

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.02.005

通孔干式铣削内冷流场的数值模拟研究*

林钰珍¹, 于大国², 张成龙³

(1. 衢州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 衢州 324000;

2. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051; 3. 浙江逊龙机器人科技有限公司, 浙江 金华 321000)

摘要:针对通孔干式铣削的冷却和排屑问题,提出了采用三爪卡盘夹紧工件、压力气体从孔底注入加工区进行冷却和排屑的创新工艺方案。采用整体立式铣刀的三维精确模型,辅助建立了铣削加工区的三维湍流模型;基于 Fluent 软件的标准 $k \sim \varepsilon$ 湍流模型和多重旋转坐标系 MRF 方法,对气流从铣刀中心孔和从孔底 5 种角度射出时,铣削加工区的压力场和速度场进行了对比分析。研究表明:气流从偏离孔底径向 15° 背离容屑槽射出时,铣刀附近、容屑槽螺旋壁面、周刃螺旋壁面的气体压力分布和容屑槽、周刃螺旋壁面的气体流速情况有效地改善了加工区的冷却和排屑条件,研究成果为优化通孔干式铣削加工区气流射出角度和流场提供了理论依据。

关键词:干式铣削;绿色切削;气流;压力场;速度场

中图分类号:TH162;TG54

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)02-0138-06

Numerical simulation of the internal cold flow field in through-hole dry milling

LIN Yu-zhen¹, YU Da-guo², ZHANG Cheng-long³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Zhejiang Sunlong Robot Technology Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

Abstract: Aiming at the problems of cooling and chip removal in through-hole dry milling, an innovative process scheme for cooling and chip removal by using three-jaw chuck to clamp workpiece and injecting pressure gas from the bottom of the hole into the processing area was proposed. Three-dimensional turbulence model of milling area was established by using three-dimensional accurate model of integral vertical milling cutter. Based on standard $k \sim \varepsilon$ turbulence model and MRF method in multiple rotating coordinate system of Fluent software, the pressure and velocity fields in the milling zone were compared and analyzed when the air flow was ejected from the center hole of the milling cutter and from the five angles of the bottom of the hole. The results indicate that the gas pressure distribution near the milling cutter, the spiral wall of the chip-containing groove and the spiral wall of the circumferential edge, and the gas velocity of the chip-containing groove and the spiral wall of the circumferential edge can effectively improve the cooling and chip removal conditions in the processing area when the gas flow is ejected from the direction of deviation from the hole bottom diameter 15° and depart from the chip holder groove. The research results provide a theoretical basis for optimizing the air injection angle and flow field in through-hole dry milling zone.

Key words: dry milling; green cutting; airflow; pressure field; velocity field

0 引言

高速铣削具有切削力小、切削效率高等优点,可获

得高质量的加工表面^[1,2]。高速铣削加工中冷却非常重要。传统喷淋式切削使用大量的切削液,严重威胁工人的身体健康,处理混杂切屑的废液也成为困扰企

收稿日期:2019-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875532)

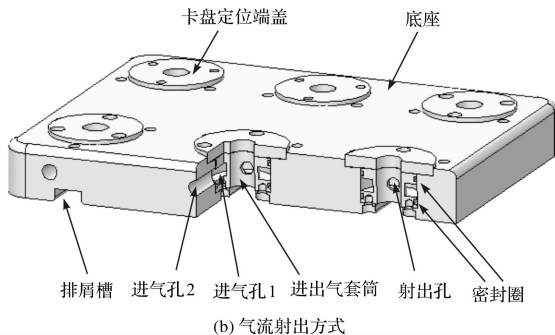
作者简介:林钰珍(1984-),女,浙江金华人,硕士,讲师,主要从事机械优化及生产设备自动化设计方面的研究。E-mail:361250302@qq.com

