

# 磨削加工件表面残余应力测试及其线性回归预测分析

雷瑛<sup>1</sup>, 李达<sup>2</sup>, 罗森怡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安交通工程学院机械工程学院; <sup>2</sup>西南交通大学材料科学与工程学院

**摘要:** 通过磨削加工试验,以 022Cr 钢为材料测得工件表面残余应力,并分析了工件表面残余应力的极差和方差。利用线性回归的方法建立了磨削加工表面的残余应力预测模型,分析了磨削阶段的机械应力变化特征。研究表明:工件表面残余应力主要受磨削深度的影响,其次是工件进给速度,砂轮转速的影响程度最低。根据 F 检验法可以发现,所有磨削参数都对工件表面残余应力产生了显著影响。通过磨削参数对残余应力的影响分析得到最优的参数范围:磨削深度 15 $\mu\text{m}$  ~ 20 $\mu\text{m}$ ,砂轮转速 20m/s。磨削表面最大机械应力与残余应力变化量随磨削参数增加形成了单调变化特征;提高工件进给速度后形成了更高磨削力,产生了更高的最大机械应力。

**关键词:** 磨削加工;残余应力;测试;线性回归;预测分析

**中图分类号:** TG580.6;TH123.4;TH16 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2021.10.004

## Surface Residual Stress Measurement and Linear Regression Prediction Analysis of Grinding Workpiece

Lei Ying, Li Da, Luo Senyi

**Abstract:** The grinding test is set up, the residual stress is obtained by testing 022Cr steel, and the range and variance of residual stress on the workpiece surface are analyzed. The residual stress prediction model of the grinding surface is established by linear regression method, and the variation characteristics of mechanical stress are analyzed. The results show that the surface residual stress is mainly affected by the grinding depth, followed by the feed speed of the workpiece, and the influence of grinding wheel speed is the lowest. According to the F-test, all grinding parameters have a significant effect on the surface stress of the workpiece. Through the analysis of the influence of grinding parameters on the residual stress, the optimal parameter range is obtained that the grinding depth is 15 ~ 20 $\mu\text{m}$ , and the grinding wheel speed is 20m/s. The maximum mechanical stress and residual stress change monotonously with the increase of grinding parameters. With the increasing of the workpiece feed speed, higher grinding force is formed and higher maximum mechanical stress is generated.

**Keywords:** grinding; residual stress; test; linear regression; forecast analysis

## 1 引言

零部件加工时会在内部组织中形成残余应力,从而降低力学强度并缩短使用寿命<sup>[1]</sup>。进行磨削加工时,残余应力受到多种复杂因素的影响而不断发生变化,改变磨削工艺条件后,工件表面与内部会形成不同的机械、相变与热应力效果,获得不同的残余应力,因此需根据各个磨削阶段所形成残余应力的差异性展开深入分析。

磨削过程中,工件中的残余应力受到磨削力以及磨削热的综合影响,需要对各磨削阶段中的残余应力进行预测<sup>[2,3]</sup>。同时为满足提升零部件加工精度的需求,还应深入研究零件磨削处理过程中残余应力的形成原因,以延长设备使用期限并提升运行

稳定性。根据残余应力构建预测模型,利用调整磨削参数的方式实现残余应力的调节,有助于更好地提升产品综合性能<sup>[4,5]</sup>。

很多学者已经做了相关方面的研究。张银霞等<sup>[6]</sup>选择陶瓷结合剂 CBN 砂轮对工件实施了高速磨削测试,利用正交方法分析了线速度、径向进给速度引起的残余应力变化。王栋等<sup>[7]</sup>研究了高速精密磨削的表面残余应力分布,发现磨削垂直方向容易形成较大的应力值。袁巨龙等<sup>[8]</sup>对磨粒切削过程形成的残余应力构建了仿真模型,按照单因素法进行了验证,经过对比发现,理论与实际测试结果偏差小于 10%。

本文分析工件在磨削过程中形成的表面残余应力,同时以数理统计的方式研究了工件表面残余应力与磨削参数的关系,采用线性回归方式构建相应的残余应力预测模型,并重点分析了磨削阶段的机械应力变化特征。

