DOI: 10.11858/gywlxb.20261052

电-磁-热-力多场耦合加载下 CuCrZr 合金的动态拉伸性能

苏日娜[1], 周中玉[1], 陈学秒[1], 罗斌强[1], 王桂吉[1], 谭福利[1], 赵剑衡[2]

（1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999）

摘要: CuCrZr 合金作为电磁轨道炮导轨的候选材料之一, 获取其在电-磁-热-力多场耦合加载下的力学响应对于 CuCrZr 合金的工程应用具有重要意义。提出了一种外磁场辅助的电磁膨胀环实验技术, 在不显著提升金属样品环中感应电流和焦耳热温升的情况下, 稳定实现了 10^4 s^{-1} 以上的高应变率加载。基于该技术, 开展了电-磁-热-力耦合加载下 CuCrZr 合金的动态拉伸性能研究, 获得了高电流密度、高应变率、高温升率、强磁场环境下 CuCrZr 合金的应力-应变曲线和断裂应变, 研究成果可为 CuCrZr 合金在多物理场耦合工况下的应用提供重要参考。

关键词: 电磁膨胀环; CuCrZr 合金; 动态拉伸性能; 多物理场耦合

中图分类号: O389; O521.3 **文献标志码:** A

电磁轨道炮是一种依靠电磁能将电枢加速至超高速的新型武器[1]。电枢发射过程中, 导轨材料承受脉冲大电流、强磁场、热烧蚀以及电枢姿态变化引起的斜冲击等多物理场耦合极端条件, 引发电弧烧蚀、摩擦损伤、刨削侵蚀等极端工况[2−3]。开展导轨材料在多场耦合极端环境下的力学行为研究, 可为电磁轨道炮的结构设计和性能优化提供科学依据, 从而提高其发射效率、射击精度和服役寿命。

CuCrZr 合金具有高导电性、高强度、良好热稳定性及耐腐蚀性等优异的综合性能, 是电磁轨道炮轨道的候选材料之一[4−6], 其在不同加载条件下的力学性能得到了广泛关注。Wang 等[7] 对化学成分为 $Cu_{0.84}Cr_{0.08}Zr$ 和 $Cu_{0.7}Cr_{0.13}Zr$(质量分数)的 2 种 CuCrZr 合金样品开展了一维拉伸和压缩实验, 结果表明, 准静态加载条件下, CuCrZr 材料的应力-应变响应表现出典型的拉压对称性。Qian 等[8] 通过霍普金森压杆实验研究了 CuCrZr 合金在 500～2 200 s^{-1} 应变率、20～600 ℃ 温度范围内的动态压缩行为, 建立了修正形式的 JC 本构模型。Huang 等[9] 对 CuCrZr 合金进行了高温压缩实验, 通过观察热变形后样品的金相组织, 发现 CuCrZr 合金在热变形过程中经历了明显的动态再结晶, 构建了 CuCrZr 高温流动行为本构模型。Zhang 等[10] 采用等时退火实验, 结合硬度测试与材料表征, 分析了 CuCrZr 在 1 000 ℃ 以下加热时的组织演变与软化行为。Suzuki 等[11] 通过断裂韧性和疲劳裂纹扩展实验, 获得了 CuCrZr 在 298～573 K 的裂纹扩展阻力, 发现高温使 CuCrZr 的延性下降、裂纹扩展速率加快, 为评估其在高热负荷下的结构完整性提供了重要数据。然而, 对电-磁-热-力多场耦合条件下, 尤其是高应变率多场耦合条件下的力学性能研究仍然很少, 难以支撑 CuCrZr 合金材料在电磁发射这种极端条件下的应用研究。

电磁膨胀环技术基于电磁感应原理, 利用洛伦兹力在极短时间内驱动环状样品高速膨胀, 可在 10^2～10^3 s^{-1} 应变率范围内实现均匀拉伸, 是实现电-磁-热-力多场耦合高应变率加载的理想手段之一。自 Niordson[12] 提出电磁膨胀环技术以来, 其在材料动态拉伸行为和动态断裂特性研究方面获得了广泛的

* **收稿日期:** 2026-03-12; **修回日期:** 2026-04-16
基金项目: 国家自然科学基金(92166201); 冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室基金(JCKYS2025212105)
第一作者: 苏日娜(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事材料动力学行为研究. E-mail: srn2657200377@163.com
通信作者: 罗斌强(1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事材料动力学行为研究. E-mail: bqluoo@126.com

应用。Gourdin[13−14] 将 Rogowski 电流探针和任意反射面速度干涉仪(velocity interferometer system for any reflector, VISAR)测速方法引入电磁膨胀环实验,通过测量螺线圈与样品环中的电流以及样品环膨胀速度,对样品环的运动过程进行电磁学分析,获得了样品材料自由膨胀时的应力-应变曲线。Dan 等[15] 通过在电磁膨胀环装置中引入 B.dot 磁场探针捕捉 7075 铝合金的断裂起始时刻,建立了断裂准则和断裂模型以描述样品的断裂特征。Huang 等[16] 采用电磁膨胀环技术对 A5083 铝进行动态拉伸实验,发现其断裂应变较准静态实验提高了 53%,电子背散射衍射(electron backscatter diffraction, EBSD)分析显示,晶粒细化与高密度小角晶界是电塑性与高应变率协同增强塑性的微观机制。Ma 等[17] 对比了采用霍普金森拉杆和电磁膨胀环 2 种实验方法获得的 5052-O 铝合金的变形行为,发现在 2 500 s^{-1} 拉伸应变率下,电磁膨胀环实验得到的峰值应力低于霍普金森杆实验,其主要原因是电磁膨胀环实验中样品环内的感应电流引起了焦耳热软化。目前,在超过 10^4 s^{-1} 的高应变率加载下,电磁膨胀环技术中样品环内的大幅温升容易导致显著的热效应,对解耦分析应变、应变率、温度等不同因素对材料力学性能的影响构成了挑战。

