

铝 7075 介观尺度切削过程的仿真研究^{*}

宋 旭,解丽静,庞思勤,王西彬

(北京理工大学,北京 100081)

[摘要] 基于位错机制的应变梯度(MSG)塑性理论,采用任意拉格朗日-欧拉 ALE 算法,建立了铝合金介观尺度切削过程的仿真模型,并通过试验对仿真模型进行了验证。结果表明:PCD 刀具切削铝合金的最小切削厚度大致为刀具钝圆半径的 0.25~0.3 倍;材料应变梯度的存在使得材料表现出强烈的尺度效应,并且使单位切削力随着进给量的减小明显增大。

关键词: 介观尺度;最小切削厚度;刀具钝圆半径;应变梯度

Research on Simulation of Meso-Scale Machining Process of Al7075

SONG Xu, XIE Lijing, PANG Siqin, WANG Xibin

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] Based on the Mechanism-based Strain Gradient (MSG) plasticity theory, a model for the meso-scale cutting process is built and verified by the experiments. Using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) adaptive meshing technique. The results show that minimum chip thickness is proposed to be about 0.25 to 0.3 times as big as tool edge radius for meso-scale cutting of aluminum alloy by PCD tools. The strain gradient are found to be the main cause of the size effect of meso-scale machining and the specific cutting force significantly increases as the feed decreases.

Keywords: Meso-scale; Minimum cutting thickness; Tool edge radius; Strain gradient

DOI:10.16080/j.issn 1671-833x.2016.12.071

近年来,生产具有军事、医疗用途的微型发动机、血管清道夫以及尺寸微小、功能复杂的微型机电产品正在成为一种趋势,这种产品小型化的趋势使介观制造技术成为研究的热点。介观切削不仅仅是宏观切削在尺寸上的减小,而且存在诸如尺度效应、最小切削厚度等与宏观切削截然不同的特点和机理。由于经典塑性理论不能表现材料在不同尺度层次上的不同力学响应行为,因此不能很好地解释尺度效应。为了解释介观切削中的尺度效应,描述当切削量与材料特征长度相当时的材料变形特征,研究人员引入了基于微观机制的应变梯度(Mechanism-based Strain Gradient, MSG)塑性理论;在 MSG 理论中,为了平衡应变和应变梯度的量纲引入了材料内禀长度 l (长度量纲),成功揭示了金属材料的尺度效应,即材料强度随特征尺寸的降低而增加的现象。Jin^[1] 等扩展传统的切削理论,分析了微切削过程中刀具切削刃钝圆半径对尺度效应的影响;Lai^[2]、Liu^[3]、Ding^[4]

等将 MSG 理论运用于材料铜、Al5083、H13 模具钢的有限元仿真建模研究之中。

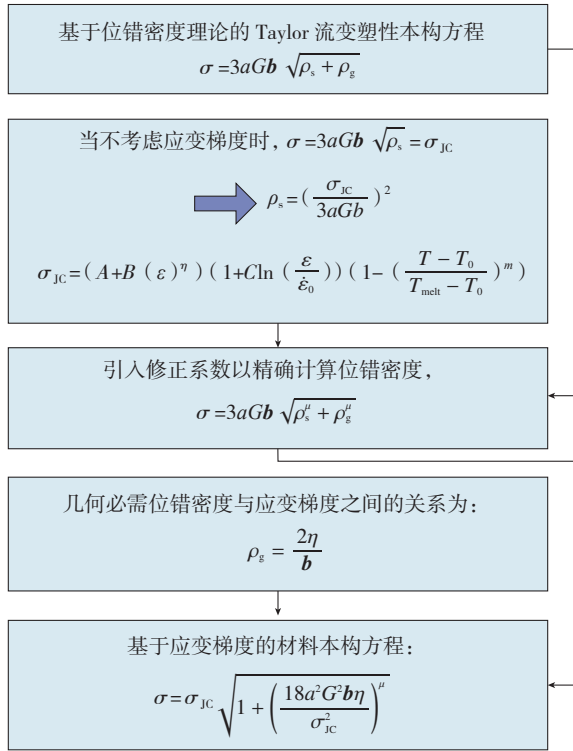
一般微型产品都对产品的轻量化有一定的要求,在铝合金材料中,Al7075 具有很高的强度,非常适合用于制造轻量化要求高的飞机承载结构件,如飞机零部件、齿轮和轴等,尤其是微型飞机发动机的零部件^[5]。针对 Al7075 的微切削加工开展基于 MSG 理论的有限元建模技术研究,首先建立 Al7075 的介观尺度力学性能的本构关系,然后结合 ALE 算法建立切削过程有限元仿真模型,最后通过 Al7075 微切削的有限元仿真,研究介观尺度下 Al7075 材料的最小切削厚度、单位切削力以及尺度效应。

