



论文题目：钻削力的仿真分析与试验研究

学科专业：机械制造及其自动化

研究生：王超

签名：王超

指导教师：肖继明 教授

签名：肖继明

摘要

切削力作为金属切削过程中主要的物理现象之一，直接决定着切削热的产生，影响刀具寿命、加工精度和加工表面质量，也是设计机床、夹具等工艺设备必不可少的依据。钻削加工是一种重要的加工工艺，占机械加工总量的 30%左右。因此，进行钻削力研究，不仅是钻削机理研究的重要方面，而且对指导生产实际具有重要的现实意义。

本文以麻花钻为研究对象，进行钻削力仿真与试验研究。利用 DEFORM-3D 有限元软件，建立了钻削过程的仿真模型，实现了切屑形成、钻削力和钻削温度的仿真，研究了钻削速度、进给量等工艺参数与钻削力之间的关系。通过用麻花钻对 45 钢、灰铸铁 HT200 和硬铝 LY12 等普通材料，以及奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti、钛合金 Ti-6Al-4V 和高强度钢 30CrMnSiA 等难加工材料的钻削力试验，揭示了钻削速度、进给量等工艺参数对钻削力的影响规律，以及麻花钻主切削刃和横刃对切削力的贡献，分析了修磨横刃之后钻削力的变化情况。采用正交试验和回归分析法，建立了几种材料钻削力的经验公式。在干式切削条件下，研究了涂层刀具钻削力特性。最后通过仿真值与实验值的比较，判断仿真模型的可靠性。

研究分析结果表明，①钻削速度对钻削力的影响较小，钻削力随着进给量和钻头直径的增大而增大。②工件材料性能对钻削力的影响较大，随着材料强度、硬度和韧性等物理机械性能的提高钻削力增大。③麻花钻主切削刃对扭矩的影响较大，其对扭矩的贡献约占总扭矩的 80%，而横刃对轴向力的影响较大，其对轴向力的贡献占总轴向力的 60%左右。采用修磨横刃的方法，能大大降低轴向力，提高钻头的定位精度。④CrAlTiN 涂层具有一定的固体润滑作用，能显著改善钻头的摩擦特性，提高其切削性能，尤其在钻削 1Cr18Ni9Ti 和钛合金 Ti-6Al-4V 时，优势明显。⑤采用正交试验和回归分析方法所建立的钻削力经验公式可信度较高，与试验结果拟合程度良好。

另外，所建钻削力分析模型能较好地反映钻削加工过程钻削力的变化趋势，可以作为研究钻削加工的重要辅助工具。

关键词：钻削力；DEFORM-3D；试验研究；经验公式

论文研究得到国家重点基础研究发展计划项目（973 计划）（编号：2009CB724406）

的资助。

**Title: SIMULATION ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY OF
DRILLING FORCE**

Major: Mechanical Manufacturing and Automation

Name: WANG Chao

Signature: WANG Chao

Supervisor: Prof. XIAO Jiming

Signature: Xiao Jiming

Abstract

Cutting force, as one of the main physical phenomena in the metal cutting process, directly determines the generation of cutting heat, affects the tool life, machining accuracy and machined surface quality, is also indispensable foundations of designing machine tools, fixtures and other process equipment. The drilling process is an important process, accounting for about 30% of the total machining. Therefore, researching the drilling force, is not only important aspect of studying the drilling mechanism, but also is considerable for practical significance in guiding the actual production.

Simulation analysis and experimental study of drilling force is studied with the twist drill as the research objective in this paper. Using finite element software DEFORM-3D, the analysis model of the drilling process is established. The simulation of chip formation, the drilling force and drilling temperature is achieved, and the relationship is studied between the drilling force and other process parameters such as cutting speed, feed rate. The effect of cutting speed, feed rate and other process parameters, as well as the contribution of cutting edge and chisel edge of the twist drill on the cutting force is revealed, and the change of the drilling force after grinding the chisel edge is analyzed, by the drilling test of some common materials such as 45 steel, gray cast iron HT200, duralumin LY12, and certain difficult machining materials such as austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti, titanium alloy Ti-6Al-4V and high-strength steel 30CrMnSiA using twist drill. Empirical formula of the drilling force of several materials is established using orthogonal test and regression analysis. The drilling force characteristics of the coated tool is studied in dry cutting conditions. The reliability of the simulation model is judged by the comparison of the simulation and the experimental values.

Analysis results show that, ①Cutting speed has little effect on drilling force, which increases with the increase of feed rate and drill diameter. ②The properties of the workpiece material strongly influence on the drilling force, which increases with the improvement of the physical and mechanical properties of the material, such as strength, hardness and toughness. ③The main cutting edge of twist drill has a great impact on the torque, which accounts for

about 80% of the total torque, while the chisel edge play a very important role on the axial force, which contribution to the total axial force is about 60%. The method of grinding the chisel edge can greatly reduce the axial force and improve the positioning accuracy of the drill. ④The CrAlTiN coating has the wonderful solid lubrication, which significantly ameliorate the friction characteristics of the drill, improve its cutting performance, especially in drilling 1Cr18Ni9Ti and titanium alloys Ti-6Al-4V, having obvious advantages. ⑤The empirical formula established by the orthogonal test and regression analysis of the drilling force, which fit well with the experimental results, is credible.

In addition, drilling force analysis model, which well reflect the trend of drilling force in drilling process, can be used as an important auxiliary tool for the drilling process.

Key words: drilling force; DEFORM-3D; experimental study; empirical formula

This research work is supported by the National Key Basic Research and Development Program (No: 2009CB724406).

1 绪论

1.1 研究背景和意义

相关资料表明：作为机械加工中重要加工工艺的钻削加工，大约占到机械加工总量的30%^[1]。在美国的汽车制造业中，孔加工在机械加工中的比重达到50%左右，而在飞机制造业中，其应用范围更广^[2]。尽管钻削加工的应用如此普遍，但其作为重要的加工工艺，仍然是一种复杂的机械加工方法。研究钻削过程的重要目的之一是通过研究各种因素对钻削力的影响规律，确定其数学模型，以方便钻削力和钻削功率的预测，同时为机床工装设计、工艺规范的确定，如切削用量等，提供参考和依据。

作为金属切削过程中主要物理现象之一的切削力，直接决定着切削热的产生，并影响着刀具磨损、破损、刀具寿命、加工精度和已加工表面质量，同时还会引起振动，甚至损坏机床上的一些零件。在设计机床、夹具和刀具时，切削力也是不可或缺的数据，特别是现代加工过程逐渐向自动化方向发展，切削力常常作为监控刀具状态和切削过程的一个重要技术参数，得到更加广泛的重视。因此，研究切削不仅是研究切削机理的重要内容，同时对于生产实际也具有重大的现实意义。而目前关于切削力的研究大多是针对车削、铣削展开的，相对于车削来讲钻削过程是在半封闭状态下完成的，其排屑困难、切削温度高、摩擦大、钻头刚度低，所以钻削力的研究相对较少，其数据库还不完善。

本课题结合国家科技重大专项(结合面特性数据库和考虑结合部耦合特性的机床整机性能)的子题(切削力及分力比例计算方法)的研究工作，进行麻花钻的钻削力研究，揭示切削用量参数、工件材料性能、刀具材料及结构等变化对钻削力的影响规律，以便为机床、夹具等工艺装备的设计，以及麻花钻的合理使用提供依据。研究工作具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 钻削力的研究现状

钻削力作为钻削加工过程中一个重要的技术参数，为合理制定加工工艺规程、设计夹具以及了解新材料的机械性能和切削工艺等奠定了基础。因此，研究钻削力的特性，对生产实际有着非常重要的指导意义。同时，随着计算机发展水平的提高和数值计算理论的更加成熟，数值模拟方法为金属切削理论的研究提供了新的强有力的工具。国内外许多学者作了大量的研究工作，为钻削力和切削加工数值模拟提供了广泛且有价值的方法、思路和信息。

1.2.1 钻削力模型的研究现状

随着人们对各种新型钻头和钻削工艺的开发，以及对钻削过程了解的深入，钻削力建模的研究在不断的发展。

在钻削力理论模型方面，最早是美国的C J Jr Oxford，他用显微照片记录下钻头主切

削刃和横刃上切屑的变形过程，并提出钻削加工过程中切削部分存在三个主要的作用区域，即主切削刃切削区、横刃（第二切削刃）切削区以及钻芯附近的刻画区^[1]。之后，C J Jr Oxford 又与 M C Shaw 通过试验证明了钻削加工过程中横刃对轴向力影响很大，产生总轴向力的 50%~60%^[2]。

1994 年，美国密歇根大学的 J.L. Wang 在其博士论文中，把主切削刃等效为斜角切削，以斜角切削经验数据为依据，建立了钻削力模型，然后通过对 S1018 冷拔钢的钻削试验表明，钻削轴向力的理论计算偏差为 12%~19%，钻削扭矩的理论计算偏差分别在 15%左右^[4]。

1996 年，美国伊利诺大学的 Vivek Chandrasekharan 在钻削力理论模型中，考虑了钻头装夹误差、刃磨误差等因素的影响，通过对灰铸铁和 1018 钢的钻削试验表明，理论模型所计算的钻削力误差小于 15%^[5]。

1999 年，美国密歇根大学 Ye chen 建立了基于车削试验数据多项式拟合的单位体积能量的钻削力理论模型，通过高速钢钻头钻削铝合金 A319 的试验，表明轴向力和扭矩的理论计算误差分别小于 10%和 15%^[6]。

2003 年，上海海运学院董丽华教授在研究直线刃标准麻花钻的基础上，采用经验值与数学分析相结合的方法对钻削机理进行了研究，建立了动态钻削力模型，实现了对动态钻削力和扭矩的仿真^[7]。

2004 年，Strenkowski J S 等人提出用有限元技术对麻花钻钻削力进行预测的方法，主要是利用一个欧拉有限单元模型对单元刀具的切削力进行模拟，从而得出由单元刀具组成的切削刃的切削力^[8]。

2004 年，吉林大学王军博士等采用正交试验的方法对压铸镁合金 AZ91D 进行了钻削试验，用多元线性回归法对试验结果进行了处理，建立了压铸镁合金 AZ91D 的轴向力与扭矩的经验公式^[9]。

2005 年，华南理工大学机械工程学院孙路华等对碳纤维复合材料进行了钻削试验研究，就高速钻削条件下对轴向力的影响较大的几个钻削参数（刀具、材料厚度、进给量、钻孔个数等）进行了较为全面的研究^[10]。之后，北京林业大学张厚江对高速钻削碳纤维复合材料时的钻削力进行了试验研究，发现切削速度与进给速度之比 v/v_f 为 3000~4000 是其对轴向力和扭矩产生影响的阈值，这一值对生产实际中选定进给速度和切削速度具有重大的参考意义^[11]。

2008 年澳大利亚 Q Zhang 和 J Wang 建立了与之前不同的平面磨法钻头钻削力模型，并通过钻削 ASSAB4340 钢的试验得出，理论计算误差小于 10%^[12]。

2010 年，哈尔滨工业大学吴健根据钻削等效模型，基于钻头切削刃的工作角度，建立了钻削力的理论模型，并对几种典型难加工材料进行了试验研究，结果表明：工件材料的力学性能对各部分切削刃所承担的钻削力比例影响较大，切削用量对其影响较小^[13]。

综上所述，可以看出钻削力的研究目前主要有三种方法：一是切削力的理论公式；二

是通过实验测量切削力,做回归分析,得出切削力的经验公式;三是应用有限元法对切削力进行预测。理论公式虽然可以反映影响切削力的各因素的内在联系,但是在推导公式的过程中对许多条件做了简化,和实际状况有较大的差异,目前还很难在理论上确定某些参数的值,因此计算值与实验值有很大的差异,因此理论公式不太实用,只能作为分析式使用^[14]。因此本文通过钻削试验,利用测力仪测出切削力,建立了回归方程,最后得到切削力的经验公式。同时利用有限元方法(FEM)对部分试验进行数值模拟,分析仿真值与实验值之间的差距。

1.2.2 切削加工数值模拟技术的研究现状

切削加工是在机床上利用切削工具从工件上切除多余材料,从而获得具有一定形状精度、尺寸精度、位置精度和表面质量的机械零件,是机械加工的基本方法^[15]。有限元法的基本思想是把一个连续的整体看成许多离散单元的集合体,是随着计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法,最初是在飞机结构、动态特性分析中应用的一种有效的数值分析方法^[16]。由于有限元数值模拟技术的快速、灵活和有效性,20世纪70年代,人们逐渐将其应用于切削工艺的模拟。与其他传统的方法相比,很大程度上提高了分析的准确性。到目前为止,很多有限元模型已经被开发出来,用来预测切削过程中切削力的变化情况以及工件的应力和温度分布等^[14]。

Armarego 和 Cheng 于 1972 年用一系列切削薄片模拟了钻削过程^[17]。这种方法后来被 Watson 发展并建立了一个麻花钻钻尖的有限元模型,用来对横刃边缘和钻头切削刃口材料的切除过程进行仿真模拟^[18]。

1978 年 Usui 等人利用能量方法建立了一个考虑三维几何条件在加工过程影响的模型^[19]。后来,Usui 又和 Shirakashi 提出流线、刀面角和切屑几何形状,对温度、应力和应变等参数进行了预测,并建立了稳态的正交切削模型^[20]。

1980 年美国 North Carolina 州立大学的 M R Lajczok 在其学位论文中应用有限元方法对切削加工中的主要问题进行了研究,初步探讨了切削工艺^[21]。

1994 年美国 Chen 和 Fuh 等人用有限元法分析了进给量、切削速度和螺旋角等对钻削温度的影响^[22]。后来北卡罗莱纳州立大学 Chang-Chi Hsieh 用 ANSYS 也建立了有限元模型,对钻削温度进行了研究,AISI-1020 钢的钻削温度的仿真误差为 20%~35%^[23],因网格稀疏,误差较大。

随着切削加工有限元理论的不完善和计算机科学技术的快速发展,对金属切削数值模拟的研究集中到了一些关键技术,如切屑的分离和断裂准则、切削工艺以及切削温度的分布等^[18]。

美国的 Huang J M 与 Black J T 和悉尼大学的 Lianchi Zhang 分别于 1996 年和 1999 年应用有限元技术对正交切削工艺中不同的切屑分离准则进行了系统的研究^[24, 25]。

意大利 Brescia 大学机械工程系的 Ceretti E 长期致力于金属塑性成形仿真模拟的研究,后来与美国 Ohio 州立大学的 T Alton 教授合作,利用有限元模拟,对切削工艺做了

全面的研究^[26-29]。

2002年美国 Jun Ni 和 Matthew Bono 利用钻削力分析计算工件上的热流,并且把它作为 Abaqus 软件有限元模型的边界条件来分析温度,通过实验证明了 82%的测量结果在仿真预测范围内^[30, 31]。

2003年美国密歇根大学 Lin Zhang 在其博士论文中,把麻花钻主切削刃等效为斜角切削,把横刃等效为直角切削,进行有限元模拟仿真,研究材料和摩擦两种模型的影响^[32]。

2004年 Michigan 大学的 J SStrenkowski 建立了钻削加工的斜角切削模型(如图 1-1 所示),将钻尖看作由一系列沿着切削刃方向的斜角切削单元刀具组成,并把这个斜角切削有限元模型应用于钻削的轴向力和扭矩的分析与研究^[33]。

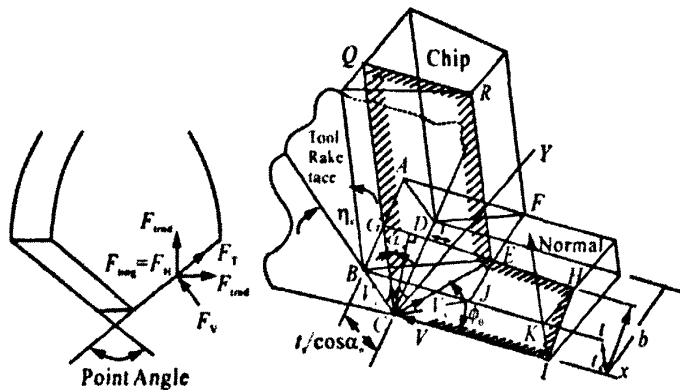


图 1-1 斜角切削模型

Fig 1-1 Oblique cutting model

与国外利用有限元进行切削加工的研究状况相比,目前国内此领域的研究还相对较少。

台湾科技大学 Zone-ching Lin 等人于 2000 年对 NiP 合金的正交超精密切削做了细致的研究,阐述了切削深度和切削速度对残余应力的影响趋势^[34]。

2001年,清华大学的方刚利用有限元软件 DEFORM-2D,针对典型的正交切削工艺,建立了平面应变模型,得到了切削力变化、切屑成形和温度分布以及残余应力等结果^[35]。

2003,黄志刚等人针对金属切削加工的有限元模拟,讨论了表面接触和自适应网格以及切屑分离准则等与金属切削加工模型相关的若干问题^[36]。

2006年,天津大学白亚江、杜云芝运用有限元软件 DEFORM-3D 模拟了麻花钻的钻孔加工过程,并对加工中的部分影响因素和结果做了预测^[37]。

2007年,西华大学杨军等采用 Deform-3D 软件建立了普通麻花钻钻削力仿真模型,在进给量为 0.2mm/r、转速为 320r/min、钻头直径为 16mm 的工况下钻削 45 钢(硬度为 200HB),表明轴向力和扭矩的仿真误差分别为 3.66%和 13.9%^[38]。

2008年,哈尔滨工业大学韩荣第教授等通过对标准麻花钻的几何造型及锥面磨法的研究,建立有限元模型,对钻削力和钻削温度的分布做了仿真研究^[39]。

2010年,西南交通大学洪明虎等运用有限元分析软件对高速钻削加工进行仿真研究。

分析钻削过程中切削力大小、切削温度的分布情况^[40]。

综上所述,利用有限元法研究钻削力、钻削温度等已经较为广泛,并且可以节省人力、财力等,已经成为研究钻削过程的重要辅助工具,因此很有必要对基于材料本构模型的物理仿真进行研究。

1.3 论文研究的内容和框架

1.3.1 研究内容

本文通过系统的钻削试验,利用测力仪测出切削力,用最小二乘法进行处理,并建立回归方程,最后得到切削力的经验公式。同时利用有限元方法(FEM)对部分试验进行数值模拟,分析仿真值与实验值之间的差距,主要研究工作如下:

(1) 阐述切削力的来源和影响因素,并分析标准麻花钻的结构和钻削原理。

(2) 研究仿真过程中有限元模型的建立方法和关键技术,并应用有限元软件 DEFORM,建立 45 钢钻削过程的三维有限元模型,对网格划分、材料模型、仿真控制以及边界条件等进行设置,选取进给量、切削速度作为研究对象,动态模拟切屑成形过程,并分析以上两个参数对钻削力和切削温度的影响。

(3) 干式钻削(Dry Cutting)条件下,钻削常用工件材料 45 钢、铝硅合金 ZL207、铸铁 HT200 和硬铝 LY12,以及难加工材料奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti、高强度钢 30CrMnSiA 和钛合金 Ti-6Al-4V (TC4)。通过各种材料的切削试验,建立不同材料的钻削力经验模型,为以后这些常用材料的钻削加工提供参考。

(4) 研究并分析切削刃(横刃、主切削刃)对钻削力的贡献比例,以及修磨横刃之后钻削力的变化情况。

(5) 与未涂层刀具相比,在干式切削条件下,研究涂层刀具的钻削力特性。

(6) 结合 45 钢和 TC4 的部分单因素钻削试验,利用 DEFORM-3D 有限元软件建立这两种材料的钻削加工有限元仿真模型,通过仿真值与实验值的比较,来考察仿真模型的可靠性和准确性。

1.3.2 总体框架

全文共分六章,具体安排如下:

第一章,绪论。主要阐述论文研究的背景和意义,总结国内外钻削力模型和应用有限元数值模拟研究金属切削加工的状况,在此基础上结合科研项目,提出论文的研究内容和总体框架。

第二章,切削力特性及麻花钻的结构要素。详细阐述了切削力的来源和影响因素,并分析标准麻花钻的结构和钻削原理,为钻削加工模拟和试验数据分析奠定基础。

第三章,基于 DEFORM-3D 的钻削加工仿真研究。介绍了 DEFORM 建模过程中的关键技术,并建立 45 钢钻削加工的有限元模型。研究钻削过程中切屑的形成及不同切削参

数对钻削力和钻削温度的影响规律。

第四章，试验条件及试验方法。介绍了试验过程中所用的的设备、仪器、工件材料及其特性，并阐述了试验方法和测试原理。

第五章，钻削力试验结果与分析。通过系统的钻削力的试验研究，汇总数据，分析不同切削参数对钻削力的影响规律，建立钻削不同材料时钻削力的经验公式，研究主切削刃和横刃对钻削力的贡献，和修磨横刃之后钻削力的变化情况，以及涂层刀具钻削力特性，最后探讨了有限元模拟结果的可靠性。

最后总结全文，对后续需要进一步研究的工作进行展望。

2 切削力特性及麻花钻的结构要素

2.1 切削力的来源及影响因素

切削过程中,切削层金属之所以会产生变形,主要在于刀具给予力的作用,这个作用在工件或刀具上的力就叫切削力;切削力不仅使切削层金属产生变形、消耗了功,产生了切削热使刀具磨损变钝,影响已加工表面质量和生产效率,而且是机床电动机功率选择、机床主运动和进给运动机构设计的主要依据;切削力的大小,是衡量刀具和工件材料的切削加工性的重要指标,同时也是对切削加工过程进行适应控制的关键因素^[15]。

2.1.1 切削力的来源

由切屑的形成过程可以知道,切削力来源于以下三个方面^[15],如图 2-1 所示。

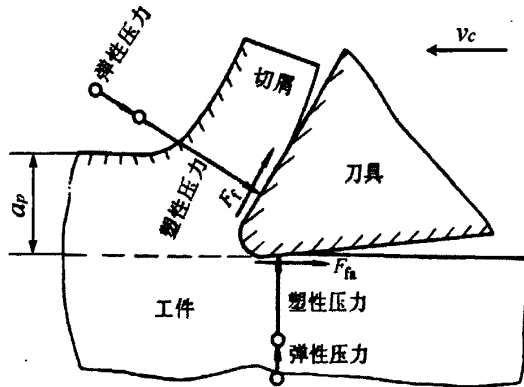


图 2-1 切削力的来源

Fig 2-1 The source of cutting force

- (1) 克服被加工材料对弹性变形的抗力。
- (2) 克服被加工材料对塑性变形的抗力。
- (3) 克服刀-屑间和刀-工间的摩擦阻力。

弹性变形抗力和塑性变形抗力,在切削中的三个变形区中均存在,但在第一变形区中的抗力最大。

上述各力形成的合力 F_r 作用在前刀面上近切削刃处。为了对切削力的作用更好的分析及方便对切削力的大小进行测量和计算,常常将合力 F_r , 在按进给方向、切深方向和主运动速度方向作的空间直角坐标轴 x 、 y 、 z 上分解成三个为相互垂直的分力,即 F_x 、 F_y 和 F_z , 如图 2-2 所示。

- (1) 进给抗力 F_x (轴向力): 进给方向的分力。
- (2) 切深抗力 F_y (径向力): 切深方向的分力。
- (3) 主切削力 F_z (切向力): 主运动切削速度方向的分力。

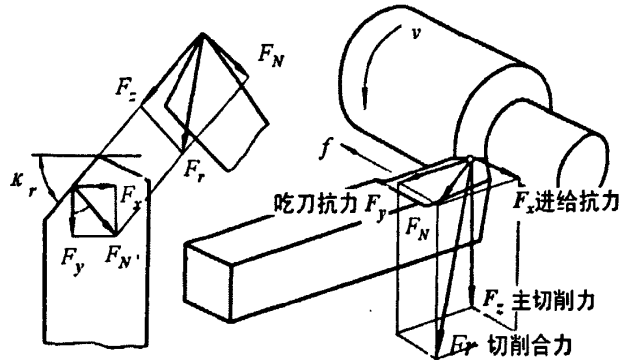


图 2-2 切削合力与分力

Fig 2-2 Total force and component force

F_z 是三个分力中最大的一个，它大约消耗切削总功率的 95%，是设计和使用刀具的主要根据，同时还用于对夹具、机床主要零部件的刚度和强度及机床电动机功率进行验算。

由图 2-2 可以看出切削合力 F_T ：

$$F_T = \sqrt{F_z^2 + F_N^2} = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2} \quad (2.1)$$

钻削力的来源和车削力的来源一样，源于工件材料的变形抗力，以及钻头和切屑、工件间的摩擦力。标准麻花钻有五个切削刃：两个主切削刃、两个副切削刃、一个横刃。因此钻头的轴向力 F_z 和扭矩 M_z 由各切削刃上总的轴向力与各切削刃上的扭矩总和构成。如图 2-3a 所示，和车削一样，钻头每一切削刃都产生切削力，包括切向力（主切削力） F_c 、背向力（径向力） F_p 和进给力（轴向力） F_f 。当左右切削刃对称时，背向力平衡，相互抵消，最终构成钻头的轴向力和切削扭矩，如图 2-3b 所示。

