

基于 D-P 本构的 Vit1 型金属玻璃激光加热辅助切削仿真研究^①

金 蒙^② 赵 岩 赵光光 符加彬 王加春^③

(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

(河北省重型智能制造装备技术创新中心 秦皇岛 066004)

摘 要 金属玻璃属于典型的难加工材料,为了提高切削加工性能,利用其强度和硬度对温度敏感的特性,提出金属玻璃的激光加热辅助切削加工,并以 Vit1 型金属玻璃为对象进行仿真研究。针对有限元软件中没有适用于金属玻璃本构模型的问题,构建了 Vit1 型金属玻璃的 Drucker-Prager 本构模型,通过切削力仿真值与实验值的对比验证了本构模型的准确性。由于在有限元软件中无法直接定义和加载激光光源模型,利用 Fortran 语言编写了激光光源代码,并嵌入到有限元软件,然后将激光加热金属玻璃的梯度温度场数据加载到金属玻璃的二维切削仿真模型中,进行了切削仿真。仿真结果表明,在给定的切削用量下相比传统切削,采用激光加热辅助切削金属玻璃的最高温度降低 15.1%,最大 Mises 应力降低 23.3%,切削力降低 36.1%,且稳定切削时切削力的波动幅度更小,表明了利用激光辅助切削的方式可以提高金属玻璃的切削加工性。

关键词 金属玻璃; D-P 本构模型; 激光加热辅助切削; 仿真研究; 切削力

0 引 言

金属玻璃属于非晶态合金,是一类通过快速冷凝技术制备而成的新型工程材料。其微观结构具有长程无序、中短程有序的特点,并且不存在晶界、位错等晶体缺陷,因而具有优异的力学、物理和化学性能。金属玻璃已经成功应用在变压器、生物医药、高端体育器材和航空航天等领域^[1]。金属玻璃在常温下具有高硬度高强度特征,属于典型的难加工材料,国内外学者研究发现采用常规方法加工金属玻璃时存在切削温度高,刀具磨损严重等问题^[2-4]。同时,材料领域的实验研究证实金属玻璃是一种温度敏感材料^[5],温升会显著降低金属玻璃的硬度。鉴于这两个方面的原因,利用激光加热辅助切削(laser assisted machining, LAM)技术的热效应软化块体金属玻璃的表层材料,理论上可以大幅提升金

属玻璃的切削加工性能。

LAM 技术通过激光加热软化切削区材料,再利用刀具进行切削加工^[6],与常规加工方法相比在降低切削力、延长刀具寿命、提高加工质量和加工效率等方面展现出许多优势,为解决难加工材料的加工提供了一种有效途径^[7]。国内外学者已经利用 LAM 技术对工程陶瓷、钛合金等典型的难加工材料进行了一系列研究。Anderson 等人^[8]对 Inconel718 材料进行了激光加热辅助车削加工,较常规加工比切削能(去除单位体积材料所需要的切削能量^[9])降低 25%,刀具寿命提高 2 ~ 3 倍。Hedberg 等人^[10]对钛合金材料 Ti6Al4V 进行了激光辅助铣削加工实验研究,相比于常规加工,切削力降低 30% ~ 50%,表面残余应力降低 10%,加工成本节省 33%。普渡大学的 Tian 等人^[11,12]对工程陶瓷材料的 LAM 技术进行了系统的理论与试验研究,结果表

① 国家自然科学基金(51675468)和河北省自然科学基金(E2016203462, E2018203440)资助项目。

② 男,1995 年生,硕士;研究方向:金属玻璃精密加工;E-mail: 2591006148@qq.com

③ 通信作者,E-mail: wjczth@ysu.edu.cn

(收稿日期:2018-12-15)

明,随着工件温度的升高,切削力降低,刀具耐用度增加,比切削能减小。苏怡雪、王励豪等人^[13,14]对钛合金进行了 LAM 微铣削和车削仿真研究,利用 ABAQUS 建立了热力耦合模型,研究了切削过程中的温度和力等关键参数,并与传统加工技术进行了比较,证明了 LAM 技术加工金属材料的有效性。

目前 LAM 技术在金属玻璃切削加工中的应用还未见报道。本文以 Vit1 (Zr_{41.2} Ti_{13.8} Cu_{12.5} Ni_{10.0} Be_{22.5}) 型金属玻璃为对象,利用有限元软件仿真研究其在激光加热辅助情况下的切削加工性能,为后续的加工系统设计及实验研究奠定了基础。

