DOI: 10.3901/JME.2015.10.033

弹塑性疲劳裂纹扩展行为的数值模拟*

樊俊铃 郭杏林

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116023)

摘要: 基于 ABAQUS 有限元软件建立内聚单元模型以研究 I 型弹塑性疲劳裂纹的扩展过程。利用 UEL 子程序定义内聚单元的疲劳损伤累积准则以识别疲劳裂纹扩展过程中裂纹尖端的位置,并预测裂纹扩展速率 da/dN 。结果发现,预测的裂纹扩展速率与已有的试验结果吻合良好。通过 ABAQUS 软件中的温度-位移耦合分析方法同步获取裂纹扩展过程中因塑性变形能引起的裂纹尖端瞬态温度场的变化。结果显示,疲劳损伤累积准则所识别的裂纹尖端位置与裂纹扩展时最大温升点的位置具有一致性。这说明疲劳裂纹扩展过程中温度信号的变化也可以用于裂纹扩展规律的研究。基于数值模拟的方法验证了疲劳裂纹扩展过程中裂纹尖端的温升信号 ΔT 与裂纹扩展速率 da/dN 、应力强度因子范围 ΔK 之间的幂函数关系。研究成果有望用于疲劳裂纹扩展寿命的快速预测。

关键词: 疲劳裂纹; 内聚单元; 裂纹扩展速率; 应力强度因子

中图分类号: O346

Numerical Simulation on Elastic-plastic Fatigue Crack Growth Behavior

FAN Junling GUO Xinglin

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract: A cohesive zone model is created to study the elastic-plastic fatigue crack growth process of Mode I crack based on the finite element software ABAQUS. The fatigue damage accumulative criterion is defined by the UEL subroutine in order to identify the location of the crack tip during the fatigue crack growth process, and to predict the crack growth rate da/dN . It is found that the predicted crack growth rates are in good accordance with the existing experimental results. The coupled temperature-displacement analysis in ABAQUS is used to synchronously obtain the variation of the transient temperature field due to the plastic deformation around the moving crack tip. The result shows that the location of the crack tip identified by the fatigue damage accumulative criterion is in good agreement with the point of the maximum temperature increment. This illustrates that the temperature signal during the crack growth process can be used to study the crack growth behavior. Based on the numerical simulation, the relationships between the temperature increment signals ΔT at the crack tip to the crack growth rates da/dN and the stress intensity factor ranges ΔK are found to be power law functions. The research achievement is expected to be used for rapid prediction of the fatigue crack propagation life.

Key words: fatigue crack; cohesive element; crack growth rate; stress intensity factor

0 前言

自 20 世纪 60 年代以来,线弹性断裂力学的发展为研究裂纹扩展行为提供了有力的支持,促进了疲劳断裂理论的迅速发展。由裂纹尖端的弹性力学解可知:裂尖附近的应力场存在奇异性,即在裂纹尖端的应力 $\sigma \rightarrow \infty$,而这在实际的工程材料中是不可能的^[1-2]。因此,裂尖附近的材料必然要进入塑性,发生屈服。在此过程中,大量的塑性变形能以热能

的形式释放出来,加之热传导的作用在材料表面形成了非均匀分布的温度场。这种裂尖温度信号的变化规律作为一种间接的能量耗散指标已经被定性和定量地应用于解析法^[3]、试验法^[4-6]和数值方法^[7-8]中,以预测裂纹萌生、扩展及随后的快速断裂过程。

PANDEY 等^[3]由 HRR 奇异场获得了裂尖塑性区内的应力应变场,并计算了裂尖附近的温度变化。结果表明裂尖温度信号与加载频率、应力强度因子和材料的热物理性能相关。WANGER 等^[4]利用红外热像法研究了超高周疲劳过程中钢和铝合金材料表面的温度变化,发现在疲劳裂纹开始扩展前温度会突然升高,说明疲劳过程中热耗散的演化规律能用

