

# 铣削 GCr15 三维热力耦合加工模型仿真

宋陶然, 殷鸣, 王玲, 殷国富

四川大学

**摘要:** 以轴承钢 GCr15 为对象, 基于 ABAQUS 有限元分析软件建立了铣削加工的三维热力耦合模型。模型采用 D20 圆角立铣刀, 仿真研究了铣削加工中铣削速度和刀具每齿进给量对铣削力的影响。并以热-力共同作用下的材料相变温度作为依据, 阐释了加工中工件表面形成白层的过程, 分析了加工参数对白层厚度的影响。对于研究铣削加工过程以及优化加工参数有重要意义。结果表明: 随着铣削速度与每齿进给量的增大, 铣削力呈上升趋势, 工件表面白层厚度逐渐增加, 但增加的速率随着铣削速度与每齿进给量的增大而逐渐降低。

**关键词:** 铣削; ABAQUS; 有限元; 白层; 热力耦合

**中图分类号:** TG714; TH161

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.11.009

## Simulation on Three-dimensional Thermal-mechanical Coupling Model of Milling GCr15 Steel

Song Taoran, Yin Ming, Wang Ling, Yin Guofu

**Abstract:** A three-dimensional thermal-mechanical coupling model of milling bearing steel Gcr15 is built based on ABAQUS. With the D20 rounded end milling cutter which usually used in milling, the influence of milling speed and feed engagement on milling force is researched. Consider the impact of stress on phase transition temperature, the process of white layer formation in milling is explained and the influence of milling speed and feed engagement on white layer thickness is researched. It is meaningful for the study and the parameter optimization of milling process. The results as following, with the increase of milling speed and feed engagement, both milling force and white layer thickness are increased. But the rate of growth of white layer thickness is decreased.

**Keywords:** milling; ABAQUS; finite element; white layer; thermal - mechanical coupling

## 1 引言

轴承钢因其具有高硬度、强耐磨性、高延展性与抗疲劳性能以及较高的弹性极限等特点, 被广泛应用于制造业中。在加工过程中, 往往会在工件表面出现一种在显微镜下呈白色的组织, 即白层。白层是一种厚度仅几微米的高硬度组织, 是引起剥落失效和疲劳裂纹的主要因素, 白层厚度被广泛认为是工件表面完整性的重要评判标准之一<sup>[1]</sup>。GCr15 作为世界上生产量最大的轴承钢, 是典型的难加工材料之一, 对其加工过程以及加工后状态的研究具有重要的理论意义和现实价值。国内外学者对此进行了大量研究。陆名彰等<sup>[2]</sup>研究归纳了高速铣削在加工轴承钢等耐磨材料中的应用情况; 神会存等<sup>[3]</sup>研究了铣削加工 GCr15 时铣削力与铣削参数的联系; G. Poulachon 等<sup>[4]</sup>提出加工过程中工件的高温是工件产生白层的主要原因; 徐进<sup>[5]</sup>指出切削导致

的切削热是白层形成的主要因素; Umbrello D. 等<sup>[6]</sup>对白层进行了显微观察和化学分析, 指出白层是由热效应引起的材料相变; Anand Ramesh 等<sup>[7]</sup>利用克拉伯龙方程将切削力与相变温度联系, 通过 ABAQUS 软件建立二维模型模拟白层厚度。

现对加工过程的研究多以二维模型为主, 无法准确模拟现实加工过程。本文通过建立三维热-力耦合铣削模型, 综合考虑应力和温度的影响, 针对实际铣削加工 GCr15 材料的加工参数, 基于白层相变机制, 探究不同加工参数对铣削加工 GCr15 铣削力以及工件白层厚度的影响, 并进行分析和预测。

## 2 铣削加工有限元仿真模型

### 2.1 材料参数

铣削加工过程中, 伴随着材料的大尺度变形和明显的热效应, 使用 Johnson-Cook 模型能很好地反映出应变、温度等参数的综合影响。其模型具体表达式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为等效塑性应力;  $\varepsilon$  为等效塑性应变;  $\dot{\varepsilon}$  为等