1 基于应变梯度本构关系的建模

基于 MSG 的 JC 修正模型是在基于位错密度的 Taylor 流变塑性本构方程的基础上推导获得的,如图 1 所示。公式(1)为基于 MSG 的 JC 修正模型表达式:

$$\sigma = \sigma_{JC} \sqrt{1 + \left(\frac{18\alpha^2 G^2 b \eta}{\sigma_{JC}^2} \right)^\mu} \quad (1)$$

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04003051-3); 国家自然科学基金青年基金项目(50505003); 国家自然科学基金项目(50935001)。



注: α 为 Taylor 系数; G 为剪切模量; b 为 Burgers 矢量; η 为应变梯度; μ 为修正系数; ρ_s 为统计存储位错; ρ_g 为几何必需位错; σ_{JC} 为经典 JC 本构方程。

图1 基于应变梯度本构方程的推导

Fig.1 Constitutive equations based on the strain gradient derivation

Melkote^[6] 通过对微切削主变形区位错的分析, 获得了主变形区的应变梯度 η 与切削主剪切变形区长度 L 之间的关系, 其表达式为:

$$\eta = \frac{1}{L} \quad (2)$$

Kim^[7] 采用分子动力学的方法研究并提出了形成切屑和不形成切屑两种不同介观尺度切削情况的主剪切变形区长度 L 的计算方法:

$$\begin{cases} \text{形成切屑时, } L = \frac{f}{\sin \phi}, \\ \text{不形成切屑时, } L = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{r_n - f}{r_n}\right) \cdot \pi \cdot r_n}{180} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\phi = \frac{\cot^{-1}(K) - \beta + \alpha_c}{2} = \frac{\zeta - \beta + \alpha_c}{2}$, f 为进给量; ϕ 为剪切角; α_c 为铣刀周向前角; β 为摩擦角; r_n 为切削刃钝圆半径; 对于材料为铝合金, 刀具为金刚石刀具来说 ζ 的常数值为 90。

图 2 为根据式(1)中基于 MSG 的 JC 修正模型开发 ABAQUS 材料本构 vumat 子程序的流程图。图中: O 为状态变量; D 为刚度矩阵; σ 为应力; ϵ 为应变。

