

水室封头材料加工切削力试验及预测模型研究

程耀楠,秦超,贾炜坤,严复钢

哈尔滨理工大学

摘要: 水室封头作为核电设备的主要零部件,长期处在高温、高压、高辐射等恶劣的工作环境下,材料为高强度钢 508 III 钢,具备高强度和高温的力学特性,导致其切削加工性差。在水室封头重型切削加工过程中,大多采用硬质合金刀具进行切削,铣削过程中刀具受到较大的机械冲击和温度影响。针对切削过程中刀具失效严重、换刀频繁等问题,进行水室封头材料加工切削力试验及预测模型研究。通过对水室封头材料进行单因素铣削试验,探讨切削用量与切削力的关系;进而采用正交试验的方法分析切削参数对切削力影响的显著程度,应用回归分析方法建立切削力预测模型,并进行验证。研究结果为进一步研究水室封头材料加工刀具失效机理、切削参数优化及刀具设计开发提供一定的试验基础和技术支持。

关键词: 水室封头;重型切削;硬质合金刀具;切削力;预测模型

中图分类号: TG136.4;TG135.5;TH164 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.004

Experimental Study and Prediction Model for Cutting Force in Machining Water Chamber Head Material

Cheng Yaonan, Qin Chao, Jia Weikun, Yan Fugang

Abstract: As the main parts of nuclear power equipment, the water chamber head has been working under the harsh environment of high temperature, high pressure and high radiation for a long time. The material is high strength steel 508 III, which has high strength and high temperature mechanical properties, resulting in poor machinability. In the heavy-duty cutting process of water chamber head, the carbide cutters are mostly used for cutting, and the cutters are affected by mechanical impact and temperature. Aiming at the problems of severe tool failure and frequent tool change in cutting process, the cutting force experiment and prediction model of water chamber head material machining are studied. Firstly, the relationship between the cutting parameters and the cutting force is discussed through single factor milling experiment with water chamber head material, and then the significant degree of cutting parameters' influence on the cutting force is analyzed by orthogonal experiment, and the prediction model for the cutting force is established by regression analysis method and verified. The research results provide some experimental basis and technical support for further research on tool failure mechanism, cutting parameters optimization and tool design and development of chamber head materials.

Keywords: water chamber head; heavy cutting; carbide tool; cutting force; prediction model

1 引言

水室封头作为 AP1000 核电机组的主要零部件^[1],在工作时需要承受高温高压,采用难加工材料 508 III 钢制成^[2,3],其加工过程在重型机床上完成。水室封头重达 40t,但是因受制于锻造技术,其锻造毛坯较大,通常可达 200t,材料去除量高达 70% 以上。508 III 钢具有较高的强度和韧性,其使用性能和安全性能较好,但是加工性较差。水室封头加工过程属于重型切削,切削参数明显大于普通切削参数^[4,5],切削速度约为 180m/min,每齿进给量 >0.6mm/z,切削深度 >8mm,从毛坯到成品水室

封头加工周期为 4 个月左右,切削效率在很大程度上影响着生产效率。较大的切削参数直接导致刀具在切削过程中承受较大的机械冲击,刀具所受切削力随着切削力以及切削热的剧烈变化而增大,刀片切削刃承受负载也随之增大,同时随着切削温度的升高,最终缩短刀具使用寿命^[6]。

在铣削加工过程中,切削力是最重要的物理参数之一,在加工过程中所消耗的功率及加工工艺系统的变形都取决于切削力的大小,切削热的产生也直接受到切削力的影响,并进一步对刀具的磨损、破损及刀具耐用度等产生影响,同时对加工精度和加工质量都有直接的影响。刀具在工作过程中,其所承受的切削力是影响载荷特性最大的因素,在铣削过程中,可以通过实时监控切削力,判断刀具的加工状态,如刀具磨损和破损等^[7]。

基金项目: 国家自然科学基金(51675145);哈尔滨市应用技术与开发项目(2014DB4AG017)
收稿日期: 2018 年 10 月

大量国内外学者都对切削力进行了深入的研究。Kim H. S. 等^[8]通过研究铣削过程中的铣削力,将刀片主轴偏差和初始位置误差两方面作为影响切削力的主要因素,在建立静态铣削力模型的基础上,推导出了动态铣削力模型;Vogler M. P. 等^[9]通过材料特性对切削力系数的影响,确定材料各相分布状况,求得切削力关于平均切削速度、切削厚度和有效前角的函数,构造了微铣削力模型;刘战强等^[10]基于圆弧铣刀的切削力预报模型,同时借助空间解析几何三维坐标转换原理,提出了圆弧铣刀的几何模型描述方法;潘永智等^[11]对单因素试验进行了分析,并结合遗传算法,建立了切削力的预测模型,在验证模型正确性的基础上,得出了在最大金属去除率前提下切削参数的最优组合;朱鲲鹏等^[12]指出,在微铣削过程中刀具切削力模型准确度受瞬时切削厚度的影响,并提出了该过程中切削力的建模方法。

综上所述,国内外学者对切削力进行了广泛研究,主要集中在普通切削和微铣削的铣削力模型及圆弧铣刀的切削力等方面,但在重型切削加工情况下,对于切削时各切削参数对切削力的影响以及刀具失效情况有待于进一步研究。本文针对硬质合金刀具对水室封头材料 508 III 钢的铣削,进行单因素试验及正交试验分析切削用量对切削力的影响,建立铣削力数学模型,从而进行多元回归得到切削力预测模型,并对切削力预测模型进行检验。为进一步研究切削参数对切削力的影响及刀具失效机理等提供一定的技术基础。

2 切削试验

2.1 试验条件

工件材料为 508 III 钢 (120mm × 75mm × 60mm),其力学性能及化学性能见表 1 和表 2。

表 1 508 III 钢的材料力学性能

拉伸强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)
585	445	58	75

表 2 508 III 钢的材料化学性能 (%)

元素	含量	元素	含量	元素	含量
C	0.17~0.23	Si	0.15~0.30	Cu	0.05
S	0.015	P	0.012	Mn	1.12~1.50
Al	0.04	V	0.01	Sb	0.002
Cr	0.2	Ni	0.57~0.93	As	0.010
Sn	0.010	Co	0.02	Mo	0.40~0.60

试验装置如图 1 所示,在 XW5032 立式铣床上进行试验,选用 FMR04-100-B32-RD16 铣刀盘,采用 WIDIA RDMT1605MOTX-TN6540 硬质合金刀片,涂

层材料为 TiAlN,运用对称铣削方式进行切削。利用 Kistler 测力仪采集铣削加工中的 x 方向切削力 F_x , y 方向切削力 F_y 和 z 方向切削力 F_z 所产生的信号,并对数据进行处理。通过单因素试验研究获得铣削过程中切削用量与切削力的关系。为进一步建立铣削力预测模型,设计并进行正交试验,分析各因素对切削力的影响,并利用 MATLAB 软件进行多元线性回归得到切削力预测模型。

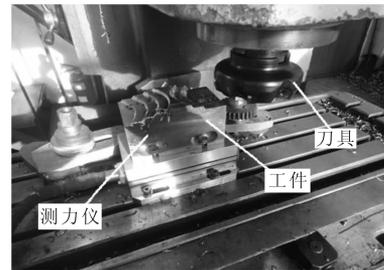


图 1 试验设备及测量装置

2.2 切削参数

单因素试验参数及结果如表 3 所示。

表 3 单因素铣削试验参数及结果

因素	序号	切削速度 (m/min)	每齿进给量 (mm/z)	切削深度 (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
v_c	1	150	0.08	2.0	657.0	698.0	462.5
	2	200	0.08	2.0	719.0	679.0	513.4
	3	250	0.08	2.0	757.3	726.5	623.0
	4	300	0.08	2.0	851.0	823.0	736.0
	5	350	0.08	2.0	1157.7	789.0	860.0
f_z	6	288	0.05	2.0	713.4	698.3	498.0
	7	288	0.07	2.0	734.0	701.6	513.0
	8	288	0.09	2.0	786.0	752.0	552.8
	9	288	0.10	2.0	986.0	830.0	678.5
	10	288	0.11	2.0	1291.0	861.0	797.0
a_p	11	288	0.06	1.2	756.0	679.4	483.0
	12	288	0.06	1.4	790.0	709.0	508.5
	13	288	0.06	1.6	951.6	752.0	590.0
	14	288	0.06	1.8	1078.0	887.0	657.0
	15	288	0.06	2.0	1288.8	903.5	894.0

表 4 因素水平

序号	v_c (m/min)	a_p (mm)	f_z (mm/z)
1	200	1.0	0.08
2	250	2.0	0.10
3	300	2.5	0.11

将切削速度 v_c 、切削深度 a_p 、进给量 f_z 选作正交试验的三个因素,每个因素取三个水平,因素水平表如表 4 所示,按照正交表 $L_9(3^4)$ 进行试验,分别采集铣削加工中的主切削力 F_x 、吃刀抗力 F_y 和进给抗力 F_z ,对切削力的测量结果进行极差分析。正交试验及结果如表 5 所示。

表5 正交试验及结果

序号	切削速度 v_c (m/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	轴向切深 a_p (mm)	切削力 F (N)		
				F_x	F_y	F_z
1	200	0.08	1	1656.5	1698.3	1463.0
2	200	0.10	2	1719.0	1678.5	1513.0
3	200	0.11	2.5	1758.0	1726.0	1623.0
4	250	0.08	2	1851.4	1822.5	1735.0
5	250	0.10	2.5	1958.0	1489.0	1859.6
6	250	0.11	1	1813.0	1752.0	1498.0
7	300	0.08	2.5	2034.0	1901.6	1513.0
8	300	0.10	1	2185.4	2052.0	1552.8
9	300	0.11	2	2985.0	2530.0	1879.0

3 试验结果分析

3.1 切削力变化规律

对试验数据进行处理,舍去刀具切入和切出时不稳定状态时的无效值,将3组单因素试验得出的有效值绘制成曲线,如图2-图4所示。图2为切削速度与三向铣削力的关系曲线图,可以看到铣削力 F_x, F_z 随着切削速度的提高逐渐上升, F_y 的变化是先缓慢上升,当切削速度达到 300m/min 后开始下降。图3为进给量与三向铣削力的关系曲线图。从图中可以看出进给量在 0.04 ~ 0.09mm/z 时, F_x, F_y, F_z 都较平稳,当进给量高于 0.09mm/z 后 F_x 上升趋势较大。图4表示在切削过程中三向铣削力对应不同切削深度的关系曲线。通过曲线图可以看出,进给量和切削速度不变时,三向铣削力在 a_p 为 1.2 ~ 1.6mm 时缓慢上升;当 a_p 在 1.6 ~ 1.8mm 时铣削力急剧上升;当 $a_p > 1.8$ mm 时 F_x 及 F_z 上升, F_y 趋于平稳。

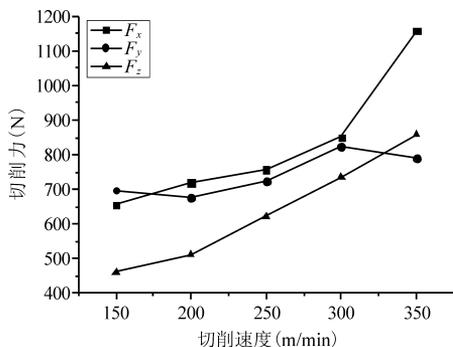


图2 切削速度与切削力关系曲线

为了进一步分析切削参数对切削力影响的显著性,对正交试验结果进行极差分析,各因素极差分析结果如表6所示。通过分析结果可知,对于切削力的影响顺序为 $v_c > a_p > f_z$,即在试验选取参数范围内切削速度对切削力的影响最大,其次是切削深度,

而进给量对切削力的影响最小。

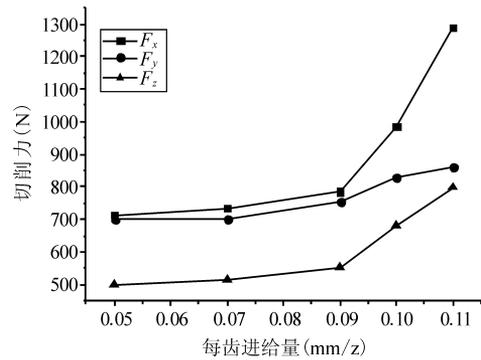


图3 每齿进给量与切削力关系曲线

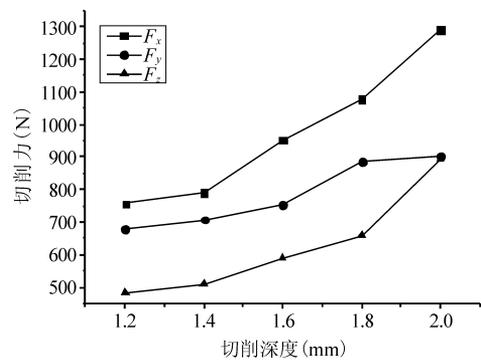


图4 切削深度与切削力关系曲线

表6 各因素极差分析

极差	v_c	f_z	a_p	因素主次
	A	B	C	$R(\max-\min)$
F_x	543	338	300	A > B > C
F_y	403	263	305	A > C > B
F_z	264	96	204	A > C > B
F	306	278	315	A > C > B

3.2 铣削力数学模型的建立

通过对单因素试验数据分析获得 a_p, f_z 和 v_c 对铣削力的影响关系,同时基于以上因素建立铣削力数学模型,有

$$\begin{cases} F_x = C_F v_c^{b_1} f_z^{b_2} a_p^{b_3} \\ F_y = C_F v_c^{b_1} f_z^{b_2} a_p^{b_3} \\ F_z = C_F v_c^{b_1} f_z^{b_2} a_p^{b_3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_F 通过被加工材料及切削条件决定, $b_1 \sim b_3$ 分别为铣削力的影响因素指数。

将式(1)两边取对数后得到式(2),令 $y = \log F, x_1 = \log v, x_2 = \log f_z, x_3 = \log a_p$,得到线性方程式(3),可表示为

$$\log F = \log C_F + b_1 \log v_c + b_2 \log f_z + b_3 \log a_p \quad (2)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

式中, y 为切削力。

设 ε_1 为试验误差,建立的多元线性回归方程为

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \beta_3 x_{13} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \beta_3 x_{23} + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ y_9 = \beta_0 + \beta_1 x_{91} + \beta_2 x_{92} + \beta_3 x_{93} + \varepsilon_9 \end{cases} \quad (4)$$

将方程组用矩阵表示为

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_9 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{91} & x_{92} & x_{93} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_9 \end{bmatrix}$$

将 b_0, b_1, b_2, b_3 设为回归方程的参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的最小二乘估计, 正交试验获得的方程为

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (6)$$

式中, \hat{y} 为统计变量; b_0, b_1, b_2, b_3 为回归系数。

经过运算得

$$b = (X'X)^{-1}X'Y \quad (7)$$

X^T 为 X 的转置矩阵, $(X'X)^{-1}$ 为 $(X'X)$ 的逆矩阵, 可得

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.3 基于 MATLAB 建立切削力预测模型

通过正交试验得到 9 组数据如表 5 所示, 利用 MATLAB 进行多元线性回归, 求出各系数获得切削力预测模型, MATLAB 程序如下

```
x0 = importdata('x0.txt'); X = [x0, x1, x2, x3];
x1 = importdata('x1.txt'); Y = importdata('Y.txt');
x2 = importdata('x2.txt'); b = inv(X' * X) * (X' * Y)
x3 = importdata('x3.txt');
```

上述 MATLAB 程序中 x_0, x_1, x_2, x_3, Y 分别代表经验公式中的 C_F, v_c, f_z, a_p 和 F_t, F_r, F_a 的矩阵, 求出系数 b_0, b_1, b_2, b_3 , 进而得出切削力预测模型。将求出的数值代入, 可得硬质合金刀具铣削水室封头材料 508 III 钢切削力预测模型为

$$\begin{cases} F_t = 58.04 v_c^{0.6447} f_z^{0.1669} a_p^{0.1062} \\ F_r = 172.07 v_c^{0.4371} f_z^{0.0848} a_p^{-0.0034} \\ F_a = 739.09 v_c^{0.1379} f_z^{0.1338} a_p^{0.0845} \end{cases} \quad (9)$$

3.4 切削力预测模型的验证

为了保证切削力预测的准确性, 对切削力预测模型进行检验, 在试验参数范围内选取三组不同参数组合进行验证, 结果如表 7 所示。

根据表中试验值与经验模型值比较可知, 实际

测的切削力大于预测值, 可能原因是由于加工时刀具与主轴间的振动引起, 也可能是工件装夹时的误差引起, 但在误差允许范围内, 因此可以使用切削力预测模型对刀具的切削力进行分析, 同时切削力预测模型也为生产过程中切削参数的实际选取提供一定的参考。

进一步对表中的误差范围进行分析, 发现切削力预测模型与切削力的实际大小在较大的切削参数下更符合。

表 7 切削力对比分析

序号	切削参数	对比	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	$v_c = 188 \text{ m/min}$	试验值	1379.9	1344.1	1292
	$f_z = 0.06 \text{ mm/z}$	预测模型值	1239.7	1256.7	1197.7
	$a_p = 1.5 \text{ mm}$	误差	10.2%	6.5%	7.3%
2	$v_c = 288 \text{ m/min}$	试验值	1850	1691	1678.5
	$f_z = 0.1 \text{ mm/z}$	预测模型值	1788.22	1577.06	1599.22
	$a_p = 2 \text{ mm}$	误差	3.3%	6.7%	4.7%
3	$v_c = 300 \text{ m/min}$	试验值	1979.1	1819.5	1806
	$f_z = 0.12 \text{ mm/z}$	预测模型值	1928	1719	1701.4
	$a_p = 2 \text{ mm}$	误差	2.6%	5.5%	5.8%

4 结语

通过对水室封头材料进行铣削单因素试验和正交试验, 分析切削用量对切削力的影响规律, 利用 MATLAB 软件进行多元线性回归建立切削力预测模型, 可得到以下结论:

(1) 进行单因素试验获得切削参数对切削力的影响规律, 并通过正交试验得到切削参数对切削力的影响为 $a_p > f_z > v_c$;

(2) 通过单因素试验, 初步建立关于 a_p, f_z 和 v_c 的铣削力数学模型, 并利用正交试验所获数据进行多元线性回归, 得到切削力预测模型;

(3) 对切削力预测模型进行试验对比验证得到, 切削力预测模型与实际切削力大小符合较好, 证明了该切削力预测模型的可靠性和可行性。

参考文献

- [1] 程耀楠, 钱俊, 卢真真, 等. 核电水室封头高效切削加工及刀具失效分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(5): 50-55.
- [2] 程耀楠, 关睿, 吴明阳, 等. 铣削 508 III 钢硬质合金刀具敏感性分析[J]. 工具技术, 2017, 51(3): 43-47.
- [3] Cheng Y, Guan R, Lu Z, et al. A study on the milling temperature and tool wear of difficult-to-machine 508III steel [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2017, 232(3): 2478-2487.

冷却温度对难加工合金切屑形貌影响机理研究

胡礼文,魏兆成,王敏杰,马日光

大连理工大学

摘要: 针对 FV520B 沉淀硬化不锈钢和 TC4 钛合金两种典型的难加工合金,利用自行研制的液氮射流冷却装置对不同切削速度和不同射流温度下两种材料的切屑微观形貌进行了试验分析。研究表明,在液氮射流冷却作用下,两种材料在切削时依然会产生绝热剪切现象,且随着切削速度的提高和射流温度的降低,切屑锯齿化程度、锯齿节距显著提高,绝热剪切带宽度、剪切带倾角略有降低,低温断屑情况相比常温得到明显改善。

关键词: 难加工合金;液氮射流;切屑微观形貌;绝热剪切

中图分类号: TG506.1;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.005

Research on Mechanism of Effect of Cooling Temperature on Chip Morphology of Difficult-to-cut Alloys

Hu Liwen, Wei Zhaocheng, Wang Minjie, Ma Riguang

Abstract: FV520B precipitation-hardened stainless steel and TC4 titanium alloy are two typical difficult-to-cut alloys, and the chip formation mechanism of the two materials under different cutting speeds and jet temperatures is analyzed by using the liquid nitrogen jet cooling device developed by ourselves. Studies have shown that under the effect of liquid nitrogen jet cooling, the chips of the two materials still generate adiabatic shear, and with the increasing of cutting speed and the reducing of the fluid temperature, serrated chip degree and serrated pitch increased significantly, adiabatic shear band width and angle of shear band is reduced in different degree, low temperature chip breaker condition dramatically improved contrast with the normal temperature condition.

Keywords: difficult-to-cut alloys; liquid nitrogen jet; micro-structure of chip; adiabatic shear

1 引言

FV520B 沉淀硬化不锈钢具有高强度、高韧性、优良的耐腐蚀性能和耐磨性良好的焊接性能等优

点,被广泛应用于整体叶轮、转子、涡轮轴和齿轮等重要零部件的生产^[1]。TC4 钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好和热稳定好等优良特性,在航空航天、石油化工、原子能以及汽车产业等领域得到广泛应用^[2,3]。然而这些材料通常切削加工性差,在切削加工过程中很容易产生加工硬化,刀具的磨损严重,加工精度和表面质量难以达到使用要求,因此被称

基金项目: 辽宁省自然科学基金(201602174);中央高校基本科研业务费资助项目(DUT17GF213)
收稿日期: 2019年3月

- [4] 刘献礼,刘铭,何耿煌,等. 重型切削过程硬质合金刀片的冲击破损行为[J]. 机械工程学报,2014,50(23): 175-185.
- [5] 刘利. 重型切削水室封头材料刀具粘结失效机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [6] 程耀楠,刘利,吴明阳,等. 超重型切削过程硬质合金刀具高温力学特性[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015(4): 560-566.
- [7] 申志刚,何宁,李亮. 高速硬铣削加工刀具磨损监测研究[J]. 中国机械工程,2009,20(13):1582-1586.
- [8] Kim H S, Ehmann K F. A cutting force model for face milling operations[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2016,33(5):651-673.
- [9] Vogler M P, Devor R E, Kapoor S G. Microstructure - level force prediction model for micro-milling of multi-phase mate-

- rials[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003,125(2):202-209.
- [10] 刘战强,王启东,汤爱民,等. 圆弧铣刀瞬态切削力建模与数值仿真[J]. 应用基础与工程科学学报,2012,20(6):1022-1031.
- [11] 潘永智,艾兴,唐志涛,等. 基于切削力预测模型的刀具几何参数和切削参数优化[J]. 中国机械工程,2008,19(4):428-431.
- [12] 朱鲲鹏,李科选,梅涛,等. 微铣削力建模研究进展[J]. 机械工程学报,2016,52(17):20-34.
- 第一作者:程耀楠,博士,教授,哈尔滨理工大学机械动力工程学院,150080 哈尔滨市
First Author: Cheng Yaonan, Doctor, Professor, School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China