效塑性应变率;  $\dot{\epsilon}_0$  为参考塑性应变率;  $A$  为材料的屈服强度;  $B$  为应变硬化系数;  $C$  为应变率系数;  $T$  为工件的瞬时温度;  $T_0$  为参考温度;  $T_m$  为材料熔点;  $m$  为热软化指数;  $n$  为应变强化指数。

切屑分离准则采用 Johnson-Cook 剪切失效模型, 主要通过比较单元积分点的等效塑性变形值是否达到预设值进行判断。当材料失效参数大于 1 时, 材料单元失效, 并与工件进行分离, 具体定义为

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad (2)$$

式中,  $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$  为等效塑性应变增量;  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  为失效应变。

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})][1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0})](1 + d_5 \theta) \quad (3)$$

式中,  $d_1 \sim d_5$  为失效参数;  $p, q$  分别为压应力和 Mises 应力;  $\dot{\epsilon}^{pl}$  为等效塑性应变率;  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率。

GCr15 的 J-C 模型参数见表 1。

表 1 GCr15 的 J-C 模型参数

$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$c$	$m$	$n$	$T_0$
2482.4	1498.5	0.027	0.66	0.19	25
$T_m$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
1572	0.036	2.34	-1.484	0.0035	0.411

### 2.2 有限元模型

根据实际加工方案, 采用由 PCBN 材料制成的 D20 圆角立铣刀 (见图 1), 考虑到铣刀硬度远大于工件, 且铣削过程中铣刀变形远小于工件, 因此在有限元仿真模型中将铣刀设置为刚体。由于本次仿真综合考虑应力和温度的影响, 采用计算量较大、计算时间较长的温度一位移耦合网格对工件及刀具进行网格划分, 为了节约计算时间, 在有限元模型中仅加入铣刀刀头部分, 刀具与工件的铣削有限元模型如图 2 所示。



图 1 D20 圆角立铣刀

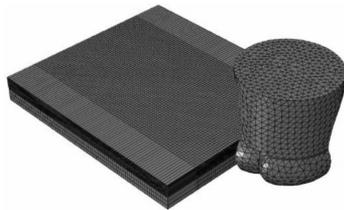


图 2 铣削有限元模型

### 3 铣削力仿真

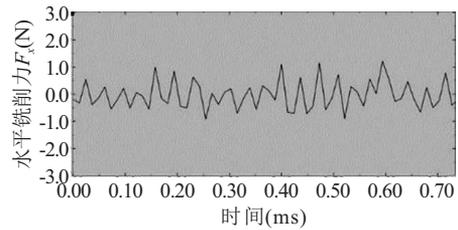
根据实际铣削加工 GCr15 材料的切削参数, 在铣削深度  $a_p$  一定的条件下, 分别研究铣削速度  $v$  和每齿进给量  $f_z$  对铣削力的影响。选取的铣削加工

参数见表 2。

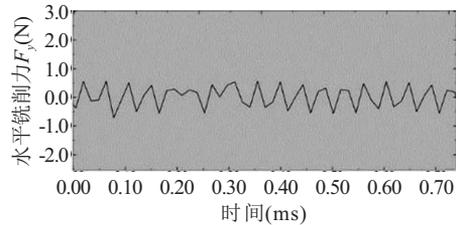
表 2 铣削仿真参数

铣削速度 $v$ (m/min)	每齿进给量 $f_z$ (mm)	铣削深度 $a_p$ (mm)	铣削速度 $v$ (m/min)	每齿进给量 $f_z$ (mm)	铣削深度 $a_p$ (mm)
100	0.3	0.5	100	0.2	0.5
150	0.3		100	0.25	
200	0.3		100	0.3	
250	0.3		100	0.35	
300	0.3		100	0.4	

