

DOI: 10.11973/jxgccl202112001

# 电脉冲处理及其辅助金属加工技术研究现状

孙富建<sup>1,2</sup>, 万 上<sup>1,2</sup>, 肖 罡<sup>1,2,3</sup>, 李时春<sup>1,2</sup>, 刘奕梁<sup>1,2</sup>, 万可谦<sup>3</sup>

(湖南科技大学 1. 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 2. 机电工程学院, 湘潭 411201;

3. 江西科骏实业有限公司, 南昌 330100)

**摘 要:** 电脉冲施加于金属材料时会产生热效应与非热效应, 两种效应的耦合作用能够促进位错移动和原子扩散, 提高空位扩散的迁移率, 导致金属材料的微观结构演变, 形成电致塑性效应。从电致塑性效应的基本理论出发, 综述了电脉冲处理调控金属材料组织结构的研究进展以及电脉冲在辅助塑性加工和切削加工方面的应用情况, 指出未来研究重点应集中在电脉冲处理及其辅助加工中热效应和非热效应的耦合机理以及复杂结构零部件加工时的电流密度分布等方面。

**关键词:** 电脉冲; 热效应; 非热效应; 微观结构转变; 电致塑性效应

**中图分类号:** TG115.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3738(2021)12-0001-06

## Research Status of Pulse Current Treatment and Assisted Metal Manufacturing Technology

SUN Fujian<sup>1,2</sup>, WAN Shang<sup>1,2</sup>, XIAO Gang<sup>1,2,3</sup>, LI Shichun<sup>1,2</sup>, LIU Yiliang<sup>1,2</sup>, WAN Keqian<sup>3</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material,

2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Jiangxi KMAX Industrial Co., Ltd., Nanchang 330100, China)

**Abstract:** When pulse currents are applied to metal materials, thermal and non-thermal effects will occur. The coupling of the two effects can promote dislocation movement and atom diffusion and increase the mobility of vacancy diffusion, leading to the evolution of microstructure of metal materials and forming an electroplastic effect. On the basis of the basic theory of electroplastic effects, the research progress on the pulse current treatment regulating the microstructure of metal materials and the application of pulse currents in auxiliary plastic processing and cutting processing are reviewed. It is pointed out that future researches are focused on the coupling mechanism of thermal effects and non-thermal effects in pulse current treatment and pulse current assisted processing, and current density distribution in application to complex structure parts, etc.

**Key words:** pulse current; thermal effect; non-thermal effect; microstructural transformation; electroplastic effect

## 0 引 言

电脉冲处理具有调控材料微观结构、提高塑性、减小硬度、降低加工硬化系数等特点, 被广泛应用于

金属材料塑性加工和切削加工等加工工艺。

1963 年, TROITSKII 等<sup>[1]</sup>发现运动电子可以调控金属中位错的运动, 因此开始研究电脉冲对金属位错移动的影响, 并提出了电致塑性效应。电致塑性效应是指对金属施加电脉冲时, 金属表面变形抗力大幅降低、塑性增强的现象。在发现电致塑性效应后, 各国研究者看到了电脉冲处理在金属加工领域的巨大潜力, 开始对其进行更深入的研究。我国研究人员也在 1980 年左右开始了对电致塑性效应的研究。晁月盛等<sup>[2]</sup>研究了电脉冲对非晶合金纳米晶化的影响, 在电脉冲处理后的  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  薄带

收稿日期: 2020-11-04; 修订日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51805165, 52075159); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50195); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ203001); 国家金属材料近净成形工程技术研究中心开放基金资助项目(2020013)

作者简介: 孙富建(1986—), 男, 山东聊城人, 副教授, 博士

通信作者: 肖罡教授

非晶合金中发现了局部区域形成纳米晶的现象。滕功清等<sup>[3]</sup>研究发现,电脉冲可以影响非晶合金晶化的形核率和形成速率,降低晶化温度,从而实现低温下非晶合金快速获得纳米晶的目标。将电致塑性效应应用到塑性加工中是近年来的研究重点。ZHU等<sup>[4]</sup>研制了新型的电致塑性轧制设备,通过在辊压过程中施加电脉冲,有效提升了材料塑性,提高了轧制效率。吴红兵等<sup>[5]</sup>研究认为,电脉冲处理能有效降低材料的表面硬度、屈服强度和切削力,提高切削效率,延长刀具寿命。

