

DOI: 10.3901/JME.2022.10.068

极低频电脉冲处理对 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金力学性能的影响规律与机理^{*}

宋燕利^{1,2,3} 郝川川^{1,2} 宁世儒^{1,2} 吴文林^{1,2} 刘 鹏⁴

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉 430070;

2. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心 武汉 430070;

3. 武汉理工大学湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心 武汉 430070;

4. 东风(武汉)实业有限公司 武汉 430040)

摘要: 电流辅助塑性成形是国际先进制造领域的研究热点,也是高强轻质合金精确成形制造的重要发展方向。研究极低频电脉冲对 7075-T6 铝合金力学性能的影响规律。结果表明,通过电脉冲辅助拉伸,7075-T6 铝合金抗拉强度降低,试样断后延伸率最高可提升 32.3%,且电流密度和持续时间与应力降之间可建立线性关联关系。揭示电-力耦合时机对铝合金塑性性能的影响机制,在弹性变形阶段施加电脉冲,高速移动电子流会破坏原子间结合力,导致裂纹源提前出现,使铝合金塑性性能降低;而在塑性变形阶段施加电脉冲,高速移动电子流会促进位错运动,提升铝合金塑性性能。研究结果有助于推进高强铝合金在航空航天、舰船、高铁、汽车等领域的广泛应用。

关键词: 电塑性; 高强铝合金; 力学性能; 电-力耦合时机

中图分类号: TG156

Effect of Extremely Low Frequency Pulse Current Treatment on the Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy

SONG Yanli^{1,2,3} HAO Chuanchuan^{1,2} NING Shiru^{1,2} WU Wenlin^{1,2} LIU Peng⁴

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

3. Hubei Engineering Research Center for Green & Precision Material Forming,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

4. Dongfeng (Wuhan) Industry Co., Ltd., Wuhan 430040)

Abstract: Current-assisted plastic forming is a research hotspot in the field of international advanced manufacturing, and it is also an important development direction for precision forming and manufacturing of high-strength lightweight alloys. The effect of extremely low frequency electric pulse on the mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy is studied. The results show that the tensile strength of 7075-T6 aluminum alloy is reduced by electric pulse-assisted stretching, the elongation of the sample after fracture can be increased by 32.3%, and a linear relationship can be established between the current density and duration and the stress drop. The mechanism of the influence of the timing of electrical-mechanical coupling on the plastic properties of aluminum alloys is revealed. When electrical pulses are applied during the elastic deformation stage, high-speed moving electron flow will destroy the bonding

^{*} 国家重点研发计划(2020YFA0714900)、国家自然科学基金(51975440)、湖北省重点研发计划(2020BAB143)、新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地(B17034)和教育部创新团队发展计划(IRT_17R83)资助项目。
20210530 收到初稿, 20210920 收到修改稿

force between atoms, leading to the early appearance of crack sources and reducing the plastic properties of aluminum alloys. While applying electrical pulses during the plastic deformation stage, the high-speed moving electron flow will promote the movement of dislocations and improve the plastic performance of aluminum alloy materials. The research results will help promote the wide application of high-strength aluminum alloys in aerospace, ships, high-speed rail, automobiles and other fields.

Key words: electroplasticity; high-strength aluminum alloy; mechanical properties; timing of electro-mechanical coupling

0 前言

7xxx 系(Al-Zn-Mg-Cu)铝合金是析出强化相合金, 具有高强度、低密度、高断裂韧性和良好的耐蚀性等优点, 是极具潜力的高强轻质铝合金材料, 但其塑性较低、室温塑性成形困难等, 严重限制了其在航空、航天、高铁、汽车等领域的广泛应用^[1-2]。针对这一问题, 国内外诸多学者开始将高强铝合金材料塑性成形方法从传统的力热能场成形逐渐转变为多能量场复合成形。

电 流 辅 助 成 形 技 术 (Electrically-assisted forming, EAF)作为一种先进的高能率塑性成形技术, 为高强铝合金构件冲压、锻造、轧制等提供新方法。电塑性效应^[3](Electroplastic effect, EPE)描述了由于电流作用引起的变形抗力下降、塑性增加的现象, 它是电流辅助成形技术的理论依据, 最早由苏联学者 TROITSKII 等^[4]对锌单晶的单轴拉伸试验发现的。围绕电塑性效应的内部机理, 学术界开展了一系列相关研究。TROITSKII^[5]和 ROH 等^[6]研究了电流密度、频率以及能量密度对材料流变应力^[7]、蠕变^[8]等材料变形行为的影响。STEPANOV 等^[9]对金属材料在高密度电脉冲作用下的剪应力松弛过程进行了分析, 并提出了一种现象学模型来描述金属材料在发生应力松弛时的行为。HARIHARAN 等^[10]提出了基于位错密度的塑性变形本构模型, 该模型可以预测铝合金材料在恒直流和电脉冲作用下的力学行为。KRAVCHENKO^[11]从理论上研究了影响金属塑性变形的电子通量与位错之间的相互作用。邓德伟等^[12]利用脉冲电流对钛合金中的深层裂纹进行处理, 裂纹中出现了部分愈合区。高殿奎等^[13]用脉冲放电的方法截至了 3Cr2W8V 热疲劳裂纹的亚临界扩展, 消除了应力集中, 提高了裂尖处的断裂韧度。

目前, 对于电塑性效应作用机理主要有以下三种理论: ① 电子风假说, TROITSKII 等^[14]和 CONRAD 等^[15-16]认为位错会受到电子定向移动产生的作用力——电子风力, 加速位错运动, 提高金

属塑性成形能力; ② 位错热激活假说, CONRAD 等^[17]根据之前研究提出电流会降低激活体积和自由能, 使位错运动所需的能量大大降低, 打开位错间的缠结, 并促使位错克服滑移面上的障碍向前运动, 显著地提高了金属的塑性应变率。BUMGARDNER 等^[18]将电流降低位错运动的能垒, 促进位错脱钉作为电塑性效应的机制, 该机制通过增加可移动位错的数量来改善铝合金的塑性行为; ③ 磁致塑性效应假说, MOLOTSKII 等^[19]从电流产生感应磁场的角度提出了磁塑性效应理论来解释电塑性效应, 理论认为电流产生感应磁场对位错的脱钉速率产生了影响。王宏明等^[20]将 3 T 脉冲磁场耦合作用于 AZ31 镁合金的拉伸试验中, 结果试样抗拉强度和延伸率分别提高了 2.2%和 28.7%, 且促进了再结晶的发生。近来, 越来越多的学者认为, 电塑性效应是一种综合效应^[21]。