业的一个环保难题。传统喷淋式切削已经处于被淘汰的边缘^[3],少无切削液使用的铣削加工技术颇受关注,干式铣削成为绿色切削追求的终极目标。

根据切削介质的状态,少、无切削液使用的加工技术主要有:干切削、低温冷风切削、微量润滑切削和低温微量润滑切削等^[4]。白海平^[5]以 P20 淬硬模具钢为研究对象,基于实验方法对大的轴向深切下空气风冷、油膜水滴、MQL 等冷却方式展开了研究,从铣削力、切屑、刀具磨损及机理等方面进行了对比分析,发现空气风冷方式的加工效果最好,油膜水滴次之,MQL 方式最差;尹凝霞^[6]针对空气和切削液两种介质,运用 Fluent 软件完成了高速内冷铣刀加工区的数值模拟计算,得到了两者的速度场和压力场,得出了空气冷却时孔底部速度较快,在孔壁切削液上升速度更明显,切削液冷却效果更好的结论,但两者速度场最大值均小于 7 m/s,且两者压力场中负压区占比较大;李广慧^[7]



(a) 装夹方式



(b) 气流射出方式

图1 装夹及气流射出方式

在加工中心或雕铣机上安装多个三爪卡盘夹紧外圆工件,由于卡盘固定在底座上,通过数控编程使刀具按照预设轨迹在工件之间移动可以省去对刀时间,提高加工效率。

图1(a)中工件带通孔结构,铣削时内孔空间狭小不利于冷却和排屑,为此笔者提出了压力气体从孔底注入进行冷却和排屑的工艺方案。气流射出方式如图1(b)所示。

安装卡盘的底座结构主要由底座、进出气套筒、密封圈和卡盘定位端盖等组成。进出气套筒和卡盘定位端面分别通过螺钉固定在底座上,进出气套筒的外圆上开有环形储气槽,环形储气槽的槽口即进气孔1与底座上的进气孔2相对,高压气体由底座上的进气孔2注入进出气套筒的进气孔1,进出气套筒的内圆上开有3个均布的射出孔,高压气体经由射出孔流向由底座、卡盘和工件内孔所组成的中空区域。

2 数值模型

2.1 铣刀结构

基于参考文献[8]中的整体式立铣刀实例参数,

针对高速内冷铣削,利用切削液冷却时可能存在的空化现象,运用 Fluent 软件完成了切削区流场分析,得到了内冷铣刀不会出现空化现象的临界转速为 20 000 r/min,当铣刀转速低于该临界转速时,空化过程中从切削液游离出来的气泡混杂碎屑会不可避免地冲击刀具,造成材料气蚀破坏。

针对带通孔外圆工件,本文将在干铣削通孔时利用多个三爪卡盘分别夹紧工件以减少对刀时间,让压力气体从孔底注入进行冷却和排屑,运用 Fluent 软件对底座、卡盘和工件内孔区域的流场进行数值模拟,对比冷却气体从铣刀中心孔直射、从底座径向射出以及从偏离底座径向 $\pm 15^\circ$ 和 $\pm 30^\circ$ 射出时气流的压力场和速度场,优选出底座上的气流射出角。

1 通孔干式铣削工艺方案

装夹及气流射出方式如图1所示。

本研究在 Creo 软件中绘制容屑槽端截面形状,经混合扫描生成铣刀主体部分,计算 Gash 面五面体顶点坐标,经混合扫描在铣刀主体部分中移除 4 个 Gash 面五面体,最后生成底刃前、后刀面。

2.2 计算区域及边界条件

计算区域及边界条件如图2所示。

笔者将其导入 Gambit 软件,建立包括底座、进出气套筒、卡盘定位端盖、三爪卡盘和工件内孔至铣刀之间可填充气体的区域作为气流场的计算区域。气流从铣刀中心孔直射、气流从孔底射出时的计算区域及边界条件分别如图2(b,c)所示。

(1)图2(b)中将铣刀中心圆柱体进气孔的上端面设置成压力入口;

(2)图2(c)中3个气流射出孔均布在卡盘下侧,将3个气流射出孔设置成压力入口,由于进出气套筒出射孔长度只有 3 mm,建模时未考虑该段影响;

