

# 织构参数对刀具主切削力及切削温度的影响

李坤<sup>1</sup>, 杜家熙<sup>1</sup>, 刘莉莉<sup>2</sup>, 申福猴<sup>1</sup>, 马利杰<sup>1</sup>, 逢明华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河南科技学院; <sup>2</sup> 河南工学院

**摘要:** 织构刀具具有良好的摩擦学特性, 针对织构参数对刀具主切削力及切削温度的影响, 利用仿真软件建立硬质合金织构刀具切削 Al7075-T6 铝合金的二维正交切削仿真模型, 分析了织构宽度、织构间距、织构刃边距、织构深度对刀具主切削力及切削温度的影响。结果表明, 合理的织构参数具有良好减磨效果, 能够改善刀具切削性能; 不合理的织构参数会引发织构刀具的二次切削, 使刀具的主切削力及切削温度增大。在所选织构参数范围内, 织构宽度 40 $\mu\text{m}$ 、织构刃边距 80 $\mu\text{m}$ 、织构间距 70 $\mu\text{m}$ 、织构深度 20 $\mu\text{m}$  时, 刀具的主切削力及切削温度最低。

**关键词:** 织构参数; 主切削力; 切削温度; 仿真

中图分类号: TG707; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.12.009

## Effect of Texture Parameters on Main Cutting Force and Temperature of Cutting Tools

Li Kun, Du Jiayi, Liu Lili, Shen Fuhou, Ma Lijie, Pang Minghua

**Abstract:** Textured cutting tools have good tribological properties. Aiming at the effect of texture parameters on main cutting force and cutting temperature, a two-dimensional orthogonal cutting simulation model for cutting Al7075-T6 aluminum alloy with cemented carbide texture cutting tool is established by using simulation software. The effects of texture width, texture spacing, edge distance of texture and texture depth on main cutting force and cutting temperature are analyzed. The results show that the reasonable texture parameters have good wear reduction effect and can improve the cutting performance of cutting tools. The unreasonable texture parameters will lead to the secondary cutting of texture cutting tools, which will increase the main cutting force and cutting temperature of the cutting tools. Within the range of texture parameters selected by this research institute, the main cutting force and cutting temperature of the tool are the lowest when the texture width is 40 micron, the edge distance of the texture is 80micron, the texture distance is 70micron and the texture depth is 20micron.

**Keywords:** texture parameter; main cutting force; cutting temperature; simulation

## 1 引言

机械制造业中, 多数零件通过切削加工工艺制成, 金属切削过程中消耗的绝大部分能量都转化为切削热<sup>[1-3]</sup>, 为了降低刀具切削温度和改善工件表面加工质量, 传统金属切削过程中会使用大量切削液。由于切削速度很快, 而且刀-屑界面存在粘结区, 所以切削液无法进入该区域, 导致切削液的利用率降低。此外, 切削液的后处理会增加加工成本, 并对环境造成破坏。

近年来, 政府部门对环境问题日益重视, 微量润滑和干切削成为绿色加工发展的趋势<sup>[4-6]</sup>。随着仿生摩擦学的发展<sup>[7,8]</sup>, 织构技术被引入刀具表面, 现有研究表明, 刀具表面织构能够改善刀具的切削性能。因此, 织构刀具引发相关学者的关注, 并进行了

大量研究。Lei S. 等<sup>[9]</sup>利用飞秒激光技术在未涂层硬质合金刀具前刀面加工出孔状织构, 并在织构内填充二硫化钨和油的混合润滑剂, 制备出了微池润滑刀具。切削试验结果表明, 与无织构刀具在干冷、液冷切削条件相比, 该微池刀具的三向切削力均值降低了 10% ~ 30%; 刀-屑接触长度降低了 30%; Jianxin D. 等<sup>[10]</sup>利用电火花技术在硬质合金刀具的前刀面和后刀面加工出微孔织构, 并在微孔中填充二硫化钨固体润滑剂, 切削淬硬钢试验结果表明, 与常规无织构刀具相比, 微孔自润滑刀具的切削力和摩擦系数均减小, 并表现出了更强的耐磨性; 吴泽等<sup>[11]</sup>利用激光技术在硬质合金刀具前刀面月牙洼区域加工出椭圆形织构, 并在织构内填充二硫化钨固体润滑剂, 切削 45 钢试验结果表明, 与常规无织构刀具相比, 该自润滑刀具能够降低切削力与切削温度, 并能够减小切屑变形及前刀面磨损; Pang M. <sup>[12]</sup>利用激光技术在硬质合金刀具前刀面加工对称的锥形槽型织构, 切削 45 钢试验结果表明, 与常