综上所述, 国内外已有很多研究者在电致塑性效应方面做了大量研究工作, 也取得了重要的研究进展, 但电脉冲作用对金属材料塑性变形规律的影响与机理阐述尚不完善, 并且相关研究中主要描述电脉冲对金属塑性变形阶段的作用机理, 尚未见到有关在金属弹性变形阶段施加电脉冲对后续塑性变形行为影响的报道。

本文通过开展极低频电脉冲辅助单向拉伸试验, 阐述极低频电脉冲处理对铝合金塑性变形行为的影响, 揭示弹性和塑性变形阶段施加电脉冲作用对铝合金塑性性能影响的内部机理。

1 试验方案

1.1 试样材料与试样制作

本次研究所采用的材料为 7075 铝合金板, 热处理状态为 T6 态, 厚度 1.6 mm。合金的化学组成如表 1 所示^[22], 屈服强度在 457~474 MPa, 抗拉强度在 534~550 MPa。为了便于试样与电极相连以及考虑电流密度要求, 沿板料轧制方向利用激光线切割得到试验所需的拉伸试样, 具体的试样尺寸形状如图 1 所示。

表 1 7075-T6 铝合金板料化学成分(质量分数) %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.4	0.35	1.52	0.092	2.66	0.22	5.28	0.029	其余

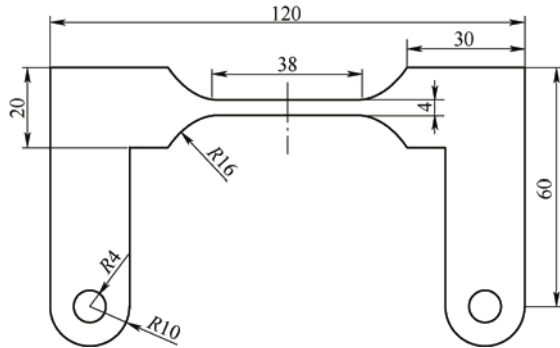


图 1 极低频电脉冲辅助单向拉伸试验试样示意图(mm)

1.2 电脉冲辅助单向拉伸试验

试验开始前先将拉伸试样通过板料拉伸的模具夹头安装固定在 Zwick/Roell Z020 万能材料试验机上, 利用螺栓将试样与纯铜电极相连, 保证电极与试样充分接触, 使脉冲电源-电极-试样构成闭环回路。所采用的脉冲电源可提供试验过程中所需的极低频电脉冲, 脉冲持续时间和脉冲周期可调, 所输出的电脉冲形式为脉冲方波, 如图 2 所示。同时为避免试验过程中电流破坏试验机的力学传感器, 在模具与拉伸机接头处进行绝缘防护措施。在试验开始后, 启动拉伸机的同时打开脉冲电源, 拉伸试样位移-时间变化如图 2 中斜直线所示, 直线斜率为万能拉伸机的单向拉伸速率, 本次试验中该速率保持恒定为 2 mm/min。整个试验过程实物图如图 3 所示, 实现了电脉冲冲击和拉伸变形同步进行, 即电力耦合作用下的塑性变形。此外在试验过程中采用红外热像仪对试样表面温度变化进行测量, 试验环境温度保持为室温(24 ℃)。

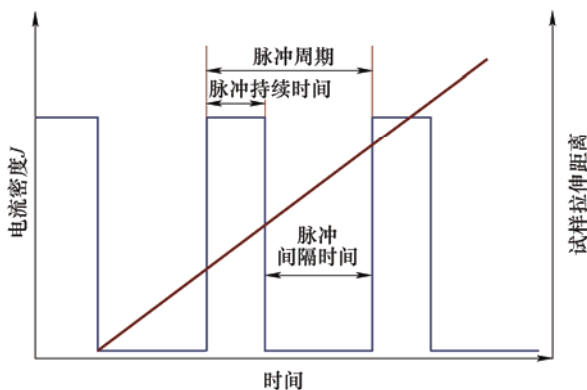


图 2 脉冲电流密度和试样拉伸距离随时间变化示意图

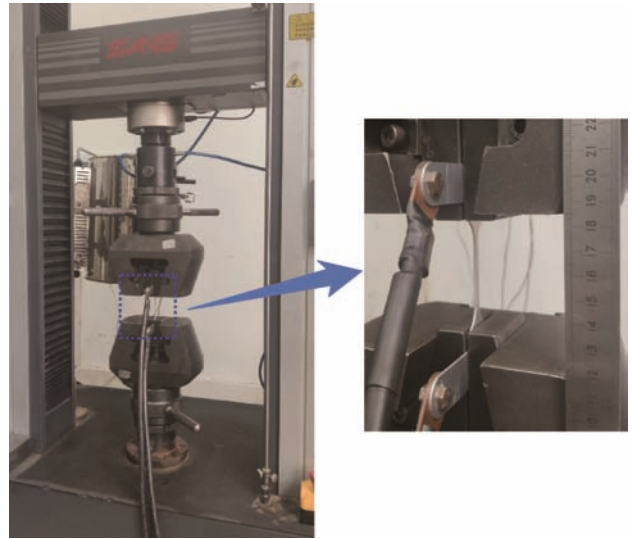


图 3 电脉冲辅助单向拉伸试验实物图

为研究脉冲电流密度 J 、脉冲持续时间 t_d 、脉冲周期 T 对 7075-T6 铝合金塑性变形性能的影响。以电脉冲的三个主要参数(电流密度、持续时间、脉冲周期)为变量, 综合考虑电流密度阈值效应与试验装备等因素, 选取三个不同的脉冲电流密度、脉冲周期值设置试验方案, 具体如表 2 所示。为保证试验数据真实可靠, 将每组试验重复进行 3 次, 选取重复性最好的试验结果进行分析。

表 2 试验方案

试验 标号	电流密度 $J/(A/mm^2)$	脉冲持续时间 t_d/s	脉冲周期 T/s
1	50	1	10
2	50	1	30
3	50	1	50
4	50	2	10
5	50	2	30
6	50	2	50
7	70	1	10
8	70	1	30
9	70	1	50
10	90	1	10
11	90	1	30
12	90	1	50

为分析不同电脉冲施加时间对铝合金材料力性能的影响, 设置对比试验, 一组试验在拉伸开始时施加电脉冲, 另一组对比试验在拉伸进行 50 s 后即板料处于塑性变形阶段时施加电脉冲, 同时考虑到材料弹性变形阶段时间短, 故电脉冲周期选择 10 s。