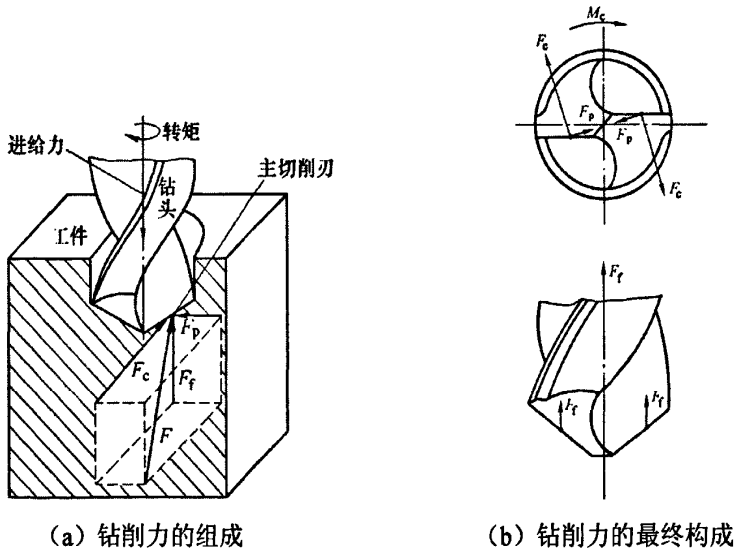


图 2-3 钻削力的来源

Fig 2-3 The source of the drilling force

2.1.2 切削力的影响因素

在切削过程中，有很多因素都对切削力产生了不同程度的影响，归纳起来除了工件材料、切削用量和刀具参数三个方面外，还有刀具材料、后刀面磨损、刀具刃磨质量及切削

液等方面的影响。这些因素的影响程度和影响规律在切削力理论公式和经验公式中都有较全面的体现。

a. 工件材料

工件材料是通过材料的剪切屈服强度 τ_s 、塑性变形程度以及切屑与前刀面间摩擦系数 u 等条件来影响切削力。

工件材料强度、硬度愈高，材料的剪切屈服强度 τ_s 越大，造成的切削力越大。材料的制造过程与热处理状态不同，最后得到的硬度也不同，切削力随着硬度的提高而增大，同时还受加工硬化程度的影响。

工件材料的韧性或塑性越高，切削变形越大，切屑越难折断，造成切屑与前刀面间摩擦增加，所以切削力增大。例如，奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的硬度接近 45 钢，但延伸率是 45 钢的 4 倍，所以同样条件下产生的切削力 F_c 较 45 钢增大 25%。

在切削铸铁等脆性材料，由于塑性变形很小，崩碎切屑与前刀面的摩擦小，故切削力小。例如灰铸铁 HT200 与 45 钢的硬度接近，但在切削灰铸铁时切削力 F_c 减小 40%。

b. 切削用量

背吃刀量与切削力近似成正比；进给量增加，切削力增加，但不成正比；切削速度对切削力影响复杂。

(1) 背吃刀量 a_p 和进给量 f

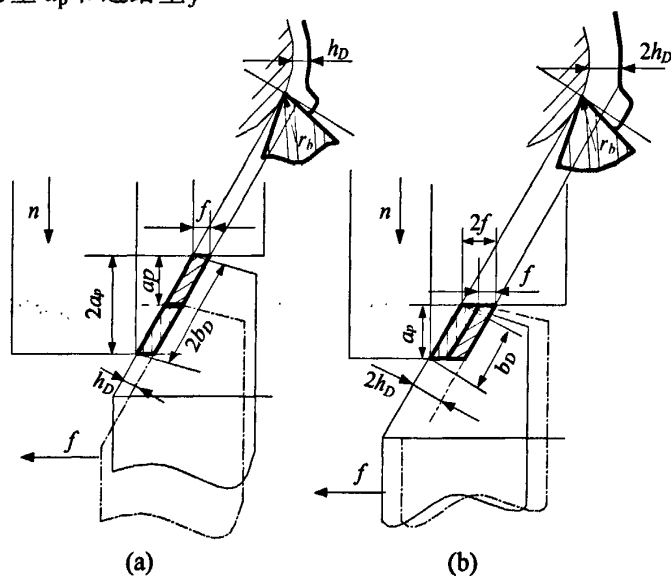


图 2-4 改变背吃刀量和进给量对切削力的影响

Fig 2-4 Cutting force influences of changing the cutting depth and feed rate

a_p 和 f 增大，切削宽度 b_D 、切削厚度 h_D 增大，切削面积 A_D 增大，抗力和摩擦力增加，则切削力增大，但影响程度不一。因刀刃钝圆半径 r_b 的关系，刃口处的变形大， a_p 增大时（如图 2-4a 所示），该处变形成比例增大； f 增大时（如图 2-4b 所示），由于摩擦和变形并不成倍增加，该处变形比例基本不变，而 h_D 变大，变形减小。所以增加 a_p 时切削力的增大较 f 的增大影响明显。

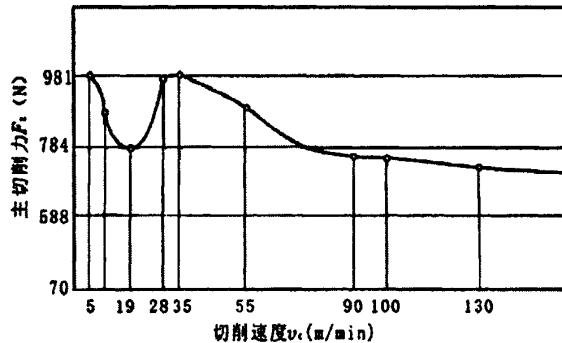
若 f 不变, 由于 a_p 增加一倍, 使切削宽度和切削层面积也随之增大一倍, 使切削力增加一倍; 若进给量 f 增大一倍, 实验表明约增加 70%~80%^[41]。

a_p 和 f 对切削力 F_z 的影响规律用于指导生产实践具有重要作用。例如相同的切削面积, 切削效率相同, 但增大进给量和背吃刀量比较, 前者既减小了切削力又省了功率消耗; 如果消耗相等的机床功率, 则在表面粗糙度允许的情况下选用更大的进给量切削, 可切除更多的金属层和获得更高的生产效率^[41]。

(2) 切削速度 v_c

切削塑性金属时, 切削速度 v_c 对切削力的影响如同对切削变形影响的规律, 主要是由积屑瘤与摩擦的作用所造成的。

以车削 45 钢为例, 从实验求得图 2-5 可知: 当切削速度 v_c 在 5~20m/min 区域内增加时, 积屑瘤高度逐渐增加, 主切削力 F_z 减小; 切削速度继续在 20~35m/min 范围内增加, 积屑瘤逐渐消失, 切削力 F_z 增加; 当 $v_c > 35$ m/min 时, 由于切削温度上升, 摩擦系数 μ 减小, 故切削力下降。一般切削速度超过 90m/min, 切削力 F_z 处于变化甚小的较稳定状态^[42]。



加工条件: 材料 45 钢、材料 YT15、 $k_r=45^\circ$ 、 $k_f=15^\circ$ 、 $\alpha_o=8^\circ$ 、 $\lambda_s=0^\circ$ 、 $a_p=2$ mm、 $f=0.2$ mm/r

图 2-5 切削速度 v_c 对切削力 F_z 的影响

Fig 2-5 The impact of cutting speed on cutting force

如果从降低切削功率和减少切削力的方面考虑, 在进行切削用量选择时, 应该首选提高切削速度, 其次选择较大的进给量, 最后根据加工要求选择背吃刀量。

c. 刀具几何参数

刀具几何参数对切削力的影响主要以麻花钻为主, 讲述其几何参数对钻削加工的影响, 将在麻花钻的结构与几何参数这一节论述。

d. 其它因素

刀具材料: 刀具材料主要是通过它与被加工材料之间的摩擦系数来影响切削力的变化。如果刀具与工件材料之间摩擦系数小, 则切削力小。如硬质合金的 μ 值随钴含量的增多和碳化钛含量的减少而提高, 故使用含钴量多的硬质合金刀片, 切削力将增大; YG 类硬质合金比 YT 类硬质合金摩擦系数小, 选用 YT15 切削钢比用 TY30 的切削力大; 陶瓷刀片导热性小, 在较高的温度下工作时因摩擦降低, 切削力减小。

切削液: 切削时浇注切削液, 由于使刀具、工件与切屑接触面间摩擦减小, 因此能显

著的减小切削力。例如选用效果良好的切削液，比干切削时的切削力小 10%~20%^[42]。

刀具磨损：后刀面磨损，使刀具与加工表面间摩擦加剧，故切削力增大，对吃刀抗力 F_y 的影响最为显著。

刀具前后刀面刃磨质量越好，摩擦系数越小，切削力越小。

2.2 麻花钻的结构与钻削原理

钻削在机械加工中具有重要地位，麻花钻作为钻孔用的主要刀具，是一种形状较复杂的双刃钻孔或扩孔的标准刀具。由于标准麻花钻有许多优点，如生产效率高，允许重磨次数多，使用方便且经济等，所以在普通钻头中，其应用最为广泛，约占使用量的 70%^[43]。由于麻花钻切削性能的好坏，不仅与麻花钻的材料及热处理状态有关，而且与它的结构、几何参数有很大关系，为了进一步研究钻削力，预测和分析标准麻花钻切削刃和修磨横刃后钻削力的分布情况，很有必要仔细地研究麻花钻的各部分结构及数学模型。

2.2.1 麻花钻的结构与几何参数

a. 麻花钻的结构

标准麻花钻的结构主要由柄部、颈部和工作部分组成，如图 2-6 所示：柄部是钻头的夹持部分，用于与机床的连接，并在钻孔时传递动力（扭矩和轴向力）；颈部是工作部分和尾部间的过渡部分，供磨削时砂轮退刀和打印标记用；麻花钻的工作部分如图 2-7 所示，它有两条对称的螺旋槽，是容屑和排屑的通道，由于其外形很像麻花，因此而得名，它是钻头的主要部分，前端为切削部分，承担主要的切削工作，后端为导向部分，起引导钻头的作用，也是切削部分的后备部分。

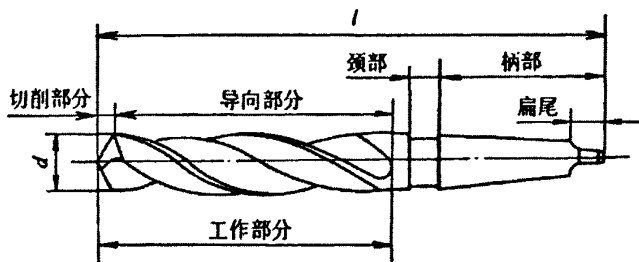


图 2-6 标准麻花钻的结构

Fig 2-6 The structure of the standard twist drill

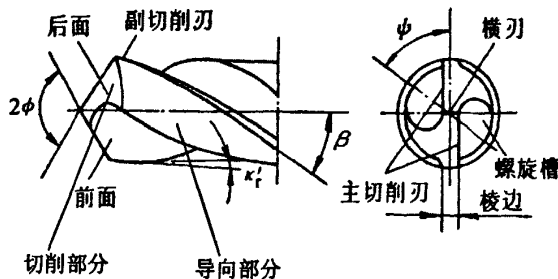


图 2-7 麻花钻的工作部分

Fig 2-7 The working part of the twist drill

切削部分担负着切削工作，有两个前面、主后面、副后面、主切削刃、副切削刃及一个横刃组成。横刃为两个主后面相交形成的刃，副后面是钻头的两条刃带，工作时与工件孔壁（即已加工表面）相对，如图 2-8 所示。

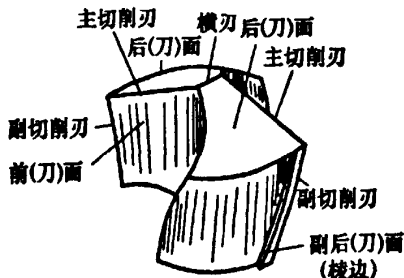


图 2-8 麻花钻切削部分的结构

Fig 2-8 The structure of twist drill cutting part

导向部分磨有两条棱边，为了减少与加工孔壁的摩擦，棱边直径磨有 $(0.03\sim 0.12)/100$ 的倒锥量（即直径由切削部分顶端向尾部逐渐减小），从而形成了副偏角 k'_r ，如图 2-9 所示。钻心圆是一个假象的圆，它与钻头的两个主切削刃相切。钻心圆直径约为 0.15 倍钻头直径，为了提高钻头的刚度，钻头由前端向后逐渐加大（即正锥），递增量为每 $1.4\text{mm}\sim 2.0\text{mm}/100\text{mm}$ ，如图 2-10 所示。

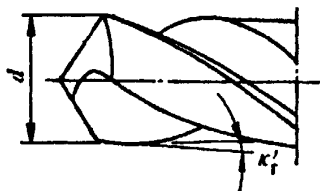


图 2-9 副偏角

Fig 2-9 Tool minor cutting edge angle

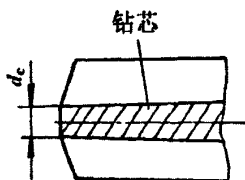


图 2-10 钻芯结构

Fig 2-10 The structure of drill core

b. 麻花钻主要几何参数及其对钻削力的影响

(1) 螺旋角 β 钻头外缘表面与螺旋槽的交线为螺旋线，该外缘螺旋线展开成直线后与钻头轴线的夹角为钻头的螺旋角，用 β 表示，如图 2-11 所示。设螺旋导程槽为 P ，钻头外圆直径为 d ，则：

$$\tan \beta = \pi d / P \quad (2.2)$$

麻花钻的主切削刃在螺旋槽的表面上，主切削刃上任一点 x 的螺旋角 β_x 是指 x 点所在圆柱螺旋线的螺旋角，其计算公式是：

$$\tan \beta_x = \frac{2\pi r_x}{P} = \frac{2\pi r}{P} \frac{r_x}{r} = \frac{r_x}{r} \tan \beta \quad (2.3)$$

由此可见，钻头不同直径处的螺旋角 β 不同，外径处螺旋角最大，接近中心处螺旋角越小。螺旋角 β 实际上是钻头的进给前角。因此螺旋角越大，钻头的进给前角越大，钻头越锋利，也有利于排屑。但是螺旋角过大，会削弱钻头的强度和散热条件，使钻头的磨损加快。标准高速钢麻花钻的螺旋角 $\beta=18^\circ\sim 30^\circ$ 。对于小直径钻头，螺旋角应取较小值，以保证钻头的刚度。钻软材料、铝合金时，为改善排屑效果， β 角可设计得大些。

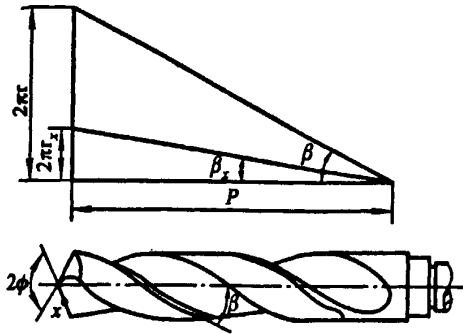


图 2-11 螺旋角 β

Fig 2-11 Helix angle β

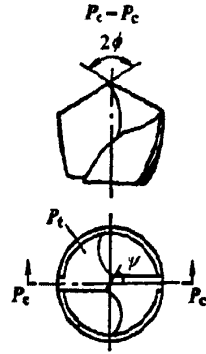


图 2-12 顶角 2ϕ

Fig 2-12 Point angle 2ϕ

(2) 顶角（锋角） 2ϕ 顶角是两主切削刃在中剖面投影中的夹角，如图 2-12 所示。图中 P_t 指端面力； P_c 指中剖面力。顶角对钻尖强度和轴向力有较大影响：减小顶角，能够增大切削刃的长度，使单位切削刃上的负荷减小，轴向力降低，同时钻头轴向稳定性提高，刀尖强度和散热条件改善；但是，顶角太小，将使钻尖强度降低，切屑卷曲严重，扭矩增加，不利于排屑。所以，顶角的大小应根据所加工材料物理性能来选择，为保证钻尖强度，在钻硬材料时比钻软材料时选的大一些。标准麻花钻的顶角 $2\phi=116^\circ\sim 118^\circ$ 。

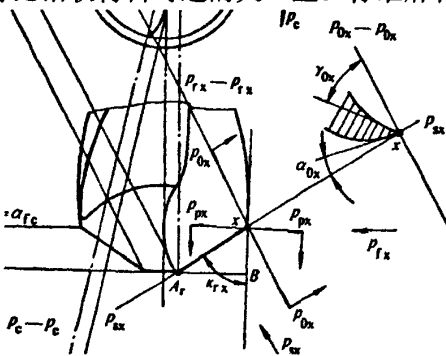


图 2-13 前角 γ_o

Fig 2-13 Rake angle γ_o

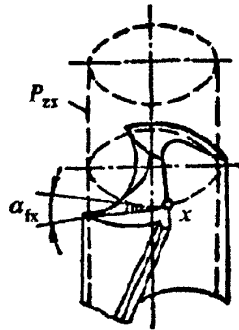


图 2-14 后角 α_f

Fig 2-14 Posterior horn α_f

(3) 前角 γ_o 钻头的前角是在正交平面内测量的前刀面与基面间的夹角，如图 2-13 所示。由于钻头的前刀面是螺旋面，且各点处的基面和正交平面位置亦不相同，故主切削刃上各处的前角也是不相同的，外缘处大约为 30° ，从外缘向中心逐渐减小，靠近钻心处为 -30° 左右，所以靠近中心处的切削条件很差。横刃上的前角在 -55° 左右。

(4) 后角 α_f 钻头的后角是过主切削刃上某选定点 x 在柱剖面内测量的后刀面与端面之间的夹角，如图 2-14 所示，图中 P_z 指柱剖面力。主切削刃上各点的后角大小不同，在钻头外缘处后角最小，大约为 $8^\circ\sim 14^\circ$ ，在靠近中心处最大，约为 $20^\circ\sim 27^\circ$ 。后角里大外小，而前角又里小外大，两者正好相对应，使切削刃上各点的强度没有明显差异。后角主要影响主切削刃的强度以及工件与后刀面的摩擦，后角越小，切削刃的强度相对较高，但钻孔时后刀面与工件已加工表面之间的摩擦越大，如果后角过小，会造成很大的轴向力，使钻头严重发热，无法正常钻进；后角越大，麻花钻后刀面与工件的摩擦越小，但钻心刃口

强度下降,若后角过大,钻孔时,孔口呈现三边或五边形,出现严重的振动现象。所以为保证刀刃强度,在对硬度较高的材料钻削时,后角可以小一些,钻软材料时,适当增大后角,但在对有色软金属材料钻孔时,可能会产生自动扎刀现象,所以后角不宜太大^[44]。标准麻花钻的后角指切削刃最外缘的后角,小直径钻头取大值,大直径钻头取小值。

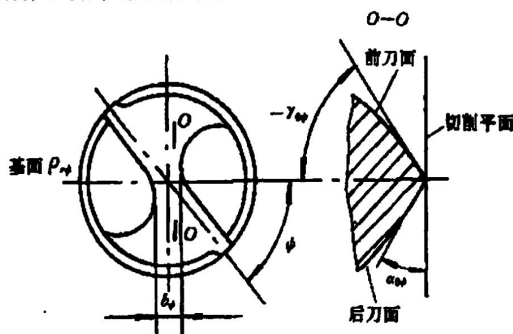


图 2-15 横刃斜角的几何角度

Fig 2-15 Geometric angle of chisel edge angle

(5).横刃斜角 ψ 横刃斜角在钻头端平面内投影的横刃与主切削刃之间的夹角,如图 2-15 所示,它是刃磨后刀面时形成的。标准高速钢麻花钻的横刃斜角 ψ 为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。当后角磨得偏大时,横刃斜角减小,横刃长度 b_ψ 增加。因此,在刃磨麻花钻时,可以观察横刃斜角的大小来判断后角磨得是否合适。

钻削过程的变形规律与车削相似。但钻孔是在半封闭的空间内进行的,横刃的切削角度又不是很合理,所以使得钻削变形比较复杂,主要表现在:主切削刃上每一处的前角和刃倾角不同,造成切屑变形、流向和卷曲也不一样。同时排屑过程还受到螺旋槽的影响,在对塑性材料进行钻削时,切屑常常卷成圆锥螺旋形,导致断屑困难;钻头刃带没有后角,与已加工表面摩擦。切削塑性材料时产生的积屑瘤容易粘在刃带上,对钻孔质量造成一定的影响^[42]。

2.2.2 麻花钻的钻削原理

钻削是使用钻头在实体材料上加工孔的最常用方法,其加工精度可以达到 IT11-IT12,表面粗糙度 R_a 可达 $12.5\mu\text{m} \sim 6.3\mu\text{m}$,可作为扩孔、攻螺纹、镗孔和铰孔的预备加工。

a. 钻削运动

钻削时的切削运动和车削一样,如图 2-16 所示,由主运动和进给运动组成。在车床上加工时,工件的旋转运动为主运动;在钻床上加工时,主运动为钻头的旋转运动,进给运动为钻头的轴向运动。



图 2-16 钻削运动

Fig 2-16 Drilling movement

b. 钻削用量和切削层参数

钻削用量和切削层参数的相关概念表示如图 2-17 所示。

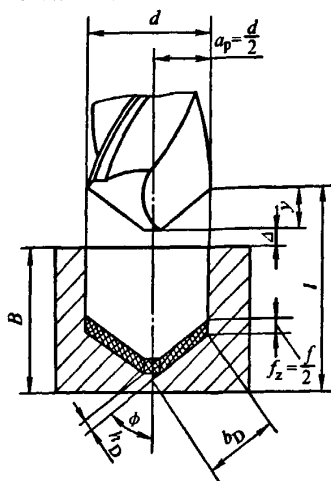


图 2-17 钻削用量和切削层参数

Fig 2-17 The parameters of drilling and cutting layer

(1) 切削速度 v_c 。钻削时通常以钻头外缘转点处的速度作为钻削速度，其计算公式如下：

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ m/min} \quad (2.4)$$

式中 d ——钻头外缘处直径 (mm)；

n ——钻头转速 (r/min)。

(2) 进给运动 加工时钻头的轴向移动称为进给运动。通常用进给量 f 、进给速度 v_f 或每齿进给量 f_z 来表示。其计算公式如下：

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot Z \cdot n \quad (2.5)$$

式中 Z ——齿数，对普通麻花钻来说， $Z=2$ ；

n ——钻头转速；

f ——每转进给量 (mm/r)：钻头或工件每转一转，它们之间的轴向相对位移；

f_z ——(mm/z)：钻头或工件相对钻头每转一个刀齿，它们之间的相对位移；

v_f ——进给速度 (m/min)：钻头或工件每分钟内，它们之间的轴向相对位移。

(3) 背吃刀量 (钻削深度) a_p 背吃刀量是在基面上垂直于进给运动方向度量的尺寸，它是钻头的半径，即 $a_p = d/2$ 当孔径较大时，可采用钻-扩加工，这时钻头直径取孔径的 70% 左右。

(4) 切削厚度 h_D 切削厚度是指垂直于主切削刃在基面投影方向上测量的切削层尺寸，以 h_D (mm) 表示：

$$h_D \approx f \sin \phi / 2 \quad (2.6)$$

(5) 切削宽度 b_D 切削宽度指在基面内沿主切削刃测量的切削层尺寸，以 b_D (mm) 表示：

$$b_D \approx d/2 \sin \phi \quad (2.7)$$

(6) 切削面积 A_D 切削面积指每个刀齿切下的切削层面积, 以 A_D (mm^2) 表示, 其关系式为:

$$A_D = h_D b_D = f_z a_p = fd/4 \quad (2.8)$$

2.3 本章小结

本章详细阐述了切削力的来源和影响切削力的主要因素, 在此基础上分析了标准麻花钻的结构要素和钻削原理及钻削加工的特点, 讨论了麻花钻几何参数对钻削加工的影响, 为进一步研究钻削加工数值模拟, 预测和分析标准麻花钻钻削力的分布及其他试验分析奠定基础。

3 基于 DEFORM-3D 的钻削加工仿真研究

通过有限单元法模拟切削加工,可以对切屑形成过程和切削过程中热传导进行分析,并预测切削过程中切削力、切削温度、应力和应变等很多变量。目前,研究金属切削的有限元分析软件,如 Ansys、MARC、Abaqus 和 DEFORM 等都具有较好的前处理、求解和后处理功能,已经可以对部分刀具和工件材料的切削过程进行数值模拟。但金属切削过程是一个相当复杂并且非线性大变形过程,要求具有准确可靠的流动应力模型,因此对有限元分析软件的选择提出了一定的要求,而 DEFORM-3D 具有丰富的材料库和成熟的数学分析模型,并且在三维流动模型分析和耦合方面具有强大的功能,所以本文采用 DEFORM-3D 有限元分析软件对钻削加工过程进行仿真分析。

3.1 DEFORM 软件简介

DEFORM-3D 是 Scientific Forming Technologies Corporation(SFTC)公司的产品,主要针对复杂金属的成形过程进行模拟分析,并提供极有价值的工艺分析数据。DEFORM-3D 图形界面强大且灵活,对用户来说输入数据与观察结果数据都很方便。同时,DEFORM-3D 具有 3D 几何操纵修正功能,对 3D 模拟过程具有非常重要的意义。它延续了 DEFORM 系统多年来一直保证模拟的可靠性传统,近年来其计算精度在国际成形仿真领域被公认为第一^[45]。

在用 DEFORM 软件进行计算时,可以采用多种迭代方法。此外,该软件为用户提供了很多材料的数据信息,几乎包括所有常用材料的塑性变形和弹性变形数据、热交换和热能数据以及材料硬化和破坏数据等。

成形过程的仿真系统建立,就是将成型工艺学、计算机图形处理技术和有限元分析理论等相关知识进行有机结合的过程,其有限元分析流程如图 3-1 所示,从中看出,DEFOEM-3D 软件主要是由前处理、FEM 求解器(模拟处理)和后处理三大模块构成^[45]。

