

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.003

球头铣刀铣削 SKD61 钢三维仿真研究

董佳灵, 黄立新, 何祥圣

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对模具钢切削性能差,严重制约了模具的精密发展和模具钢材料的推广问题,对球头铣刀铣削模具钢的加工过程进行基础工艺研究。以三维仿真为基础进行 SKD61 钢铣削力实验。在 SKD61 钢的三维仿真研究方面,利用球头铣刀进行了曲面铣削有限元仿真,对仿真结果进行分析,结果表明:SKD61 模具钢切屑在切削过程不连续、易断;铣削初始阶段,刃口受到径向冲击影响,铣削力高于稳定铣削阶段。研究发现不同的工艺参数对铣刀刃口应力的影响有差异,其中每齿进给量的影响较为关键。

关键词:模具钢;曲面铣削;球头铣刀;工艺优化;有限元分析

中图分类号:TH162;TB115.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)02-0011-08

Research on Three-Dimensional Simulation of SKD61 Steel Milling with Ball - End Cutter

DONG Jialing, HUANG Lixin, HE Xiangsheng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In view of the poor cutting performance of die steel, the precision development of mold and the promotion of mold steel materials are seriously restricted. The basic process research was carried out on the machining process of ball-end milling cutter die steel. The SKD61 steel milling force experiment was carried out based on three - dimensional simulation. In the 3D simulation of SKD61 steel, the finite element simulation of surface milling was carried out with ball end mill, the simulation results were analyzed and found: SKD61 die steel chip in the cutting process is discontinuous and easy to break; in the initial stage of milling, the edge is affected by the radial impact, and the milling force is higher than the stable milling stage. The results of stress simulation show that the influence of different process parameters on the stress of milling cutter is different, and the influence of feed per tooth is more important.

Keywords: die steel; curved surface milling; ball cutter; process optimization; FEA(finite element analysis)

机械工业领域的众多模具具有复杂的型腔或复杂曲率变化的曲面,在应用中,一般要求曲面型腔有高精度和高光洁度。球头铣刀是铣削模具型腔及复杂曲面的特殊刀具,其有效刀刃角变化范围较大,对复杂曲面具有较好的加工适应性^[1]。

课题组采用 Third Wave AdvantEdge 有限元软件对球头铣刀铣削过程进行三维仿真研究,对切屑形成、铣削温度和铣削力的仿真结果以及刃口应力结果进行

了分析,总结了模具钢 SKD61 材料的切屑形成过程及铣削温度变化等特点,阐明了应力变化与铣削参数间的关系,丰富了 SKD61 材料的铣削理论。

1 有限元三维铣削仿真试验方案

有限元仿真试验中,对铣削参数主轴转速、每齿进给量以及铣削深度采用 $L_9(3^4)$ 正交设计,取正交设计 $L_9(3^4)$ 的前三列组合方案进行参数组合设计。具体试验工艺参数设计如表 1 所示^[2-4]。

收稿日期:2017-09-01;修回日期:2017-11-29

基金项目:上海市教委产学研专项基金(12ZT14);上海市宝山区产学研合作基金(bkw2014115);上海市宝山区科委产学研专项基金(CXY-2012-18);上海工程技术大学研究生科研创新项目(E3-0903-17-01016)。

第一作者简介:董佳灵(1993),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为精密加工、高速加工理论。E-mail:1026756833@qq.com

表 1 试验参数设计
Table 1 Parameters design

仿真号	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 $f_z/(mm \cdot z^{-1})$	铣削深度 a_p/mm
1	3 000	0.02	0.8
2	3 000	0.03	1.2
3	3 000	0.04	1.6
4	4 000	0.02	1.6
5	4 000	0.03	0.8
6	4 000	0.04	1.2
7	5 000	0.02	1.2
8	5 000	0.03	1.6
9	5 000	0.04	0.8

2 球头铣刀三维铣削仿真结果分析
2.1 球头铣刀三维铣削模拟过程

实际切削中,切削刃与工件金属层接触,受前刀面推挤作用,切削区金属层被剪切而发生滑移和塑性变形,从而实现金属切削过程。金属加工过程,刀具前、后刀面是受影响最严重的地方^[5]。图 1 所示为工件铣削过程中被切金属层温度场变化。图 1(c)至图 1(f)显示工件金属层剪切区温度最高,最高温度达到 400℃ 以上;图 1(g)到图 1(i)显示的是刀刃切出及切屑脱离的过程。该图是仿真 9 下的仿真结果。