1 金属玻璃 D-P 本构模型

1.1 金属玻璃 D-P 模型的构建

金属玻璃作为一种新型非晶态合金材料,目前通用有限元软件平台中没有适用于金属玻璃的材料本构模型,因此在有限元软件中建立能够反映金属玻璃变形特性的材料本构模型是开展金属玻璃 LAM 加工仿真研究的前提和关键。

目前,已有学者采用 Mohr-Coulomb 模型(以下简称 M-C 模型)描述金属玻璃的本构关系,该模型很好地解释了金属玻璃的一些实验现象^[15,16],如“拉-压不对称性”、“材料的剪胀效应”等。然而 Drucker-Prager 本构模型(以下简称 D-P 模型)与 M-C 模型相比,D-P 考虑了中间主应力的影响,M-C 则没有^[17,18],D-P 模型更为准确全面,故本文采用 D-P 模型。

D-P 模型是通过 D-P 屈服准则、塑性流动规律和硬化规律 3 部分来描述材料的塑性行为。在 ABAQUS 有限元软件中,D-P 本构关系模型有线性函数、双曲函数和指数函数这 3 种扩展形式^[19]。通常,二维切削仿真采用 ABAQUS/Explicit 显式求解,只有线性函数描述的 D-P 模型可以进行显式求解,故本文采用线性模型。

线性 D-P 模型需要确定的参数有 5 个,分别是剪胀角 ψ 、摩擦角 β 、拉压强度比 m 、凝聚力 d 、塑性应变 ε_p 。这些参数可按照平面应变屈服极限相同条件下由 M-C 模型转换求解。

由于二维切削仿真属于平面应变问题,可以设定 $m = 1$ ^[20]。对于 Vit1 金属玻璃,本文采用相关流动法则,有 $\psi = \beta$ 。当 $m = 1$, $\psi = \beta$ 时,D-P 模型与 M-C 模型之间的参数转换关系为^[19]

$$\tan\beta = \frac{\sqrt{3}\sin\varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3}\sin^2\varphi}} \tag{1}$$

$$\frac{d}{c} = \frac{\sqrt{3}\cos\varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3}\sin^2\varphi}} \tag{2}$$

式中, φ 为 M-C 本构模型中的摩擦角; c 为 M-C 本构模型中材料的凝聚力,即剪切面上正应力为零时的剪切强度。

在 M-C 本构关系模型中,金属玻璃内摩擦系数 α 约为 0.123^[20],由摩擦系数与摩擦角的关系可求得摩擦角 $\varphi = 7.0122^\circ$,代入式(1)得到 $\beta = 11.902^\circ$ 。

根据相关流动法则,剪胀角 $\psi = \beta = 11.902^\circ$ 。
考虑金属玻璃的温度敏感性的 M-C 屈服准则中剪切强度表达式为^[21]

$$\tau = k(1 - \sqrt{\lambda \cdot T/T_g}) + \alpha\sigma_n \tag{3}$$

式中, k 为材料在室温下剪切面上无正应力时的抗剪强度,其数值为 1 GPa^[21]; λ 为无量纲温度影响因子,约等于 0.2^[20]; T 为初始温度,设为 293 K; T_g 为玻璃转变温度,取 638 K^[16]; σ_n 为剪切面上的正应力,求凝聚力时 $\sigma_n = 0$ 。将这些参数代入式(3)得到考虑温度影响的 M-C 屈服准则的凝聚力 c 为 696.93 MPa,将此值代入式(2)得 D-P 模型的凝聚力 $d = 1\,194.62$ MPa。本文采用理想线弹塑性模型,不指定塑性应变,故塑性应变 $\varepsilon_p = 0$ 。

D-P 本构模型中参数求取完毕,剪胀角 $\psi = 11.902^\circ$ 、摩擦角 $\beta = 11.902^\circ$ 、拉压强度比 $m = 1$ 、凝聚力 $d = 1\,194.62$ MPa、塑性应变 $\varepsilon_p = 0$ 。将这 5 个参数输入 ABAQUS 线性 D-P 模型中,完成本构模型的构建。

1.2 金属玻璃 D-P 模型的准确性验证

金属玻璃 D-P 材料模型的准确性是后续激光加热辅助切削仿真的基础。采取仿真主切削力与实验主切削力进行对比的办法进行验证,对比实验数据来自本课题组实验,实验采用直径 10 mm,长度 90

mm 的 Vit1 型金属玻璃,在 CA6140 型车床上车削加工,切削力的测量选用 9119AA2 型多功能测力仪,详细介绍见文献[18]。

将 D-P 模型参数以及其它材料参数如密度、热传导率、比热容、弹性模量等(见表 1)输入到 ABAQUS 中,建立 Vit1 金属玻璃的二维切削模型。

表 1 Vit1 金属玻璃物理力学参数^[2,5]