## 2 磨削试验

### 2.1 试验方案

选择 022Cr 作为磨削测试材料,对其进行元素组成与力学特性测试,结果分别见表 1 与表 2。

表 1 022Cr 钢化学成分 (wt%)

材料	C	Si	Mn	Cr	P	S
022Cr	0.35 ~ 0.41	0.15 ~ 0.35	0.46 ~ 0.72	0.75 ~ 1.13	≤0.025	≤0.018

表 2 022Cr 钢的力学性能参数

抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧性 (kJ/m <sup>2</sup> )
812 ~ 936	568 ~ 812	15.6 ~ 22.4	58.5 ~ 69.2	886 ~ 1548

以 MV-40 型立式加工设备作为磨削系统,主轴与三轴驱动电机的功率分别为 10kW 与 1.6kW。采用 CBN 砂轮对工件进行干磨削测试,按照逆磨方式进行试验,控制磨削宽度为 5mm。磨削加工现场见图 1。利用 Kistler 9119AA2 型测力仪实时监测磨削力变化。通过 TD-3600 型 X 射线衍射仪表征工件表面的残余应力。

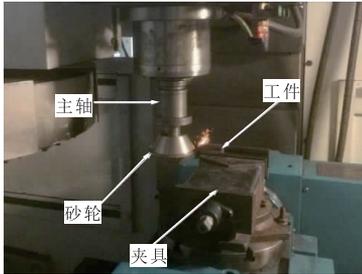


图 1 磨削加工现场

### 2.2 残余应力测量原理

采用 X 射线衍射方法进行组织结构表征时,需根据布拉格方程进行计算,最常用的是  $\sin^2\psi$  分析方法<sup>[9]</sup>。图 2 给出了应力分量  $\sigma_{\psi\varphi}$ 、 $\sigma_{\varphi}$  与主应力的关系。

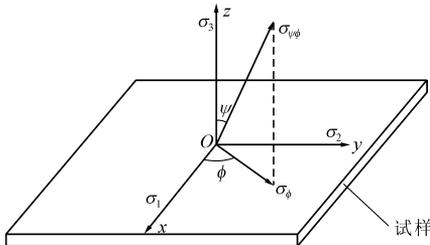


图 2 应力分量  $\sigma_{\psi\varphi}$ 、 $\sigma_{\varphi}$  与主应力的关系

根据图 1 要求,将空间任一方向正应力表示成

$$\sigma_{\psi\varphi} = \alpha_1^2 \sigma_1 + \alpha_2^2 \sigma_2 + \alpha_3^2 \sigma_3$$

式中,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  为主应力;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  为  $\sigma, \psi, \varphi$  对应的方向余弦;  $\varphi$  为晶面法线旋转角度;  $\psi$  为衍射法线倾角。

由此推导可得

$$\begin{cases} \alpha_1 = \sin\psi \cos\varphi \\ \alpha_2 = \sin\psi \sin\varphi \\ \alpha_3 = \cos\psi = \sqrt{1 - \sin^2\psi} \end{cases}$$

同样计算出个方向上的正应变为

$$\varepsilon_{\psi\varphi} = \alpha_1^2 \varepsilon_1 + \alpha_2^2 \varepsilon_2 + \alpha_3^2 \varepsilon_3$$

以下是主应力与主应变对应的广义胡克定律,即

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{cases}$$

式中,  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比。

本次测试过程中,  $\sigma_3 = 0$ , 因此只测定表面应力。利用布拉格方程计算得到应变和衍射角之间的关系为

$$\varepsilon_{\psi\varphi} = \frac{\Delta d}{d} = \frac{d_{\psi\varphi} - d_0}{d_0} = -\cot\theta_0 (\theta_{\psi\varphi} - \theta_0)$$