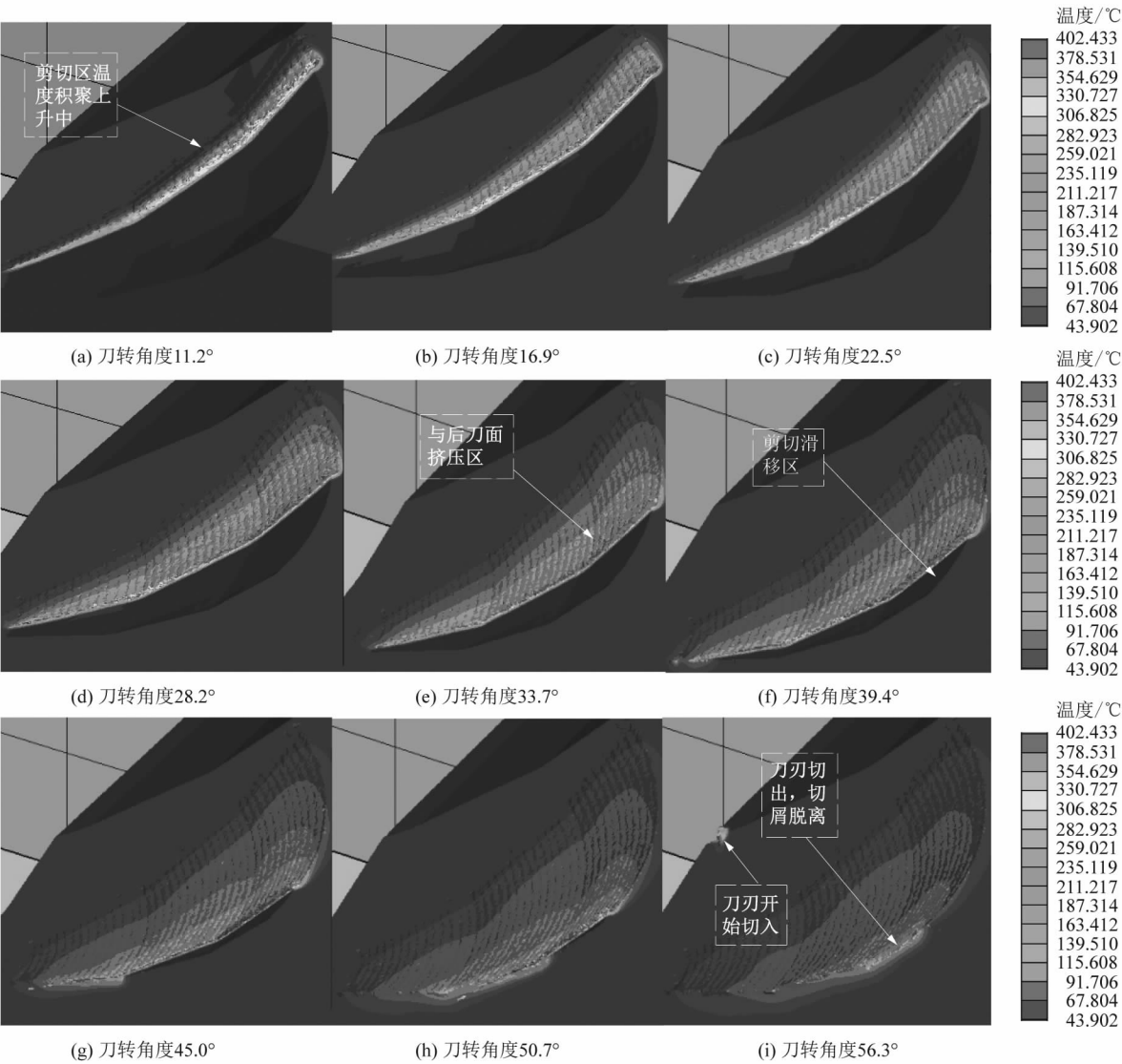


图 1 铣削工件温度场变化过程

Figure 1 Temperature field change of milling workpiece

2.2 切屑形成过程仿真分析

铣削 SKD61 钢的三维仿真再现了切屑形成及形

貌变化过程。如图 2 所示,显示了在滑移过程中切屑与螺旋槽底部接触,受到槽底挤压,同时,受切削高温

软化影响,使得切屑形成一定程度的卷曲。

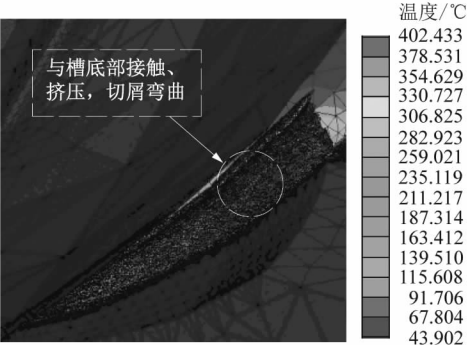
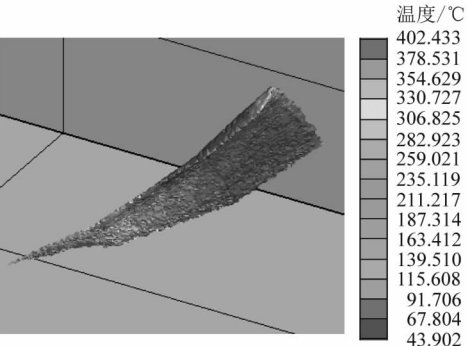
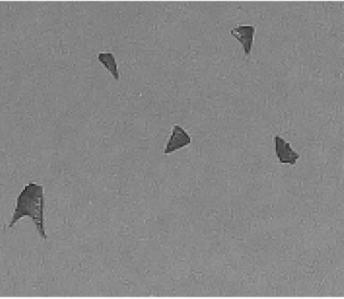


图2 切屑变化仿真结果
Figure 2 Simulation results of chip morphology change

图3对仿真切屑与实际切屑在外形方面做了比较,发现仿真切屑与实际切屑的外形相似度很高。据此,说明用有限元法模拟实际切削过程具有较高的精度。



(a) 仿真切屑图



(b) 实际切屑图

图3 切屑外形比较

Figure 3 Appearance comparison of chips