为获取轨道材料在多场耦合极端条件下的力学性能,本研究将开发一种基于外磁场辅助的高应变率加载电磁膨胀环实验技术,在控制样品材料温升基本不变的情况下,实现超过 10^4 s^{-1} 的应变率加载。利用新开发的电磁膨胀环实验技术,开展电-磁-热-力多场耦合高应变率加载下 CuCrZr 合金的动态拉伸性能研究,分析电-磁-热-力多场耦合加载下 CuCrZr 合金的动态力学响应,以期为 CuCrZr 合金在电磁轨道发射极端环境下的工程应用提供参考。

1　实验方法

1.1　加载装置

电磁膨胀环实验中,金属样品环承受的洛伦兹力由样品环所处位置的感应磁场和样品环内的感应电流共同决定。增加额外的稳态磁场既可提升样品环位置的总磁场强度,又不会引起样品环内感应电流额外增加,从而在样品环温度不显著升高的情况下获得更高的加载速率。以此为指导思想,设计稳态外磁场调控的电磁膨胀环实验装置,如图 1 所示。将外磁场线圈置于电磁膨胀环驱动线圈和金属样品环外部,外磁场线圈的内径 100 mm、外径 240 mm、高 51.5 mm,线圈截面由 4 层铜线圈构成,每层 5 匝,导线截面尺寸为 5 mm×4 mm。电磁膨胀环驱动线圈的外径 25 mm、高 44 mm,由 10 匝铜导线绕制而成,导线截面尺寸为 2 mm×4 mm。

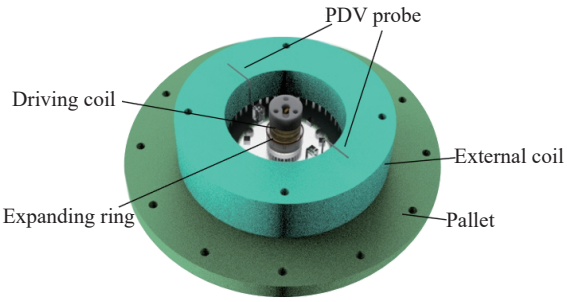


图 1　外磁场辅助的电磁膨胀环实验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of electromagnetic expansion ring experimental apparatus assisted by external magnetic field

外磁场线圈连接一组总容量为 4×830 μF 的电容器组,充电 4 kV 时线圈放电电流和中心磁场曲线如图 2(a) 所示。电流峰值为 19.8 kA,上升沿为 744 μs,电流平台宽度(98%～100% 电流峰值时的持续时间)为 484 μs,线圈内部磁场曲线和放电电流呈线性关系,磁场峰值为 3.4 T。膨胀环驱动线圈连接一台容量为 40 μF 的电容器,充电电压为 15 kV 时,其电流如图 2(b) 所示,电流周期为 43 μs。通过控制 2 个线圈的放电时序以及电流方向(初始方向相反),可将驱动线圈的放电过程控制在外磁场保持基本不变的时间窗口,同时保证 2 个线圈在样品处产生方向一致的磁场,进而使洛伦兹力增大。图 2 中,I_0、B_0、U_0 分别为外部线圈峰值电流、稳态磁场和驱动线圈充电电压。

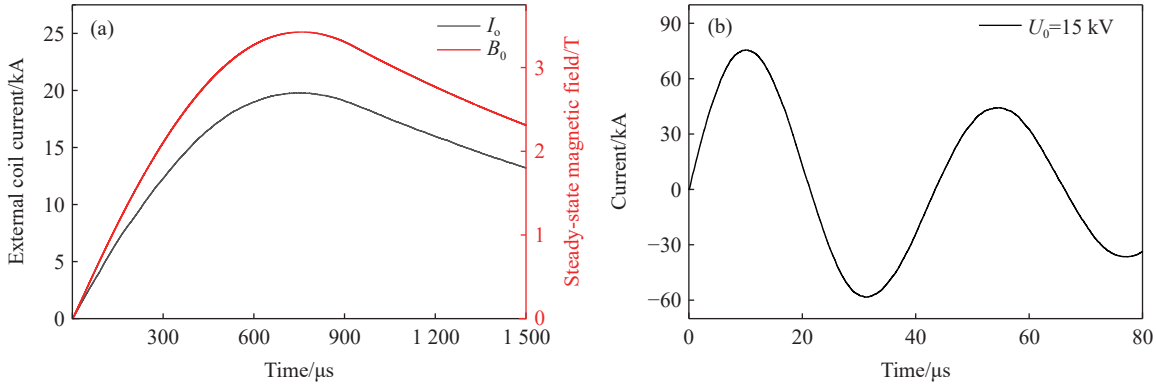


图 2　2 个线圈的典型电流曲线: (a) 外线圈的电流和外磁场曲线, (b) 驱动线圈的电流曲线

Fig. 2　Typical current waveforms of the two coils: (a) external coil current waveform and external steady-state magnetic field curve; (b) driving coil current waveform

1.2　实验样品与诊断测试

实验样品环材料为冷轧 CuCrZr 合金，密度为 8.79 g/cm^3，导电率为 88.3%～89.21% 国际退火铜标准（international annealed copper standard, IACS），Cu、Cr 和 Zr 的质量分数分别为 98.84%、1.00% 和 0.10%。样品环直径为 32 mm，横截面尺寸为 1 mm×1 mm。采用有外磁场和无外磁场 2 种方式电磁膨胀加载，获取 CuCrZr 合金在不同加载条件下的一维拉伸性能，实验布局如图 3 所示。每发实验使用 2 个对称布置的光子多普勒干涉测速仪（Doppler interferometric velocimeter, PDV）测速探头测量样品环膨胀速度历史，采用罗氏线圈分别测量驱动线圈与外线圈的放电电流。在样品环正上方放置光电探头，通过测量样品环断裂时刻断口位置的电流打火发光信号来确定断裂时刻，进而确定断裂应变。在样品外围放置石蜡作为软回收装置，实验后取出嵌入石蜡的样品碎片，进行断口形貌观察。

