

中碳钢材料高速切削原理分析与仿真

梁兆顺 李积元* 温德英 白向娟

(青海大学机械工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 为提高中碳钢材料在高速切削下的加工质量, 降低其加工能耗。通过对中碳钢材料的高速切削机理研究, 建立结构模型, 并进行高速切削仿真分析。结果表明: 仿真分析能够得到较为合理的切削参数, 得出切削参数与切削力、切削温度之间的关系。该研究能更好地指导中碳钢材料在高速切削加工技术中的实际应用。

关键词: 高速切削; 中碳钢材料; 切削参数

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8996(2016)06-0090-06

DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2016.06.016

Principle analysis and simulation for high speed cutting of medium carbon steel material

LIANG Zhaoshun, LI Jiyuan*, WEN Deying, BAI Xiangjuan

(School of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: In order to improve the processing quality of the medium-carbon steel materials under the high-speed cutting and reduce its processing energy consumption, based on the study of the high-speed cutting mechanism of medium carbon steel, the structural model is established, and high-speed cutting simulation analysis was carried out. The results show that the cutting parameters can be obtained by simulation analysis, and the relationship between cutting parameters and cutting force and cutting temperature is obtained. The study provides a theoretical basis for the application of medium carbon steel in high speed machining.

Key words: high speed cutting; medium carbon steel material; cutting parameters

高速切削加工技术通常称为高速切削(High-speed Cutting, HSC), 是一项汇集高效率、高质量、无污染等优点的先进加工技术^[1-3]。高速切削技术中的切削速度范围因不同的工件材料、加工方法、切削刀具而不同^[4-6], 例如车削 500~7 000 m/min; 磨削 9 000~21 600 m/min。所以, 对于切削速度的严格定义, 还没有统一的认识, 通常指比常规切削速度和进给速度高出 5~10 倍的切削加工, 进给速度达 15~50 m/min^[7]。

高速切削技术中, 切削力与切削温度是重要的物理参数, 影响着工件表面的加工质量^[8]。所以通过有限元模拟仿真, 研究高速切削过程中如何最大程度的减小切削力, 降低切削温度, 对于实际的生产过程具有非常重要的意义^[9]。近些年对于高速切削有限元仿真研究较多, 但其在仿真中均具有一定的局限性, 复杂的高速切削过程不能完全的反映出来, 需要进一步完善^[10-11]。本文借助于有限元软件 DEFORM 强大的非线性计算能力, 对中碳钢进行高速切削模拟, 建模不用分离线, 基于材料本构关系建立本构模型, 基于刀具与切削之间的接触关系建立摩擦模型, 利用切削分离准则对中碳钢高速切削建立二维正交切削有限元模型, 使模型能够有效地模拟出切屑形成过程, 以便更好地指导中碳钢材料在高速

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 青海大学中青年基金项目(2014-QGY-25); 青海省科技厅项目(2015-GX-Q09)

作者简介: 梁兆顺(1991—), 男, 山东菏泽人, 青海大学在读硕士研究生。* 通信作者, E-mail: lijyuan6939@126.com

切削加工中的实际应用^[12]。

1 高速切削机理的研究

在切削过程中,切削力直接影响切削热的生成,切削热又转化为切削温度,进而对刀具磨损和加工表面质量产生一定的影响。

1.1 切削力的分析

对切削力进行分析的数学模型如图1所示。

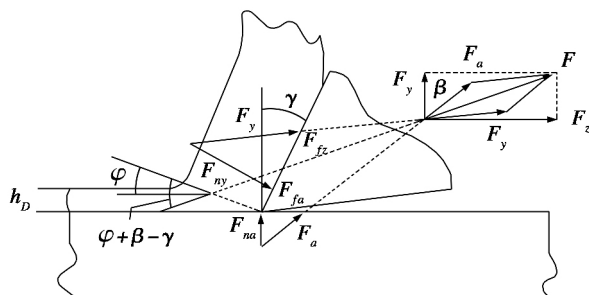


图1 刀具受力分析示意图

Fig. 1 Sketch map of forces analysis of tool

由图1可知,刀具前刀面受到正压力 F_{ny} 及摩擦力 F_{fy} ,剪切面上受到正压力 F_{na} 及剪切力 F_{fa} ,此两对力的合力相互平衡。由牛顿第三定律可知,作用在切削和刀具上的力是一对作用力与反作用力,即一个是切削运动方向上的力 F_y ,另一个为垂直于切削运动方向上的主切削力 F_z ,由此可得^[13]:

$$F_z = \frac{\tau h_D b_D \cos(\beta - \gamma)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \gamma)} \quad (1)$$