材料性能参数	符号	数值
玻璃转变温度	T_g	638 K
晶化温度	T_x	692 K
剪切强度	C	1 GPa
泊松比	ν	0.36
热传导率	ξ	4 W/(mK)
比热容	c	420 J/(kgK)
密度	ρ	6 125 kg/m ³
杨氏模量	E	96 GPa

将 3 组实验测量的主切削力与仿真值进行对比,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出实验值与仿真值很相近,3 组结果的相对误差分别是 4.3%、4.4% 和 8.9%,总体相对误差在 10% 以内,证明了建立的 D-P 模型及切削仿真模型较为准确,可以为后续的激光加热辅助切削仿真研究使用。

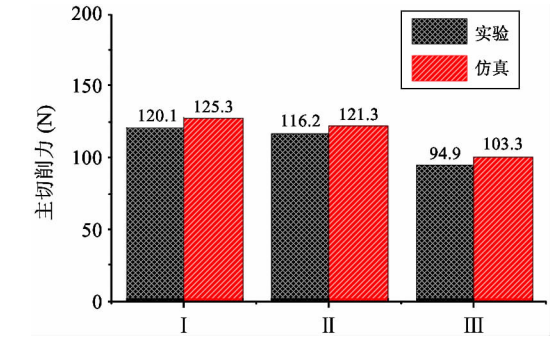


图 1 实验与仿真的主切削力对比图

2 激光加热辅助切削仿真模型

由于激光光源模型无法在 ABAQUS 软件中直接定义和加载,因此本文激光加热辅助切削仿真的基本思路是:首先通过 Fortran 语言利用 DFLUX 子程序经二次开发实现激光光源加载,然后通过有限元软件仿真得到激光加热 Vit1 型金属玻璃温度场,

最后建立 Vit1 金属玻璃二维切削仿真模型,将之前得到的温度场作为初始温度场加载到金属玻璃的切削仿真模型当中。

2.1 激光光源模型的建立

首先通过 Fortran 语言利用 DFLUX 子程序经二次开发实现激光光源加载,建立了激光加热 Vit1 型金属玻璃的轴对称仿真模型。激光光源模型采用高斯热源,其表达式^[22]为

$$I = \frac{2\eta P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right)$$
 (4)

式中, I 为激光功率密度, P 为激光功率, η 为激光吸收率, r 为距离激光中心距离, R 为光斑半径。

考虑到激光加热时间较短、能量高等因素,忽略了工件表面和外界的对流和辐射换热,仅考虑工件内部的热传导。在 ABAQUS 中,该加热模型是通过 Fortran 语言编写用户子程序 DFLUX 实现的。

部分 Fortran 编码如下:

SUBROUTINE

DFLUX (FLUX, SOL, JSTEP, JINC, TIME, NOEL, NPT, COORDS, JLTY, TEMP, PRESS, SNAME)

INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'

parameter(one = 1. d0)

DIMENSION COORDS(3), FLUX(2), TIME(2)

CHARACTER * 80 SNAME

$P = 120$

$\nu = 0.068$

$R = 0.003$

$d = \nu \times \text{TIME}(2)$

$x = \text{COORDS}(1)$

$y = \text{COORDS}(2)$

$z = \text{COORDS}(3)$

$x0 = 0$

$y0 = 0$

$z0 = 0$

$\text{PI} = 3.1415$

$r = \text{sqrt}((x - x0 - d) ** 2 + (y - y0) ** 2)$

```
C  JLTYPE=0,表示为面热源
JLTYPE=0
if (JSTEP. eq. one) then
  FLUX(1)=2*0.25*P/(PI*R**2)*exp
(-2*r**2/R**2)
ENDIF
RETURN
END
```

2.2 激光工艺参数的选择

激光加热形成的工件温度场分布和激光功率 P 、光斑半径 R 和激光移动速度 v 有关。为选择合适的激光参数,针对不同的激光工艺参数,进行了多组温度场仿真实验。

考虑到激光加热辅助切削激光的光斑尺寸相比于工件尺寸很小,故在激光加热 Vit1 型金属玻璃的温度场仿真时将工件设为矩形平板。

为了在激光加热辅助切削时,使用合适的激光参数(激光功率、光斑半径及激光移动速度),以加热软化厚度和最高温度为目标进行正交分析,表 2 为激光加热辅助切削 Vit1 金属玻璃的仿真正交实验结果。