(3)图2(b,c)中将铣削区上端面设置成压力出口;

(4)图2(b,c)中3个均布压力出口分别是介于工件下端面、卡盘上端面和相邻卡爪侧面之间的3个开

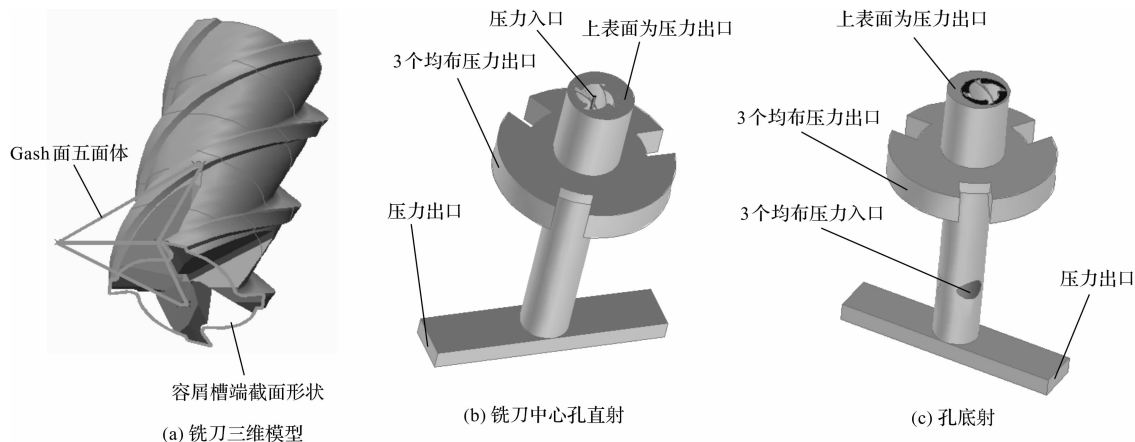


图2 计算区域及边界条件

放面;图2(b,c)中长方体处的压力出口即图1(b)中的底座排屑槽;图2(c)中气流射出孔偏离径向 30° 背离容屑槽,另外建立的5种气流射出孔方案分别为:射出孔沿进出气套筒径向,射出孔偏离径向 15° 、 30° 面向容屑槽,射出孔偏离径向 15° 背离容屑槽。

2.3 数值计算

笔者采用四面体网格对计算区域划分网格,其中,动区域网格尺寸为 1 mm ,静区域网格尺寸为 2 mm 。将5种孔底射出和中心孔直射气流计算区域的网格模型分别导入Fluent软件中,采用标准 $k \sim \varepsilon$ 湍流模型;设置压力入口的表压为 $3 \times 10^5\text{ Pa}$,压力出口的总压为

1个标准大气压;采用多重旋转坐标系MRF实现动静界面间数据传递^[9-10];设置铣刀转速为 $10\,000\text{ r/min}$;设置速度、 k 、 ε 的计算收敛误差均小于 10^{-5} 。

3 结果与分析

3.1 竖直平面上的压力场

为了研究铣削区域的压力场,笔者截取反应铣刀偏心位置且通过内孔回转轴线的竖直平面上的压力场,得到气流从铣刀中心孔直射和从孔底5种角度射出时竖直平面上的压力场,如图3所示。