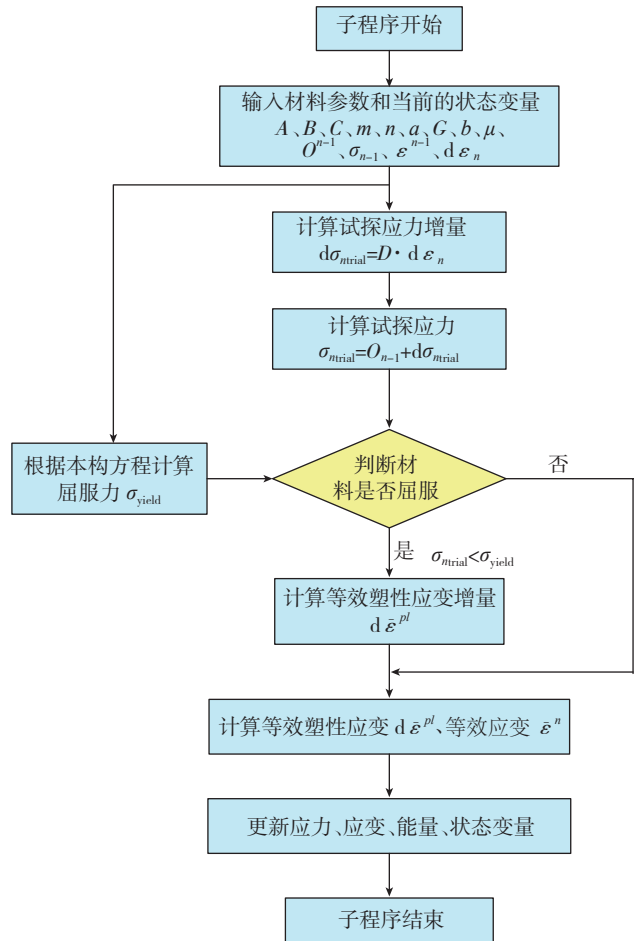


图2 材料本构vumat子程序的流程图

Fig.2 Flow chart of the VUMAT program

表 1 为后续介观切削仿真中所用到的 A17075 的材料参数^[8-9], 是在经典 JC 本构模型的材料参数基础上增添了反映材料尺度效应的微观材料参数。

2 基于 ALE 算法的有限元仿真技术

对于介观尺度切削中切削层的厚度与刀具的刃口钝圆半径同属于一个数量级的情况, 不合适的材料分离准则参数设置将会导致切削层内网格单元过多的失效和删除, 从而造成仿真预测的切屑厚度远小于实际的切屑厚度, 并且预测的其他参数也会产生较大的误差, 而材料分离准则参数的正确设置难度较大; ALE 算法能够绕开这一问题, 无需设置材料失效准则, 其切屑的形成是通过工件网格随着刀具不断切入工件而逐渐迁移到刃区前端的切屑分离区以提高这一区域的网格适应性, 精确模拟出刃区前端工件材料的变形情况而形成切屑, 因此 ALE 算法非常适合用于介观尺度切削仿真。

图 3 中工件上表面的网格将会随着刀具不断切入工件而逐渐迁移到刀具刃区的前端, 增加表面网格种子的数量有利于增加切削分离区的网格适应性, 更加精确

表1 Al7075的材料参数

类型	参数	数值
Al7075 物理参数	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2810
	弹性模量 E/MPa	73200
	泊松比 γ	0.33
	比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	900
	热膨胀系 $a / (10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	23.5
	热导率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	121
塑性应变梯度	Taylor 系数 α	0.35
	Burgers 矢量 b/nm	0.315
	剪切模量 G/MPa	26900
	修正系数 l/μ	0.38
JC 本构参数	A/MPa	490
	B/MPa	206.9
	C	0.005
	m	1.8
	n	0.344
	T_{melt}	580
	T_0	20

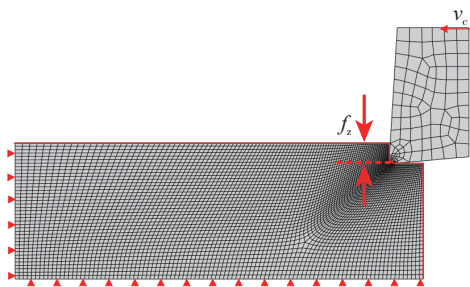


图3 基于ALE算法的切削仿真过程的几何建模和网格划分
Fig.3 Geometric modeling and meshing of process of cutting simulation process based on ALE

地模拟出切削分离的材料变形情况,但是初始网格密度太大将会大幅降低仿真计算的速度。为了既增加网格种子的播撒数量同时又不使初始网格密度过大,将刀具切入工件的部分预先设计出如图3中所示的凹角,从而增加了网格划分时播撒种子的面积。

由于金刚石刀具的硬度远远高于铝合金材料,因此把刀具设定为刚体;整个刀具随着其上选定的一个参考点以切削速度做从右往左的刚体直线运动,逐渐切入工件。在工件的底部和左侧设置约束使其固定不动,工件上表面和右侧表面为拉格朗日边界,其上的网格将会随着材料点移动而形成切屑,同时由于采用了ALE适应性网格重划技术,网格又会进行定期调整以增加切屑分

离区的网格适应性。其中,ALE控制参数设置中初始几何特征角度的设置非常重要,一个合适的参数设置能够保证工件上表面的节点不会迁移到工件的左右表面,而又能够在整个上表面上都能流畅地移动^[10]。

3 准直角自由铣削试验的设计

试验所用试样材料为Al7075,所用PCD立铣刀的轴向前角为 0° ,周向前角为 3.5° ,周向后角为 5° ,钝圆半径为 $5\mu\text{m}$;安装在Kistler测力仪上的5mm厚平板形的工件中部预先加工出了宽6mm、深4mm的通槽,如图4所示,其目的是为了减小铣削深度至1mm,同时又能尽量保证工件的整体刚度。为实现准直角自由铣削,试验中仅仅使用立铣刀的侧刃铣削掉槽部的材料,即端刃不参与切削,因此铣削深度等于槽部工件材料的厚度,即1mm;铣削试验设备为DMG monoblock DMU80 镗铣加工中心(X和Y方向的定位精度为 $8\mu\text{m}$);铣削力的测量仪器为Kistler9257B型测力仪,量程采用50N,其灵敏度为 -7.92pC/N ,线性度为 $0.1\%\text{F.S.}$ 。