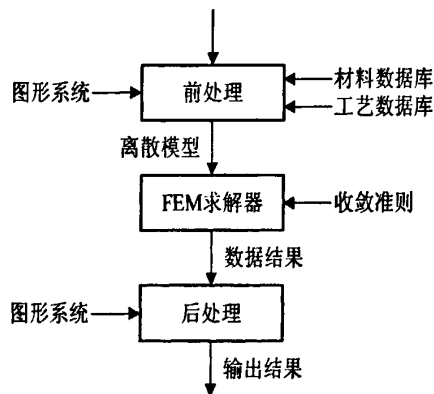


图 3-1 有限元分析的实施步骤

Fig 3-1 The implementation steps of finite element analysis

本文在充分考虑实际切削过程中不同工艺参数的情况下,采用 DEFORM 工艺仿真系统,对钻削加工过程进行了动态模拟,并对轴向力和扭矩做仿真分析,仿真基本流程如图 3-2 所示。

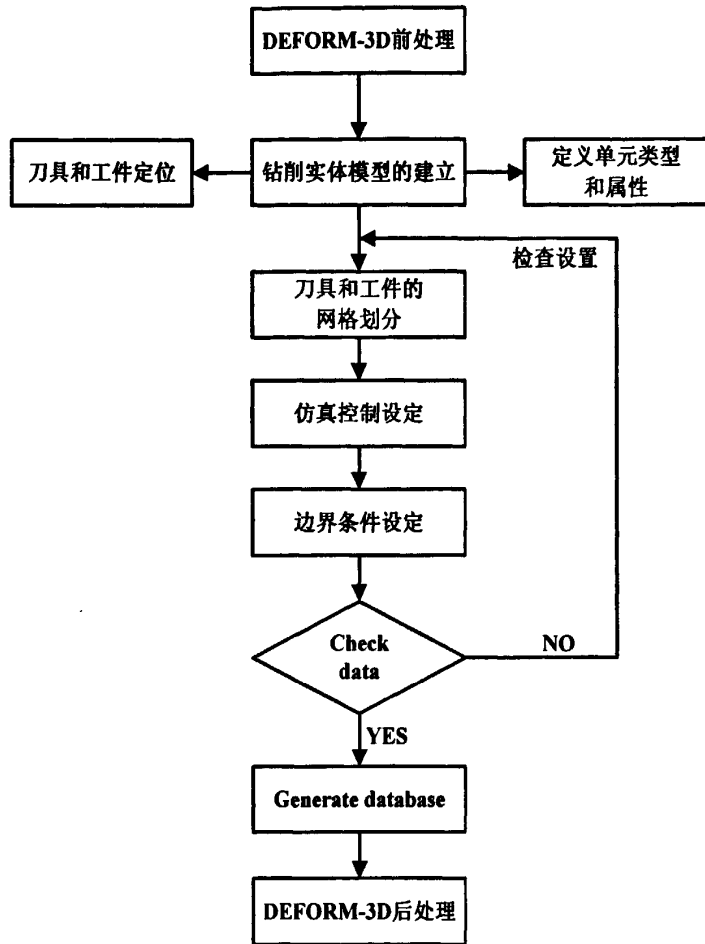


图 3-2 钻削仿真基本流程图

Fig 3-2 The basic process of drilling simulation

3.2 DEFORM-3D 钻削仿真模型建立

有限元模型的建立过程实际上就是将被研究对象的特性(如几何外形、材料属性等)、研究对象内部及与周围环境的相互作用进行一个有机结合的过程。

a. 麻花钻和工件模型

几何建模就是要生成刀具和工件的几何模型,为有限元网格划分和定义属性提供载体。本文使用 DEFORM 提供的工具模块建立麻花钻和工件的实体模型,麻花钻的几何尺寸如图 3-3 所示。工件选用直径 $\Phi 12 \times 6\text{mm}$ 的圆柱体。图 3-4 为麻花钻钻削的三维有限元模型。

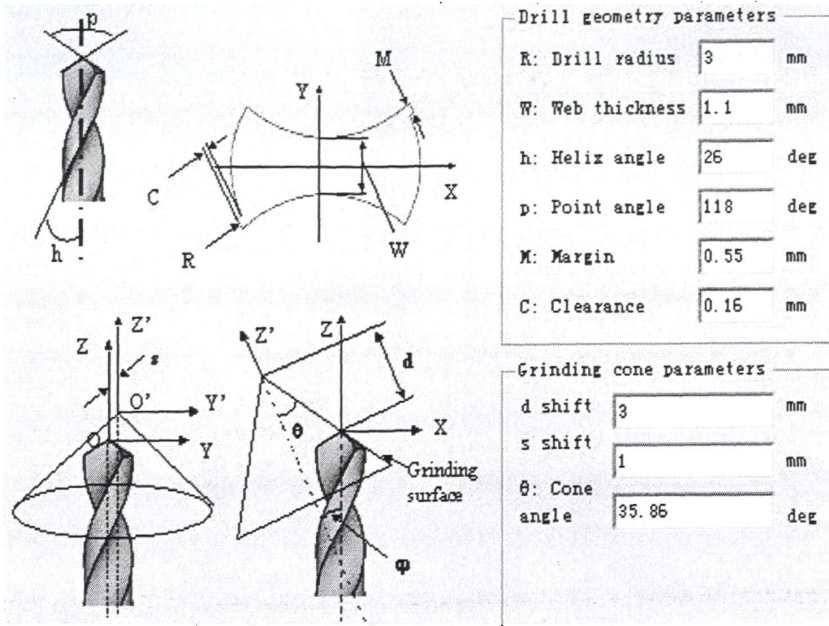


图 3-3 麻花钻的几何尺寸

Fig 3-3 The geometric dimensions of the twist drills



图 3-4 三维有限元模型

Fig 3-4 Three-dimensional finite element model

DEFORM 采用修订的拉格朗日定理为理论基础，在刚塑性有限元法的范畴内，它的材料模型有弹性、塑性、刚性和多孔材料模型^[45]。相同条件下（如工件的尺寸和所用单元数等相同），弹塑性和刚塑性有限元的应力、应变等计算结果几乎相同，但刚塑性有限元计算时间却是弹塑性有限元模拟计算时间的 1/5~1/3，为了节省计算时间，仿真过程中设置工件为塑性材料模型，而刀具采用考虑温度变化的刚性材料模型^[37]。

b. 钻削条件的设置

本次仿真选用 $\Phi 6\text{mm}$ 的麻花钻，钻孔过程设置了 3 组不同的参数（如表 3-1 所示）来比较钻削用量对钻削力和钻削温度的影响。

表 3-1 钻削用量设置

Tab 3-1 The settings of drilling parameters

方案 编号	进给量 f (mm/r)	主轴转速 n (r/min)	对应的切削速度 v_c (m/min)
1	0.3	2000	37.68
2	0.3	1500	28.26
3	0.15	1500	28.26

c. 网格划分

应用有限元进行切削加工仿真的过程中,工件和刀具的网格划分是一项非常关键的技术。在有限元模拟过程中,为保证计算精度,必须对网格进行即时重划分,以防止出现不合格的单元形状^[35]。因此,DEFORM 软件就采用这种 AMG(自适应网格划分)技术来对网格进行划分,当变形量超过所设定的数值时,软件程序会自动对网格进行重新划分,在网格重新划分过程中,会造成工件体积的部分损失,如果损失愈大,那么计算误差就越大,而 DEFORM 相对于其他同类软件,体积损失较小^[45]。本文采用四节点组成的四面体单元网格形式,工件和钻头均采用相对网格划分类型,钻头网格数为 25000, size radio 设为 4。因为有时候切屑模型只能在一定精度网格单元下实现,所以工件的网格划分要比刀具网格更为细密^[46]。设定工件网格数为 35000, size radio 设为 7。同时设置不同的权重因子,对麻花钻的切削部分和工件材料中欲切除部分附近的网格进行了细化,并生成实体网格,如图 3-5 和 3-6 所示。



图 3-5 刀具的网格细化

Fig 3-5 The mesh refinement of tool

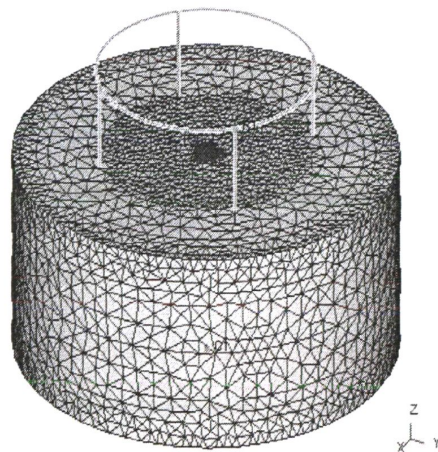


图 3-6 工件的网格细化

Fig 3-6 The mesh refinement of workpiece

d. 材料模型

DEFORM-3D 自带丰富的材料库,同时还能够根据需要自定义材料。对于材料库中每一种材料,提供了不同应变率和温度下材料流动应力应变曲线,以及弹性模量、热膨胀系数、泊松比和热导率等随温度的变化曲线。由于材料的性能试验复杂,并且耗费大,所以目前切削状态下材料本构模型的研究大多是基于现有材料本构模型展开的,应用较多的材

料本构模型有 ERC 模型、Maekawa 模型、Oxley 模型和 El-Magd 模型等^[47]。如果想要获得材料的信息,就需要做大量的实验,DEFORM-3D 中的材料模型都是在多项试验和模拟之后才被确认应用,为了保证模拟的可靠性,本文使用 DEFORM 材料库中自带的材料。由于把刀具设置为刚体,所以刀具材料对钻削力的影响不大。本文选用 WC 基硬质合金,工件选用 AISI-1045,材料本构模型为 Oxley 模型。

e. 仿真控制

在 DEFORM 软件中,切屑的变形过程被分为很多个时间步,最初设定的仿真总步数给程序指定了一个计算长度,如果这个值过大,系统会根据仿真的需要自动缩减时间步长^[48]。本次研究中,选择国际单位制,根据进给量和步长设置仿真总步数为 10000 步。存储增量设为 25,即每 25 步保存一次模拟数据。存储增量设置的太小,会造成数据文件过大。钻削深度设为 6mm,钻削深度或者总步数之一达到模拟停止条件,模拟即停止。钻孔的模拟需要耗费很大的计算机能源,如果要完整地模拟整个孔的加工,对计算机的要求相当高,不但技术上有一定的难度,而且需要的时间也很长,鉴于模拟深度对最终结果的影响较小,所以在此只模拟一定深度,即钻削达到稳态即可。

f. 边界条件和其它参数的设置

刀具沿着-Z 方向进给,绕 Z 轴旋转。选择自动定位的方式,设定刀具和工件的所有面与外界热传递,环境温度定义为 20°,设定热传导系数为 45N/sec/mm/C,对流系数 0.02N/sec/mm/C,摩擦类型选择为剪切摩擦,摩擦系数 0.6,如图 3-7 所示。

The image shows two dialog boxes from the DEFORM-3D software. The top dialog box is titled 'Environment' and contains the following settings: Temperature is set to 20 C; Convection coefficient is set to 0.02 N/sec/mm/C. Below these are two buttons: 'Load from library' and 'Save to library'. The bottom dialog box is titled 'Tool-Workpiece Interface' and contains: Shear friction factor is set to 0.6; Heat transfer coefficient is set to 45 N/sec/mm/C.

图 3-7 其他参数设置

Fig 3-7 The settings of other parameters

对于金属切削而言,刀具磨损模型选择 usui 模型:

$$w = \int apVe^{-b/T} dt \quad (3.1)$$

式中 w ——磨损的体积; p ——正压力;

V ——工件材料相对于切削刀具的滑动速度;

a 、 b ——试验系数,根据经验值分别取 0.0000001 和 855^[49]。

h. 仿真后处理

有限元建模完成后,点击 Database Generation,进行 Check data,检查无误后,Generate

database 生成数据, 前处理到此结束, 开始进行模拟。仿真运行结束后, 生成所需的 DB 文件, 在后处理模块中可以查看模拟过程中的切屑的成形过程, 同时可以得到轴向力、扭矩和应力等数据的变化曲线。

3.3 仿真结果分析

利用有限元技术对金属切削进行模拟, 可以对切削过程中的主要物理要素进行预报分析, 为进一步深化金属切削理论和开发新型刀具材料提供切实可行途径, 对低耗、高效地研究金属切削具有非常重要的意义。

3.3.1 切屑成形过程

金属切削的过程实际上就是刀具从工件上切下切屑的一个过程, 即切屑的形成过程, 其本质是一种挤压变形的过程。在有限元模拟过程中, 连续的切屑成形主要是通过系统的网格重新划分功能来实现的。在 DEFORM 软件内部设置了一定的断裂准则, 通过删除受到较大压力和大变形而达到断裂准则的单元来模拟切屑的断裂过程^[50, 51]。图 3-8 显示的是在钻削参数为 $d=6\text{mm}$, $n=2000\text{rpm}$, $f=0.3\text{mm/r}$ 的情况下切屑的形成过程, 可以看出, 运行至 10000 步时, 一部分切屑已经断裂。

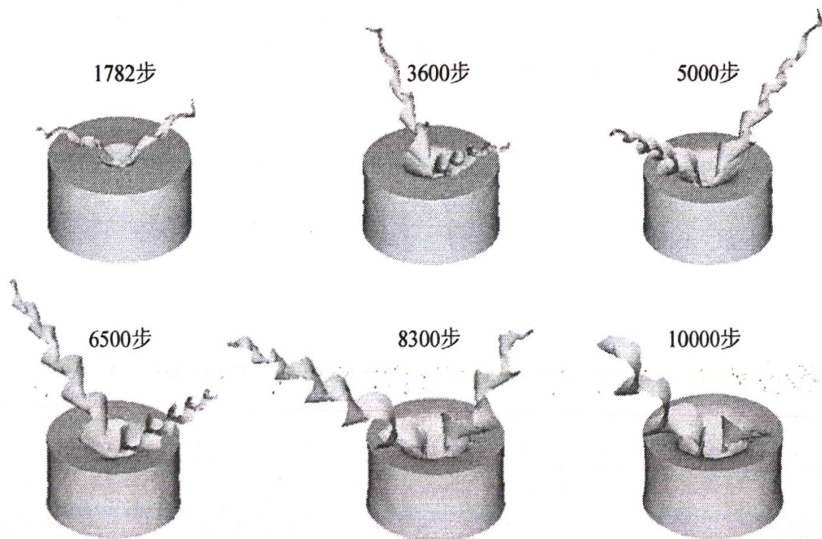


图 3-8 一号方案的切屑形成过程

Fig 3-8 The chip formation process of No.1 program

3.3.2 轴向力和扭矩的分析

对钻削加工过程进行有限元仿真, 有助于预报不同加工条件下的钻削力, 研究切削用量对钻削力的影响规律, 以及切削温度的分布情况。钻削仿真过程其实是一种高度非线性数值计算的过程, 对网格的划分要求相当高, 只有足够细小的网格才可以充分描述钻削过程中工件、刀具及切屑三者之间力和热的相互作用, 从而满足非线性的计算要求^[40]。在模拟过程中, 随着切削的进行, 钻削力、钻削温度和切削区的应力状态等都会发生相应变

化^[37]。通过对切屑形成过程的模拟，可以得到钻削加工过程中轴向力、扭矩和应力等的变化曲线。

图 3-9 所示为 2 号方案运行过程中轴向力随钻削行程的变化曲线。

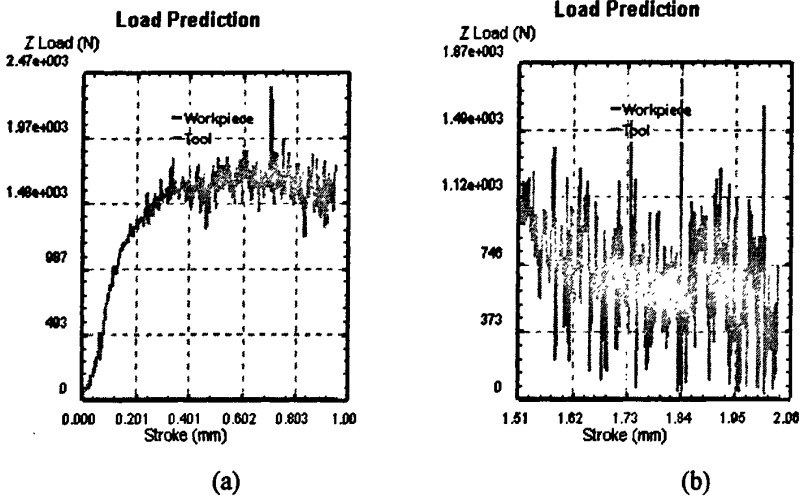


图 3-9 轴向力随钻削行程的变化

Fig 3-9 The axial force change with drilling depth

从图 3-9a 可以看出：随着刀具逐渐切入工件，轴向力逐渐上升，总体较为稳定。图 3-9b 可以看出，随着钻削深度的增加，轴向力出现很大波动。因为钻削过程中应变率变化很大，随着钻头深入工件，应变率不断变化，应力应变曲线出现由低应变率曲线向高应变率曲线跳跃的现象，导致钻削力曲线波动很大^[18]。同时，模拟过程不断的自适应网格划分，也是曲线波动剧烈的一个原因。由于轴向力一半以上是由横刃产生的，所以本文选取横刃切入工件后稳定阶段轴向力的平均值作为轴向力仿真的最终结果。

图 3-10 分别为 1、2、3 号方案的轴向力达到稳定状态时的变化曲线。

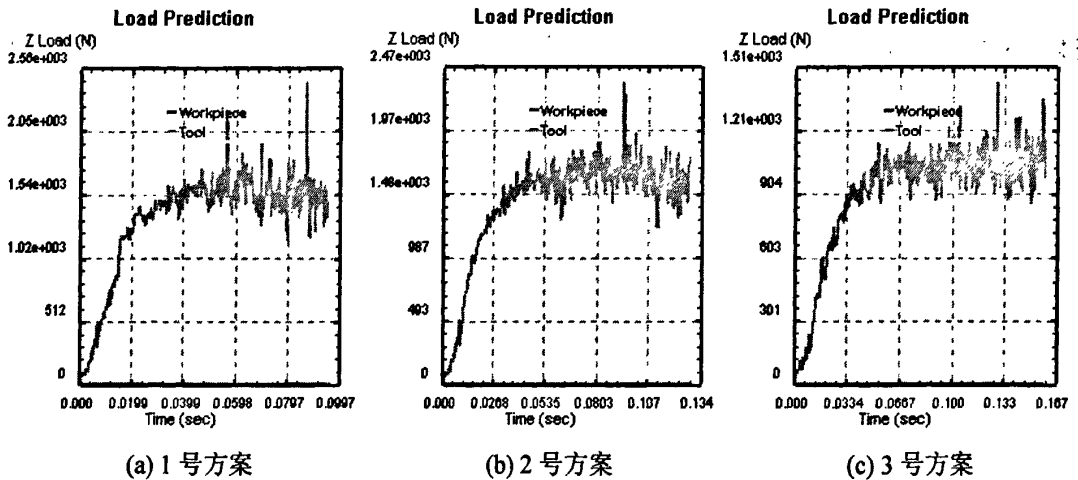


图 3-10 三种方案轴向力的变化

Fig 3-10 Axial force change of the three options

从图 3-10a 和 3-10b 中可以看出切削达到稳态后，两者轴向力相差不大。进一步从仿真过程中所生成的 htm 文件查看稳态时两种方案轴向力的变化情况，得出 1 号方案轴

向力均值为 1548N，略小于 2 号方案的 1633N。可见，切削速度对切削力的影响较小，并且随着切削速度的增大，轴向力有减小的趋势。从图 3-10b 和 3-10c 中可以看出切削达到稳态后，2 号和 3 号方案轴向力相差较大。3 号方案轴向力达到稳态后，均值为 1054N。可见，进给量对轴向力的影响程度较大，远大于切削速度对轴向力的影响程度，并且随着进给量的增加，钻削力明显增加。

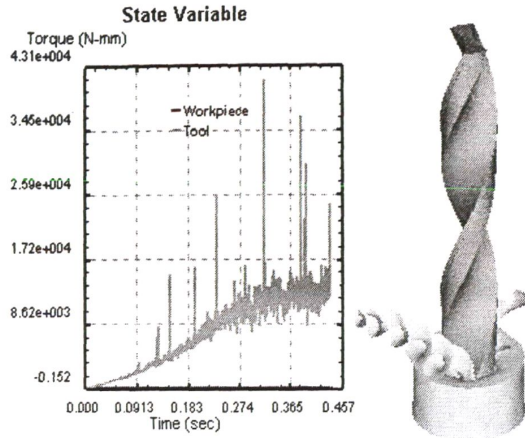


图 3-11 2 号方案扭矩的变化曲线

Fig 3-11 The torque curve of No.2 program

图 3-11 为 2 号方案扭矩的变化曲线。可以看出，扭矩值一直处在增大状态，这主要是因为钻削深度的增加，导致切削条件恶化，同时，模拟过程中设置了摩擦条件，受其影响，扭矩一直处在上升状态。在扭矩的上升过程中也出现了较大波动，除了网格的重划分这一原因外，还与计算精度和网格划分的密度等有关^[37]。本文选取主切削刃参与切削后一小段时间内扭矩的平均值，作为扭矩仿真的最后结果。

图 3-12 所示分别为 3 种方案的扭矩运行至稳定状态时的曲线。

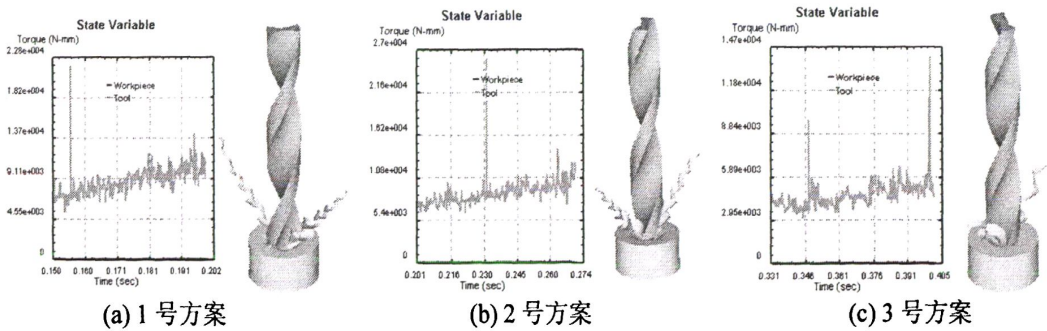


图 3-12 三种方案的扭矩曲线

Fig 3-12 The torque curve of the three options

图 3-12a 和图 3-12b 中可以看出，扭矩的差异较小，可见，切削速度对扭矩的影响程度较小，这点与轴向力相似。2 号和 3 号方案扭矩相差较大，这说明进给量对刀具所受扭矩影响很大，其影响程度远大于切削速度对扭矩的影响程度，其他条件相同时进给量越大，则刀具所受扭矩越大。

3.3.3 钻削温度的分析

切削热和由它所产生的切削温度是金属切削过程中重要的物理现象之一。切削时消耗的能量约 97%—99% 转换为热能；大量的切削热使得切削区温度升高，直接影响到刀具的寿命和工件的加工精度及表面质量；因此，研究钻削温度对生产实践有着重要意义^[15]。

图 3-13 为三种方案在相同钻削深度时的工件钻削温度云图。切削产生的热量主要来自两大部分，一份是由金属的塑性变形所产生的，另一部分是由于切屑与前刀面的摩擦作用所产生。金属切削时，因剧烈的挤压和摩擦作用引起切屑底层金属的剧烈变形，导致刀屑界面温度的升高。从图 3-13 中三幅图中都可以看到，切屑的温度高于工件的温度，这说明在干式切削过程中，大部分的热量都被切屑带走；工件的最高温度主要分布在孔的根部较大区域内，这主要是由于强烈的挤压引起金属剧烈的塑性变形，加上切屑与前刀面的摩擦产生大量的热量。

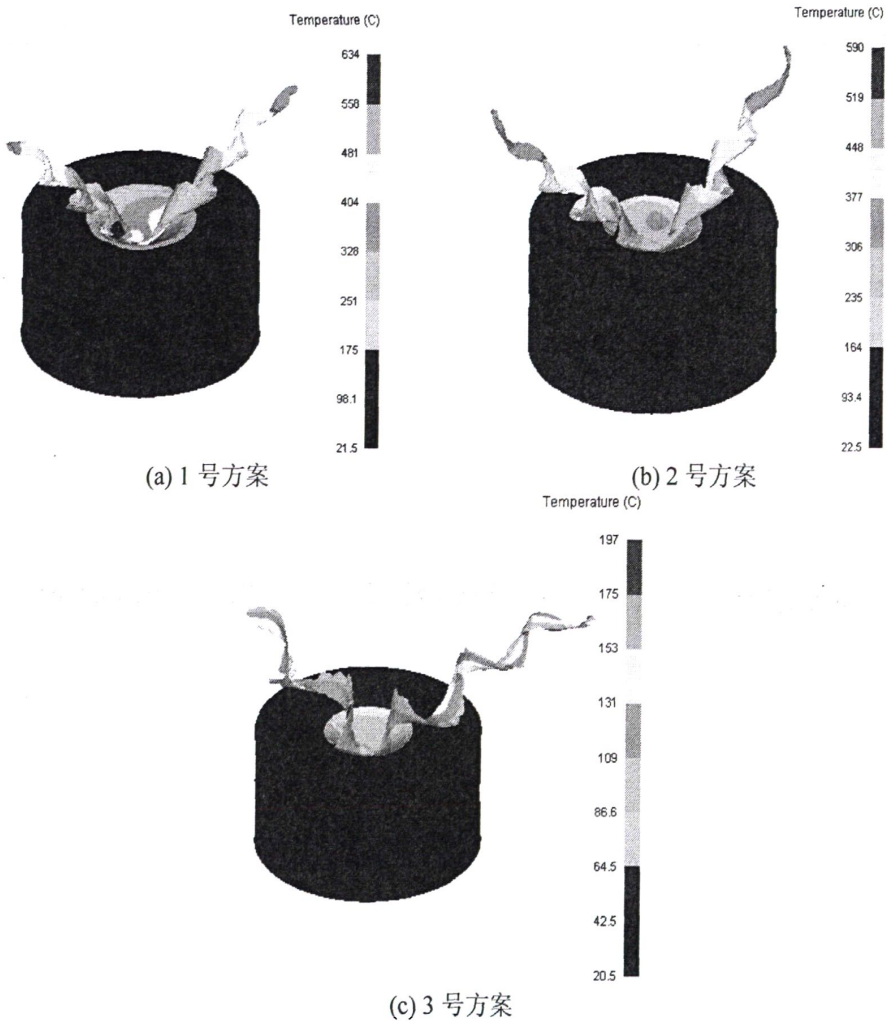


图 3-13 三种方案在相同钻削深度时的工件钻削温度云图

Fig 3-13 The temperature cloud map of workpiece in the same drilling depth

比较 3-13a、3-13b 图和 3-13b、3-13c 图可以看出，切削速度和进给量的增大，都会导致切削温度的升高，并且切削速度对切削温度的影响程度更大一些，这与对切削力的影

