

Cu-Cr-Zr 合金动态载流力学性能及其修正 Johnson-Cook 模型

李伟昊, 陈立, 石昊, 李成成, 周佳婧, 刘鸿第, 石桓通, 李兴文
(西安交通大学电工材料电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电磁轨道发射装备多场耦合仿真中传统本构模型无法表征载流条件下材料电-力耦合力学行为的问题, 提出一种融合电致塑性效应的修正本构模型以提高计算精度。该研究基于霍普金森拉杆实验平台增加了超级电容载流回路, 通过高应变率试验缩短有效信号时长避免电磁干扰, 并在此平台开展了不同应变率与电流密度下的 Cu-Cr-Zr 合金动态拉伸试验, 获得了相应条件下的应力-应变曲线。实验结果表明: Cu-Cr-Zr 合金在动态拉伸条件下的强度显著高于准静态拉伸条件, 表现出明显的应变率强化效应; 随着电流密度的增加, 流动应力逐渐下降, 尤其在电流密度达到 $5.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 时, 出现显著的流动应力下降现象, 其中屈服强度降低了 94 MPa, 极限强度降低了 177.9 MPa。基于实验数据, 对 Johnson-Cook 模型修正了应变率强化项并引入了电致塑性项, 从而能够有效描述材料在动态载流拉伸条件下的力学行为。修正后的模型预测结果与实验曲线吻合较好, 误差小于 3.69%, 为电磁能装备多物理场计算与材料考核提供了参考。

关键词: Cu-Cr-Zr 合金; 动态载流拉伸; Johnson-Cook 模型; 电致塑性

中图分类号: TM241 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511021 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0218-09

Dynamic Current-Carrying Mechanical Properties of Cu-Cr-Zr Alloy and Its Modified Johnson-Cook Model

LI Weihao, CHEN Li, SHI Hao, LI Chengcheng, ZHOU Jiajing,
LIU Hongdi, SHI Huantong, LI Xingwen

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the inability of traditional constitutive models to characterize the electro-mechanical coupling behavior of materials under current-carrying conditions in multi-field coupled simulations of electromagnetic rail launch systems, a modified constitutive model incorporating electroplastic effects is proposed to improve computational accuracy. A supercapacitor-based current-carrying circuit is integrated into a split Hopkinson tensile bar experimental platform. High-strain-rate tests are conducted to shorten effective signal durations and mitigate electromagnetic interference. Dynamic tensile tests on Cu-Cr-Zr alloy under varying strain rates and current densities are performed, yielding corresponding stress-strain curves. Experimental results demonstrate that the strength of Cu-Cr-Zr alloy under dynamic tensile conditions is significantly higher than under quasi-static conditions, exhibiting notable strain-rate strengthening effects. As

current density increases, flow stress gradually decreases, with a pronounced reduction observed at $5.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$. In particular, yield strength decreases by 94 MPa and ultimate strength by 177.9 MPa. Based on experimental data, the Johnson-Cook model is modified by revising its strain-rate hardening term and introducing an electroplasticity term, effectively capturing the material's mechanical behavior under dynamic current-carrying tension. The modified model shows strong agreement with experimental curves, with an error of less than 3.69%, providing a valuable reference for multi-physics computation and material evaluation in electromagnetic energy equipment.

Keywords: Cu-Cr-Zr alloys; dynamic current-carrying stretching; Johnson-Cook intrinsic model; electroplasticity

电磁轨道发射作为一种新型发射方式,其发射过程中极端的多物理场环境对电磁能材料电学、热学与力学性能提出了严峻的挑战^[1-4]。然而,由于电磁轨道结构紧凑、身管封闭且电枢运动过程伴随强烈电磁、弧光及烟尘干扰,实时原位诊断难度大,因此数值仿真是研究电磁能材料极端物理场加载特性及装备发射动力学特性的重要手段^[5-8]。本构模型作为描述材料应力与应变关系的数学方程,其精确性对计算的准确性至关重要。

近年来,许多学者针对金属材料在不同工况下的力学行为展开研究,以获得更为精确的本构模型。Kotkunde 等^[9]对 Ti-6Al-4V 合金在低应变率和高温条件下的 J-C(Johnson-Cook)、F-B(Fields-Backofen)、KHL(Khan-Huang-Liang)和 MTS(mechanical threshold stress)4 种本构模型进行了对比研究,并对各模型的预测结果进行了评估。结果表明,F-B 模型与实验值偏差较大,而 J-C、KHL 和 MTS 模型的预测结果与实验数据较为一致。Knezevic 等^[10]提出了一种受应变率和温度影响的多晶模型,并通过钽钨合金在不同温度、不同应变率下的压缩实验进行了验证。研究表明,该模型能够通过一组独特的单晶硬化参数,准确捕捉钽钨合金的应力-应变响应及织构演变的各向异性。Wang 等^[11]利用分离式霍普金森压杆研究了 2060 Al-Li 合金在高应变率下的动态变形特性,并基于内部缺陷分布和晶界强化效应建立了耦合材料宏观与微观多维度的本构模型,计算结果与实验数据吻合良好。Tan 等^[12]在修正应变率硬化系数的基础上,提出了一种改进的 J-C 模型,用于描述 7075 铝合金的动态变形行为。通过对比原始 J-C 模型和优化后的预测结果,修正后的模型可以更有效地对实验结果进行预测。