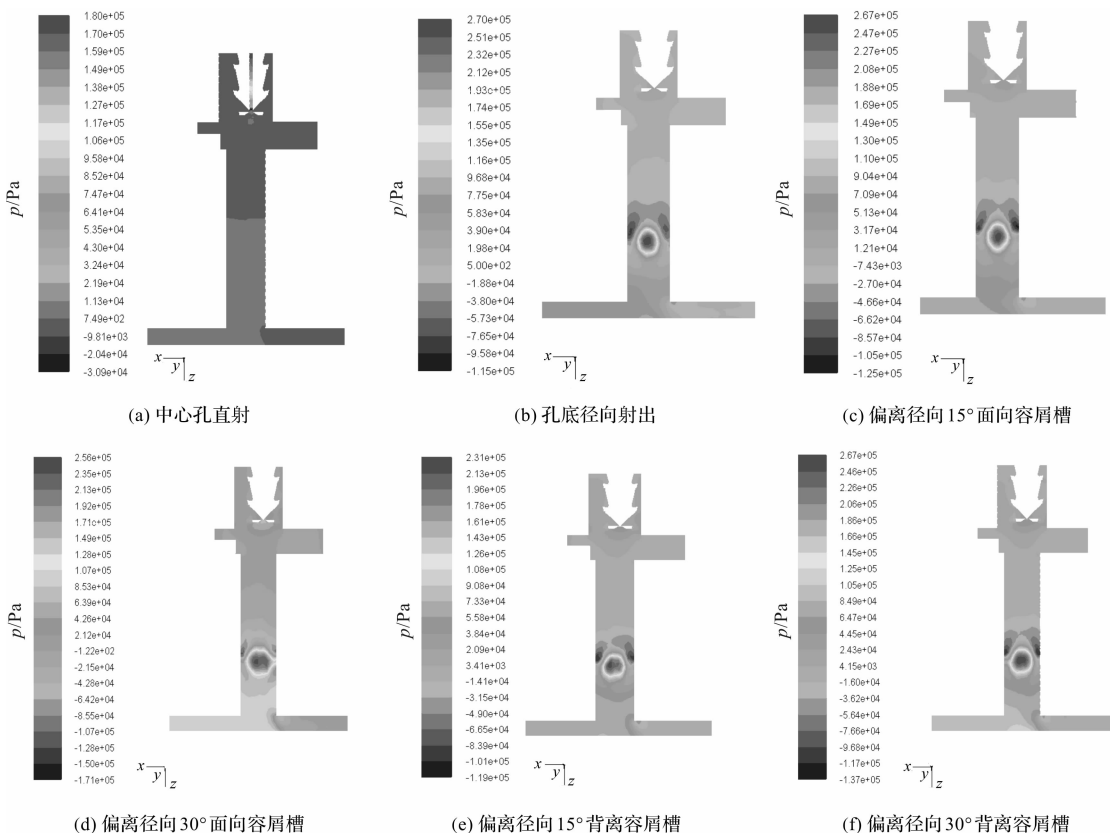


图3 竖直平面上的压力场

由图 3(a)可知:高压气体从铣刀中心孔射出后压力迅速降低,立铣刀附近充满负压气体;由图 3(b~f)可知:高压气体从孔底射出后受铣刀底刃轴端面阻挡在铣刀附近形成压力较高的气体区域,气体区域面积由大到小依次为气流射出孔偏离径向 30°面向容屑槽、偏离径向 15°背离容屑槽、偏离径向 30°背离容屑槽、偏离径向 15°面向容屑槽和沿径向 5 种方案所形

成的气体区域。铣削区域的高压气体区域占比越大,越有利于冷却。

3.2 竖直平面上的速度场

为了研究铣削区域的速度场,笔者截取反应铣刀偏心位置且通过内孔回转轴线的竖直平面上的速度场,得到气流从铣刀中心孔直射和从孔底 5 种角度射出时竖直平面上的速度场如图 4 所示。

