



·脉冲功率技术·

10 MA 多支路汇流装置上钽的强度实验研究^{*}

张朝辉, 王贵林, 章征伟, 郭帆, 计策, 傅贞, 李勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 磁驱动准等熵加载技术通过电流产生的磁压力加载材料, 加载路径由负载电流波形和负载结构决定。作为应变率介于静高压加载和冲击加载之间的新型实验技术, 熵增小、温升高。10 MA 装置是典型的多支路汇流装置, 包括 24 个电流支路, 可在较大范围内控制负载电流波形, 实现 mm 厚、cm 直径样品在不同应变率下的准等熵加载。基于 10 MA 装置, 通过调节负载电流波形实现样品加载路径控制, 在一定压力-应变率范围, 开展金属钽的强度实验研究, 获取了不同厚度金属钽样品的加-卸载波剖面速度历史, 分析获得了钽在系列峰值压力下的强度数据, 比较了多个加载平台不同加载路径下的强度数据, 实验结果与美国圣地亚国家实验室的磁驱动准等熵结果接近(平均应变率都约为 10^5 s^{-1}), 明显高于冲击加载的流动强度, 低于准静态加载获取的流动强度, 与应变率增高强度会有所下降的理论预测一致。基于多支路汇流装置, 未来将可开展更为丰富的材料动力学特性实验研究。

关键词: 磁驱动准等熵; 电流波形; 强度; 加载路径; 钽

中图分类号: O521.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210069

Tantalum strength experiments on 10 MA facility

Zhang Zhaohui, Wang Guilin, Zhang Zhengwei, Guo Fan, Ji Ce, Fu Zhen, Li Yong

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In metal strength research under extreme conditions, material's response is closely related to microstructure, stress history, pressure and temperature, etc. Magnetically driven isentropic compression as a new experimental technique with strain rate between quasi-static and impact loading, has low increased entropy and temperature. This paper presents the experimental work carried out on a 10 MA facility in CAEP using the new technique. The 10 MA facility includes 24 modules, which help to control the load current shape in a relative wide range. Based on the characteristics of the 10 MA facility, the sample loading path was controlled by adjusting the load current waveform. In a certain pressure-strain rate range, the strength of tantalum was tested. The loading and unloading wave profile velocity history of tantalum samples with different thicknesses was successfully obtained, and the strength data of tantalum under a series of peak pressures were obtained. Comparison shows that the strength obtained is significantly higher than the strength under shock loading, but lower than that under quasi static loading. More experimental studies on material dynamic characteristics will be carried out at the facility in the future.

Key words: magnetically driven quasi-isentropic; current shape; strength; loading history; tantalum

金属材料在极端加载条件下(压力 $> 10 \text{ GPa}$, 应变率 $> 10^5 \text{ s}^{-1}$)的强度特性研究在极端条件材料物理、航天航空等领域有着重要应用。材料强度与微结构、加载路径和加载压力、温度等因素相关。磁驱动加载作为近年发展起来的一种新型材料动力学实验技术^[1], 可以实现对材料的快速($0.1 \sim 1 \mu\text{s}$)、超高压($0.1 \sim 1 \text{ GPa}$)平滑加载(“等熵压缩”)。

随着磁驱动加载实验技术快速发展, 国内外相继开展了钽在磁驱动准等熵加载下的强度特性研究。莫建军等人^[2]在 CQ-1.5 上开展多晶钽的准等熵压缩实验, 在约 30 GPa 压力下观察到了准等熵压缩过程中的弹塑性转变和

* 收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-03-28

基金项目: 中国工程物理研究院科研项目

作者简介: 张朝辉(1979—), 男, 博士研究生, 副研究员, 从事材料动力学特性研究; zhangzh108@caep.cn.

层裂现象。张红平、王桂吉等人^[3]采用反积分计算分析实验数据获得了相应钽样品的流动强度为 1.85 GPa, 在近 10^5 s^{-1} 应变率加载下的弹性屈服极限为 2.9 GPa, 与国外准等熵加载下的相关数据相符, 但与传统冲击加载测量结果却有明显差别。J. P. Davis, J. Eggert 等人^[4-5]基于 ZR 装置, 结合波形调节技术, 将钽加载到约 0.4 GPa, 样品厚度为 400~700 μm 。材料的力学和物理性质与材料微观结构密切相关, 不同加工工艺会对钽的强度带来影响, 为此, J. R. Asay 等人^[6-7]在 Veloce 和 ZR 装置上开展了几种不同工艺和杂质含量钽样品在无冲击压缩的屈服强度研究, 获得了 18 GPa 内不同工艺和杂质含量钽样品屈服强度变化的规律性, 同时分析了不同应变率加载下弹性屈服极限的变化。T. J. Vogler^[8]结合 $10^5 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ 应变率加载下的铝的实验数据分析了应变率变化对强度的影响机制, 考虑热软化降低强度和叠加应力增加强度, 得到铝在 10^7 s^{-1} 应变率以下强度随应变率增加而增加, 类似的, 钽也应该有一个相应的应变率极值。