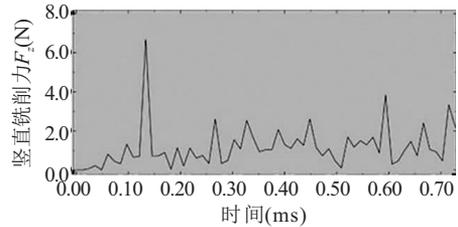
以铣削速度  $v = 100\text{m/min}$ 、每齿进给量  $f_z = 0.25\text{mm}$  该组仿真为例, 将铣削力分解为水平铣削力  $F_x$  (铣刀进给方向)、 $F_y$  (垂直于进给方向) 与竖直铣削力  $F_z$ 。该组仿真中三种铣削力随时间变化的曲线如图 3 所示。



(a) 水平铣削力  $F_x$



(b) 水平铣削力  $F_y$



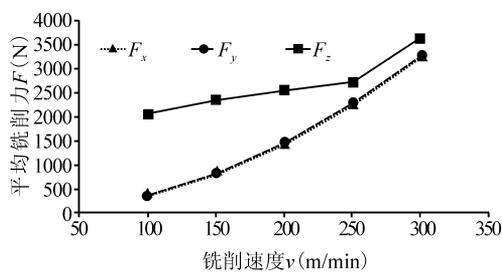
(c) 竖直铣削力  $F_z$

图 3 铣削力随时间变化曲线

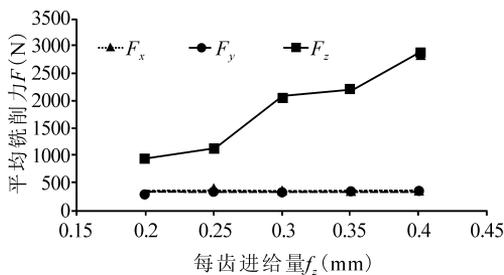
图 3a 和图 3b 反映出在铣削过程中, 水平铣削力随着铣削的进行不停地出现周期性的正负变化。其原因是在使用 D20 圆角立铣刀进行铣削的过程中, 两齿铣刀使得同一时间点只有一条铣削刃在进行铣削。在该铣削刃运动的前半段, 即切入工件时, 铣削刃在水平面上的运动相对于进给方向的方向一致; 而在该铣削刃运动的后半段, 即切出工件时, 铣削刃在水平面上的运动相对于进给方向的方向相反。因此, 铣削力在水平面上的两个分量  $F_x$  和  $F_y$

便出现了这种周期性的正负变化。经过对比,水平铣削力  $F_x$  和  $F_y$  的变化频率与刀具转速的两倍相等,由于 D20 圆角立铣刀是两齿刀具,因此该结果与设想一致。

对于铣削力  $F_x, F_y, F_z$  按一定时间间隔输出 2000 个时间点的铣削力值。因水平铣削力在周期性的正负变化,故对各点水平铣削力的值均进行求绝对值,再把各点的  $F_x, F_y, F_z$  求和取平均值,得到平均水平铣削力  $\overline{F_x}, \overline{F_y}$  与平均竖直铣削力  $\overline{F_z}$ 。对各组仿真均进行操作,得到平均铣削力与铣削参数的关系见图 4。



(a) 平均铣削力随铣削速度变化曲线



(b) 平均铣削力随每齿进给量变化曲线

图 4 平均铣削力随铣削参数变化曲线

从图 4 可以看出,当铣削速度变化时,水平铣削力与竖直铣削力同时随着铣削速度的增大而增大,且水平铣削力相比竖直铣削力对铣削速度的增加更加敏感。当铣削速度固定而增大每齿进给量时,竖直切削力仍然随着每齿进给量的增大而增大,而此时水平铣削力几乎不变。可以看出,水平铣削力对每齿进给量的变化极不敏感。此外,在任何加工条件下,水平铣削力沿进给方向和垂直于进给方向的两个分量  $F_x$  与  $F_y$  的平均值几乎相等。

## 4 白层厚度仿真

### 4.1 白层形成原理

多位学者<sup>[6,8]</sup>研究表明,白层的形成机理是在加工过程的高温高压中,钢组织在应力和热效应的综合作用下产生奥氏体相变,在迅速冷却过程中奥氏体冷却产生马氏体相变,由马氏体、较少的细小铁