式中 τ : 剪切面上的剪切应力; h_D : 切屑厚度; b_D : 切屑宽度; φ : 剪切角; β : 前刀面与切屑之间的摩擦角; γ : 前角。

1.2 切削热的产生

如图2所示,高速切削过程中变形和摩擦所消耗的大部分功转变为热能,这些热能最终转化为切削温度。其单位时间内产生的总热量可以用下式表示^[14]

$$E_Q = E_{Q1} + E_{Q2} + E_{Q3} \quad (2)$$

E_{Q1} E_{Q2} E_{Q3} 分别为剪切区、切屑与前刀面接触区、工件与后刀面接触区所产生的热量。

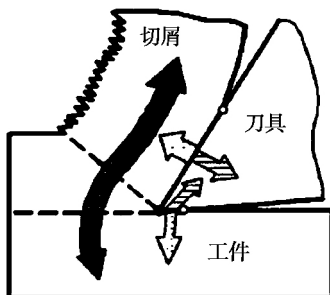


图2 切削热的来源

Fig. 2 The heat source of cutting

根据箭头的粗细,从上图可以看出,前刀面温度较高,后刀面温度较低,切削热大部分传到切屑中被切屑带走,一小部分传到刀具中,一部分传到工件中。因为切削速度提高后,被切屑带走的热量也随之增多,所以工件和刀具的升温也并不大。

2 有限元模型的建立

2.1 摩擦模型

在进行高速切削有限元仿真时,为了模拟仿真的正确性,需要选择刀具与切削之间合适的摩擦模型。库伦摩擦模型是经典的摩擦模型,其公式为 $F = \mu F_n$,其中 μ 为摩擦因数,但是考虑到金属切削的复杂性,本文采用修正的库伦摩擦模型^[15],其公式如下:

$$\tau_c = \min(\mu \sigma_n, \sigma_s) \quad (3)$$

τ_c 为摩擦应力 μ 为摩擦因数 σ_n 为接触面上的压力 σ_s 为工件材料的剪切强度。

2.2 材料本构模型与切削分离准则

在切削加工模拟中,常用的本构关系有许多,本文在 DEFORM 软件中设置材料的硬化为各向同性硬化,它能够体现实际工况中的材料行为。

分离准则有几何分离准则和物理分离准则,为了更加符合实际,本文采用物理分离原则中的应变准则作为切削与工件分离的标准。

2.3 几何模型建立及网格划分

以 45 号中碳钢为研究对象,把切削参数作为主要研究内容利用 DEFORM 软件建立模型。在仿真中,为了更加接近实际情况,刀具和工件都设为弹塑性可变形体,详细参数见表 1。

表 1 模型属性

Tab. 1 The model properties

名称	尺寸/(mm × mm × mm)	材料	密度/(g · cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
刀具	57 × 74 × 102	PCBN	3.34	850	0.21
工件	220 × 80 × 30	45 号钢	7.85	210	0.31

对网格合理的划分将直接影响仿真的时间以及计算精度,不合理的网格划分会造成极大的结果误差甚至导致求解失败,所以在有限元仿真中一定要对网格划分给予足够的重视。

图 3 是对二维正交切削几何模型进行的网格划分,其网格类型采用四节点热力耦合平面应变四边形单元,能够有效提高网格质量。仿真开始时,工件环境温度设为 20 °C,为了更好地模拟工况,先以普通的切削速度切削,而后逐渐提高达到高速切削,最后采集数据。

