

镀材切削加工温度场和应力场的数值模拟

董 平, 李瑞文

(表面物理与化学国家重点实验室, 四川 绵阳 621907)

摘 要: 采用 MSC.Marc 软件对镀材切削加工温度场和应力场进行热力耦合有限元分析, 镀材本构关系采用 Johnson-Cook 模型, 编写子程序模拟镀材切削断裂分离现象。结果表明: 镀材切削加工过程温升不明显, 最高温度约 45 °C, 切削后工件表面平行和垂直于走刀方向残余应力分量均为拉应力; 采用工艺获得镀材切削稳定状态下切削力和进给力分别为 280 和 -250 N/mm。此研究有助于加深镀材切削应力形成规律认识以及切削工艺参数优化。

关键词: 镀; 温度场; 应力场; 切削; 有限元方法

中图分类号: TG115.22⁺2.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)09-1622-04

镀作为具有独特性能的结构材料, 在核能、航空和航天等领域有着重要用途, 但镀的延展性差, 镀结构件加工不允许有较大应力, 从而影响了镀的加工性能。到目前为止, 对镀材焊接应力进行大量实验和数值模拟研究^[1-4], 对认识和控制焊接应力发挥了积极作用。切削加工是镀结构件加工成形的另一重要工艺, 在加工过程中, 刀具作用在镀结构件表层, 去除多余材料, 以获得需要的工件形状和尺寸。镀材切削加工不仅在表层产生应力, 而且从微观角度看还使表层晶粒产生孪晶或形成微裂纹, 在应力和微裂纹共同作用下, 容易导致镀材在切削加工过程中发生宏观开裂, 降低镀结构件的加工成品率。

目前, 已经开展镀材切削加工应力的实验研究^[5,6], 但为了深入认识镀材切削加工应力的产生根源, 优化切削工艺, 还需要开展镀材切削加工过程的数值模拟研究。虽然, 国内外许多学者已经采用有限元法对钢、铝、铜等金属切削加工过程进行了大量数值模拟研究^[7-9], 并针对切削加工过程的切削形成、刀削分离以及接触和摩擦等现象建立了有效的数值计算方法, 但尚未开展镀材切削加工过程的数值模拟研究。本研究采用大型有限元软件 MSC.Marc 建立镀材切削加工热力耦合数值模拟模型, 在实际工艺基础上, 对镀材切削加工温度场和应力场进行有限元分析, 数值计算镀材表层切削残余应力与 X 射线应力测试对比, 验证了有限元模型。

1 有限元分析

1.1 计算模型

金属切削是一个动态过程, 但在开始切削后很快达到平衡。在平衡状态下, 切削热和切削力保持稳定, 因此, 一般选取刀具前方一小块区域作为研究对象。通常, 试样厚度远大于切削深度, 假定切削过程处于平面应变状态, 有限元模型单元初始网格示于图 1, 模型长度和宽度分别为 4 mm 和 2 mm。采用 4 节点等参数单元, 假设刀具为理想刚体, 刀尖圆弧半径为 0.2 mm。由于刀具与工件摩擦生热及塑性功转换, 切削过程通常发生温度变化, 采用热力耦合有限元分析, 考虑刀具的热传导。切削深度通过调整刀具离工件表面 y 轴方向的位置实现, 切削速度通过控制刀具沿 x 轴方向的平移运动速度实现。工件左右两侧和底部采用刚体限制其位移。计算选取镀材的切削实验参数为: 切削深度 0.05 mm, 切削速度 1000 mm/s, 刀具前角和后角分别为 23° 和 10°。

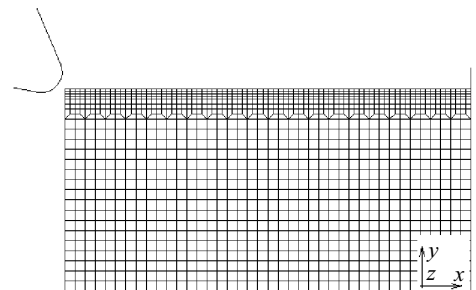


图 1 单元初始网格划分

Fig.1 Initial mesh of finite element

收稿日期: 2008-09-07

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金及表面物理与化学国家重点实验室基金(2005Z0302、SPC200705)