基金项目: 河南省科技攻关项目(192102210216, 182102210301, 152102210100)

收稿日期: 2019 年 5 月

规无织构刀具及平行槽型织构刀具相比,该新型织构刀具的切削力、平均摩擦系数和刀具磨损均为最小。

目前,织构刀具的研究多集中在织构形貌及织构对切削性能影响的定性分析,定量研究较少。依据相关文献调研结果表明,关于织构参数对切削性能的影响研究缺乏。为此,建立了硬质合金织构刀具干切削 Al7075-T6 铝合金模型,研究了织构宽度、织构间距、织构刃边距、织构深度对主切削力、切削温度的影响,为织构刀具技术发展奠定基础。

## 2 切削模型

### 2.1 几何模型

利用仿真软件建立硬质合金织构刀具切削 Al7075-T6 铝合金的二维正交切削模型。根据平面应变特征,当切削宽度是切削厚度的 5 倍以上时,切削过程可以作为平面应变问题处理<sup>[13]</sup>。选用切削厚度 0.12mm、切削深度 2mm,满足平面应变特征,采用二维正交切削模型。现有研究表明,平行于刀具主切削刃的沟槽型织构效果最好<sup>[14,15]</sup>。为此,仿真选用平行于主切削刃方向的槽型织构,织构参数见表 1,刀具表面织构类型见图 1。工件尺寸为 3mm × 1.2mm,刀具前角为 5°,刀具后角为 7°。

表 1 织构参数 (μm)

织构宽度	织构刃边距	织构间距	织构深度
20	40	30	20
30	60	50	30
40	80	70	40
50	100	90	50
60	120	110	60

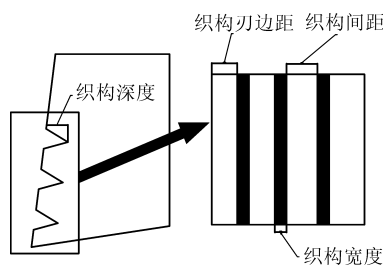


图 1 刀具表面织构类型

### 2.2 材料本构模型

材料本构模型描述材料的力学特性,表征材料弹塑性变形过程的动态响应,其准确性对仿真结果有直接影响。切削过程有高温变化、高应变率的特征,选取考虑了应变、应变率、温度的 Johnson-Cook 材料本构模型作为仿真的工件材料模型。Al7075-T6 的 Johnson-Cook 本构参数见表 2。

表 2 Al7075-T6 的 Johnson-Cook 本构参数<sup>[17]</sup>

参数	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
数值	546	678	0.024	0.71	1.56

Johnson-Cook 材料本构模型为<sup>[16]</sup>

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

式中,  $[A + B(\bar{\epsilon})^n]$  为应力状态相关项;  $\left[ 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right]$  为应变率相关项;  $\left( 1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m$  为温度相关项; A 为屈服强度; B 为应变硬化指数; C 为应变率敏感系数; m, n 为工件材料常数。

### 2.3 切削参数

金属切削过程中,切削参数对切削效果有重要影响。仿真精加工切削过程,根据硬质合金刀具常用切削工况<sup>[18]</sup>,选择切削参数为:进给量 0.1 ~ 0.3mm/r,背吃刀量 0.5 ~ 2mm,切削厚度为 0.12mm,切削深度为 2mm。干切削和高速切削为先进切削加工技术、绿色切削的发展趋势<sup>[19]</sup>,选取较高切削速度 1200m/min。