式中,  $d_0, \theta_0$  分别为在晶面未受到应力作用下的面间距与掠射角;  $d_{\psi\varphi}, \theta_{\psi\varphi}$  分别为在应力作用下沿  $(\psi, \varphi)$  方向形成的晶面距与掠射角;  $\varepsilon_{\psi\varphi}$  为在  $(\psi, \varphi)$  方向产生的应变。

根据上式可得

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot\theta_0 \frac{\pi}{180^\circ} \times \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)}$$

令

$$K_1 = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot\theta_0 \frac{\pi}{180^\circ}, M = \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)}$$

则

$$\sigma_{\varphi} = K_1 M$$

## 3 残余应力分析

### 3.1 残余应力极差分析

表 3 是对工件磨削过程中形成的表面残余应力极差进行测试的结果。在设定的磨削工艺条件下,工件表面残余应力主要受到磨削深度的影响,其次是工件进给速度,影响程度最低的是砂轮转速。

表 3 工件表面残余应力极差分析结果

极差分析项	磨削深度 $a_p$	砂轮转速 $v_w$	进给速度 $v_s$
$K_{j1}$	19.03	-24.18	-3.18
$K_{j2}$	-16.82	-17.32	-16.76
$K_{j3}$	-49.72	-11.23	-30.15
$k_{j1}$	5.96	-7.42	-0.46
$k_{j2}$	-3.88	-5.72	-4.76
$k_{j3}$	-18.06	-3.16	-10.22
极差 $R$	22.15	4.71	9.48

### 3.2 残余应力方差分析

为提升试验结果可靠性,需进行重复取样测试,计算测试结果总和  $T$  时需包括所有数据,由此得到总偏差平方和  $S_T$  为

$$S_T = Q_T - CT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij})^2 - \frac{T^2}{kn}$$

式中,  $k$  为重复测试次数。

表 4 为对工件表面残余应力进行方差分析的结果。可以发现,磨削深度、进给速度与砂轮转速都满足  $FH > F_{0.01}$ ,根据 F 检验法<sup>[10]</sup>可知,所有磨削参数都对工件表面残余应力产生了显著影响。

表 4 工件表面残余应力方差分析结果

误差来源	偏差平方和	自由度	均方和	$FH$ 值	显著性
磨削深度 $a_p$	2588.63	2	1321.63	622.67	高度
砂轮转速 $v_s$	96.87	2	49.73	23.32	高度
进给速度 $v_w$	426.31	2	210.28	96.83	高度
误差	43.15	23	2.26	—	—

### 3.3 磨削参数对残余应力的影响

磨削参数对工件表面残余应力的影响程度也存在一定差异,磨削深度和砂轮转速对工件表面残余应力的影响结果见图 3。

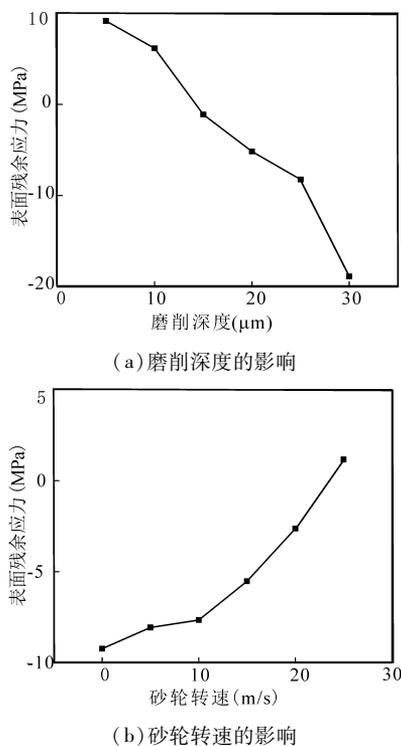


图 3 磨削深度和砂轮转速对工件表面残余应力的影响

由图 3a 显示,在逐渐提高磨削深度的过程中,表层残余应力形式从最初的拉应力转变成了压应力,并且与磨削深度呈正相关。这是由于提高磨削深度后,磨粒和工件材料之间发生更强烈的相互作用,从而引起磨削力的显著上升,对工件表面造成更