表 2 激光加热辅助切削 Vit1 金属玻璃的仿真正交实验结果

仿真次数	激光功率 (W)	光斑大小 (m)	激光移动速度 (m/s)	最高温度 (℃)	加热软化厚度 (m)
1	80	0.002	0.068	676.7	6.0E-04
2	80	0.0025	0.114	490.2	4.7E-04
3	80	0.003	0.172	403.4	3.9E-04
4	100	0.002	0.114	664.3	4.7E-04
5	100	0.0025	0.172	495.3	3.8E-04
6	100	0.003	0.068	533.1	6.2E-04
7	120	0.002	0.172	654.7	3.8E-04
8	120	0.0025	0.068	697.5	6.2E-04
9	120	0.003	0.114	514.6	4.8E-04

以最高温度为目标,对正交仿真结果进行直观分析,如表 3 所示。表中 $K_i(i=1,2,3)$ 是任一系列水平号为 i 时所对应的仿真结果, k_i 是任一系列上因素取水平 i 时所得到的仿真结果的算术平均值,其计算公式是 $k_i=K_i/s$, 式中 s 为任一系列上各水平出现的次

数。从表中可以看出,光斑大小对激光加热最高温度影响最大,其次是激光速度,影响最小的是激光功率,最高温度值随着激光功率的增加而增加,随着光斑的增大而减小,随着移动速度的增加而减小。并且从表 3 可以看出,当激光功率、光斑大小及激光移动速度取表 2 中的值时,要想加热温度达到最大值,激光功率、光斑大小及激光移动速度可分别取 120 W、0.002 m 和 0.068 m/s。

以加热软化厚度为目标,对正交仿真结果进行直观分析,如表 4 所示。可以看出,激光移动速度对软化厚度影响最大,其次是光斑大小,最后是激光功率。加热软化厚度随着激光功率的增加而增加,随着移动速度的增加而减小,随着光斑半径的增大而增大。并且从表 4 可以看出,当激光功率、光斑大小及激光移动速度取表 2 中的值时,要想加热软化厚

表 3 以最高加热温度为目的的直观分析表

	激光功率 (W)	光斑大小 (mm)	激光移动速度 (m/s)
K1	1570.3	1995.7	1907.3
K2	1692.7	1683.0	1699.1
K3	1866.8	1451.1	1553.4
k1	523.4	665.2	635.8
k2	564.2	561.0	556.4
k3	622.3	483.7	517.8
极差	296.5	544.6	353.9
因素主次	光斑大小→激光速度→激光功率		
优方案	120	0.002	0.068

表 4 以加热软化厚度为目的的直观分析表

	激光功率 (W)	光斑大小 (mm)	激光移动速度 (m/s)
K1	1.46E-03	1.45E-03	1.84E-03
K2	1.47E-03	1.46E-03	1.42E-03
K3	1.48E-03	1.49E-03	1.16E-03
k1	4.87E-04	4.83E-04	6.13E-04
k2	4.9E-04	4.87E-04	4.73E-04
k3	4.93E-04	4.97E-04	3.87E-04
极差	0.2E-04	0.4E-04	6.8E-04
因素主次	激光速度→光斑大小→激光功率		
优方案	120	0.003	0.068

度最大,激光功率、光斑大小及激光移动速度可分别取 120 W、0.003 m 和 0.068 m/s。

总结上述分析,激光加热工件时最高温度和软化层厚度都会随着激光功率的增加而增加,随着移动速度的增加而减小^[14,23]。光斑半径对最高温度和软化层厚度的影响不同,最高温度会随着光斑半径的增大而减小,而软化层厚度会随着光斑的增大而增大。当增大光斑时,增加了激光对照射点的加热时间(激光对照射点的加热时间为光斑直径除以激光移动速度),这有利于热传导,但与此同时光斑的增大减少了单位面积上的热流密度,这 2 种现象的综合作用效果使得加热软化厚度增加而温度降低。

当激光加热温度超过 Vit1 金属玻璃的晶化温度(692 K)然后冷却至室温时,材料微观结构会有从非晶态演化成晶态的趋势,从而失去非晶的优良特性,故已加工表面最高加热温度应当小于晶化温度。综合上面的分析考虑,为确保金属玻璃在激光加热辅助切削时,材料软化层厚度达到实验中的切削深度和保证加工后已加工表面不发生晶化,经过多次仿真,确定光斑半径 0.003 m,激光功率 120 W,移动速度 0.068 m/s,照射时间为 0.1 s,作为激光辅助切削金属玻璃仿真时的光源参数。