在电枢与轨道发生高应变率冲击时,材料同时

处于大电流环境,电流密度可超过 10^8 A/m^2 ^[13-14]。电流对材料的作用机理较为复杂,包括电子风力、焦耳热、顺磁位错退钉、磁箍缩和惯性位错退钉等效应,这些假设均被认为是电致塑性^[15-17]。韩建超等^[18]基于 J-C 模型,建立了同时考虑焦耳热效应与纯电效应的本构模型,研究载流拉伸时电流、温度、应变和应变率等多个参数对钛合金动态变形行为的影响。研究表明,钛合金的应力随电流密度增加显著降低。同时,提高电流密度将会导致试样温升速率增大,温度分布更不均匀,降低断裂应变。Wang 等^[19]基于有限元方法和 J-C 本构模型,对 6063 铝合金的电辅助拉伸变形进行了仿真计算,其计算结果是电流大幅降低了材料的抗变形能力,同时增大了塑性应变。此外,施加电流后,试样截面畸变程度降低,外缘壁厚变薄程度增加。Hariharan 等^[20]在拉伸测试中结合焦耳热仿真模型实现了载流拉伸试验中热电效应的分离,实验结果表明,热效应导致试样软化,显著降低了材料变形所需的瞬时应力。文献[21]中基于微观缺陷密度建立了一种载流变形本构模型,用于预测连续电流和脉冲电流对材料塑性变形的作用规律,并通过 5052 铝合金的电辅助拉伸实验进行了验证,预测结果与实验数据吻合良好。通过电辅助单轴拉伸试验,Kim 等^[22]探究了脉冲电流加载对 Al-Mg-Si 系合金塑性变形特性的调控机理。该研究创新性地融合热退火与电流退火协同作用下的析出硬化机制,建立了一个耦合位错密度演化方程与第二相颗粒强化理论的多尺度本构模型。综上所述,在本构方程中综合考虑应变、应变率和电流密度的影响,是准确描述材料高应变率载流情况下力学特性的必要条件,这对电磁发射的多物理场仿真与材料优化设计提供理论支持。

本文基于超级电容模块加载电流改进了分离式霍普金森拉杆装置,对 Cu-Cr-Zr 合金进行了多应变

率下的拉伸试验,系统研究了该合金在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内不同电流密度下的动态力学性能。基于实验数据,对 J-C 本构模型修正了应变率强化项并引入了电致塑性项,修正后的模型预测结果与实验曲线较为匹配,误差小于 3.69%。

1 试样制备与实验方法

1.1 实验方法

采用准静态拉伸实验机对 Cu-Cr-Zr 合金进行常温下准静态拉伸实验,试样尺寸为 $1.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。动态拉伸实验采用西北工业大学冲击动力学及其工程应用陕西省重点实验室的 $\Phi 12 \text{ mm}$ 霍普金森拉杆装置进行,实验应变率设置为 $1\,500$ 、 $2\,500 \text{ s}^{-1}$ 。对于应变率为 $10\,000 \text{ s}^{-1}$ 的实验,使用了特制的试样,实验在常温下进行。由于在试样上施加电流会产生电磁干扰,从而影响透射波应变片的信号(电压信号幅值较低),因此选择了应变率为 $10\,000 \text{ s}^{-1}$ (仪器的最大应变率)以降低拉伸时间,将电磁干扰与透射波信号分离。基于这一应变率的实验方案,进行了载流拉伸实验,电流密度分别设定为 3×10^8 、 4.8×10^8 和 $5.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 。为确保测试数据的统计显著性,试样的最终应力通过 3 组独立测试数据的均值计算确定,降低单次测量随机误差对结果的影响。

1.2 试样材料

在电磁发射应用中,电枢材料需要高强度和低密度,而轨道材料需要高强度和高导电性。因此,试样选择了典型的轨道材料,试样材料是厚度为 10 mm 的铜铬钼合金板材,其化学成分如表 1 所示。

表 1 Cu-Cr-Zr 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of Cu-Cr-Zr alloy