1.3 拉伸断口扫描

试样拉断之后, 制备断口扫描试样, 使用丙酮超声振荡清洗试样后, 使用蔡司 Zeiss Auriga 热场发射扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)进行观察, 本文中 SEM 的成像模式均为二次电子成像, 以获得较高的清晰度, 将加速电压均设置为 5 kV。分别将拉伸试样的断口形貌放大 50 倍、100 倍和 500 倍进行观察。

2 电脉冲辅助单向拉伸试验结果分析

无电拉伸与电脉冲辅助拉伸试验结果如图 4 所示。在塑形变形阶段, 脉冲持续时间内的电流流过后, 铝合金材料应力值会突然下降, ROH 等^[23]将这种现象称之为应力降。当电流流过进入脉冲间隔时间时, 应力值斜线上升, 随后进入屈服与强化阶段, 完成一个局部应力-应变曲线, 之后在第二次电脉冲冲击到来后继续这样一个循环, 直至试样断裂, 最终铝合金应力-应变曲线由多个局部曲线图构成, 整体上呈现独特的锯齿状。该现象与 HARIHARAN 等^[24]得到的试验现象是一致的。此外, 在经过一次

电脉冲冲击后, 铝合金在塑性强化阶段会出现塑性失稳现象, 分布有稀疏的应力锯齿形状, 应力跌幅较小, 这种现象被称为 Portevin-Le Chatelier(PLC)效应^[25-26], 说明产生了局部不稳定的塑性流动。

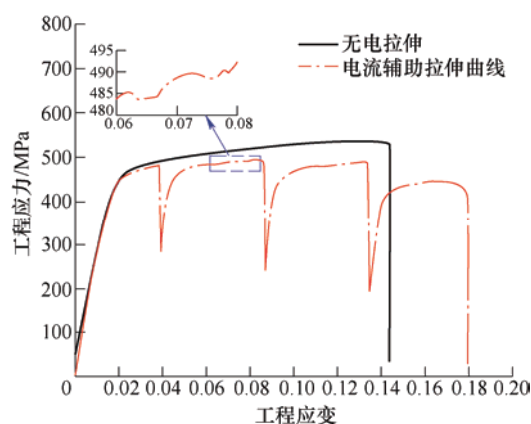


图 4 无电拉伸与电脉冲辅助拉伸应力-应变曲线

2.1 电脉冲辅助拉伸与等温热拉伸试验结果比较

通过热成像仪测得电脉冲辅助拉伸过程中试样温度变化图, 如图 5 所示。电脉冲通过时, 铝合金温升峰值大小基本相同, 70 A/mm^2 和 90 A/mm^2 脉冲电流密度下试样最大温升分别为 88.3°C 与 130.4°C 。

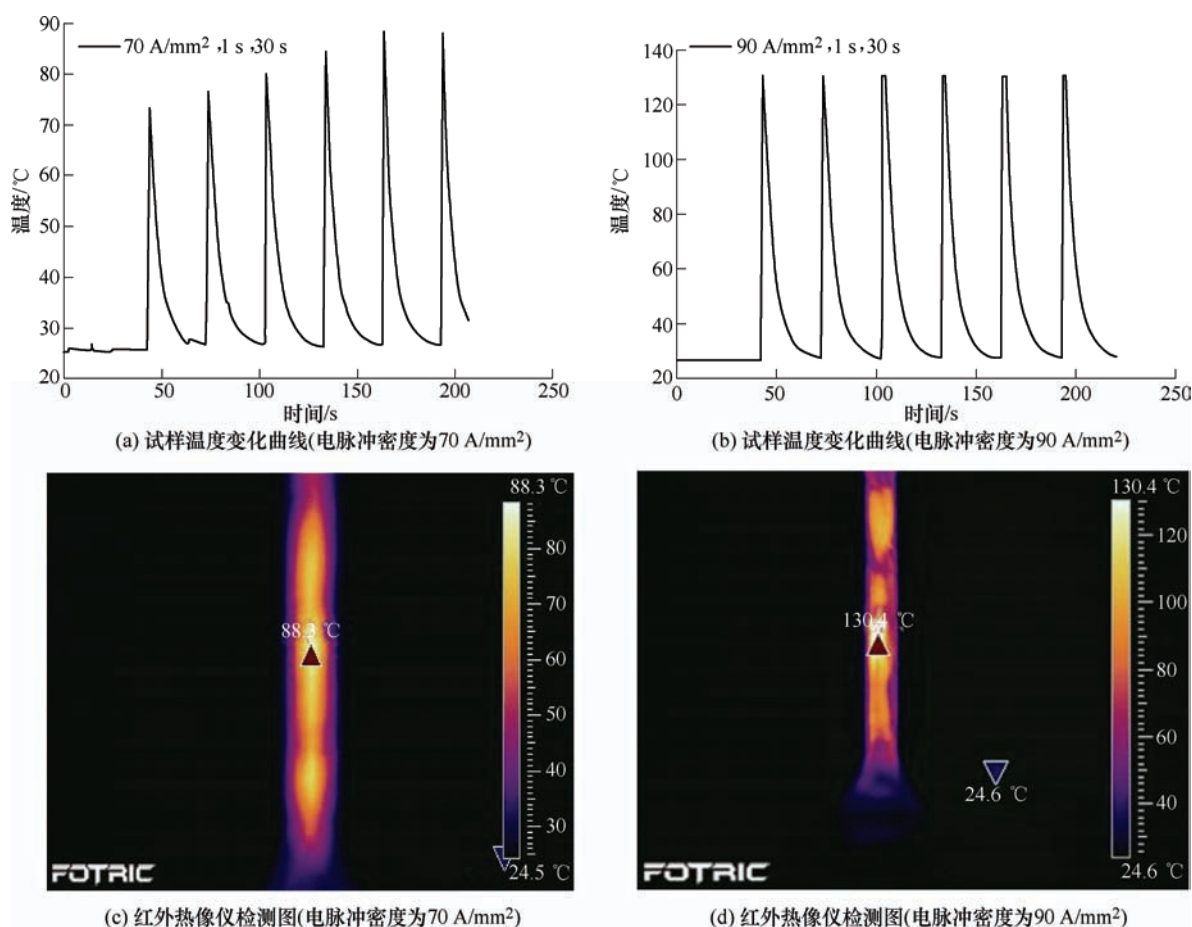


图 5 极低频电脉冲冲击处理下的试样温度变化图

因通入 50 A/mm^2 脉冲电流密度后试样温升不明显, 在 $10 \sim 25^\circ\text{C}$, 这里未做展示。图 6 为 7075-T6 铝合金电脉冲辅助拉伸与等温热拉伸应力-应变曲线。通过比较发现, 电脉冲冲击引起的材料应力下降显著, 且与电脉冲频率步调一致; 而相同温度下热拉伸曲线中应力下降不明显。因此可以得出, 电脉冲作用导致铝合金应力值降低的原因除焦耳热效应引起的热软化之外, 确实存在其他效应。除此之外, 铝合金应力值降低同样的应力值所需的热能远大于电脉冲能量大小, 并且电软化是一瞬间完成的, 从耗时、耗能角度出发, 电脉冲作用远优于热软化更高效。

