

基于单刃单磨粒正交切削的微铣磨温度仿真

巩亚东¹, 王超¹, 范智广², 谭学飞¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳工程学院 机械学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 建立单刃单磨粒正交切削模型, 采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)法, 对微尺度铣磨复合加工进行有限元仿真, 分析切削过程中的温度场分布与变化情况, 以及后刀面磨粒磨削对加工温度的影响。按照热源分布位置划分温度区, 分析加工过程中各温度区温度变化规律。通过仿真结果发现, 工件加工时温度场中的最高温度出现在磨粒磨削区和毗邻刃口处两个位置; 除磨粒磨削区外, 微铣磨复合加工工件各温度区温度变化规律与微铣削相同; 后刀面磨粒磨削作用使切削过程中工件各温度区温度升高, 离磨削区越近, 温升越大。

关 键 词: 微铣磨; 正交切削; 单刃单磨粒; 有限元仿真; 温度

中图分类号: TG 501.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)07-1005-05

Simulation of Temperature in Micro Mill-Grinding Based on Single-Edge Single-Grit Orthogonal Cutting

GONG Ya-dong¹, WANG Chao¹, FAN Zhi-guang², TAN Xue-fei¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. School of Mechanics, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China. Corresponding author: WANG Chao, E-mail: wangchaoneu@163.com)

Abstract: The single-edge single-grit orthogonal cutting model was developed, and the finite element simulation of micro mill-grinding was accomplished using the arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) method. The distribution and variation of temperature fields in the cutting process were analyzed. For the grinding of abrasive grains on the rear face, its effect on processing temperature was investigated. Temperature zones were defined according to the heat sources distribution, and the temperature change law of each temperature zone was analyzed. The simulation results show that the maximum temperature during processing is located at the abrasive grinding zone and the zone adjacent to the cutting edge. The temperature change law of each temperature zone in micro mill-grinding is the same as that in micro milling except for abrasive grinding zone. Grinding of the grit on rear face leads to temperature rise of all zones during processing. And the closer from the grinding zone, the larger the temperature rise is.

Key words: micro mill-grinding; orthogonal cutting; single-edge single-grit; finite element simulation; temperature

在金属切削中通常认为温度升高是有害的, 虽然它能减小摩擦, 降低切削力, 但当加工温度过高时, 会造成加工表面热变质层、表面烧伤和残余应力等问题, 进而影响到零件的疲劳强度和使用性能; 同时过高的加工温度还会加快刀具的磨损, 缩短刀具寿命^[1-2]。在微尺度加工中, 由于工件尺寸和加工用量本身就很微小, 温度升高造成的工件变形等问题就显得尤其严重。所以控制加工温度

对提高加工质量和节约加工成本有着重要意义。

对金属切削过程中的温度测量使用最多的是热电偶法和红外线热成像法。研究者很早就使用刀具-工件热电偶法^[3]、刀具埋入热电偶法^[4]、工件埋入热电偶法^[5]得到了金属切削过程中工件和刀具的温度分布。Boothroyd^[6]提出红外摄影的方法, 并从切削点侧面求得温度分布。Stephenson^[7]还将温度的理论分析结果与红外成

收稿日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375082); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120603002)。

作者简介: 巩亚东(1958-), 男, 辽宁本溪人, 东北大学教授, 博士生导师。

像和热电偶测量结果进行了对比. 有限元仿真法是计算机技术兴起后, 研究人员大量使用的方法. 利用其对切削、磨削进行仿真分析, 可以不受尺度限制. Ding 等^[8]在研究中用有限元仿真对激光辅助微铣削加工温度等问题进行了研究.

微铣磨复合加工是一种新的微尺度加工技术, 目前其刀具制备技术还不够成熟, 在这种技术条件下用试验方法测量其加工温度会受到刀具因素的影响, 无法得到较为精确的结果. 利用有限元仿真可以不受实际条件和技术问题的限制, 本文对微铣磨复合加工的温度场进行模拟, 分析微尺度铣磨复合加工工件的温度场分布和温度变化规律, 以及铣磨刀上的磨粒对加工温度的影响.