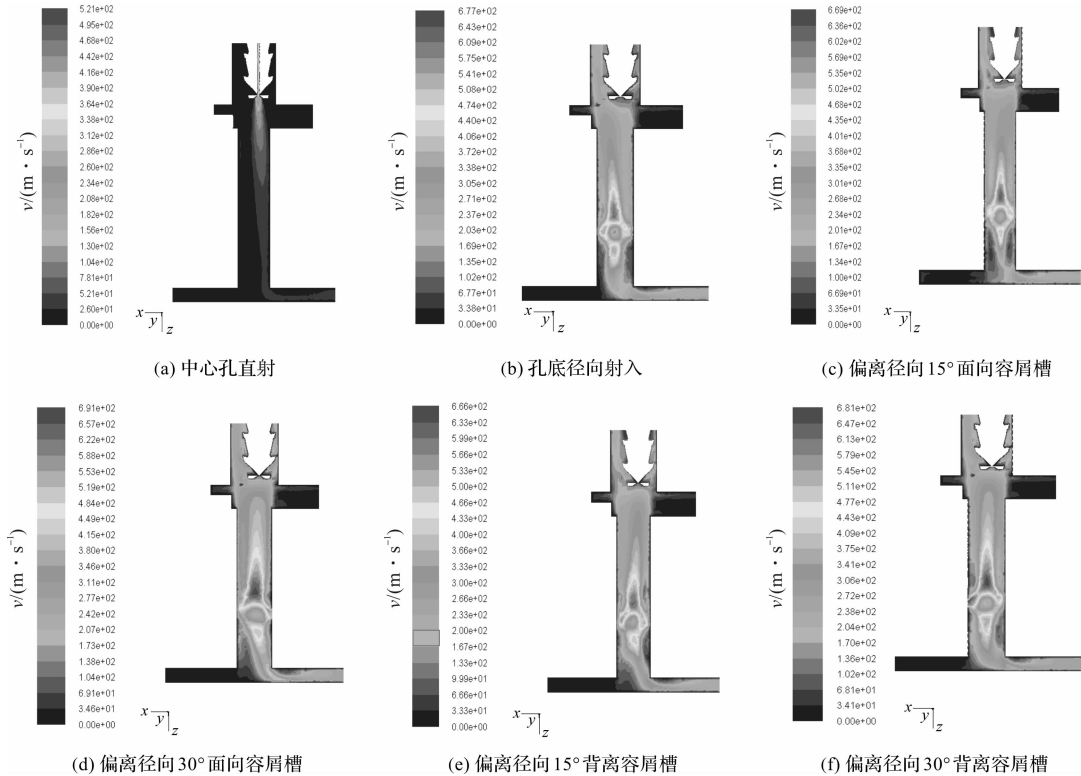
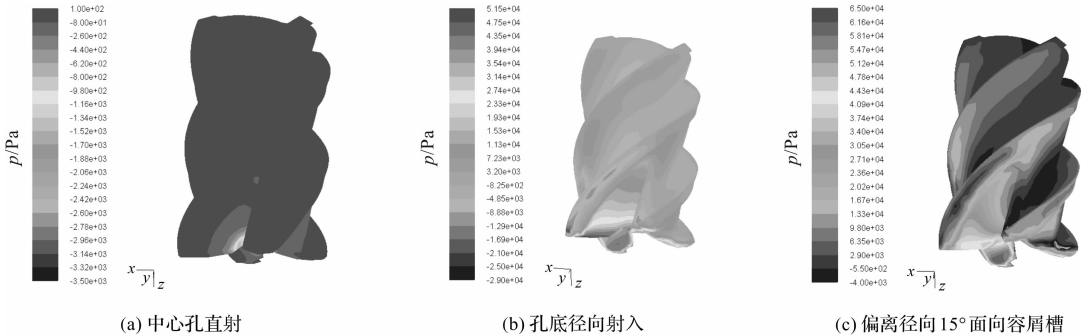


图 4 竖直平面上的速度场

由图 4(a)可知:高压气体从铣刀中心孔射出后速度迅速降低并沿底座排屑槽流出,铣削区气体流速极低甚至为零;由图 4(b~f)可知:高压气体从孔底射出后沿最上侧的铣刀压力出口和最下侧的底座排屑槽流出,因此铣削区域的铁屑可随气流向上排出。