作者简介: 董 平, 男, 1970 年生, 博士, 高级工程师, 表面物理与化学国家重点实验室, 四川 绵阳 621907, 电话: 0816-3626968

1.2 材料性能与本构关系

工件材料为热等静压铍 (HIPed-Be), 铍含量大于 99.0%, 密度 $\rho=1850 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\nu=0.022$, 考虑铍材热物理性能 (导热系数 λ 、比热 C_v 、线膨胀系数 α) 和力学性能 (弹性模量 E 、泊松比) 随温度的变化, 在高速切削过程中, 刀具前方材料处于高温、大应变和高应变率状态下, 为了同时考虑温度、塑性应变和应变率的影响, 金属切削过程的材料本构关系通常采用 Johnson-Cook 模型, 其表达式如下:

$$\sigma = \left[A + B(\epsilon_p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 m 和 n 为材料常数; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, 取值为准静态应变率 $0.1/\text{s}$; T_m 为材料熔点; T_r 为室温。式 (1) 右边 3 项分别表示塑性应变、应变率和温度的影响。通过拟合静态应力-应变曲线以及高温拉伸试验结果, 可得到参数 A 、 B 、 m 和 n , 由动力学试验拟合参数 C 。本工作计算取: $A=420 \text{ MPa}$, $B=280 \text{ MPa}$, $n=0.58$, $m=1$, $C=0.01$, $T_r=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_m=1283 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3 求解技术

在金属切削过程中, 随着刀具不断向前推进, 刀尖处材料与工件分离形成切屑, 使用 Marc 软件模拟时, 可通过网格重划分实现切屑不断形成和分离, 本研究采用增量步、单元畸变和接触穿透 3 种准则组合判定网格是否重划分。切屑形成后, 切屑与刀具保持接触关系, 而接触节点受到挤压表现为压应力, 随着切屑不断生成, 压应力减小并与刀具发生分离, 分离准则为: 当与前刀面接触节点应力为非常小的拉应力时 (计算取 0.5 MPa), 切屑单元与前刀面分离。

实验表明, 切屑和刀具前刀面接触区域分为滑动区和粘着区^[10]。滑动区摩擦应力计算采用 Columb 摩擦定律, 但随着切屑与前刀面间压力的增大, 按 Columb 摩擦定律计算摩擦应力可能超过材料最大剪切应力, 而粘着区最大摩擦应力为材料剪切应力。因此, 按下式计算滑动区和粘着区摩擦应力^[9]:

$$f = \min \{ \mu \sigma_n, \tau \} \quad (2)$$

式中: μ 为摩擦系数, σ_n 为接触节点法向应力, τ 为材料最大剪切应力。

金属切削热主要来源于两个方面: 一是切屑与工件之间的摩擦生热; 二是切屑塑性功转化。假定摩擦热一半传给工件, 另一半传给刀具, 因此, 计算中取摩擦热效率为 0.5; 塑性功转化的热效率一般取 90%。由于铍延展性较差, 当刀具前方切屑单元法由塑性应变转变为拉应变, 且比金属铍断裂应变大时, 该单元将发生破坏。计算中编写单元生死子程序模拟这种现

象, 当某一切屑单元 4 个积分点平均塑性应变大于 5% 时, 令该切屑单元死, 同时也可避免切屑单元塑性功继续转化。

2 结果和讨论

2.1 切削温度场

铍材切削过程中刀具前方温度场分布示于图 2。可见, 切削过程中铍材升温并不明显, 最高温度约 $43 \text{ }^\circ\text{C}$, 主要是由于铍材延展性差, 刀具前方铍材切屑脱落时, 塑性功热转换低以及铍优良的导热性能所致, 这种现象与铍材切削试验较为吻合。铍材切削过程中刀具前方最高温度与刀具行程的变化示于图 3。可见, 在切削开始时, 切屑最高温度迅速升高, 当刀具行程约 2 mm 后, 切屑最高温度达到稳定状态, 在稳定状态下切屑最高温度在 $43\sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化。