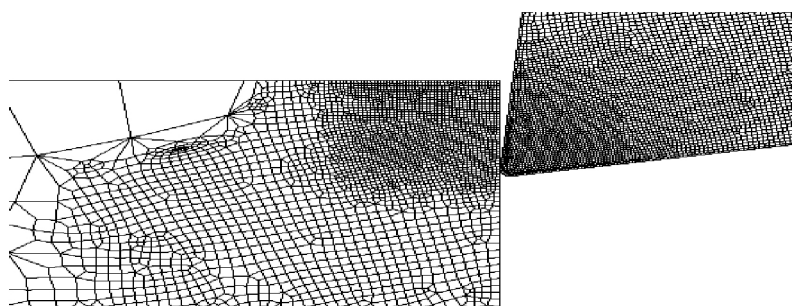


图 3 正交切削中网格的划分

Fig. 3 The division of the grid in the orthogonal cutting

3 高速切削仿真结果分析

3.1 切削力仿真分析

3.1.1 刀具前角和刀具后角对切削力的影响

根据研究刀具前角取值为 -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° 和 20° , 刀具后角取值为 0° , 5° , 10° , 15° 和 20° , 仿真结果如图 4 所示。

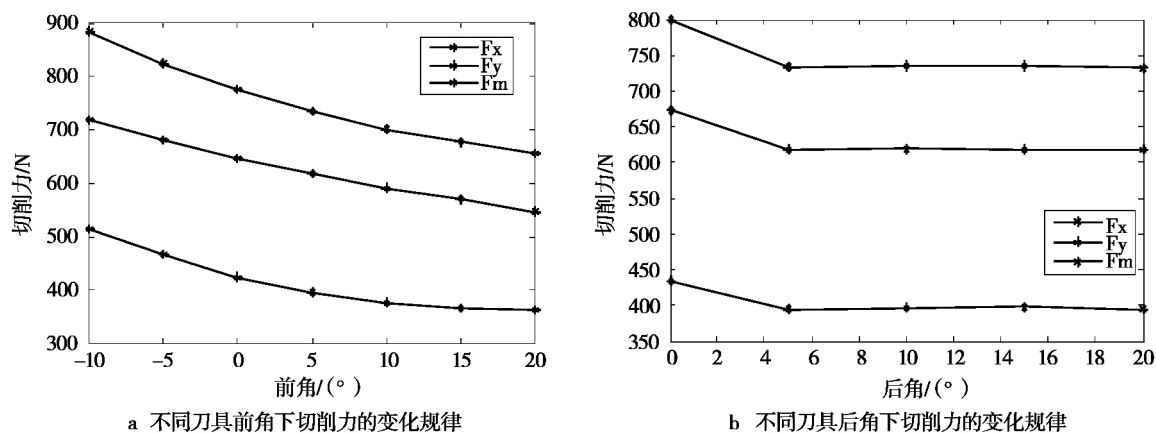


图4 不同刀具前角和后角下切削力的变化规律

Fig. 4 The change rule of cutting force for different cutting tool rake angle and back angle

从图4可以看出:随着刀具前角从 -10° 增大到 20° 的过程中,切削力逐渐降低。这是因为随着刀具前角的增大,刀具切入被加工材料变得越容易,切削层材料变为切屑时的变形随之减小,因此切削力降低。随着后角从 0° 增加到 20° ,切削力呈下降趋势。当后角从 5° 到 20° 时,主切削力与切深抗力只是略有波动基本不变,后角变化对切削力的影响不大;而当后角由 0° 增加到 5° 时,切削力却大幅度减小。刀具后角对切削力的影响主要体现在摩擦上,当后角为 0° 时,刀具后刀面与工件已加工表面的摩擦力大,同时刀具后刀面的磨损也较为严重;当有一定后角时,刀具后刀面与工件已加工表面之间的接触情况改变,摩擦力急剧减小,所以切削力减小。而后,随着后角的进一步增大,切削力变化趋于平稳。

3.1.2 刀尖圆弧半径和切削速度对切削力的影响

由图5可知,在刀尖圆弧半径不断增大的情况下,切削力总的趋势是上升的,且刀尖圆弧半径对切深抗力的影响比对主切削力 F_x 的影响明显。在切削速度不断增加的情况下,切削力的平均值呈先上升后下降的趋势。从结果中可以看出,高速切削时当切削速度达到一定值时,切削力不增反降,这是高速切削的一大优势。

