

基于 DEFORM-3D 的钛合金钻削温度场研究

沈钰,白海清,王磐,张嘉琪

陕西理工大学

摘要: 为研究麻花钻的钻削参数对钛合金钻削温度的影响规律,采用 DEFORM-3D 软件对钛合金的钻削加工进行有限元仿真分析,建立钻削温度场模型,应用正交试验设计分析钻头直径、钻削速度和进给量三个钻削参数对钻削温度场的分布及温度的影响。通过极差分析,以图表直观反映各因素对钻削温度的影响程度,并获得最优钻削参数组合。仿真结果表明:钻削速度对于钻削温度的影响最为明显,进给量次之,钻头直径影响最小。

关键词: Ti6Al4V;温度场;DEFORM-3D ;正交试验;极差分析

中图分类号: TG115.63;TH140.7

文献标志码: A

Study on Drilling Temperature Filed of Titanium Alloy Based on DEFORM-3D

Shen Yu, Bai Haiqing, Wang Pan, Zhang Jiaqi

Abstract: In order to study the effect of twist drill drilling parameters on the drilling temperature field of titanium alloy, the drilling process of titanium alloy is analyzed by using DEFORM-3D software finite element simulation. A model of drilling temperature field is established. The effects of three drilling parameters, which are drill diameter, drilling speed and feed rate on distribution of the drilling temperature field and temperature are analyzed by orthogonal experimental design. The effect of various factors on drilling temperature is directly reflected by the chart, and the optimum drilling parameter combination is obtained through range analysis. Simulation results show that the influence of drilling speed on drilling temperature is most obvious, feed rate is the next and drill diameter is the last.

Keywords: Ti6Al4V; temperature distributing; DEFORM-3D; orthogonal test; extreme analysis

1 引言

钻削由于其半封闭性加工方式,导致刀具与工件之间存在摩擦大、切削温度高、排屑困难和钻头刚度低等问题。其中,钻削温度的高低直接影响刀具磨损及刀具寿命,并对工件的加工精度和表面质量有着重要影响,是国内外学者研究金属切削的主要方向。Agapiou J. S. 等^[1]基于 Jaeger 摩擦系数理论预测了钻孔过程中的热现象;鲍永杰等^[2]针对金刚石磨料刀具建立了钻削温度场模型;赵建设^[3]利用热像仪对碳/环氧复合材料高速钻孔时的钻削温度及温度场分布进行了系统的试验研究。

钛合金作为一种典型的难加工材料,因具有热强度高、抗腐蚀性好、耐热性强等特点,被广泛应用于航空航天制造及医疗器械等领域。但也由于其材料导热性差、弹性模量小和化学活性强等特点导致其易与刀具材料产生化学反应,切削温度高导致刀具磨损严重,加工效率低^[4]。因此,钛合金材料钻削温度场的研究引起了学者们的广泛关注。

目前常用的切削温度场研究方法为试验法、解析法和有限元数值法。试验法数据可靠,但只能测得某些点的平均温度,无法直接获得温度场分布情况;解析法常是基于各种假设,与实际情况不符;有限元法主要是解决由材料性质、变形状态和多耦合场引起的非线性问题,其仿真过程便捷、高效,仿真结果更加接近于实际^[5]。本文采用有限元分析法分析钛合金钻削过程中的温度场分布情况,以获得最优钻削参数。

DEFORM-3D 是基于工艺模拟系统的有限元系统(FEM),能直观地获取钻削过程中任一时刻的钻削力、钻削温度及其他工作应力的变化情况。本文基于 DEFORM-3D 软件建立钻削温度场等效模型,利用正交试验的设计方法,分析钻头直径、钻削速度、进给量三个钻削参数对钻削温度场的分布影响。通过极差分析直观反映各钻削参数对钻削温度的影响程度,通过仿真获得的钛合金钻削温度变化规律为后续钛合金材料在实际钻削过程中提高钻孔的质量及钻削参数的选择、优化提供依据。

2 钻削温度场的等效模型

在钻削加工过程中,工件的温度场一直处在非

基金项目:陕西省重点科学研究计划(15JS016);陕西理工大学大学生创新创业训练计划(2017018)