1 单刃单磨粒正交切削模型

1.1 几何模型

微铣磨复合加工与微铣削的不同之处在于, 微铣磨复合刀具后刀面有磨粒, 其加工过程是刀刃切削与后刀面磨粒磨削同时进行的. 在磨削中, 常以单颗磨粒为研究对象来研究磨削机理. 为便于研究, 对微铣磨复合加工也采取类似方法, 以切削刃后刀面只有一颗磨粒为对象, 建立单刃单磨粒正交切削模型, 为减少几何参量将磨粒抽象为圆形, 如图 1 所示. 图中刀具刃口圆弧半径为 $2\ \mu\text{m}$, 刀刃前角 10° , 后角 6° ; 磨粒直径 $5\ \mu\text{m}$, 出刃高度 $2.5\ \mu\text{m}$, 磨粒到刃口距离 $10\ \mu\text{m}$; 切削深度 $10\ \mu\text{m}$.

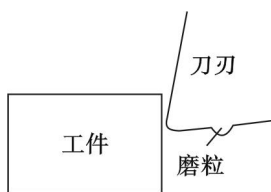


图 1 单刃单磨粒正交切削模型

Fig. 1 The single-edge single-grit orthogonal cutting model

1.2 材料模型

被加工材料是加工温度的一个重要影响因素. 钛合金导热率低, 加工温度高, 工艺性能差, 属于典型的难加工材料. 但因其强度高、密度小、耐腐蚀性好, 是航空航天工业中重要的结构材料. 本文对钛合金 Ti6Al4V 微铣磨复合加工温度进行仿真研究, 并与微铣削仿真进行对比. Ti6Al4V 的材料性能如表 1 所示.

金属材料在加工时有高应变率和温升特点, Johnson 和 Cook^[9]建立了一种材料本构模型, 即

Johnson – Cook 模型(简称 J – C 模型), 很好地描述了材料的这种特性, 如式(1)所示.

表 1 Ti6Al4V 材料机械与物理性能
Table 1 Material properties of Ti6Al4V

物理量	值
导热率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	7.5
比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	526.3
热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	9.1×10^{-6}
弹性模量/GPa	108
泊松比	0.33
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	4 400

$$\sigma = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \times \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \times \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \right)^m \right]. \quad (1)$$

式中: σ 为屈服应力; $\bar{\varepsilon}$ 是等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率 ($1\ \text{s}^{-1}$); θ_0 为室温(一般为 $20\ ^\circ\text{C}$); θ_m 为熔化温度; A 为初始屈服应力; B 为硬化模量; n 为加工硬化指数; C 为应变率系数; m 为热软化系数. Ti6Al4V 的材料本构模型系数见文献[10].

对于单刃单磨粒切削模型来说, 微铣磨复合加工相当于在工件同一表面进行了两次切削, 即切削刃先切过某处, 随后后刀面磨粒对该处进行二次切削. 若采用分离准则, 只会在切削刃切除材料时生效形成切屑, 而磨粒进行二次切削时分离层已不存在. 因此对微铣磨复合加工采用 ALE 自适应网格技术. 这种方法将切削过程看作楔形挤压, 不需要切屑分离准则, 而是由材料塑性变形生成切屑^[11].

2 仿真结果分析与讨论

2.1 温度区定义

根据金属切削机理, 塑性材料切屑形成过程中有 3 个变形区. 因为切削过程中的热主要来自于材料变形和切屑形成的剪切热, 以及切屑、工件与刀具的摩擦热, 所以这 3 个变形区即为切削过程中的主要热源. 将被加工工件的温度场按热源位置划分, 如图 2a 所示. 第 I 变形区为剪切温度区, 第 II 变形区为切屑 – 前刀面摩擦温度区, 第 III 变形区为工件 – 后刀面摩擦温度区.