为了研究介观尺度铣削的尺度效应中进给量与刃口半径之比对切削力等介观尺度切削过程变量的影响规

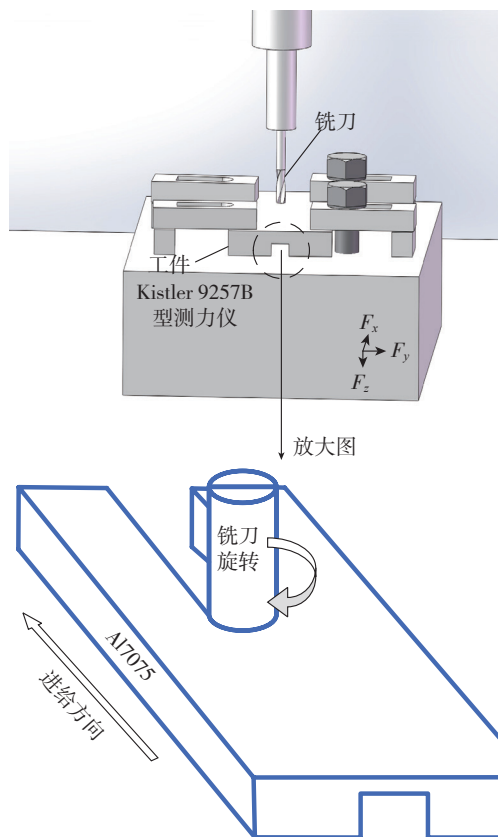


图4 工件和刀具相对位置及安装
Fig.4 Installation and the relative position of the workpiece and machine tool

律,本文进行了如表 2 所示的多组变进给单因素试验。

4 试验与仿真结果分析

4.1 两种仿真模型的对比与试验验证

从图 5 中可以看出,铣削力随着每齿进给量的增加而不断增大,并且 F_y 大于 F_x ; 另外,基于 MSG 的 JC 修

表2 试验参数

参数	数值
铣刀齿数 z	1
铣刀半径 D/mm	3
铣削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	94.2
每齿进给量 $f_z / (\mu\text{m} \cdot z^{-1})$	1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4
铣削深度 a_p/mm	1
铣削宽度 a_w/mm	3

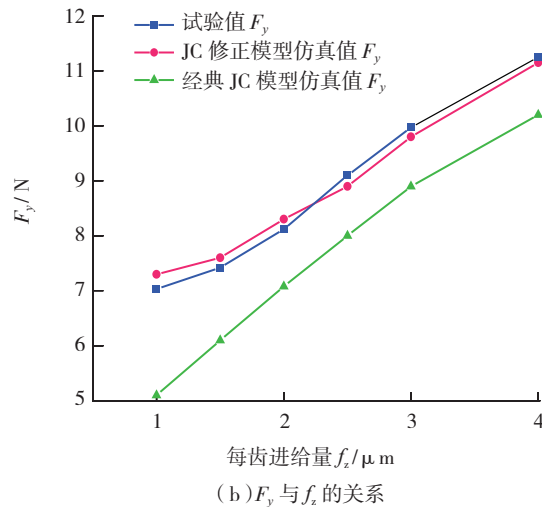
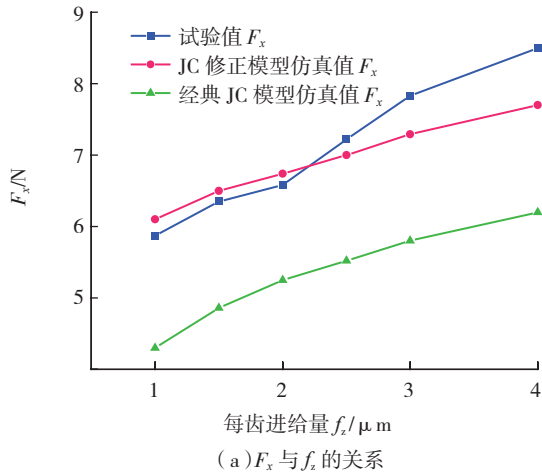