在金属材料加工时施加电脉冲,电脉冲产生的无序原子波动能满足相变过程中能量的阈值,加快原子扩散和位错移动,快速开启合金的再结晶,优化材料的微观结构,细化晶粒,消除晶格缺陷与残余应力<sup>[6]</sup>,降低材料强度和硬度,提高塑性。作者从电脉冲对金属材料微观结构演变的影响和电致塑性效应的基本理论出发,综述了电脉冲处理研究现状及电脉冲在塑性加工、切削加工工艺等方面的应用。

## 1 电脉冲相关理论

电脉冲辅助金属加工主要利用的是电致塑性效应。当前的主流观点认为,电致塑性效应是热效应和非热效应耦合作用的结果,热效应和非热效应对原子扩散、位错移动、晶界滑移的促进作用产生了电致塑性效应。热效应是由于材料自身存在电阻而产生的。材料在通电时,因自身存在电阻而产生电阻热,使得温度升高;温度升高会导致材料发生软化,流动应力降低,并且有利于提高拉伸时的伸长率<sup>[7]</sup>。这种因热效应而产生的温升<sup>[8]</sup>可表示为

$$\Delta T = \rho J^2 t_p / (C_p d) \quad (1)$$

式中: $\Delta T$ 为温升; $\rho$ 为材料电阻率; $J$ 为电流密度; $t_p$ 为脉冲持续时间; $C_p$ 为定压热容; $d$ 为材料密度。

非热效应主要是由电子风力导致的。电子风理论认为电脉冲产生的定向移动的电子对位错施加了一定的作用力(即电子风力);移动电子与晶格位错发生相互交错,推动了位错的迁移,加剧了晶格位错作用。这种作用有利于材料的再结晶形核、抗变形应力的下降和塑性的提高<sup>[9]</sup>。再结晶形核率的增加有利于晶粒细化,从而提升材料性能。电子风力的表达式<sup>[10]</sup>为

$$F_{ew} \approx \frac{b}{4} \left( \frac{v_e}{v} - 1 \right) \frac{v}{v_F} \frac{\partial n_e}{\partial \mu} \Delta^2 \quad (2)$$

式中: $F_{ew}$ 为电子风力; $v$ 为位错运动速率; $v_e$ 为电子运动速率; $v_F$ 为费米面电子运动速率; $n_e$ 为电子

密度; $\mu$ 为化学位; $b$ 为柏氏矢量; $\Delta$ 为变形能常量。

热效应和非热效应的共同作用促进了金属材料内部的原子扩散,降低了位错运动的激活能,有利于修复晶格缺陷、降低变形抗力、促进塑性变形、降低残余应力<sup>[11]</sup>。原子扩散通量 $F$ 的表达式<sup>[12]</sup>为

$$F = F_t + F_a = \frac{2\pi M}{\Omega \ln(R/r)} \left( 1 + \frac{c}{c_0} \right) + \frac{2NMZe\rho f j_m \tau_p}{\pi k T} \quad (3)$$

式中: $F_t, F_a$ 分别为由热效应和非热效应引起的原子扩散通量; $M$ 为晶格扩散系数; $c_0$ 为平均空位浓度; $c$ 为过饱和空位浓度; $\Omega$ 为原子体积; $r, R$ 分别为对应 $c_0$ 和 $c_0 + c$ 的位错距离; $N$ 为原子密度; $Z$ 为有效化学价; $e$ 为单原子所带电荷; $k$ 为玻尔兹曼常数; $j_m, f, \tau_p$ 分别为电脉冲的有效电流、频率和持续时间; $T$ 为热力学温度。

金属零部件在制造过程中一般需要通过热处理来改变内部微观结构,消除残余应力,调控力学性能,从而改善可加工性、提高零部件服役寿命。传统的热处理工艺通过热辐射加热工件,时间长、能耗大、人力成本高,并且长时间的高温会导致工件精度难以控制、材料组织粗化而性能恶化<sup>[13]</sup>。电脉冲处理同样可以起到调控金属材料组织的作用:电子流动为再结晶提供额外动力与能量,可以提高再结晶形核率,从而达到细化晶粒的效果;电脉冲产生的热效应与非热效应还可以促进位错移动以及原子和空位扩散,弥补晶格缺陷,能够在相对较低的温度下改善金属的微观结构。