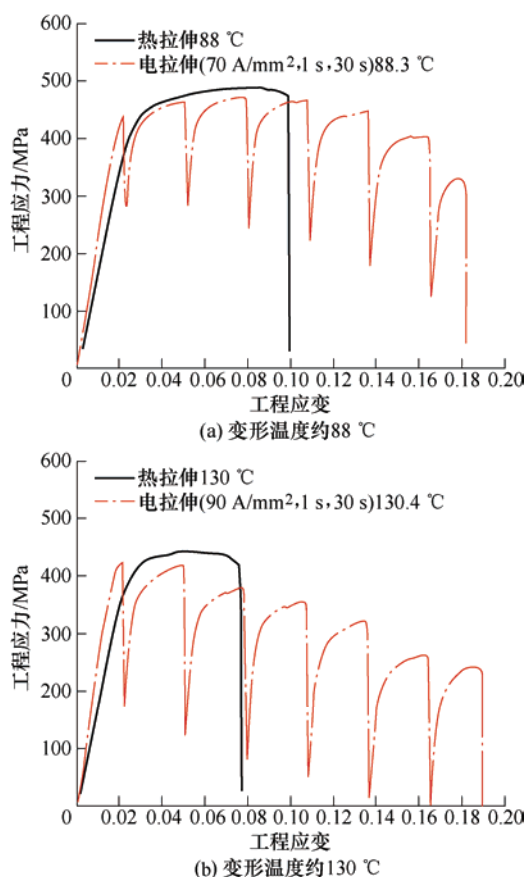


图 6 7075-T6 铝合金电脉冲辅助拉伸与等温热拉伸应力-应变曲线比较

2.2 电脉冲参数与应力降值之间的关系

通过对试验结果分析证实了电脉冲参数与应力降值之间存在关联。图 7 表示相同电脉冲周期和持续时间下不同电流密度的电脉冲辅助拉伸应力-应变曲线。可以看出, 相同脉冲周期下, 每次电脉冲冲击后的应力降值随电流密度增加而增大; 随着电脉冲冲击次数增加, 应力降值整体呈线性增大, 并且线性增长的速度与电流密度有关; 在相同脉冲电流密度下, 脉冲周期越长, 电流冲击次数越少, 每

次电脉冲冲击后的应力降值整体较大。图 8 表示相同脉冲周期与电流密度下, 不同脉冲持续时间下的应力-应变曲线。可以看出, 随着电脉冲持续时间增大, 每次电脉冲冲击引起的应力降值升高约 1 倍, 而铝合金材料断后延伸率有所提升。

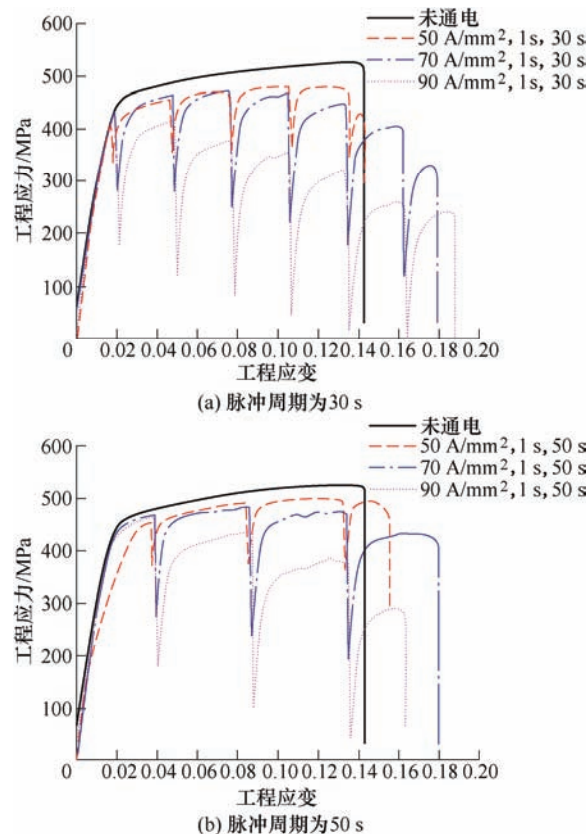


图 7 相同电脉冲周期和持续时间下不同电流密度的电脉冲辅助拉伸应力-应变曲线

试验结果表明, 7075-T6 铝合金在电脉冲冲击下表现出的电塑性取决于每个电脉冲的电能量密度(每单位体积的电能量)。对于给定的电脉冲参数, 所施加的电能量密度 j (单位为 J/mm^3) 可以简单地计算为^[23]

$$j = I^2 R_0 t_d \quad (1)$$

式中, I 、 R_0 、 t_d 分别代表电流(以 A 为单位), 材料的电阻(以 Ω 为单位)和脉冲持续时间(以 s 为单位)。基于在第一个电脉冲时的电流密度 J_0 和试样的原始体积 V_0 的初始电能量密度被定义为

$$j_0 = \frac{J_0}{V_0} = I^2 \left(\frac{\rho_e l_0}{A_0} \right) t_d \frac{1}{A_0 l_0} = \left(\frac{I}{A_0} \right)^2 \rho_e t_d \quad (2)$$

式中, ρ_e 、 l_0 、 A_0 分别代表所选材料的电阻比、试样原始的平行长度、试样原始横截面积, 而 n 个电脉冲通过的电能量密度定义为 j_n , 可与初始电能量密度相联系, 用式(3)定义

