

铁基粉末冶金零件切削特性的研究进展

付雷杰¹, 魏伟¹, 曹岩¹, 白瑀¹, 冷杰武², 左鹏军³

¹西安工业大学机电工程学院;

²广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室;³ 陕西省机械研究院

摘要: 铁基粉末冶金技术在汽车、航天、兵器等行业得到了广泛应用。粉末冶金零件在成型后还需进行少量加工,由于材料自身的特殊性,加工过程中刀具易出现崩刃、剥落、碎断和裂纹等快速失效现象。本文介绍了铁基粉末冶金零件工艺特点及其应用范围,阐述了粉末冶金材料的基本特性和较难加工的原因,较系统地介绍了铁基粉末冶金零件切削特性的研究进展,并结合以往的研究现状对粉末冶金材料的发展前景及切削技术的发展做出总结和展望,对铁基粉末冶金零件的切削优化提出建议。

关键词: 铁基粉末冶金;孔隙;切削加工;性能优化

中图分类号: TG506;TH16

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.03.002

Research Progress of Cutting Characteristics of Iron-based Powder Metallurgy Parts

Fu Leijie, Wei Wei, Cao Yan, Bai Yu, Leng Jiewu, Zuo Pengjun

Abstract: Iron-based powder metallurgy technology has been widely used in various industries, such as automobile, aerospace, weapons and so on. Powder metallurgy parts need a small amount of processing after forming. Due to the particularity of their own materials, the processing problems are also obvious. During the process of processing, the cutting tools have such rapid failure phenomena as chipping, spalling, breaking and cracking. The process characteristics and application scope of iron-based powder metallurgy parts is introduced, and it describes the basic characteristics of powder metallurgy materials, the reasons for difficult machining, and systematically introduces the research progress of cutting characteristics of iron-based powder metallurgy parts. Combined with the research status of previous researchers, the development prospect of powder metallurgy materials and the development of cutting technology are summarized and summarized, some suggestions on cutting optimization of iron-based PM parts are put forward.

Keywords: iron based powder metallurgy; porosity; cutting; performance optimization

1 引言

粉末冶金是一种以金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)为原料,通过成型和烧结来制造金属材料、复合材料和各种产品的技术。粉末冶金技术具有节能、节省材料、性能优良、精度高和稳定性好等一系列优点,适合批量生产。另外,一些传统的铸造方法和加工方法无法制备的材料以及难于加工的零件也可以通过粉末冶金技术制备^[1]。目前粉末冶金广泛应用于众多领域中,其中铁基粉末冶金的运用最广泛,其应用领域如图1所示。

铁基粉末冶金技术诞生于上世纪50年代,铁基粉末冶金零件是以铁粉或合金钢粉为主要原料,采用粉末冶金工艺制造的结构零件。这类零件具有较

好的力学性能、耐磨性、机械加工性能、耐热和耐腐蚀性能。铁基粉末冶金零件大都是直接成形至目标形状,但烧结后的零件表面精度不够。此外,无法通过压制直接获得台面和孔类特征,因而粉末冶金零件在制取获得后还需进行少量的加工。

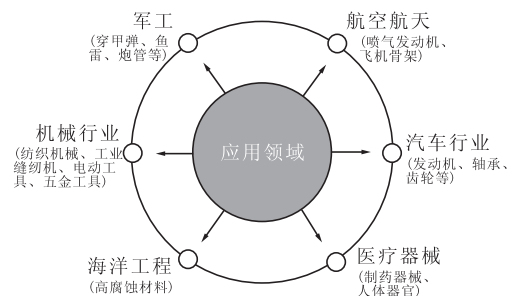


图1 铁基粉末冶金应用领域

对粉末冶金零件进行加工以及对铁基粉末冶金零件的切削特性进行试验研究发现,粉末冶金是一种较难加工的新型材料,切削过程产生热量较高,压制成型后材料内部形成的空隙在烧结后依然存在,

孔隙是热传递的不良导体,导致工件表面易被切削液氧化,加速切削工具的磨损。

由于缺乏铁基粉末冶金切削特性针对性的理论和技术研究,加工中基本采用试凑的方法来选择刀具,而刀具失效时间不统一制约生产效率。实际切削中换刀不及时会导致工件浪费和机床损坏,造成经济损失。