素体与残奥体组成白层。即加工过程中白层的形成包含了材料升温产生奥氏体以及奥氏体迅速冷却形成马氏体两个过程。因此,材料在加工过程中如果达到奥氏体转变温度  $A_{c1}$  并在冷却过程中冷却速率达到马氏体冷却速率,即会在该处产生白层组织。

### 4.2 铣削过程形成白层的分析

在铣削加工中,材料升温产生奥氏体相变,而在该过程中,材料受到的压力以及其导致材料自身的应力与自由能,都会影响改变材料发生奥氏体相变的转变温度  $A_{c1}$ 。因此,需先计算出在应力影响下材料的实际奥氏体转变温度变化值  $\Delta A_{c1}$ 。文献[9]给出了奥氏体转变温度在不同自由能差下对应的值,因此可通过材料在加工过程中产生的应力计算出材料自由能差  $\Delta F_{tr}^T$ ,对照文献[9]得到材料奥氏体转变温度变化值  $\Delta A_{c1}$ 。

以铣削速度  $v = 100\text{m/min}$ 、每齿进给量  $f_z = 0.3\text{mm}$  该组仿真为例,由仿真模拟结果得到工件表面平均等效应力(见图 5)。

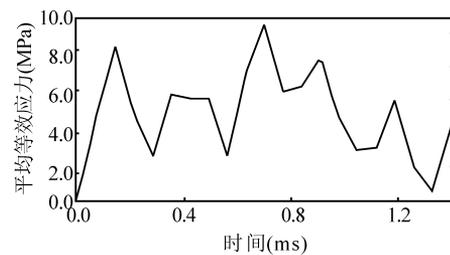


图 5 工件表面等效应力

由于文献[9]中给出的数据都是以标准大气压 (atm) 为压力单位计算,因此,首先将平均等效应力  $P$  通过  $1\text{atm} = 101325\text{Pa}$  将单位转换为 atm。材料的自由能差  $\Delta F_{tr}^T$  与应力  $P$  的关系为

$$\Delta F_{tr}^T = \int \Delta V_{tr} dp \quad (4)$$

式中,  $\Delta V_{tr}$  是奥氏体相变中材料的体积变化率,对于铁元素,  $\Delta V_{tr} = 0.06\text{cm}^3/\text{mol}$ 。

因此,由式(4)可得

$$\Delta F_{tr}^T = 0.06P \quad (5)$$

将仿真得到的工件平均等效应力值代入式(4)和式(5)中,即得到该状态下工件材料的自由能差值,通过  $1\text{cal/mol} = 41.3\text{cm}^3\text{atm/mol}$  将自由能差单位换算为 cal/mol。将该值与文献[9]中数据进行对应,即得到该状态下工件材料奥氏体转变温度变化值  $\Delta A_{c1}$ 。材料 GCr15 的名义奥氏体转变温度  $A_{c1}$  为  $745^\circ\text{C}$ ,故在该状态下工件材料的实际奥氏体转变温度  $A'_{c1}$  为

$$A'_{c1} = A_{c1} + \Delta A_{c1} \quad (6)$$

本组仿真影响奥氏体转变温度的数据与实际奥氏体转变温度  $A'_{c1}$  见表 3 ( $v = 100\text{m/min}$ ,  $f_z = 0.3\text{mm}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$ )。

表 3 实际奥氏体转变温度

平均等效应力 $P$ (MPa)	平均等效应力 $P$ (atm)	自由能差 $\Delta F_{tr}^T$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{atm/mol}$ )
5290	52208.24	3132.49
自由能差 $\Delta F_{tr}^T$ (cal/mol)	奥氏体转变温度变化值 $\Delta A_{c1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	实际奥氏体转变温度 $A'_{c1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
75.85	-197	548

从仿真中工件已加工表面选取一个节点,并在该点沿切削深度方向每隔  $1\mu\text{m}$  选取一个点,依次选取 6 个节点,得到这些节点在仿真过程中温度随时间变化的关系(见图 6)。