元素	质量分数/%
Cu	99.250
Cr	0.640
Zr	0.056
其他	0.054

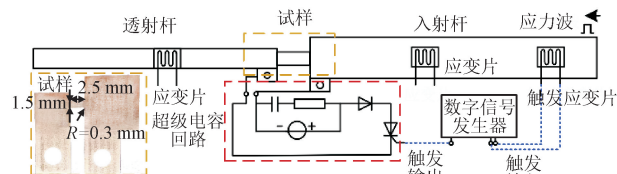
1.3 实验设置

在单向拉伸实验中,拉伸试样参考 GB/T 30069.2—2016 标准^[23],单向拉伸试样和尺寸如图 1 所示,厚度为 0.8 mm 。霍普金森拉伸系统主要由冲击加载装置、杆件、数据采集装置和缓冲装置组成。由于霍普金森拉杆的高应变率拉伸过程总时长不超过 1 ms ,为实现电流覆盖样品拉伸全过程,本

文通过增加超级电容回路对样品施加直流电流,电流趋肤效应会使电流密度分布不均,从而导致拉伸不均匀,电流趋肤深度 d 可通过下式计算

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi f \varphi \mu}} \quad (1)$$

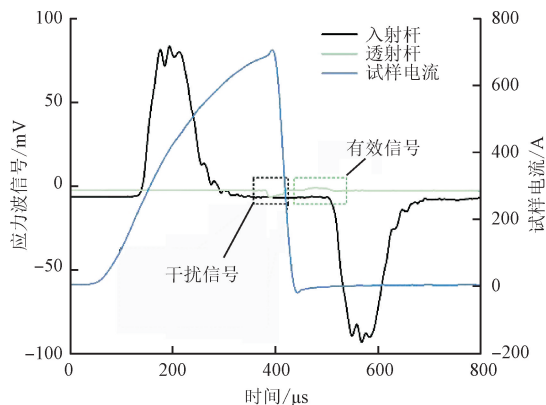
式中: f 为电流频率; φ 为电导率; μ 为磁导率。实验中施加在试样上的电流频率为 641.02 Hz , Cu-Cr-Zr 合金的电导率为 $4.756 \times 10^7 \sim 4.872 \times 10^7 \text{ S/m}$,计算结果表明,导体趋肤深度达 $(3.20 \pm 0.02) \text{ mm}$,显著超过试样特征尺寸,由此可推断电流密度在截面上均匀分布。



(a) 载流式霍普金森拉杆原理示意图与试样构型



(b) 试样装实物图



(c) 应变率为 $10\,000 \text{ s}^{-1}$ 且试样电流密度为 $5.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 时应力波信号与试样电流随时间的变化

图 1 载流式霍普金森拉杆与实验设置图

Fig.1 Current carrying Hopkinson bar and experimental setup diagram

超级电容回路的数字信号发生器(DG535)收到新增触发应变片的触发信号,并输出晶闸管触发信

号。在通电过程中会对透射杆应变片产生电磁干扰,但由于应力波传播时间差与载流拉伸时间短,并没有对有效信号产生干扰,应力波信号与电流波形如图 1(c)所示。

根据一维应力波理论,加载过程中试样的应力、应变和应变率可由下式^[24]计算得到

$$\sigma_s = \frac{EA_t}{2A_s}(\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (2)$$

$$\epsilon_s = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \quad (3)$$

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = \frac{c_0}{l_0} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \quad (4)$$

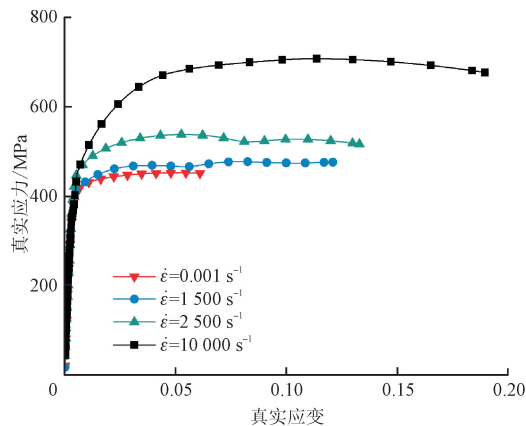
式中: σ_s 、 ϵ_s 分别为试样应力、应变; l_0 为试样长度; E 为弹性模量; A_t 为拉杆截面积; A_s 为试样横截面积; ϵ_i 为入射应变; ϵ_r 为反射应变; ϵ_t 为透射应变; c_0 为波速。