* 国家自然科学基金(11072045)和国家留学基金委访问学者资助项目。
20140519 收到初稿,20141108 收到修改稿

于损伤识别和失效分析。FEDOROVA 等^[5]通过红外热成像试验研究了疲劳过程中的温度信号, 利用傅里叶变换处理温度信号以获取相应的热源和储能变化, 由此计算了裂尖附近的 J 积分和应力强度因子 K_I 。BHALLA 等^[7]利用有限元法模拟了静载下稳态裂纹扩展过程中温度变化, 与热像试验结果具有很好的一致性, 说明有限元法在研究热力耦合问题时的可行性。RANC 等^[8]通过数值法计算了裂纹尖端塑性区的热源, 发现较大的热源强度会对应力强度因子产生重要的影响。

上述的这些研究表明: 在裂纹萌生、扩展及断裂的过程中, 裂尖塑性引起的温度信号与损伤程度、J 积分、应力强度因子及裂纹扩展速率之间有着密切的联系。因此, 通过 ABAQUS 有限元软件创建内聚单元模型以研究弹塑性疲劳裂纹的扩展规律, 建立裂尖温度信号与应力强度因子和裂纹扩展速率之间的函数关系, 有利于疲劳裂纹扩展寿命的快速预测及结构的安全评估。

1 理论模型

1.1 内聚单元模型

在单调载荷的作用下, 内聚单元的法向张力 T_n 和法向张开量 Δ_n 之间具有如下的本构关系^[9]

$$T_n = \sigma_{\max,0} \left(\frac{\Delta_n}{\delta_0} \right) \exp \left(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_0} \right) \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\max,0}$ ——内聚单元的初始强度;

δ_0 ——内聚单元的特征长度。

考虑到疲劳演化过程中的损伤累积, 引入循环损伤变量 D , 所以在疲劳过程中内聚单元强度 $\sigma_{\max}$ 需要不断地进行更新

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max,0} (1 - D) \quad (2)$$

则在循环载荷作用下内聚单元的损伤状态演化, 可以表示为

$$\begin{cases} \dot{D} = \frac{\dot{\Delta}_n}{\delta_\Sigma} \left(\frac{T_n}{\sigma_{\max}} - C_f \right) H(\Delta_{n,acc} - \delta_0) \\ \dot{D} \geq 0 \quad \Delta_{n,acc} = \int_t |\dot{\Delta}_n| dt \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\dot{D}$ ——损伤累积率;

$\dot{\Delta}_n$ ——法向张开率;

δ_Σ ——累积内聚单元长度;

$\Delta_{n,acc}$ ——累积的材料张开量;

σ_f ——内聚单元的耐久极限;

C_f ——耐久系数;

$C_f = \sigma_f / \sigma_{\max,0}$;

$H(\Delta_{n,acc} - \delta_0)$ ——Heaviside 函数。

疲劳过程中, 当前累积材料张开量 $\Delta_{n,acc}$ 大于内聚单元的特征长度 δ_0 时, 疲劳损伤才开始累积。循环加载/卸载的过程中, 法向张力与张开量之间的关系为

$$T_n = T_{n,\max} + K_n (\Delta_n - \Delta_{n,\max}) \quad (4)$$

式中 $T_{n,\max}$ ——内聚单元法向最大张力;

$\Delta_{n,\max}$ ——内聚单元法向最大张开量;

K_n ——内聚单元法向刚度;

$K_n = T_{n,\max} / \Delta_{n,\max}$ 。

当裂纹扩展过程中, 裂尖后面的上下裂纹面相接触时, 则式(1)变为

$$T_n = A \sigma_{\max,0} \left(\frac{\Delta_n}{\delta_0} \right) \exp \left(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_0} \right) \quad (5)$$

式中 A ——内聚单元的罚刚度系数, 用于张开量 $\Delta_n < 0$ 的情况^[10], $A=30$ 。

1.2 塑性理论

在疲劳裂纹扩展的过程中, 裂纹尖端会产生很小范围的屈服区, 其中绝大部分的塑性能以热能的形式释放出来, 进而在裂纹尖端附近形成非均匀分布的温度场。利用内聚单元研究裂纹尖端附近的塑性区时, 在单调和循环载荷的作用下, 裂尖塑性区的尺寸分别为^[10]

$$\begin{cases} r = \frac{1}{3\pi(1-\nu^2)} \frac{EG_{\max}}{\sigma_y^2} \\ \Delta r = \frac{1}{3\pi(1-\nu^2)} \frac{EG_{\max}}{(2\sigma_y)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 r ——单调载荷下的裂尖塑性区尺寸;