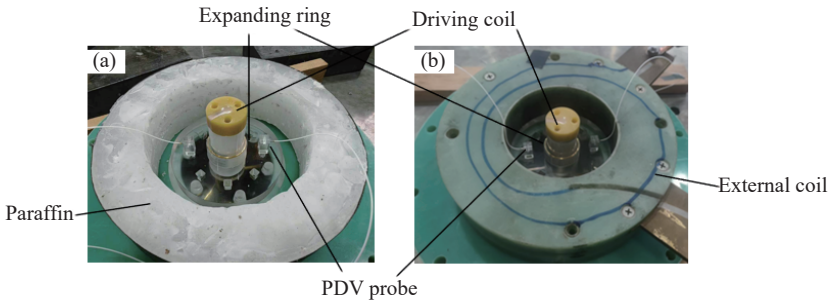


图 3　实验装置照片: (a) 无外磁场实验, (b) 外磁场辅助实验

Fig. 3　Experimental setup diagrams: (a) without external magnetic field experiment, (b) external magnetic field assisted experiment

1.3　实验数据处理

考虑电磁力的影响，金属样品环膨胀过程中的运动方程[18] 为

$$\sigma_\theta = r f_\mathrm{r} - r\rho_0 \ddot{r} \tag{1}$$

式中：σ_θ 为环向应力，ρ_0 为样品环材料密度，r 为膨胀环半径，f_r 为电磁力。

利用实验测量的膨胀环速度 v_r，计算获得样品环的瞬时半径 r、应变 ε_p 和加载应变率 $\dot{\varepsilon}_\mathrm{p}$ 分别为

$$r = \int_0^t v_\mathrm{r}\mathrm{d}t + r_0 \tag{2}$$

$$\varepsilon_\mathrm{p} = \ln\frac{r}{r_0} \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}=\frac{v_{\mathrm{r}}}{r} \tag{4}$$

样品环中感应电流产生的焦耳热以及塑性功耗散会导致样品升温，膨胀环温度 T_{s} 为

$$T_{\mathrm{s}}(t)=T_0+\frac{1}{c_p\rho}\int_0^t\left[\frac{R_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{s}}^2(\tau)}{2\pi rA_{\mathrm{s}}}+\sigma_\theta(\tau)\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}(\tau)\right]\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

式中：T_0 为初始温度，c_p 为比定压热容，R_{s} 为样品环的电阻，I_{s} 为样品环中的感应电流，A_{s} 为金属样品环的截面积。

按照实验条件进行 1∶1 几何建模，将罗氏线圈测量的驱动线圈电流以及稳态磁场作为输入条件，开展电-磁-热-力多场耦合有限元仿真。以实验测量的膨胀速度曲线 $v_{\mathrm{Exp}}(t)$ 为基准，借鉴铜材料的电导率与温度变化关系，通过调整不同温度区间内电导率的取值，使数值仿真得到的膨胀速度时程曲线 $v_{\mathrm{Sim}}(t)$ 与实测结果的偏差最小化，进而确定数值仿真采用的 CuCrZr 电导率参数，获取膨胀环承受的洛伦兹力和感应电流。根据式 (1)～式 (5)，计算得到 CuCrZr 合金膨胀过程中的应变率、应力、应变、温度以及电流密度变化。

2　实验结果与分析

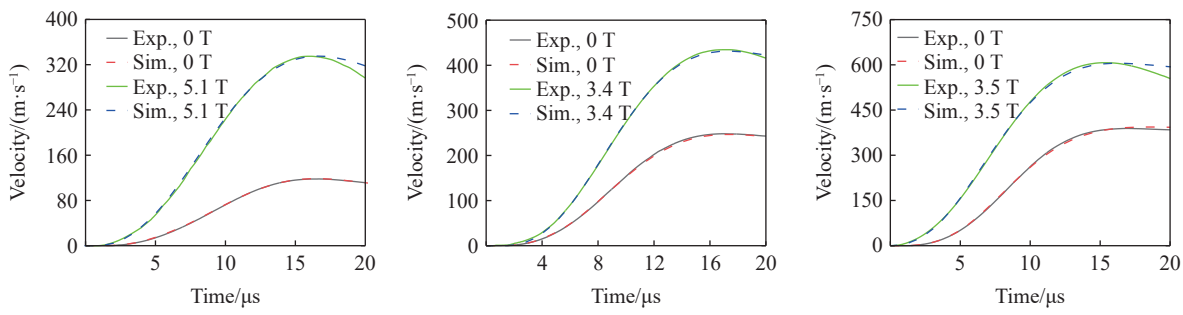
2.1　实验结果

共开展了 3 组对比实验，加载条件以及实验结果见表 1，其中：U_{E}、I_{i}、v_{P}、$\dot{\varepsilon}_{\max}$、t_{F}、ε_{F}、$T_{\mathrm{s}}/\varepsilon$、$S_{\max}$ 分别为外部线圈充电电压、驱动线圈峰值电流、膨胀环峰值速度、最大应变率、断裂时间、断裂应变、试样温度/应变、回收碎片最大尺寸。驱动线圈充电电压相同时，有/无外磁场条件下实验测量的样品环速度曲线与电磁热力多场耦合仿真计算获得地速度曲线对比如图 4 所示，数值计算较好的复现了实验结果。根据应力、应变、应变率以及温度计算公式，获得 CuCrZr 合金膨胀过程中的应变率、温度、应力、应变以及电流密度变化，如图 5～图 8 所示。