明显的挤压作用,在工件表面形成机械压应力。当磨削深度提高时,机械压应力也随之上升。当磨削深度较小时,CBN 砂轮表现出了优异的切削能力与散热效果,此时工件表面只留存了很少的热量,但这时工件在机械应力作用下主要表现为压应力状态,不利于切削。综合考虑,选取磨削深度在 15 ~ 20  $\mu\text{m}$  切削效果更好。

由图 3b 可知,随着砂轮转速的增加,工件表面残余应力表现出单调增加的变化规律,在砂轮转速小于 20m/s 时,表面残余应力发生了持续减小的变化规律。这是因为增大砂轮转速的过程中,更多磨粒参与了磨削过程,从而降低了磨削力,工件表面形成了更小的残余压应力。综合考虑,选取砂轮转速 20m/s 切削效果更好。

根据以上分析可知,为降低磨削过程的发热量,应选择具备优异切削性能、低磨削深度以及散热效率高的砂轮,此外磨粒与工件还会在塑性变形过程中相互作用,在工件表面产生机械应力。考虑到工件表面形成有应力层,在较浅磨削深度条件下,应力层无法被充分去除,因此对于小切深磨削过程,初始组织应力与磨削应力会对工件表面残余应力产生综合影响。

## 4 预测模型建立及分析

### 4.1 建立残余应力预测模型

磨削加工残余应力跟磨削参数呈现非线性变化的特征,因此需要通过线性回归的方式构建预测模型。磨削应力与工件初始应力都会对磨削工件残余应力产生影响,因此对小切深磨削结构而言,假定在工件表面形成了均匀初始应力,则可以将残余应力和磨削参数表示成以下指数关系,即

$$F_i = Aa_p^\alpha v_s^\beta v_w^\gamma$$

为简化计算过程,取对数可得

$$\lg F_i = \lg A + \alpha \lg a_p + \beta \lg v_s + \gamma \lg v_w$$

根据上式可以发现,函数值跟自变量具有线性变化的规律,因此以  $y$  表示函数值,  $x_1 \sim x_p$  为自变量,  $P$  为自变量个数,  $M$  为测试次数,  $y_M$  为在第  $M$  次测试时得到的结果,构建得到以下的多元线性回归模型,即

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_p x_{1p} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_p x_{2p} + \varepsilon_2 \\ \dots \\ y_M = \beta_0 + \beta_1 x_{M1} + \beta_2 x_{M2} + \dots + \beta_p x_{Mp} + \varepsilon_M \end{cases}$$

式中,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  都是带估计的参数;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M$  相互间不会产生干扰。

## 4.2 显著性检验

利用工件表面残余应力回归方程计算出表 5 所示的残余应力回归结果。可以发现,此时  $FH > F_{0.01}$ , 因此,按照 F 检验法进行判断,本次构建得到的工件表面残余应力回归方程满足高显著性的要求。

表 5 残余应力的回归分析结果

误差来源	偏差平方和	自由度	均方和	FH 值	显著性
回归	0.7625	3	0.2542	65.18	高度显著
剩余	0.0193	5	0.0039	—	—
合计	0.7818	8	—	—	—