Δr ——循环载荷下的裂尖塑性区尺寸;

E ——弹性模量;

ν ——泊松比;

$G_{\max}$ ——能量释放率;

σ_y ——屈服强度。

塑性功率 $\dot{W}_p$ 与热生成功率 $\dot{Q}$ 之间具有如下的关系

$$\dot{Q} = \alpha \dot{W}_p = \alpha \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (7)$$

式中 α ——塑性能转变为热能的部分;

σ_{ij} ——应力张量;

$\dot{\epsilon}_{ij}^p$ ——塑性应变率张量。

忽略热对流、热辐射和热弹性耦合效应之后, 则有二维的热传导方程

$$\dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

式中 ρ ——密度;
 c_p ——比热容;
 κ ——热导率。

1.3 有限元模型及边界条件

利用 ABAQUS 有限元软件建立 I 型裂纹的弹塑性模型, 单元为平面四节点单元 CPET4^[11]。通过耦合温度-位移分析来研究疲劳裂纹扩展过程中的裂尖小范围屈服区附近的瞬态热力学问题。根据模型的对称性, 图 1a 仅给出了 1/2 的有限元模型, 裂纹尖端在模型的原点位置 P , 图 1b 是裂纹扩展路径上的局部细化网格。疲劳裂纹扩展路径上的内聚单元是通过在 ABAQUS 的 input 文件中加入 UEL 程序命令: *USER ELEMENT、*ELEMENT、*ELGEN 及 *UEL PROPERTY 来建立内聚单元并赋予单元属性。然后, 运用 UEL 子程序将式(1)~(5)中内聚单元的张力-张开量关系和疲劳损伤累积准则程序化, 从而实现对内聚单元损伤程度的定量计算, 即当 $D=1$ 时, 当前内聚单元失效, 裂纹向前扩展一个单元的长度。内聚单元具有四个节点和两个积分点。模型中沿裂纹扩展路径的内聚单元最小尺寸为 h , 裂纹扩展路径长度 $L_e=110h$ 。

(a) 1/2 模型

(b) 局部细化网格

图 1 有限元模型

在有限元模型的外边界施加随时间周期性变化的位移边界条件^[10]

$$\begin{pmatrix} u_x(t) \\ u_y(t) \end{pmatrix} = \frac{K_I(t)}{2\mu} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \times$$

$$\begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left[\frac{(3-4\nu)-1}{2} \right] + \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \left[\frac{(3-4\nu)-1}{2} \right] - \cos^2 \frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中 (r, θ) ——极坐标下有限元模型外边界节点的坐标;

$$r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

$$\theta = \arctan(y/x);$$

$K_I(t)$ ——应力强度因子;

$$K_I(t) = K_0 (0.55 - 0.45 \cos(2\pi f t));$$

f ——加载频率;

K_0 ——外加载荷;

$$R = K_{\min} / K_{\max} = 0.1。$$

另外, 有限元模拟时设置有限元模型的温度边界条件为

$$\begin{cases} T(t=0, r) = 0 \\ T(t, r) = 0 \\ r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (10)$$

模拟计算过程中不考虑热对流、热辐射、热弹性效应和外界热源的影响。

2 材料参数

数值模拟中选用 Ti-6Al-4V 合金, 其物理力学性能参数如表 1 所示^[5, 12]。疲劳裂纹扩展过程中, 材料参数不受温度变化的影响。有限元模拟中材料属性为非率相关的等向强化材料模型^[13]

$$\sigma_0 = \sigma_y \left(1 + \frac{E \varepsilon_p}{\sigma_y} \right)^n \quad (11)$$