2.3 铣削力仿真数据结果分析

球头铣刀铣削模具钢是既包含轴向的钻削又包含径向的铣削过程。图4为仿真1铣削力变化情况。铣削开始阶段(约0.000~0.001 s),3个方向铣削力迅速上升到最大值;随后,铣削力下降并进入正常铣削阶

段。铣削阶段初期,刀刃与工件金属层发生接触撞击使得金属层被撕裂,该阶段刃口受力高于正常铣削阶段。平稳铣削阶段,就铣削力最大值而言,Z方向铣削力与Y方向铣削力相接近,X方向铣削力最小。平稳铣削阶段后期Y方向铣削力最大值比铣削初始阶段最大值减少了约30 N以上;Z向铣削力变化较小,说明铣削开始阶段刃口与金属层接触撞击产生的主要影响为径向冲击。

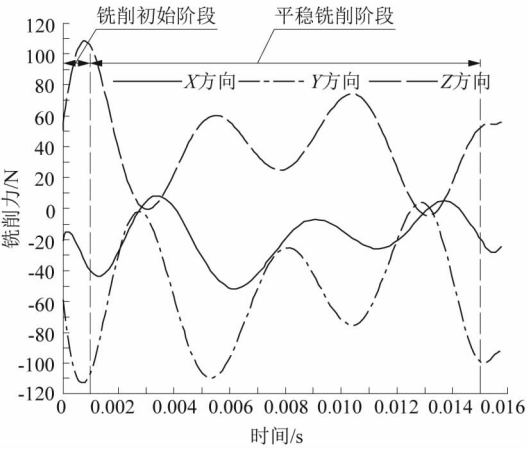


图4 铣削力仿真结果

Figure 4 Simulation results of milling force

2.4 温度仿真数据结果分析

图5为仿真1刃口温度场仿真结果,图中切削刃口前刀面切削区形成了2个明显的温度场,刃口尖部温度最高,远离刃口区域温度呈梯度变化。受剪切、挤压、滑移摩擦及金属变形作用产生热量积聚,使得刃口尖部温度高;远离刃口区域温度主要来源于切屑滑移、挤压摩擦做功。

