

单颗 CBN 磨粒微切削硬质合金 YG8 磨损研究

陈凯,杨长勇,高绍武,丁文锋,祝丞
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:微小孔用铰珩工具长径比大,刚度差,可以采用加工工艺方法对其进行修整。为揭示铰珩工具修整过程中 CBN 磨粒的磨损特性,采用光滑粒子流体动力学法,建立 CBN 磨粒微切削 YG8 硬质合金的仿真模型,并通过试验验证该模型的可行性。结果表明:在微切削 YG8 硬质合金过程中,随着累积材料去除体积的增加,CBN 磨粒不断发生微破碎而使其磨损体积持续增大;在相同的累积材料去除体积下,随着切削宽度和切削深度增加,磨粒的相对磨损量呈现出先增大后减小的变化趋势。

关键词:光滑粒子流体动力学;CBN;磨损;微切削;硬质合金

中图分类号:TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0025-04

Study on Wear of Single CBN Grain Micro-cutting YG8 Cemented Carbide

CHEN Kai, YANG Changyong, GAO Shaowu, DING Wenfeng, ZHU Cheng
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The reaming tool for small holes has a large aspect ratio and poor rigidity, and can be dressed by machining the workpiece. In order to analyze the wear characteristics of CBN grain in the grinding process, a simulation model of CBN grain in micro-cutting of YG8 cemented carbide was built by Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) method. In addition, a single grain micro-cutting test was carried out to investigate the grain wear evolution in the micro-cutting process. The conclusion is that the CBN grain displays micro-fracture wear characteristic and gradually increases wear volume during the micro-cutting process. And under the same material removal volume, and with the increase of cutting width and cutting depth, the relative wear of grain increases first and decreases after.

Keywords: SPH; CBN; wear; micro-cutting; cemented carbide

0 引言

航空发动机燃油喷嘴是航空发动机的重要部件之一。喷嘴的作用是将液体燃料雾化成小液滴,提高液体燃料的燃烧性能^[1]。针对喷嘴的精密加工,可考虑采用铰珩工艺。铰珩加工是磨粒加工的一种,可获得极高的尺寸一致性、形状精度(圆柱度可达 $0.5\text{ }\mu\text{m}$)和表面质量,已广泛应用于液压领域精密孔的加工中。然而,喷嘴等微小孔加工用的铰珩工具直径小、长径比大,刚度差,若采用金刚石滚轮或碟轮修整^[2-3],工具单边受力易引起变形,无法保障其修整精度。因此,一般采用工具来加工高硬度工件,从而实现铰珩工具的修整,这也是目前较为可行的柔性铰珩工具精密修整方法。然而,目前有关微小孔铰珩工具表面上磨粒的形貌演变鲜有报道,切削参数对于磨粒磨损量的影响趋势也尚未明确,这也是本文需解决的问题。

随着计算机技术的迅速发展,有限元仿真逐步应用于金属切削机理的研究中。由于磨粒的磨损涉及材料的变形和破碎,若是采用有限元网格法则会造成网格单元畸

变,很可能导致计算终止;而采用光滑粒子流体动力学法(SPH),则能够应对磨粒的大变形问题,因为其依赖离散的携带材料属性的粒子进行数值模拟,且在单颗磨粒切削机理和切削力的研究中已得到广泛应用^[4-5]。

因此,本文采用 SPH 法建立单颗磨粒切削仿真模型,并进行试验验证,以研究 CBN 磨粒微切削高硬度工件 YG8 时的磨损特性,为铰珩工具的修整研究奠定基础。

1 仿真模型建立

在建模仿真时,若是将被加工内孔沿某一母线展开,则能够将磨粒的旋转运动转化为直线运动。通常情况下,使用 SPH 法建模时都将工件设置成 SPH 粒子,采用有限元网格对铰珩工具进行建模;本文反其道而行之,铰珩工具由 SPH 粒子进行填充,而工件采用网格进行划分。建立如图 1 所示的单颗 CBN 磨粒几何模型^[6],其中:磨粒的高度为 $20\text{ }\mu\text{m}$;钝圆半径为 $1\text{ }\mu\text{m}$ ^[7];前角为 -45° 。单颗 CBN 磨粒微切削 YG8 的切削仿真模型如图 2 所示,磨粒由 SPH 粒子进行填充。