式中 σ_0 ——流变应力;
 σ_y ——初始屈服应力;
 E ——弹性模量;
 ε_p ——塑性应变;
 n ——硬化指数。

表 1 Ti-6AL-4V 的物理力学性能

参数	数值
弹性模量/GPa	113
屈服强度/MPa	800
抗拉强度/MPa	932
热导率/[W/(m·K)]	18.85
比热容/[J/(kg·K)]	540
密度/(kg/m ³)	4 505
泊松比	0.32
硬化指数	0.35
断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	75.6

在裂纹扩展的过程中,大部分(80%~100%)^[14]塑性能以热能的形式释放出来,小部分的能量储存在材料内部。在有的文献^[3, 8, 15-16]计算中常选用 90% 作为塑性能转变为热能的量,所以在数值模拟中假设裂纹尖端 90% 的塑性变形能转化为热能。

根据之前的一些研究工作^[10, 17-18],选用表 2 中的内聚单元参数。通过这些参数来预测弹塑性疲劳裂纹扩展的行为,假设在此过程中裂纹尖端的温度变化不会改变内聚单元的参数。

表 2 内聚单元参数

参数	数值
初始强度/MPa	4 000
特征长度/ μm	2.5
累积长度/ μm	15
表面能/(kJ/m^2)	27.2
耐久系数	0.35

3 结果与分析

3.1 疲劳裂纹扩展规律

通过 UEL 子程序所定义的疲劳损伤累积准则,图 2 给出了应力强度因子 $\Delta K=29.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时疲劳裂纹扩展至长度为 $\Delta a=14h$ 时,裂纹尖端经归一化的法向张力 $T_n/\sigma_{\max,0}$ 与张开量 Δ_n/δ_0 之间的关系图。由此可见:在疲劳损伤累积的过程中,内聚单元的刚度 K_n 不断变化,裂尖法向张力与张开量也不断地变化,直至当前内聚单元完全失效,同时裂尖前移一个单元的长度 h 。

图 2 归一化的张力-张开量演化规律

在循环载荷的不断作用下,裂纹尖端不断地张开闭合,图 3a、3b 给出了裂纹扩展过程中所预测的裂纹尖端附近的裂纹张开和闭合状态的变化。由于在加载初期,初始裂纹尖端位置处发生了较大且不可逆的塑性变形,故在裂纹扩展过程中即使裂纹处于闭合状态该位置处也总有微小的张开量,如图 3b 所示。

图 3 裂纹尖端的张开闭合状态

图 4a 是疲劳裂纹扩展的过程中,UEL 子程序所定义的疲劳损伤累积的渐进演化过程,当累积的损伤变量 $D=1$ 时,当前内聚单元的刚度降为零,即当前内聚单元失效,裂尖向前扩展一个单元的长度;图 4b 则是不同的裂纹扩展时刻下裂纹尖端内聚单元的损伤分布状态曲线,可见随着与裂纹尖端间距的增大,内聚单元损伤程度逐渐减小至零。

图 5a 是疲劳裂纹扩展长度 Δa 与循环次数 N 之间的关系。交变载荷水平 ΔK 越高,由式(3)知损伤累积率就越快,裂纹萌生所需的循环次数就越少;同时由图中可见在裂纹扩展的过程中,存在短暂的裂纹不稳定扩展阶段,之后裂纹扩展速率 da/dN 趋于稳定。图 5b 是通过有限元法所得到的不同应力水平 ΔK 下的裂纹扩展速率 da/dN 。

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K)^m \quad (12)$$

式中 C_1 ——材料常数, $C_1=2.92 \times 10^{-12}$;

m ——材料常数, $m=3.699$ 。

比较发现:有限元法预测的结果 $C_1=2.92 \times 10^{-12}$ 和 $m=3.699$ 与试验结果 $C_1=4.60 \times 10^{-12}$ 和 $m=3.58$ ^[19] 处于同一量级,且比较接近,说明了有限元法预测疲劳裂纹扩展行为的有效性。

(a) 损伤演化状态

(b) 损伤分布状态

图 4 损伤状态

(a) $\Delta a/h-N$ (b) $da/dN-\Delta K$ (应力比 $R=0.1$, 相关系数 $|r|=0.9974$)