2.3 激光加热金属玻璃的温度场仿真

利用前面建立的 Vit1 型金属玻璃的材料模型和激光模型对其进行加热仿真,仿真步骤如下:

(1) 建立几何模型

激光加热辅助车削的待加工材料为一个圆柱体,激光加热圆柱体时的光斑非常小,可以近似为激光加热一个半径无限大的圆柱,也就是一个平板,故在激光加热 Vit1 型非晶合金的温度场仿真时将工件建立成一个矩形平板。

(2) 建立材料模型并将其赋予几何模型

经过上一节的切削仿真及验证,可以看出切削模型和材料模型是正确的,因此此处将加入了材料参数随温度变化的上一节材料模型赋予给几何模型。

(3) 设置分析步

激光加热金属玻璃属于瞬态过程,在仿真时设置为隐式通用热传导分析步,其增量步的选择通过时间增量的最小来确定。设置准则为^[24]

$$\Delta t \geq \frac{\rho c \Delta l^2}{6k} \quad (5)$$

式中, Δt 为时间增量, ρ 为密度, Δl 为单元长度。

(4) 施加载荷及边界条件

在相互作用模块里面,设置对流换热和热辐射边界条件,在载荷和边界条件模块中设置恒温边界条件及用户子程序 DFLUX 自定义的激光热流密度载荷,通过此处的设定和以下第(6)步提交 job 文件处的设定就将二次开发的激光模型加载到仿真模型中。

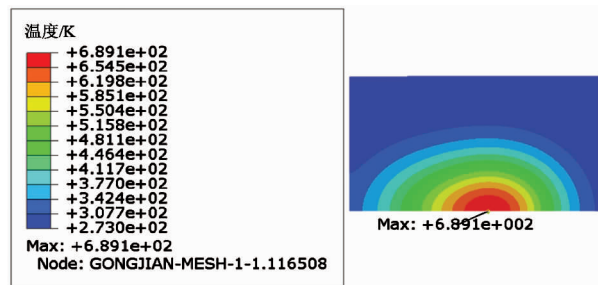
(5) 划分网格

对加热板的网格划分采用隐式热传导网格,网格形状为六面体,单元类型为 DCC3D8D。

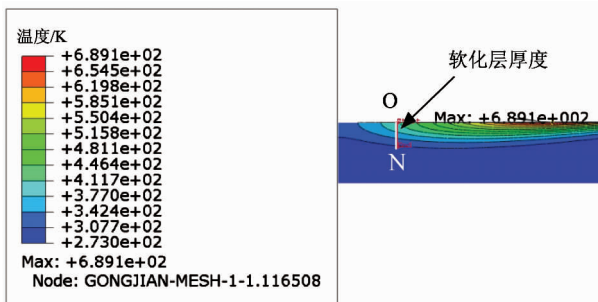
(6) 创建及提交 job 文件与结果分析

前面的步骤完成后,开始创建 job 文件。在文件创建时,需要将子程序连接到模型中。在此同时,还需设置处理器个数及结果精度。通过激光加热 Vit1 型金属玻璃的仿真工作可以得到施加辅助激光热源之后金属玻璃的温度场,通过调整激光功率、光斑半径及移动速度可分析其对温度场的影响,为激光加热辅助切削仿真提供理论依据。

图 2 为 $P = 120 \text{ W}$, $R = 0.003 \text{ m}$, $v = 0.068 \text{ m/s}$, 照射时间 $t = 0.1 \text{ s}$ 时的仿真温度场云图。



(a) 俯视图



(b) 剖视图

图 2 激光加热 Vit1 金属玻璃轴对称模型温度场云图

图 2(a)为从工件上方看时工件表面的温度场,由图可以看出,工件右侧的等温线比左侧更密集,这表示温度场右侧区域温度梯度变化较左侧大。图 2(b)为从工件侧面看去工件表面到工件内部的温度场。由图 2 可看出,仿真温度场最高加热温度为 689.1 K,没有超过金属玻璃的晶化温度(692 K)。

利用此光源参数对 Vit1 型金属玻璃进行激光加热仿真时,图 2(b)中 O 点处竖直面内的温度分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出,当选择切深为 0.05 mm 时,此位置的温度为 420 K,在 0.25 mm 深度处的温度为 368 K。