为了优化刀具选择、设计以及切削参数选取,国内外学者研究了在新材料、新工艺、新设备和新技术条件下粉末冶金零件切削特性优化的方法。本文较详细地介绍了铁基粉末冶金零件的研究进展,进行了总结归纳,并提出展望。研究内容路线见图2。

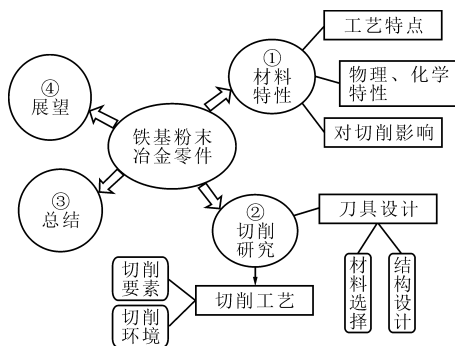


图2 研究内容路线

2 铁基粉末冶金材料特性及其对切削加工的影响分析

作为一种新兴的材料制备工艺,铁基粉末冶金技术一般包括4道程序,即原粉制备、成分混料、压制成型、烧结(中高温)。通过粉末冶金工艺制得的零件不同于一般铸造或锻造件,其内部会存在一定的孔隙和金相缺陷,给切削加工带来一定影响。

2.1 铁基粉末冶金材料特性

现有制粉工艺方法可以归为机械法和物理化学法两大类。随着科技的发展,越来越多的新技术应用在制备上,如机械合金化和喷雾干燥等。近年来,粉末冶金技术正向着高致密化、高性能化、集成化和低成本等方向发展,一系列粉末冶金新的成形技术在生产中实现,如粉末注射成形、温压成形、流动温压成形、喷射成形、高速压制成形等。粉末冶金烧结是指粉末或粉末压坯在适当的温度和气氛条件下加热所发生的现象或过程,如微波烧结、放电等离子烧结、自蔓延高温合成、烧结硬化等^[2-4]。

粉末冶金原材料有圆形、片形和条形等,铁基粉末冶金材料常见的特性有:孔隙率、密度、金相、硬度等。其中,材料的孔隙、金相特性对刀具切削过程产生的主要影响见图3。

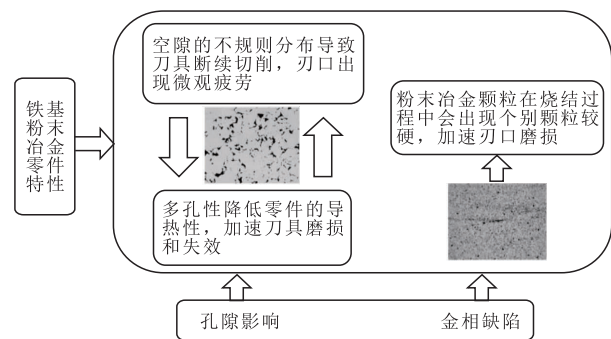


图3 铁基粉末冶金零件特性

(1) 孔隙影响

粉末冶金零件的孔隙率是指材料中孔隙体积与其在自然状态下总体积的百分比,与之对应的是零件的密度。密度表示材料内被固体所填充的程度,它在量上反映了材料内部固体的含量,对材料性质产生的影响与孔隙率相对应。粉末冶金孔隙率与密度的关系表示为

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, P 为材料孔隙率(%); V_0 为材料在自然状态下的体积,即表观体积(cm^3 或 m^3); ρ_0 为材料表观密度(g/cm^3 或 kg/m^3); V 为材料的绝对密实体积(cm^3 或 m^3); ρ 为材料密度(g/cm^3 或 kg/m^3)。

根据部分学者的分析可知,利用粉末冶金技术生产的结构零件的含孔率在15%~20%,利用粉末冶金技术生产的用于过滤装置的零件含孔率约50%左右^[5]。在铁基粉末冶金件中,压制成型不是最终产品,但压制的性能却决定着粉末冶金产品的最终使用性能,因此压制成型是粉末冶金技术的关键工序之一。粉末成型一般过程为:粉末颗粒的移动、粉末颗粒的变形、粉末颗粒表面间的冷焊(粉末颗粒两个直接接触表面在常温、低温下形成的粘着)。随着密度逐渐增大,孔隙越来越小^[6]。由于粉末冶金成形的复杂性,其致密的机理尚无统一的定论,因此粉末压制过程中的建模方法也没有统一的标准。目前运用较多的是数值仿真技术,其建模方法主要有两种,即连续介质学方法和非连续介质学方法,如表1所示。