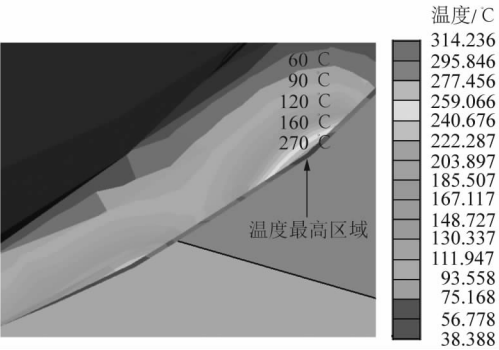


图5 切削刃口温度场仿真结果

Figure 5 Simulation results of temperature field of cutting edge

图6为仿真9铣削温度变化情况。从图6可知,铣削初始阶段,铣削温度在0.000~3 s内迅速上升到

400 ℃,随后铣削温度进入稳定阶段。随着切削量的减少,铣削温度开始下降。图 6 所示虚线圈处为铣削过渡阶段,该阶段正在切削的刀刃开始切出,切屑即将脱离,新的刀刃开始切入,由于金属铣削量少,铣削温度处于最低。

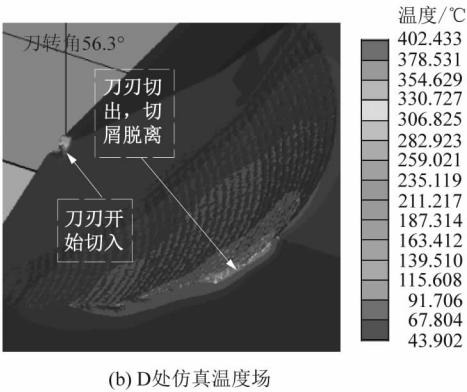
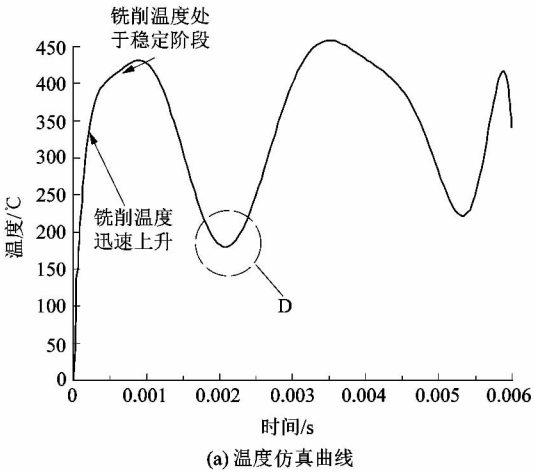


图 6 铣削温度仿真结果
Figure 6 Simulation results of milling temperature

2.5 刃口应力场结果分析

刃口应力分布对刀具刃口强度及其切削性能有着直接的影响。切削应力的产生大体可归为如下 3 个方面:①金属塑性变形产生的应力;②切削热产生的热应力;③金属相变产生的应力^[6-8]。

对刀具刃口部位进行了应力场分布模拟仿真,获得了刀具刃口部位的 XX,YY 和 ZZ 方向应力分布情况。图 7 为仿真 1 下刃口应力场分布情况。

为了解图 7 中的刃口应力场变化情况,利用软件 ThirdWave Advantage 对图 7 中 AA,BB,CC 区应力场按点取值,从刃口尖部往槽底方向采样取值,应力结果见表 2。

表 2 前刀面应力数据
Table 2 Stress data of rake face MPa

点序号	XX 方向应力	YY 方向应力	ZZ 方向应力
1	-1 574	-1 361	-1 454
2	-1 393	-1 316	-1 386
3	-1 133	-1 170	-1 199
4	-927	-908	-999
5	-839	-798	-850
6	-743	-669	-727
7	-631	-523	-610
8	-534	-418	-492
9	-477	-364	-426
10	-414	-302	-372
11	-354	-241	-317
12	-295	-176	-246
13	-235	-128	-204
14	-202	-92	-174