$$j_n = j_0 \left(1 + \frac{(n-1)\mu\dot{d}}{l_0} \right)^2 \quad (3)$$

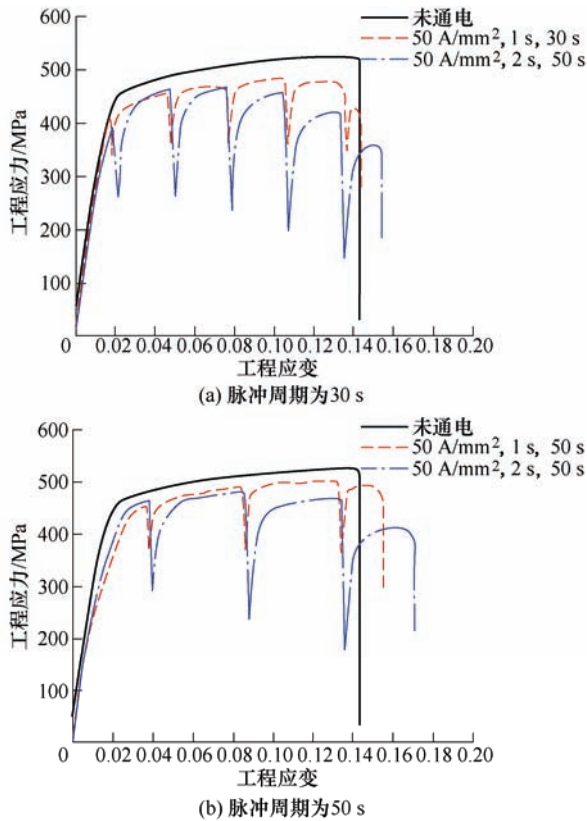


图 8 相同电脉冲周期和电流密度下不同脉冲持续时间的电脉冲辅助拉伸应力-应变曲线

式中, μ 和 \dot{d} 分别表示脉冲周期和拉伸速率。为更直观地表示出电能密度与应力降值之间的关系式, 将应力降值与局部应力-应变曲线中的最大应力值相联系, 定义两者的比值为应力降比值 y , 用一定脉冲周期和拉伸速率下的电能密度与应力降比值之间的关系式来描述铝合金在电脉冲冲击作用下的电塑性行为。图 9 为电能密度与应力降比值关系图。图中给出了不同参数的电脉冲辅助拉伸试验中电能密度与应力降比值之间的线性拟合关系式。式中, 斜率反映了不同电流密度和电流持续时间下电脉冲冲击对应力降值的影响规律; 线性拟合系数 R^2 作为线性拟合相关性的评价指标, R^2 越接近于 1, 线性拟合相关性越好。斜率刚开始随着电流密度增加而增大, 而当电流密度值到 70 A/mm^2 时斜率出现拐点, 之后电流密度继续增加斜率值逐渐减小, 截距值随着电流密度增大而逐渐降低; 在相同脉冲电流密度下, 脉冲周期为 50 s 时的直线斜率值均小于脉冲周期为 30 s 时的斜率值; 说明应力降值随着电脉冲冲击次数的增加而线性增大, 而局部应力-应变曲

线中的应力最大值反而逐渐减小, 而应力降比值与电能密度关系式斜率出现拐点证明局部应力-应变曲线中的最大值与应力降值存在阈值效应, 不能无限增大或减小。总体而言当脉冲电流密度、周期和持续时间增加, 应力降值整体增大, 多次电脉冲冲击后的应力降值增长速度随脉冲电流密度增加而先增大后逐渐减小; 随电脉冲周期变长而减小; 随脉冲持续时间增加而增大。总之, 并非脉冲电流密度、周期、持续时间越大, 应力降值增长越快。

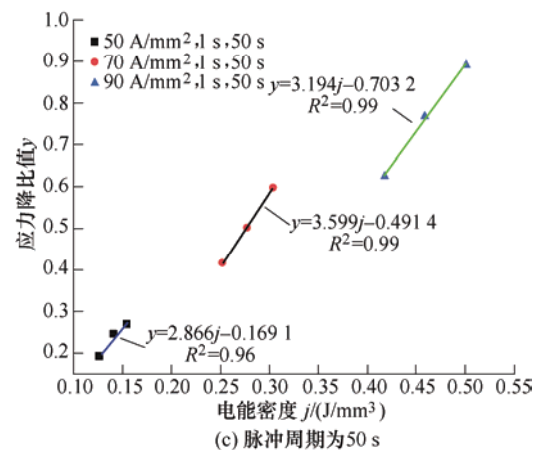
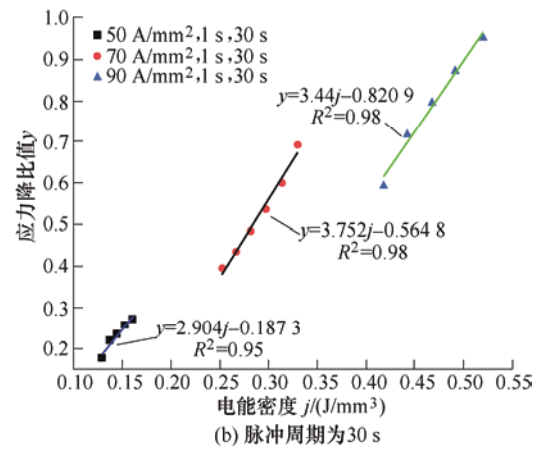
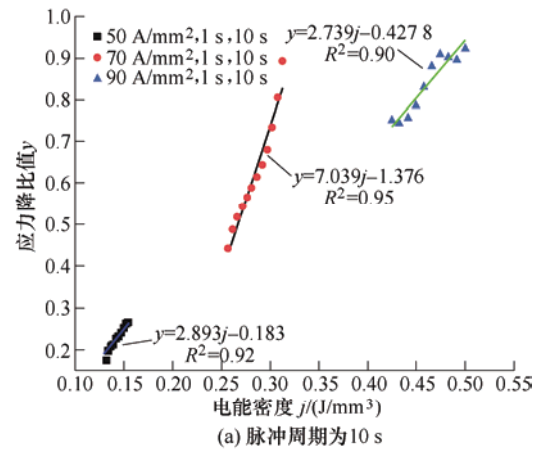


图 9 电能密度与应力降比值关系图(图中 R^2 为线性拟合系数)

2.3 电流-力耦合时机对于铝合金塑性性能的影响

分析施加电脉冲冲击时间对铝合金塑性性能的影响,对于电脉冲辅助成形工艺中的电流施加时间参数的设定具有重要意义。在材料弹性和塑性变形阶段施加具有不同脉冲电流密度的电流后,铝合金材料单向拉伸应力-应变曲线如图10所示,从图中可以得出,铝合金试样在弹性变形阶段通入电脉冲后同样也出现了应力降现象,屈服强度降低,试样断后延伸率较无电拉伸时大大减小。而在塑性变形阶段通入相同参数的电脉冲后,试样断后延伸率较无电拉伸时有不同程度的提升,并且断后延伸率随

着脉冲电流密度增加而增大。通过对比相同温度下热拉伸试验的应力值,分析弹性变形阶段电脉冲冲击后出现应力降的原因除了焦耳热效应导致的热软化与热膨胀之外,同样存在非热效应。分析认为,弹性阶段施加电脉冲冲击后出现明显应力降的原因是电脉冲会为弹性变形阶段的原子热振动提供能量,导致原子间间距变化所需的外界机械能减小。