电脉冲的电致塑性效应首先被应用于辅助金属材料的塑性加工。定向移动的电子与晶格位错发生相互交错,能够降低材料的变形抗力,提高塑性,并且有效消除金属塑性加工过程中产生的各向异性;原子扩散有利于修复晶格缺陷,可以减免塑性加工中的中间退火工序<sup>[14-15]</sup>,减少塑性加工时材料中出现的微小裂纹,提高工件质量。

由于电致塑性效应能有效提升金属材料的塑性,研究人员开始将电脉冲应用到金属材料切削过程。在辅助切削加工时,电脉冲产生的特定频率使得工件的受迫振动接近于拓扑原子之间相互作用的频率,两者因而产生共振<sup>[16]</sup>,促使摩擦颗粒的动能转化为振动周期下的动能,最终转化为热能<sup>[17]</sup>;受热后材料强度降低,冷作硬化程度减轻,工件与刀具接触区域的塑性变形能力提高。非热效应能降低切削温度,减轻刀具的黏结磨损<sup>[18-19]</sup>,增强刀具与工件之间的润滑性。热效应与非热效应的共同作用减

小了切削力并减轻了切削力的波动,减弱了刀具的崩刃磨损<sup>[20-21]</sup>,增加了切削过程的稳定性。

## 2 电脉冲处理的研究现状

BEN等<sup>[22]</sup>对经860℃油淬+500℃回火1h处理后的AISI 4340钢进行电脉冲处理,发现在较高的放电电压(9,10 kV)下,试验钢中形成孪晶马氏体,显微硬度明显增大;更高的放电电压可以诱导钢快速硬化,固溶原子、位错和某些纳米双马氏体的复合强化作用是导致其快速硬化的主要原因。HAO等<sup>[23]</sup>和CHANG等<sup>[24]</sup>研究发现,在电脉冲作用过程中,钢的显微组织发生变化,在高放电电压下呈现马氏体形态。因此,电脉冲处理可以对具有不同电阻率和相变可能性的多相材料进行微观结构调整。

LIU等<sup>[25]</sup>分析了轧制Mg-3Al-1Zn(AZ31)合金在电脉冲处理过程中的组织演变,认为电脉冲处理促进了合金的再结晶,改善了轧制镁合金的组织;在359 K温度以下,经低占空比、高电流密度电脉冲处理320 s的合金可获得平均晶粒尺寸约为2 μm的微细晶粒结构;电致塑性效应中的非热效应加速了封闭环境下变形合金再结晶的成核速率,而再结晶晶粒的后续生长依赖于热效应,因此为了获得细化的再结晶晶粒,在电脉冲处理过程中应加强非热效应并减弱热效应。TROITSKII等<sup>[26]</sup>利用电脉冲对Fe<sub>78</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>9</sub>非晶合金进行处理时发现:调整电脉冲密度可以控制晶核的形成与长大,控制电脉冲参数可以使合金保持相应的非晶特征;电脉冲具有弛豫非晶合金显微组织的作用。与高温退火处理不同,电脉冲处理可在较低温度下提高材料晶化过程中的形核率,促进再结晶的发生。电脉冲的施加也会促进晶粒的长大,但是晶粒生长时间很短,长大程度有限。在一定的温度范围内,电脉冲处理甚至可以使金属材料在低于晶化温度下获得纳米晶。

MIZUBAYASHI等<sup>[27]</sup>研究了电脉冲对非晶薄带晶化过程的影响,发现当电脉冲密度大于某一阈值时,非晶薄带的电阻率发生急剧变化,产生结构弛豫现象,其晶化速率提高;低于该阈值时,随电流密度增大,非晶薄带的弹性模量增大。LAI等<sup>[28]</sup>在对采用液态急冷单辊法制备的非晶薄带施加电脉冲后发现,电脉冲可以在不改变其宏观非晶特性的前提下改变其微观结构;当电脉冲的温升较低时,电脉冲作用时间的延长或者频率的提升都会促进金属内的

原子迁移,使得非晶合金产生结构弛豫现象。

MA等<sup>[29]</sup>研究发现:在较低的放电电压(0~9 kV)下,电脉冲处理能够稳定纳米层状奥氏体钢中的纳米层状结构,恢复高密度位错,使得抗拉强度和显微硬度分别提高了6.9%和7.4%;在较高放电电压(9~13 kV)下,电脉冲促进再结晶晶粒的形核和长大,导致纳米层状奥氏体钢发生软化。