2 力学性能结果与模型建立

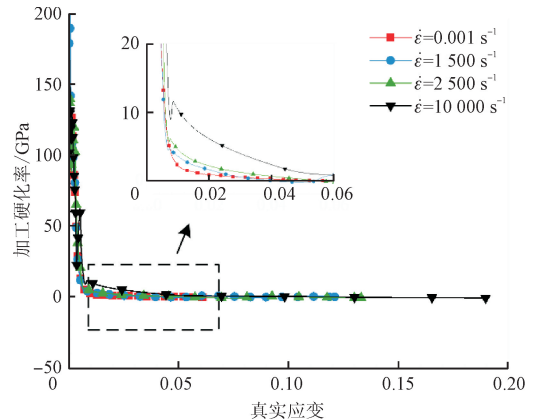
2.1 力学性能

2.1.1 不同应变率下 Cu-Cr-Zr 合金力学性能

不同应变率下 Cu-Cr-Zr 合金的真应力-真应变曲线如图 2 所示,图 2 表明应变率为 0.001 和 1 500 s⁻¹ 条件下拉伸变形时,屈服强度分别为 404.5、434.9 MPa,流动应力先随应变的增加而迅速升高,当应变达到 0.03 后流动应力随应变的增加而不再继续变化。屈服强度为塑性变形达到 0.2% 时的应力。由于这是变形初期,材料内部缺陷激增使强度增加并占据主导,所以有较高的应变硬化率。由于快速变形时产生的热能无法通过热传导有效耗散,同时位错迁移速度未能匹配外部加载速率。热软化效应与位错密度演化之间的动态耦合,共同抑制了应力随塑性应变的增长。在更高动态载荷条件下,材料的力学响应被观测到显著强化:相较于准



(a) 真实应力-真实应变曲线



(b) 加工硬化曲线

图 2 Cu-Cr-Zr 合金不同应变率下力学性能测试结果
Fig. 2 Test results of mechanical properties of Cu Cr Zr alloy at different strain rates

静态加载,其屈服强度增幅达 38.2%,且加工硬化率最大值出现在最高应变率工况。这种强化机制被解释为:缺陷密度动态积累速率受应变率正向调控,导致流动应力持续期延长及应力弛豫过程滞后,具体的力学性能参数如表 2 所示,峰值应变对应极限强度时的应变。

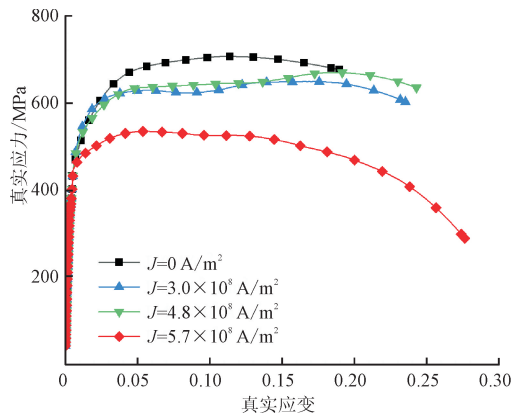
表 2 Cu-Cr-Zr 合金不同应变率下动态拉伸结果
Table 2 Dynamic tensile test results of Cu-Cr-Zr alloys at different strain rates

应变率/s ⁻¹	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	峰值应变
0.001	404.5	451.5	0.057
1 500	434.9	485.7	0.114
2 500	499.3	533.6	0.118
10 000	559.5	712.5	0.217

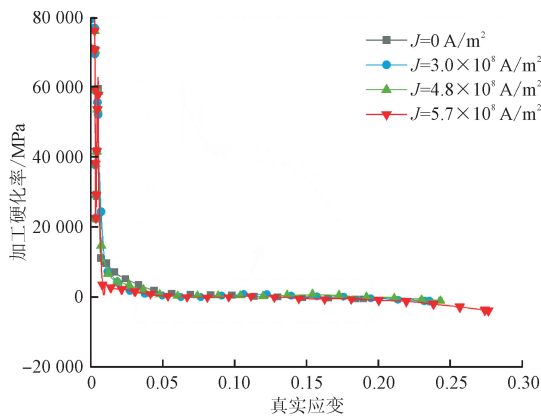
2.1.2 不同电流密度下 Cu-Cr-Zr 合金力学性能

电塑性效应显著影响 Cu-Cr-Zr 合金在应变率为 10 000 s⁻¹ 的动态力学行为,如图 3 所示。在电流密度 J 为 3×10^8 、 4.8×10^8 A/m² 时,屈服强度分别为 557.1、541.8 MPa。与无电流密度的拉伸相比,流动应力明显下降,但两者的下降幅度相近。当电流密度升高至 5.7×10^8 A/m² 时,屈服强度降低了 94 MPa,极限强度降低了 177.9 MPa,出现明显的软化特征,具体参数见表 3。在电流密度小于 4.8×10^8 A/m² 时,加工硬化曲线变化不大,只有在 5.7×10^8 A/m² 时整体下降,并且在应变达到 0.1 后持续为负值。这一现象证明电流引起位错运动加快导致位错密度下降,与应变硬化效应相竞争,并在变形后期占据主导地位^[15]。结果表明,随着电流密度的增加,加工

