硅(Si)含量大于 4.0%的铸铁。但是考虑到以下因素:

(1) 铸铁中所含的合金元素尚不止上述的几种。

(2) 某些合金元素在铸铁中的含量虽然很小,但仍可大大改变铸铁的物理机械性能。例如,若铸铁中含有 0.04%~0.08%的硼,铸铁的耐磨性就会大幅度提高;再如,当对片状石墨铸铁进行孕育处理时,实际起作用的是含在孕育剂中的较微量的铝和钙<sup>[2]</sup>。所以,从合金元素对铸铁的物理机械性能的影响,尤其是对其切削加工特性的影响的角度来看,关于铸铁中究竟含有多少合金元素方可称为合金铸铁的问题,似无必要规定得太严格。

(3) 球墨铸铁、蠕虫状石墨铸铁(以下简称蠕墨铸铁)以及孕育铸铁都是在铸造过程中,通过对普通铸铁添加一定的合金元素及运用其它适当的处理手段而得到的,它们的物理机械性能以及切削加工性能,均受到合金元素的重要影响。

据上述三条理由,作者依据切削加工研究工作的实际情况,将除了普通灰铸铁、一般可锻铸铁和普通白口铸铁以外的各类铸铁,包括孕育铸铁、蠕墨铸铁、球墨铸铁和其它各种特殊性能铸铁,均

作为合金铸铁看待。

### 1.1.2 合金铸铁的发展及其重要作用

合金铸铁在现代社会中的作用是十分巨大的。很久以来,铸铁就因其优异的成型性能及取材方便等特点,而成为人类生活中应用最为广泛的铸造金属材料。随着现代工业的发展和科学技术的进步,一般的灰铸铁、白口铸铁及可锻铸铁虽然获得了更广泛的应用,但是由于受它们本身的性能的限制,已不能满足现代生产提出的更高级、更复杂的使用要求,所以,各类合金铸铁便应运而生。

随着铸铁件日益复杂的使用工况的出现,人们对铸铁件提出了耐热、耐磨、耐腐蚀等特殊要求。这些特殊使用要求,使得具备上述各种特殊性能的铸铁成为合金铸铁中特别重要的组成部分。例如,在几乎所有类型的发动机上,都含有用这些特殊性能铸铁制作的零部件,不少化学工业设备及在海水中工作的各种泵,也往往由这些铸铁材料制作。因此可以说,无论是在陆地、天空还是海洋,几乎所有的机械(机器)都含有用特殊性能合金铸铁制作的零部件。

球墨铸铁是一大类较年轻的合金铸铁材料(发展历史仅约40年),但由于它具有比锻钢更优越的成型性能、耐磨性能和疲劳强度,在工业生产中尤其在农业机械工业中获得了十分广泛的应用,因而成为合金铸铁中产量增长最快的一类。

蠕墨铸铁(亦称稀土铸铁)是近十年来日益受到广泛关注的一种新型合金铸铁。这主要是由于蠕墨铸铁不但在铸造性能、耐热疲劳性能和生产成本等方面均比球墨铸铁优越,而且在强度、韧性等机械性能方面又大大优于片状石墨铸铁,而与球墨铸铁相接近,因此在实际应用中,占据着球墨铸铁和片状石墨铸铁均不能替代的重要地位。近十几年来,美国、英国、德国、日本及俄罗斯等主要的工业国家,均相继对蠕墨铸铁开展了大量的研究与制造工作,并开始日益广泛地应用于工业生产,我国也已用蠕墨铸铁铸造生产了

不少机床零件及其它蠕墨铸铁件。

另外,对各种合金铸铁的研究、生产和应用还有其重要的理论意义。因为,每一种新型合金铸铁材料的出现,既是材料科学发展的结果,反过来又可以促进材料科学的进步和繁荣。

## § 1.2 合金铸铁切削加工及其研究工作的重要地位

合金铸铁切削加工在现代机械制造业中,占有越来越重要的地位,这主要体现在以下二个方面。

首先,合金铸铁切削加工所需要的社会劳动量正在不断增多。这一方面是因为合金铸铁在现代社会中已获得日益广泛的应用;另一方面是因为合金铸铁大多数是用来制作形状比较复杂的、与其它零部件有较多的配合面和较严格的配合要求的、比较关键的零部件(例如汽缸套、活塞环槽等)。这与普通灰铸铁往往被用于制作比较笨重而且切削加工量较少的零部件的情况有显著的区别。所以,尽管合金铸铁件在某一台机器中所占的重量比例可能比普通灰铸铁件所占的比例小,但前者切削加工劳动量却可能比后者更多一些。

其次,由于合金铸铁的问世及其日益广泛的应用,所谓“铸铁中没有难加工材料”的传统观念已经不对了。

如前所述,合金铸铁在强度、塑性、韧性等方面往往比普通灰铸铁高得多,因而所产生的切削抗力也相应大得多;另外,在耐磨铸铁中,各种碳化物、氮化物或硼化物等硬质点的含量,往往比普通灰铸铁大许多倍;而耐热铸铁往往产生并保持很高的切削温度……。所有这些因素,除了会产生其它的加工困难外,更重要的是都会加剧刀具磨损。同时,零件的耐热、耐磨、耐腐蚀、耐冲击、耐疲劳等项使用要求,必然对合金铸铁件的尺寸精度及表面质量,诸如表面粗糙度、表面残余应力和表面缺陷等项技术指标,提出较为

严格的加工要求。然而,刀具的较易磨损,显然又同对合金铸铁零件较高的表面质量、尺寸精度等要求之间存在着尖锐的矛盾。所以,合金铸铁在难加工材料中所占的比例,目前不仅已不容忽视,而且还有继续增长的趋势。

随着合金铸铁切削加工在现代生产中所占的地位日益提高,合金铸铁切削加工的研究工作也逐渐成为金属切削理论工作中的重要组成部分。同时,由于合金铸铁在成分、结构、性能等诸方面既不同于普通铸铁,又不同于钢及合金钢,故在合金铸铁的切削加工中必然会有其特殊的表现和规律,认识这些现象和规律,并弄清它们与其它金属材料切削加工时的主要区别,无疑应成为金属切削学的重要任务之一。

## § 1.3 合金铸铁切削机理研究的历史及意义

进行合金铸铁切削加工的研究,首先必须进行其切削机理的研究。只有弄清了合金铸铁的切削机理,才能迅速提高其切削加工水平。为了说明这个问题,有必要简要回顾一下合金铸铁切削机理研究的历史。

### 1.3.1 合金铸铁切削机理研究的历史

资料表明,迄今为止,合金铸铁切削加工机理的研究及实践工作,主要在三个方面进行。

第一个方面是加强新的刀具材料的研制工作。例如,硬质合金不断出现新的品种,各种涂层刀具迅速涌现,这均有效地促使了合金铸铁切削加工水平的不断提高。陶瓷刀具被认为是合金铸铁高速切削的有效工具,例如,日本已将若干种使用陶瓷刀具切削合金铸铁的实践经验整理成比较系统的资料<sup>[3]</sup>。长期以来被认为极难切削的镍铬冷硬铸铁(Nihard Cast Iron),由于立方氮化硼(CBN)