2.4 电脉冲施加时间对拉伸断口形貌的影响

图11显示不同阶段施加电脉冲辅助拉伸条件下试样的断口形貌。图11a为无电拉伸试样宏观断口,从中可以看到韧性断裂的放射剪切花样^[27],断口颜色较暗。图11b为纤维区处放大500倍下的图像,形貌多为标准的剪切脊特征,并且剪切脊平行于拉伸试样宽度方向,长度在10~20 μm ,与晶粒宽度大小基本一致,说明剪切脊在晶界处产生并扩展到另一侧。图11c为弹性变形阶段通入电脉冲辅助拉伸试样的宏观断口,断口为杯锥状,表面有较大突起,颜色较暗。图11d为纤维区域放大500倍下的图像,从中可以看出纤维区的剪切脊形貌特征减少并出现较大的韧窝,在局部放射区里发现解理断口的舌状和河流状花样^[28],整体断口为韧窝-准解理混合断口。图11e为塑性变形阶段通入相同参数电脉冲辅助拉伸试样宏观断口,断口为剪切滑移形断口,宏观形貌为无特征的平坦面,并未有较大突起,断口颜色亮,图11f同样为纤维区放大500倍下的图像,从中可以判断出该试样颈缩中心的断裂方式符合微孔聚集型断裂特征,分布着许多不同形状、大小和深浅的微坑,存在少量的剪切脊特征,韧窝数量较多,部分大韧窝中含有第二相粒子。

从试样断口形貌中分析,在塑性阶段施加电脉冲后断面特征平坦,韧窝数量多且深度大,断裂方式为韧窝断裂。而在弹性阶段通入电脉冲后铝合金材料出现了脆性断裂的特征,塑性变形量降低。分析出现这种现象的原因可能是由于弹性变形阶段自由电子会对原子间结合键进行破坏出现断裂源,在后续拉应力作用下裂纹扩展,连接形成解理断裂起裂源,当一起裂源满足Griffiths脆性解理断裂所需要的临界裂纹尺寸时,沿一定的晶面(即解理面)劈开而产生穿晶断裂,进而扩展到整个试样,导致铝合金塑性性能降低,同时由于电脉冲对位错滑移的促进作用会使韧窝数量增多。