图 5 裂纹扩展规律

3.2 裂纹扩展过程中的温度信号

在裂纹扩展的过程中, 通过裂纹尖端塑性区释

放的塑性能大部分以热能的形式释放, 在热传导的作用下使得裂尖附近出现非均匀分布的温度场。通过裂尖温度信号的变化, 同样可以确定裂纹尖端的位置。图 6 是疲劳裂纹扩展过程中法向张力 σ_{22} 、裂尖附近塑性区和裂尖温度场的演化过程。由图 6a 可见在裂纹扩展过程中 σ_{22} 的形状基本保持不变, 而塑性区的大小(图 6b)在裂纹扩展初期并不稳定, 但是在此阶段之后, 塑性区的宽度趋于稳定, 说明裂纹扩展速率趋于稳定, 与图 5a 相对应。图 6c 则给出了裂尖附近的非均匀温度场的演化过程, 认为出现温升最大值的点对应着当前裂纹尖端的位置。

(a) 法向张力 σ_{22} 的演化 (b) 塑性区的演化 (c) 温度场的演化图 6 裂纹扩展过程中法向张力 σ_{22} 、裂尖附近塑性区和裂尖温度场的演化过程

图 7a 是裂纹扩展过程中裂纹尖端附近温度信号的分布曲线, 最大温升所在的点对应当前裂尖的位置, 这与图 4a 损伤演化过程中的损伤变量 $D=1$ 时所预测的裂尖位置较为吻合。图 7b 是裂尖法向张力 σ_{22} 沿裂纹扩展路径的分布曲线。在裂尖经过的自由裂纹面上 $\sigma_{22} \rightarrow 0$, σ_{22} 的最大值在裂尖稍前的塑性区内。因此, 通过对疲劳裂纹扩展过程中裂纹尖端温度信号的研究, 能为裂纹扩展行为的研究提供参考^[20-21]。

3.3 裂纹扩展速率与温度信号的关系

KLINGBEIL 等^[22-23]通过数值和试验研究证明裂纹扩展过程中的塑性能耗与裂纹扩展速率之间具有幂函数的关系。KIM 等^[24]通过试验验证了疲劳过程中的循环滞回能(塑性能耗)与温度信号之间具有线性关系, 因此裂纹扩展过程中的温度信号与裂纹

图7 裂纹扩展过程中裂尖温度变化和法向应力变化

扩展速率之间也可用幂函数关系来表达, 则有

$$\Delta T = C_2 (\Delta K)^p \quad (13)$$

图8是所预测的裂尖温升信号 ΔT 与应力强度因子范围 ΔK 的关系。图中所给出的幂函数的常数 $C_2 = 1.82 \times 10^{-6}$, $p = 4.18$ 。其中 $p = 4.18$ 与 KLINGBEIL^[22] 给出的 $p = 4.002$ 误差较小。

图8 ΔT - ΔK 曲线(应力比 $R=0.1$, 相关系数 $|r|=0.9983$)

通过式(12)和式(13), 则可以推出裂纹扩展过程中裂尖的温升信号 ΔT 与裂纹扩展速率 da/dN 之间的幂函数关系。

图9是所预测的裂纹扩展过程中的裂尖温升信号 ΔT 与裂纹扩展速率 da/dN 之间的关系, 其中所

预测的幂函数的系数 $C_3 = 1.56 \times 10^7$ 和 $q = 1.11$, 而通过式(13)所计算得到的幂函数系数 $C_3 = 1.97 \times 10^7$ 和 $q = 1.13$ 。这说明了有限元预测结果的正确性, 也验证了裂纹扩展过程中裂尖温度信号与裂纹扩展速率、应力强度因子范围之间具有的幂函数关系, 这个关系式的建立有望用于今后疲劳裂纹扩展行为的研究及结构或构件的疲劳裂纹扩展寿命的快速预测, 为疲劳断裂力学的研究提供支持和帮助。

$$\begin{cases} \Delta T = C_3 \left(\frac{da}{dN} \right)^q \\ C_3 = C_2 \left(\frac{1}{C_1} \right)^{p/m} \\ q = \frac{p}{m} \end{cases} \quad (14)$$

图9 ΔT - da/dN 曲线(应力比 $R=0.1$, 相关系数 $|r|=0.9969$)