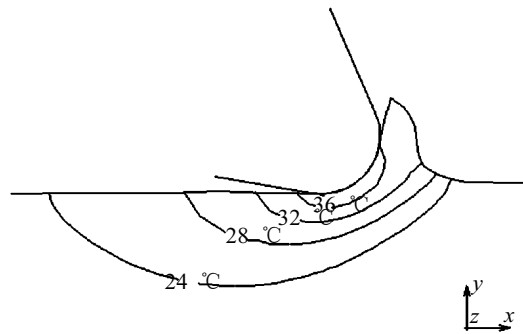


图 2 刀具前方温度场分布

Fig.2 Distribution of temperature fields near cutter tip

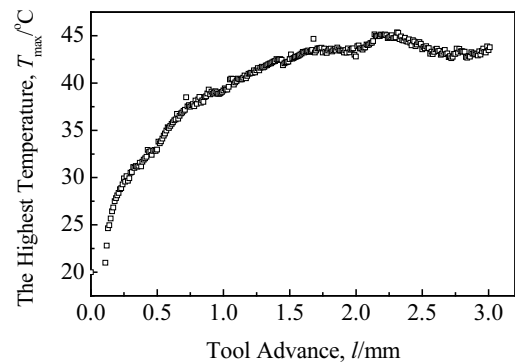


图 3 铍材切削过程的最高温度与刀具行程的关系

Fig.3 Change of the highest temperature in Be cutting process

2.2 工件切削后残余应力应变分布

铍材切削后工件厚度方向残余应力分布示于图 4, 图中 σ_x 为走刀方向应力, σ_z 为垂直于走刀方向应力。可见, 铍材切削后工件表面两个方向的应力分量均为拉应力, 二者分别为 150 和 200 MPa , 但在工件

表层 0.5 mm 内, σ_x 的应力梯度小, σ_z 的应力梯度大, σ_x 在整个样品厚度内均保持为拉应力, 而 σ_z 在离表面 0.2 mm 后转变为压应力。铍材切削后工件厚度方向残余塑性应变分布示于图 5, 图中 ϵ_x 为走刀方向塑性应变, ϵ_z 为垂直于走刀方向塑性应变。可见, 铍材切削后沿走刀方向应变 ϵ_x 为拉应变, 垂直于走刀方向 ϵ_z 为压应变, 残余变形主要分布在离表面 0.5 mm 以内区域。实验研究表明^[6], 铍材切削加工后表层晶粒发生孪晶变形和形成微裂纹, 正是由于铍材切削加工塑性应变所致, 采用化学蚀刻法去除塑性应变层, 可改善铍材的力学性能和加工性能。

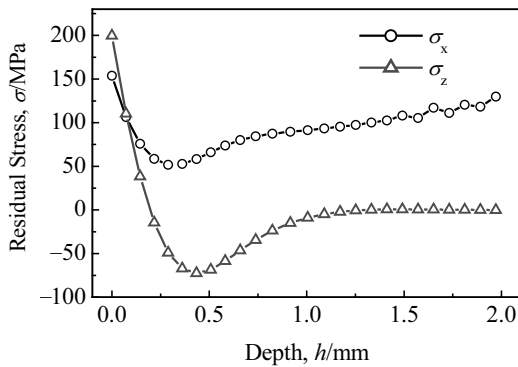


图 4 工件厚度方向的残余应力分布

Fig.4 Residual stress along the workpiece depth

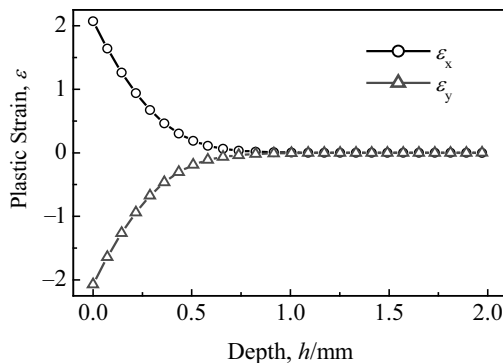


图 5 工件厚度方向的残余塑性应变分布

Fig.5 Residual plastic strain along the workpiece depth

2.3 切削过程中切削力和进给力的动态变化

切削过程中切削力和进给力是切削工艺、刀具设计的重要参数, 通过对金属切削过程进行热弹塑性有限元分析, 可以获得它们在切削中的动态变化。铍材在切削过程的切削力和进给力变化示于图 6, 图中切削力为正值, 表示力的方向垂直于工件表面向上, 进给力为负值, 表示力的方向与刀具前进方向相反。由图可见, 切削开始阶段切削力和进给力迅速增大, 切削力和进给力分别

在刀具行程约 0.5 和 1.8 mm 后达到稳定状态, 稳定状态下二者分别约为 280 和 -250 N/mm, 其大小不仅取决于切削材料、工艺、刀具形状, 还与单元厚度有关, 本研究计算取单元厚度为 1.0 mm。稳定阶段切削力波动主要由于金属切削过程中切屑不停地与刀具前刀面接触和分离所致; 另外, 刀具与切屑发生接触穿透以及网格重划分对波动幅度也有影响。