对于微铣磨复合加工, 因为磨粒的磨削过程必然伴随着材料的变形以及磨粒与材料的摩擦等现象, 也会产生大量的热, 这部分热量向外扩散传

递,不可避免地改变工件切削过程中温度场的分布,对整个温度场产生影响.所以在单刃单磨粒正交切削温度场中,除与图2a相同的3个温度区外,在磨粒磨削区还有一个热源,将该区域定义为磨削温度区,即图2b所示的第Ⅳ温度区.

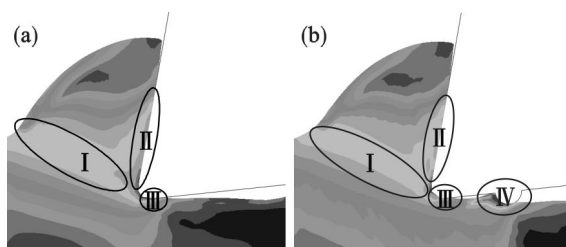


图2 温度区

Fig. 2 Temperature zones

(a)—微铣削; (b)—微铣磨复合加工.

2.2 切削过程中温度场变化

对微铣磨仿真过程中不同时刻的温度场进行分析,如图3所示.磨粒接触工件前,其切削效果与铣削相同.由于工件与后刀面摩擦区产生的热量较小,而切削刃的剪切作用以及切屑与前刀面的摩擦产热量较大,是主要热源,在二者的共同作用下,温度场中的高温中心出现在靠近刃口的前刀面上,形状像一个与前刀面垂直放置的弹头.而在 $t = 0.8 \times 10^{-4}$ s 之后,磨粒开始接触工件,到 $t = 1.1 \times 10^{-4}$ s 形成稳定的磨粒磨削区.这段时间内因磨粒对工件的磨削作用而快速产生大量的热,使磨削区温度急剧上升并明显超出原高温中心最大温度而高于其他所有区域,磨削区成为整个温度场的高温中心.