根据刃口应力分布情况知,刃口顶部区域应力分布最大,最大应力值在 1 600 MPa 左右,该应力值为压应力。将表 2 中应力变化数据用 Excel 绘制成折线图,如图 8 所示。图中可以看出第 1 点到第 2 点区域属于应力极值区域,第 2 点到第 8 点之间压应力值变化较快,第 8 点到第 14 点间压应力递减较为均匀。刃口区域承载应力最大,该应力及相应的应变对铣刀铣削稳定性有着很重要的影响,应力释放是刀具产生磨损、破损及崩刃的关键影响因素之一^[9]。

仿真结果共获得 9 份不同参数组合下的刃口应力场分布情况,现分别对不同参数组合下的刃口应力场应力最大值进行了采样,应力采样数据如表 3 所示。表 3 中数据负号表示应力方向,一般情况下,带正号的应力值代表拉应力,带负号的应力值为压应力。

表 3 铣削仿真应力数据
Table 3 Stress data of milling simulation MPa

参数组合号	XX 方向应力	YY 方向应力	ZZ 方向应力
1	-1 625	-1 622	-1 610
2	-1 744	-1 735	-1 696
3	-2 165	-2 204	-2 184
4	-2 050	-2 054	-2 052
5	-2 183	-2 207	-2 193
6	-2 033	-2 080	-2 145
7	-1 834	-1 840	-1 838
8	-2 122	-2 159	-2 208
9	-2 384	-2 415	-2 429