ZHOU等<sup>[30]</sup>提出循环相变晶粒细化机制以解释电脉冲细化晶粒原理:电脉冲产生的高温促使低碳钢中粗大的α相在升温过程中转化成为γ相,而由于电脉冲的加热速率快,升温时间短,γ晶粒还未长大便开始冷却,在冷却过程中发生相转变形成细小的α相;相比传统的升温→降温过程,电脉冲处理可降低热力学势垒从而增强形核作用,导致的晶粒细化效果更明显。

YE等<sup>[31]</sup>的研究结果表明:与传统热处理相比,电脉冲处理时工业纯钛条的再结晶温度更低;当控制电脉冲频率在一定范围内时,电脉冲处理可提高再结晶晶粒的体积分数,能够在保持抗拉强度不变的前提下提高延展性能;但是过高的电脉冲频率会导致再结晶晶粒粗大,力学性能下降;在合理的参数下,电脉冲处理可替代钛带材的中间软化退火工艺。

## 3 电脉冲辅助塑性加工的研究现状

塑性加工是指通过塑性变形获得所需形状、尺寸、组织和性能的工件的一种金属加工技术,以往常称压力加工<sup>[32]</sup>。金属塑性加工的方法很多,根据加工时工件的受力和变形方式,可分为锻造、轧制、挤压、拉拔、拉深、弯曲、剪切等。目前电脉冲被广泛应用于金属材料的塑性加工,由此而形成了一些新型复合加工工艺,包括电塑性拉拔、电塑性弯曲、电塑性轧制、电塑性拉深等。这些工艺都是在传统加工工艺的基础上对模具或者材料施加电脉冲,以达到利用电致塑性效应来改进材料性能的目的。目前,国内外学者对电脉冲在钨、不锈钢、黄铜合金、镁铝合金等材料塑性加工过程中的应用开展了系列试验与研究<sup>[33]</sup>。这些研究结果表明:电脉冲的施加降低了金属变形所需要的外加作用力,作用力的下降与电流密度、脉冲频率以及电流方向有关。电脉冲辅助塑性加工工艺可以省去传统加工工艺的一些工序,如传统拉拔工艺中的软化退火、酸洗等工序,从而起到提高生产效率、降低成本、保护环境的作用。

XIE等<sup>[34]</sup>在研究直流电脉冲密度和电流频率

对 AZ31B 镁合金薄板回弹行为的影响时发现,电流频率或电流密度越高,回弹角越小,弯曲处的晶粒尺寸越小,其中电流频率对晶粒尺寸的影响更大。KIM 等<sup>[35]</sup>利用单电脉冲辅助塑性加工技术对超高强度钢进行冲裁,与冷下料相比,电脉冲辅助下料和局部电阻加热下料的抛光表面精度略有增加,电脉冲辅助冲裁的截面更平整光滑;相比于局部电阻加热冲裁,电脉冲辅助冲裁在相同温度条件下的冲裁载荷更小,同时电脉冲辅助冲裁的时间也略有缩短;电脉冲辅助冲裁所减少的冲裁载荷达到了冷冲裁的 85%,这点在 1.2 GPa 超高强度钢的冲裁加工中尤为重要。

在 2024-T4 铝合金等高强度轻质材料的冲压过程中,冲压模具的严重磨损和边缘断裂是研究人员关注的主要问题。根据施加电流可以降低金属在冲压过程中的流动应力<sup>[36]</sup>、提高金属延性、促进在退火温度以下位错湮没的原理,TANG 等<sup>[20]</sup>在不同的冲压阶段对 2024-T4 铝合金施加了电脉冲,结果发现:冲压载荷得以降低,冲压断面的表面质量得到提高,并且由于电脉冲诱发了退火效应,2024-T4 铝合金的硬度各向异性 and 穿孔边缘的应变硬化被部分消除;由于电脉冲的施加消除了边缘应变硬化,抑制和修复了冲压边缘附近的微裂纹和微孔洞,2024-T4 铝合金的极限拉伸载荷提高。