表 1　实验结果

Table 1　Experimental results

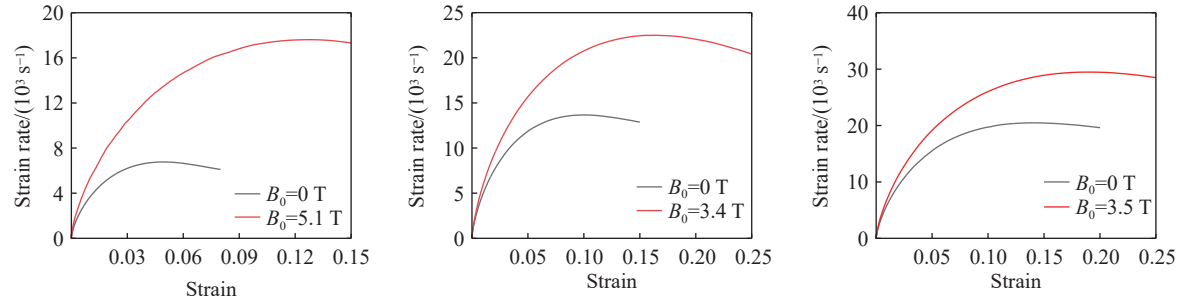
Group	U_0/kV	U_{E}/kV	I_{i}/kA	I_{o}/kA	B_0/T	v_{P}/(m·s^{-1})	$\dot{\varepsilon}_{\max}$/s^{-1}	t_{F}/μs	ε_{F}	$(T_{\mathrm{s}}\varepsilon^{-1})$/℃	$S_{\max}$/mm
1	10	0	50.5	0	0	117	8 180			518/0.24	
		6	50.4	29.6	5.1	334	17 610			267/0.24	
2	15	0	77.8	0	0	248	13 660	35.8	0.37	665/0.25	7
		4	76.6	18.5	3.4	435	22 490	28.6	0.40	466/0.25	8
3	20	0	100.1	0	0	388	20 480	32.3	0.44	635/0.10	
		4	98.6	18.4	3.5	593	29 470	24.5	0.40	485/0.10	4



(a) U_0=10 kV　(b) U_0=15 kV　(c) U_0=20 kV

图 4　CuCrZr 样品环膨胀速度曲线

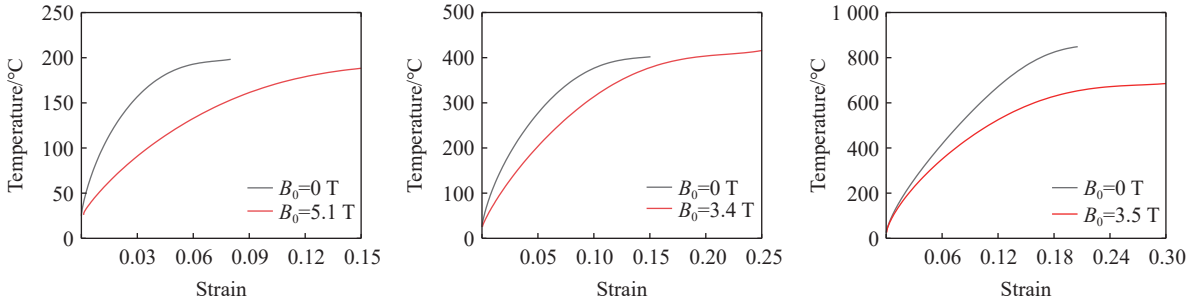
Fig. 4　Expanding velocities of CuCrZr ring



(a) U_0=10 kV　(b) U_0=15 kV　(c) U_0=20 kV

图 5　CuCrZr 合金的应变率-应变曲线

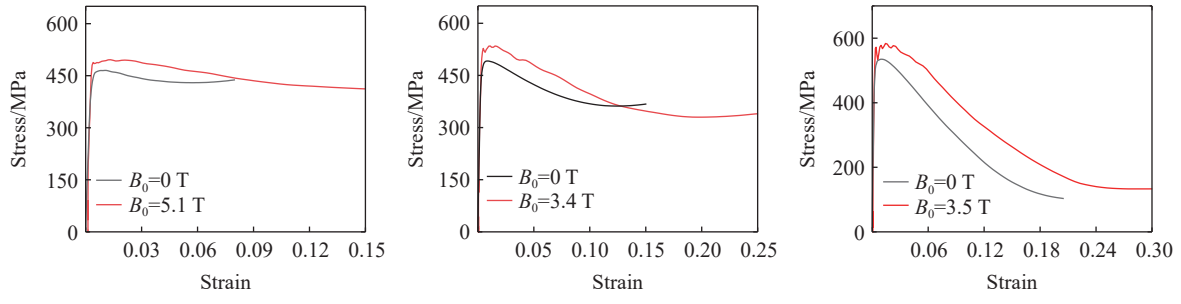
Fig. 5　Strain rate-strain curves of CuCrZr alloy



(a) U_0=10 kV　(b) U_0=15 kV　(c) U_0=20 kV

图 6　CuCrZr 合金的温度-应变曲线

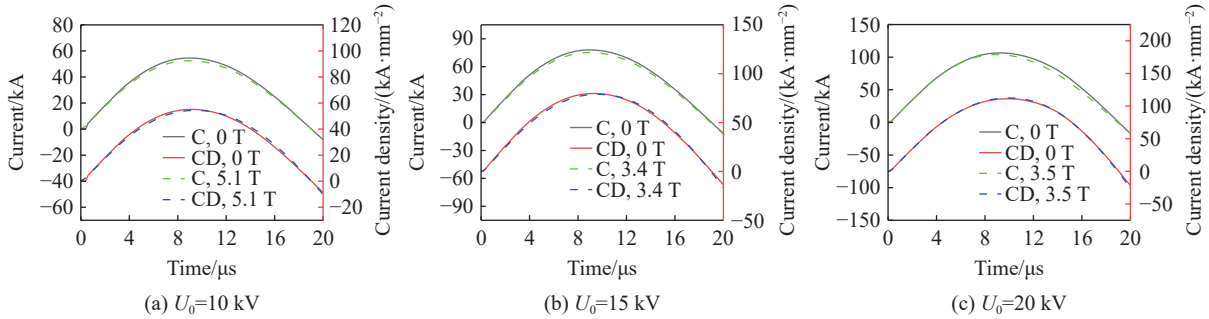
Fig. 6　Temperature-strain curves of CuCrZr alloy