收稿日期:2017年6月

稳定的状态,其温度随着钻头的深入进给而持续增高。根据传热与传质基本原理中的能量守恒和傅里叶公式,在直角坐标系上建立其三维、非稳态导热偏微分方程^[6],有

$$q(x,y,z) + k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, $q(x,y,z)$ 为热源的热流密度; T 为相对温升; ρ 、 c 为工件材料的密度与热容; k_x 、 k_y 、 k_z 为各坐标方向上的导热系数。

钻削温度场的等效模型见图1。分析可知, v_f 为钻头进给速度, ω 为角速度,钻头的主切削刃和横刃在钻削过程中对去除材料起主要作用,是钻头温度的主要热源,设产热为 q_1 。副切削刃主要起导向作用,且产热 q_2 很小,故可忽略。钻削工件模型的上、下表面除钻头作用区域外,其余均为对流热表面,而工件四周的受热源影响较小,故设为绝热表面。此外,相对于固体热传导与对流换热,热辐射对本模型的影响很小,可忽略。

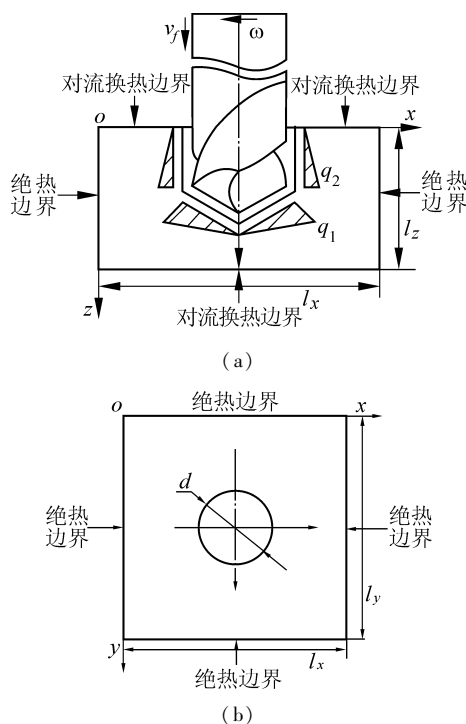


图1 钻削温度场的等效模型

通过以上钻削温度场等效模型的建立与分析,进一步了解钻削温度场的产生与分布,为后续钻削加工的有限元分析奠定了理论基础。

3 DEFORM-3D 钻削有限元仿真

3.1 建立麻花钻模型

采用 DEFORM 软件的三维建模功能建立麻花钻模型,通过查阅相关设计手册和公式计算确定麻

花钻几何参数和刃磨参数后默认建模。此外,还可以通过 UG 和 Pro/E 等三维建模软件建模,再保存为 .stl 格式导入 DEFORM 软件中进行有限元仿真。

对于 DEFORM 软件中标准麻花钻默认建模的合理性,可通过麻花钻的横刃方程式(2)和后角方程式(3)计算验证^[7],验证其建模后的标准麻花钻后角和横刃斜角是否在合理值范围内,如果角度值合理,则进一步证明了标准麻花钻模型的准确性。

$$\tan\psi = \frac{z_0 \sin\theta \cos\theta (1 + \tan^2\delta) - A \tan^2\delta}{e} \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{A \cos\theta \sin^2\delta - \cos\delta \sqrt{\sin^2\theta (e^2 \cos^2\theta + A^2 \sin^2\delta + e^2 \cos^2\delta)}}{(-\cos^2\theta + \cos^2\delta) \sin\theta}$$

$$\tan\alpha_f = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\frac{(y \cos\theta - z \sin\theta) x \cos\theta - y(x - e) - \tan^2\delta (z \cos\theta + y \sin\theta - \frac{A}{\sin\theta}) x \sin\theta}{(y \cos\theta - z \sin\theta) \sin\theta + \tan^2\delta (z \cos\theta + y \sin\theta - \frac{A}{\sin\theta}) \cos\theta} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q = y \sin 2\theta + 2 \cos\theta \tan^2\delta (y \sin\theta - \frac{A}{\sin\theta}) \\ R = \sin^2\theta - \cos^2\theta \tan^2\delta \\ H = (x - e)^2 + y^2 \cos^2\theta - y^2 \sin^2\theta \tan^2\delta + \\ 2y A \tan^2\delta - \tan^2\delta \frac{A^2}{\sin^2\theta} \end{cases} \quad (4)$$