硬化曲线在变形前期出现上升,而在变形后期则提前出现负值。



(a) 真实应力-真实应变曲线



(b) 加工硬化曲线

图 3 Cu-Cr-Zr 合金应变率为 $10\,000\text{ s}^{-1}$ 时不同电流密度下力学性能测试结果

Fig. 3 Test results of mechanical properties of Cu-Cr-Zr alloy under different current densities at a strain rate of $10\,000/\text{s}$

表 3 Cu-Cr-Zr 合金不同电流密度下动态拉伸测试结果

Table 3 Dynamic tensile test results of Cu-Cr-Zr alloy at different current densities

电流密度/ ($10^8\text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$)	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	峰值应变
0	559.5	712.5	0.217
3.0	557.1	648.8	0.248
4.8	541.8	669.7	0.260
5.7	465.5	534.6	0.119

2.2 载流本构方程建立

脉冲电流载荷对材料施加的物理影响可解耦为两种机制:①电-塑性耦合效应,即载流子与位错的非热相互作用导致塑性变形能垒降低;②电阻加热

效应,通过焦耳热累积引发热激活软化过程。从脉冲电流触发到样品拉断电流截止总时长仅 $400\text{ }\mu\text{s}$,拉伸时间为 $50\text{ }\mu\text{s}$,这导致了焦耳热效应无法累积,电流温升小于 $1\text{ }^\circ\text{C}$,所以温度软化效应忽略不计。

电流的存在导致高应变率下 Cu-Cr-Zr 合金力学性能出现明显变化,所以进行了高应变率下 Cu-Cr-Zr 合金结合电流密度忽略温度项的模型拟合, J-C 模型^[25-27]表达式为

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))(1 + D\ln J) \quad (5)$$

式中: σ_y 为流动应力; A 为屈服强度; B 为硬化常数; n 为硬化指数; C 为应变率敏感系数; D 为电流密度影响系数; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,通常选取应变率较低的准静态应变率作为参考应变率; ϵ 为等效应变; 式(5)中右侧 3 项分别描述了材料的应变强化效应、应变率强化效应和电致塑性效应。

2.2.1 应变率敏感系数确定

A 、 B 和 n 由万能实验机进行常温准静态拉伸确定,为确定参数将 J-C 模型简化为

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n) \quad (6)$$

通过准静态加载条件参考应变率为 10^{-3} s^{-1} 下的实验数据进行统计分析,标定该合金本构模型关键参数,屈服强度基准值确定为 404.5 MPa ,对应本构方程中材料常数 A 的取值,基于式(6)可以得到

$$\ln(\sigma_y - A) = n\ln\epsilon + \ln B \quad (7)$$

对 $\ln(\sigma_y - A) - \ln\epsilon$ 关系进行拟合,得到常数 $n = 0.624\,38$, $\ln B = 5.978\,3$,则 $B = 386.77\text{ MPa}$,则 J-C 本构方程中应变强化项为

$$\sigma_y = (404.5 + 386.77\epsilon^{0.624\,38}) \quad (8)$$

2.2.2 应变率敏感系数拟合

J-C 本构方程中有一项是应变率敏感性相关项,为了确定应变率敏感系数 C ,本构模型可简化为

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)) \quad (9)$$

即

$$C = \frac{\sigma_y/(A + B\epsilon^n) - 1}{\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)} \quad (10)$$

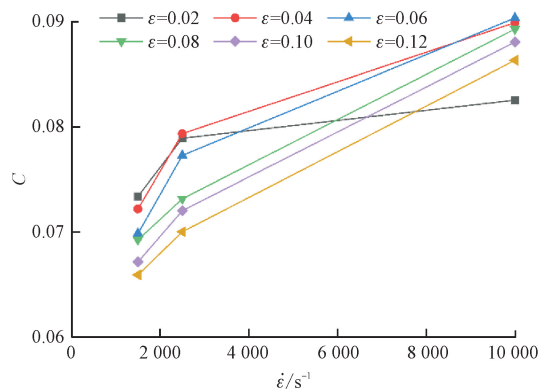
J-C 本构模型中应变率系数为常值,由实验得到的 Cu-Cr-Zr 合金结果拟合该系数并不唯一,通过应变率为 $1\,500$ 、 $2\,500$ 、 $10\,000\text{ s}^{-1}$ 下的应力应变曲线结果与式(10)可得相关 C ,应变区间为 $0 \sim 0.12$,间隔为 0.02 ,对 C 进行计算并取平均值,得到等效参数 $C = 0.077\,5$ 。由此得到基础 J-C 本构模型的表达式为

$$\sigma_y = (404.5 + 386.77\epsilon^{0.624\,38})(1 + 0.077\,5\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)) \quad (11)$$