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 仿真结果有效性验证

实际切削试验过程受室温、振动、工件材料均匀程度等影响,试验结果与仿真结果之间会有一定误差。设定切削厚度 0.12mm、切削深度 2mm、切削速度 1200m/min,对无织构刀具进行切削试验及仿真分析,提取主切削力。图 2 为试验与仿真的主切削力对比情况。由图可知,试验与仿真的主切削力变化趋势基本一致,均值大小基本相等,表明仿真结果可靠,可以采用该模型对织构刀具进行研究。

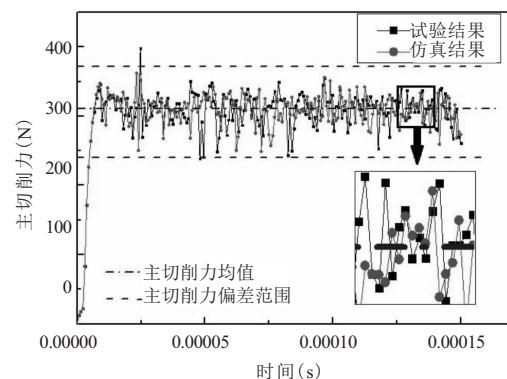


图 2 试验与仿真结果对比

### 3.2 织构宽度对主切削力、切削温度的影响

织构宽度为刀具织构的重要参数之一,将织构宽度与主切削力、切削温度关联,对于揭示织构对刀

具切削性能影响有重要意义。采用单因素法分析织构宽度对主切削力、切削温度的影响,取织构间距 $70\mu\text{m}$ 、织构深度 $30\mu\text{m}$ 、织构刃边距 $80\mu\text{m}$ 。仿真结果见图3。

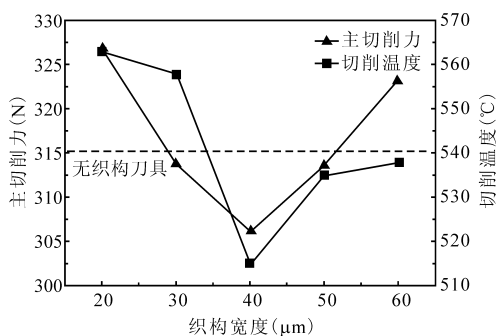


图3 织构宽度对主切削力及切削温度的影响

由图3可知,随着织构宽度的增加,主切削力及切削温度均先减小后增大,织构宽度在 $30\sim 50\mu\text{m}$ 内,织构刀具的主切削力小于无织构刀具;织构宽度在 $35\sim 60\mu\text{m}$ 内,织构刀具的切削温度小于无织构刀具。可见,当织构宽度在一定范围内,织构刀具表现出良好的切削性能。

织构在干切削条件下,如式(2)<sup>[20]</sup>所示,通过改变刀一屑界面的接触面积 $A_{\gamma}$ 影响刀一屑界面摩擦力 $F_f$ 。切削力由变形区工件材料弹塑性变形抗力和刀一屑、刀一工之间的摩擦力组成,因此主切削力与刀一屑界面摩擦力同增同减。切削温度与切削热正相关,切削热由变形区工件材料弹塑性变形功和刀一屑、刀一工之间的摩擦功组成,因此切削温度与刀一屑摩擦力同增同减,有

$$F_f = A_{\gamma} \tau_c \quad (2)$$

式中, $A_{\gamma}$ 为刀一屑接触面积; $\tau_c$ 为摩擦剪切强度。

由图3可知,当织构宽度大于 $40\mu\text{m}$ 时,主切削力、切削温度并未随着刀一屑接触面积的减小而降低。图4为织构宽度 $50\mu\text{m}$ 时的刀一屑界面温度场,可以看出,当织构宽度达到一定值时,织构对切屑产生明显的二次切削现象,并且温度在二次切削区域急剧增加。织构对切屑的二次切削导致刀一屑界面应力增大,从而使主切削力和切削温度增加。