$$x = r \cos t, y = r \sin t, z = \frac{Q + \sqrt{Q^2 - 4RH}}{2R} \quad (5)$$

$$(t = \frac{3\pi}{2} + \arcsin \frac{d_c}{2r})$$

式中, Ψ 为横刃斜角; α_f 为外缘后角; z_0 为横刃上 $x=0, y=0$ 时 z 的坐标值; d_c 为钻芯直径; r 为切削刃上选定点所在圆柱剖面的半径值; δ 为半锥角; θ 为轴间角; A 为锥顶距; e 为偏距。

3.2 预处理参数设置

(1) 刀具与工件参数设置

机械加工类型选择钻孔 (Drilling), 采用国际单位制 (SI) 标准, 刀具设为刚性 (Rigid) 模型, 材料选用硬质合金 (Carbide 15% Cobalt); 工件设为塑性 (Plastic) 模型, 其形状选择直径 12mm、高度 6mm 的圆柱体, 材料选用钛合金 (Ti6Al4V), 其主要性能参数见表 1。

表1 钛合金的主要性能参数

参数	数值	参数	数值
密度 (g/cm ³)	4.44	熔点 (°C)	1530 - 1650
热导率 (W/m·K)	7.5 (20°C)	硬度 HB (N/mm ²)	320
拉伸强度 (MPa)	920	剪切强度 (MPa)	760
屈服强度 (MPa)	860	弹性模量 (GPa)	108
延伸率 (%)	10	泊松比	0.33

DEFORM-3D 软件采用自适应网格划分(AMG)技术,其目的是为了保证在有限元分析过程中出现的不合格单元形状的网络能够即时重新划分。刀具采用相对网格划分(Relative),设置网格数 20000, size ratio 为 4;工件采用绝对网格划分(Absolute),设置最小单位边长(Min element size)小于进给量的 1/2,即最小网格尺寸小于单刃进给量, size ratio 为 10。在边界条件中,设置工件侧面与底面在 X 、 Y 、 Z 方向上的速度均为 0,其目的是确保工件静止;刀具沿 $-Z$ 方向作进给运动并绕自身轴线旋转。

(2) 工作状态参数设置

环境温度(Environment Temperature)设 20°C ;对流系数(Convection Coefficient) $0.02\text{N/s/mm}^{\circ}\text{C}$;定义摩擦类型为剪切摩擦(shear),摩擦系数(Friction factor)设 0.6;热传导系数(Heat transfer coefficient) $45\text{N/s/mm}^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 模拟参数设置

模拟运算总步数 7500 步,每 25 步存储 1 次,或钻削深度 1.5mm,二者达其一就仿真停止;求解器(Solver)采用共轭梯度求解(Conjugate Gradient),迭代方法(Iteration Method)为直接迭代法(Direct iteration);刀具磨损模型采用经验公式 Usui 模型^[8],设置参数 a 为 $1\text{e}-06$, b 为 855。在 Database generation 对话框中,单击 Check 按钮,数据库检查确认无误后,单击 Generate 按钮生成 DB 文件,生成的钻削有限元仿真模型见图 2。

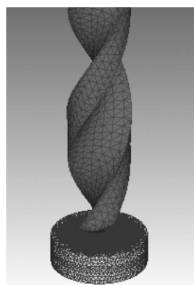


图 2 钻削有限元仿真模型

4 正交试验设计

4.1 试验因素和水平的确定

根据《金属切削工艺手册》选择合理参数,研究钻头直径 d 、钻削速度 v_c 和进给量 f 3 个因素对钻削温度的影响,故采用 3 水平 3 因素的试验因素水平表(见表 2)。

4.2 试验结果

通过上述分析,该试验是三因素三水平的正交

试验,故采用 $L_9(3^3)$ 的正交试验表。利用 DEFORM-3D 软件对 9 组数据进行有限元仿真,并以后处理器里钻头最高钻削温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 作为钻削性能指标^[9],其试验安排及结果见表 3。