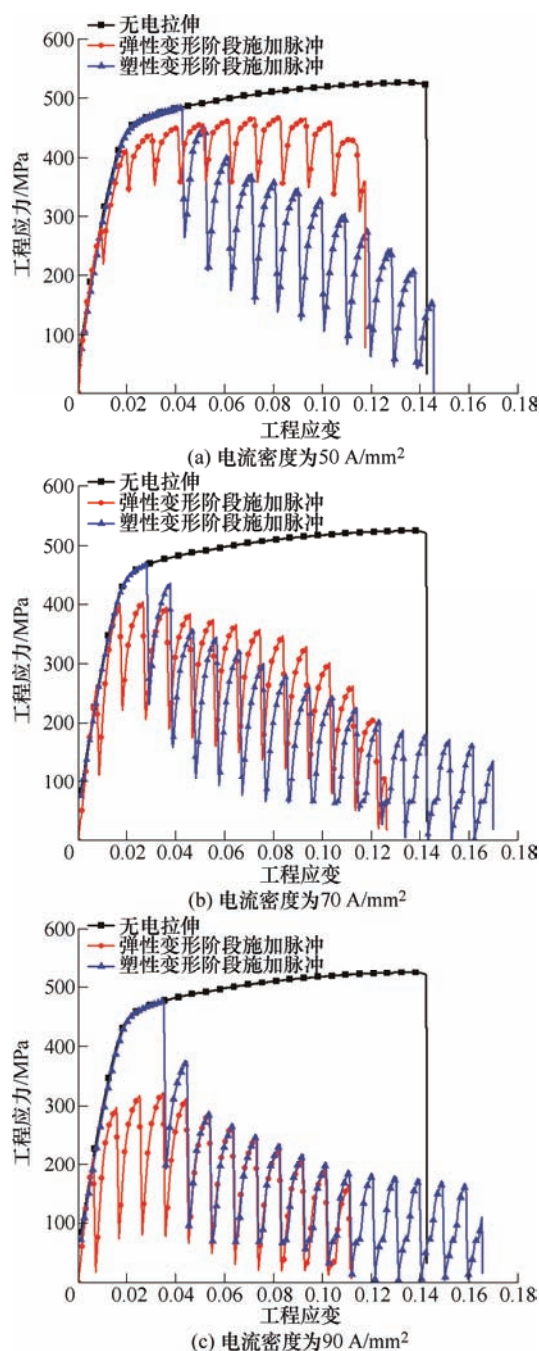


图10 不同变形阶段施加电脉冲后的材料应力-应变曲线

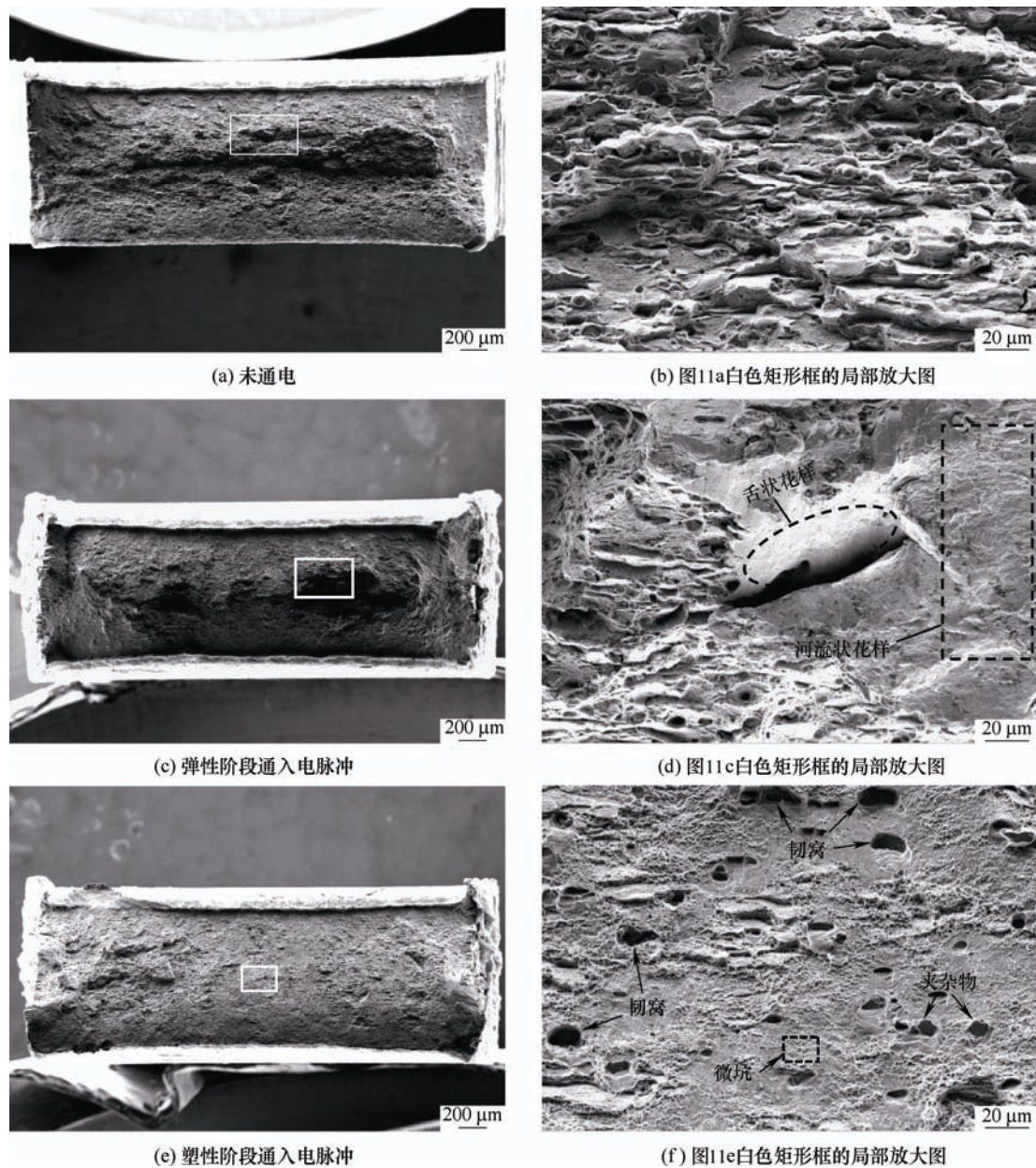


图 11 不同电脉冲施加时间拉伸试样的断口形貌图

3 电脉冲冲击对铝合金塑性性能影响的机理

通过对断口形貌与应力-应变曲线的综合分析,可从微观角度解释出现该现象的内部机理。弹性阶段原子之间的结合力主要为金属键,金属键是三种主要结合键中结合力最弱的,同时金属键共享更多电子,这些键由带正电的离子核(质子和中子)和共享的“电子气”组成^[21]。每个离子核都会释放其几个价电子,从而形成“电子气”。带负电的电子被吸引到带正电的离子核上,它们起到提供彼此排斥的离子核之间的间距的作用。电子在许多离子核之间

共享,并且可以轻松移动。所有价电子(“电子气”)都易于移动并且不与一个特定原子缔合,键的断裂和重整容易。当电脉冲冲击作用于铝合金时会提供大量定向移动电子,这些移动电子会对晶格进行冲击,金属原子之间的结合力产生影响,加速金属键的断裂和重整产生裂纹,引起沿特定晶面发生的脆晶穿晶断裂,材料在后续变形过程以塑性撕裂,出现准解理断裂,降低延展率。同时电脉冲提供的自由电子会对晶格冲击,这种撞击能量会给原子热振动提供能量,推动其向外部机械力作用的方向位移,使其平衡位置发生变化,减少弹性阶段原子间距变化所需外力,导致出现应力降现象。当金属材料进入塑性变形阶段时,位错大量增殖,电脉冲主要作用对象变为位错,促进位错运动和湮灭。

塑性变形阶段主要依靠位错的滑移来实现,通常推动电迁移的力包括两个分量,一个是来自外部电场的库仑力 F_d , 另一个是电子风力 F_w , 可以用式(4)表示这种驱动力^[29]

$$F = F_d + F_w = (Z_d + Z_w) e \rho j = Z^* e \rho j \quad (4)$$

式中, Z_d 、 Z_w 、 Z^* 别代表库仑力, 电子风力和合力的有效系数, e 是电子电量, ρ 是电阻, j 是电能密度。其中对于电子风力的计算公式如下^[17]

$$F_w = \left(\frac{\rho}{N_d} \right) e n_e j \quad (5)$$

式中, ρ/N_d 为单位长度位错的电阻率, n_e 为电子密度。对于电脉冲参数而言, 更高的脉冲电流密度意味着更高的能量密度, 在电脉冲冲击时, 更加有利于推动位错运动跨过障碍物, 避免位错塞积过大导致的应力集中, 使原子键断裂的时间向后推移, 提高材料最终塑性变形量, 延伸率提高^[30]。同时在滑移的作用下, 空洞逐渐长大并与其他空洞连接在一起形成韧窝断口, 因此电脉冲冲击后断面韧窝数量和深度增加, 这都证明了电脉冲冲击对位错的推动作用。

4 结 论

采用所提出的极低频电脉冲冲击处理, 明显降低了 7075-T6 铝合金成形时的流动应力, 且该工艺对铝合金材料的断后延伸率的影响与电流-力耦合时机有关。

(1) 电脉冲冲击后应力降值会随脉冲电流密度、周期和持续时间增加而整体增大。应力降比值与电能密度之间呈线性关系, 应力降比值随电能密度的增加先增大后减小, 电流密度为 70 A/mm^2 时出现拐点, 证明局部应力-应变曲线中的最大值与应力降值存在阈值效应, 不能无限增大或减小。

(2) 在弹性变形阶段施加电脉冲会对金属键进行冲击, 提前产生裂纹源, 导致后续变形出现脆性断裂, 塑性变形性能降低; 在塑性变形阶段施加电脉冲会促进位错运动和湮灭, 拉伸断口形貌中剪切脊特征减少, 生成大量的韧窝和微孔, 断裂源出现及扩展的时间延后, 塑性变形性能提升。