2.4 激光加热辅助切削仿真

建立切削仿真模型。刀具前角为 4°,后角为 5°,刃口半径为 0.056 mm,切削速度为 0.068 m/s,切削深度为 0.05 mm,工件厚度为 0.25 mm。将图 3 所示的坐标原点至 0.25 mm(同工件厚度)深度处的温度场从工件表面加载到工件底部,加载后的温度分布及切削模型如图 4 所示,工件此时的温度场即为切削仿真时的初始温度场,其中切屑层底部温度为 420 K,工件底部为 368 K。

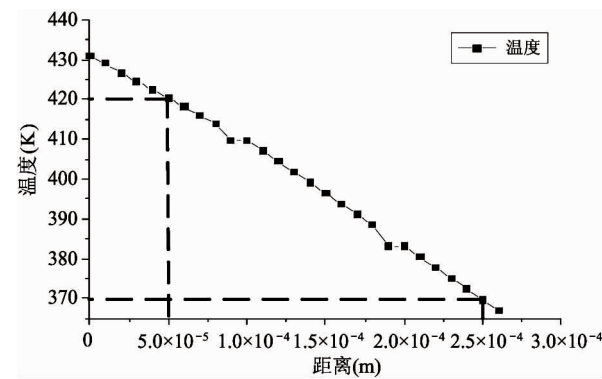


图 3 工件坐标原点处竖直剖面内温度分布

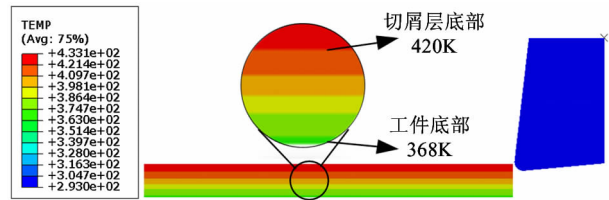


图 4 加载温度场后的切削模型

本构模型采用前面建立的 D-P 模型。仿真中不考虑刀具变形对切削过程的影响,将刀具设为刚

体。采用网格重划分技术及质量缩放技术,质量缩放系数为 80。切屑分离准则采用物理准则,以剪切准则定义损伤萌生,以有效塑形位移定义损伤演化。单元损伤量 $D_{max} = 1$,当单元损伤达到此值时,材料发生失效而从模型中去除。摩擦模型采取摩尔-库伦模型,粘结区内摩擦系数为 1,滑移区的摩擦系数为 0.1。塑形功转化成热的系数为 0.9,摩擦功转化成热的系数为 0.5。

3 仿真结果分析

3.1 应力场分析

激光加热辅助切削仿真所得的应力场如图 5(a)所示。为了分析激光加热辅助切削金属玻璃相对于传统切削的有效性,在相同的刀具和切削参数下进行了传统切削仿真,仿真所得的应力场如图 5(b)所示。

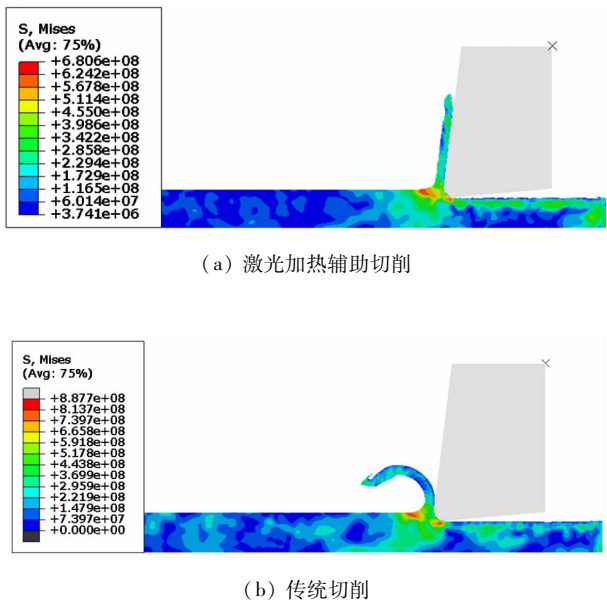


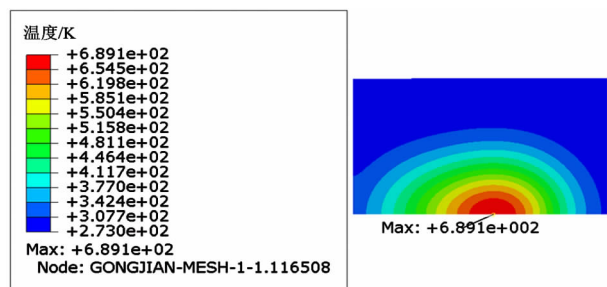
图 5 切削仿真应力场云图

对比应力场云图 5(a)和 5(b),发现激光加热辅助切削的最大 Mises 应力为 680.6 MPa,而传统切削的最大 Mises 应力为 887.7 MPa,减小了 207.1 MPa,相对降低了 23.3%。从图中可以看出,在此切削用量下,激光加热辅助切削的切屑几乎没有卷曲。导致这种现象的原因是激光加热使材料发生较大软化,从而导致微观剪切变形区内材料的流动应力降