响程度相反。因此在控制切削温度的前提下提高加工效率，应在机床允许的的条件下，选用较大的进给量，这比选用大的切削速度更有利。

从切削热的产生与扩散，来分析切削速度和进给量对切削温度的影响。在进给量相同的条件下，切削速度的大小，决定着在单位时间内切除的材料多少。单位时间内切除的材料越多，摩擦和切屑变形所消耗的功越大，产生的切削热就会增多，使切削温度升高。切削速度增大的同时，切屑流动速度加快，切削层变形产生的热还没来得及传给工件与刀具，一部分的切削热就被切屑带走，又降低了切削温度。但消耗功所产生的热大于被切屑带走的热量，所以总体上切削温度是升高的。在切削速度相同的条件下，进给量的增大，单位时间内的金属切除量增加，使得切削热增多，切削温度升高。进给量的增大的同时，变形系数减小，单位切除量所消耗的功率降低。

3.4 本章小结

对 DEFORM-3D 有限元软件做了简单介绍，对涉及建模过程的材料模型、网格划分、边界条件等关键技术进行了设置，在此基础上建立了 45 钢钻削过程的有限元模型，仿真主要成果如下：

(1) 获得了不同切削用量下麻花钻钻削加工中切屑的成形过程。

(2) 对钻削过程中轴向力和扭矩的仿真分析表明：钻削 45 钢时，切削用量对轴向力和扭矩的影响趋势是一致的。切削速度对钻削力的影响程度较小，并且随着切削速度的增大，轴向力有减小的趋势；进给量对钻削力的影响程度明显，随着进给量的增大，轴向力和扭矩增大。

(3) 对钻削温度的分布做了仿真分析，表明切削速度和进给量的增加都会导致钻削温度升高，且切削速度对其的影响程度更大。

4 试验条件及试验方法

金属切削中, 钻削力的测量是一种重要的试验技术。钻削力大小不仅对研究钻削机理具有重要的作用, 也为钻床设计和切削方案的制定提供了依据, 同时也可以作为钻头磨损的监测信号。

4.1 试验设备和仪器及测试原理

试验设备为 Z5125 立式钻床, 主轴经无级调速改造, 最高转速 2000r/min。钻削力(轴向力与扭矩)信号的测量和采集用 Kistler-9271A 型压电式钻削力测力仪, 以及与之相配套的 Kistler-5006 型电荷放大器和自行开发的信号采集仪, 并与计算机联接输出切削力波形, 试验现场装置如图 4-1 所示。

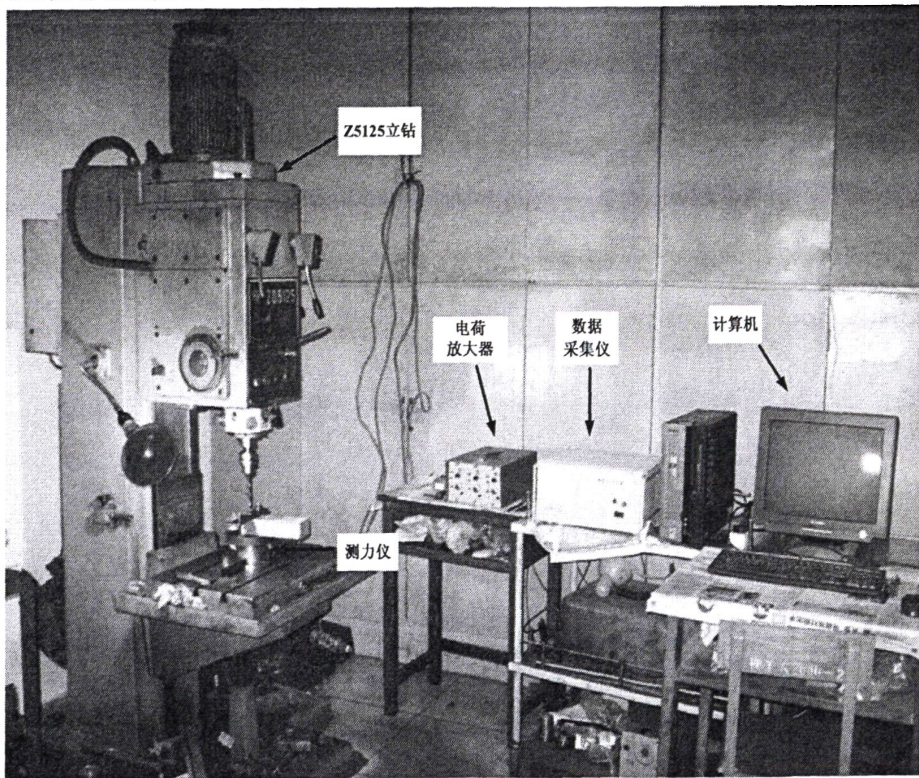


图 4-1 试验现场装置

Fig 4-1 Test devices of test site

测力仪是整个钻削力测试系统中的关键部分, 其基本测试过程为: 刀具给予工件的作用, 将产生的钻削力信号作为信号源, 作用在测力仪内的压电石英传感器上, 然后通过传感器把力信号转换为输出的电信号, 再经过电荷放大器放大后, 形成可以测量的电压信号, 输入到数据采集卡中, 然后采集卡把模拟信号转换为数字信号输入到计算机, 最后通过数据采集软件把数据存储到计算机中。对所采集到的数据进行整理, 即可得到轴向力和扭矩的测量值。图 4-2 为钻削力测试原理图, 图 4-3 为钻削力数据采集软件界面。由于高速钢

刀具的切削性能具有分散性，所以相同条件下的试验做三次，取其平均值。

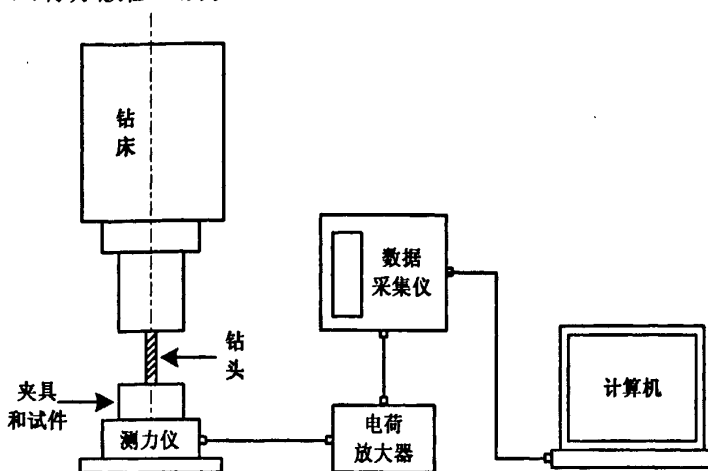


图 4-2 钻削力测试原理

Fig 4-2 The testing principle of drilling force

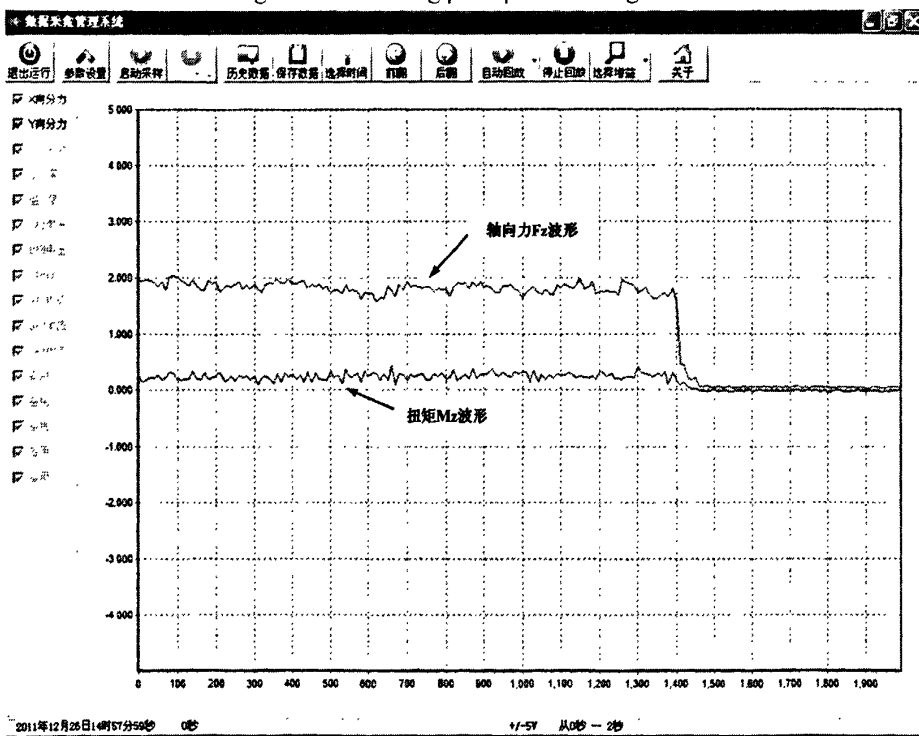


图 4-3 钻削力数据采集界面

Fig 4-3 The data acquisition interface of drilling force

孔加工刀具中，虽然硬质合金刀具的硬度和耐磨性较好，但其抗弯强度低、冲击韧性差、易崩刃且成本较高、刃磨困难，从而限制了它的使用，所以仍以高速钢刀具为主。在我国，高速钢刀具的用量约占孔加工刀具的 60%以上^[52]。本次试验所用刀具主要为标准高速钢麻花钻，材料为 W6Mo5Cr4V2，钻头直径分别为 $\Phi 6\text{mm}$ 、 $\Phi 8\text{mm}$ 和 $\Phi 10\text{mm}$ 。其中 $\Phi 10\text{mm}$ 钻头，部分进行了 CrAlTiN 涂层处理^[53]。表 4-1 和表 4-2 分别为高速钢刀具的化学成分与机械性能和 CrAlTiN 涂层的特性。

表 4-1 高速钢刀具的化学成分与物理机械性能

Tab 4-1 Main chemical composition and mechanical properties of HSS used in test

化学成分/%							机械性能		
C	W	Mo	Cr	V	Si	Mn	硬度 HRC	a_k MJ/m ²	600℃时 HRC
0.80~ 0.90	5.50~ 6.75	4.50~ 5.50	3.80~ 4.40	1.75~ 2.20	≤0.40	≤0.40	60~63	0.30~ 0.40	47~ 48

表 4-2 CrAlTiN 涂层特性

Tab 4-2 The coating characteristics of CrAlTiN

涂层 材料	厚度 /μm	平均硬度 /HV	临界载荷 /N	平均磨损率 /m ³ N ⁻¹ m ⁻¹	平均摩 擦系数	耐热温度 /℃
CrAlTiN	3.59	2838	60	2.56×10 ⁻¹⁶	0.60	~900

4.2 试验材料

工件材料的化学成分及物理机械性能的不同,使刀具表现出的切削性能有很大差异。通常情况下,工件材料的强度、硬度以及塑性等指标数值越高,它的导热性能愈差,加工过程中的切削温度越高,造成刀具磨损越严重,使用寿命越低,在评价钢类材料的切削加工性时,一般以 45 钢为基准^[54]。此次试验为了能够全面系统地研究钻削力,选取常用材料 45 钢、铝硅合金 ZL207、铸铁 HT200、LY12 硬铝和难加工材料奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti、高强度钢 30CrMnSiA 以及钛合金 Ti-6Al-4V (TC4),材料的化学成分与物理机械性能分别如表 4-3、4-4 和 4-5 所示。

表 4-3 LY12 和 ZL207 的化学成分与物理机械性能

Tab 4-3 Main chemical composition and mechanical properties of LY12 and ZL207 used in test

材料	化学成分/%							物理机械性能			
	Cu	Si	Mn	Mg	Fe	Cr	Zn	硬度	σ_b / MPa	λ / W(mK) ⁻¹	δ_5 / %
LY12	3.8~ 4.9	≤0.5	0.3~ 0.9	1.2~ 1.8	≤0.5	≤0.1	≤0.25	120 HB	205		10
ZL207	3.0~ 4.0	5.50~ 6.50		0.10	1.0			66~67 HB		230	

表 4-4 材料的化学成分与物理机械性能

Tab 4-4 Main chemical composition and mechanical properties of materials used in test

材料	化学成分/%							物理机械性能			
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	硬度	$\sigma_b /$ MPa	$\lambda /$ $W(mK)^{-1}$	$\delta_5 /$ %
45 钢	0.42~	0.17~	0.50~	≤ 0.25	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.25	207	610	45	≥ 16
	0.50	0.37	0.80					HB			
HT200	2.5~	1.0~	0.25~		0.05~	0.02~		185	220		
	4.0	3.0	1.0		0.50	0.20		HB			
1Cr18Ni9Ti	≤ 0.12	≤ 0.8	≤ 2.00	17.0~	≤ 0.03	≤ 0.03	8.00~	156	580		60
				19.00			5	11.00			
30CrMnSiA	0.27~	0.90~	0.80~	0.80~	≤ 0.03	≤ 0.03		37~41	1100		≥ 10
	0.34	1.20	1.10	1.10				5			

表 4-5 钛合金 Ti-6Al-4V 的化学成分与物理机械性能

Tab 4-5 Main chemical composition and mechanical properties of Ti-6Al-4V used in test

Ti	化学成分/%						机械性能			
	Al	V	Fe	C	N	O	硬度 HB	$\sigma_b /$ MPa	$a_k /$ MJ/m^2	$\delta_5 /$ %
余量	5.5~ 6.75	3.5~ 4.5	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.20	350	903	0.39	10

铝硅合金由于其比重小、强度高、耐腐蚀、耐磨损、导热性好、便于回收再利用等优点，在航空、航天、造船和汽车等工业领域的应用越来越广泛。

铸铁具有许多优良的性能（铸造性能、减振性、耐磨性和切削加工性）及生产简便、成本低廉等优点，因而是应用最广泛的材料之一。HT200 是灰铸铁中的一种，主要用于汽缸、齿轮、机体、飞轮、齿条、衬筒，及一般机床床身和中等压力（8MPa 以下）液压筒、凸轮、轴承座等。

LY12 铝板国内通常叫做 2A12 铝板，相当于 LY12 铝板，广泛应用于飞机结构（蒙皮、骨架、肋梁、隔框等）、铆钉、导弹构件、卡车轮毂、螺旋桨元件及其他各种结构件。

1Cr18Ni9Ti 属于奥氏体不锈钢，在较高温度（ $>450^\circ\text{C}$ ）下仍具有较高强度，因此被广泛应用于航空航天、化工、石油、建筑和食品等工业部门及日常生活中。该钢种具有优良的力学性能，在大气或腐蚀性介质中具有良好的耐蚀能力，并具有较突出的冷变形能力和无磁性等特性。一般来说，不锈钢被认为是切削加工性能较差的金属材料，1Cr18Ni9Ti 不锈钢尤为突出，与 45 钢相比，其相对可切削性仅为 0.3~0.5，属于典型的难加工材料。

30CrMnSiA 钢是一种典型的 Cr-Mn-Si 系中碳调质钢，强度高，焊接性能较差，调质后有很高的强度和足够的韧性，淬透性也好。目前，飞机上的钢制零件如发动机架，

机身加强隔框、接头、支座、起落架以及一些重要的螺栓等大都用它制造。据统计，其用量约占飞机上的钢制零件的 80%。在航空发动机上，30CrMnSiA 钢也被大量应用，如压气机叶片、压气机盘等。

钛合金 Ti-6Al-4V (TC4) 是具有较大比强度的金属结构材料，它比重小（约为钢的一半），强度高（与合金结构钢相近），并且有高温强度高、耐腐蚀和耐低温等特性。目前，已广泛应用于航空、宇航、造船、化工等工业中。钛合金是一种难加工材料，钻孔中硬化现象较严重，刀具磨损较快，尤其是 $\alpha+\beta$ 相钛合金（如 TC4）的钻削加工性更差一些。

4.3 试验方法

采用直接测量切削力的方法，通过大量钻削试验，研究高速钢标准麻花钻钻削不同材料时的钻削力情况。对于每一种材料先做单因素试验，研究各个切削要素对钻削力（轴向力和扭矩）的影响规律，然后在单因素试验的基础上进行三因素三水平的正交试验。正交试验设计是一种减少实验次数的方法，实验中所取的样本不是随机的，而是通过正交表对实验进行选取和安排，使试验中每一因素所选取的不同水平具有相同的实验次数，同时要求和不同因素的各水平相遇概率相等。正是因为这些特点，用正交表所安排的试验方案具有代表性，可以较全面地反映不同因素不同水平对试验指标影响的大概结果。所以用正交试验设计方法所做的实验次数虽然减少了，但仍然能够得到较为精确的结果^[55]。由正交试验所得数据建立回归方程，通过矩阵的变化对方程回归系数进行简单处理，再进行线性回归分析，建立钻削这些材料时的钻削力经验模型。为了节约实验成本，两套试验方案的部分数据重合。根据常用金属材料切削用量手册，设定钻削试验参数水平如表 4-6 所示，实验中切削速度 v_c 、进给量 f 和钻头直径 d 的设定如表 4-7 所示，钻削力测量的正交试验方案如表 4-8 所示，以上试验均采用标准高速钢 HSS 麻花钻。

表 4-6 L9(3³)钻削试验参数水平设定

Tab 4-6 The parameters level settings of L9(3³) drilling test

序号 试件材料	切削速度 v_c (m/min)			进给量 f (mm/r)			钻头直径 d (mm)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
45 钢	10	20	30	0.056	0.112	0.224	6	8	10
1Cr18Ni9Ti	8	12	16	0.056	0.112	0.16			
30CrMnSiA	6	10	16						
Ti-6Al-4V	8	12	16	0.056	0.112	0.224			
ZL207	15	25	35						
LY12	15	25	35						
HT200	15	25	35						

表 4-7 单因素试验方案

Tab 4-7 Single-factor test program

试件材料	切削速度 v_c (m/min) ($f=0.112\text{mm/r}$, $d=6\text{mm}$)	进给量 f (mm/r) ($d=6\text{mm}$)	钻头直径 d (mm)	
45 钢	10、15、20、25、30	0.056、0.112、0.16、0.224、 0.315 ($v_c=20\text{m/min}$)	6、8、10	$v_c=20\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$
1Cr18Ni9Ti	8、12、16、20	0.056、0.112、0.16、0.224 ($v_c=12\text{m/min}$)		$v_c=12\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$
30CrMnSiA	6、10、14、16	0.056、0.112、0.16、0.224 ($v_c=10\text{m/min}$)		$v_c=10\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$
Ti-6Al-4V	8、10、12、16	0.056、0.112、0.16、0.224 ($v_c=10\text{m/min}$)		$v_c=10\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$
ZL207	15、20、25、30、35	0.056、0.112、0.16、0.224、 0.315、0.45 ($v_c=30\text{m/min}$)		$v_c=30\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$
LY12	15、20、25、30、35	0.056、0.112、0.16、0.224、 0.315、0.45 ($v_c=30\text{m/min}$)		$v_c=30\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$
HT200	切削速度 v_c (m/min) $f=0.112\text{mm/r}$, $d=10\text{mm}$	进给量 f (mm/r) $d=10\text{mm}$, $v_c=25\text{m/min}$		
	10、15、20、25、30、35	0.056、0.112、0.16、0.224、 0.315		

表 4-8 L9(3³)钻削力测量试验方案

Tab 4-8 The test program of L9(3³) drilling force measurement

序号	切削速度 v_c	进给量 f	钻头直径 d
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

涂层钻头的钻削力试验中,均选用 $\Phi 10\text{mm}$ 的CrAlTiN高速钢麻花钻(简称CrAlTiN涂层钻头),表4-9为单因素试验方案,两因素三水平钻削试验水平设定和试验方案如表4-10和4-11所示。

表4-9 CrAlTiN涂层钻头单因素试验方案

Tab 4-9 The single factor test program of CrAlTiN coated drill

试件材料	切削速度 v_c (m/min) ($f=0.112\text{mm/r}$, $d=10\text{mm}$)	进给量 f (mm/r) ($d=10\text{mm}$)
1Cr18Ni9Ti	8、12、16、20	0.056、0.112、0.16、0.224 ($v_c=12\text{m/min}$)
Ti-6Al-4V		
HT200	10、15、20、25、30、35	0.056、0.112、0.16、0.224、 0.315($v_c=25\text{m/min}$)

表4-10 CrAlTiN涂层钻头两因素三水平钻削试验设定

Tab 4-10 The setting of two factors and three levels of drilling test on CrAlTiN coated drill

试件材料 \ 序号	切削速度 v_c (m/min)			进给量 f (mm/r)		
	1	2	3	1	2	3
1Cr18Ni9Ti	8	12	16	0.056	0.112	0.224
Ti-6Al-4V						
HT200	15	25	35			

表4-11 CrAlTiN涂层钻头两因素三水平钻削力测量试验方案

Tab 4-11 The test program of two factors and three levels of drilling test on CrAlTiN coated drill

序号	切削速度 v_c	进给量 f
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

4.4 本章小结

本章主要做了以下两个方面的内容：

(1) 介绍了试验过程中所要用到的设备、仪器和刀具，试验材料的化学成分、物理机械性能和应用范围，以及钻削力的测试原理。

(2) 分析了正交试验的原理，根据不同材料的性能，确定单因素试验方案，对正交试验中的水平进行了设定。

5 钻削力试验结果与分析

在孔的钻削过程中,发现钻削力变化有这样规律:当刀具开始入钻时,轴向力和扭矩均由零逐渐增大,其中轴向力增大的幅度更快一些。在钻削不同的材料时,各种切削用量下这一规律都是相同的。当钻头的主切削刃全部参加切削时,轴向力和扭矩达到稳定状态,随着钻孔的深度的增加,45钢、ZL207、HT200和LY12轴向力和扭矩波动较小,而1Cr18Ni9Ti、30CrMnSiA及Ti-6Al-4V波动相对较大,并且有逐渐增大的趋势,特别是速度和进给量较大时,表现的尤为明显,这主要是由于材料的物理机械特性引起的。本文所讨论的轴向力 F_z 和扭矩 M_z 均指钻削达到稳定状态时,即横刃和主切削刃均参加切削时钻削力的平均值。

5.1 钻削用量和钻头直径及工件材料对钻削力的影响

钻削用量的选择直接决定钻削力的大小,并影响切削加工效率。但随着进给量和钻头直径的增加,切削力增大,切削温度升高,刀具磨损加剧,刀具寿命降低。因此,研究钻削用量对钻削力的影响,并且合理地选择钻削用量,对提高加工效率具有非常重要的意义。

5.1.1 钻削用量对钻削力的影响

a. 切削速度对钻削力的影响

图5-1所示为钻削不同工件材料时,钻削力随切削速度的变化。从图中可以看出,相同条件下,轴向力的扭矩的变化趋势基本一致。

在钻削45钢时,随着切削速度的增大,轴向力和扭矩均呈下降的趋势(图5-1a)。这是由于积屑瘤的存在,使刀具的实际前角增大,切削变形减小,从而造成钻削力逐渐下降。此外,由于切削速度增大,摩擦系数 μ 减小,同时,切削温度升高,被加工材料的强度和硬度降低,也会使切削力减小。

在1Cr18Ni9Ti的钻削过程中,当 $v_c > 16\text{m/min}$ 时,钻削力出现下降趋势(图5-1b),主要是因为1Cr18Ni9Ti的塑性和韧性很好,钻削过程中在刀具前刀面逐步产生积屑瘤,使刀具具有了更大的前角,减小了切屑的变形,使钻削力下降。

在HT200的切削过程中,轴向力和扭矩随着切削速度的增大一直呈下降趋势(图5-1g)。这主要是因为铸铁为脆性材料,形成崩碎切屑,塑性变形小,切屑与前刀面间的摩擦较小,所以切削速度对其的影响不大。

在钻削其他材料时,轴向力和扭矩随着切削速度的增大,出现先增大后减小的情况,之后也有微小的波动。这是积屑瘤、摩擦系数、切削温度及刀具磨损等综合作用的结果。但总的来看,随着切削速度的增大,轴向力和扭矩在小范围内波动,也就是说,切削速度对钻削力的影响较小。