基金项目:国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111);中央高校基本科研业务项目(NS2018031)

第一作者简介:陈凯(1994—),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为高效精密加工技术。

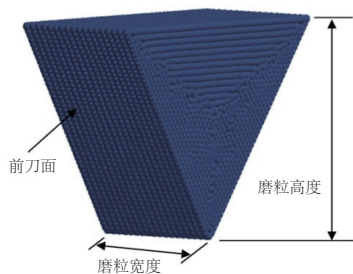


图1 磨粒几何模型

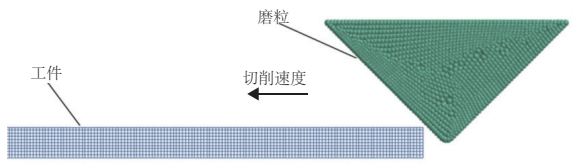


图2 单颗 CBN 磨粒微切削仿真模型

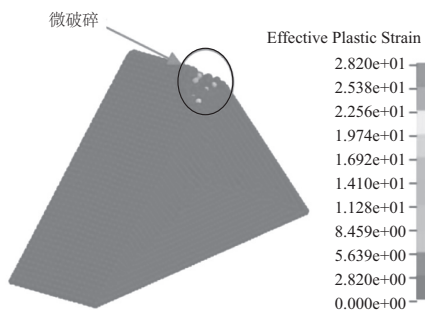


图4 仿真中的磨粒磨损形貌

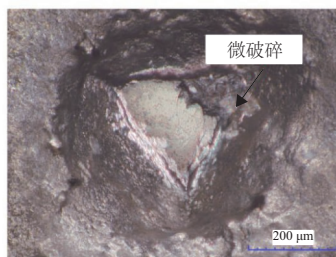


图5 试验中的磨粒磨损形貌

2 试验验证

针对建立的仿真模型,开展了对单颗磨粒微切削的试验验证。其试验装置如图3所示,单颗 CBN 磨粒粒度代号 40/45,用 Ag-Cu-Ti 钎料,炉中焊于 45 钢材料基体上,制备单颗磨粒工具,固定于夹具之上,并且使用 KISTLER 9272 测力仪进行对刀。工件为直径 $\phi 8\text{ mm}$ 的硬质合金 YG8,作旋转和进给运动。

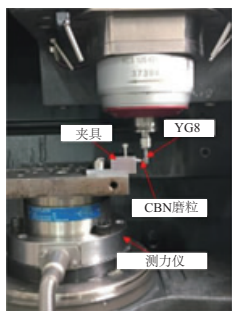


图3 单颗磨粒微切削试验装置

CBN 磨粒在切削速度 0.2 m/s 、切削深度 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、切削宽度 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,磨粒最终的形貌如图4所示。可以看出:磨粒在切削刃处应变较大,导致其发生微破碎。此外,磨粒在相同的工艺参数下,磨粒的实际磨损形貌如图5所示。试验结果表明:CBN 磨粒在微切削硬质合金 YG8 时,其切削刃处出现明显的微破碎磨损;而在试验中的磨损面积较仿真更大,这是由于试验中的单次切深为 $1\text{ }\mu\text{m}$,进行多次径向进给才能去除一定体积的工件材料;当累积进给量增大时,磨粒与工件的接触面积增大,也就造成了磨损区域面积的增大。然而,从磨粒磨损形式的角度看,依旧可以说明其发生了微破碎磨损,即实现了对仿真模型的验证。

此外,磨削比是评价砂轮磨削性能的重要指标,能够反映出砂轮的耐磨性。本文定义磨削比为磨粒去除的工件材

料体积与磨粒磨损体积的比值,用来表征单颗磨粒的耐磨性。仿真与试验的磨削比对比如图6所示:切宽为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,试验中计算的磨削比为 1007,仿真的结果为 774,误差为 23.1%;增大切宽到 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,磨粒的切削截面积增大,磨损量增大,试验的磨削比降到 757,仿真的结果为 589,降低了 22.2%。这在一定程度上说明了仿真结果的可靠性。