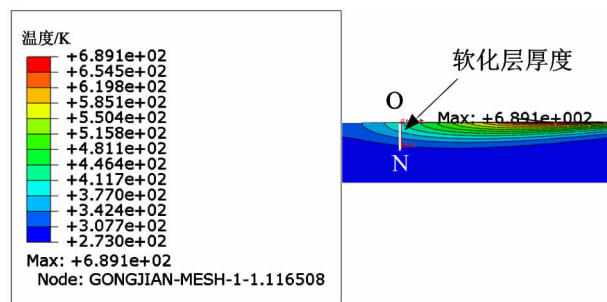
低进而使得切屑无法形成卷曲而沿着前刀面流动。

3.2 温度场分析

激光加热辅助切削仿真的温度场如图 6(a) 所示。同样为了比较,在相同切削参数下进行了传统切削仿真,温度场如图 6(b) 所示。



(a) 激光加热辅助切削



(b) 传统切削

图 6 切削仿真温度场云图

从图 6(a) 中看出工件已加工表面的温度场在 600 K 以下,小于 Vit1 型金属玻璃 692 K 的晶化温度,因此已加工表面不会发生晶化。对比温度场云图 6(a) 和 6(b),发现激光加热辅助切削的最高温度在刀尖附近为 724 K,比传统切削时的 853.3 K 降低了 129.3 K,相对降低了 15.1%。这是由于激光加热辅助切削时,金属玻璃因对温度敏感出现了明显的软化而使屈服应力降低,应力的降低导致切削力降低,使得工件塑性变形以及摩擦产生的热量减小,进而使切削温度降低。

3.3 切削力分析

对比金属玻璃激光加热辅助切削和传统切削仿真的主切削力,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,采用激光加热后主切削力较传统切削时明显减小,主切削力由 105 N 降低到

67 N,降低了 36.1%,且切削状态稳定时主切削力的波动幅度减小。切削力波动的减小有利于获取高精度的加工质量,特别是在精密切削加工中更为重要。同时较小的切削力和切削力波动也减小了工件对刀具的剧烈冲击,有助于延长刀具的使用寿命。

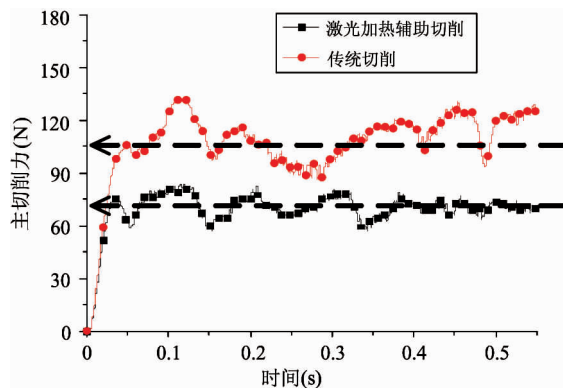


图 7 激光加热辅助切削与传统切削的主切削力对比

4 结 论

(1) 针对目前有限元软件中无适用于金属玻璃本构模型问题,构建了金属玻璃 D-P 本构模型,切削力仿真值与实验值对比误差小于 10%,表明本构模型的有效性。

(2) 通过激光加热 Vit1 金属玻璃温度场的大量仿真,确定了最佳激光光源参数为光源半径 0.003 m,移动速度 0.068 m/s,激光功率 120 W。

(3) 建立了激光加热辅助切削仿真模型,仿真得到了最高温度、最大 Mises 应力及切削力,与传统切削仿真结果对比,最高温度降低 15.1%,最大 Mises 应力降低了 23.3%,切削力降低了 36.1%,且稳定切削时切削力振幅更小,结果表明通过激光加热辅助切削明显提高了金属玻璃的切削加工性能。

后续工作将围绕以下几个方面进行:三维切削仿真研究;搭建金属玻璃激光加热辅助切削系统,并开展实验研究。

参考文献

- [1] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. 物理学进展, 2013,33(5):178-344
- [2] Bakka M, Shih A J, Scattergood R O. Chip formation,