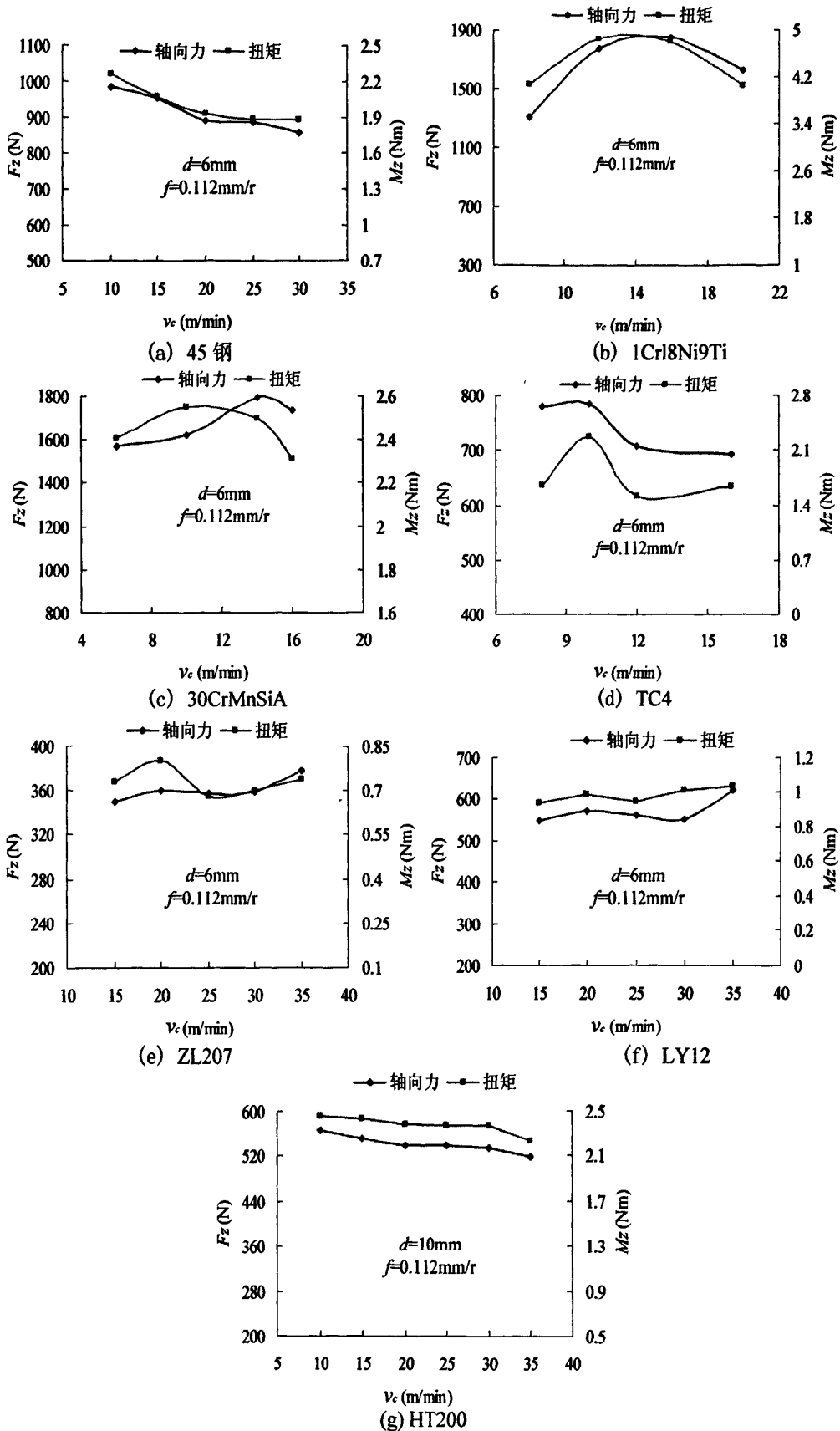


图 5-1 钻削力均值随切削速度的变化

Fig 5-1 The change of the drilling force with cutting speed

表 5-1 为在上述钻削条件下, 钻削不同材料时轴向力和扭矩最小值与最大值的相差情况。对于轴向力, 最小值与最大值相差最少的只有 7.5%; 对于扭矩, 最小值与最大值相差最少的 9.4%。进一步说明切削速度对钻削力的影响较小。当然, 这也与每组实验所选的速度范围有关, 预计增加速度的试验范围, 钻削力最小值与最大值也不会有太大差距。

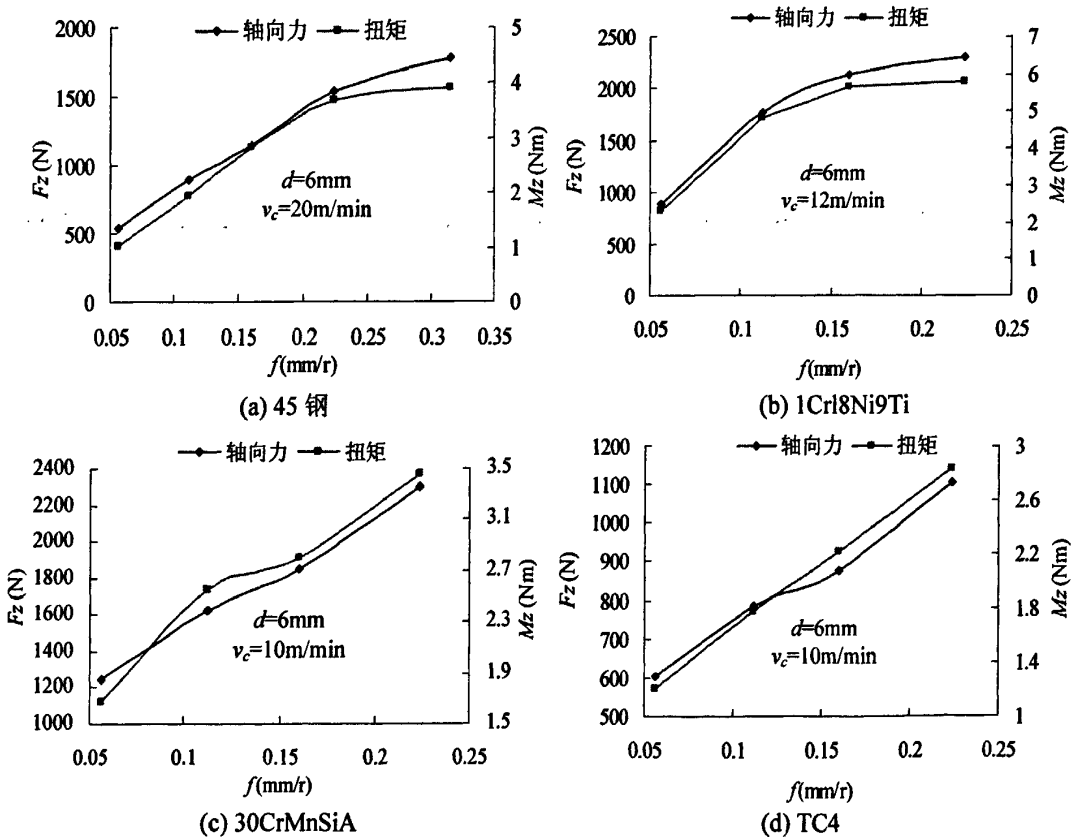
表 5-1 试验材料钻削力最小值与最大值的相差情况

Tab 5-1 The difference between minimum and maximum drilling force on experimental materials

试件材料	F_z (N)		相差幅度	M_z (Nm)		相差幅度
	最小 F_z (N)	最大 F_z (N)		最小 M_z (Nm)	最大 M_z (Nm)	
45 钢	858.87	984.42	12.8%	1.89	2.26	16.4%
1Cr18Ni9Ti	1311.24	1855.13	29.3%	4.05	4.85	16.5%
30CrMnSiA	1569.08	1795.04	12.6%	2.31	2.55	9.4%
Ti-6Al-4V	693.52	785.86	11.8%	1.52	2.28	33.3%
ZL207	349.86	378.21	7.5%	0.68	0.8	15%
LY12	547.99	621.48	11.8%	0.94	1.04	9.6%
HT200	491.64	567.6	13.4%	2	2.28	12.3%

b. 进给量对钻削力的影响

图 5-2 所示为钻削不同工件材料时, 钻削力随进给量的变化。



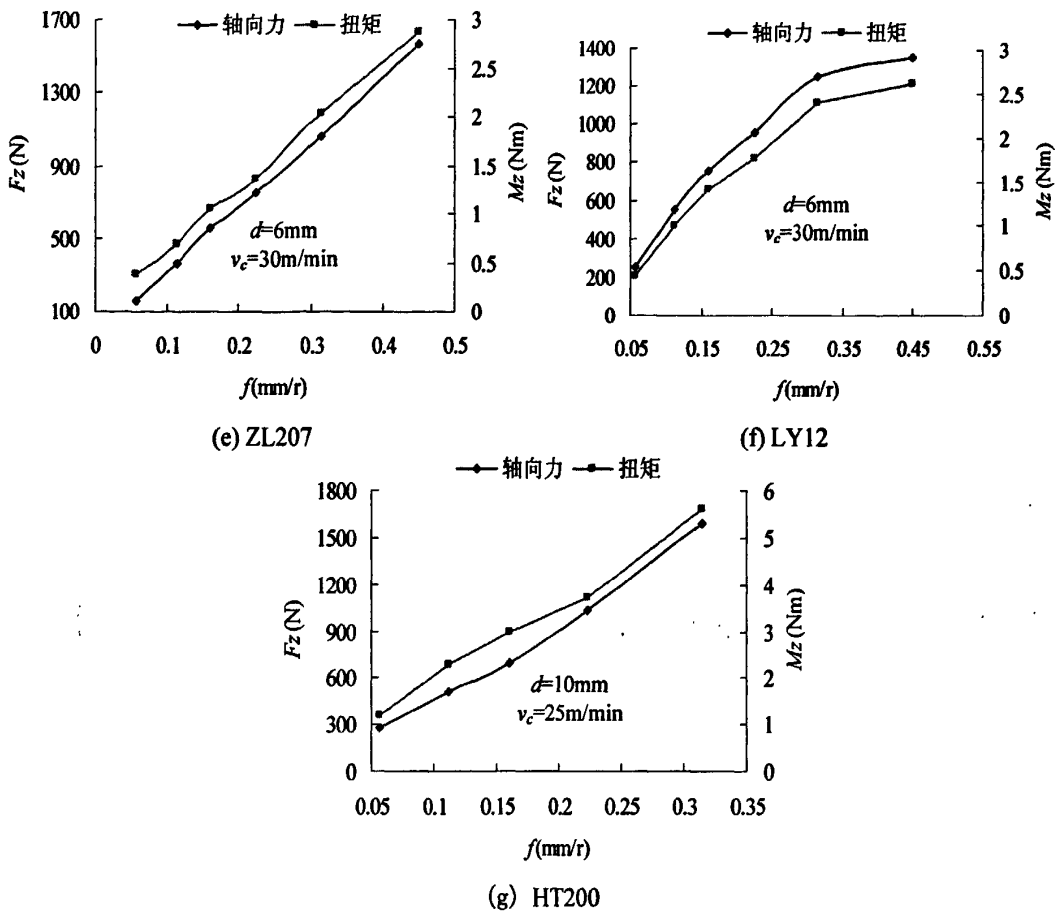


图 5-2 钻削力均值随进给量的变化

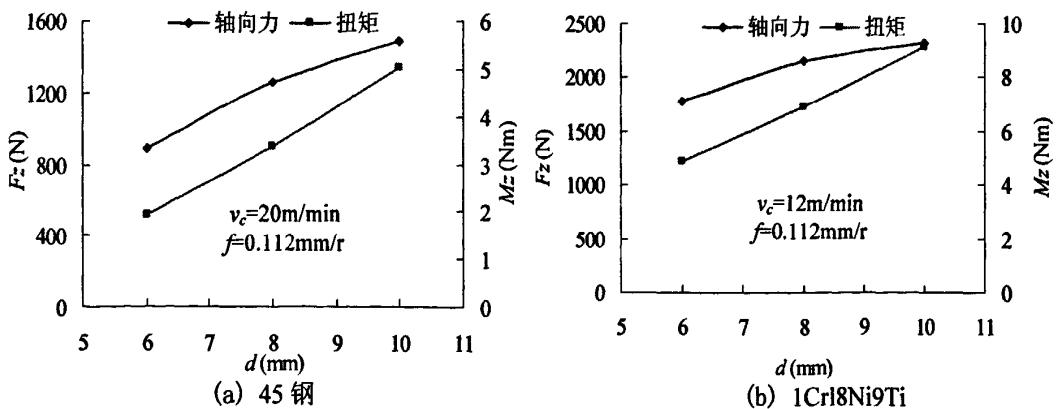
Fig 5-2 The change of the drilling force with feed rate

可以看出,在对不同材料进行钻削时,随着进给量的增大,轴向力和扭矩都是呈增大趋势。这是由于在切削速度不变的前提下,进给量的增大,使切削厚度增大,切削变形增大,从而使轴向力和扭矩增大。

5.1.2 钻头直径对钻削力的影响

图 5-3 所示为钻削不同工件材料时,钻削力随钻头直径的变化。

由图中很显然可以看到,钻头直径越大,钻削力越大。这是因为随钻头直径增大,切削宽度增大,造成钻削力的增加。



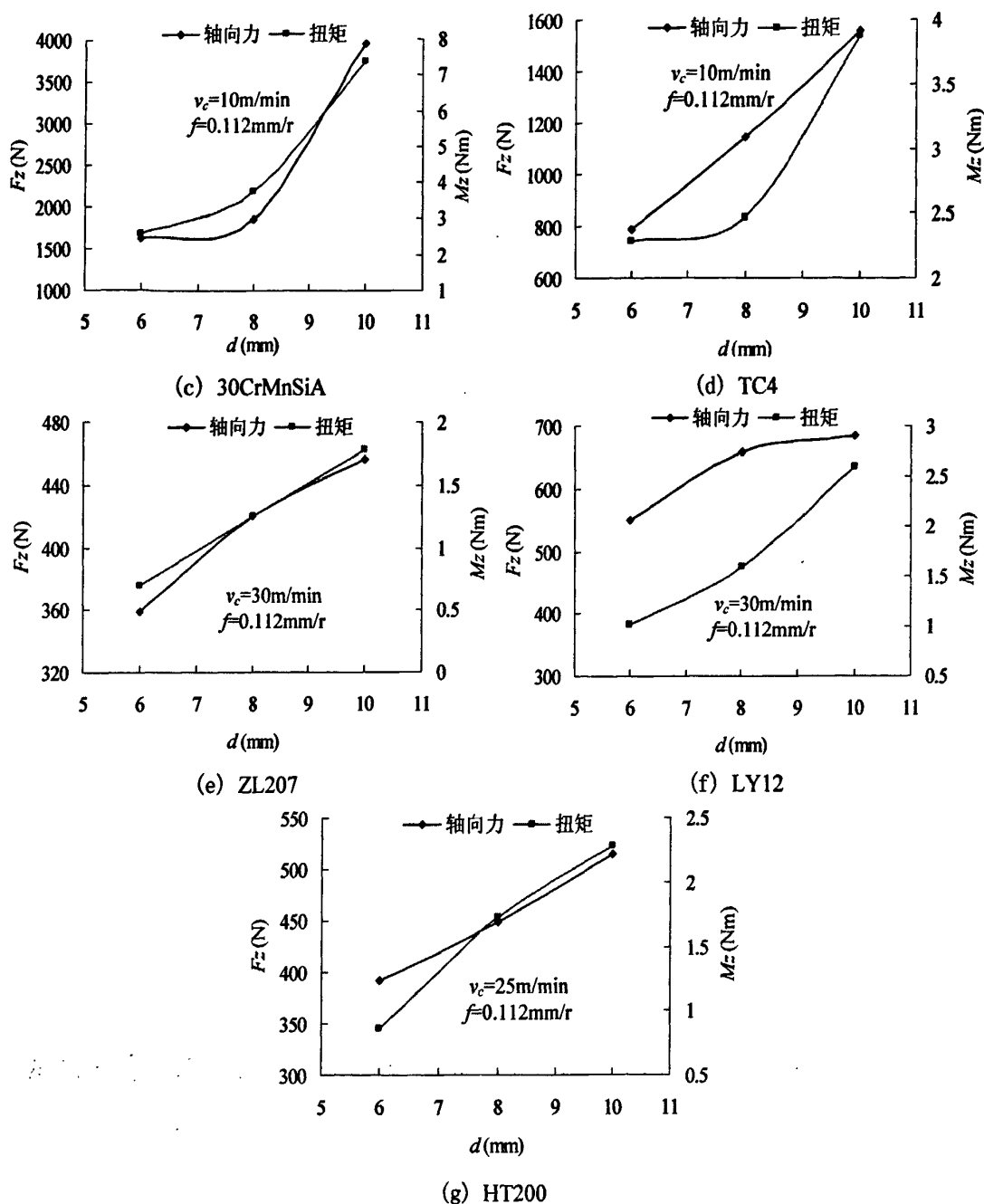


图 5-3 钻削力均值随钻头直径的变化

Fig 5-3 The change of the drilling force with drill diameter

5.1.3 工件材料对钻削力的影响

从上面钻削用量和钻头直径对钻削力影响的单因素试验可以看出,在相同或相近条件下 1Cr18Ni9Ti、30CrMnSiA 和 TC4 的钻削力普遍大于其他材料的钻削力。这主要由材料本身的物理机械性能所引起的,而材料的机械性能主要由其化学成分和金相组织所决定。一般情况下,材料的强度和硬度越高,切削力越大。在强度、硬度相近的情况下,材料的塑性(延伸率)和韧性越大,切削力越大。由于在切削大塑性材料的过程中,产生较大的塑性变形和剧烈的加工硬化,同时切屑与前刀面的接触时间较长,所以切削力较大。使大

韧性材料发生变形或破坏所消耗的能量较多，所以切削力也较大。钻削温度对钻头性能、磨损情况和积屑瘤的形成有较大影响，进而影响切削力的大小。

奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 虽然硬度不高，但塑性很好（延伸率是 45 钢的 4 倍），钻削变形大，切屑不易切离和折断，切屑变形所消耗的功增多，钻削扭矩增大，切屑排出困难，常常阻塞螺旋槽，轴向力增大。由于韧性较好，钻削过程中弹性恢复较为严重，已钻孔表面在钻后缩小，紧紧“抱住”钻头，使摩擦力增大。切屑变形所消耗的功和刀-工间所产生的摩擦热的大部分能量转化为热能，切削温度升高，加之 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的导热性差（导热系数仅为 45 钢的 1/3），切削区局部温度很高（相同加工条件下 1Cr18Ni9Ti 的切削温度比 45 钢高出 200℃-300℃左右），大量切削热集中于切削区和刀-屑界面上。高的切削温度和 1Cr18Ni9Ti 材料中许多微细的碳化物（如 TiC）颗粒，使得钻头磨损严重，进一步增大了钻削力。此外，1Cr18Ni9Ti 加工硬化现象非常严重，较小的变形就会引起硬度较大的提高（硬化层硬度比原硬度提高 1.4~2.2 倍），也使得钻削力大大提高。

从表 4-4 所列的试件材料的化学成分与机械性能可以看出 30CrMnSiA 高强度钢的强度和硬度明显高于常用普通材料 45 钢。其中的 Ni、Cr、Mo、Mn、V、W 等元素改善了钢的切削性能，使钢的硬度和强度大大提高；同时，Si 元素的存在又使材料的导热性能变差，并且当形成 SiO₂ 这样的硬质点时，又使材料的可切削加工性变差，容易使刀具发生磨粒磨损，切削温度也会随之升高；在 Cr、V、Mo 三个元素中，V 和 Mo 虽然分别起到细化晶粒和抑制回火脆性的作用，但三个元素都使钢的机械性能提高，切削加工性变差；特别是钢中的碳元素与材料中的这些合金元素形成比较稳定的碳化物时，使刀具的切削性能变得更差，如 CrC 和 VC 的硬度可达 2094HV，在钻削加工时，刀具很快磨损，造成很大的切削力^[56]。另外，经热处理强化后的 30CrMnSiA 塑性较低，导热性也比较差，钻削时大量的切削热排出困难，并集中在刀刃附近，造成很高的切削温度，刀具磨损加速，使得切削力增大。

TC4 切削加工的显著特点是变形系数小，接近于 1，切屑在前刀面上滑动摩擦的路程加大，并且钛合金的导热系数很小（只相当于 45 钢的 1/5~1/7），钻削过程中切削热很难传出，大都集中切削刃附近的较小范围内，使得切削温度很高（约为切削 45 钢的 2 倍），刀具磨损加快。加之 TC4 化学活性高，冷硬现象严重，弹性模量小等特点综合起来使得钻削力大于常用的普通材料^[57-59]。

LY12 和铝硅合金 ZL207 硬度低，切削负荷小，伸长率低，所以切削加工性较好，钻削力较小。由于铸铁是脆性材料，塑性变形小，加工硬化小，抗拉强度和硬度较低，加工时形成崩碎切屑，对前刀面摩擦力小，所以，整体来说，钻削力也比较小（相对于钢而言）。

5.2 钻削力经验公式

多因素正交试验是探索切削加工过程各因素间关系的有效途径，也是实验优化设计的重要方法。它的优点在于可以凭借尽量少的实验次数，表达较为丰富的信息量，结合回

归分析方法，建立经验模型是常用的方法。45钢正交试验及钻削力测量值如表5-2所示。

表5-2 45钢的正交试验表及钻削力测量值

Tab 5-2 The orthogonal experiment table and drilling force measurement values of 45 steel

因素 水平	切削速度 v_c (m/min)	进给量 f (mm/r)	钻头直径 d (mm)	轴向力 F_z (N)	扭矩 M_z (Nm)
1	10	0.056	6	639.10	1.22
2	10	0.112	8	1228.34	3.56
3	10	0.224	10	2530.48	9.32
4	20	0.056	8	731.29	1.92
5	20	0.112	10	1482.85	5.04
6	20	0.224	6	1543.58	3.7
7	30	0.056	10	994.42	2.98
8	30	0.112	6	858.87	1.89
9	30	0.224	8	1668.08	5.23

5.2.1 回归分析

为了更好地分析切削力，并揭示切削参数与切削力之间的内在关系，我们采用多元回归的方法，来建立切削力与切削参数之间的关系。常用的经验公式约分为两类：一类是指数公式；一类是按单位切削力进行计算。在金属切削中广泛采用指数公式作为切削力的经验拟合公式，来表示各切削参数对切削力的影响规律。常用的指数公式的形式为：

$$F = C_F d^{X_F} f^{Y_F} v_c^{Z_F} \quad (5.1)$$

其中 C_F ——由被加工材料和钻削条件所决定；

X_F ——钻头直径 d 的指数；

Y_F ——进给量 f 的指数；

Z_F ——切削速度 v_c 的指数。

上述四个参数均可以通过回归分析方法得到。

正交试验设计场合常用这种指数回归方式，因为切削力公式为指数公式，所以应尽量化为线性模型，应用多元线性回归的分析方法。

对式(5.1)做线性化处理，即两边取对数，则有：

$$\log F = \log C_F + X_F \log d + Y_F \log f + Z_F \log v_c \quad (5.2)$$

为了计算方便，再进行对应变量代换。令 $\log F = F'$ ， $\log C_F = C_F'$ ， $\log d = d'$ ， $\log f = f'$ ， $\log v_c = v_c'$ ，得三元线性回归方程：

$$F' = C_F' + X_F d' + Y_F f' + Z_F v_c' \quad (5.3)$$

对表5-2中的所有数据取对数得表5-3。

表 5-3 45 钢的正交试验表的对数值

Tab 5-3 The logarithmic of 45 steel orthogonal experiment

因素 水平	$\log v_c$	$\log f$	$\log d$	$\log F_z$	$\log M_z$
1	1	-1.2518	0.77815	2.8056	0.08636
2	1	-0.95078	0.90309	3.0893	0.55145
3	1	-0.64975	1	3.4032	0.96942
4	1.301	-1.2518	0.90309	2.8641	0.2833
5	1.301	-0.95078	1	3.1711	0.70243
6	1.301	-0.64975	0.77815	3.1885	0.5682
7	1.4771	-1.2518	1	2.9976	0.47422
8	1.4771	-0.95078	0.77815	2.9339	0.27646
9	1.4771	-0.64975	0.90309	3.2222	0.7185

运用最小二乘法进行拟合，计算 F' 的回归函数：

$$F' = \begin{bmatrix} 2.8056 \\ 3.0893 \\ 3.4032 \\ 2.8641 \\ 3.1711 \\ 3.1885 \\ 2.9976 \\ 2.9339 \\ 3.2222 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0.77815 & -1.2518 & 1 \\ 1 & 0.90309 & -0.95078 & 1 \\ 1 & 1 & -0.64975 & 1 \\ 1 & 0.90309 & -1.2518 & 1.301 \\ 1 & 1 & -0.95078 & 1.301 \\ 1 & 0.77815 & -0.64975 & 1.301 \\ 1 & 1 & -1.2518 & 1.4771 \\ 1 & 0.77815 & -0.95078 & 1.4771 \\ 1 & 0.90309 & -0.64975 & 1.4771 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} C'_F \\ X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{bmatrix}$$

利用公式：

$$A^T AB = A^T F' \tag{5.4}$$

通过Matlab数值计算软件求得：

$$B = \begin{bmatrix} 2.9515 \\ 0.9530 \\ 0.6348 \\ -0.0989 \end{bmatrix}$$

然后把计算结果带到式 (5.3) 中得：

$$\log C_F = 2.9515, C'_F = 894.3345, X_F = 0.9530, Y_F = 0.6348, Z_F = -0.0989$$

最后把这些参数带到式 (5.1) 中得：

$$F = 894.33d^{0.95} f^{0.63} v_c^{-0.1} \tag{5.5}$$

用同样的方法可以计算出来扭矩 M_z

$$M' = \begin{bmatrix} 0.08636 \\ 0.55145 \\ 0.96942 \\ 0.2833 \\ 0.70243 \\ 0.5682 \\ 0.47422 \\ 0.27646 \\ 0.7185 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0.77815 & -1.2518 & 1 \\ 1 & 0.90309 & -0.95078 & 1 \\ 1 & 1 & -0.64975 & 1 \\ 1 & 0.90309 & -1.2518 & 1.301 \\ 1 & 1 & -0.95078 & 1.301 \\ 1 & 0.77815 & -0.64975 & 1.301 \\ 1 & 1 & -1.2518 & 1.4771 \\ 1 & 0.77815 & -0.95078 & 1.4771 \\ 1 & 0.90309 & -0.64975 & 1.4771 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} C_M' \\ X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix}$$