表 2 试验因素水平表

水平	钻头直径 $d(\text{mm})$	钻削速度 $v_c(\text{m/min})$	进给量 $f(\text{mm/r})$
1	6	12	0.20
2	8	18	0.24
3	10	24	0.28

表 3 钻削正交试验安排及结果

试验编号	钻头直径 $d(\text{mm})$	钻削速度 $v_c(\text{m/min})$	进给量 $f(\text{mm/r})$	钻削温度 $T(^{\circ}\text{C})$
1	6	12	0.20	68.29
2	6	18	0.24	96.84
3	6	24	0.28	124.24
4	8	12	0.24	70.54
5	8	18	0.28	105.27
6	8	24	0.20	95.90
7	10	12	0.28	102.04
8	10	18	0.20	82.24
9	10	24	0.24	113.08

5 仿真分析

5.1 钻削温度场分析

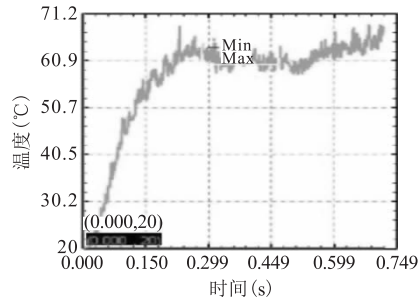
在金属切削过程中,热量主要来源于切削层金属的弹、塑性变形和前刀面与切屑、后刀面与工件之间的摩擦作用,产生的热量由工件、切屑和刀具及周围的介质传出,对于钻削加工,工件的传热量最多,切屑次之。而工件材料的热导率也是影响热传导的主要因素^[10]。钛合金材料由于其导热率低,导致切削区域温度高,刀具磨损严重。

仿真的钻削温度曲线如图 3 所示。随着钻头不断深入工件,钻头的钻削温度先在短时间内急剧上升,随后上升速度变缓,渐渐趋于平稳,但总体状态依旧呈上升趋势。由图可知,钻削温度趋于平稳后,其曲线呈现上下波动的形式,这可能是由于网格即时重新划分时造成仿真过程的不连续而引起。

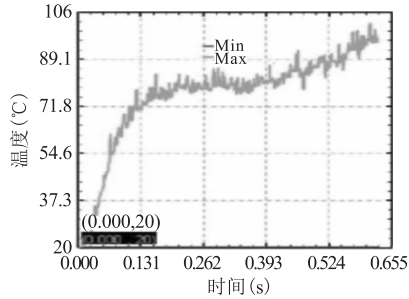
以 $d=6\text{mm}$ 、 $v_c=12\text{m/min}$ 、 $f=0.20\text{mm/r}$ 时的钻削参数为例,分析钛合金钻削温度场的分布情况(见图 4 和图 5)。

根据钻削温度场云图可知,由于钻尖与工件摩擦严重且接触面积最小,比热容小且热量无法及时散出,所以钻尖处的温度最高,而相对于钻尖,麻花钻的后刀面摩擦最大,故产热量也更多,但由于其接触面积大,故比热容大,因此温度相对较低。此外,麻花钻钻头横刃处的温度也较高,这是由于在钻削过程中,钻头横刃最先与工件接触,并通过挤压产生

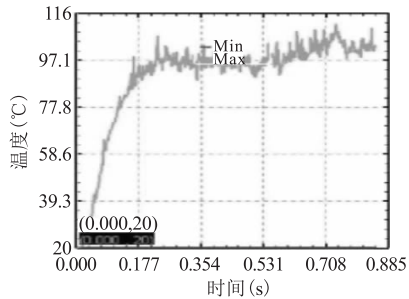
轴向力切削工件,工件因挤压变形生成切屑,随后与工件分离。



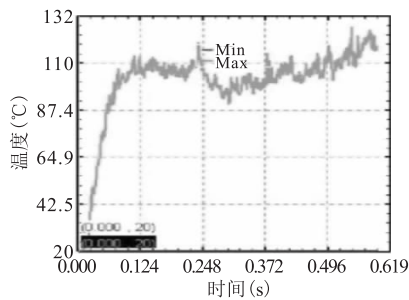
(a) $d = 6\text{mm}, v_c = 12\text{m/min}, f = 0.20\text{mm/r}$