4 结论

通过内聚单元模型对疲劳裂纹扩展过程中的裂纹扩展速率与相应的裂尖温度信号的研究, 主要得到以下一些结论。

(1) 利用 UEL 子程序在内聚单元模型中定义合适的疲劳损伤累积准则, 弹塑性有限元模型能够预测疲劳裂纹的扩展行为, 所预测的裂纹扩展速率 da/dN - ΔK 与已有的试验结果吻合较好。

(2) 裂纹尖端的最大温升点与当前裂纹尖端的位置相对应, 与损伤累积模型所预测的裂尖位置较为吻合, 说明裂尖温度信号可用于裂尖位置识别。

(3) 验证了弹塑性疲劳裂纹扩展过程中的裂尖温度信号与裂纹扩展速率、应力强度因子范围之间的幂函数关系。

参考文献

- [1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社,

- 2002.
- CHEN Chuanyao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002.
- [2] 丁振宇, 高增梁, 王效贵. 16MnR 钢过载峰作用下的疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 84-90.
- DING Zhenyu, GAO Zengliang, WANG Xiaogui. Study on crack growth behavior of 16MnR subjected to single tensile overload[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 84-90.
- [3] PANDEY K N, CHAND S. Analysis of temperature distribution near the crack tip under constant amplitude loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2008, 31(5): 316-326.
- [4] WAGNER D, RANC N, BATHIAS C, et al. Fatigue crack initiation detection by an infrared thermography method[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2009, 33(1): 12-21.
- [5] FEDOROVA A, BANNIKOV M, PLEKHOV O. Infrared thermography study of the fatigue crack propagation[J]. Fracture and Structural Integrity, 2012(21): 46-53.
- [6] 李明, 林翠, 李晓刚, 等. 红外热像技术在线评估高温炉管剩余寿命[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 139-144.
- LI Ming, LIN Cui, LI Xiaogang, et al. Infrared image on-line inspection and remaining life prediction for atmospheric heater tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(12): 139-144.
- [7] BHALLA K, ZEHNDER A, HAN X. Thermomechanics of slow stable crack growth: Closing the loop between experiments and computational modeling[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(17): 2439-2458.
- [8] RANC N, PALIN-LUC T, PARIS P C. Thermal effect of plastic dissipation at the crack tip on the stress intensity factor under cyclic loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(6): 961-972.
- [9] NEEDLEMAN A. An analysis of decohesion along an imperfect interface[J]. International Journal of Fracture, 1990, 42(1): 21-40.
- [10] WANG B, SIEGMUND T. A numerical analysis of constraint effects in fatigue crack growth by use of an irreversible cohesive zone model[J]. International Journal of Fracture, 2005, 132(2): 175-196.
- [11] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- SHI Yiping, ZHOU Yurong. Example explanation of finite element analysis of ABAQUS[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] CALAMAZ M, COUPARD D, GIROT F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(3-4): 275-288.
- [13] HUANG Y, HWANG K, LI M, et al. A conventional theory of mechanism-based strain gradient plasticity[J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4-5): 753-782.
- [14] ROSAKIS P, ROSAKIS A J, RAVICHANDRAN G, et al. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48: 581-607.
- [15] FARREN W S, TAYLOR G I. The heat developed during plastic extension of metals[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1925, 107(743): 422-451.
- [16] TAYLOR G I, QUINNEY H. The latent energy remaining in a metal after cold working[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1934, 143(849): 307-326.
- [17] BONIFAZ E. Cohesive zone modeling to predict failure processes[J]. Canadian Journal of Mechanical Science & Engineering, 2011, 2(3): 42-54.
- [18] LI H, YUAN H. Cohesive zone modeling of low cycle fatigue cracks in cracked and notched specimens[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 36: 1246-1257.
- [19] KORSUNSKY A M, SONG X, BELNOUE J, et al. Crack tip deformation fields and fatigue crack growth rates in Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11-12): 1771-1779.
- [20] 陈龙, 蔡力勋. 考虑裂尖疲劳损伤的材料疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 51-56.
- CHEN Long, CAI Lixun. Research on fatigue crack growth behavior of materials by considering the fatigue damage near the crack tip[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 51-56.
- [21] 魏凌霄, 闫志峰, 王文先, 等. 基于红外热成像的镁合金疲劳裂纹扩展的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 64-69.
- WEI Lingxiao, YAN Zhifeng, WANG Wenxian, et al. Study on fatigue crack propagation of AZ31B magnesium alloy based on infrared thermographic technology[J].

- Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 64-69.
- [22] KLINGBEIL N. A total dissipated energy theory of fatigue crack growth in ductile solids[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 117-125.
- [23] MAZARI M, BOUCHOUICHA B, ZEMRI M, et al. Fatigue crack propagation analyses based on plastic energy approach[J]. Computational Materials Science, 2008, 41(3): 344-349.
- [24] KIM J, JEONG H Y. A study on the hysteresis, surface temperature change and fatigue life of SM490A, SM490A-weld and FC250 metal materials[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(7): 1159-1166.
- 作者简介: 樊俊铃(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士。主要研究方向为疲劳与断裂。
E-mail: fanjunling@mail.dlut.edu.cn
- 郭杏林(通信作者), 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为结构振动与控制、疲劳与断裂及无损检测。
E-mail: xlguo@dlut.edu.cn

第 4 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

面向硬切削的切削区域温度场解析建模及实验研究

作者: 李林文

毕业学校: 华中科技大学

指导教师: 李斌, Kornel F. Ehmann

硬切削加工过程中, 切削温度及分布是影响刀具使用寿命和加工质量的关键因素之一, 其中切削区域温度及分布的精确测量与预测一直是切削加工机理研究的热点和难题, 主要问题是现有的温度测量方法很难实现对切削区域温度分布的原位(在接近切削作用区域)测量, 其温度测量结果的时间和空间分辨率难以满足要求, 因此切削区域温度预测模型的有效性和准确性难以得到验证。

论文针对上述难题, 在深入分析切削加工过程中材料塑性变形区复杂热力耦合效应的基础上, 考虑了第二变形区切屑材料滞留区的影响, 提出了前刀面上切屑沿刀具与切屑作用面间非线性流动的数学模型, 并修正了 Komanduri 和 Hou 模型中关于前刀面和后刀面之间的绝热假设, 提出了一个正交切削条件下的切削温度分布解析模型, 该模型可用于预测切削作用区域的热、力参数。

在切削温度测量方法上, 论文采用无缝嵌入到 PCBN 刀具中的微尺度薄膜热电偶传感器阵列(Micro-scale thin film thermocouples, TFTCs), 实现了刀具切削区域温度分布的原位获取与准确测量。在同等切削条件下, 通过硬车削试验中获得的切削温度、切削力以及切屑厚度等数据, 验证了所建立的解析模型的预测精度。验证结果表明, 解析模型的预测结果与试验数据之间表现出了较高的预测精度。

论文根据所提出的解析模型和硬车削条件下所进行的切削试验结果, 对切削区域的热力耦合行为及一些尚未澄清的机理问题进行了分析与探讨。基于所提出的解析模型的预测结果, 分析了硬车削加工条件下切削区域的切削温度、应力分布、切屑流动速度之间的稳态热力耦合行为, 研究结果表明, 随着切削速度的变化, 切削区域的热源位置与热释放强度分布、热传导过程中的热分配比例关系等是影响刀具切削区域温度分布状态及其变化趋势的重要原因。

另外, 基于硬切削试验中获得的温度数据、切削力和振动信号, 对硬车削加工中切屑形成区域的动态热力耦合行为进行了分析。研究结果发现主剪切区域所发生的绝热剪切过程, 导致的工件材料周期性的裂纹萌生与扩展, 会引起切屑形成区域的材料流动应力及切削温度的周期性耦合脉动, 进而影响到硬车削加工的切屑宏观形貌和切屑的锯齿化形成过程。同时, 主剪切区域的绝热剪切带位置, 同样会影响刀具前刀面上的切削温度及分布状态。

总体而言, 研究成果可广泛应用于金属切削理论研究, 加工过程的参数优化, 以及切削过程监测等, 丰富了金属切削加工研究的理论方法和试验手段。