#### 4 电脉冲辅助切削加工的研究现状

切削加工是指利用切削工具(包括刀具、磨具和磨料)把坯料或工件上多余的材料层切除,使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量的加工方法。传统切削加工技术易造成位错缠结,使得金属表面出现较厚的加工硬化层,导致较大的切削力波动和工件残余应力,加大刀具磨损。在切削加工过程中施加电脉冲,产生的电致塑性效应增加了可动位错,产生的热效应提高了试样表面温度,促进了原子扩散和位错移动,使得材料表面塑性提高,切削力降低<sup>[37-40]</sup>。张硕等<sup>[41]</sup>在研究淬火态 GCr15 钢的电脉冲辅助切削加工时发现,引入电脉冲后的主切削力比传统切削工艺的主切削力降低了 25%。

表面粗糙度是衡量工件表面加工质量的一个重要因素。王海波<sup>[42]</sup>采用电脉冲辅助车削工艺对 304 不锈钢进行加工,在一定参数范围内,电脉冲的施加不仅能够减小主切削力,还能够降低表面粗糙度;表面粗糙度下降的主要原因是电致塑性效应导致切削

表层塑性降低,使得主切削力和刀具摩擦力减小;电流参数较大时表面粗糙度增加是由于过高的塑性形成了积屑瘤和切削鳞刺,导致切削性能下降。

#### 5 结束语

施加电脉冲后,材料中会产生热效应和非热效应,热效应作用提高了工件温度,非热效应形成电子风力,二者的耦合作用促进了原子和位错的移动以及晶界的滑移。相比于传统热处理,电脉冲处理时的升温速率快、效率高,能够有效抑制晶粒生长,在短时间内完成对金属材料微观结构的调控;相比于传统塑性加工,电脉冲辅助塑性加工通过加快原子和位错的移动,能够有效降低流动应力和工件残余应力,提高塑性变形的质量和效率;相比于传统切削加工,电脉冲辅助切削加工能够提升工件塑性,降低切削力和表面粗糙度,从而降低刀具磨损、提升工件表面质量。

电脉冲通过促进原子、位错移动,在组织调控、辅助加工等方面均表现出了明显的优点。但是,当在复杂结构零部件上施加电脉冲时,零部件的形状会影响电脉冲的分布,导致集肤效应的产生,所以目前电脉冲辅助加工技术主要应用于形状简单零部件上。此外,电脉冲相关理论的研究尚不够深入,无法系统地对生产实践进行指导。因此,未来应进一步完善电脉冲处理和电脉冲辅助加工理论研究,包括电脉冲处理和电脉冲辅助加工过程中热效应、非热效应耦合机理及各自影响,电脉冲集肤效应的成因,电脉冲在大型、复杂结构零部件上的分布情况等。在理论研究的基础上,开展大型、复杂结构零部件的电脉冲处理及其辅助加工应用研究。

#### 参考文献:

- [1] TROITSKII O A, LIKHTMAN V I. The anisotropy of the action of electron and  $\gamma$  radiation on the deformation process of brittle zinc single crystals in the brittle state[J]. Dokl Akad Nauk SSR, 1963, 148: 332.
- [2] 晁月盛,滕功清,耿岩,等. 非晶合金  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  在脉冲电流作用下的单相晶化[J]. 物理学报, 1997, 46(7): 122-127.  
CHAO Y S, TENG G Q, GENG Y, et al. Single phase crystallization in amorphous  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  alloy induced by electropulsing[J]. Acta Physica Sinica, 1997, 46(7): 122-127.
- [3] 滕功清,晁月盛,赖祖涵,等.  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  非晶合金纳米晶化的新方法[J]. 科学通报, 1994, 39(11): 974-976.  
TENG G Q, CHAO Y S, LAI Z H, et al. A new method for nano crystallization of  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  amorphous alloy[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(11): 974-976.