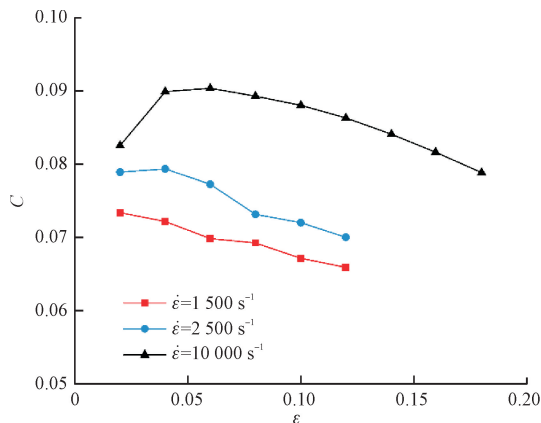
通过图 4 系统揭示了应变率敏感系数 C 与材料变形参数的关联特性。实验结果表明,该敏感系数在应变演化过程中具有非线性响应特征,而对应变率参数则表现出准线性依赖关系。经典 J-C 本构模型中将 C 简化为常数,导致材料动态响应预测产生误差。为此,对应变率敏感系数进行修正,将不同条件的 C 导入 First Optimization 软件建立了 C 和变形参数间的方程

$$C = C_0 + C_1 \epsilon + C_2 \epsilon^2 + C_3 \epsilon^3 + C_4 \dot{\epsilon} \quad (12)$$

式中: C_0 为材料的基础力学响应特性; C_1 、 C_2 、 C_3 为应变关联参数; C_4 为应变率耦合效应参数,这些参数经标定如表 4 所示。



(a) C 与应变率的关系



(b) C 与应变的关系

图 4 应变率敏感系数的拟合

Fig. 4 Strain rate sensitivity coefficient fitting diagram

表 4 应变率敏感系数方程中的参数

Table 4 Parameters in the strain rate sensitivity coefficient equation

参数	数值
C_0	0.070 69
C_1	0.076 31
C_2	-1.547 00
C_3	4.604 00
C_4	1.865×10^{-6}

2.2.3 电致流密度影响系数拟合

在 J-C 模型结构中,对应于电流载入工况的第三表征项揭示了电致塑性效应对材料动态流变特性的耦合作用机制,其中 D 表征了电流密度加载与材料力学性能响应间的定量关联特性,将本构方程转换为如下形式^[28]

$$\frac{\sigma_y}{(A + B\epsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))} = (1 + D \ln J) \quad (13)$$

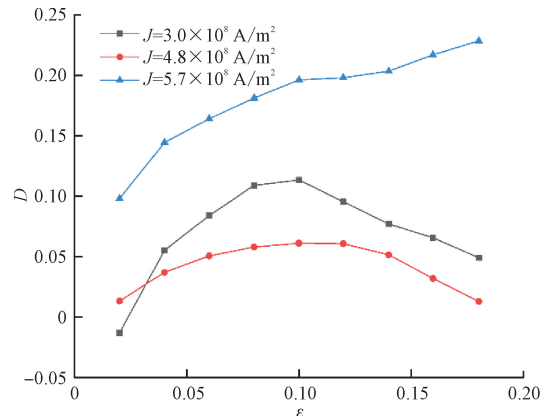
电流密度影响系数 D 可以表示为

$$D = \frac{\sigma_y / ((A + B\epsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))) - 1}{\ln J} \quad (14)$$

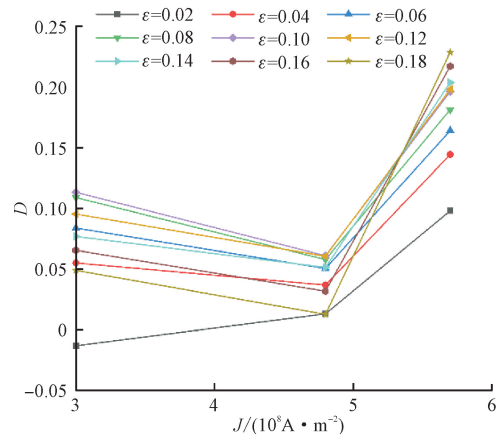
图 5 表示了 D 在机电耦合作用下的非线性演化规律。实验结果表明, D 在塑性变形过程中与应变、电流密度呈现显著的非线性特性。因此需要采用函数形式对 D 进行描述,拟合得 D 与应变和电流密度关系如下

$$D = (D_0 + D_1 \ln(\epsilon) + D_2 \epsilon + D_3 \epsilon^2 + D_4 J + D_5 \ln(J) + D_6 \ln(J)^2) \quad (15)$$