近几年,连续介质模型在粉末压制中应用已很少,工程上应用较广泛的是非连续介质模型,因其更符合颗粒的活动性。由于孔隙的存在,使其物理和力学性能受到影响,导致实际切削中刀具出现快速磨损,加速刀具寿命的失效。不同硬质合金刀具、PCBN刀具、陶瓷刀具车削铁基粉末冶金零件的实

验结果显示:破损失效是 PCBN 刀具的主要失效形式,切削刃微崩和剥落磨损是陶瓷刀具磨损的主要原因,硬质合金刀具前刀面出现微观疲劳^[7],连续切削后几种刀具的前刀面都有比较明显的月牙洼磨损。孔隙的不均匀分布导致刀具在连续切削时产生断续切削现象,造成载荷波动频繁,出现断裂现象;由于工件散热较差,前刀面上切削载荷和切削热比较集中,随着切削进行,刀具磨损愈发严重。图 4 为切削铁基粉末冶金零件时刀具常出现的几种失效形式。

表 1 数值模拟建模方法

| 方法 | 原理 | 特点 |
|-----------------------|--|---------------------------------------|
| 连续介质法 ^[8] | 将粉末体看成是连续体,用拟流体的方法加以研究,其数学模型采用动理论模型(kinetic theory)、摩擦塑性模型、岩土力学理论中的 Drucker-Prager-Cap 模型等 | 体系较为完备,但对于密度较低的材料模拟结果出入较大 |
| 非连续介质法 ^[9] | 以粉末颗粒出发,从细观角度分析颗粒成型,采用离散元法 DEM、颗粒有限元法和孔洞模型法等 | 充分考虑粉末颗粒大小、形貌等微观因素的影响,有利于深入研究粉末压制的致密化 |

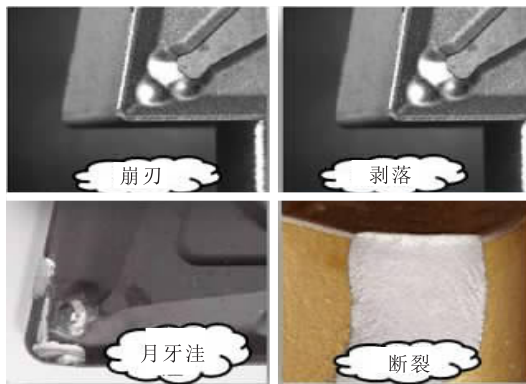


图 4 加工粉末冶金材料的刀具常出现的几种失效形式

(2) 金相缺陷

铁基粉末冶金金相是指其化学成分以及各种成分在合金内部的物理和化学状态。通过分析金相可以发现粉末冶金零件的缺陷^[10]。实验发现,铁基粉末压制过程中的金相有分层、裂纹与断裂现象。其中,由于粉末颗粒传送不当造成分层偏析,并由此产生了大量孔隙和异常组织,使分层零件烧结后出现性能(例如尺寸)变化和力学性能不稳定。烧结过程会出现表面熔化、硬度异常等不良现象。理想烧结后得到的金相为纯铁素体,硬度为 24HRB 左右,但是实际烧结后还会产生细针状的铁氮化物以及极少量的马氏体,导致局部硬度超过 50HRB。实际切削中,刀具出现磨粒磨损、粘结磨损、扩散磨损以及氧化磨损,其中硬质点磨损伴随整个切削过程^[11]。这是由于刀具的高脆性与粉末冶金增强颗粒相互摩

擦、冲撞引起的,由此还会引起涂层的剥落和前刀面月牙洼的形成,致使刀尖部位产生崩刃。硬质点颗粒在摩擦力的作用下不断被剥离刀具基体,从而导致高温条件下前刀面出现月牙洼磨损^[12]。为了尽量减少金相缺陷,提高其切削性能,国内外部分学者对粉末冶金金相缺陷进行研究,建立了基于损伤力学的缺陷形成模型^[13,14]。

由于粉末冶金零件中存在孔结构,加工时,刀具会在孔之间切入和切出,从而使该工具受到高频载荷的影响,并易造成疲劳损伤;多孔结构降低了材料的导热性,无法及时获得切削热,从而加剧了刀具的磨损。当铁基粉末冶金材料宏观硬度为 25HRC 时,材料中硬颗粒的硬度可达 60HRC^[15],会导致工具严重磨损。铁基粉末冶金零件的加工仍然存在许多问题,有时甚至成为粉末冶金产品发展的瓶颈。