- [4] ZHU R, TANG G. The improved plasticity of NiTi alloy via electropulsing in rolling[J]. *Materials Science and Technology*, 2017, 33(5): 546-551.
- [5] 吴红兵, 史云龙, 杜雪, 等. 电脉冲处理对钛合金超精密切削的影响[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 226-229.  
WU H B, SHI Y L, DU X, et al. Effects of electropulsing treatment on ultra-precision cutting of titanium alloy Ti6Al4V[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 226-229.
- [6] 叶肖鑫. 高能电脉冲对生物医用钛合金制备及性能影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
YE X X. The effects of high-energy electropulsing on the preparation and properties of biomedical titanium alloy[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [7] 袁同心, 江鹏, 吴王平. 电塑性加工研究进展[J]. *铸造技术*, 2017, 38(4): 752-757.  
YUAN T X, JIANG P, WU W P. Research progress of electroplastic processing[J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(4): 752-757.
- [8] OKAZAKI K, KAGAWA M, CONRAD H. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium[J]. *Materials Science and Engineering*, 1980, 45(2): 109-116.
- [9] CONRAD H, GUO Z, SPRECHER A F. Effects of electropulse duration and frequency on grain growth in Cu[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, 24(2): 359-362.
- [10] KAGANOV M I, KRAVCHENKO Y V, NATSIK V D. Dislocation dragging by electrons in metals[J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1974, 16(6): 878-891.
- [11] GUAN L, TANG G Y, CHU P K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals[J]. *Journal of Materials Research*, 2010, 25(7): 1215-1224.
- [12] ZHU Y H, JIANG Y B, LIU X M. Electropulsing induced circular phase transformations of a cold-deformed ZA27 alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 737: 630-636.
- [13] XU X F, ZHAO Y G, WANG X D, et al. Effect of rapid solid-solution induced by electropulsing on the microstructure and mechanical properties in 7075 Al alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 654: 278-281.
- [14] TANG G Y, ZHANG J, YAN Y J, et al. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 137(1/2/3): 96-99.
- [15] XU Z H, TANG G Y, TIAN S Q, et al. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182(1/2/3): 128-133.
- [16] POSTNIKOV S N. Electrophysical and electrochemical phenomena in friction, cutting, and lubrication[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1978.
- [17] 陈龙. 金属模具表面高效低成本的精密加工新技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
CHEN L. Research on the efficient, low-cost and high resolution processing technology on metallic mold surface[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [18] RAHMAN RASHID R A, SUN S, WANG G, et al. An investigation of cutting forces and cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 63: 58-69.
- [19] RAHMAN RASHID R A, BERMINGHAM M J, SUN S, et al. The response of the high strength Ti-10V-2Fe-3Al beta titanium alloy to laser assisted cutting[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(2): 461-472.
- [20] TANG Z J, DU H, LANG L H, et al. Experimental investigation into the electropulsing assisted punching process of 2024T4 aluminum alloy sheet[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 253: 86-98.
- [21] MIGUÉLEZ M H, SOLDANI X, MOLINARI A. Analysis of adiabatic shear banding in orthogonal cutting of Ti alloy[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 75: 212-222.
- [22] BEN D D, YANG H J, MA Y R, et al. Rapid hardening of AISI 4340 steel induced by electropulsing treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 725: 28-32.
- [23] HAO Q G, QIN S W, LIU Y, et al. Relation between microstructure and formability of quenching-partitioning-tempering martensitic steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 671: 135-146.
- [24] CHANG S N, ANDRÉMEYERS M. Martensitic transformation induced by a tensile stress pulse in Fe-22.5wt%Ni-4wt%Mn alloy[J]. *Acta Metallurgica*, 1988, 36(4): 1085-1098.
- [25] LIU Y, FAN J F, ZHANG H, et al. Recrystallization and microstructure evolution of the rolled Mg-3Al-1Zn alloy strips under electropulsing treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 622: 229-235.
- [26] TROITSKII O A. Effect of the electron state of a metal on its mechanical properties and the phenomenon of electroplasticity[J]. *Strength of Materials*, 1977, 9(1): 35-45.
- [27] MIZUBAYASHI H, OKAMOTO T. Low-temperature homogeneous deformation in amorphous alloys induced under electropulsing[J]. *Materials Science Forum*, 1999, 304/305/306: 355-360.
- [28] LAI Z H, CONRAD H, TENG G Q, et al. Nanocrystallization of amorphous Fe-Si-B alloys using high current density electropulsing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 287(2): 238-247.
- [29] MA Y R, YANG H J, TIAN Y Z, et al. Hardening and softening mechanisms in a nano-lamellar austenitic steel induced by electropulsing treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 713: 146-150.
- [30] ZHOU Y Z, ZHANG W, WANG B Q, et al. Grain refinement and formation of ultrafine-grained microstructure in a low-carbon steel under electropulsing[J]. *Journal of Materials*