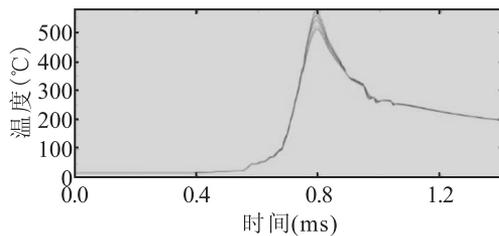


图 6 不同节点温度随时间变化曲线

段春争等<sup>[10]</sup>研究表明,切削速率越高,马氏体临界冷却速率就越快。当速率达到  $110\text{m/min}$  时,马氏体临界冷却速率为  $1.5 \times 10^5 \text{K/s}$ 。由图 6 可知,工件材料的冷却速率远大于奥氏体转变为马氏体所需速率,因此,只要温度达到了奥氏体转变温度从而转变为奥氏体的部分工件材料,其在冷却过程中均能转变为马氏体形成白层,故加工仿真过程中温度超过奥氏体转变温度的工件表层组织的厚度即为工件最终产生的白层的厚度。该组仿真中白层厚度见图 7。

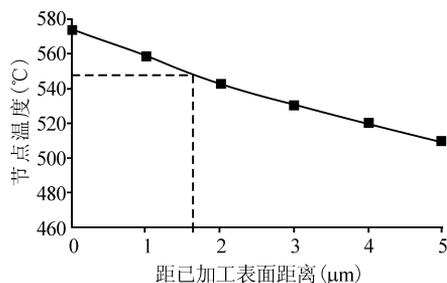
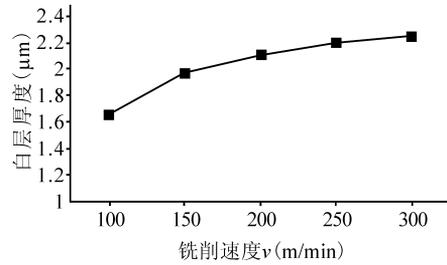


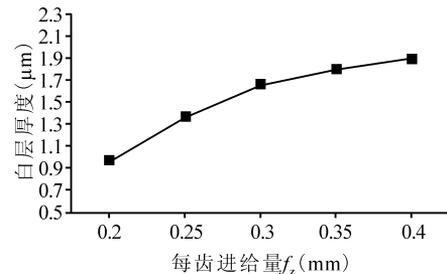
图 7 白层厚度

对各组仿真均进行白层厚度分析,得到白层厚度与铣削参数的关系见图 8。从图中可以看出,白层厚度随着铣削速度和每齿进给量的增加而增大,而且随着铣削速度和每齿进给量的增加,白层厚度增大的速率在逐渐降低。因此推测白层厚度并不会随着铣削速度和每齿进给量的增加而无限增大,最

终会趋于一个稳定值。该结论与文献[11]的试验结果相符。



(a) 白层厚度随铣削速度变化曲线



(b) 白层厚度随每齿进给量变化曲线

图 8 白层厚度随铣削参数变化曲线

## 5 结语

基于铣削加工 GCr15 材料的实际情况,通过建立热-力耦合三维仿真模型,对铣削加工过程进行研究分析。分析了铣削参数对铣削力的影响关系,并综合应力与温度的影响,考虑材料自由能和相变温度的联系,探讨了铣削加工参数对材料表面完整性的一个重要影响因素即白层厚度,预测了其影响的变化趋势,为铣削加工过程的研究以及对加工参数的优化提供了参考。

## 参考文献

- [1] 张方圆,段春争,王敏杰. 已加工表面变质层的发展研究[J]. 机械设计与制造,2014(10):265-268.
- [2] 陆名彰,曾湘黔,胡忠举,等. 超高速铣削及其在高硬度钢加工中的应用[J]. 机械设计与制造,2006(10):84-86.
- [3] 神会存,宗万栓,李启泉,等. PCBN 刀具和硬质合金刀具铣削 GCr15 的对比试验研究[J]. 工具技术,2008(10):67-69.
- [4] G Poulachon, A Albert, M Schluraff, et al. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2005,45(2):211-218.
- [5] 徐进. 高速硬态切削工件表层显微硬度与白层研究[J]. 机械设计与制造,2009(2):192-194.