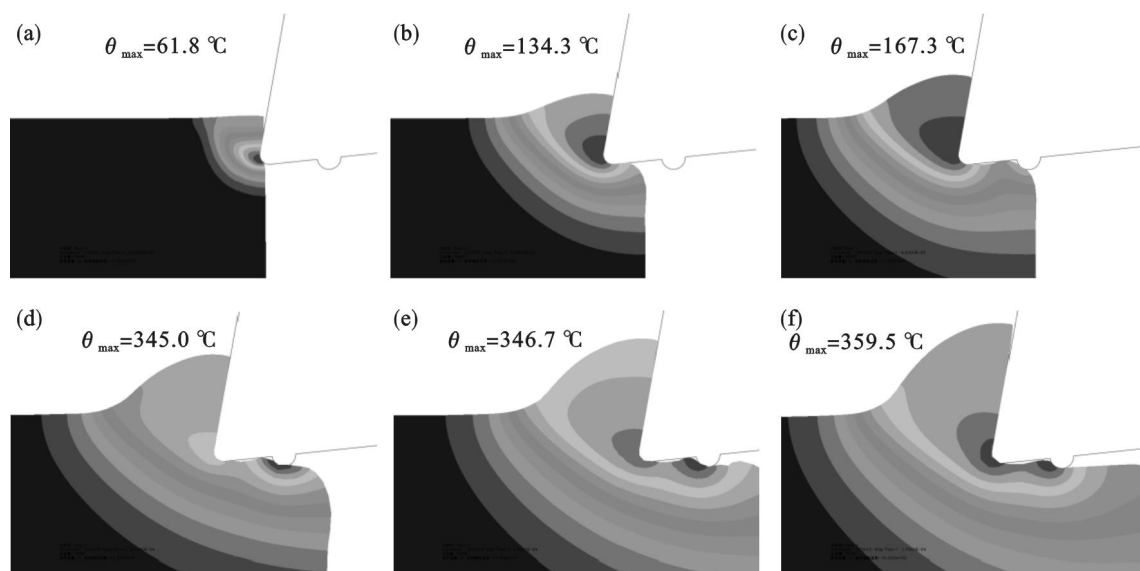


图3 微铣磨仿真过程中温度场变化

Fig. 3 Temperature field in micro mill-grinding simulation

(a)— $t = 0.2 \times 10^{-4}$ s; (b)— $t = 0.5 \times 10^{-4}$ s; (c)— $t = 0.8 \times 10^{-4}$ s;
(d)— $t = 1.1 \times 10^{-4}$ s; (e)— $t = 1.4 \times 10^{-4}$ s; (f)— $t = 1.7 \times 10^{-4}$ s.

随着切削过程的继续进行,磨削区热量向周围扩散,传递到刃口附近区域,再加上剪切热与刀-屑摩擦热的共同作用,使刃口附近温度升高,与磨削区达到热平衡状态,再次形成一个高温中心.但相比于起始阶段,该高温中心面积大幅度缩小,位置沿前刀面下移,呈月牙状包围刃口.这是因为很大一部分热量是从后刀面磨削区向前传递至刃口周围的区域,使剪切热与刀-屑摩擦热的影响相对减弱,所以高温区中心会向磨削区方向移动,且范围向下大幅度收缩.在磨粒磨削区,因磨粒前方比后方材料与磨粒摩擦作用强,生成热量多.且磨削区后方是已加工区域,热量散失快;而前方是刀刃切削区,也有热量产生,热量集聚较

多,散失较慢,因此磨粒前方温度比后方温度要高,即位于磨粒磨削区的高温中心偏移向磨粒前方.至此整个温度场中在磨粒磨削区和刃口前形成两个稳定的高温中心.

2.3 各温度区温度变化规律

提取切削过程中各温度区的最高温度,分析其变化规律,并与相同仿真条件下的微铣削仿真结果进行对比,分析后刀面磨粒对工件各温度区的影响.

1) 磨粒磨削温度区.图4所示为后刀面磨粒磨削区最高温度 θ_{\max} 在切削过程中的数值变化.对于微铣磨复合加工,由图3可知, $t = 0.8 \times 10^{-4}$ s 时刻磨粒开始接触工件进行磨削,在此之前并没有

磨削区,图 4 中 $t = 0.8 \times 10^{-4}$ s 时刻之前的温度取的是工件加工表面边缘处(即刀口切入点)的温度,以虚线表示。而微铣削整个加工过程都不存在磨削区,提取的是其与微铣磨复合加工磨粒磨削区对应位置的温度。

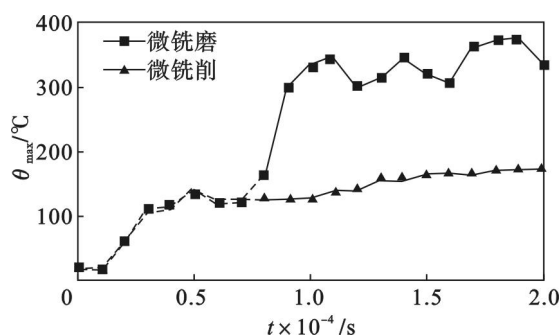


图 4 磨粒磨削温度区
Fig. 4 Temperature zone of grinding

起始阶段,磨粒还未参与切削,微铣磨复合加工与微铣削的温度基本相同。切入点温度随着刀刃的切削作用快速上升,达到 142.9 °C。刀刃切过后,切入点温度略有下降。至 $t = 0.8 \times 10^{-4}$ s 时刻,铣磨刀的磨粒开始磨削工件,切入点温度又开始急剧上升。在 $t = 1.1 \times 10^{-4}$ s 时刻,形成稳定的磨削区,温度攀升至顶点,随后在一定范围内呈波动性变化,波动范围为 300 ~ 370 °C,总的趋势略有升高。这是由于工件受磨粒的挤压、滑擦和耕犁作用,切削状态不稳定,同时热量还要向外扩散传递,所以温度呈现起伏波动。而微铣削加工不存在磨削区,其对应区域的温度在经历了刀刃切入时的快速上升之后,变化趋于平缓,缓慢上升。与微铣削相比,微铣磨加工磨粒的磨削作用使该区域的温度升高了约 140 ~ 200 °C。