- Research, 2002, 17(8): 2105-2111.
- [31] YE X X, TSE Z T H, TANG G Y, et al. Retracted: Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical properties of cold-rolled pure titanium strips[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 27-32.
- [32] 董菲菲. 薄壁钢管管绕弯成形工艺的有限元数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- DONG F F. Finite element simulation research of thin-walled steel tube rotary-draw bending forming process [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [33] KOPANEV A A. The nature of the electroplastic effect in metals[J]. Strength of Materials, 1991, 23(1): 55-59.
- [34] XIE H Y, WANG Q, LIU K, et al. Investigation of influence of direct-current pulses on springback during V-bending of AZ31B magnesium alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 321-327.
- [35] KIM W, YEOM K H, THIEN N T, et al. Electrically assisted blanking using the electroplasticity of ultra-high strength metal alloys[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 273-276.
- [36] XIE H Y, WANG J F, PENG F, et al. An investigation of electroplastic effect on formability of AZ31B sheet metal[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1567: 950-953.
- [37] 田雪, 刘金旭, 李树奎, 等. 电脉冲热处理对网篮组织热轧 TC4 合金力学性能和绝热剪切特性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 202-206.
- TIAN X, LIU J X, LI S K, et al. Effects of electric pulse heat treatment on mechanical properties and adiabatic shear banding of hot-rolled lamellar TC4 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 202-206.
- [38] 郑建毅, 何闻, 施彦彬. 电脉冲消除 45 钢淬火件的残余应力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(8): 1407-1411.
- ZHENG J Y, HE W, SHI Y B. Eliminating residual stress in 45 steel quenching specimens by electrical pulse[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8): 1407-1411.
- [39] 黄金亮, 曹兴国, 孙万昌, 等. 电脉冲快速退火对铁基非晶合金性能的影响[J]. 材料开发与应用, 1996, 11(5): 24-29.
- HUANG J L, CAO X G, SUN W C, et al. Effect of electric pulse rapid annealing upon properties of Fe-base amorphous alloy[J]. Development and Application of Materials, 1996, 11(5): 24-29.
- [40] LIU X L, WEN D H, LI Z J, et al. Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/2/3): 217-221.
- [41] 张硕, 王海波, 张冰, 等. 高能电脉冲对淬火态 GCr15 钢切削性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(2): 574-580.
- ZHANG S, WANG H B, ZHANG B, et al. Effect of electropulsing assisted cutting process on cutting properties of quenched GCr15 bearing steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(2): 574-580.
- [42] 王海波. 304 不锈钢的电脉冲辅助车削与声电耦合表面加工研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- WANG H B. Research on the electropulsing assisted turning and ultrasonic-electropulsing coupling surface process for the 304 stainless steel[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.

## 中文核心期刊《机械工程材料》2022 年征订启事

《机械工程材料》杂志创刊于 1977 年, 由上海材料研究所主办, 为中国机械工程学会材料分会会刊, 是国内外公开发行的有关工程材料研究与生产应用的专业技术期刊, 是中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

《机械工程材料》杂志报道内容涵盖金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料以及复合材料等传统及新型工程材料的最新研究及应用成果, 主要栏目有综述、试验研究、新材料新工艺、材料性能及应用、纳米材料、残余应力、物理模拟与数值模拟、失效分析等, 可供从事与材料生产研究相关的研发与技术人员阅读参考。

《机械工程材料》杂志为大 16 开, 每期 100 页以上, 每月 20 日出版, 国际标准连续出版物号为 ISSN 1000-3738, 国内统一连续出版物号为 CN 31-1336/TB, 国际期刊刊名代码(CONDEN)为 JGCAEL。国内各地邮政局(所)或本刊发行

部均可订阅, 邮发代号 4-221, 发行价 22 元/册, 264 元/年, 可以破季破年订阅; 本刊发行部还提供电子期刊订阅服务, 电子期刊为 PDF 格式, 通过 E-mail 发送给读者, 订阅价为 90 元/年。

### 欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

投稿网址: <http://www.mat-test.com/Submission>

联系地址: 上海市虹口区邯郸路 99 号。邮编: 200437

编辑部: 021-65556775-368, 021-65541496

mem@mat-test.com

发行部: 021-65556775-311, 021-65527634

wm@mat-test.com

广告部: 021-65556775-319, 021-65544943

admem@mat-test.com

《机械工程材料》编辑部