(a) U_0=10 kV　(b) U_0=15 kV　(c) U_0=20 kV

图 7　CuCrZr 合金的应力-应变曲线

Fig. 7　Stress-strain curves of CuCrZr alloy



(a) U_0=10 kV　(b) U_0=15 kV　(c) U_0=20 kV

图 8　CuCrZr 合金样品环的感应电流(C)和电流密度(CD)

Fig. 8　Current and current density of CuCrZr alloy

实验结果表明，稳态外磁场的引入显著提升了膨胀环的加载应变率，同时降低了样品环的温升。当膨胀环驱动线圈充电 10 kV、外部稳态磁场为 5.1 T 时，膨胀环速度峰值由无外磁场时的 117 m/s 增大

至 334 m/s, 膨胀环最大应变率由 8180 s^{-1} 提升至 17610 s^{-1}, 5% 应变对应的温升由 217 ℃ 降低至 129 ℃, 速度增幅和加载应变率分别增长 2.85 倍和 2.15 倍, 温升降低了 41%。当膨胀环驱动线圈充电 20 kV、外部稳态磁场为 3.5 T 时, 膨胀环速度峰值由无外磁场时的 388 m/s 增大到 593 m/s, 最大应变率由 20480 s^{-1} 提升至 29470 s^{-1}, 5% 应变对应的温升由 436 ℃ 降低至 308 ℃, 速度和加载应变率分别增长 1.53 倍和 1.44 倍, 温升降低了 29%。随着膨胀环驱动线圈充电电压的提升, 外磁场的作用逐渐减弱, 其原因是外磁场在总磁场中的占比降低。若需在驱动线圈充电 20 kV 时通过稳态外磁场更加显著地提升加载应变率, 外磁场幅值需达到 8～10 T, 这超出了目前外磁场线圈的能力。

2.2　分析与讨论

驱动线圈的充电电压相同时, 有/无外磁场条件下 CuCrZr 合金的应力-应变曲线表现为明显的相似性, 均呈现先快速下降后变化缓慢的趋势, 且有外磁场时材料的流动应力更高。随着驱动线圈充电电压的提升, 材料进入屈服后的流动应力表现出随驱动线圈充电电压提升而增大的现象。表 2 给出了应变为 0.01 时 CuCrZr 合金的应力、温度、应变率、电流密度以及磁场强度。随着充电电压的升高, 起硬化效应的加载应变率逐渐增大, 起软化效应的温升、电流密度和磁感强度也在同步增大, 但 CuCrZr 合金最终表现出明显的应力增强, 表明在多场耦合作用下, CuCrZr 合金材料的加载应变率变化是影响材料强度的主导因素。

表 2　应变为 0.01 时 CuCrZr 合金的多场耦合加载参数与流动应力

Table 2　Multifield coupling loading parameters and flow stress of CuCrZr alloy at 0.01 strain

Loading conditions	Stress/MPa	Temperature/℃	Strain rate/s^{-1}	Current density/(kA·mm^{-2})	Magnetic field strength/T
10 kV/0 T	465	95.43	3745	55.1	2.2
15 kV/0 T	491	112.00	4937	76.1	2.7
20 kV/0 T	534	131.00	6153	96.2	3.0
10 kV/5.1 T	492	53.88	5832	48.8	6.7
15 kV/3.4 T	534	77.00	6588	71.2	5.6
20 kV/3.5 T	567	123.00	7571	75.0	5.9

为进一步甄别不同因素对材料力学行为的影响, 利用霍普金森压杆测量 CuCrZr 合金在 500～5000 s^{-1} 应变率、25～500 ℃ 温度范围内的应力-应变曲线, 联合准静态压缩实验结果, 建立修正的 JC 本构模型, 即

$$\sigma=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}+C\varepsilon_{\mathrm{p}}^{2})\left[1+D\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{n}\right]\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_{\mathrm{m}}-T_0}\right)^{m}\right] \tag{6}$$

式中: 参数 A=430 MPa, B=336 MPa, C=−528 MPa, D=1.2×10^{-4}, $\dot{\varepsilon}$=0.001 s^{-1}, n=2.6, T_0=25 ℃, T_{m}=1050 ℃, m=1.8。

基于该本构模型及参数, 引入图 4 和图 5 中的温度和应变率变化, 对电-磁-热-力多场耦合条件下 CuCrZr 合金动态拉伸过程的应力-应变进行计算, 只考虑温度和应变率效应的修正 JC 本构模型预测结果与电磁膨胀环实验结果的对比如图 9 所示。图 10 给出了实验结果和预测结果的差值。预测结果与实验结果的差异表明, 电流与磁场可使材料的强度下降超过 50%。Okazaki 等[19] 在 77 K 低温下的研究表明, 10^4 A/mm^2 的电流密度可使钛合金材料强度下降 126 MPa, 而温度仅升高 96 K, 其原因是大功率高能脉冲电流增强了电子与位错之间的交互作用, 进而降低了强度。另一方面, 李桂荣等[20] 的研究结果表明, 磁场与位错的相互作用使得材料强度降低, 本实验中样品环的最大电流密度范围为 55～110 kA/mm^2, 样品环位置的最高磁场强度为 2.4～7.3 T, 电流与磁场引起的电塑性效应导致 CuCrZr 合金的强度显著降低。

Molotskii 等[21] 指出, 电流引起的磁场变化是脉冲大电流作用下金属材料强度显著下降的主要原因, 并给出电流与感应磁场作用下的材料本构关系, 即

$$\sigma_j = \sigma_0\left(1-\frac{j^2}{j^2+j_0^2}\right) \tag{7}$$

式中：σ_j为施加电流后的应力，σ_0为未施加电流的应力，j 为感应电流密度，参数j_0 与温度相关。

$$j_0^2 = C_1\exp(C_2T) \tag{8}$$

式中：C_1、C_2 为拟合参数。

本实验中样品区的磁场既包括样品自感应磁场，还包括驱动线圈以及外线圈产生的背景磁场。为了更准确地考虑磁场因素，将式 (7) 中的修正项改为$1-B^2/(B^2+K_0^2)$，同时耦合热力模型的本构方程，则式 (7) 转变为

$$\sigma = (A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}+C\varepsilon_{\mathrm{p}}^2)\left[1+D\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^n\right]\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_{\mathrm{m}}-T_0}\right)^m\right]\left(1-\frac{B^2}{B^2+K_0^2}\right) \tag{9}$$