式中: D_0 表征材料的基准本征参数; $D_1 \sim D_3$ 构成应变关联参数组; $D_4 \sim D_6$ 表征电流密度耦合参数集。经标定获得的参数如表 5 所示。



(a) D 与应变的关系



(b) D 与电流密度的关系

图 5 电流密度影响系数的拟合

Fig. 5 Fitting diagram of current density influence coefficient

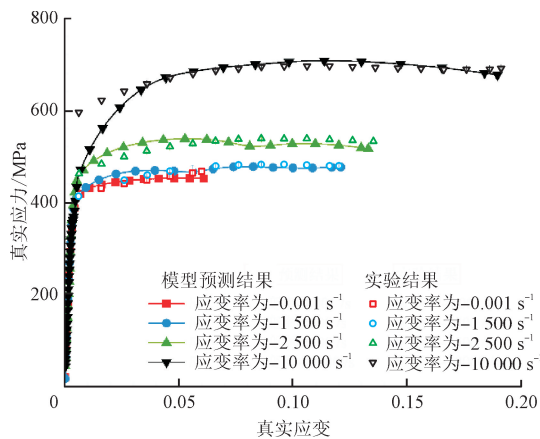
表 5 电流密度影响系数方程中的参数

Table 5 Parameters in the current density influence coefficient equation

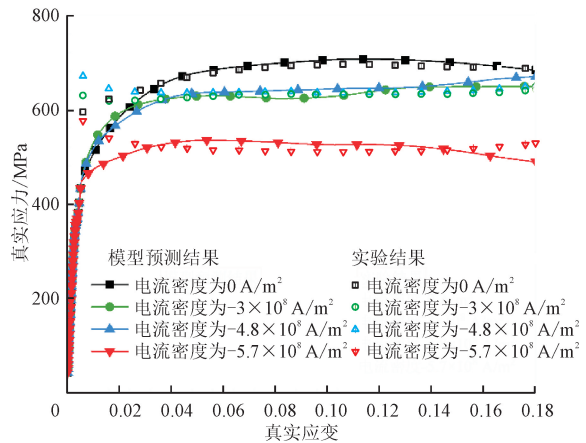
参数	数值
D_0	1.118 00
D_1	-0.060 84
D_2	0.201 70
D_3	1.746 00
D_4	-1.221 00
D_5	0.223 40
D_6	1.692 00

2.2.4 模型准确性分析

通过实验测试数据与数值模拟结果的验证,系



(a) 不同应变率模型与实验结果对比



(b) 不同电流密度模型与实验结果对比

图 6 模型预测与实验测试结果对比

Fig. 6 Comparison chart of model prediction and experimental test results

3 结 论

本文将霍普金森拉杆实验平台与超级电容载流回路耦合,通过高应变率实验避免载流回路电磁干扰,并在此平台开展了不同应变率与电流密度下的 Cu-Cr-Zr 合金动态拉伸实验,获得了相应条件下的应力-应变曲线。采用修正后的 J-C 本构模型拟合了实验所得应力应变数据,并对比预测精度,得出如下结论。

(1)随着应变率增加,Cu-Cr-Zr 合金的应力和加工硬化率具有明显的应变率硬化效应,当电流密度开始增加后,流动应力下降,在电流密度达到 $5.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 时下降最明显。

(2)对 J-C 本构模型进行优化,通过对模型中应变率强化项和电致塑性项进行修正,模型预测结果和实验得到的应力应变数据较为一致,平均相对误

差仅 3.69%,能够较好地描述 Cu-Cr-Zr 合金的载流动态特性。

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_y^i - \sigma_p^i}{\sigma_y^i} \right| \times 100\% \quad (16)$$

式中: σ_y 和 σ_p 分别表示实验和拟合得到的应力数据。计算相关系数为 0.974,平均相对误差为 3.69%。结合以上结果和图 6 可以看出,该本构建模方法不仅在静态/动态加载工况下具有参数稳定性,更在电力耦合作用域内表现出良好的工程适用性。

差仅 3.69%,能够较好地描述 Cu-Cr-Zr 合金的载流动态特性。

参考文献:

- [1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
MA Weiming, LU Junyong. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959.
- [2] COOPER K P, JONES H N, MEGER R A. Analysis of railgun barrel material [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 120-125.
- [3] XIE Hongbin, YANG Huiya, YU Jian, et al. Research progress on advanced rail materials for electromagnetic railgun technology [J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 429-439.