3 铁基粉末冶金切削特性的研究进展

在航空航天、汽车等机械制造工业部门中,切削加工占有极其重要的地位,目前切削加工约占整个机械加工工作量的 95%^[16]。铁基粉末冶金零件在切削加工过程中,刀具出现崩刃、碎断等快速磨损的现象,关于粉末冶金切削特性的研究主要集中在两个方面:刀具设计和切削时工艺参数的选取,其中刀具设计包括刀具选材、几何角度和刀具涂层。

3.1 刀具设计

在切削加工中,无论是车削、铣削、钻孔还是磨削,切削刀具的选择都起着决定性的作用。切削工具的性能取决于其结构参数和材料性能。在设计或选择切削工具时,应考虑材料的选择和几何角度的确定。这些因素对切削工具切削性能的影响约为 65%。良好的刀具性能不仅可以有效降低零件的表面粗糙度和提高加工效率,还可以节省机床动力,提高刀具寿命和机床寿命。

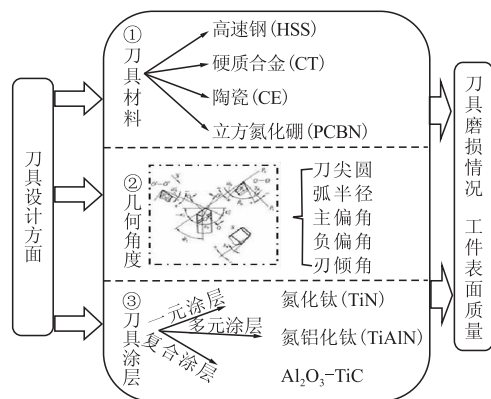


图 5 刀具设计

如图5所示,刀具设计方面主要包括刀具材料、几何角度和刀具涂层三个因素。

在切削铁基粉末冶金材料时,常用的刀具材料有高速钢、硬质合金、陶瓷以及立方氮化硼(PCBN)等。表2为几种常用刀具材料的物理性能。

表2 各类刀具材料物理性能

| 刀具材料 | 密度(g/cm^3) | 硬度 | 抗弯强度(MPa) |
|--------|------------------------------|-------------|-----------|
| 高速钢 | 8.3~8.7 | HRC63~70 | 2400~4800 |
| 硬质合金类 | 13.6~14.5 | HRA89~94 | 1370~1470 |
| 陶瓷刀片 | 4.75 | HRA91~95 | 345~1176 |
| PCBN刀片 | 3.48 | HV8000~9000 | 700 |

以上常用的几种刀具材料在实际切削中各有优劣,实际应用中应综合考虑各种因素进行选用。通过分别对铁基粉末冶金进行切削加工的实验可知,由于陶瓷材料的化学稳定性较好且与工件的摩擦系数较小,陶瓷刀具拥有更长的使用寿命,且陶瓷刀具切削后的零件表面粗糙度小于硬质合金加工后的零件表面粗糙度。例如,在铁基粉末冶金同步环的加工中^[17],带TiN涂层的硬质合金车刀磨损最小,带TiAlN涂层的硬质合金车刀温度最低,陶瓷刀具的刀尖温度最高。由实验中刀具的磨损程度分析可得:硬质合金刀具适用于约300℃的加工,而陶瓷刀具则适用于高温加工;在低速切削过程中,硬质合金刀具的使用寿命最长,而PCBN刀具的使用寿命最短,在高速切削中(切削速度是传统切削的5~10倍),PCBN刀具、陶瓷刀具和硬质合金刀具的使用寿命依次降低,而PCBN刀具的使用寿命约为硬质合金的2~3倍^[18]。普通硬质合金材料具有较高的强度、韧性和良好的耐磨性,适用于中、低硬度材料的切削、间断和冲击切削;高速钢工具材料在低硬度材料的钻孔中具有较高的强度和韧性、良好的可磨削性、切削性和较高的加工效率。采用硬质合金和高速钢材料制成的车刀和钻头价格低廉,磨损后易于维修和打磨,再磨性能好,具有切削烧结零件的特性^[19]。由此可知,普通的硬质合金和高速钢刀具材料在加工粉末冶金烧结件(尤其是多孔和断续切削零件)时,具有较好的综合加工性能。因价格低廉而在切削铁基粉末冶金的孔隙零件中仍广泛应用。