图5 实验和仿真铣削力对比

Fig.5 Comparisons of milling forces between the experimental and predicted results

正模型仿真得到的切削力更接近试验值,而用经典 JC 模型预测的切削力则比实验值小很多。通过切削力的对比可以证明在微观切削中由于几何必需位错的存在对材料造成了硬化作用,使材料产生了尺度效应,导致使用经典 JC 本构模型计算得出的塑性屈服应力以及材料流动应力值比真实材料屈服应力小了许多,所以仿真得到的切削力明显小于试验测量值。

图 6 中的 3 条曲线都表明:单位切削力随着进给量的减小而增加,材料呈现出了“越小越强”的尺度效应;其中基于 MSG 的 JC 修正仿真模型比经典 JC 仿真模型预测的单位切削力更接近试验值,而且经典 JC 模型预测的误差会随着进给量减小不断增加。采用经典 JC 模型预测的单位切削力也会随着进给量减小而增加,其原因在于:进给量减小,刀屑接触区域下移导致刀具工作前角为负值;进给量越小,负值越大,切削变形系数增加,因此单位切削力增加。

4.2 最小切削厚度的分析

最小切削厚度是指由切削到完全耕犁转变的一个临界值,是介观切削中非常重要的一个参数。它与刀

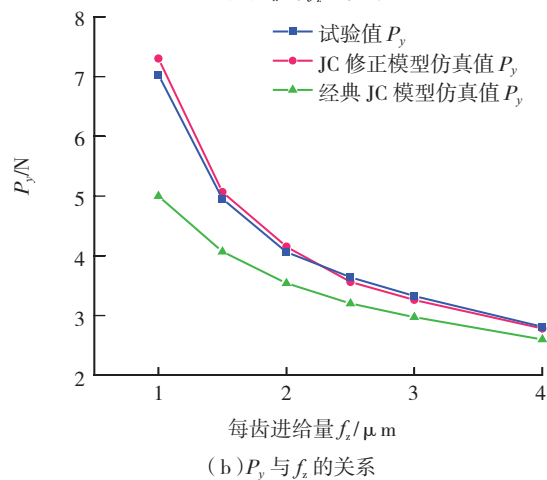
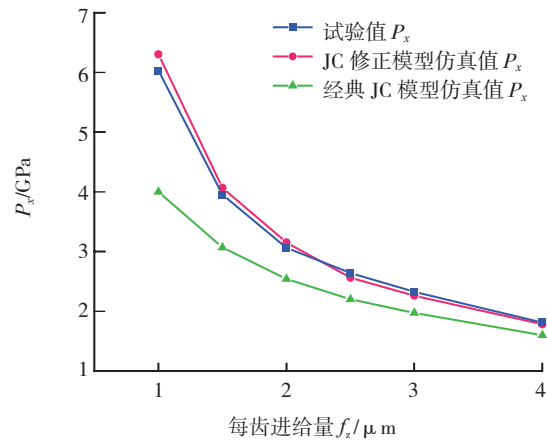


图6 单位切削力随进给量的变化规律

Fig.6 Unit cutting force at different feed per tooth

具刃口的钝圆半径 R 有关。图 7 针对切削厚度(对应于铣削的每齿进给量)为 $0.2R(1\ \mu\text{m})$ 、 $0.25R(1.25\ \mu\text{m})$ 、 $0.3R(1.5\ \mu\text{m})$ 3 种情况进行了二维切削仿真。从图中可以明显地看出,当切削厚度为 $0.2R$ 时不能产生切屑, $0.25R$ 时是即将形成切屑的临界情况,但材料在前刀面发生了累计效应, $0.3R$ 时产生了明显的切屑。因此,刃口钝圆半径为 $5\ \mu\text{m}$ 的 PCD 刀具切削 AL7075 时,最小切削厚度应该在 $0.25R(1.25\ \mu\text{m})\sim 0.3R(1.5\ \mu\text{m})$ 之间。

4.3 尺度效应对等效应力的影响

以每齿进给量为 $2.8\ \mu\text{m}$ 时为例,研究相同切削条件下基于 MSG 的 JC 修正模型与经典 JC 模型两种材料本构模型对切削区的等效应力分布的影响。通过图 8 中