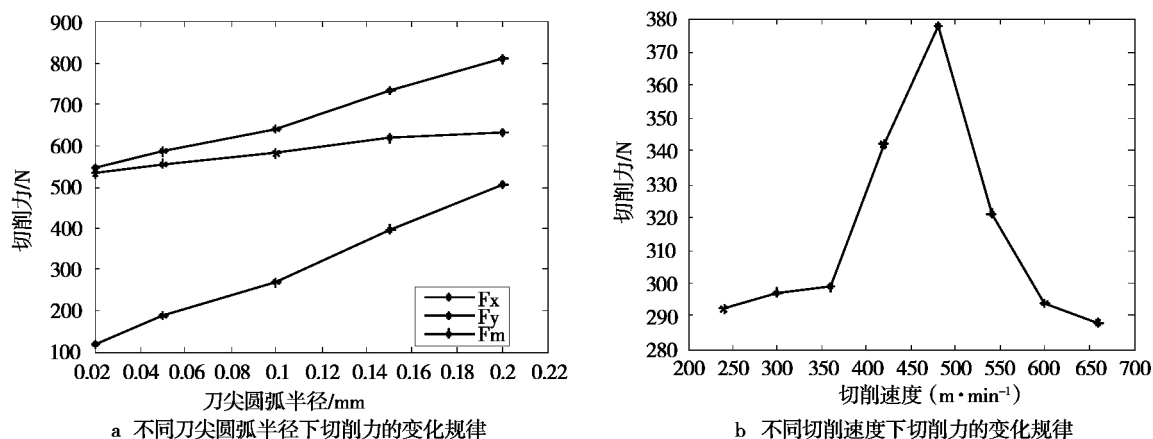


图5 不同刀尖圆弧半径和切削速度下切削力的变化规律

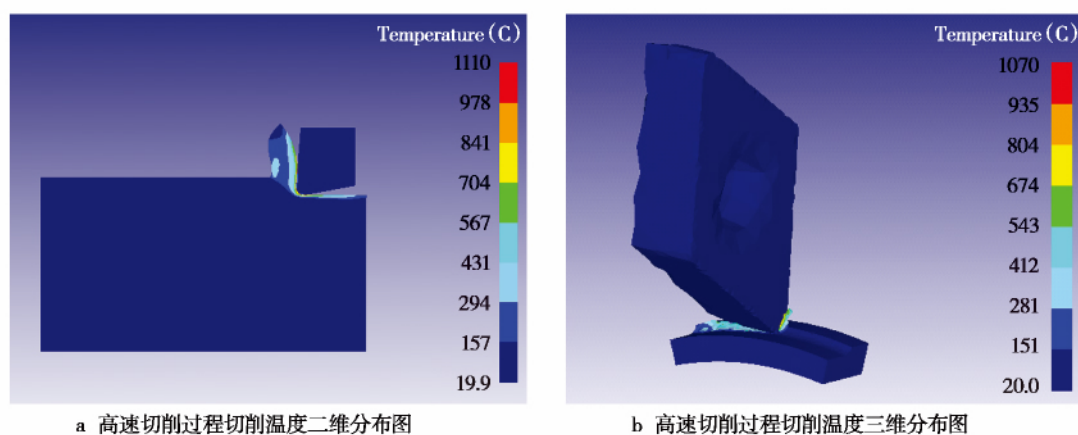
Fig. 5 The change rule of cutting force for different corner radius and cutting speed