部分学者通过实验分析了刀具几何形状对刀具寿命、表面粗糙度和表面完整性的影响^[20,21],得出采用较大的刀尖圆弧半径可提高加工零件的表面粗糙度。此外,选用涂层硬质合金刀片加工粉末冶金零件时,当刀具角度参数为表3所示范围时,可以避免出现积屑瘤,并获得较好的已加工表面质量。

表3 刀具角度参数 (°)

| 前角 | 主偏角 | 副偏角 | 刃倾角 |
|-----------------------|-------|-------|---------|
| —— ^[22] | 40~50 | 0.5~3 | -10~-20 |
| 25~30 ^[23] | —— | —— | —— |
| 10~20 ^[24] | —— | —— | —— |

注:表中“——”表示该研究中未涉及此变量。

在加工铁基粉末冶金零件时,一般切削速度下,采用陶瓷刀具能获得质量优的零件表面,其次是硬质合金刀具,二者使用寿命相差不大,PCBN刀具的寿命最短。考虑到硬质合金刀具的可多次刃磨特性,同时能够满足质量原则,因此大多数工厂在现阶段选用带涂层的硬质合金刀具作为切削铁基粉末冶金零件的工具。

3.2 切削工艺

切削参数的选择和切削环境的变化也是影响切削性能一个重要方面,选择是否恰当将直接影响到工件质量、刀具寿命和加工成本等。随着铁基粉末冶金等一些新加工材料以及新刀具的不断涌现,在工厂制造加工系统出现了一些问题^[25]:①由于新工件、新刀具材料的不断采用,现有参数过于陈旧;②机床刚度、转速和功率不断提高,使合理切削参数发生变化;③进口刀具样本提供的参数与国内相差较大,参考价值不大。造成这一系列问题的原因是数控加工效率低,制约了制造业生产能力的发展,造成巨大的资源浪费。所以,获取合理的切削加工参数非常迫切,图6为切削工艺选取的主要参数。

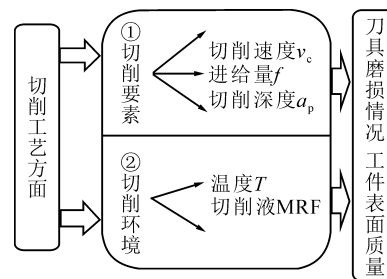


图6 切削工艺参数

切削工艺中各项参数的选取对加工结果有不同程度的影响。在选用硬质合金刀具对铁基粉末冶金进行高速干切削的实验中^[18],得出切削速度对刀具耐用度的影响最大,进给速度和切削深度的影响不大且较接近;切削速度和进给速度对零件表面粗糙度的影响较明显,影响程度较接近,而切削深度对表面粗糙度的影响最小。

在应用涂层硬质合金刀具对铁基高温合金进行外圆干切削加工时,测量了切削力、切削温度、表面粗糙度和刀具寿命,利用最小二乘法对实验数据进

行多元回归分析,得到切削用量三要素对表面粗糙度、刀具寿命影响的主次顺序^[26](见表4)。

表4 切削三要素对实验目标影响程度

| 指标 | 表面粗糙度 | 刀具寿命 |
|------|-----------------|-----------------|
| 影响程度 | $f > v_c > a_p$ | $v_c > f > a_p$ |

切削过程实际是切削者和被切削者之间的物理反应,当切削温度过高时会引起刀具表面和零件表面的化学反应,并加速切削液对工件的腐蚀。实验表明,采用合适的切削液能够提高切削效率和工件表面质量,高压切削液下刀具寿命提升3倍^[27]。在钻削烧结钢时,文献[28]采用将 -10°C 的冷空气引入切削区域的方法来降低切削温度,结果显示,使用冷空气冷却切削区域可以显著提高加工孔的外观质量。

在实际切削加工中,由于工件材质不均匀、切削力发生变化、刀具不断磨损以及切削环境变化,往往会导致切削过程偏离最佳状态,工件表面质量和刀具寿命的降低^[29]。为保证目标函数在整个加工过程中保持最优,应根据实时工况调整切削用量,实现对切削过程的实时控制。为此,研究者们尝试建立切削加工模型以实现对加工过程的最优控制,表5为部分研究者基于实时切削控制所作的优化方案。