(b) $d = 6\text{mm}, v_c = 18\text{m/min}, f = 0.24\text{mm/r}$



(c) $d = 10\text{mm}, v_c = 12\text{m/min}, f = 0.28\text{mm/r}$



(d) $d = 10\text{mm}, v_c = 24\text{m/min}, f = 0.24\text{mm/r}$

图3 标准麻花钻在不同钻削参数下的钻削温度

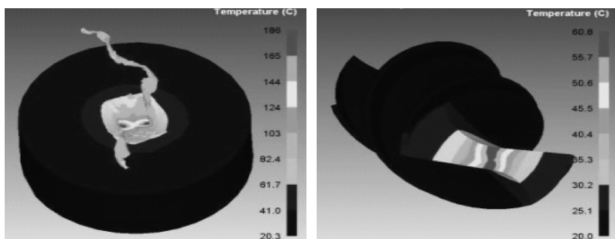


图4 钛合金工件钻削温度分布

图5 标准麻花钻钻削温度分布

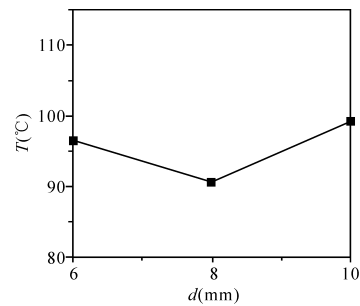
5.2 极差分析

根据正交试验的仿真结果,对钻削温度仿真数据进一步进行极差分析,其结果列入极差分析表,并通过绘制折线图,更直观表现各钻削参数对钻削温度的影响程度(见表4和图6)。

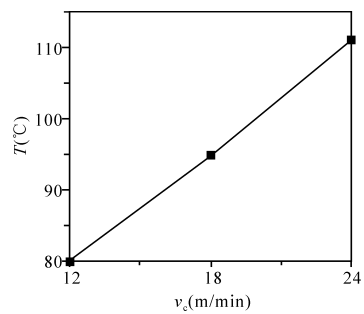
表4 钻削温度极差分析表

因素	钻头直径 d (mm)	切削速度 v_c (m/min)	进给量 f (mm/r)
K_1	289.37	240.87	246.43
K_2	271.71	284.35	280.46
K_3	297.36	333.22	331.55
k_1	96.46	80.29	82.14
k_2	90.57	94.78	93.49
k_3	99.12	111.07	110.52
极差 R	8.55	30.78	28.38
最优组合	$d = 8\text{mm}, v_c = 12\text{m/min}, f = 0.20\text{mm/r}$		

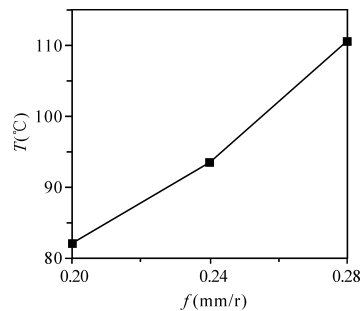
由图6分析可知,钛合金钻削加工过程中的钻削温度随钻削速度 v_c 和进给量 f 的增加而增加,随着钻头直径 d 的增加,钻削温度先是减小后再增加。其中,钻削速度 v_c 对于钻削温度的影响最为明显,进给量 f 次之,钻头直径 d 影响最小。



(a) 钻头直径



(b) 钻削速度



(c) 进给量

图6 钻头直径、钻削速度和进给量对钻削温度的影响趋势

在钻削加工过程中, 钻孔深度和进给速度不变的情况下, 钻削速度越高, 进给量越小, 故增大了钻头与钻孔已加工表面间的摩擦距离, 产热量增多, 因此, 钻削速度越高, 钻削温度越高; 在保持钻削速度不变的同时, 进给量越大, 则摩擦的距离越短, 故产热量越少, 但由于金属材料切削变形的增大, 总产热量增多, 所以, 进给量越大, 钻削温度越高; 钻头直径对钻削温度的影响最小, 是由于在钻头直径增大的同时钻头的摩擦面积也增大, 产热量增多的同时比热容也在增大, 所以钻头直径对钻削温度的影响最小。