其中

$$K_0^2 = C_1\exp(C_2T+C_3B_{\max}) \tag{10}$$

式中：拟合参数 C_1、C_2、C_3 分别为 0.9096、-9.2×10^{-3}、2.096，$B_{\max}$为样品处的磁场峰值。采用式 (9) 计算获得的应力-应变曲线与实验结果的对比如图 11 所示，其中：“Exp.”表示实验数据，“TF-Model”表示热力模型预测结果，“EMTF-Model”表示电-磁-热-力模型预测结果。引入电磁耦合修正项后，本构模型的预测精度得到了较好的提升。

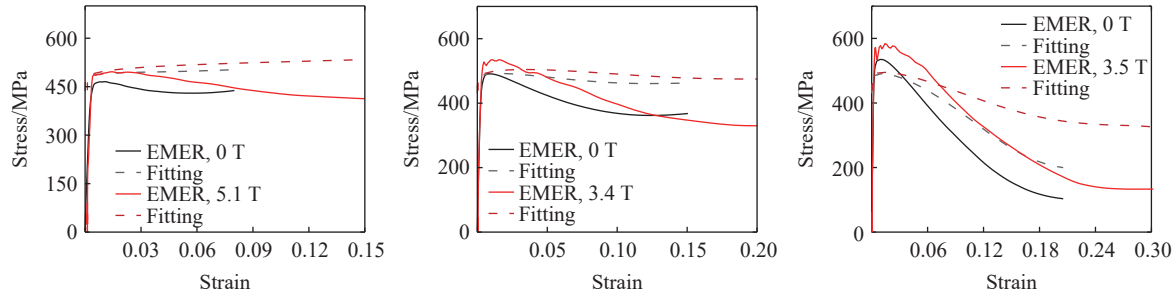


图 9　多场耦合加载下 CuCrZr 合金的应力-应变曲线的实验结果与热力耦合模型预测结果对比

Fig. 9　Comparison of stress-strain curves of CuCrZr alloy under multi-field coupled loading with thermo-mechanical coupling model predictions

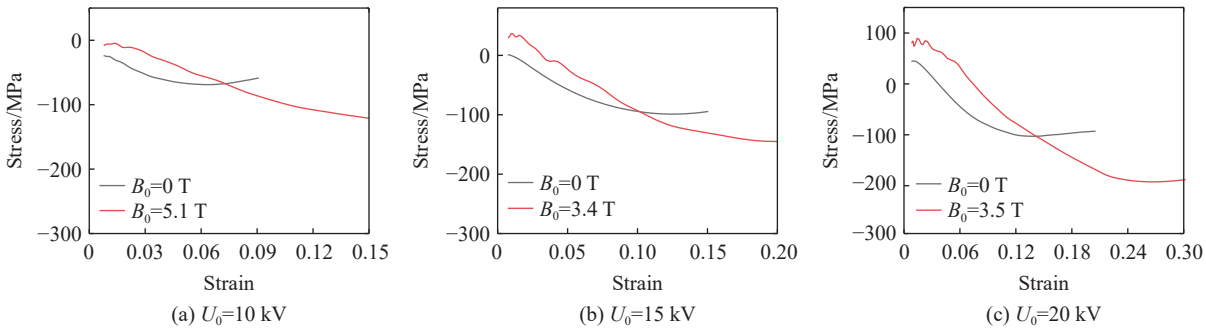
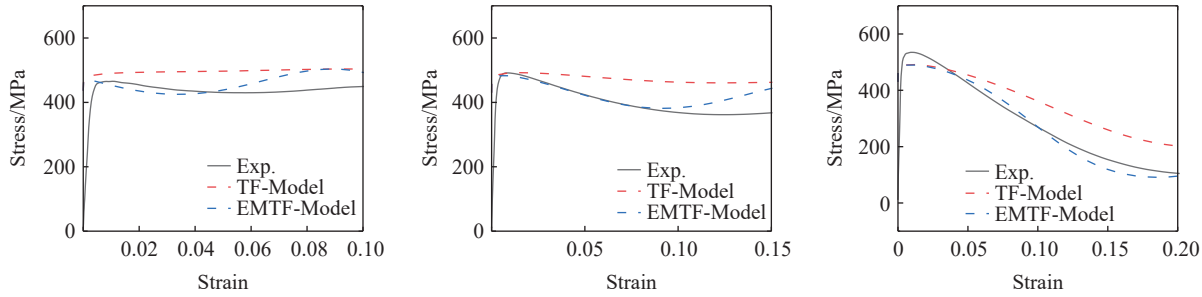


图 10　多场耦合加载下 CuCrZr 合金的应力-应变曲线的实验结果与热力耦合模型预测结果的差异

Fig. 10　Differences between stress-strain curves of CuCrZr alloy under multi-field coupled loading and thermo-mechanical coupling model predictions

根据光电探测器测量信号的突变确定样品环膨胀断裂时刻，继而计算获得 CuCrZr 合金动态断裂应变。电磁膨胀环实验测量的 CuCrZr 合金与纯铜[22−23] 以及 H62 黄铜的断裂应变对比如图 12 所示，CuCrZr 合金在最大膨胀速度 250～600 m/s（应变率为 1.3×10^4～3.0×10^4 s^{-1}）范围内的断裂应变稳定在 0.4 左右，未呈现随膨胀速度增大而增大的趋势，出现了断裂应变的应变率饱和效应[24]。其中，“0 T”代