3.3 铣刀压力场

为了研究铣刀处的压力场,笔者选取动区域铣刀转动壁面的压力场,得到气流从铣刀中心孔直射和从孔底 5 种角度射出时的铣刀压力场如图 5 所示。



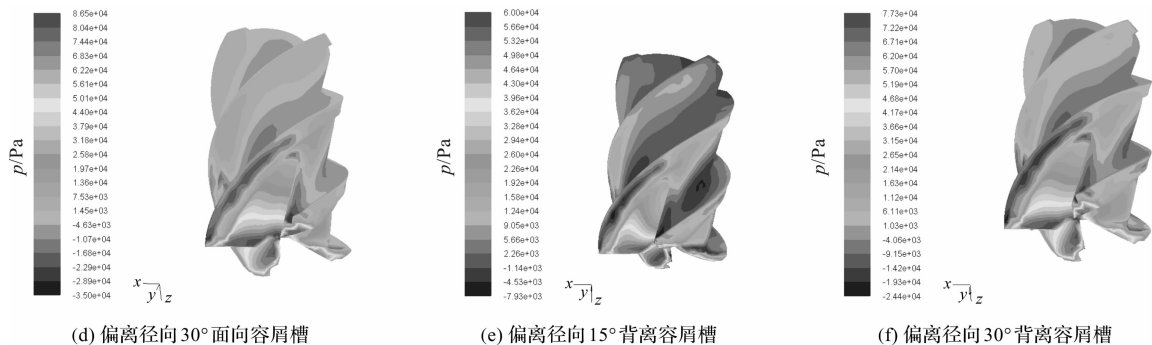


图 5 铣刀压力场

由图 5(a)可知:高压气体从铣刀中心孔射出后中心孔附近的压力迅速降低,铣刀螺旋壁面压力基本保持恒定;由图 5(b~f)可知:高压气体从孔底射出后受铣刀底刃轴端面阻挡,底刃轴端面上气体压力较高并沿底刃 Gash 面逐渐降低,周刃螺旋壁面上的气体压力高于容屑槽螺旋壁面上的气体压力,且容屑槽螺旋壁