2.5.1 主轴转速对刃口应力的影响分析

从表 3 中应力数据无法看出主轴转速亦或者是铣

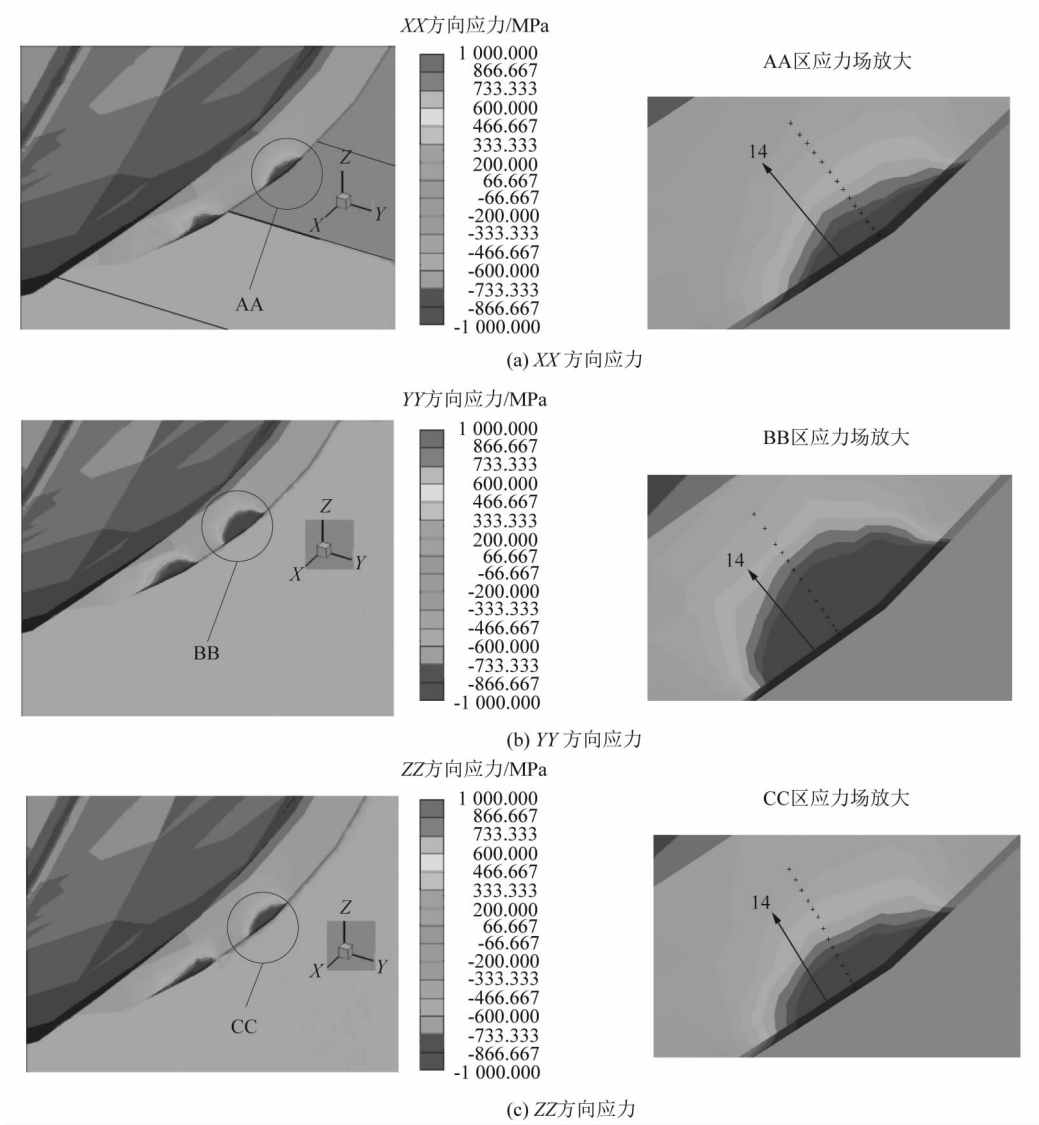


图 7 前刀面刃口应力场分布
Figure 7 Stress field of the rake face

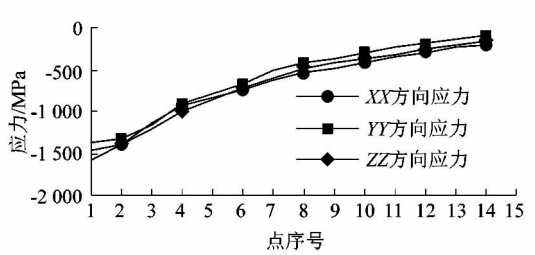


图 8 前刀面应力变化
Figure 8 Stress change of the rake face

削深度对应力影响,需进行数据处理。参照极差分析法,计算主轴转速在不同水平下的平均应力数据^[10-13],结果如表 4 所示。表中数据为压应力有效值。

表 4 主轴转速在不同水平下的应力均值			
Table 4 Mean values of stress at different spindle speed			
转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	XX 方向 应力/MPa	YY 方向 应力/MPa	ZZ 方向 应力/MPa
3 000	1 844.7	1 853.7	1 830.0
4 000	2 088.7	2 113.7	2 130.0
5 000	2 113.3	2 138.0	2 158.3
极差	268.6	284.3	328.3

表 4 中应力数据用 Excel 处理成折线图,如图 9 所示。图中显示随主轴转速增加刃口的 XX,YY 和 ZZ 方向应力值增加。主轴转速在 3 000 ~ 4 000 r/min 范围内,刃口应力值变化速率比 4 000 ~ 5 000 r/min 范围内的变化速率要快。在转速为 4 000 ~ 5 000 r/min

范围内,应力值增加缓慢,只提高了 30 MPa 左右。由此可以推论,在一定的转速条件下,主轴转速的增加会引起刃口应力的增加,但应力变化不与主轴转速成线性关系。

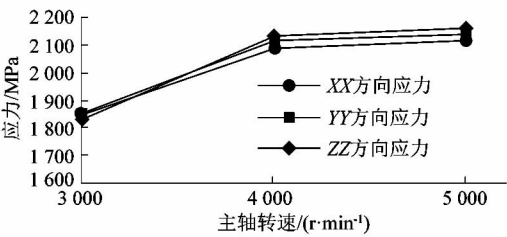


图9 主轴转速对应力变化的影响

Figure 9 Effects of spindle speed on stress

2.5.2 每齿进给量对刃口应力的影响分析

对表3中数据进行处理,获得每齿进给量在不同水平下的平均应力数据,结果如表5所示。表中数据为压应力有效值, z 为铣刀齿数。

表5 每齿进给量在不同水平下的应力均值

Table 5 Mean values of stress at different feed per tooth

每齿进给量/ (mm·z ⁻¹)	XX 方向 应力/MPa	YY 方向 应力/MPa	ZZ 方向 应力/MPa
0.02	1 836.3	1 838.7	1 833.3
0.03	2 016.3	2 033.7	2 032.3
0.04	2 194.0	2 233.0	2 252.7
极差	357.7	394.3	419.4