表5 实时切削控制优化方案

| 方法 | 原理 | 成效 |
|--|--|---|
| 基于神经网络的并行计算处理能力测量瞬时刀具磨损率 | 目标函数: $\varphi = \frac{z_w}{c_0(c_t\beta + c_0t_{ct})} \frac{W}{W_0}$ 约束条件: $f_i(v, f, a_p) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$ | 建立了机械加工过程的神经网络最优自适应控制系统 ^[30] |
| 基于BP神经网络,根据切削加工过程状态的变化在线建立加工过程模型 | 目标函数: $F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 约束条件: $G_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$ | 根据当前的状态模型和优化目标得出当前状态下的最优输入参数 ^[31] |
| 基于人工神经网络方法建立加工过程模型,用遗传算法实现在线优化 | 目标函数: $\max \text{MRR} = f a_p a_w$ 约束条件: $n_{\min} < n < n_{\max}, f_{\min} < f < f_{\max}$ | 在不违反加工约束的前提下构造了加工系统,保持获得最大材料去除率 ^[32] |
| 利用BP神经网络和遗传算法实现曲面切削过程,并通过遗传算法对过程模型的切削参数进行自适应建模 | 目标函数: $g(x) = \begin{cases} f(x) - F_{\min}, & \text{若 } f(x) - F_{\min} > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ | 建立在线优化问题的自学习控制方案优化 ^[33] |

铁基粉末冶金成分不同,其用途和切削参数也会有所不同。对于一般铁基粉末冶金结构件,切削速度超过一定范围后,零件表面粗糙度迅速增大,并出现刀尖崩刃的现象。据以往研究者对粉末冶金零件的切削加工实验可知,切削粉末冶金时,切削速度应保持在一定范围内(硬质合金类 $30 \sim 70\text{m}/\text{min}$)才能够保证较理想的工件表面质量;进给量和切削深度的增大会使表面粗糙度逐渐增大,并降低刀具寿命,针对精加工零件的要求,应采用较小的进给量以保证零件质量;在一定范围内,切削温度越低,零件和刀具越不易被氧化,材料越不易发生相互渗透的现象,因此切削时注意温度的控制,必要时采取降温措施。

4 结语

目前对于粉末冶金的切削加工性能研究主要是切削刀具的选材、结构设计和切削工艺的优化改进,以提高刀具的使用寿命和零件表面质量。国内外研究者学者就粉末冶金压制、烧结的工艺进行了数值模拟和实验探究,通过压制方式和力度增加粉末冶金结构件密度,尽可能降低其孔隙率。由于铁基粉末冶金零件制造工艺特殊,其内部孔隙无法消除,给实际切削带来较大影响。结合以往研究结果,就铁基粉末冶金零件及其切削加工的发展做出展望:

(1)由于孔隙的存在,使其物理和力学性能受到影响,增大铁基粉末件密度,提升孔隙分布均匀性是提高其性能的关键措施。在粉末冶金零件实际的加工过程中,可以通过改善混料、压制和烧结工艺来控制材料的孔隙率,提高孔隙分布的均匀性,以提高铁基粉末冶金的性能。利用高速压制技术^[34]得到的生坯密度最高可达 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$,接近完全致密,可以获得较好的切削加工性能,但成本较大,不适合批量生产。

(2)一般切削速度下,选用涂层硬质合金刀具作为切削工具,其失效后可重磨,节约资源,较经济,且使用寿命和切削效果符合要求,适用于工厂、企业大批量加工零件。

(3)在切削三要素中,切削速度对粉末冶金零件的切削性能影响表现较突出,切削速度过大易造成刀尖崩刃,加重刀具硬化现象,造成工件的浪费。运用现代切削理论、数学建模和模型分析方法寻求切削参数的最优组合是切削参数优化的一个重要发展方向^[35]。

(4)切削过程中保持较低的温度,可以有效避

免切削液对零件表面的腐蚀,同时阻隔刀具表面与零件表面因相互挤压发生成分的相互渗透,保证粉末冶金零件的表面质量。可采用引用冷空气、内冷刀具或在极端环境下加工等措施。