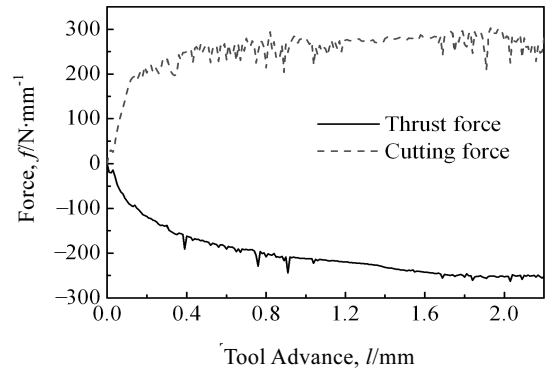


图 6 工件切削过程的切削力和进给力与刀具行程的变化关系

Fig.6 Change of cutting force and thrust force during the workpiece cutting process

2.4 实验验证

采用 X3000 应力分析仪测试铍环切削加工表面残余应力, 该仪器以 X 射线衍射原理为基础对材料表面应力进行无损测试。铍环切削加工参数与本研究计算模型相同, 测试铍环表面两不同点 A 和 B 的残余应力 (图 4 中), 每点分别测试 3 次, 以 3 次测试平均值表示该应力大小。表 1 列出有限元计算和测试结果。可见, 铍材表面残余应力有限元计算与测试值应力状态一致, 均为拉应力, 从而可定性证实数值计算结果的合理性。

表 1 铍环切削加工表面应力有限元计算与实测值对比

Table 1 Comparison of cutting stress at the surface of Be ring by FEM and experiment

Stress component	Measured stress/MPa		Calculated stress/MPa
	Point A	Point B	
σ_x	136.7	163.5	153.92
σ_z	154.9	189.7	199.73

3 结 论

- 1) 铍材切削加工过程温升不明显。
- 2) 铍材切削加工后, 工件表面平行和垂直于走刀方向的残余应力分量均为拉应力, 与 X 射线应力测试

吻合, 一定深度后垂直于走刀方向应力分量转变为压应力, 而平行于走刀方向应力分量仍为拉应力, 切削加工后残余塑性变形主要分布在离表面 0.5 mm 以内。

3) 在稳定状态下, 计算得到铍材切削力和进给力分别为 280 和 -250 N/mm。

参考文献 References

- [1] Dong Ping(董平), Chen Yuze(陈裕泽), Zou Juesheng(邹觉生). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(8): 881
- [2] Dong Ping(董平), Chen Yuze(陈裕泽), Zou Juesheng(邹觉生). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(6): 585
- [3] Dong Ping(董平), Li Ruiwen(李瑞文). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(8): 585
- [4] Dong Ping(董平), Chen Yuze(陈裕泽), Zou Juesheng(邹觉生). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2004, 25(3): 79
- [5] Zhang Pengcheng(张鹏程), Dong Ping(董平), Zou Juesheng(邹觉生). *Mineral & Metallurgy*(矿物与冶金)[J], 2001, 10(1): 59
- [6] Zhang Pengcheng(张鹏程). *Nonferrous Metal*(有色金属)[J], 2001, 53(1): 60
- [7] Pantale O, Bacaria J L, Dalverny O. *Computer Methods in Applied Mechanics And Engineering*[J], 2004, 193: 4383
- [8] Mamalis A G, Horvath M, Branis A S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 110: 19
- [9] Deng Wenjue(邓文君), Xia Wei(夏伟), Zhou Zhaoyao(周照耀). *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2004, 40(3): 71
- [10] Zhou Zehua(周泽华). *Theory of Metal Cutting*(金属切削理论)[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992: 128

Numerical Simulation of Temperature and Stress Fields in Beryllium Cutting Process

Dong Ping, Li Ruiwen

(National Key Laboratory Surface Physics and Chemistry, Mianyang 621907, China)

Abstract: Using the MSC.Marc software, the temperature and stress fields in beryllium during cutting process are studied by employing a thermo-mechanically coupled finite element method (FEM). The constitutive equation of beryllium is fitted with the Johnson-Cook plasticity model, and an user subroutine is written for modeling the chip separation after fracturing. The results show that the temperature in beryllium increases only a little and the highest temperature is about 45 °C. Both of the residual stress components for parallel and vertical to the cutting direction are tensile on the surface of beryllium after cutting. The cutting force and thrust force are 280 and -250 N/mm, respectively, during the cutting steady state if the cutting process is adopted in this paper. This study is helpful to enhance the understanding for stress formation and the optimizing for the beryllium cutting process.

Key words: beryllium; temperature field; stress field; cutting; FEM

Biography: Dong Ping, Ph. D., Senior Engineer, National Key Laboratory Surface Physics and Chemistry, Mianyang 621907, P. R. China, Tel: 0086-816-3626968