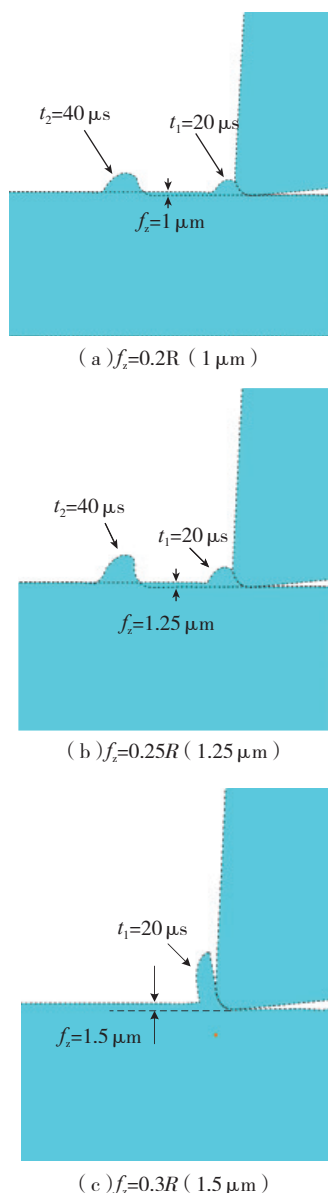


图7 根据仿真结果确定形成切屑的最小进给量
Fig.7 Minimum chip thickness based on the simulation results of chip formation

(a)和(c)、(b)和(d)应力分布图的比较可以发现,两种仿真模型预测的切削区的应力分布的相似之处在于:最大应力的区域位于紧密围绕着刀具刃口半径的切削层部分;但是基于 MSG 的 JC 修正模型预测的最大应力值比经典 JC 模型预测的最大应力值要高出很多。在介观尺度切削中除了存在宏观尺度切削中的统计存储位错,还存在着尺度效应引起的几何必需位错,由此造成的位错密度增值必定导致介观尺度相应切削区域中应力值的增加,基于 MSG 的 JC 修正模型很好地反映了这种现象。

采用基于 MSG 的 JC 修正模型针对进给量分别为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ 的切削过程进行了分析,以研究随着切削厚度的变化,尺度效应对等效应力分布的影响。由图 8 中(a)和(b)可见,随着进给量的减小,切削区的最大应力值在增加,分别为 1177MPa 、 1028MPa ,而由图 8 中(c)和(d)可知,经典 JC 模型预测的切削区最大应力保持稳定,数值变化不大,说明随着进给量减小而最大应力值增加基本是由几何必需位错密度增值产生的。

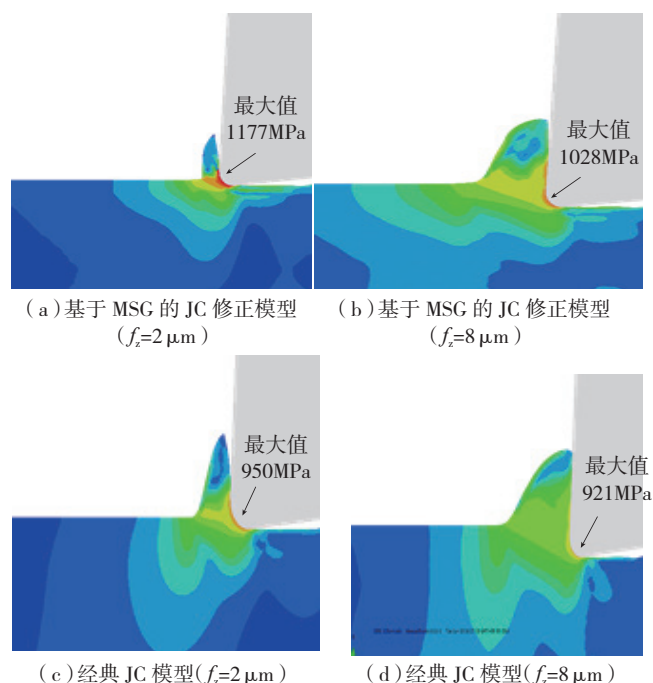


图8 仿真模型对切削区应力分布情况的预测对比
Fig.8 Comparison of the stress distribution based on the simulation results

5 结论

(1) 基于 MSG 的 JC 修正模型能够正确反映切削厚度减小引起的几何必需位错密度的增值现象,即尺度效应,比经典的 JC 模型更适合于介观尺度切削的仿真,所

(下转第 83 页)