表5中应力数据用 Excel 处理,得图10。图中显示每齿进给量对刃口XX,YY和ZZ方向应力的影响呈近似线性递增。每齿进给量每增加0.01 mm,3个方向的应力值增加近200 MPa。由此可以推论每齿进给量是影响刃口应力变化的重要因素,应力随每齿进给量的增加成近似线性规律增加。

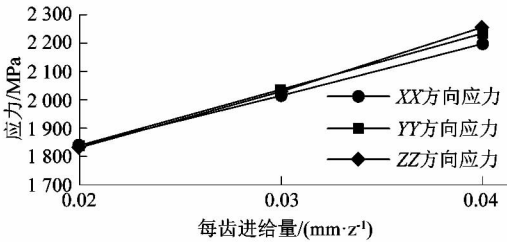


图10 每齿进给量对应力变化的影响

Figure 10 Effects of feed per tooth on stress

2.5.3 铣削深度对刃口应力的影响分析

对表3中数据进行处理,获得铣削深度在不同水平下的平均应力数据,结果如表6所示。表中数据为

压应力有效值。

表6 铣削深度在不同水平下的应力均值

Table 6 Mean values of stress at different cutting depth

铣削深度/ mm	XX 方向 应力/MPa	YY 方向 应力/MPa	ZZ 方向 应力/MPa
0.8	1 926.7	1 953.7	1 987.7
1.2	2 059.3	2 068.0	2 059.0
1.6	2 060.7	2 083.7	2 071.7
极差	134.0	130.0	84.0

对表6中应力数据用 Excel 处理,得图11。图中显示铣削深度对刃口XX,YY和ZZ方向应力的影响规律与主轴转速相似。铣削深度在0.8~1.2 mm之间,刃口应力变化较快;在1.2~1.6 mm之间,刃口应力变化较小。刃口应力值随铣削深度的增加而增加。

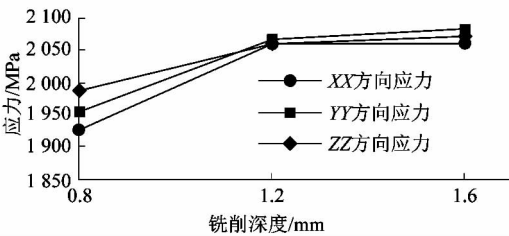


图11 铣削深度对应力变化的影响

Figure 11 Effects of cutting depth on stress

对表4~6中极差值数据进行相互比较,发现每齿进给量的极差值最大,铣削深度的极差值最小。说明每齿进给量 f_z 在 n , f_z 和 a_p 三者中对刃口应力的影响程度最大,铣削深度的影响最小。

3 模具钢 SKD61 铣削力的实验分析

3.1 试验结果

在球头铣刀铣削 SKD61 钢三维仿真分析的基础上,课题组进行了 SKD61 铣削力的实验,根据正交试验设计,对正交设计的试验重复进行了2次^[14]。参数组合为 $n=3\,000\text{ r/min}$, $f_z=0.005\text{ mm/z}$, $a_p=0.6\text{ mm}$, $R=3\text{ mm}$ (R 为刀具半径)下的试验结果及铣削力变化规律见图12。

选择稳定铣削过程中铣削力最大值作为读取数据,3个方向铣削力的试验结果见表7。表中均值数据为试验结果1和试验结果2对应铣削力的数据均值,各方向铣削力均值数据分别用 F_x , F_y 和 F_z 表示。

3.2 铣削力数据结果分析

为了对试验原数据进行解析,现对工艺参数组合为 $n=3\,000\text{ r/min}$, $f_z=0.005\text{ mm/z}$, $a_p=0.6\text{ mm}$ 和 $R=3\text{ mm}$ 下的铣削试验数据进行分析。

表 7 试验数据结果

Table 7 Experiment results

N

试验序号	试验结果 1			试验结果 2			均值数据		
	$F_{x\max}$	$F_{y\max}$	$F_{z\max}$	$F_{x\max}$	$F_{y\max}$	$F_{z\max}$	F_x	F_y	F_z
1	142.0	177.0	112.0	130.0	154.0	107.0	136.0	165.5	109.5
2	186.0	208.0	170.0	182.0	221.0	176.0	184.0	214.5	173.0
3	264.0	320.0	206.0	230.0	295.0	205.0	247.0	307.5	205.5
4	153.0	213.0	140.0	138.0	190.0	136.0	145.5	201.5	138.0
5	171.0	240.0	140.0	174.0	233.0	150.0	172.5	236.5	145.0
6	195.0	197.0	143.0	202.0	224.0	163.0	198.5	210.5	153.0
7	119.0	120.0	134.0	145.0	115.0	151.0	132.0	117.5	142.5
8	223.0	289.0	195.0	216.0	230.0	182.0	219.5	259.5	188.5
9	174.0	293.0	164.0	152.0	249.0	156.0	163.0	271.0	160.0