利用公式：

$$A^T AB = A^T M' \quad (5.6)$$

通过 Matlab 数值计算软件求得：

$$B = \begin{bmatrix} -0.2504 \\ 1.8178 \\ 0.7819 \\ -0.0924 \end{bmatrix}$$

即： $\log C_M = -0.2504$ ， $C_M' = 0.5618$ ， $X_M = 1.8178$ ， $Y_M = 0.7819$ ， $Z_M = -0.0924$

得出钻削 45 钢时扭矩的经验公式

$$M = 0.56d^{1.82} f^{0.78} v_c^{-0.09} \quad (5.7)$$

5.2.2 显著性检验

为了验证所得经验公式的准确性，选择F检验。F检验是根据平方和分解式，直接从回归效果检验回归方程的显著性。平方和分解式是：

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.8)$$

式中 y_i ——对试验所得的轴向力取对数；

\bar{y} ——对试验所得轴向力取对数后的平均值；

\hat{y}_i ——由式(5.2)计算所得的值；

$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ——总平方和，简称SST；

$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ ——回归平方和，简称SSR；

$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ ——残差平方和，简称SSE。

平方和的分解式可以简写为： $SST=SSR+SSE$ ，其中 SSR 是由回归方程确定的，也就是自由变量的波动引起的，SSE 是不能用自变量解释的波动，是由自由变量之外的未加控制的因素引起的。这样，回归平方和越大，回归的效果越好。

对式(5.2)进行F检验，其中 $\log C_F = 2.9515$ ， $C_F' = 894.3345$ ， $X_F = 0.9530$ ， $Y_F = 0.6348$ ，

$Z_F = -0.0989$ 。通过表 5-3 计算方差分析中的单元得出：

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 0.29466 \quad (5.9)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = 0.28992 \quad (5.10)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0.00472 \quad (5.11)$$

设显著性水平 $\alpha = 0.01$ ，轴向力回归模型方差分析如表 5-4 所示

表 5-4 轴向力回归模型方差分析表

Tab 5-4 The variance analysis table of axial force regression model

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	$F_{0.01}(3,5)$
回归	3	0.28992	0.09664	102.373	12.06
残差	5	0.00472	0.000944		
总和	8	0.29466			

由表 5 可以看出 $F = 102.373$ ，从数学用表中查 F 分布表得临界值 $F_{0.01}(3,5) = 12.06$ 。 $F = 102.373 > F_{0.01}(3,5) = 12.06$ ，所以显著性非常明显。同时也说明试验点的分散性比较低，经验公式的可信度比较高。

同样，通过计算得出扭矩回归模型方差分析表，表 5-5 所示，显著性也非常明显。可见上述的多元线性回归能够较好地反应实际加工过程，所以式 (5.5) 和式 (5.7) 符合求。

表 5-5 扭矩回归模型方差分析表

Tab 5-5 The variance analysis table of torque regression model

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	$F_{0.01}(3,5)$
回归	3	0.58063	0.19354	381.559	12.06
残差	5	0.00254	0.00051		
总和	8	0.58318			

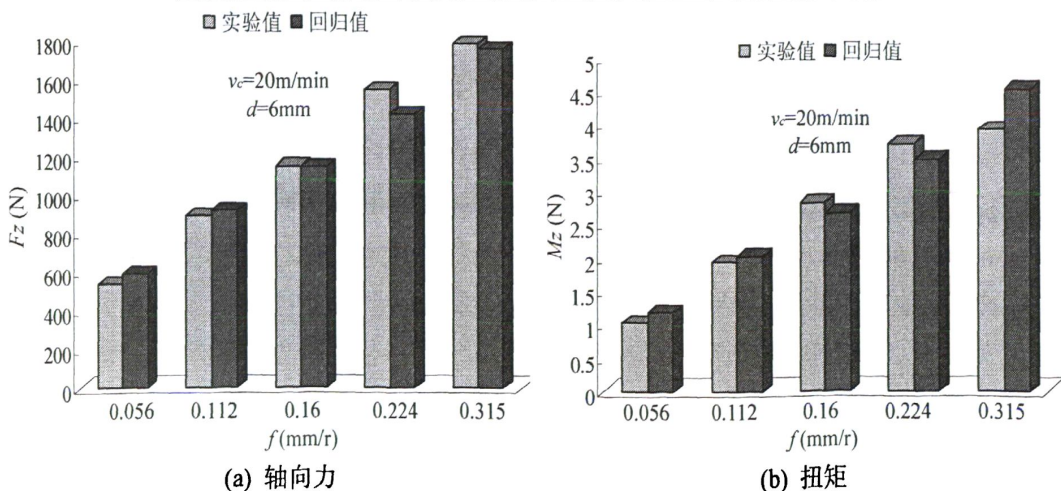


图 5-4 45 钢钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-4 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in 45 steel

图 5-4 为 45 钢钻削力模型回归值与实验结果比较对照图,可以看出经验公式与各试验点的拟合程度比较高。

同样的,根据其他材料钻削力正交试验测量值回归出其钻削力经验公式,分别如下:

(1) 铝硅合金 ZL207 钻削力经验公式:

$$F = 809.1d^{0.72} f^{1.08} v_c^{0.087} \quad (5.12)$$

$$M = 0.2276d^{1.69} f^{0.96} v_c^{0.073} \quad (5.13)$$

铝硅合金 ZL207 钻削力模型回归值与实验值比较如图 5-5 所示。

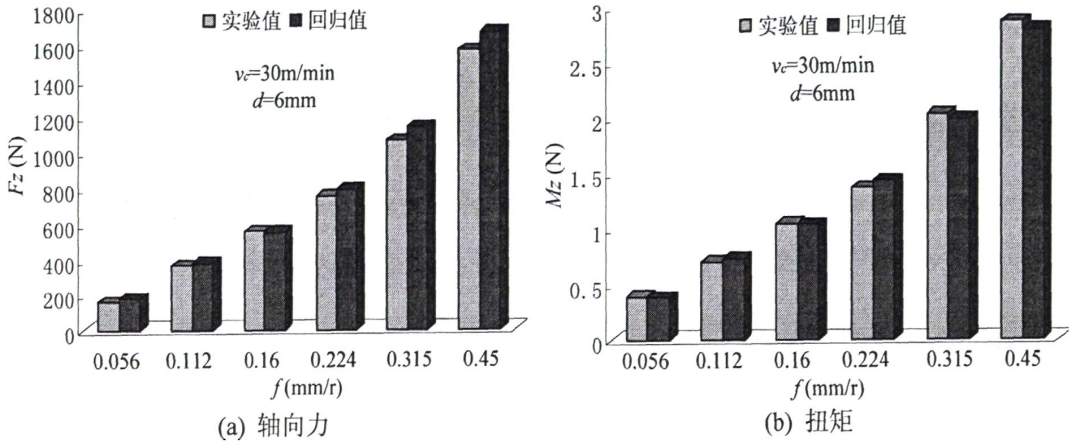


图 5-5 铝硅合金 ZL207 钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-5 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in ZL207

(2) 铸铁 HT200 钻削力经验公式:

$$F = 1386.1d^{0.511} f^{1.03} v_c^{0.035} \quad (5.14)$$

$$M = 0.183d^{1.91} f^{0.88} v_c^{0.019} \quad (5.15)$$

铸铁 HT200 钻削力模型回归值与实验值比较如图 5-6 所示。

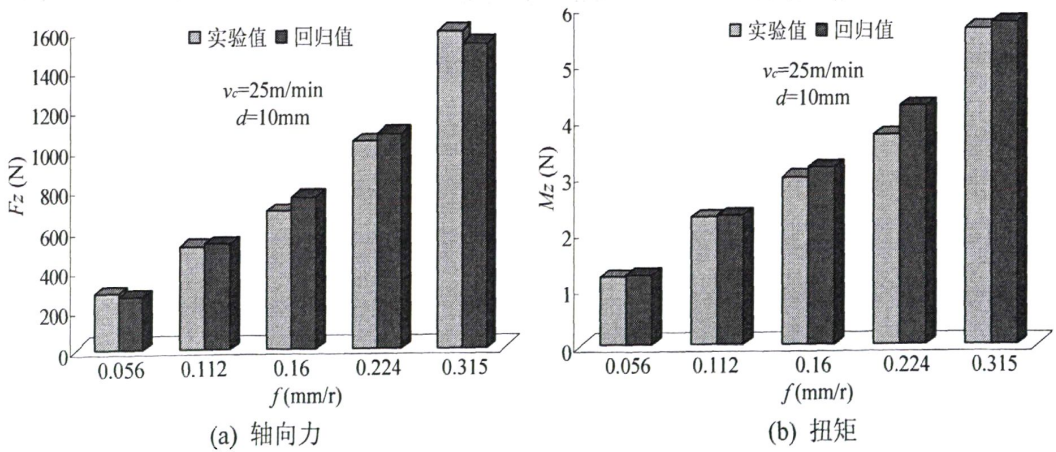


图 5-6 铸铁 HT200 钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-6 Drilling forces comparison of the regression and the experimental values in HT200

(3) 硬铝 LY12 钻削力经验公式:

$$F = 979.49d^{0.72} f^{1.05} v_c^{0.11} \quad (5.16)$$

$$M = 0.24d^{1.8} f^{0.94} v_c^{0.073} \quad (5.17)$$

LY12硬铝钻削力模型回归值与实验值比较如图5-7所示。

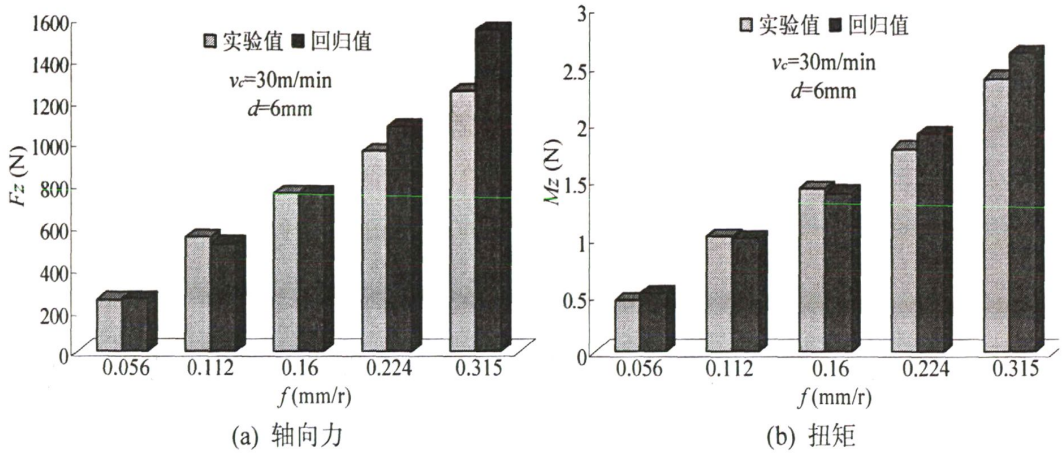


图 5-7 LY12 硬铝钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-7 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in LY12

(4) 奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 钻削力经验公式:

$$F = 734.51d^{0.89} f^{0.88} v_c^{0.41} \quad (5.18)$$

$$M = 0.78d^{1.59} f^{0.84} v_c^{0.21} \quad (5.19)$$

1Cr18Ni9Ti钻削力模型回归值与实验值对照如图5-8所示。

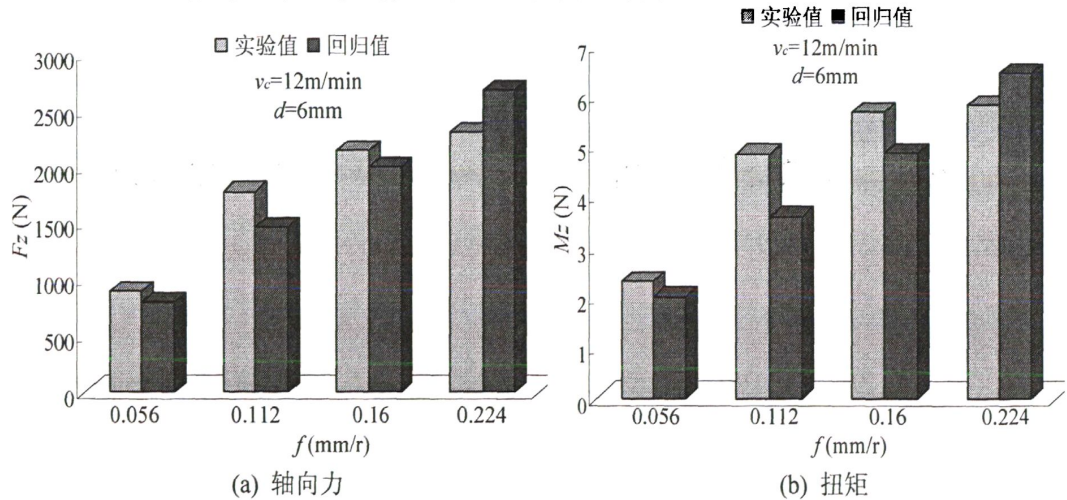


图 5-8 1Cr18Ni9Ti 钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-8 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in 1Cr18Ni9Ti

(5) 高强度钢 30CrMnSiA 钻削力经验公式:

$$F = 284.84d^{1.71} f^{0.64} v_c^{0.007} \quad (5.20)$$

$$M = 0.25d^{2.13} f^{0.71} v_c^{-0.01} \quad (5.21)$$

30CrMnSiA 钻削力模型回归值与实验值比较如图 5-9 所示。

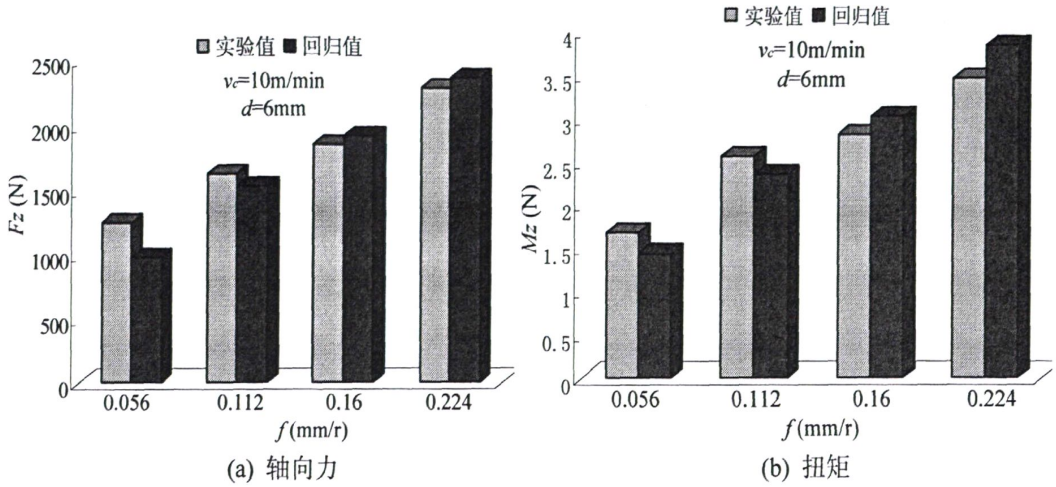


图 5-9 30CrMnSiA 钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-9 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in 30CrMnSiA

(6) 钛合金 TC4 钻削力经验公式:

$$F = 369.06d^{1.18} f^{0.49} v_c^{-0.14} \quad (5.22)$$

$$M = 0.29d_o^{1.85} f^{0.72} v_c^{0.005} \quad (5.23)$$

TC4 钻削力模型回归值与实验值比较如图 5-10 所示。

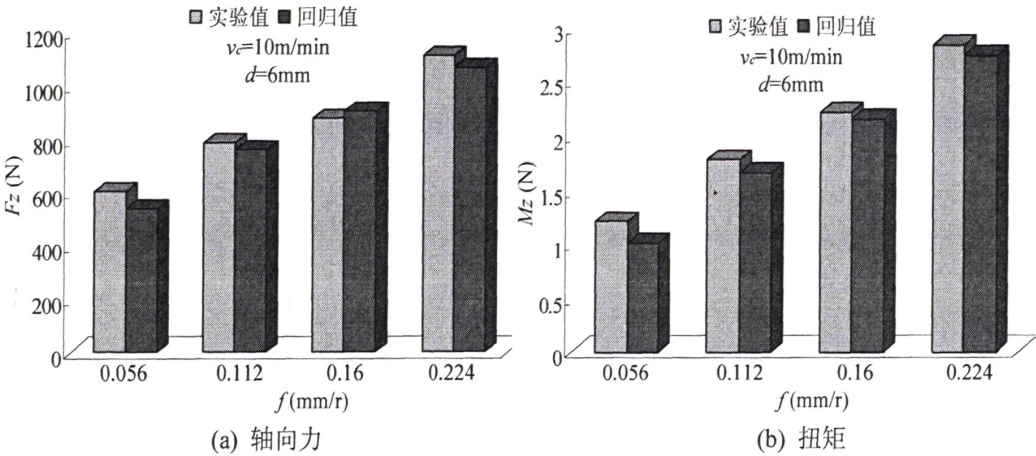


图 5-10 TC4 钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-10 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in TC4

从图 5-4 到图 5-10 中可以看出, 1Cr18Ni9Ti 的钻削力模型回归值与实验值有一定的差异, 其他材料拟合程度较高。这主要是由于速度较高时, 钻削温度特别高 (相同加工条件下 1Cr18Ni9Ti 的切削温度比 45 钢高出 200°C-300°C 左右), 加之 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的导热性差 (导热系数仅为 45 钢的 1/3), 大量切削热无法排除, 集中于切削区, 使钻头磨损很快, 钻削力很快增大。1Cr18Ni9Ti 严重的加工硬化现象, 也是其两者差异较大的一个原因。在做 1Cr18Ni9Ti 的钻削实验时, 即使是相同的三次实验, 所测量的钻削力都有较大波动, 钻头直径和进给量较大时体现更加突出。

5.3 主切削刃与横刃对钻削力贡献的试验结果与分析

为了研究分析麻花钻主切削刃与横刃对轴向力和扭矩的贡献大小。以钻削 $\Phi 10\text{mm}$ 为例安排了如下钻削试验,先用 $\Phi 2\text{mm}$ 、 $\Phi 4\text{mm}$ 、 $\Phi 6\text{mm}$ 和 $\Phi 8\text{mm}$ 麻花钻钻孔,然后用 $\Phi 10\text{mm}$ 麻花钻扩孔,测量轴向力和扭矩,并与直接用 $\Phi 10\text{mm}$ 麻花钻钻孔时的结果比较。试件材料为 45 号钢和 HT200 铸铁,钻削条件为:钻削 45 钢,切削速度 $v_c=20\text{m/min}$,进给量 $f=0.112\text{mm/r}$;钻削 HT200 铸铁,切削速度 $v_c=25\text{m/min}$,进给量 $f=0.112\text{mm/r}$ 。结果如表 5-6 和 5-7 所列。

表 5-6 45 钢钻削结果

Tab 5-6 The results of 45 steel drilling

加工条件		钻削力		钻削力下降幅度	
		F_z (N)	M_z (Nm)	F_z	M_z
钻 $\Phi 10$ 孔		1482.85	5.04		
扩 $\Phi 10$ 孔	底孔 2	531.67	4.55	65.10%	11.39%
	底孔 4	353.90	3.74	79.43%	32.49%
	底孔 6	218.30	2.72	87.54%	46.84%
	底孔 8	101.13	1.57	94.94%	71.86%

表 5-7 HT200 铸铁钻削结果

Tab 5-7 The results of HT200 drilling

加工条件		钻削力		钻削力下降幅度	
		F_z (N)	M_z (Nm)	F_z	M_z
钻 $\Phi 10$ 孔		538.93	2.37		
扩 $\Phi 10$ 孔	底孔 2	188.07	2.1	64.15%	9.72%
	底孔 4	110.86	1.6	76.13%	25.79%
	底孔 6	67.14	1.26	85.29%	46.03%
	底孔 8	27.28	0.667	93.18%	68.85%

由金属切削原理可知,扭矩和钻削力的大小是由钻削过程中消耗在主切削刃上的功,横刃上的功以及切屑和棱带上得摩擦功所组成的。从以上两表中可以看出,扭矩主要是由主切削刃产生的,约占 80%,这是因为主切削刃最长,切下的切屑最多,负荷最大,而横刃长度较短,约占扭矩的 10%左右。但是因为横刃是负前角工作的,因此其轴向力最大,占 50%-60% (不修磨时);而主切削刃所承担的轴向力约占 40%。这与金属切削原理中钻削力的分配比例是一致的,说明此试验是可靠的。

前面提到的当钻头开始钻入工件时,轴向力和扭矩均由零逐渐增大,其中轴向力增大

的幅度更快一些,就是因为横刃首先接触工件,进行挤压切削,它所产生的切削力占到总切削力的57%左右,而其所产生的扭矩大约只有8%。

对表5-6和5-7中所测得的实验数据进一步分析,得出用 $\Phi 10\text{mm}$ 的标准麻花钻在45钢、铸铁上钻孔时,各部分切削刃所占钻削力的比例,如表5-8、5-9所示。

表5-8 钻削45钢时各部分切削刃所占钻削力的比例 ($v_c=20\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$)

Tab 5-8 The proportion of the drilling force of various parts of the cutting edge on 45 steel

切削刃上点到钻头轴线 距离(各段切削刃)(mm)	承担 F_z 的比例	承担 M_z 的比例
0~1 (包含整个横刃)	65.10%	11.39%
1~2	14.33%	16.88%
2~3	08.11%	18.57%
3~4	07.40%	25.02%
4~5 (含刃带)	05.06%	28.14%

表5-9 钻削铸铁时各部分切削刃所占钻削力的比例 ($v_c=25\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$)

Tab 5-9 The proportion of the drilling force of various parts of the cutting edge on HT200

切削刃上点到钻头轴线 距离(各段切削刃)(mm)	承担 F_z 的比例	承担 M_z 的比例
0~1 (包含整个横刃)	64.15%	9.72%
1~2	11.99%	16.07%
2~3	09.14%	20.24%
3~4	7.90%	22.82%
4~5 (含刃带)	6.82%	31.15%

从表5-8、5-9中可以看出,无论是在钻削45钢还是钻削铸铁,对于轴向力,主切削刃上自中心至外缘处轴向力的分配依此减小,而扭矩依次增加。需要指出的是,材料的力学性能对切削刃各部分所承担的钻削力的比例有较大影响,对于不同种类的材料,各段切削刃的钻削力分配比例不同。哈尔滨工业大学吴健对常用普通材料45钢和难加工材料GH4169、不锈钢和钛合金进行钻削试验研究得出:主切削刃上的钻削力比例最大的是45钢,其次是GH4169,再次是不锈钢,最后是钛合金^[13]。

5.4 修磨横刃对钻削力的影响

标准麻花钻钻心处的切削刃前角为负值,特别是横刃区,在切削过程中产生刮削挤压,造成切屑为粒状而且被压碎。钻心处的直径几乎为零,切削速度很小,也接近于零,但进给运动仍然存在,这就使钻心横刃区域的工作后角为负值,等于用一定角度楔角的凿子劈

入工件，这是造成钻孔时轴向力增大的主要因素^[42]。同时，在钻孔过程中，轴向力的一半以上由横刃承担，轴向力大时，容易使孔钻偏，甚至将钻头折断。可见横刃起着极为重要的作用，因此修磨横刃成为改善麻花钻切削性能的主要措施。本文在对 $d=10\text{mm}$ 的标准麻花钻横刃进行 S 型修磨（在横刃两端开切屑槽）后，对 45 钢和铸铁 HT200 进行钻削试验，分析其轴向力的扭矩的变化规律。图 5-11 所示为 S 型修磨后横刃示意图。

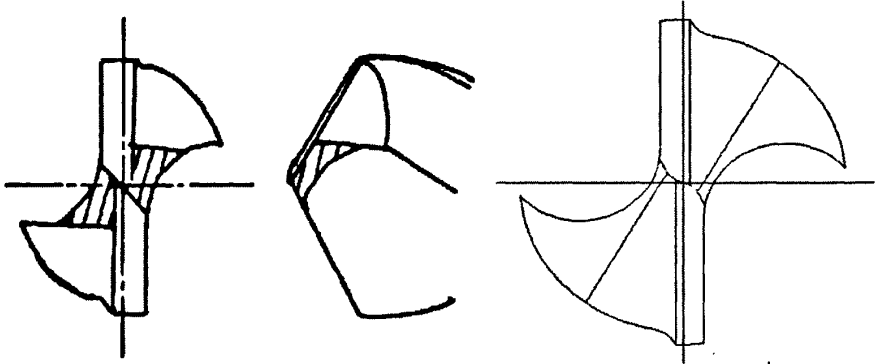


图 5-11 修磨 S 型横刃示意图

Fig 5-11 The schematic diagram of grinding chisel edge

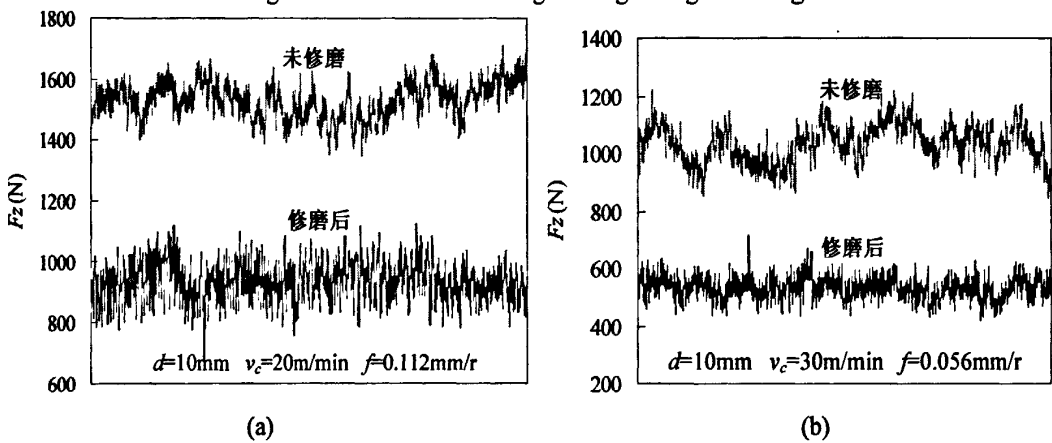


图 5-12 标准麻花钻在修磨前、后钻削 45 钢时钻削力的波形图

Fig 5-12 The waveform of the drilling force before and after grinding of standard twist drill on 45 steel