3.2 切削温度仿真分析

切削温度是高速切削加工研究中一项重要的研究指标,其对刀具的磨损、刀具耐用度以及加工表面质量产生重要的影响。

3.2.1 高速切削过程中的温度分布

图6显示了高速切削中碳钢过程中刀具、工件、切屑的温度分布图。



a 高速切削过程切削温度二维分布图

b 高速切削过程切削温度三维分布图

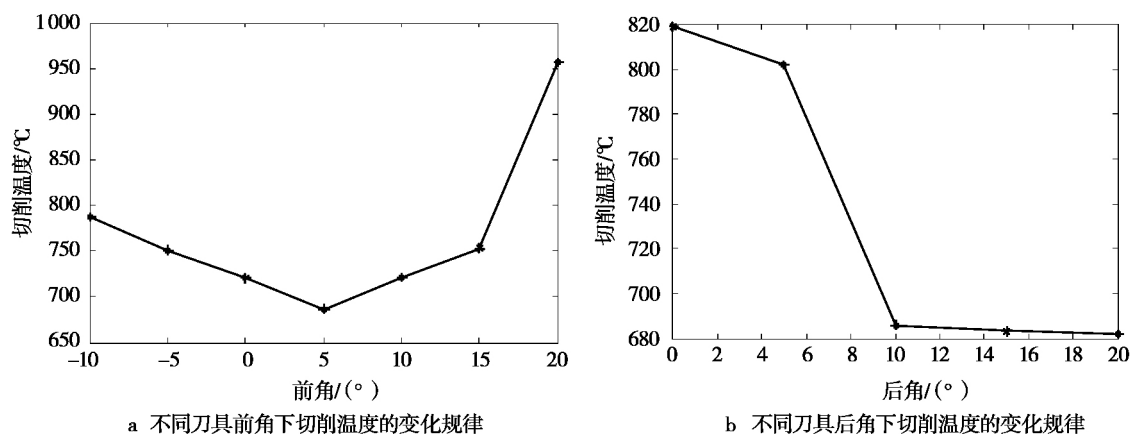
图 6 高速切削过程切削温度分布图

Fig. 6 Cutting temperature distribution of high speed cutting process

从图 6 中可以看出: ①刀屑接触面附近的局部区域内的温度相对较高, 在剪切区内稍低。②刀尖或者靠近刀尖的前刀面某处是刀具上温度的最高点。③切屑过程中的温度要明显高于刀具与工件已加工表面。

3.2.2 刀具前角及刀具后角对切削温度的影响

在从负前角向正前角方向转换的情况下, 刀屑之间的挤压作用减小, 摩擦减轻, 滞流层的应变和应变速度都减小, 从而导致切屑的塑性变形大幅度减小, 故产生的热量减小, 切削温度降低。所以随着刀具前角从 -10° 增加到 5° 时, 切削温度的最高值逐渐降低。但是刀具前角从 5° 增加到 20° 时, 刀具的模角减小, 散热条件变差, 切削温度又逐渐增加(图 7)。



a 不同刀具前角下切削温度的变化规律

b 不同刀具后角下切削温度的变化规律

图 7 不同刀具前角和后角下切削温度的变化规律

Fig. 7 The change rule of cutting temperature for different cutting tool rake angle and back angle

随着刀具后角从 0° 到 10° 时, 切削温度由 819°C 降至 686°C , 减小幅度较大; 而从 10° 到 20° 时, 切削温度从 686°C 到 689°C , 682°C , 变化很小。这是因为随着后角的增大, 后刀面与过渡表面和已加工表面之间的接触长度减少, 摩擦减小, 从而产生的热量减少, 切削温度降低; 但当后角继续增大时, 刀具散热体积减少, 散热条件恶化, 切削温度降低幅度逐渐变缓。刀具后角增加, 有利于使刀具切入工件。但如果后角过大时, 楔角会显著减少, 切削刃强度将严重削弱, 造成使刀具寿命降低。

3.2.3 刀尖圆弧半径及切削速度对切削温度的影响

随着刀尖圆弧半径的增大, 切削温度逐渐增加。刀尖圆弧半径从 0.02 mm 到 0.05 mm 时, 切削温度急剧增加; 从 0.05 mm 到 0.2 mm 时, 切削温度增加缓慢。刀尖圆弧半径增大, 后刀面摩擦增大, 则后刀面的磨损也将增大, 并且切削力 F_y 增加, 会增加切削振动, 所以刀尖圆弧半径不宜过大。当切削速度从 240 m/min 变化到 660 m/min 的过程中, 切削温度先增大后减小(图 8)。