根据正交试验设计的特性, 钻头直径 d 分别为 6mm、8mm、10mm 的同组试验, 当试验条件相同时, 可进行直接比较。若钻头直径 d 对钻削温度的变化无影响时, 则相对的 k_1 、 k_2 、 k_3 应相等, 反之则有。

由表 4 可知, 钻头直径 d 对钻削温度有影响。所以根据 k_1 、 k_2 、 k_3 的大小可以判断钻头直径 d 分别为 6mm、8mm、10mm 时对钻削温度的影响情况。在钻削过程中, 麻花钻的钻头温度越低影响越小, 越有利于提高刀具的耐用度, 减缓刀具磨损, 延长使用寿命。由于 $k_3 > k_1 > k_2$, 故可断定 $d = 8\text{mm}$ 时是关于钻头直径 d 因素的优水平。同理, 计算并确定 $v_c = 12\text{m/min}$ 、 $f = 0.20\text{mm/r}$ 分别是关于钻削速度 v_c 、进给量 f 因素的优水平。故可获得影响钻削温度变化的最优钻削参数组合为 $d = 8\text{mm}$ 、 $v_c = 12\text{m/min}$ 、 $f = 0.20\text{mm/r}$ 。

6 结语

(1) 利用 DEFORM-3D 软件对钛合金材料钻削加工进行的有限元仿真试验, 相比传统试验方式更加便捷和高效。随着计算机及有限元分析软件的不发展与完善, 其仿真数据的精度将进一步提高。

(2) 通过分析得到了麻花钻钻削参数对钛合金钻削温度的影响规律。采用正交试验法, 选取代表性试验点, 并结合极差分析, 以图表形式直观地表现了各因素对钻削温度的影响程度, 即钻削速度 v_c 对于钻头钻削温度的影响最为明显, 进给量 f 次之, 钻头直径 d 影响最小, 并获得最优钻削参数组合为 $d = 8\text{mm}$ 、 $v_c = 12\text{m/min}$ 、 $f = 0.20\text{mm/r}$ 。

(3) 对钛合金钻削过程进行有限元分析, 为后

续麻花钻钻削钛合金材料的加工过程中提高钻孔的质量及钻削参数的合理选择和优化提供了一定的参考依据。

参考文献

- [1] Agapiou J S, Devries M F. On the determination of thermal phenomena during drilling—part II, comparison of experimental and analytical twist drill temperature distributions [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1990, 30(2): 217 - 226.
- [2] 鲍永杰, 高航, 马海龙, 等. 单向 C/E 复合材料磨削制孔温度场模型的研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 169 - 176.
- [3] 赵建设. 碳纤维复合材料钻削温度测试与分析 [J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 49 - 52.
- [4] 李克强. 钛合金车削用 PCD 刀具优选及切削参数优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [5] 胡艳娟, 王占礼, 李静, 等. 基于有限元法的切削加工温度场数值分析 [J]. 制造业自动化, 2013(24): 46 - 49.
- [6] 鲍永杰, 高航, 梁延德, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料钻削温度场建模与试验 [J]. 兵工学报, 2013, 34(7): 846 - 852.
- [7] 朱超, 白海清. 采用 DEFORM-3D 对钻削过程的有限元仿真 [J]. 煤矿机械, 2015, 36(6): 286 - 289.
- [8] Usui E, Shirakashi T. Mechanics of machining—from description to predictive theory [J]. On the Art of Cutting Metals - 75 Years Later, 1982, 7: 13 - 55.
- [9] 商解波, 武美萍, 杭勇, 等. 基于 DEFORM-3D 的共轨喷油器体深孔钻削温度场仿真 [J]. 机械设计与研究, 2016(6): 87 - 89.
- [10] 赵炳桢, 商宏谟, 辛节之. 现代刀具设计与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
第一作者: 沈钰, 硕士研究生, 陕西理工大学机械工程学院, 723001 陕西省汉中市
First Author: Shen Yu, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China
通信作者: 白海清, 教授, 陕西理工大学机械工程学院, 723001 陕西省汉中市
Corresponding Author: Bai Haiqing, Professor, College of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China