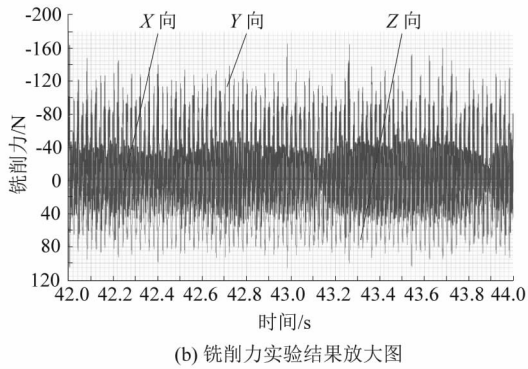
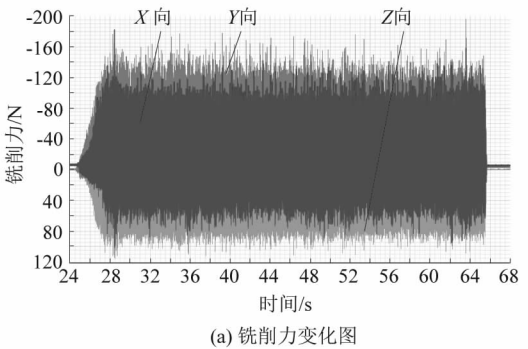


图 12 试验数据

Figure 12 Experimentat data

图 13 为 40.0 ~ 40.1 s (5 个铣削周期) 铣削过程内的铣削力变化放大图。各向铣削力呈周期性规律变化。采样频率为 3 kHz, 即采样周期为 0.02 s, 与该参数组合下的铣削周期一致。从图 13 中可知, 在单个铣削周期内 (即刀具第 1 齿切入到第 2 齿切出过程), 铣刀刃口受 Y 方向铣削力最大。先切入材料的刃口所受到的各向铣削力大于后切入刃口的铣削力; 后切入刃口的各向铣削力以力值小、峰值多的规律变化。

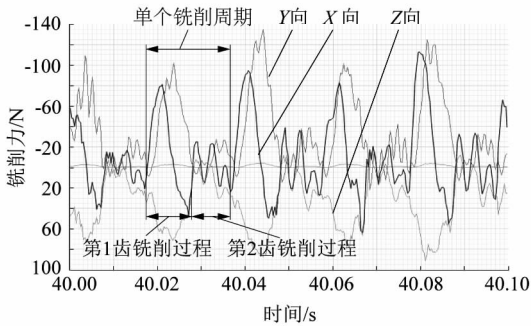


图 13 铣削力变化曲线放大图

Figure 13 Milling force change curve

- ### 4 结论
- 本课题主要内容为球头铣刀铣削 SKD61 钢的有限元仿真分析, 包括有限元仿真原理综述、球头铣刀及工件结构网格划分和仿真结果处理及分析。笔者研究了球头铣刀三维铣削 SKD61 钢的仿真过程, 从切屑形成、铣削温度、铣削力和刃口应力等方面做了分析, 研究和分析发现如下结论:
- 1) 切屑仿真发现 SKD61 钢的切屑在切削过程不连续, 易断裂。切屑滑移过程中切屑与螺旋槽底部接触, 受槽底挤压及切削高温的软化影响, 使得切屑形成一定程度的卷曲。
 - 2) 铣削力及温度仿真结果分析发现铣削开始阶段铣削温度迅速上升, 球头铣刀刃口受到径向冲击影响, 刀刃受力高于正常铣削阶段。
 - 3) 应力仿真分析知刃口应力随主轴转速、每齿进给量及铣削深度值的递增而增加, 每齿进给量对刃口应力的影响呈近似线性相关。
- (下转第 24 页)