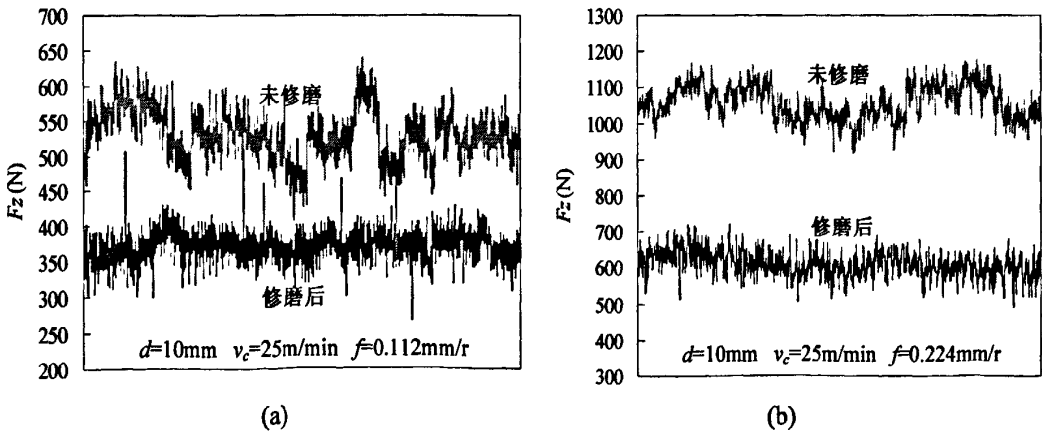


图 5-13 标准麻花钻在修磨前、后钻削铸铁时钻削力的波形图

Fig 5-13 The waveform of the drilling force before and after grinding of standard twist drill on HT200

图 5-12 和 5-13 为标准麻花钻在修磨前、后,对 45 钢和铸铁进行钻削试验,钻削力在稳定阶段的波形图。从图中可以看出,对标准麻花钻进行横刃修磨后,其轴向力明显小于未修磨的轴向力,并且轴向力波动程度有所减小。由此可见,修磨横刃不仅缩短了其长度,而且修磨部分的负前角变成正前角,大大降低了钻孔轴向力,除此之外,还发现钻削过程中钻头自动定心性能特别好,即具有良好的定位精度,位置偏移和扩孔量减小。这主要是因为 S 型修磨方式使得钻尖处顶角减小,横刃前角增大。所以, S 型修磨钻头适用于高精度孔的加工。

将修磨横刃麻花钻与未修磨标准麻花钻的轴向力数据进行对比,如表 5-8 所示,修磨横刃后的轴向力明显小于标准麻花钻的轴向力,但是扭矩变化较小,这是由于在扭矩的分配中,横刃只承担一小部分扭矩(8%左右)。

表 5-8 标准麻花钻在修磨前、后钻削 45 钢和铸铁 HT200 时的钻削力数值

Tab 5-8 The drilling force values before and after grinding of standard twist drill on HT200

切削条件	修磨状况	F_z (N)	M_x (Nm)	切削条件	修磨状况	F_z (N)	M_x (Nm)
45 钢, $v_c=20\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$	修磨前	1482.85	5.044	HT200, $v_c=25\text{m/min}$, $f=0.112\text{mm/r}$	修磨前	517.70	2.37
	修磨后	920.31	4.91		修磨后	357.96	2.25
	下降幅度	37.94%	2.66%		下降幅度	30.86%	5.06%
45 钢, $v_c=30\text{m/min}$, $f=0.056\text{mm/r}$	修磨前	994.42	2.98	HT200 $v_c=25\text{m/min}$, $f=0.224\text{mm/r}$	修磨前	1049.21	4.00
	修磨后	531.35	2.82		修磨后	654.25	3.88
	下降幅度	46.57%	5.37%		下降幅度	37.64%	3%

顺便指出,磨短横刃长度时,不应该损坏切削刃的强度以致于发生断刃现象,若减小横刃过多,则会使钻头发生破坏,过早出现磨钝或崩刃的现象。

5.5 涂层钻头钻削力试验结果与分析

随着高速切削和绿色制造的发展,干式切削成为金属切削技术发展的一个重要方向。干式切削要求刀具具有高硬度和高耐磨性、足够的强度、韧性以及高的耐热性,传统的刀具材料往往只具备其中的一两个性能,这便诞生了涂层刀具。涂层刀具可以减少刀具磨损,延长刀具寿命,大幅度提高机械加工效率,具有良好的切削性能,它的出现成为刀具发展史上的重大突破。

本次试验在干式切削条件下,用 CrAlTiN 涂层钻头对灰铸铁 HT200、1Cr18Ni9Ti 和 TC4 进行钻削试验,研究其钻削力的情况。

5.5.1 铸铁 HT200 的钻削力试验结果

图 5-14 为钻削铸铁 HT200(硬度 185HB)时,未涂层与 CrAlTiN 涂层钻头($d=10\text{mm}$)钻削力随钻削速度和进给量的变化。

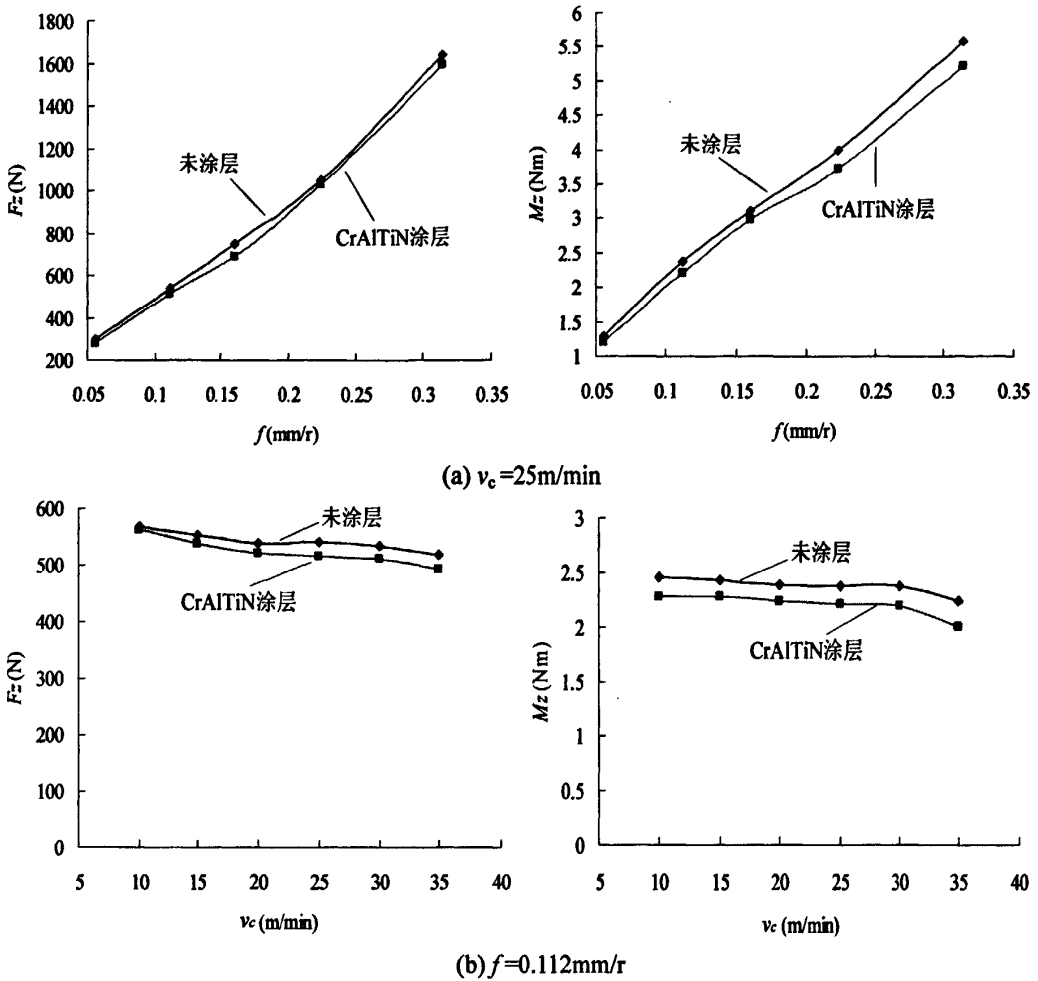


图 5-14 CrAlTiN 涂层与未涂层钻头钻削铸铁时钻削力随切削用量的变化

Fig 5-14 Drilling forces change on CrAlTiN coated and uncoated drills with the cutting parameters in HT200

从图 5-14a 可以看出，未涂层与 CrAlTiN 涂层钻头的轴向力 F_z 和扭矩 M_z 均随着进给量的增大而增大，但相同条件下两者轴向力之间的差异很小，随着进给量的增大，两者扭矩之间的差异逐渐扩大。由试验可知，横刃承担一半以上的轴向力，主切削刃产生约 80% 扭矩，两种钻头切削部分的几何参数相同，所以切削环境较好的条件下，CrAlTiN 的涂层作用没有明显的显示出来。

从图 5-14b 可以看出，未涂层与 CrAlTiN 涂层钻头的轴向力 F_z 和扭矩 M_z 均随着切削速度的增大而减小，但轴向力和扭矩的减小程度都很小，说明钻削铸铁时，切削速度对轴向力和扭矩的影响比较微弱，与前文中单因素试验相符。

总体上来看，未涂层与 CrAlTiN 涂层钻头的轴向力 F_z 和扭矩 M_z 差异较小，轴向力的减小程度不足 5%，扭矩的减小程度不足 10%，这可能是由于铸铁属于脆性材料，塑性变形和摩擦小，具有良好的切削加工性，采用普通标准麻花钻已经能够对其进行很好的切削加工，在短期内（钻孔个数较少）时，CrAlTiN 涂层钻头的优势未能充分的发挥出来。

对 $d=10\text{mm}$ CrAlTiN 涂层钻头钻削铸铁 HT200 的实验数据用线性回归法总结出如下两因素经验公式：

$$F = 4702.2f^{0.938}v_c^{-0.036} \quad (5.24)$$

$$M = 15.06f^{0.86}v_c^{-0.016} \quad (5.25)$$

图 5-15 为 CrAlTiN 涂层钻头钻削铸铁时钻削力模型回归值与实验值对照图，可以看出经验公式与各试验点的拟合程度比较高。

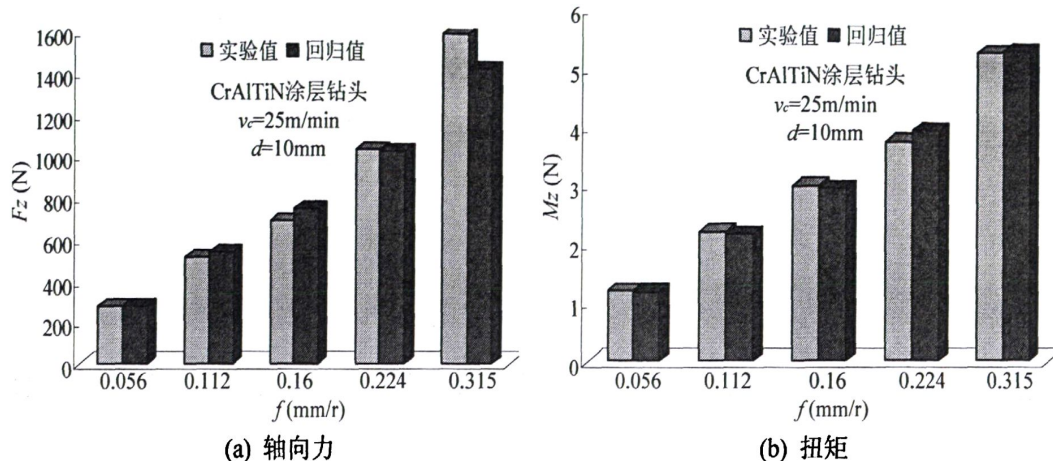


图 5-15 CrAlTiN 涂层钻头钻削铸铁时钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-15 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in HT200

5.5.2 奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的钻削力试验结果

图 5-16 所示为钻削奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 钢时，CrAlTiN 涂层与未涂层钻头的钻削力随切削用量的变化规律。

可以看出，对于 CrAlTiN 涂层钻头与未涂层钻头而言，切削速度与进给量对钻削力的影响趋势是相同的。在钻削奥氏体不锈钢的整个过程中，CrAlTiN 涂层钻头的轴向力和扭矩明显小于未涂层，并且在切削速度和进给量较大时，优势更为明显。说明用 CrAlTiN 涂层钻头可采用比未涂层钻头较大切削用量进行钻孔，对提高钻孔效率十分有利。

对于轴向力，横刃约承担总轴向力的 50%~60%，主切削刃约承担 40%左右。标准麻花钻横刃有很大的负前角，钻削时横刃处发生严重的挤压作用，造成很大的轴向力，加之奥氏体不锈钢具有大塑性、低热导率、加工硬化现象严重等特点，因此在钻削加工时存在排屑困难、切削力大、切削温度较高、刀具磨损严重等问题。而 CrAlTiN 涂层钻头的抗磨作用，使得横刃和主切削刃处的磨损程度相对于标准麻花钻小很多，且 CrAlTiN 涂层钻头的表面摩擦系数相对较小，并具备一定的固体润滑作用，粘屑现象减少，切屑变形降低，排屑相对顺畅。这些因素的综合作用，使得 CrAlTiN 涂层钻头的轴向力明显小于未涂层的。

对于扭矩而言，主要是由主切削刃产生的，占总扭矩的 80%左右。由于 CrAlTiN 涂层有着良好的抗磨作用，所以钻头主切削刃磨损较少，能较长时间保持锋利，故 CrAlTiN 涂层钻头的扭矩很显然小于未涂层钻头，加之，CrAlTiN 涂层钻头较小的表面摩擦系数与固体润滑作用，使积屑瘤和粘结现象减少，螺旋槽堵塞的现象大有缓和，综合这些因素，

使得相对于未涂层钻头，扭矩减小。

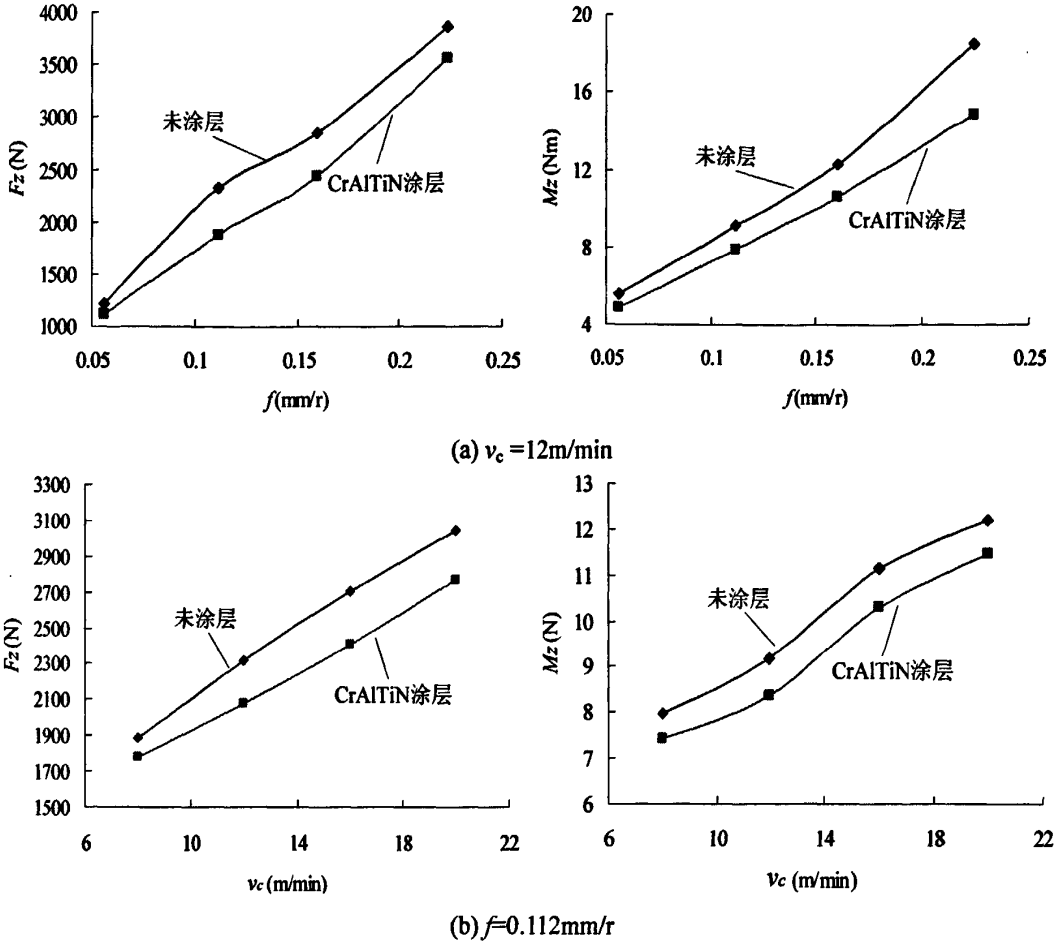


图 5-16 CrAlTiN 涂层与未涂层钻头钻削 1Cr18Ni9Ti 时钻削力随切削用量的变化

Fig 5-16 Drilling forces change on CrAlTiN coated and uncoated drills with the cutting parameters in 1Cr18Ni9Ti

从图 5-16b 可以看出，无论是 CrAlTiN 涂层钻头，还是未涂层钻头，当切削速度 v_c 在 8~20m/min 之间时，切削力随着切削速度的增大而增大，而对于 $d=6\text{mm}$ 的标准麻花钻，当切削速度 v_c 小于 16m/min 时，切削力随着切削速度的增大而增大，但是当切削速度 v_c 大于 16m/min 时，切削力有下降的趋势（图 5-1b 所示）。造成这种现象的原因，可能是由于不同直径的麻花钻在相同切削条件下，刀具磨损状况不同，造成的钻削力状况不同。

同时还发现，当速度 $v_c=16\text{m/min}$ ，进给量 $f=0.224\text{mm/r}$ 时，用未涂层钻头钻削 1Cr18Ni9Ti，出现钻头被“咬死”的现象，已经不能进行正常的钻削。而相同切削条件下，用 CrAlTiN 涂层钻头钻削 1Cr18Ni9Ti，钻削顺利，排屑较为顺畅。

对 CrAlTiN 涂层钻头钻削 1Cr18Ni9Ti 的实验数据用线性回归法总结出如下两因素经验公式：

$$F = 5169f^{0.87}v_c^{0.418} \quad (5.26)$$

$$M = 33.37f^{0.985}v_c^{0.346} \quad (5.27)$$

CrAlTiN 涂层钻头钻削力模型与实验结果比较如图 5-17 所示,可以看出在进给量较大时 ($f=0.16 \text{ mm/r}$, $f=0.224 \text{ mm/r}$) 时,实验值和经验公式的拟合值差异较大。这主要是由于进给量较大时钻削力大,机床震动明显,加之钻头产生了一定程度的磨损,三次实验所测值也有一定的差异。不过整体上拟合程度还是比较高的,能够预测钻削力的变化趋势。

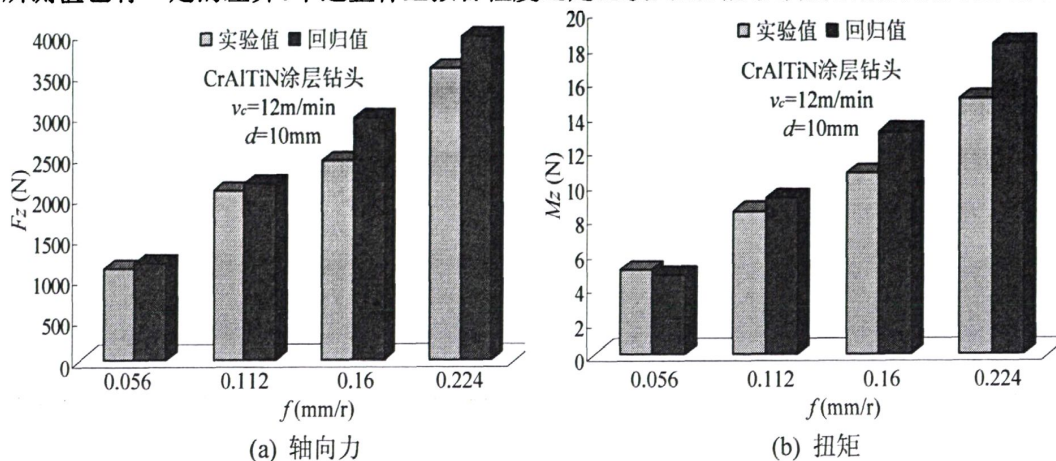


图 5-17 CrAlTiN 涂层钻头钻削 1Cr18Ni9Ti 时钻削力模型回归值与实验值比较

Fig 5-17 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in 1Cr18Ni9Ti

5.5.3 钛合金 TC4 的钻削力试验结果

图 5-18 为钻削 TC4 时,未涂层与 CrAlTiN 涂层钻头钻削力随钻削用量的变化。

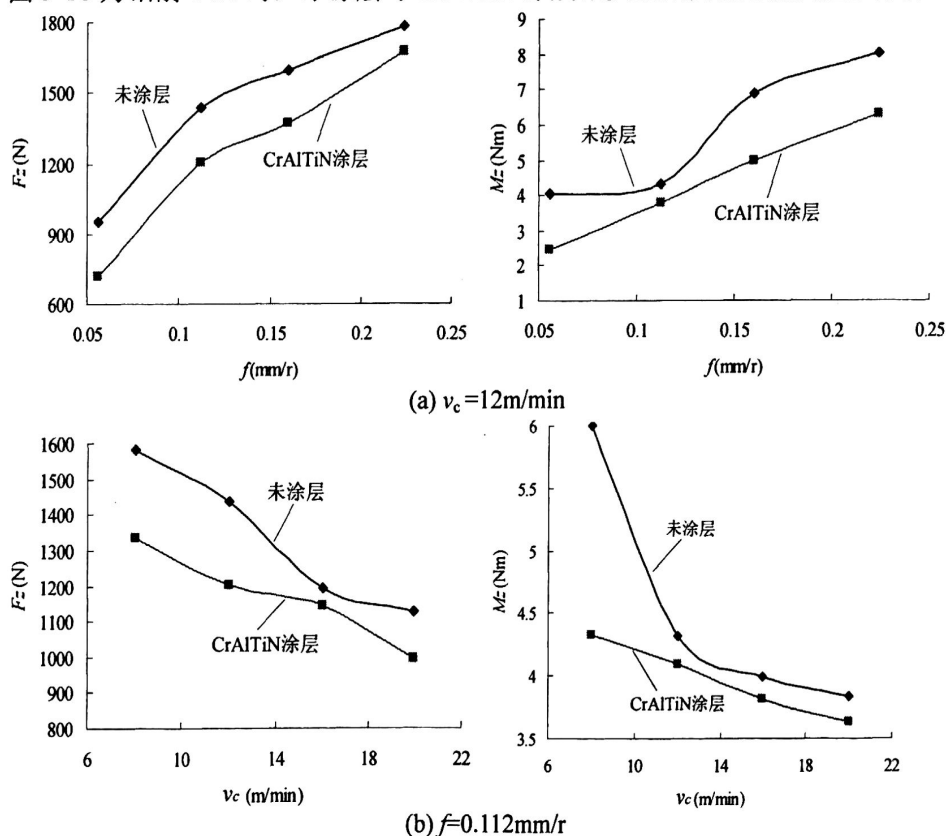


图 5-18 CrAlTiN 涂层与未涂层钻头钻削 TC4 时钻削力均值随切削用量的变化

Fig 5-18 Drilling forces change on CrAlTiN coated and uncoated drills with the cutting parameters in TC4

和钻削奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 钢时显示出来的力的特性一样, CrAlTiN 涂层钻头的轴向力和扭矩明显小于未涂层。与其不同的是, 钻削钛合金时, 轴向力和扭矩均随着切削速度的增大而减小, 在切削速度较小时, 两种钻头的切削力差异较为明显。