经分析可知,当其他织构参数不变而织构宽度改变时,随着织构宽度的增加,刀一屑界面的摩擦力减小,主切削力及切削温度随之减小;当织构宽度达到一定值时,织构对切屑产生明显的二次切削现象,二次切削导致主切削力及切削温度增加。综上分析,主切削力及切削温度的变化呈现如图3所示规律。

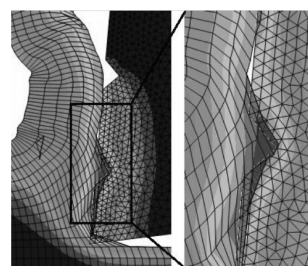


图4 织构宽度 $50\mu\text{m}$ 的刀一屑界面温度场

### 3.3 织构刃边距对主切削力及切削温度的影响

织构刃边距是刀具织构的另一重要参数,其大小决定织构区域距主切削刃的距离,同时影响刀一屑接触区内织构的数量,对刀具切削性能有重要影响。采用单因素法分析织构刃边距对主切削力及切削温度的影响,取织构宽度 $40\mu\text{m}$ 、织构间距 $70\mu\text{m}$ 、织构深度 $30\mu\text{m}$ 。仿真结果见图5。

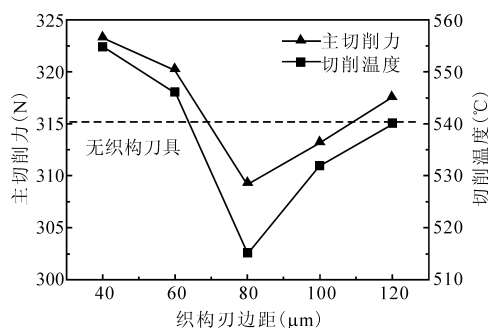


图5 织构刃边距对主切削力及切削温度的影响

由图5可知,随着织构刃边距的增加,主切削力及切削温度先减小后增大,并表现出相同的变化趋势。织构刃边距为 $70\sim 110\mu\text{m}$ 时,织构刀具的主切削力小于无织构刀具;织构刃边距为 $70\sim 120\mu\text{m}$ 时,织构刀具的切削温度小于无织构刀具。织构刃边距在一定范围内,织构刀具表现出良好的切削性能。

主切削力及切削温度呈先减小后增大的特征,经分析,主要原因是:随着织构刃边距的增加,二次切削现象减弱,从而使主切削力及切削温度随之减小,织构刃边距为 $80\mu\text{m}$ 的刀一屑界面见图6;织构刃边距继续增加,使刀一屑接触长度内织构数量减小,不能有效降低刀一屑界面摩擦面积,导致刀一屑界面摩擦力增加,从而使主切削力及切削温度增加。综合以上原因,主切削力及切削温度的变化出现如图5所示规律。

### 3.4 织构间距对主切削力及切削温度的影响

织构间距用来表示各织构间的净距离,该参数影响刀一屑接触区内织构个数。采用单因素法分析

织构间距对主切削力及切削温度的影响,取织构宽度 $40\mu\text{m}$ 、织构刃边距 $80\mu\text{m}$ 、织构深度 $30\mu\text{m}$ 。仿真结果见图7。

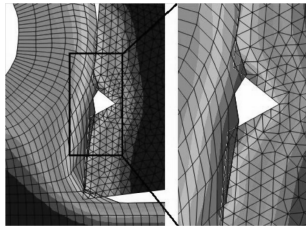


图6 织构刃边距 $80\mu\text{m}$ 的刀—屑界面

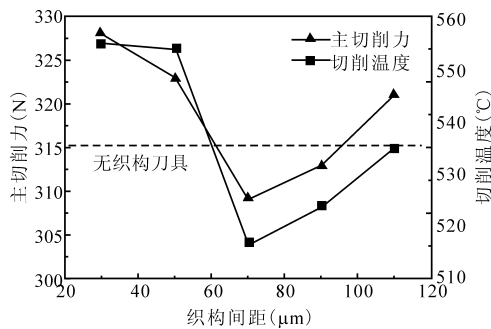


图7 织构间距对主切削力及切削温度的影响

由图7可知,随着织构间距的增加,主切削力及切削温度先减小后增大。织构间距为 $60\sim 90\mu\text{m}$ 时,织构刀具的主切削力小于无织构刀具;织构间距为 $60\sim 110\mu\text{m}$ 时,织构刀具的切削温度小于无织构刀具。织构间距在一定范围内,织构刀具表现出良好的切削性能。