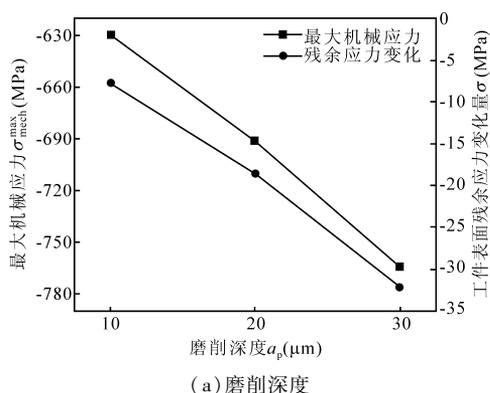
## 4.3 最大机械应力分析

表 6 为工件磨削测试结果,图 4 为不同磨削条件下最大机械应力和残余应力变化量的分布。

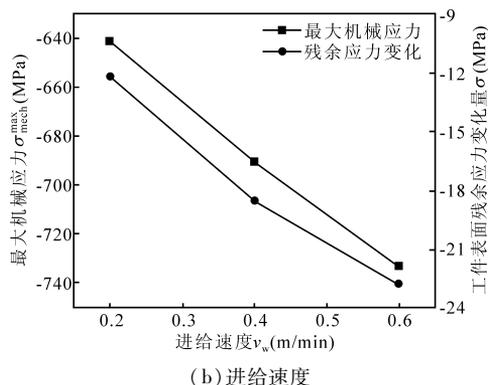
表 6 磨削试验结果

序号	磨削深度 ( $\mu\text{m}$ )	进给速度 ( $\text{m}/\text{min}$ )	砂轮转速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	径向切削力 (N)	轴向切削力 (N)	表面残余应力 (MPa)
1	15	0.2	20	3.28	7.06	5.49
2		0.3	20	8.06	16.49	-11.52
3		0.4	20	4.06	10.62	1.33
4		0.5	20	5.12	8.96	-7.63
5		0.6	20	3.26	7.85	-5.22
6	20	0.2	20	6.68	13.76	-3.28
7		0.3	20	10.89	21.56	-17.43
8		0.4	20	6.12	12.26	1.38
9		0.5	20	7.42	15.48	-9.35
10		0.6	20	6.75	9.48	-4.52
11	25	0.2	20	9.62	18.53	-1.26
12		0.3	20	14.26	26.68	-22.63
13		0.4	20	12.36	19.87	1.42
14		0.5	20	9.63	14.56	-8.56
15		0.6	20	7.59	12.68	-6.75

根据图 4 可知,当砂轮转速为  $20\text{m}/\text{s}$  时,磨削表面最大机械应力与残余应力变化量随磨削参数的增加形成单调变化特征。这是由于增大磨削深度以及提高工件进给速度后,磨削力变大,因此产生了更高的最大机械应力。CBN 砂轮按照小切深方式进行磨削处理时,磨削阶段产生的热量很低,磨粒和工件因塑性变形而产生表面残余应力,并且在磨削深度持续增大的过程中,热应力也明显提升。



(a) 磨削深度



(b) 进给速度

图 4 磨削深度和进给速度对工件表面最大机械应力和残余应力变化量的影响

## 5 结语

(1) 工件表面残余应力主要受到磨削深度的影响,其次是工件进给速度,砂轮转速的影响程度最低。根据 F 检验法可以发现,所有磨削参数都对工件表面残余应力产生了显著影响。通过磨削参数对残余应力的影响分析得到最优的参数范围:磨削深度  $15\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ ,砂轮转速  $20\text{m}/\text{s}$ 。

(2) 磨削表面最大机械应力与残余应力变化量随磨削参数增加形成单调变化特征。提高工件进给速度后,形成了更大的磨削力,产生了更高的最大机械应力。

## 参考文献

- [1] 樊荣,李秀红,李文辉,等. 基于 ABAQUS/FE-SAFE 的 TC4 钛合金板材疲劳寿命仿真与实验[J]. 表面技术, 2017,46(1):148-163.
- [2] Haifa Sallem, Hedi Hamdi. Analysis of measured and predicted residual stresses induced by finish cylindrical grinding of high speed steel with CBN wheel[J]. Procedia CIRP, 2015, 56(31):381-386.
- [3] 梁志强,黄迪青,周天丰,等. 螺旋伞齿轮磨削残余应力分布规律及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018,54(21):183-190.
- [4] 李厦,钞俊闯. 基于热力耦合的磨削残余应力仿真与试验研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(2):84-86.
- [5] Bahman Azarhoushang, Amir Daneshi, Dal Ho Lee. Evaluation of thermal damages and residual stresses in dry grinding by structured wheels[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,142:1922-1930.
- [6] 张银霞,杨鑫,原少帅,等. 18CrNiMo7-6 钢高速外圆磨削的残余应力[J]. 中国机械工程, 2021,32(5):540-546.
- [7] 王栋,陈冠华,沙雪莹,等. 高速精密磨削 18CrNiMo7-6 表面残余应力试验研究[J]. 机械设计与制造, 2021(1):99-102.