- cutting forces, and tool wear in turning of Zr-based bulk metallic glass[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(9): 915-925
- [3] 张卫国. Vit1 块体金属玻璃的切削性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2012: 21-33
- [4] Zhao Y, Lu J, Zhang Y, et al. Development of an analytical model based on Mohr-Coulomb criterion for cutting of metallic glasses [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 12(16): 1-22
- [5] Lu J, Ravichandran G, Johnson W L. Deformation behavior of the $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass over a wide range of strain-rates and temperatures [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(12): 3429-3443
- [6] Smurov I Y, Okorokov L V. Laser Assisted Machining [M]. Netherlands: Springer, 1993
- [7] Venkatesan K, Ramanujam R, Kuppan P. Laser assisted machining of difficult to cut materials: reasearch opportunities and future directions—a comprehensive review[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 1626-1636
- [8] Anderson M, Parwa R, Shin Y C. Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(14): 1879-1891
- [9] Rodrigues A R, Reginaldo T C. Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2007, 29(3): 279-283
- [10] Hedberg G K, Shin Y C, Xu L. Laser-assisted milling of Ti6Al4V with the consideration of surface integrity[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(9): 1645-1658
- [11] Tian Y, Incropera F P. Laser-assisted machining of magnesiapartially-stabilized zirconia[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2004, 126(1): 42-51
- [12] Tian Y, Shin Y C. Thermal modeling for laser-assisted machining of silicon nitride ceramics with complex features[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2006, 128(2): 425-434
- [13] 苏怡雪. 基于尺寸效应的 TC4 合金激光辅助微铣切削力建模及仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学船舶与海洋工程学院,2016: 56-66
- [14] 王励豪,王武义. 激光加热辅助车削钛合金 Ti6Al4V 的数值研究[J]. *机械工程与自动化*,2017(1):34-36
- [15] Fujita K, Morishita Y, Nishiyama N, et al. Cutting characteristics of bulk metallic glass[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(12): 2856-2863
- [16] Zhu P Z, Qiu C, Fang F Z, et al. Molecular dynamics simulations of nanometric cutting mechanisms of amorphous alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 317: 432-442
- [17] 邹萍. 块体非晶合金屈服行为分析[D]. 湘潭:湘潭大学土木工程与力学学院,2015:13-14
- [18] 卢金平. 基于 M-C 屈服准则的金属玻璃切削力学建模与实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院, 2015: 26-30
- [19] 费康. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010: 70-77
- [20] Schuh C A, Lund A C. Atomistic basis for the plastic yield criterion of metallic glass[J]. *Nat Mater*, 2003, 2(7): 449-452
- [21] Sun L, Jiang M Q, Dai L H. Intrinsic correlation between dilatation and pressure sensitivity of plastic flow in metallic glasses[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63(9): 945-948
- [22] Tian Y, Incropera F P. Laser-assisted machining of magnesiapartially-stabilized zirconia[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2004, 126(1): 42-51
- [23] 吴雪峰. 激光加热辅助切削氮化硅陶瓷技术的基础研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2011:55-70
- [24] 颜伯霞,陈裕泽. 金属切削过程热力耦合的三维数值仿真[J]. *机械强度*,2011,33(6):845-849

Simulation research of laser-assisted machining of Vit1 metallic glass based on D-P constitutive model

Jin Meng, Zhao Yan, Zhao Guangguang, Fu Jiabin, Wang Jiachun

(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(Heavy-duty Intelligent Manufacturing Equipment Innovation Center of Hebei Province, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Metallic glass is a typical hard-to-machine material. In order to improve the cutting performance, the temperature-sensitive characteristics of strength and hardness are used. Laser-assisted machining of metallic glass is proposed, and simulation is carried out on Vit1 metallic glass. In view of no accurate material constitutive model of metallic glasses in finite element software, D-P constitutive model of Vit1 metallic glass is constructed. By comparing the cutting force with simulation cutting force, it proves the accuracy of the model. The laser source can't be directly defined and loaded in the finite element software, so the laser source code is written by Fortran language and embedded into the finite element software. Then the gradient temperature field of laser-heated Vit1 metallic glass is loaded into the two-dimensional cutting simulation model of metallic glass and cutting simulation is advanced. When comparing with normal cutting at the given parameters, the results show that the highest temperature of laser-assisted machining of Vit1 metallic glass is reduced by 15.1% and the maximum Mises stress by 23.3% and the cutting force by 36.1%. And there is a small fluctuation range during stable cutting of the cutting force that proves that the use of laser-assisted cutting to improve the machinability of metallic glass is an effective method.

Key words: metallic glass, D-P constitutive, laser-assisted machining, simulation research, cutting force