由前文可知,刀—屑接触面积大小决定刀—屑界面摩擦力大小。随着织构间距增大,刀—屑接触面积增大,如果仅考虑刀—屑接触面积,主切削力及切削温度应随织构间距的增大而增大。但是,实际情况为随着织构间距增大,主切削力及切削温度先减小后增大。经分析,主要原因是:当织构间距过小时,会出现多个织构参与二次切削的现象发生,导致主切削力及切削温度较大,图8为织构间距为 $30\mu\text{m}$ 时的刀—屑界面。随着间距的增加,除距主切削刃第一个织构,其余织构二次切削减弱,主切削力及切削温度呈下降趋势;随着织构间距继续增大,刀—屑接触面积随之增大,主切削力及切削温度呈上升趋势。综合以上分析,导致主切削力、切削温度的变化出现如图7所示规律。

### 3.5 织构深度对主切削力、切削温度的影响

织构深度表示织构底距前刀面的垂直距离。采用单因素法分析织构深度对主切削力、切削温度的影响,取织构宽度 $40\mu\text{m}$ 、织构刃边距 $80\mu\text{m}$ 、织构间

距 $70\mu\text{m}$ 。仿真结果见图9。

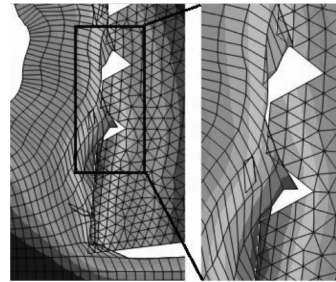


图8 织构间距 $30\mu\text{m}$ 的刀—屑界面

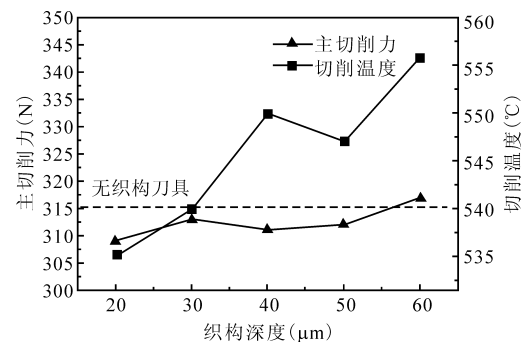


图9 织构深度对主切削力及切削温度的影响

由图9可知,随着织构深度的增加,主切削力呈上升趋势,但增加幅度较小,可以认为主切削力基本不变,切削温度逐渐增大但增幅较小。在 $20\sim 55\mu\text{m}$ 的范围内,织构刀具的主切削力小于无织构刀具;在 $20\sim 30\mu\text{m}$ 的范围内,织构刀具的切削温度小于无织构刀具。织构深度在一定范围内,织构刀具表现出良好的切削性能。可见,织构深度的变化不影响刀—屑接触面积,因此对主切削力及切削温度的影响较小。

## 4 结语

通过建立硬质合金织构刀具切削Al7075-T6铝合金仿真模型,研究了织构宽度、织构间距、织构刃边距、织构深度4个参数对主切削力及切削温度的影响,通过分析,所得主要结论如下:

(1) 织构参数的变化引起刀—屑界面接触面积的变化,刀具主切削力及切削温度与刀—屑接触面积正相关。二次切削现象的产生与织构参数有关,二次切削现象使刀具的主切削力及切削温度增大。