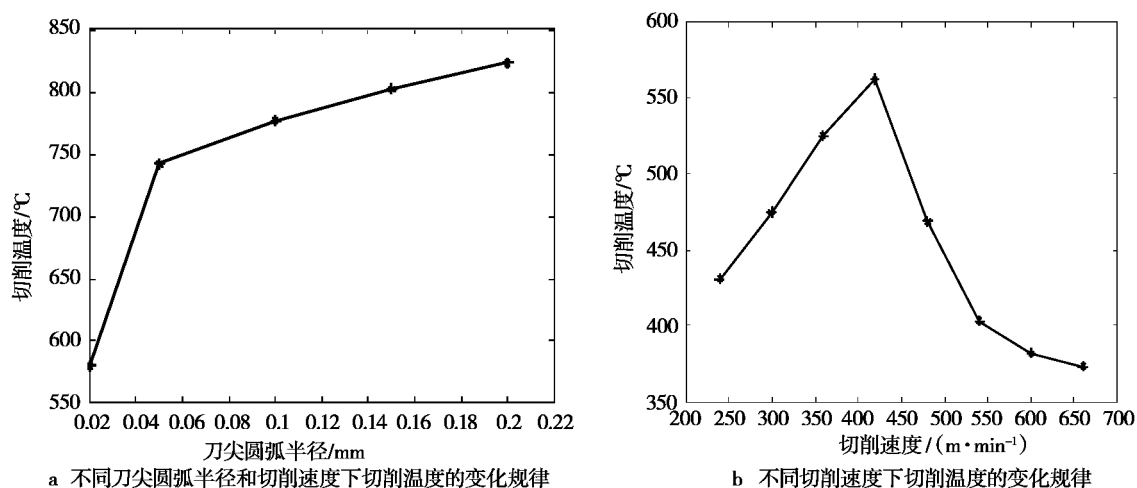


图8 不同刀尖圆弧半径和切削速度下切削温度的变化规律

Fig. 8 The change rule of cutting temperature for different corner radius and cutting speed

4 讨论与结论

在高速切削 45 号钢时,随着刀具前角从 $-10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的变化,切削力变化幅度先大后小,切削温度的最高值先逐渐降低后逐渐增加,所以,前角取 5° 较佳;刀具后角从 5° 至 20° ,切削力几乎不变,而在刀具后角取 10° 时,切削温度较小,为了提高刀具的强度,后角应取 10° ;在整个刀尖圆弧半径增大的过程中,切削力也随之逐渐增加,所以刀尖圆弧半径取较小值;在切削速度从 240 ~ 660 m/min 增加的过程中,切削温度呈现无规律波动,但在切削速度达到 600 m/min 时切削温度较低,由切削速度对切削力的影响,分析得切削速度选 600 m/min 较佳。

本文没有考虑对表面质量的影响,表面质量需要根据仿真分析结果进行实验检测分析,但是建立的仿真模型在参数选择、边界条件处理和网格重划分等技术方面处理得比较好,能够得到较为合理的切削参数,对提高加工质量和延长刀具寿命等具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 艾兴. 高效加工技术及其应用研究[J]. 中国工程科学, 2000, 2(11): 40-51.
- [2] 杨叔子, 吴波. 先进制造技术及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 73-78.
- [3] 李合生. 超高速切削加工技术及其发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2005(5): 162-164.
- [4] 袁巨龙. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- [5] 王先逵, 吴丹. 精密加工和超精密加工技术综述[J]. 中国机械工程, 1999, 10(5): 161-177.
- [6] 任小中. 先进制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 14-16.
- [7] 王华侨. 模具高速铣削加工技术及数控编程实例应用[J]. 模具制造技术, 2005(3): 54-57.
- [8] 张忠松. 自由曲面高速铣削工艺规划与自主决策技术[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [9] 刘占强, 艾兴. 高速切削技术的发展与展望[J]. 制造技术与机床, 2001(7): 5-7.
- [10] 邓朝晖. 高速加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 106-120.
- [11] 沈斌, 周莹君. HSC 在模具制造中的应用[J]. 制造业自动化, 2007, 29(4): 20-26.
- [12] 刘战强, 黄传真, 郭培全. 先进切削加工技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 21-23.
- [13] 李红华. 高速切削高温合金有限元模拟及试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [14] 董丙闯. 淬硬钢高速切削有限元分析及刀具参数研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

(编辑 杨家华)