- [4] WILD B, SCHUPPLER C, ALOUAHABI F, et al. The influence of the rail material on the multishot performance of the rapid fire railgun [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(6): 2095-2099.
- [5] LIN Qinghua, LI Baoming. Numerical simulation of dynamic large deformation and fracture damage for solid armature in electromagnetic railgun [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(2): 348-353.
- [6] WU Jinguo, TANG Bo, LIN Qinghua, et al. 3D numerical simulation and analysis of railgun gouging mechanism [J]. *Defence Technology*, 2016, 12(2): 90-95.
- [7] GU Benfeng, LI Haiyuan, LI Baoming. An internal ballistic model of electromagnetic railgun based on PFN coupled with multi-physical field and experimental validation [J]. *Defence Technology*, 2024, 32: 254-261.
- [8] REN Shida, FENG Gang, LIU Shaowei. Study on wear of electromagnetic railgun [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 100955-100963.
- [9] KOTKUNDE N, DEOLE A D, GUPTA A K, et al. Comparative study of constitutive modeling for Ti-6Al-4V alloy at low strain rates and elevated temperatures [J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 999-1005.
- [10] KNEZEVIC M, BEYERLEIN I J, LOVATO M L, et al. A strain-rate and temperature dependent constitutive model for BCC metals incorporating non-Schmid effects: application to tantalum-tungsten alloys [J]. *International Journal of Plasticity*, 2014, 62: 93-104.
- [11] WANG Ziyu, ZHANG Kaoshi, SONG Yanqiao, et al. Constitutive behavior and microstructural evolution of 2060 Al-Li alloy under high strain rate: experiment and simulation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 844: 143048.
- [12] TAN Jinqiang, ZHAN Mei, LIU Shuai, et al. A modified Johnson-cook model for tensile flow behaviors of 7050-T7451 aluminum alloy at high strain rates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 631: 214-219.
- [13] 吴金国. 电磁轨道炮枢轨结构动力学与超高速刨削研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 68-81.
- [14] KERRISK J. Electrical and thermal modeling of railguns [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, 20(2): 399-402.
- [15] DIMITROV N K, LIU Yucheng, HORSTEMEYER M F. Electroplasticity: a review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(5): 705-716.
- [16] CONRAD H, SPRECHER A F, CAO W D, et al. Electroplasticity: the effect of electricity on the mechanical properties of metals [J]. *JOM*, 1990, 42(9): 28-33.
- [17] LIU Jiahao, JIA Dongzhou, FU Ying, et al. Electroplasticity effects: from mechanism to application [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(5): 3267-3286.
- [18] 韩建超, 张孟非, 王斌, 等. 钛合金电致塑性本构方程及多物理场耦合分析 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(9): 421-433.
- HAN Jianchao, ZHANG Mengfei, WANG Bin, et al. Analysis of electroplastic constitutive equation and multi-physical field coupling of titanium alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(9): 421-433.
- [19] WANG Xinwei, XU Jie, DING Minghan, et al. Finite elements modeling and simulation of electrically-assisted rotary-draw bending process for 6063 aluminum alloy micro-tube [J]. *Metals*, 2021, 11(12): 1956.
- [20] 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.
- [21] KRISHNASWAMY H, KIM M J, HONG S T, et al. Electroplastic behaviour in an aluminium alloy and dislocation density based modelling [J]. *Materials & Design*, 2017, 124: 131-142.
- [22] KIM M J, LEE M G, HARIHARAN K, et al. Electric current-assisted deformation behavior of Al-Mg-Si alloy under uniaxial tension [J]. *International Journal of Plasticity*, 2017, 94: 148-170.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 高应变速率拉伸试验 第 2 部分: 液压伺服型与其他类型试验系统: GB/T 30069.2—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
- [24] 赵习金. 分离式霍普金森压杆实验技术的改进和应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003: 20-24.
- [25] SIRIGIRI V K R, GUDIGA V Y, GATTU U S, et al. A review on Johnson Cook material model [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62(Part 6): 3450-3456.
- [26] 刘丽娟, 吕明, 武文革. Ti-6Al-4V 合金的修正本构模型及其有限元仿真 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(7): 73-79.
- LIU Lijuan, LÜ Ming, WU Wenge. An improved con-

- stitutive model and finite element simulation for machining Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(7): 73-79.
- [27] 夏洪利, 刘振, 闫华东, 等. 高超声速火箭橇刨削效应仿真与验证研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 71-79.
- XIA Hongli, LIU Zhen, YAN Huadong, et al. Simulation and verification study on gouging effect of hypersonic rocket sled [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 71-79.
- [28] 方进秀, 张兴权, 王会廷, 等. 5052 铝合金的动态拉伸性能及其本构模型 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 160-169.
- FANG Jinxiu, ZHANG Xingquan, WANG Huiting, et al. Dynamic tensile properties and constitutive model of 5052 aluminum alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 160-169.
- (编辑 武红江)