(2) 合理的织构参数能够减小刀—屑接触面积,并减弱二次切削现象,使刀具的主切削力及切削温度减小(小于无织构刀具),有良好的减磨效果。

(3) 在所选织构参数范围内,织构宽度 $40\mu\text{m}$ 、织构刃边距 $80\mu\text{m}$ 、织构间距 $70\mu\text{m}$ 、织构深度 $20\mu\text{m}$ 时,刀具的主切削力及切削温度最低。

## 参考文献

- [1] 朱明臣. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] Wu Z, Deng J, Su C, et al. Performance of the micro-texture self-lubricating and pulsating heat pipe self-cooling tools in dry cutting process[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 45: 238 - 248.
- [3] Lian Y, Deng J, Guangyuan Yan. Preparation of tungsten disulfide (WS<sub>2</sub>) soft-coated nano-textured self-lubricating tool and its cutting performance[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9 - 12): 2033 - 2042.
- [4] Xing Y, Deng J, Zhao J, et al. Cutting performance and wear mechanism of nanoscale and microscale textured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic tools in dry cutting of hardened steel[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 43: 46 - 58.
- [5] 韩荣第, 吴健. 绿色切削技术探讨[J]. 工具技术, 2006, 40(12): 8 - 10.
- [6] 路冬, 李剑峰, 李方义, 等. 绿色切削加工技术的研究现状与进展[J]. 工具技术, 2005, 39(3): 3 - 6.
- [7] 邵世超, 谢峰. 仿生微织构对刀具切削性能影响的有限元分析[J]. 工具技术, 2013, 47(5): 8 - 12.
- [8] 戚宝运, 李亮, 何宁, 等. 表面织构在刀具减磨技术中的应用[J]. 工具技术, 2010, 44(12): 3 - 6.
- [9] Lei S, Devarajan S, Chang Z. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1612 - 1620.
- [10] Jianxin D, Wenlong S, Hui Z. Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(1): 66 - 72.
- [11] 吴泽, 邓建新, 邢佑强, 等. 椭圆状微织构自润滑车刀切削性能试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 228 - 234.
- [12] Pang M, Nie Y, Ma L. Effect of symmetrical conical micro-grooved texture on tool-chip friction property of WC-TiC/Co cemented carbide tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(1 - 4): 737 - 746.
- [13] 谭阳, 迟毅林, 黄亚宇. 基于有限元法的二维正交切削刀具应力分析[J]. 工具技术, 2007, 41(10): 36 - 38.
- [14] 逢明华, 聂永芳, 申福猴, 等. 刀具表面织构对刀-屑界面摩擦学特性的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 119 - 128.
- [15] 吴泽, 邓建新, 连云崧, 等. 表面织构刀具的研究现状与进展[J]. 航空制造技术, 2012(10): 32 - 37.
- [16] 彭臣西, 吴运新, 易守华, 等. JC 本构模型对 7050 铝合金二维切削仿真影响的研究[J]. 工具技术, 2018, 52(11): 59 - 62.
- [17] Brar N S, Joshi V S, Harris B W. Constitutive model constants for Al7075-T651 and Al7075-T6[J]. AIP Conference Proceedings, 2009.
- [18] 刘世飞, 苏文斌. 常用硬质合金刀片及参数的选择[J]. 机械工人(冷加工), 2006(12): 31 - 32.
- [19] 刘战强, 王兆辉, 刘逢时. 先进切削加工技术综述[J]. 工具技术, 2003, 37(5): 3 - 7.
- [20] 冯秀亭. 表面织构陶瓷刀具的切削性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
第一作者: 李坤, 硕士研究生, 河南科技学院机电学院, 453003 河南省新乡市  
*First Author: Li Kun, Postgraduate, School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China*  
通信作者: 杜家熙, 硕士, 教授, 河南科技学院机电学院, 453003 新乡市  
刘莉莉, 博士, 教授, 河南工学院, 453003 河南省新乡市  
*Corresponding Author: Du Jiaxi, Master, Professor, School of Mechanical and Electrical Engineering of Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China*  
*Liu Lili, Doctor, Professor, Henan Institute of Technology, Xinxiang, Henan 453003, China*