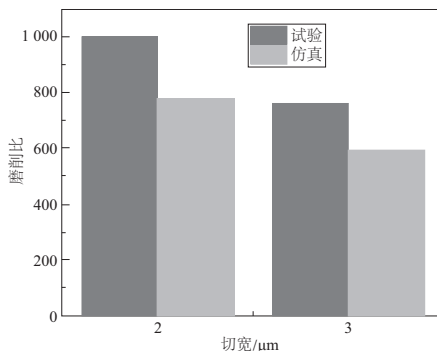


图6 仿真与试验磨削比对比

3 仿真结果及分析

3.1 CBN 磨粒的形貌演变

CBN 磨粒在切削速度为 0.8 m/s 、切削深度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、切削宽度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,磨粒的形貌演变过程如图7所示。当累积材料去除体积为 $50\text{ }\mu\text{m}^3$ 时,有 SPH 粒子掉落,磨粒开始出现微破碎(图7(a));随着累积材料去除体积增大,磨粒不断发生微破碎磨损,切削刃处形貌逐渐发生细微改变(图7(b)、图7(c));当累积材料去除体积为 $200\text{ }\mu\text{m}^3$ 时,磨粒的径向磨损量显著(图7(d));当累积材

料去除体积从 $250 \mu\text{m}^3$ 增加到 $300 \mu\text{m}^3$ 时,磨粒磨损体积持续增大,磨粒出现大应变,其径向磨损量也增大(图 7(e)、

图 7(f))。因此,在整个微切削过程中,随着累积材料去除体积的增大,磨粒的磨损体积和径向磨损量也随之增大。

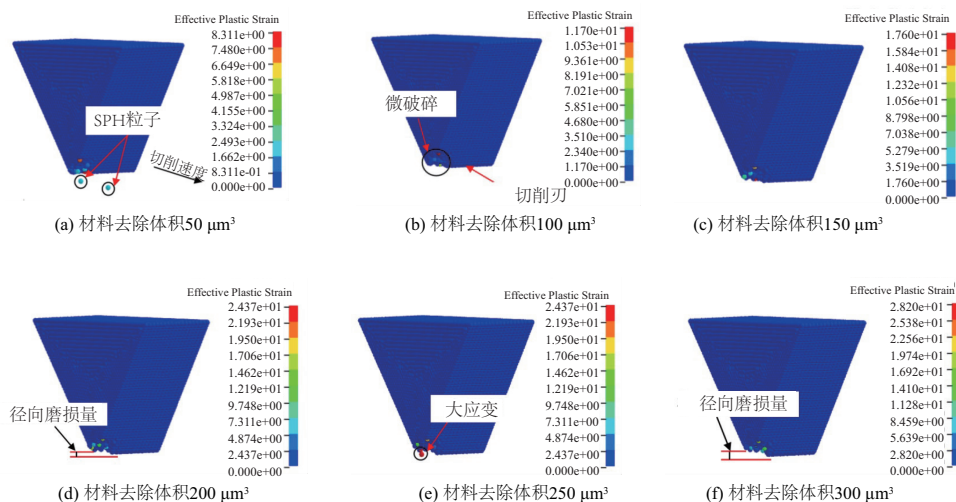


图 7 CBN 磨粒形貌演变

3.2 磨粒的磨损速率

为进一步研究磨粒的磨损速率,分析了仿真中单颗磨粒磨损体积的变化情况,在切削速度为 0.8 m/s 、切削深度为 $2 \mu\text{m}$ 、切削宽度为 $2 \mu\text{m}$ 时,相对磨损量随切削时间的变化趋势如图 8 所示,其中磨粒的相对磨损量即磨粒磨损体积的百分比。可以看出:当累积材料去除体积在 $0 \sim 350 \mu\text{m}^3$ 时,磨损曲线的斜率较大,表明磨粒在第一阶段的磨损速率较快;当累积材料去除体积在 $350 \sim 630 \mu\text{m}^3$ 时,磨粒的磨损曲线斜率也较为平缓,即磨粒在第二阶段中磨损速率很慢。