表无外磁场实验，“B_0”代表有外磁场实验。图 13 展示了不同实验样品的回收照片，在相同的 20 kV 驱动电压下，施加 3.5 T 外磁场的实验最大回收破片尺寸为 4 mm，而无外磁场实验则全部为碎状颗粒。这进一步表明，外磁场调控技术可以实现更高应变率的同时降低样品温度。回收破片的扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）断口表征如图 14 所示，2 种加载下的断口均表现出熔化形貌，由此可知，在外磁场加载下，虽然有一定的块状回收，但在断口处，温度仍达到了熔点以上。



(a) Charged with 10 kV　(b) Charged with 15 kV　(c) Charged with 20 kV

图 11　应力-应变曲线的实验与拟合结果对比

Fig. 11　Comparison of experimental and fitted stress-strain curves

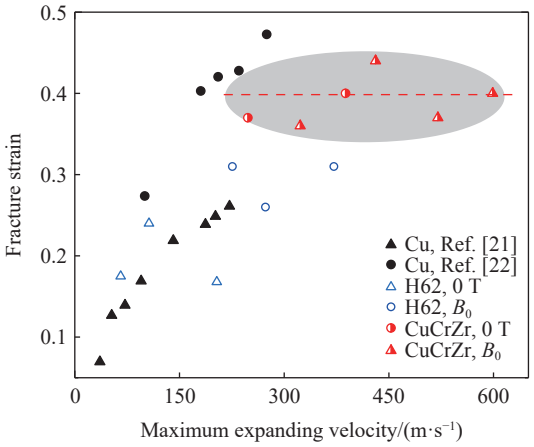
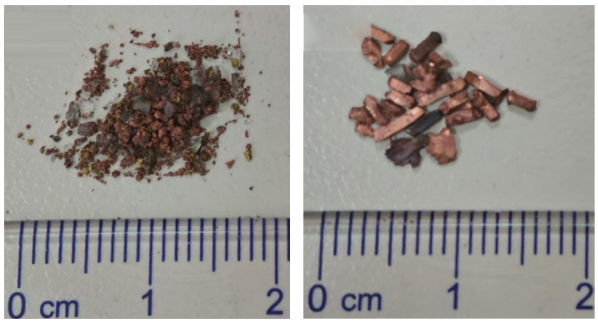


图 12　CuCrZr 合金断裂应变-最大膨胀速度关系

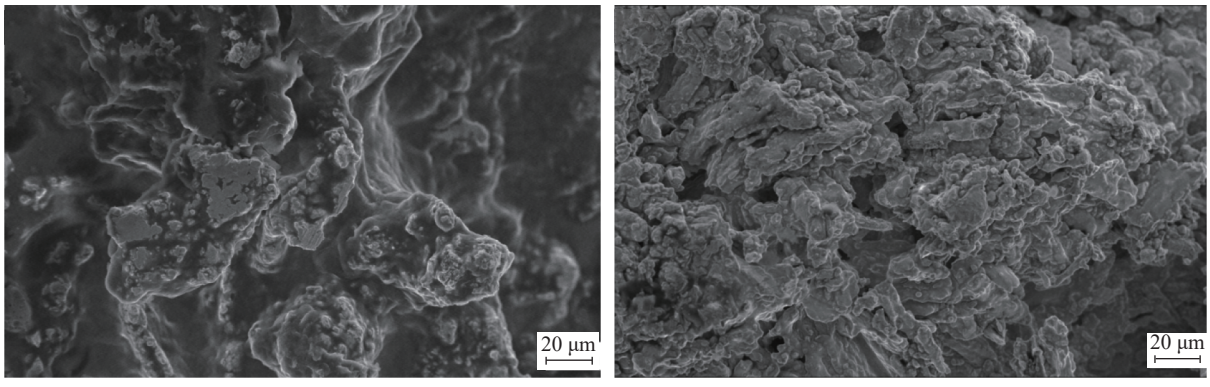
Fig. 12　Relationship between fracture strain and maximum expansion velocity of CuCrZr alloy



(a) U_0=20 kV, B_0=0 T　(b) U_0=20 kV, B_0=3.5 T

图 13　有无磁场条件下 CuCrZr 膨胀环回收照片

Fig. 13　Recovered CuCrZr expansion ring specimens with and without magnetic field



(a) U_0=20 kV, B_0=0 T　(b) U_0=20 kV, B_0=3.5 T

图 14　回收破片断口表征

Fig. 14　Fracture surface characterization of recovered fragments

3 结　论

基于新发展的外磁场辅助电磁膨胀环实验技术，开展了 CuCrZr 合金在电-磁-热-力多场耦合条件下的动态力学性能研究，主要结论如下：

(1) 外磁场辅助的电磁膨胀环实验技术在不显著提升金属样品环中感应电流和焦耳热温升的情况下，可稳定实现 10^4 s^{-1} 以上的高应变率加载，在相同驱动线圈电压下，加载能力较传统电磁膨胀环提升 1 倍以上；

(2) 获得了电-磁-热-力多场耦合加载条件下 CuCrZr 合金的应力-应变曲线，与只考虑温度和应变率效应的修正 JC 本构模型预测结果进行对比，发现电-磁-热-力多场耦合条件下 CuCrZr 合金的流动应力比相同参数的热力耦合条件下的流动应力低 50% 以上，电流和磁场引起的电塑性效应显著降低了材料强度；

(3) 获得了 CuCrZr 合金材料在 1.3×10^4～3.0×10^4 s^{-1} 应变率（对应最大膨胀速度为 250～600 m/s）范围的断裂应变，高应变率条件下 CuCrZr 合金的断裂应变稳定在 0.4 左右，未呈现随加载应变率增大的趋势，表明加载应变率达到约 1.0×10^4 s^{-1} 以上时，CuCrZr 合金的断裂应变出现了应变率饱和效应。

参考文献：

[1] 马伟明, 鲁军勇, 李湘平. 电磁发射超高速一体化弹丸 [J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 1–10.
MA W M, LU J Y, LI X P. Electromagnetic launch hypervelocity integrated projectile [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 1–10.