对 CrAlTiN 涂层钻头钻削 TC4 的实验数据用线性回归法总结出如下两因素经验公式:

$$F = 6195.8f^{0.556}v_c^{-0.197} \quad (5.28)$$

$$M = 32.43f^{0.763}v_c^{-0.187} \quad (5.29)$$

图 5-19 为 CrAlTiN 涂层钻头钻削 TC4 时钻削力模型回归值与实验值比较图, 可以看出经验公式与各试验点的拟合程度比较高。

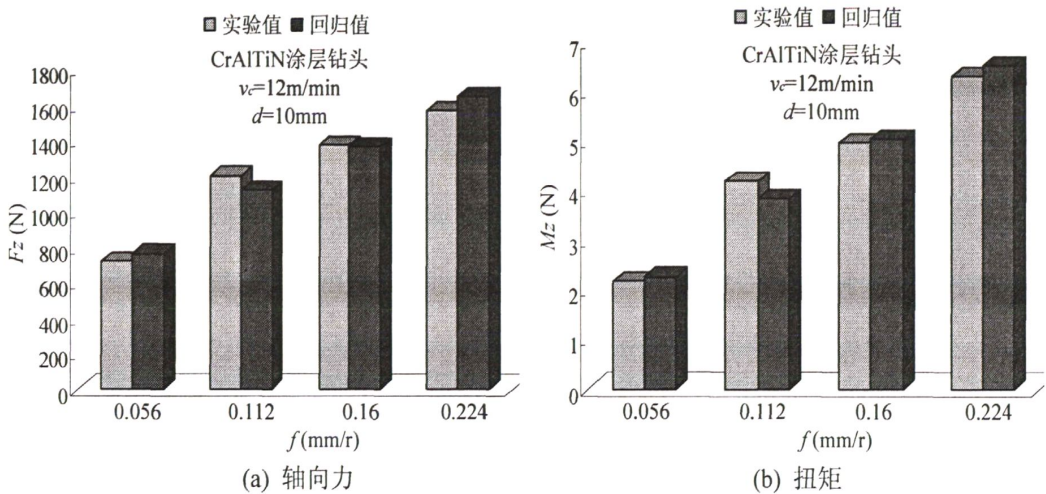


图 5-19 CrAlTiN 涂层钻头钻削 TC4 时钻削力模型回归值与实验值比较

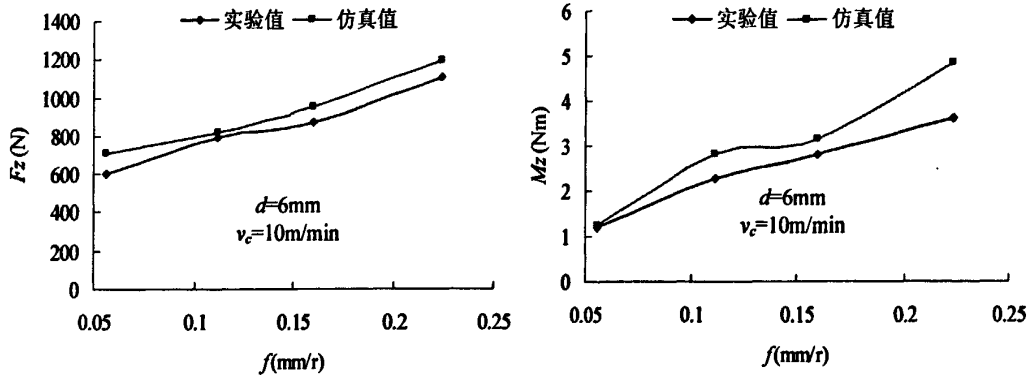
Fig 5-19 Drilling forces comparison of the model regression and the experimental values in TC4

与钻削铸铁相比, 钻削奥氏体不锈钢和钛合金时, CrAlTiN 涂层钻头的轴向力和扭矩明显小于未涂层, 此时 CrAlTiN 多元复合涂层的优势比较明显。如果加上适当的微量润滑 CrAlTiN 涂层钻头将会在难加工材料的钻削加工中取得更好的效果, 在这方面, 有待日后进一步试验研究。

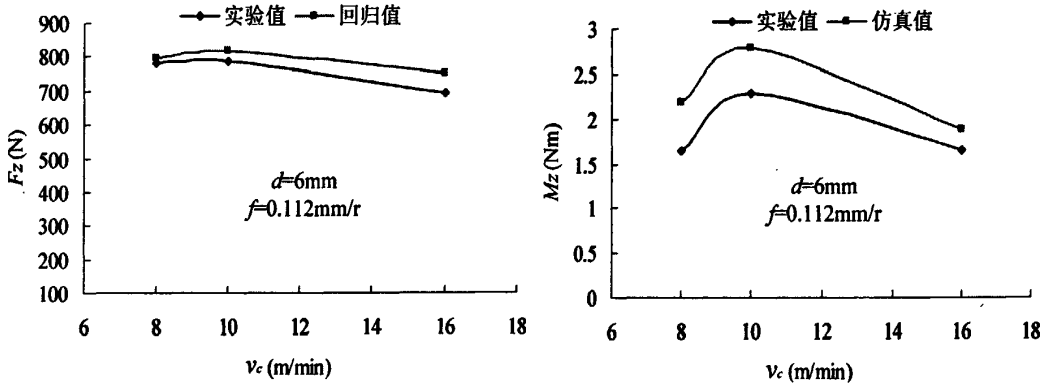
5.6 钻削力仿真结果分析与讨论

之所以进行钻削力的仿真分析, 就是为了寻求合适的数值模拟方法, 以替代传统的实验方法, 来研究钻削力, 为设计机床、合理选择切削用量等提供参考和依据, 从而节省研究费用, 减少加工时间。钻削力作为钻削机理的一个重要指标, 直接决定切削热的产生, 并影响刀具磨损、破损和使用寿命等。因此, 本文结合 45 钢和 TC4 的单因素钻削试验, 利用 DEFORM-3D 有限元软件建立这两种材料的钻削加工有限元仿真模型, 通过对钻削力的仿真值与实验值的比较, 来考察仿真模型的可靠性和准确性。

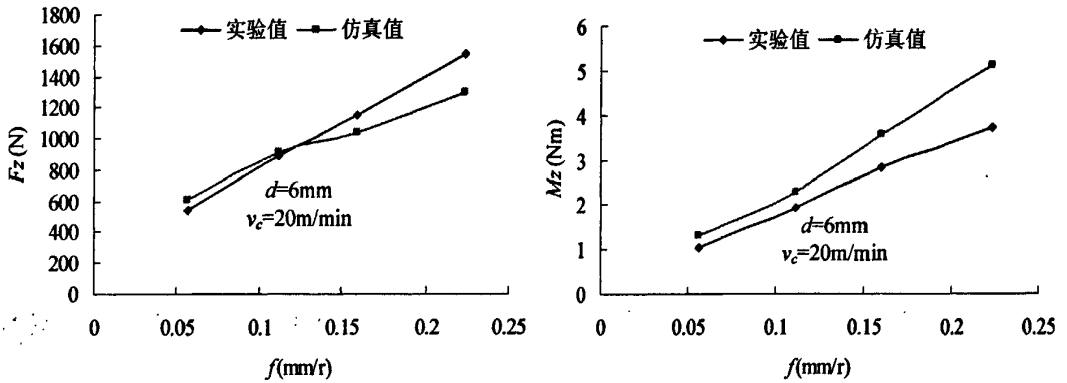
图 5-20 为钻削 TC4 和 45 钢和时, 仿真和实验所得钻削力随切削用量的的变化规律。可以看出, 有仿真与实验所得钻削力随切削用量的变化有着相同的变化趋势。



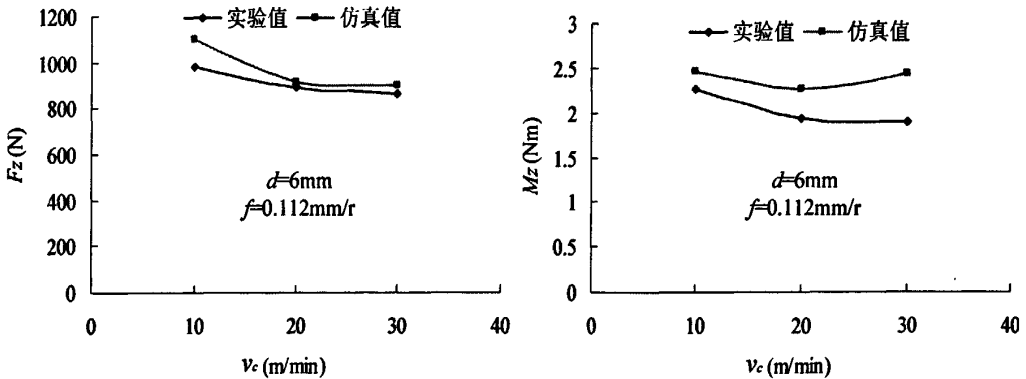
(a) 钻削 TC4 时钻削力随进给量的变化规律



(b) 钻削 TC4 时钻削力随切削速度的变化规律



(c) 钻削 45 钢时钻削力随进给量的变化规律



(d) 钻削 45 钢时钻削力随切削速度的变化规律

图 5-20 仿真与实验所得 TC4 和 45 钢钻削力随切削用量的的变化规律

Fig 5-20 The drilling forces change of simulation and experiment on 45 steel and TC4 with the cutting parameters

仿真结果和试验结果对比可以发现,除了具有共同的发展趋势外,进一步计算得出:45 钢轴向力平均误差为 9.89%,扭矩平均误差为 24.41%;TC4 轴向力平均误差为 8.09%,扭矩平均误差为 19.45%。扭矩误差相对较大,主要是因为随着钻削深度的增加,切削条件恶化,加之仿真过程中设定了摩擦条件,受到摩擦的影响,使扭矩较大。除此之外,与稳定状态的取值范围也有一定关系。

钻削加工中,仿真值与实验值存在误差的原因主要有以下几点:

(1) 有限元模型中的刀具设置为刚体,而实际钻削过程复杂,排屑困难,随着切削的进行,钻头出现不同程度的磨损,对钻削力会有较大影响。

(2) 实际加工时机床刚度不足,刀具会产生振动,而在仿真中是无法考虑的。

(3) 本构模型中的应力-应变关系与真实的钻削过程存在一定的差异。

(4) 硬件和人为操作的误差等。

考虑到以上原因,有限元仿真结果在可接受的范围内。表明本文所建立的模型较好地反映了钻削加工过程钻削力的变化趋势,有限元模拟仿真作为研究钻削力的一种分析手段是可信的。

5.7 本章小结

本章主要通过不同材料的单因素试验和正交试验、钻削力的分配、横刃修磨及 CrAlTiN 涂层钻头钻削试验来研究钻削力的特性。最后结合 45 钢和 TC4 的部分单因素钻削试验,利用 DEFORM-3D 有限元软件建立其钻削加工有限元仿真模型,考察仿真值与实验值的吻合程度,判断仿真模型的可靠性。主要得出以下结论:

(1) 切削速度对钻削力的影响较小,不同材料的切削速度变化对钻削力影响趋势不同。进给量和钻头直径的增大,都会导致钻削力增加,且影响程度较大。工件材料对切削力的影响很大。

(2) 建立了不同材料的钻削力经验模型,并对其进行显著性检验,表明可信度较高。

(3) 横刃承担一半以上的轴向力,主切削刃所承担的扭矩占全部扭矩的 80%左右。对钻头横刃进行 S 型修磨不仅能大大降低钻孔轴向力,而且能提高钻头的定位精度。

(4) CrAlTiN 涂层钻头钻削试验表明①在对切削加工性良好的材料进行钻削时,短期内 CrAlTiN 涂层钻头的优势发挥不明显;②在钻削 1Cr18Ni9Ti 和 TC4 的整个过程中,排屑相对较为顺畅,CrAlTiN 涂层钻头的轴向力和扭矩明显小于未涂层钻头,并且在切削速度和进给量较大时,表现的更为明显;③CrAlTiN 涂层钻头具有良好的润滑作用,能显著改善其摩擦特性并提高其切削性能。建立了 CrAlTiN 涂层钻头钻削铸铁 HT200、1Cr18Ni9Ti 和 TC4 的两因素经验公式,并且与实际钻削加工拟合程度较高。

(5) 结合 45 钢和 TC4 的钻削试验所建立的有限元仿真模型,较好地反映了钻削加工过程钻削力的变化趋势,所以有限元仿真可以作为研究钻削过程的重要辅助工具。

6 结论和展望

6.1 结论

切削力作为金属切削加工中主要的物理现象,它直接影响着刀具的耐用度和已加工表面质量,并且是设计机床、夹具时的重要依据。本论文围绕干式切削条件下钻削力的试验研究与仿真,首先阐述了切削力的来源和影响因素,并分析标准麻花钻的结构要素和钻削原理;其次,利用有限元软件 DEFORM 对 45 钢的钻削过程进行仿真,预测了加工中轴向力、扭矩的大小和切削温度的分布,分析进给量和切削速度对钻削力和钻削温度的影响;再次,对 45 钢、铝硅合金 ZL207、硬铝 LY12 和铸铁 HT200,以及高强度钢 30CrMnSiA、奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和钛合金 (Ti-6Al-4V) 进行系统的钻削试验,建立了不同材料的钻削力经验模型,研究并分析钻削力分配比例及修磨横刃对钻削力的影响等。最后对部分实验进行有限元仿真,检验有限元模型的可靠性。论文的主要研究成果和结论如下:

(1) 对 45 钢钻削过程的仿真研究表明:①钻削 45 钢时,切削用量对轴向力和扭矩的影响趋势一致。钻削速度对钻削力的影响较小,且随钻削速度的增大,轴向力有减小的趋势;进给量对钻削力的影响较大,随着进给量的增大,轴向力和扭矩明显增大。②切削速度和进给量的增加都会使钻削温度升高,且切削速度的影响程度更大。

(2) 对于不同材料,切削速度变化对钻削力影响趋势不同,但总的来说切削速度对钻削力的影响较小。进给量和钻头直径对钻削力的影响程度大于切削速度对其的影响。

(3) 工件材料的化学成分和物理机械性能对切削力的影响很大。相同条件下 1Cr18Ni9Ti、30CrMnSiA 和 Ti-6Al-4V 的钻削力比实验中其他材料大很多,主要是由于它们的塑性、韧性、强度、硬度、导热系数和加工硬化现象等不同于其他材料。

(4) 在单因素试验的基础上,对所有实验材料进行三因素三水平的正交试验,建立了不同材料的钻削力经验模型,并对其进行显著性检验,表明所建立的经验模型可信度较高。

(5) 进一步证实了钻削力的分配规律:横刃承担一半以上的轴向力,主切削刃承担 80%左右的扭矩。同时,对钻头横刃进行 S 型修磨可以大大降低轴向力,而且能提高钻头的定位精度。

(6) CrAlTiN 涂层麻花钻的钻削试验表明:①CrAlTiN 涂层钻头具有良好的润滑作用,能显著改善摩擦特性并提高其切削性能;②在钻削切削加工性良好的材料时,短期内(钻孔个数较少时)CrAlTiN 涂层钻头的优势发挥不明显,而在钻削 1Cr18Ni9Ti 和 TC4 的整个过程中,排屑相对顺畅,CrAlTiN 涂层钻头的钻削力明显小于未涂层钻头的,并切削速度和进给量较大时,表现的更明显;③所建立的 CrAlTiN 涂层钻头两因素经验公式与实际钻削加工拟合程度较高。

(7) 结合实验所建立的有限元仿真模型,较好地反映了钻削加工过程中钻削力的变化趋势。

6.2 展望

本文通过系统的钻削试验和仿真分析,对钻削不同材料时的钻削力特性做了深入的研究,取得了一定的成果,但由于课题涉及面广且工作量大,受时间和精力限制,在某些方面还存在不足,后续需要进一步完善。有待于进一步深入研究的内容如下:

(1) 增加单因素试验的试验点,并扩大因素的试验范围,以便更细致的描述各个因素对钻削力的影响规律。由于实验条件限制,本次试验所用的 Z5125 立式钻床的最高转速为 2000r/min,对部分试件(如铸铁、硬铝等)来说,还可取更高的切削速度来研究它对钻削力的影响。

(2) 钻削仿真是一种高度非线性数值计算过程,但由于计算机性能所限,此次仿真过程中对刀具和工件的网格划分还不够细,步长设置的较大,因此仿真值与实验值之间还有一定的差别。随着计算机硬件和软件技术的发展,以及有限元理论的日趋完善,预计未来采用有限元软件计算出的结果将与真实值更加接近。

(3) 在钻削 1Cr18Ni9Ti 和 Ti-6Al-4V 时, CrAlTiN 多元复合涂层的优势比较明显。如果加上适当的微量润滑,可能会在钻削难加工材料时,取得更好的效果,在这方面,有待日后进一步试验研究。

致 谢

本论文是在尊敬的导师肖继明教授的严格要求和悉心指导下完成的，从论文的选题、方案构思、实验实施以及最后的审阅和修改，无不倾注着导师大量的心血和汗水。肖老师正直的人品、渊博的学识和谦虚严谨的治学作风以及高度的责任心深深地感染着我。近三年来，导师言传身教和谆谆教诲始终激励和鞭策着学生不断进取，是学生最宝贵的精神财富，并使学生终身受益。值此论文完成之际，谨向尊敬的导师致以崇高的敬意和最衷心的感谢！

在论文写作的过程中，还得到李言教授、郑建明教授、李淑娟教授、杨明顺副教授、王凯副教授、高新勤副教授、袁启龙副教授、汤奥菲副教授、李鹏阳副教授、孔令飞副教授等诸多老师的指导和杨晓明、姚勋和刘林等同学的帮助，在此向他们致以最诚挚的感谢。

在课题的研究过程中，参阅和引用了大量的参考文献，在此对这些文献作者的开拓性成果表示深深的敬意！

感谢默默支持本人完成学业的父母、姐姐和哥哥，感谢他们为作者所作的巨大奉献和无私支持！

感谢百忙中抽出宝贵时间评审论文的各位老师。

最后，谨向所有给予作者关怀和帮助的师长、同学和朋友致以诚挚的谢意！

参考文献

- 【1】 王磊,王贵成,马利杰. 钻削加工有限元仿真的研究进展[J]. 工具技术, 2007, 41(8):8-12.
- 【2】 熊良山,师汉民,陈永洁. 钻头与钻削研究的历史、现状与发展趋势[J]. 工具技术, 2005, 39(8): 11-14.
- 【3】 C. J. Oxford. On the Drilling of Metals-I: Basic Mechanics of the Process [J]. Trans. ASME, 1955, 77: 103-104.
- 【4】 J. L. Wang. Development of New drilling force models for improving drill point geometries [D]. University of Michigan, 1994.
- 【5】 Vivek Chandrasekharan. A model to predict the three-dimensional cutting force system for drilling with arbitrary point geometry [D]. University of Illinois, 1996.
- 【6】 Ye Chen. Drilling process modeling for new drilling process development [D]. University of Michigan, 1999
- 【7】 董丽华,刘大昕. 钻削力模型的建立及仿真[J]. 机械工程师, 2003, 7:27-30.
- 【8】 Strenkowski J S, Hsieh C C, Shih A J. An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44:1413-1421.
- 【9】 王军,刘勇兵,杨晓红等. 压铸镁合金 AZ91D 钻削力经验公式[J]. 吉林大学学报 2005,35 (2): 145~147.
- 【10】 孙路华,全燕鸣,钟文旺等. 碳纤维复合材料高速钻削力的研究[J]. 航天制造技术, 2005, 6 (3): 9~12.
- 【11】 张厚江,樊锐,陈五一等. 高速钻削碳纤维复合材料钻削力的研究[J]. 航空制造技术, 2006, 12: 76~79.
- 【12】 J. Wang, Q. Zhang. A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part II: Predictive force models [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48:1286-1295.
- 【13】 吴健. 典型难加工材料钻削相关技术的基础研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- 【14】 侯恩光. 基于有限元法的钻削力预报研究[D]. 西华大学, 2010.
- 【15】 陈锡渠,彭晓南. 金属切削原理与刀具[M]北京:中国林业出版社, 2006.
- 【16】 黄国权. 有限元法基础及 ANSYS 应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- 【17】 A R Watson. Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. I—IV [J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1985.
- 【18】 王慧东. 高锰钢钻削加工仿真与实验研究[D]. 大连交通大学, 2009.
- 【19】 E. Usui, A. Hirota, M. Masuko. Analytical prediction of three dimensional cutting Process. Part I: Basic cutting model and energy approach [J]. Trans. ASME, 1978, 100(2)229-235.

- 【20】 Usui E, Shirakashi T. Mechanics of machining-form descriptive to predictive theory, On the art of cutting metals—75 years later attribute to F W Taylor [J]. ASME PED-7 1982.13-30
- 【21】 Lajczok M R. A Study of Some Aspects of Metal Cutting By The Finite Element Method [D].NC State University, 1980.
- 【22】 K.H. Fuh, W.C. Chen and P.W. Liang. Temperature Rise in Twist Drills with a Finite Element Approach [J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 1994, 21(3): 345-358.
- 【23】 Chang-Chi Hsieh. Development of a Force and Temperature Twist Drill Model for AISI 1020 Steel [D]. North Carolina State University, 1998
- 【24】 Huang J M, Black J T. An evaluation of chip separation criteria for the FEM simulation of machining[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118:545-554.
- 【25】 Lianchi ZHANG. On the separation criteria in the simulation of orthogonal metal cutting using the finite element method [J]. Journal of Material Processing Technology, 1999,88-89:273-278.
- 【26】 Ceretti E, Fallbohmer P, Wu W T and Altan T. Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting [J]. Journal of Material Processing Technology, 1996, 59: 168-180.
- 【27】 Ceretti E, Altan T. Simulation of metal flow and fracture application in orthogonal cutting, blanking and cold extrusion [J]. Annal of CIRP, 1997, 46(1), 187-190.
- 【28】 Ceretti E, Lucchi M, Altan T. FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation [J]. Journal of Material Processing Technology, 1999, 95:17-26.
- 【29】 Ceretti E, Lazzaroni C, Menegardo L, Altan T. Turning simulation using a three—dimension FEM code[J]. Journal of Material Processing Technology, 2000, 98:99-103.
- 【30】 Matthew Bono. Jun Ni. A Method for Measuring the Temperature Distribution along the Cutting Edges of a Drill [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002,124:921-923.
- 【31】 Matthew Bono. Jun Ni. A Model for Predicting the Heat Flow into the Workpiece in Dry Drilling [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002, 124:773-777.
- 【32】 Lin Zhang. Material characterization for finite element simulation of orthogonal cutting and drilling[D]. University of Michigan, 2003.
- 【33】 J S Strenkowski, C C Hsieh, A J Shih. An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004,44:1413-1421
- 【34】 LinZone-Ching, LaiWun-Ling, LinHY and LiuCR. The study of ultra-precision machining and residual stress for NP alloy with different cutting speeds and depth of cut [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 200-210.
- 【35】 方刚, 曾攀. 金属正交切削工艺的有限元模拟[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4) :641-645.
- 【36】 黄志刚, 柯映林, 王立涛. 金属切削加工有限元模拟的相关技术研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10):846-849.

- 【37】 白亚江, 杜云芝. 麻花钻钻削过程的有限元动态仿真[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(10): 1143-1146.
- 【38】 杨军, 周利平, 吴能章. 基于 Deform-3D 的钻削力仿真研究[J]. 工具技术, 2007, 41(4): 50-53.
- 【39】 韩荣第, 杨昌琪, 吴健. 麻花钻的数学建模及钻削过程有限元分析[J]. 工具技术, 2008, 42(4): 52-57.
- 【40】 洪明虎. 基于 Deform 3D 加工中心钻削加工仿真研究[J]. 机械制造, 2010, 48(549): 18-19.
- 【41】 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具 (第 4 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 【42】 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具 (第 3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 【43】 朱祖良. 孔加工刀具[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- 【44】 孟强. 浅谈麻花钻几何角度对切削性能的影响[J]. 科技风, 2010, (23).
- 【45】 胡建军, 李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- 【46】 武文革, 黄美霞. 基于 DEFORM-3D 的高速车削加工仿真[J]. 现代制造工程, 2009(11): 91-94.
- 【47】 李伟. 基于 Ti(C,N)基金属陶瓷刀具的金属切削过程的有限元分析[D]. 合肥工业大学, 2007.
- 【48】 王慧东. 基于 Defrom 的高锰钢钻削加工仿真[J]. 科协论坛, 2009, (7)98-99.
- 【49】 李传民, 王向丽, 闫华军等. DEFORM5.03 金属成形有限元分析实例指导教程教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- 【50】 Hossainy T M, Shazly M H, Rabou M. Finite element simulation of metal cutting considering chip behavior and temperature distribution [J]. Mater Manuf Processes, 2001, 16: 803-814.
- 【51】 Warnecke G, Oh J D. A new thermo-visco plastic material model for finite element analysis of the chip formation process [J]. CIRP Ann, 2002, 51: 79-82.
- 【52】 卜繁岭. 高锰钢钻削加工的试验研究[D]. 大连交通大学, 2007.
- 【53】 肖继明, 李言, 白力静等. CrAlTiN 涂层高速钢刀具的切削性能和磨损特性[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(6): 117-121.
- 【54】 肖继明. 梯度涂层高速钢刀具切削性能及磨损失效机理研究[D]. 西安理工大学, 2007.
- 【55】 袁哲俊. 金属切削实验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 【56】 肖继明, 李言, 吴玉生等. D406A 超高强度钢的钻削性能[J]. 宇航材料与工艺, 2006, (1): 49-52.
- 【57】 齐德新, 马光锋, 张桂木. 钛合金切削加工性综述[J]. 煤矿机械, 2002, (11): 3-5.
- 【58】 陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2010, (15): 27-30.
- 【59】 魏树国, 吴照银, 马光锋等. 钛合金的切削加工性及其改善方法[J]. 工具技术, 2005, 39(12): 50-51.

攻读硕士学位期间发表的论文及参与项目

发表论文

王超, 肖继明. 基于 DEFORM-3D 的钻削力仿真分析[C]. 2011 年西安理工大学研究生学术年会论文集. 中国西安, 2011.

参与项目

切削力及分力比例计算方法研究, 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划), 项目编号: 2009CB724406.