参 考 文 献

- [1] 张新明, 邓运来. 新型合金材料—铝合金[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [2] 徐正. 7005/7075 中高强度铝合金的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [3] 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.
- [4] TROITSKII O A, LIKHTMAN V I. The anisotropy of the action of electron and γ radiation on the deformation of zinc single crystal in the brittle state[J]. Soviet Physics Doklady, 1963, 8(148): 332-334.
- [5] TROITSKII O A. The electroplastic effect in metals[J]. Strength of Materials, 1984, 16(2): 277-281.
- [6] ROH J H, SEO J J, HONG S T, et al. The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 58: 84-99.
- [7] TROITSKII O A, SPITSYN V I, SOKOLOV N V, et al. Electroplastic drawing of stainless steel[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR USSR., 1977, 237(5): 1082-1085.
- [8] STASHENKO V I, TROITSKII O A, SPITSYN V I. Action of current pulses on zinc single crystals during creep[J]. Physica Status Solidi, 1983, 79(2): 549-557.
- [9] STEPANOV G V, BABUTSKII A I. Effect of electric current on stress relaxation in metal[J]. Strength of Materials, 1996, 28(2): 125-128.
- [10] HARIHARAN K, KIM M J, HONG S T, et al. Electroplastic behaviour in an aluminium alloy and dislocation density based modelling[J]. Materials and Design, 2017, 124: 131-142.
- [11] KRAVCHEN V Y. Effect of directed electron beam on moving dislocations[J]. Soviet Physics. JETP, 1967, 24(6): 1135.
- [12] 邓德伟, 于涛, 张林, 等. 脉冲电流-激光复合愈合钛合金深层裂纹微观组织研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 38-44.
- [13] 高殿奎, 李慧, 付宇明, 等. 脉冲放电截至热疲劳裂纹 material—aluminum alloy[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [14] XU Zheng. Application research of 7005/7075 medium and high strength aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [15] 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.
- [16] TROITSKII O A, LIKHTMAN V I. The anisotropy of the action of electron and γ radiation on the deformation of zinc single crystal in the brittle state[J]. Soviet Physics Doklady, 1963, 8(148): 332-334.
- [17] TROITSKII O A. The electroplastic effect in metals[J]. Strength of Materials, 1984, 16(2): 277-281.
- [18] ROH J H, SEO J J, HONG S T, et al. The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 58: 84-99.
- [19] TROITSKII O A, SPITSYN V I, SOKOLOV N V, et al. Electroplastic drawing of stainless steel[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR USSR., 1977, 237(5): 1082-1085.
- [20] STASHENKO V I, TROITSKII O A, SPITSYN V I. Action of current pulses on zinc single crystals during creep[J]. Physica Status Solidi, 1983, 79(2): 549-557.
- [21] STEPANOV G V, BABUTSKII A I. Effect of electric current on stress relaxation in metal[J]. Strength of Materials, 1996, 28(2): 125-128.
- [22] HARIHARAN K, KIM M J, HONG S T, et al. Electroplastic behaviour in an aluminium alloy and dislocation density based modelling[J]. Materials and Design, 2017, 124: 131-142.
- [23] KRAVCHEN V Y. Effect of directed electron beam on moving dislocations[J]. Soviet Physics. JETP, 1967, 24(6): 1135.
- [24] 邓德伟, 于涛, 张林, 等. 脉冲电流-激光复合愈合钛合金深层裂纹微观组织研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 38-44.
- [25] DENG Dewei, YU Tao, ZHANG Lin, et al. Effect of healing on microstructure by the combined treatment of pulse current and laser applied to deep crack in titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 38-44.
- [26] 高殿奎, 李慧, 付宇明, 等. 脉冲放电截至热疲劳裂纹

- 的亚临界扩展[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 28-31.
- GAO Diankui, LI Hui, FU Yuming, et al. Pulse discharge ends the subcritical growth of thermal fatigue cracks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 28-31.
- [14] TROITSKII O A, STASHENKO V I. Stress relaxation investigation of the electroplastic deformation of a metal[J]. Phys. Met. Metal, 1980, 47(1): 180-185.
- [15] 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.
- [16] CONRAD H, CAO W D, LU X P, et al. Effect of an electric field on the superplasticity of 7475 Al[J]. Scripta Metallurgica, 1989, 23(5): 697-702.
- [17] CONRAD H, SPRECHER A F, CAO W D, et al. Electroplasticity-the effect of electricity on the mechanical properties of metals[J]. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 1990, 42(9): 28-33.
- [18] BUMGARDNER C H, CROOM B P, SONG Ningning, et al. Low energy electroplasticity in aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 798(4): 140235.
- [19] MOLOTSKII M, FLEUROV V. Magnetic effect in electroplasticity of metals[J]. Physical Review B, 1995, 52(22): 15829-15834.
- [20] 王宏明, 朱弋, 李桂荣, 等. 强磁与应力场耦合作用下 AZ31 镁合金塑性变形行为[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 195-205.
- WANG Hongming, ZHU Yi, LI Guirong, et al. Plasticity and microstructure of AZ31 magnesium alloy under coupling action of high pulsed magnetic field and external stress[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(14): 195-205.
- [21] SALANDRO W A. Thermo-mechanical modeling of the electrically assisted manufacturing (EAM) technique during open die forging[D]. Clemson : Clemson University, 2012.
- [22] LU Jue, SONG Yanli, HUA Lin, et al. Effect of temperature on friction and galling behavior of 7075 aluminum alloy sheet based on ball-on-plate sliding test[J]. Tribology International, 2019, 140: 105872.
- [23] ROH J H, SEO J J, HONG S T, et al. The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 58: 84-99.
- [24] HARIHARAN K, LEE M G, KIM M J, et al. Decoupling thermal and electrical effect in an electrically assisted uniaxial tensile test using finite element analysis[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(7): 3043-3051.
- [25] ZHOU Pu, SONG Yanli, HUA Lin, et al. Using novel strain aging kinetics models to determine the effect of solution temperature on critical strain of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 838: 155647.
- [26] WU Wenlin, SONG Yanli, NING Shiru, et al. Microstructure evolution and mechanical properties improvement of Al-Zn-Mg-Cu alloys induced by a novel double electroshocking treatment[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(7): 2000106.
- [27] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [28] 李红英. 金属拉伸试样的断口分析[J]. 山西大同大学学报, 2011, 27(1): 76-79.
- LI Hongying. Fracture analysis of the metal tensile specimen[J]. Journal of Shanxi Datong University, 2011, 27(1): 76-79.
- [29] LIU Yuchen, LIN S K. A critical review on the electromigration effect, the electroplastic effect, and perspectives on the effects of electric current upon alloy phase stability[J]. JOM: the Journal of the Minerals, 2019, 71(9): 3094-3106.
- [30] 武伟超. 电脉冲对 2024 铝合金力学性能及微观组织影响研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- WU Weichao. Effect of electrical pulse processing on the microstructures and material properties of 2024 aluminum alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.

作者简介: 宋燕利(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高端装备轻量化与先进制造技术。
E-mail: ylsong@whut.edu.cn
郝川川, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电脉冲辅助塑性成形制造技术。
E-mail: hcc9610@126.com