在第一阶段中:一方面磨粒对工件进行了冲击;另一方面磨粒自身的缺陷(空位、位错),致使其在切削过程中容易发生破碎,因此磨损速率较快。而磨粒在历经第一阶段的磨损后,其结构更为稳定,持续的微破碎导致磨粒的径向磨损量不断增大,在微切削的工况下,磨粒的实际切削减小。因此在第二阶段,磨粒呈现出较慢的磨损趋势。

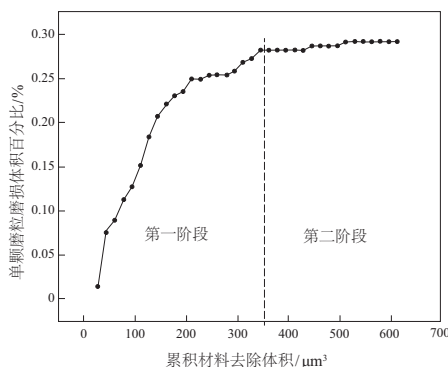
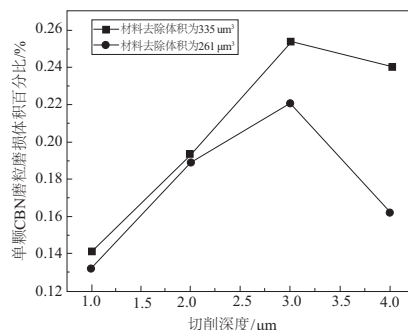


图 8 累积材料去除体积对磨粒相对磨损量的影响

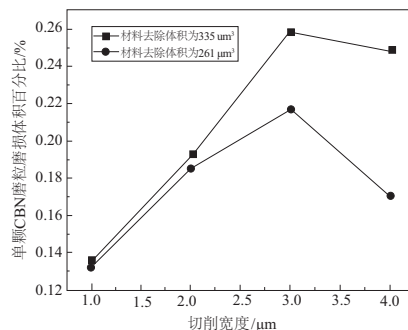
3.3 切削参数对 CBN 磨粒相对磨损量的影响

图 9 给出了材料去除体积为 $335 \mu\text{m}^3$ 和 $261 \mu\text{m}^3$ 时磨粒相对磨损量随切削深度和宽度变化的曲线。由图 9(a)

可知:材料去除体积为 $335 \mu\text{m}^3$,切削深度在 $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 变化时,切削深度增大,磨粒的相对磨损量从 0.141% 增大到 0.254% ;而当切削深度为 $4.0 \mu\text{m}$ 时,相对磨损量反而会减小到 0.24% ;材料去除体积为 $261 \mu\text{m}^3$ 时的相对磨损量变化情况与 $335 \mu\text{m}^3$ 时的相似。此外,切削宽度对磨粒的相对磨损量影响也是如此。这是因为:伴随着切削深度或切削宽度增加,磨粒的切削截面积增大,切削力增大,导致磨粒的相对磨损量增大;然而在相同的材料去除体积下,切削截面积的增大,导致磨粒的切削行程减少。所以,当切削深度或切削宽度增大时,磨粒的相对磨损量呈现先增大后减小的趋势,即切削力和切削行程相继对磨粒的相对磨损量起主导作用。



(a) 切削深度对磨粒相对磨损量的影响



(b) 切削宽度对磨粒相对磨损量的影响

图 9 切削参数对磨粒相对磨损量的影响

4 结语

文中建立了基于 SPH 法的单颗 CBN 磨粒微切削硬质合金 YG8 的仿真模型,并通过其 SPH 粒子的掉落定量表征磨粒的磨损量,还对模型进行了试验验证,得出如下结论:

1) CBN 磨粒微切削硬质合金 YG8 时,磨粒在切削刃处的大应变导致其磨损,磨损形式主要为微破碎;随着累积材料去除体积的增大,磨粒的相对磨损量随之增大,且磨损速率先快后慢。

2) 在相同的累积材料去除体积下,随着切削宽度和切削深度增加,由于切削力和切削行程相继起主导作用,磨粒的相对磨损量呈现先增大后减小的变化趋势。

参考文献:

- [1] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 赵清亮, 赵玲玲, 王宇, 等. 电镀金刚石砂轮高效精密修整及熔融石英磨削试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 174-181.