[2] GHARIB L, KESHTKAR A. Electromagnetic interference of railgun and its effect on surrounding electronics [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 4196–4202.

[3] CIOLINI R, SCHNEIDER M, TELLINI B. The use of electronic components in railgun projectiles [C]//2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology. Victoria: IEEE, 2008: 1−6.

[4] SHEN K C, GONG Q T, SUN Z Y, et al. Damage characteristics of Cu-Cr-Zr alloy rail of electromagnetic railgun after simulated launch [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(8): 2589–2604.

[5] WANG X, YAO P P, ZHOU H B, et al. Research progress on surface damage and protection strategies of armature-rail friction pair materials for electromagnetic rail launch [J]. Materials, 2024, 17(2): 277.

[6] 康丽, 王兴, 刘梓屹, 等. 超高速滑动电接触 CuCrZr 合金轨道表面磨损机制及电接触性能 [J]. 润滑与密封, 2024, 49(5): 8–14.
KANG L, WANG X, LIU Z Y, et al. Investigation on wear mechanism and electrical contact performance of CuCrZr alloy rail surfaces for high-speed sliding electrical contact [J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(5): 8–14.

[7] WANG Y Q, MOHAMED O, DUNN K, et al. Effects of stress triaxiality and strain rate on the fracture of a CuCrZr alloy [J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 543: 152546.

[8] QIAN X Y, PENG X B, SONG Y T, et al. Dynamic constitutive relationship of CuCrZr alloy based on Johnson-Cook model [J]. Nuclear Materials and Energy, 2020, 24: 100768.

[9] HUANG Y C, LI M, MA C Q, et al. Flow behaviour constitutive model of CuCrZr alloy and 35CrMo steel based on dynamic recrystallization softening effect under elevated temperature [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(6): 1550–1562.

[10] ZHANG X X, YUAN Y L, ZHAO S Q, et al. Microstructure stability, softening temperature and strengthening mechanism of pure copper, CuCrZr and Cu-Al_2O_3 up to 1 000 ℃ [J]. Nuclear Materials and Energy, 2022, 30: 101123.

[11] SUZUKI R, SAITO M, HATANO T. Fracture strength of CuCrZr in high temperature environment [J]. Fusion Science and Technology, 2003, 44(1): 242–246.

[12] NIORDSON F I. A unit for testing materials at high strain rates [J]. Experimental Mechanics, 1965, 5(1): 29–32.

[13] GOURDIN W H. VISAR analysis in the presence of large intensity changes: application to the expanding ring [J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(4): 754–759.

[14] GOURDIN W H. Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test [J]. Journal of Applied

Physics, 1989, 65(2): 411–422.
[15] DAN J K, GUO Z L, CHEN Y, et al. Preliminary investigations on dynamic fracture of ductile metals by using electromagnetically driven expanding ring [J]. AIP Advances, 2020, 10(10): 105001.
[16] HUANG L T, HAN X T, CHEN Q, et al. Effect of electromagnetic ring expansion on the mechanical property of A5083 aluminum alloy [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 7100104.
[17] MA H J, HUANG L, WU M Q, et al. Dynamic ductility and fragmentation for aluminum alloy using electromagnetic ring expansion [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 787–792.
[18] YANG K, TABER G, SAPANATHAN T, et al. Suitability of the electromagnetic ring expansion test to characterize materials under high strain rate deformation [J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 80: 15002.
[19] OKAZAKI K, KAGAWA M, CONRAD H. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titatnium [J]. Materials Science and Engineering, 1980, 45(2): 109–116.
[20] 李桂荣, 王宏明, 李沛思, 等. 磁致塑性效应下的位错动力学机制 [J]. 物理学报, 2015, 64(14): 148102.
LI G R, WANG H M, LI P S, et al. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(14): 148102.
[21] MOLOTSKII M, FLEUROV V. Magnetic effects in electroplasticity of metals [J]. Physical Review B, 1995, 52(22): 15829–15834.
[22] JIANG Y, CHEN Y, GUO Z L, et al. Effect of strain rate on ductility of Cu TU1 in electromagnetic ring expansion [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 184: 104832.
[23] JANISZEWSKI J. Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(7/8): 1001–1008.
[24] 郭昭亮, 范诚, 刘明涛, 等. 爆炸与电磁加载下无氧铜环、柱壳的断裂模式转变 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1072–1079.
GUO Z L, FAN C, LIU M T, et al. Fracture mode transition in expanding ring and cylindrical shell under electromagnetic and explosive loadings [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1072–1079.

Dynamic Tensile Properties of CuCrZr Alloy under Electro-Magnetic-Thermal-Mechanical Multifield Coupled Loading

SU Rina[1], ZHOU Zhongyu[1], CHEN Xuemiao[1], LUO Binqiang[1], WANG Guiji[1], TAN Fuli[1], ZHAO Jianheng[2]

（1. *Institute of Fluid Physics*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*;
2. *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*）

Abstract: Obtaining the mechanical response of CuCrZr alloy under coupled electro-magnetic-thermal-mechanical loading is significant for the engineering application of CuCrZr alloy, which is one of the candidate materials for electromagnetic railgun rails. This paper proposes an external-magnetic-field-assisted electromagnetic expanding ring technique, which stably achieves high strain rate loading exceeding 10^4 s^{-1} without the significant increase in the induced current and Joule heating temperature rise in the metal sample ring. Based on this technique, a study on the dynamic tensile properties of CuCrZr alloy under coupled electro-magnetic-thermal-mechanical loading was conducted. The stress-strain curves and fracture strain of CuCrZr alloy under conditions of high current density, high strain rate, high temperature rise rate, and strong magnetic field were obtained. The results provide important references for the application of CuCrZr alloy under multi-physics field coupling conditions.

Keywords: electromagnetic expanding ring; CuCrZr alloy; dynamic tensile properties; multiphysics coupling