# 切削参数对车削钛合金切削力影响的研究

战勇,金成哲,张莹莹

沈阳理工大学

**摘要:** 为研究切削参数对车削钛合金切削力的影响,建立了车削钛合金的仿真模型,选择不同的切削参数进行加工仿真,得到了多组不同的切削力。为验证所建立仿真模型的正确性及合理性,进行了正交车削加工试验,选择与加工仿真相同的切削参数,得到多组不同的切削力数据。将两者进行对比分析,验证所建立的仿真模型。基于此加工仿真模型,进一步采用单因素试验法进行车削加工仿真,得到车削加工钛合金时不同切削参数对切削力的影响规律。研究表明:对切削力的影响程度由大到小依次为刀具角度、进给量和切削速度;刀具角度和切削速度与切削力成反比,进给量则与之成正比。

**关键词:** 钛合金;车削;切削参数;切削力

**中图分类号:** TG506;TG146.23

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2021.10.005

## Study on the Influence of Cutting Parameters on Cutting Force in Turning Titanium Alloy

Zhan Yong, Jin Chengzhe, Zhang Yingying

**Abstract:** In order to study the influence of cutting parameters on the cutting force of turning titanium alloy, a simulation model of turning titanium alloy is established, and several groups of different cutting forces are obtained by selecting different cutting parameters for machining simulation. In order to verify the correctness and rationality of the simulation model, orthogonal turning experiments are carried out. The cutting parameters the same as those of the simulation, and several groups of different cutting forces are obtained. The two parameters are compared to verify the simulation model. Based on the machining simulation model, the turning simulation is carried out by single factor test method, and the influence rule of different cutting parameters on cutting force in turning titanium alloy is obtained. The results show that the degree of influence on cutting force from large to small is the tool angle, feed and cutting speed. The tool angle and cutting speed are inversely proportional to the cutting force, and the feed is directly proportional to it.

**Keywords:** Titanium alloy; turning; cutting parameters; cutting force

## 1 引言

钛合金以一系列突出优点被应用于许多行业,尤其是在军工领域,受到许多发达国家的关注并得到典型应用<sup>[1]</sup>。钛合金属于难加工材料<sup>[2]</sup>,在钛合金切削加工过程中,切削力的大小直接影响刀具的磨损和使用寿命,间接影响零件的加工质量,同时,切削参数的选择又对切削力有着显著的影响<sup>[3]</sup>。因此研究切削参数对切削钛合金产生的切削力具有

重要意义。

目前,许多学者对钛合金材料切削力方面的研究日益增多。贾兴民等<sup>[4]</sup>利用正交试验法对钛合金进行了铣削加工试验,分析切削力、切削振动等工艺参数的优化方法。蔡伟<sup>[5]</sup>对高速车削钛合金的力和热特性进行研究,利用有限元仿真软件对高速车削钛合金进行车削仿真和车削实验。李宝栋等<sup>[6]</sup>建立了 Ti6242 钛合金车削仿真模型,通过切削力的二次响应面回归到数学模型,并进行了试验验证。纪飞飞<sup>[7]</sup>为研究多孔钛合金切削加工效率及

收稿日期:2021年4月

[8]袁巨龙,韩文杰,杜东兴,等.基于微切削模型的不锈钢研磨表面残余应力规律[J].表面技术,2021,50(1):422-431.

[9]李兴东,姜男,周新灵,等.17-4PH汽轮机叶片叶根磨削及铣削表面质量对比[J].工具技术,2018,52(1):30-33.

[10]吴书安,祝锡晶,王潞杰.单磨粒磨削对表面残余应力

影响的仿真分析[J].工具技术,2016,50(9):31-34.

第一作者:雷瑛,硕士,副教授,西安交通工程学院机械工程学院,710300 西安市

First Author: Lei Ying, Master, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong Engineering University, Xi'an 710300, China