- [3] 冯克明, 师超钰, 朱建辉, 等. 单层磨料砂轮修整及修整阈值控制试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 225-232.
- [4] DUAN N, YU Y Q, WANG W S, et al. SPH and FE coupled 3D simulation of monocrystal SiC scratching by single diamond grit[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 64: 279-293.
- [5] XI Y, BERMINGHAM M, WANG G, et al. SPH/FE modeling of cutting force and chip formation during thermally assisted machining of Ti₆Al₄V alloy[J]. Computational Materials Science, 2014, 84: 188-197.
- [6] 孙伟, 赵恒华, 杨世彬. 基于 LS-DYNA 的单颗磨粒超高速磨削成屑动态研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 57-60.
- [7] DAI J B, SU H H, HU H, et al. The influence of grain geometry and wear conditions on the material removal mechanism in silicon carbide grinding with single grain[J]. Ceramics International, 2017, 43(15): 11973-11980.

收稿日期:2019-12-03

(上接第 24 页)



图 13 液体垫片损伤情况

4 结语

1) 强迫装配时,随着间隙的不断增大,螺栓杆与孔壁接触面积不断减小,复合材料-铝合金单搭接接头的峰值载荷和拉伸刚度呈现减小趋势,从间隙 0 到间隙 2.0 mm,峰值载荷和拉伸刚度降幅分别为 17.7% 和 60.1%。

2) 液体垫片补偿时,垫片可以显著减小复合材料板与铝合金板的弯曲变形,使得拉伸过程中螺栓杆与孔壁的接触面积基本保持不变。且液体垫片也具有一定的承载能力,对峰值载荷的提升有一定的作用。但拉伸过程中铝合金板变形的加剧导致峰值载荷所对应的位移不断增大,最终导致接头刚度的降低。

3) 随着液体垫片厚度的增加,复合材料-铝合金接头峰值载荷提升,刚度开始减小,使得复合材料和液体垫片发生较大的变形。

参考文献:

- [1] 卡萨波格罗(荷). 飞机复合材料结构设计与分析[M]. 颜万亿,译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.

- [2] DHÔTE J X, COMER A J, STANLEY W F, et al. Investigation into compressive properties of liquid shim for aerospace bolted joints[J]. Composite Structures, 2014, 109: 224-230.
- [3] LIU L, ZHANG J, CHEN K, et al. Experimental and numerical analysis of the mechanical behavior of composite-to-titanium bolted joints with liquid shim[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49: 167-172.
- [4] HÜHNE C, ZERBST A K, KUHLMANN G, et al. Progressive damage analysis of composite bolted joints with liquid shim layers using constant and continuous degradation models[J]. Composite Structures, 2010, 92(2): 189-200.
- [5] 崔雁民. 复合材料钛合金叠层结构间隙加垫补偿的拉伸性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [6] CHENG L, WANG Q, KE Y L. Experimental and numerical analyses of the shimming effect on bolted joints with nonuniform gaps[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(11): 3964-3975.
- [7] 岳烜德, 安鲁陵, 云一坤, 等. 液体垫片对复合材料单搭接螺栓接头力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1): 50-60.
- [8] 刘怡冰, 安鲁陵, 蒋麒麟, 等. 复合材料翼盒装配工装研究与设计[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(3): 14-18.
- [9] COMMITTEE D. Test method for bearing response of polymer matrix composite laminates[S]. ASTM International.
- [10] LIU L. The influence of the substrate's stiffness on the liquid shim effect in composite-to-titanium hybrid bolted joints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(3): 470-479.

收稿日期:2019-10-11