2) 工件-后刀面摩擦温度区。工件与后刀面摩擦区离磨削区最近,磨削区产生的热量能迅速传递至该区域,所以此处温度受磨削区影响最大。由图 5 可以看出,从 $t = 0.8 \times 10^{-4}$ s 开始,微铣磨工件的刃后摩擦区温度就开始高出微铣削温度,二者温度都呈缓慢上升趋势,但始终存在明显的温度差。微铣磨复合加工该区的最高温度达 366.1 °C,微铣削最高温度为 279.2 °C,二者最大温差达 88.4 °C。

3) 剪切温度区。剪切区温度在开始时的刀刃切入阶段因有大量的热产生,从初始的 20 °C 快速上升到 178.5 °C,之后温度上升趋势减缓。二者前期温度基本相同,当微铣磨复合加工后刀面磨粒磨削区温度向前传递至剪切区后,使其温度升高并高于微铣削。尤其是 $t = 1.6 \times 10^{-4}$ s 之后,出现

明显温度差,二者的最大温差为 41.7 °C,小于后刀面摩擦区。这是由于剪切区比后刀面摩擦区到磨削区距离远,由磨削区传递至此处热量较少,如图 6 所示,微铣磨剪切区最高温度达 361.7 °C,微铣削剪切区最高温度为 325.2 °C。

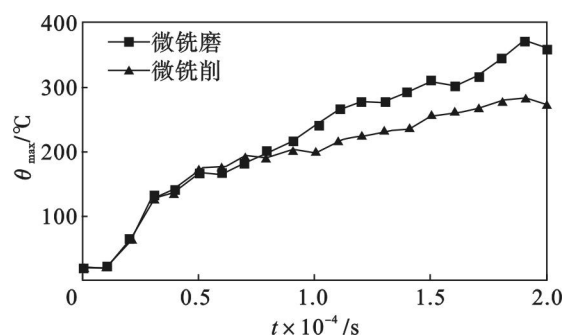


图 5 后刀面摩擦温度区
Fig. 5 Temperature zone of tool-workpiece friction

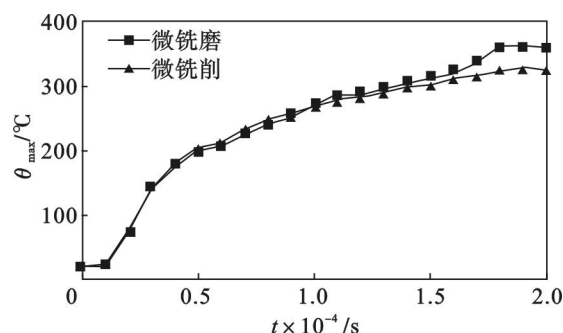


图 6 剪切温度区
Fig. 6 Temperature zone of shearing

4) 切屑-前刀面摩擦温度区。刀-屑摩擦区温度变化规律与剪切温度区相似,其到磨削区距离较远,所以受磨粒磨削的影响也较小。如图 7 所示,微铣磨复合加工工件在该区域的最高温度达 348.6 °C,微铣削该区域最高温度为 318.3 °C,微铣磨复合加工的磨粒磨削作用使其在该温度区的温度比微铣削最多高出 31.4 °C。因前刀面高温中心向下收缩至刀口处,致使该区域温升略小于剪切区。但其到磨削区距离与剪切区到磨削区距离相差不多,所以其温度变化和温差也与剪切区相近。