# 球头铣刀铣削轮廓曲面的有效切削速度分析

杨炬, 胡小秋, 程寓, 方静弦

南京理工大学; 工信部高端装备制造技术协同创新中心

**摘要:** 对球头铣刀加工轮廓曲面的有效速度进行研究, 考虑到球头铣刀倾角变化和工件曲率半径变化, 建立了球头铣刀切削凹凸轮廓曲面的干涉模型。采用相对加工倾角的方式解决了高角度铣削的干涉问题, 并根据实际有效切削直径得到凹凸轮廓曲面的有效切削速度。研究表明: 采用小切入角度和大切出角度切削加工曲面时, 有效切削速度较小; 铣削加工凹曲面时受切深影响较大, 凸曲面主要受前后刀轨影响较大。

**关键词:** 球头铣刀; 轮廓曲面; 曲率半径; 刀具干涉; 有效切削速度

中图分类号: TG714; TH162.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.11.010

## Study on Effective Cutting Speed of Milling Contour Surfaces of Ball-end Milling Cutter

Yang Ju, Hu Xiaoqiu, Cheng Yu, Fang Jingxian

**Abstract:** The effective cutting speed of machining contour surfaces is studied with ball-end milling cutter in this paper. Considering the variation of the inclination angle of the ball-end milling cutter and the radius of the curvature of work-piece, the interference model of concave and convex contour surface milling by ball-end milling cutter is established. The interference problem of high-angle milling is solved by means of the relative machining inclination angle, and according to the actual effective cutting diameter, the effective cutting speed of machining the concave-convex contour surface is obtained. The research results show that the effective cutting speed is small when milling the curved surface with a small plunging angle and a large cutting-out angle, and the concave surface is more affected by the depth of cut during the milling process, and the convex curved surface is mainly affected by the front and rear tool rails.

**Keywords:** ball-end milling cutter; contour surface; radius of curvature; tool interference; effective cutting speed

## 1 引言

凹凸轮廓曲面由于弧形的美观性和良好的功能特性, 广泛应用于航天和汽车行业<sup>[1]</sup>, 如航空发动机的叶片存在大量的凹凸曲面。考虑到其几何特殊

性, 在不同类型凹凸曲面情况下, 曲面曲率和加工倾角会对切削刃的有效速度产生影响, 而有效切削速度也会影响表面完整性、切削力和切削温度等<sup>[2]</sup>。

球头铣刀用于仿形和特殊用途铣削加工时, 复杂曲面具有较好的自适应性, 尤其适用于加工航空发动机叶片。为此, 越来越多的学者对球头铣刀斜面铣削进行研究, 建立了一系列关于表面完整

收稿日期: 2019年5月

- [6] Umbrello D, Rotella G. Experimental analysis of mechanisms related to white layer formation during hard turning of AISI 52100 bearing steel[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 28(2): 205-212.
- [7] Anand Ramesh, Shreyes N Melkote. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(3-4): 402-414.
- [8] 陈涛, 刘献礼, 李素燕, 等. 高速硬切削加工表面白层形成机理研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 182-188.
- [9] Darken L S, Gurry R W. *Physical chemistry of metals*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1953: 396-397.
- [10] 段春争, 张方圆, 寇文能, 等. 高速硬切削表面白层马氏

体相变研究[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*: 1-9 [2019-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.t.20181114.1410.017.html>.

- [11] 张凌飞. 硬态干式切削材料被加工表面白层的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.

第一作者: 宋陶然, 硕士研究生, 四川大学机械工程学院, 610041 成都市

First Author: Song Taoran, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China

通信作者: 殷鸣, 博士, 副教授, 四川大学机械工程学院, 610041 成都市

Corresponding Author: Yin Ming, Doctor, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China