参考文献

- [1] 黄伯云, 易健宏. 现代粉末冶金材料和技术发展现状(一)[J]. 上海金属, 2007(3): 1-7.
- [2] 马金龙, 童学锋, 彭虎. 烧结技术的革命——微波烧结技术的发展及现状[J]. 新材料产业, 2001, 96(6): 30-32.
- [3] Upadhyaya G S. Some issues in sintering science and technology[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 67: 1-5.
- [4] Groza J R, Subhash H R, Kazuo Y. Plasma activated sintering of additive-free AlN powders to near-theoretical density in 5 minutes [J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(10): 2643-2645.
- [5] 黄桃根. 对粉末冶金机械零件的切削加工分析[J]. 冶金与材料, 2018, 38(5): 118-120.
- [6] 刘胜. 粉末冶金低合金钢力学性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [7] 杨洁. 铁基粉末冶金零件常见生产缺陷的金相分析[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(5): 337-341, 348.
- [8] 颜士伟, 黄尚宇, 胡建华, 等. 数值仿真技术在粉末冶金零件制造中的应用及研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(1): 57-67.
- [9] 周照耀, 李元元. 金属粉末成形力学建模与计算机模拟[M]. 广东: 华南理工大学出版社, 2011: 1-29.
- [10] 韩立发, 屈盛官, 夏伟. 涂层刀具切削铁基粉末冶金复合材料时的磨损机理[J]. 机械制造, 2007(1): 42-44.
- [11] 辛民, 王西彬, 康运江, 等. 铁基粉末冶金材料的高速干切削试验研究[J]. 工具技术, 2006(7): 17-20.
- [12] 董林峰. 粉末金属成形中的缺陷预测与成形过程的计算机仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- [13] 汪俊, 李从心, 阮雪榆. 粉末金属压制过程数值模拟建模方法[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(7): 436-438.
- [14] 邹玉明. PCBN 刀具切削粉末冶金气门座圈切削性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [15] 杜劲. 粉末高温合金 FGH95 高速切削加工表面完整性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [16] 蓝渊. 数控铣削加工切削参数优选专家系统的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [17] 王阳. 铁基粉末冶金机械零件车削刀具性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
- [18] 郭丽波, 李传红. 铁基粉末冶金零件车削试验研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(10): 22-24.
- [19] 陈成英, 林育阳, 杨聪斌, 等. 粉末冶金机械零件的切削加工[J]. 装备制造技术, 2009(8): 144-145, 156.
- [20] 邹玉明. PCBN 刀具切削粉末冶金气门座圈切削性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [21] M Saoubi R, Czotscher T, Andersson O, et al. Machinability of powder metallurgy steels using PCBN inserts [J]. Procedia CIRP, 2014(14): 83-88.
- [22] 颀龙, 赵兴龙, 朱岩, 等. AHP10V 粉末冶金工具钢切削试验与分析[J]. 工具技术, 2015, 49(1): 61-64.
- [23] 刘志兵, 王西彬. 积屑瘤状态对微细切削表面轮廓特征的影响[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 90-96.
- [24] 魏飞. 精加工中积屑瘤的预防措施[J]. 机床与液压, 2014, 42(14): 192-193.
- [25] 王威. 高速切削加工高温镍基合金 GH4169 的切削力和切削热的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [26] 闫奎呈, 田宪华, 刘亚, 等. (Ti, Al)N + TiN 涂层硬质合金刀具加工铁基高温合金正交切削试验研究[J]. 工具技术, 2020, 54(5): 3-8.
- [27] Suresh Palanisamy, Stuart D McDonald, Matthew S Daryusch. Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(9): 739-743.
- [28] Czampa M, Markos S, Szalay T. Improvement of drilling possibilities for machining powder metallurgy materials [J]. Procedia CIRP, 2013, 7(7): 288-293.
- [29] 姜彬, 杨树财, 郑敏利, 等. 数控切削加工工艺参数的多目标优化[J]. 工具技术, 2002, (7): 22-25.
- [30] 刘艳明. 机械加工过程的神经网络最优自适应控制[J]. 机械工业自动化, 1994, 16(2): 4-11.
- [31] 汪朝军. 铣削加工过程的自适应最优控制[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(10): 7-9.
- [32] 倪其民. 基于人工神经网络和遗传算法的平面铣削加工参数自适应优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2000(2): 5-7.
- [33] Li L, Liu F, Chen B, et al. Multi-objective optimization of cutting parameters in sculptured parts machining based on neural network [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015, 26(5): 891-898.
- [34] Skoglund P. High density PM components by high velocity compaction [J]. Powder Metallurgy, 2001, 44(3): 199-201.
- [35] 李绍明. 机械加工工艺基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

第一作者: 付雷杰, 博士, 讲师, 西安工业大学机电工程学院, 710000 西安市

First Author: Fu Leijie, Ph. D., Lecturer, School of Mechanical & Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710000, China