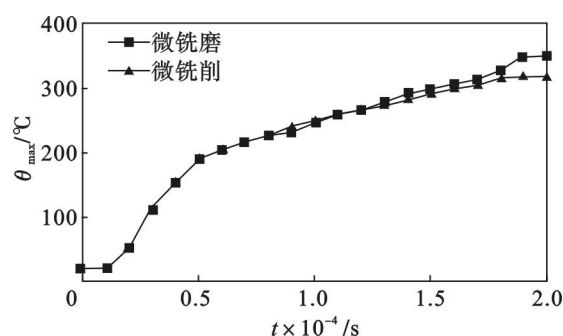


图 7 刀-屑摩擦温度区
Fig. 7 Temperature zone of tool-chip friction

3 结 论

1) 在单刃单磨粒正交切削工件温度场中,存在两个高温中心,磨削区磨粒前方和毗邻刃口处.

2) 后刀面磨粒对微铣磨复合加工工件温度有显著影响,使其各温度区温度都高于微铣削;磨粒磨削区温差最大,离磨削区越远,其影响越小.

3) 微铣磨复合加工除磨粒磨削区温度有突升和波动外,其余各温度区温度变化规律与微铣削一致。

参考文献:

- [1] 白井英治. 切削磨削加工学[M]. 高希正, 刘德忠译. 北京: 机械工业出版社, 1982: 145 - 161.
(Usui Eiji. Study of cutting and grinding[M]. Translated by Gao Xi-zheng, Liu De-zhong. Beijing: China Machine Press, 1982: 145 - 161.)
- [2] 中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 李云芳译. 北京: 机械工业出版社, 1985: 59 - 61.
(Nakayama Kazuo. Metal cutting theory[M]. Translated by Li Yun-fang. Beijing: China Machine Press, 1985: 59 - 61.)
- [3] Nakayama K, Shaw M C, Brewer R C. Relationship between cutting force, temperature, built-up edge and surface finish[J]. *Annals CIRP*, 1966, 14: 211 - 223.
- [4] Qureshi A H, Koenigsberger F. An investigation into the problem of measuring the temperature distribution on the rake

face of a cutting tool [J]. *CIRP ANN*, 1966, 14 (2) : 189 - 199.

- [5] Reichenbach G S. Experimental measurement of metal cutting temperature distribution [J]. *Transactions of the ASME*, 1958, 80: 525 - 546.
- [6] Boothroyd G. Temperature in orthogonal metal cutting [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering*, 1963, 177 (1): 789 - 810.
- [7] Stephenson D A, Ali A. Tool temperatures in interrupted metal cutting [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1992, 114 (2): 127 - 136.
- [8] Ding H T, Shen N G, Shin Y C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212 (3): 601 - 613.
- [9] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21 (1): 31 - 48.
- [10] 刘胜. 钛合金正交切削的温度场和切削力仿真与试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
(Liu Sheng. FEM simulation and experiment research of cutting temperature and force in orthogonal cutting of titanium alloys [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.)
- [11] Vaziri M R, Salimi M, Mashayekhi M. Evaluation of chip formation simulation models for material separation in the presence of damage models [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, 19 (2): 718 - 733.

(上接第 999 页)

- [6] Park H, Lee J H. B-spline curve fitting based on adaptive curve refinement using dominant points[J]. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(6) : 439 - 451.
- [7] 周红梅, 王燕铭, 刘志刚, 等. 基于最少控制点的非均匀有理 B 样条曲线拟合[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(1) : 73 - 77.
- (Zhou Hong-mei, Wang Yan-ming, Liu Zhi-gang, et al. Non-uniform rational B-splines curve fitting based on the least control points [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(1) : 73 - 77.)

- [8] 刘德平,陈建军. 逆向工程中数据精简技术的研究[J]. 西安电子科技大学学报,2008,35(2):334-339.
(Liu De-ping, Chen Jian-jun. Point data reduction technique in reverse engineering[J]. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(2):334-339.)
- [9] Hsiao S W, Chen R Q. A study of surface reconstruction for 3D mannequins based on feature curves[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(11):1426-1441.
- [10] Bai Y B, Yong J H, Liu C Y, et al. Polyline approach for approximating Hausdorff distance between planar free-form curves[J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(6):687-698.