面上的气体压力为负值,有利于铁屑向容屑槽聚集。

3.4 铣刀速度场

为了研究铣刀处的速度场,笔者选取动区域铣刀转动壁面的速度场,得到气流从铣刀中心孔直射和从孔底 5 种角度射出时的铣刀速度场如图 6 所示。

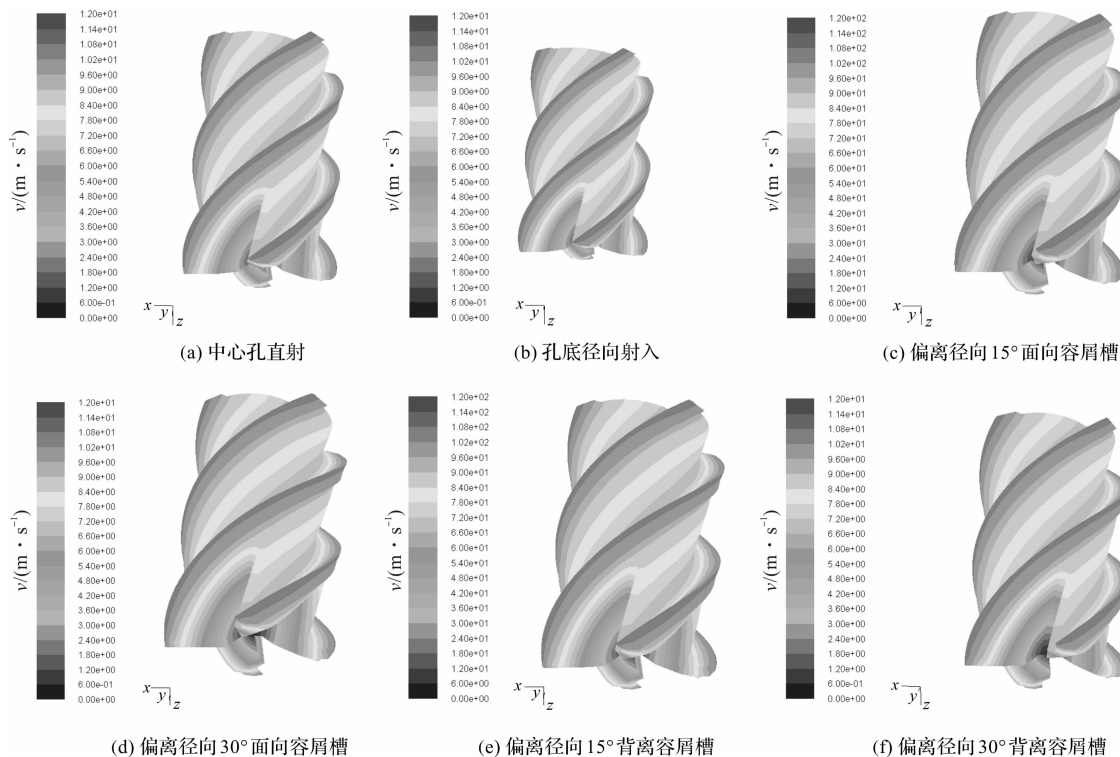


图 6 铣刀速度场

由图 6(a,b,d,f)可知:高压气体从孔底其余 4 种方案射出时,铣刀壁面最高气体流动速度低于 12 m/s;由图 6(c,e)可知:高压气体从孔底偏离径向 15° 面向、背离容屑槽射出时,铣刀壁面上气体最高流动速度约 120 m/s,且容屑槽螺旋壁上的气体流动速度可达

60 m/s,有利于冷却和排屑。

4 结束语

本文提出了铣削内孔时利用三爪卡盘夹紧带通孔外圆工件、压力气体从孔底注入铣削区域进行冷

却和排屑的工艺方案,采用基于 Fluent 的 CFD 软件,对气流从铣刀中心孔、从孔底径向、偏离径向 $\pm 15^\circ$ 和 $\pm 30^\circ$ 射出时的气流场进行了数值模拟分析,得出以下结论:

(1)相较于高压气体从铣刀中心孔射出,高压气体从孔底射出能使铣削区形成高压气体区域有利于冷却;

(2)气流由孔底射出至铣削区域时,铣刀容屑槽螺旋壁面气体压力为负值且气体可向铣刀压力出口排出,有利于铁屑向容屑槽聚集和向上排屑;

(3)气流由孔底偏离径向 15° 背离容屑槽射出时铣削区的高压气体面积较大且均匀,铣刀周刃螺旋壁面和容屑槽螺旋壁面的气体流动速度较大,冷却和排屑条件得到改善。

参考文献(References):

[1] 袁松梅,韩文亮,朱米远,等.绿色切削微量润滑增效技术研究进展[J].机械工程学报,2019,55(5):175-185.
[2] VAN LUTTERVEL T C A, CHILDS T H C, JAWAHIR I

S. Present situation and future trends in modelling of machining operations[J]. CIRP Annals,1998,47(2):587-626.
[3] 陈光明.数控超高压水射流切割技术的特点及其应用[J].机床与液压,2007,35(8):64-68.
[4] 祝亚京.内冷式 MQL 铣削工艺基础研究[D].镇江:江苏科技大学机械工程学院,2017.
[5] 白海平.多种气液体冷却方式的淬硬钢深切高速铣削研究[D].广州:广东工业大学机电工程学院,2018.
[6] 尹凝霞,谭光宇,李广慧,等.基于 Fluent 的高速内冷铣削加工区数值模拟[J].东华大学学报,2017,43(4):511-514.
[7] 李广慧,尹凝霞,谭光宇,等.高速内冷立铣刀的三维空化湍流计算[J].工具技术,2019,53(4):42-44.
[8] 李国超,孙杰,李剑峰,等.整体立铣刀三维精确建模与软件实现[J].计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(3):411-417.
[9] 温正,石良辰,任毅如.FLUENT 流体计算应用教程[M].1版.北京:清华大学出版社.2009.
[10] 周俊杰,徐国权,张华俊.Flulent 工程技术与实例分析[M].1版.北京:中国水利水电出版社.2010.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式: