

# 负极性电火花加工时表面做功能量研究及其参数分析

刘蜀阳, 韩志宏, 吴南星, 张 玲

(景德镇陶瓷学院机械电子工程学院, 江西景德镇 333403)

**摘 要:** 本文基于电子溅射理论和电流电阻热效应,进行了负极性电火花加工时工件表面做功能量的建模与参数分析,并开展了一系列单因素孔加工实验.理论与实验数据分析表明:电阻热效应是材料去除的主要作用机理,且电阻热占总做功能量的集中度随极间电流的提高而增加,随放电斑面积的增大而减小.理论探讨与实验数据分析的一致性表明所建立的能量描述方程有效.

**关键词:** 电火花加工; 场致发射; 电阻热效应; 能量集中度

**中图分类号:** TB131      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0578-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.023

## The Study of Work Energy on Machined Surface During Negative Polarity EDM and Its Parameters Analysis

LIU Shu-yang, HAN Zhi-hong, WU Nan-xing, ZHANG Ling

(School of Mechanical & Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen, Jiangxi 333403, China)

**Abstract:** Based on the field emission theory and resistance heating effect, the energy on workpiece surface in electrical discharge machining (short in EDM) process was modeled and its related parameters were analyzed in this paper, when the tool electrode is negative. The theoretical study and the analysis on the experimental data both show that, the resistance heating effect is the main mechanism of material removal of workpiece, and the concentration ratio of resistance heat to total work power increases with the improvement of interelectrode current and decrease with the enlargement of the discharge spot area. Moreover, the consistence of theoretical model and experimental results show that the established describing equations of work energy are valid.

**Key words:** electrical discharge machining(EDM); field emission; resistance heating effect; concentration ratio of power

## 1 引言

电火花加工(EDM)技术的机理研究,特别是关于电极表面做功能量的描述上,近十年来并没有较大进展,其原因主要有:(1)随着对电火花加工技术研究的深入,发现了更多影响加工效果的耦合因素,且其耦合关系的变化规律往往是难于测量或定量描述的;(2)对EDM机理的研究方法上并没有较大突破,而传统单脉冲大功率大极间距放电研究方法虽然对认识放电现象是有益的,却难以圆满解释电火花加工的实际;(3)EDM做功的物理描述上并没有取得新的突破,各种经验公式的提出对实验条件存在较大的依赖性,很难找到合理定性的统一描述方程.目前关于不同极性EDM的材料蚀除机理,还没有形成学术界所公认的数学模型,需要新的理论推导与实证分析去充实<sup>[1-3]</sup>.显然弄清能量在工具、工件

和极间的分配关系,以及能量与材料的蚀除量之间的关系,对深入挖掘EDM技术的潜力,提高加工精度和效率有着重要的意义.

众多学者的研究与相关实验均已表明,在EDM极间通道中的粒子主要是阴极上发射的电子流,正离子对通道构成的作用很小.现代场致发射和热场发射理论的提出与完善,特别是Fowler-Nordheim方程的描述表明,电子从材料表面上逸出要克服表面壁垒做功,表面壁垒的厚度约为一个原子层的厚度,并给出了材料的功函数,发射电子克服壁垒所做的功将转化为通道中的材料热能<sup>[4-6]</sup>.而且有研究表明,电子在电极中的流动遵从集肤效应<sup>[7]</sup>,按系统论的熵最小原则也可认为,电子流的流动区域可看作是在表面以下一个原子直径的通道中流动,这就为进行表面材料蚀除的能量分析给定了空间边界条件.

本文将主要基于单因素孔加工实验,对负极性 EDM 加工时工件表面的做功能量进行分析,并基于稳态场致电子发射和电流的电阻热效应,对工件电极表面的做功能量的及能量集中度情况进行理论建模与推导;进行加工工艺的相关影响参数讨论,并结合具体的实验现象与结果,对模型的合理性和有效性进行仿真分析与验证。

## 2 单因素孔加工实验

为了便于采用统计学方法和数据回归处理技术进行 EDM 过程中的机理和做功能量的影响参数分析,我们设计了单因素孔加工实验,实验示意图如图 1 所示。

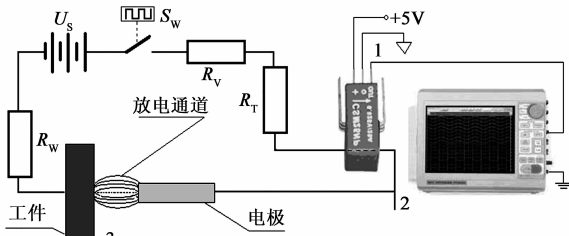


图1 单因素负极性EDM通孔实验示意图

其中:  $S_w$ ——脉冲开关;  $U_s$ ——脉冲放电管电压(V);  $R_{pp}$ ——工具电极端回路电阻( $\Omega$ );  $R_{mp}$ ——工件电极端回路电阻( $\Omega$ );  $R_{pv}$ ——放电管的内阻( $\Omega$ );  $n$ ——放电管管数(个)。

相关实验条件如下:

机床型号: AGIE CHARMILLES SE2; 输入功率:  $P_m = 10\text{kW}$ ; 极间介质: 煤油;

霍尔传感器型号: CSM015NPT; 数据采集仪型号: NEC RA 2300;

电极材料及尺寸: A3# 钢,  $\Phi = 8\text{mm}/10\text{mm}$ ,  $L = 40\text{mm}$ ;

工件材料及尺寸: 45# 钢,  $\Phi = 80\text{mm}$ ,  $h = 3.5\text{mm}$ 。

表 1 为实验中所采用的部门工艺参数及实验结果记录。实验中分别采用端直径为 8mm 和 10mm 的 A3# 圆柱电极在 45# 钢板上进行通孔加工。其中对稳态放电过程中的极间电流与电压参数的采集上,每组工艺不少于十次采样,每次采样不少于 50 个脉冲,然后再求取平均。为了提高实验数据的置信度,每组工艺参数实验均重复进行三次,记录下每次通孔击穿的时间并求取平均。

表 1 加工工艺参数及实验结果记录表

组号	电极直径 (mm)	脉冲( $\mu\text{s}$ )		电压测值 (V)	平均电压 (V)	电流 $V_{SN}$ 值 (V)	平均 $V_{SN}$ 值(V)	加工时间	平均加工 时间
		$T_{on}$	$T_{off}$						
1	8	10	3,2	-99.9969	-97.9721	2.5119	2.5086	472h53min	523h31min
				-97.7586		2.5100		562h05min	
				-96.1609		2.5040		535h34min	
2	10	10	5.6	-110.3517	-100.1025	2.8014	2.5072	724h51min	688h23min
				-94.6534		2.3365		670h32min	
				-95.3024		2.3837		669h46min	
3	8	10	3,2	-105.5239	-98.0046	2.6832	2.5083	893h27min	867h25min
				-93.3881		2.5129		819h42min	
				-95.1018		2.3288		915h08min	
4	10	10	5.6	-97.5372	-99.4371	2.5549	2.5069	1103h45min	1135h16min
				-103.0694		2.5052		1176h38min	
				-97.7047		2.4606		1125h25min	

采用 CSM015NPT 霍尔传感器测极间电流  $J(\text{A})$  时,输出信号实际上是副边的感应电压值  $V_{SN}(\text{V})$ ,其转换关系为:

$$J = \left| \frac{48}{0.625} \cdot (2.5 - V_{SN}) \right| \quad (1)$$

图 2 是 EDM 实验过程盲孔底面组织形貌及其金相组织分析,图中所采用的工艺制度见表 1 中的第一组参数。

对图中盲孔底面的显微观测与金相分析,得到的结果如下:

(1) 表面形貌观测:由图中都可看出,负极性加工表面存在明显的组织熔融痕迹,说明表面热作用是发生材料去除的主要原因;图中的熔融斑大小较为均匀,说明负极性加工时单次放电周期内的热作用体积较小。

(2) 组织连续性分析:图 2 中的熔融斑下凹较浅且

叠加较为连续,故可推测负极性加工时的材料蚀除作用是由表面向基体内发生。

(3)表面组织成分分析:由图右侧的衍射峰可知,负极性加工表面的C元素含量达到49.17%,明显高于

工件材料基体组织的正常含碳量,说明由极间介质电离所产生的游离C在工件表面有明显的沉积.进一步对这一表面积碳层用软纸擦拭,效果不明显,说明存在较明显的C元素对工件基体的渗入。

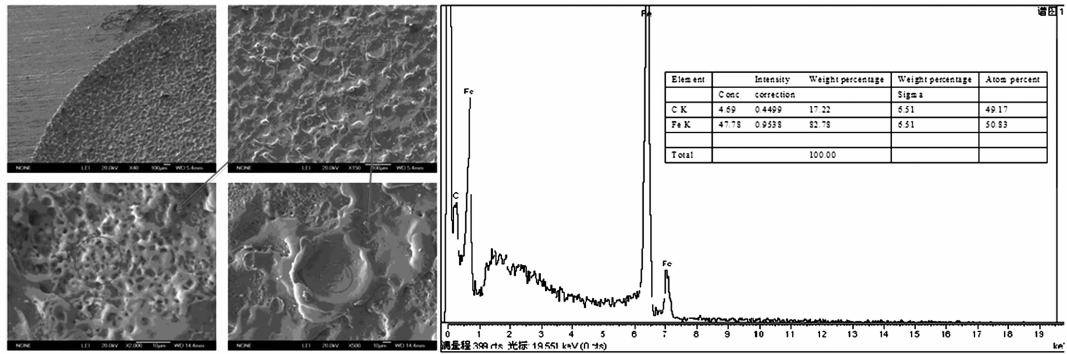


图2 EDM实验盲孔底面组织形貌及金相分析

### 3 极间电流流动过程建模及做功能量集中度分析

基于场致发射理论和上述实验结果,得到:

负极性加工时,从工具阴极发射出的自由电子在极间电场中被加速后溅射到工件表面,并在工件中形成电流,工件表面在溅射作用下承受高温高压.溅射电子被表面材料俘获后,其所具有的能量也同时转移到材料表面,当然形成的电流在表面材料体中流动也要克服电阻做功.所以发生工件阳极表面材料去除的直接做功能量可分为溅射电子所携带的溅射能和电流在材料表面流动的电阻热.电子的溅射对表面积碳的直接作用还引起了C元素对基体的渗入。

当然,放电通道中的高温环境也助于自由电子突破表面壁垒,和提高入射电子对工件表面的溅射能。

#### 3.1 工件材料中入射电流流通过程

设 $t$ 时刻极间放电通道的截面积为 $A_1$ ( $\text{mm}^2$ ),发射电子流为 $J_i$ (A),根据电荷的集肤效应,工件中的电流运行通道为 $2\pi(R_2 - d_a) \times h$ 的环柱体和端面向里 $d_a$ 距离处的 $\pi(R_1^2 - r^2) \times d_a$ 环柱体区域,如图3中所示。

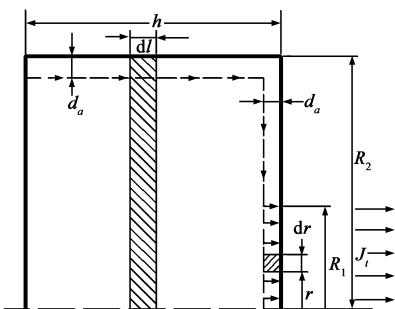


图3 工件表面的电流流通过程

其中: $d_a$ ——为材料中理想原子平摊体积的直径

(mm); $A_2$ ——为工件的表面积( $\text{mm}^2$ ); $R_2$ ——为工件表面的等效半径(mm); $R_1$ ——为通道半径(mm); $h$ ——为工件材料的厚度(mm)。

为了研究方便,进行如下假设:

(1)工件材料与电极材料完全均匀且各项同性,工具电极端面与工件表面平行.即:

$$A_1 = \pi \cdot R_1^2 \quad (2)$$

(2)因为放电时间很短,热传导对在某一微时刻的影响很小,这里不考虑电阻的热效应,即工件材料的电阻率 $\rho_w$ 为一常数。

(3)入射电子流 $J_i$ 在工件的放电表面上均布.即其在放电通道投影区域上的分布势函数 $\lambda_j = (dJ_i/dr) \times (1/2\pi r)$ 为一常数。

$$\text{根据: } J_i = \int_0^{2\pi R_1} dJ = \int_0^{R_1} \lambda_j \cdot 2\pi r \, dr = \lambda_j \cdot \pi R_1^2 \quad (3)$$

$$\text{从而得到: } \lambda_j = J_i / (\pi R_1^2) \quad (4)$$

(4)入射电子流 $J_i$ 随时间 $t$ 的变化连续.即 $J_i$ 在放电脉冲的稳定加工时间( $t_3 - T_{on}$ )内可积。

事实上,由于放电脉冲很短,通常可用极间放电电流的统计学测量值 $J$ 作为平均电流进行等效.即:

$$\int_{t_3}^{T_{on}} J_i \, dt = J \cdot (T_{on} - t_3) \quad (5)$$

式中: $T_{on}$ ——为放电脉冲时间( $\mu\text{s}$ ); $t_3$ ——为在一个放电脉冲中通道形成并进入稳定放电的临界时间( $\mu\text{s}$ )。

#### 3.2 材料切除做功能量分析

首先进行场致发射电子的入射溅射能分析。

在进入稳定放电时,由于极间介质电离,通道呈真空状态,可认为此时入射电子在通道中没有能量损失.由于发射电子从工具电极表面逸出时的初速度为零,根据能量守恒定律,入射电子的溅射能即等于其刚突破电极表面壁垒时所具有的电位势,并设置在( $t_3, T_{on}$ )

内的平均电流大小为:

$$J = \int_{t_3}^{T_{on}} J_t dt / (T_{on} - t_3)$$

则从而在单个放电脉冲的稳定放电时间( $t_3, T_{on}$ )内的入射电子溅射能为:

$$\begin{aligned} Q_h &= E_e = \int_{t_3}^{T_{on}} U \cdot J_t \cdot A_1 dt \\ &= U \cdot \pi R_1^2 \cdot \int_{t_3}^{T_{on}} J_t \cdot A_1 dt \\ &= U \cdot J \cdot \pi R_1^2 \cdot (T_{on} - t_3) \end{aligned} \quad (6)$$

其次进行入射电子在工件表面流动时所引起的电阻热分析。

在图 3 所示的工作表面通道投影区域内取一微环形面:

$$dS_r = [\pi r^2 - \pi(r - dr)^2], \quad 0 \leq r \leq R_1$$

忽略二次小项得到:  $dS_r \approx 2\pi r dr$ 。则根据假设(4), 在单位时间内流经  $dS_r$  区域入射电子所产生的微电流可表示为:

$$J_{\pi} = \lambda_j \cdot dS_r = \frac{2r}{R_1} \cdot J_t dt$$

从而根据电阻热效应, 在单个放电脉冲的稳定放电时间( $t_3, T_{on}$ )内工件表面放电通道投影区域所产生的电阻热大小为:

$$\begin{aligned} Q_s &= \int_{t_3}^{T_{on}} \left[ \int_0^{R_1} \int_{R_1}^{R_2} \left( \frac{2s}{R_1} \cdot J_t \right)^2 \cdot \rho_w \cdot \frac{s}{2\pi \cdot s \cdot d_a} ds dr \cdot \frac{A_1}{A_2} \right] dt \\ &+ \int_{t_3}^{T_{on}} \left[ \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \left( \frac{2s}{R_1} \cdot J_t \right)^2 \cdot \rho_w \cdot \frac{s}{2\pi \cdot s \cdot d_a} ds dr \cdot \frac{A_1}{A_2} \right] dt \\ &= \frac{2\rho_w}{3\pi \cdot d_a} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1^2}{R_2^2} + \frac{3}{4} \right) \cdot J^2 \cdot (T_{on} - t_3) \end{aligned} \quad (7)$$

即在单个放电脉冲的稳定放电时间( $t_3, T_{on}$ )内工件表面放电通道投影区域的总能量为:

$$\begin{aligned} Q &= Q_h + Q_s \\ &= \left[ U \cdot \pi R_1^2 \cdot J + \frac{2\rho_w}{3\pi \cdot d_a} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1^2}{R_2^2} + \frac{3}{4} \right) \right] \cdot J \cdot (T_{on} - t_3) \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.3 能量集中度分析

定义在单位脉冲的稳定放电时间( $t_3, T_{on}$ )内电阻热在总作功能量中所占的比率为:

$$\eta_c = Q_s / Q$$

将式(7)和(8)代入上式得到:

$$\eta_c = \frac{\frac{2\rho_w}{3\pi \cdot d_a} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1^2}{R_2^2} + \frac{3}{4} \right) \cdot J}{U \cdot \pi R_1^2 + \frac{2\rho_w}{3\pi \cdot d_a} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1^2}{R_2^2} + \frac{3}{4} \right) \cdot J} \quad (9)$$

为了简化分析, 分别定义:

$$C_1 = \rho_w / (6\pi \cdot d_a), \quad C_2 = U \cdot \pi, \quad \lambda = R_1 / R_2$$

其中  $\lambda$  为工件被加工面积与工件表面的等效半径比, 且显然有  $0 < \lambda \leq 1$ 。

将其代入式(9)中并进行简化, 得到:

$$\eta_c = \frac{C_1 \cdot (4 - 4\lambda^3 + 3\lambda) \cdot J}{C_2 \cdot \lambda^3 \cdot R_2^2 + C_1 \cdot (4 - 4\lambda^3 + 3\lambda) \cdot J} \quad (10)$$

## 4 实验分析与验证

以在 45# 钢基体材料表面采用负极性加工通孔为例进行测算。用到的相关参数如下:

Avogadro 常数  $N_A = 6.02 \times 10^{23} (\text{mol}^{-1})$ ; 45# 钢密度  $\rho_{Fe} = 7.9 \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$ ; 电阻率  $\rho_w = 0.97 \times 10^{-7} (\Omega \cdot \text{m})$ ;

Fe 原子的 mol 质量:  $\mu_{Fe} = 56 \times 10^{-3} (\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$ ; 加工表面等效半径  $R_2 = 40 \times 10^{-3} (\text{m})$ ;

电火花机床的脉冲电压:  $U = 110 (\text{V})$ 。

由上述参数计算可以得到:

$$d_a = \left( \frac{6\mu_{Fe}}{\pi \cdot \rho_{Fe} \cdot N_A} \right)^{1/3} \approx 1.223 \times 10^{-6} (\text{m})$$

$$C_1 = 0.97 \times 10^{-7} / (6 \times 3.14 \times 1.223 \times 10^{-6}) \approx 4.21 \times 10^{-3} (\Omega)$$

$$C_2 = U \cdot \pi = 345.575 (\text{V})$$

将  $C_1, C_2$  和  $R_2$  代入式(10), 并应用计算机工具可以进行极间平均稳态电流  $J$  和等效半径比  $\lambda$  对  $\eta_c$  的影响情况分析。

图 4 为应用 Matlab 软件所做出的不同稳态电流下  $\eta_c$  关于  $\lambda$  的变化曲线, 可见, 当  $\lambda$  为一定值时, 极间稳态放电电流  $J$  越大, 电阻热在总作功能量中所占的比率也越大; 而当  $J$  为一定值时, 这一比率随电极直径的增大而减小。

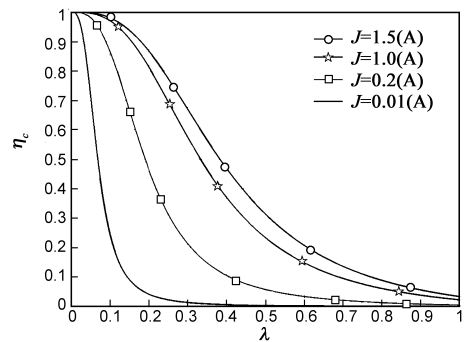


图4 不同稳态电流下  $\eta_c$  关于  $\lambda$  的变化曲线

结合前述单因素实验结果的分析可知, 在同样的输入功率下, 电阻热作用是材料去除的主要机理, 即小的电极表面积和大的输入功率均有利于提高加工的效率。

在表 1 中所用到四组加工工艺的极间平均放电电流由式(1)可分别计算如下:

$$J_1 = \left| \frac{48}{0.625} \cdot (2.5 - 2.5086) \right| = 0.66048;$$

$$J_2 = \left| \frac{48}{0.625} \cdot (2.5 - 2.5072) \right| = 0.55296$$

$$J_3 = \left| \frac{48}{0.625} \cdot (2.5 - 2.5083) \right| = 0.63744;$$

$$J_4 = \left| \frac{48}{0.625} \cdot (2.5 - 2.5069) \right| = 0.52992$$

同样四组工艺下的等效半径比可计算如下:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 8/80 = 0.1; \lambda_3 = \lambda_4 = 10/80 = 0.125$$

显然,在相同的等效半径比下,加工耗时与极间电流的关系为

$$J_1 > J_2 \text{ 且 } T_1 < T_2 (\lambda_1 = \lambda_2); J_3 > J_4 \text{ 且 } T_3 < T_4 (\lambda_3 = \lambda_4)$$

在相同的加工工艺下,加工耗时与等效半径比的关系为:

$$\lambda_1 < \lambda_3 \text{ 且 } T_1 < T_3 (J_1 \approx J_3); \lambda_2 < \lambda_4 \text{ 且 } T_2 < T_4 (J_2 \approx J_4)$$

可见,实验结果与模型分析结果是一致的。

## 5 结论

本文主要基于场致发射理论,对负极性 EDM 加工时工件表面的做功能量进行了建模分析,并开展了相关单因素孔加工实验,得到的主要研究结果如下:

(1) 负极性电火花加工过程中,材料去除的主要机理是由入射高能电子在工件表面流动所产生的电阻热效应。

(2) 推导并建立了负极性加工做功能量描述方程和电阻热占总做功能量的集中度方程。

(3) 理论分析与实验数据均表明,电阻热占总做功能量的比重随极间平均放电电流的提高而提高,随放电通道半径的增大而减小。小的电极表面积和大的输入功率有利于提高加工效率。

## 参考文献

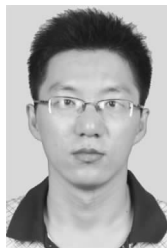
- [1] Shuyang Liu, Yumei Huang. A plate capacitor model of electric discharge machining process based on field emission theory [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(7): 653 - 659.
- [2] 刘蜀阳, 黄玉美. 基于场致发射理论的 EDM 平板电容模型及其参数 [J]. 机械工程学报, 2011, 4(17): 141 - 149.  
LIU Shu-yang, HANG Yu-mei. Plate-capacitor model of electric discharge machining process based on field electron emission theory and its parameters analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 4(17): 141 - 149. (in Chinese)

- [3] 刘蜀阳, 黄玉美. 负极性电火花加工时的电极损耗机理及积炭层的减损作用研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(4): 654 - 660.  
LIU Shu-yang, HANG Yu-mei. The study on the wear mechanism of electrode materials in negative EDM process and the effect of carbon deposition layer [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 654 - 660. (in Chinese)
- [4] P. Shankar, V K Jain, T Sundarajan. Analysis of spark profiles during EDM process [J]. Machining Science and Technology, 1997, 1(2): 195 - 217.
- [5] Kuneida M, Lauwers B, Rajurkar K P, Schumacher B M. Advancing EDM through fundamental insight into the process [J]. Annals of CIRP, 2005, 54(2): 599 - 622.
- [6] A Singh, A Ghosh. A thermo-electric model of material removal during electric discharge machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39: 669 - 682.
- [7] LIU Yu, ZHAO Fu-lin, WANG Yuan-gang, WANG Jin, HUANG Bo. Influences of skin-effect on micro-EDM, [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, (3): 362 - 367.

## 作者简介



刘蜀阳 女, 1976 年 11 月出生于四川资阳, 博士, 研究领域: 特种加工、智能控制。  
E-mail: hanliuyang@163.com



韩志宏 男, 1975 年 7 月出生于山西太原, 博士, 研究领域: 摩擦学理论与工业应用。  
E-mail: handlod@sina.cn



吴南星 男, 1968 年 1 月出生于安徽宿松, 教授/博士, 研究领域: 机械动力学及机械系统动态设计。  
E-mail: wxn1968@163.com