磁驱动加载作为应变率介于静态加载和冲击加载之间的新型实验技术, 通过脉冲功率发生器将脉冲大电流加载到实验负载区, 在负载区形成随时间平滑上升的磁压, 实现对样品的准等熵加载。调节负载电流波形和电极结构, 可控制样品的加载路径。用于磁驱动加载的脉冲功率装置主要有美国 Sandia 实验室的 Z/ZR 装置^[4, 7, 9-10]和 VELOCE^[6-7], Los Alamos 实验室的 Atlas 装置^[11]、法国的 GEPI、流体物理研究所的 CQ-1.5^[12-3]及 CQ-4 和水介质传输线装置“阳”加速器^[12]和 10 MA 装置^[13-15]等。

10 MA 装置作为国内最强电流的脉冲功率源, 充电 $\pm 70 \text{ kV}$ 时, 储能 3.53 MJ, 瞬时输出功率达 TW 级。包括 24 个支路平行分布在两层, 每支路包含 6 MV 的 Marx 发生器、中间储能器、5 MV 触发激光开关、脉冲形成线、水介质自击穿开关和三纤板传输线等。所有 24 路由 12 路激光分别触发, 每路激光触发 2 个开关, 短脉冲模式下负载电流幅值 8~10 MA, 10%~90% 脉冲上升沿 80~120 ns。采用电流波形调节技术, 长脉冲模式下负载电流幅值 5~8 MA, 0~100% 上升时间 300~750 ns 的平缓电流。本文基于 10 MA 装置, 设计开展了金属钽系列峰值压力的流动强度实验, 获取了钽/LiF 界面的加-卸载剖面速度历史, 分析得到了钽在(峰值压力 28.7/81/119 GPa, 应变率 $4.1/6.7/7.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$)准等熵加载下的流动强度数据。

1 基于多支路汇流装置的加载路径控制技术

10 MA 装置因其多路汇流特性, 电流波形从幅值、上升沿和波形结构都有较大的调节空间, 适合开展较宽压力范围($\sim 150 \text{ GPa}$)、较宽应变率范围($10^4 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$)和复杂加载路径下的材料动力学特性研究。下面具体介绍负载结构设计优化、电极和样品尺寸设计、电流波形设计与实现等加载路径控制技术。

1.1 负载结构设计优化

磁驱动平面加载实验对样品区加载均匀性和不同样品区驱动压力历史的一致性要求很高^[16], 如图 1 所示。如要通过测量速度历史数据获取材料动态实验特性, 至少需要相同应力加载历史下 2 个以上厚度样品的自由面速度数据, 需要保证磁驱动平面加载过程中的磁场均匀性和同步性。

为验证负载结构优化方案, 在 10 MA 装置开展了一系列不同负载结构类型的磁驱动平面加载实验, 定标负载结构的驱动效率, 典型负载结构如图 2(a)所示。 δ_{E1} , δ_{E2} 分别为不同样品区电极厚度, δ_c 为阴极柱厚度, g 为阴阳极间隙, w 为样品区宽度, w_a 为电极过流宽度, H 为样品区高度, H_a 为负载总高度。实验通过 PDV(Photon Doppler Velocimeter)速度测量系统^[17-19]获得了大量的磁加载均匀性、同步性和平面性数据。应用 Ansoft 软件开展对应负载结构三维静态磁场模拟给出的磁感应强度分布如图 2(b)所示, 沿 z 轴从 $z=-3 \text{ mm}$ 到 $z=3 \text{ mm}$ 的磁场均匀性在 2% 以内, 沿 x 轴从 $x=-3 \text{ mm}$ 到 $x=3 \text{ mm}$ 磁场均匀性在 4% 以内。实验中样品区各位置的速度历史如图 2(c)所示, 将测量速度历史归一化到样品厚度为 1000 μm 的自由面速度历史, 对比分析可知, 不同位置加载 500 ns 后速度历史差别小于 2%, 反推得到的负载样品区磁加载压力不均匀性在 3% 以内。

1.2 电极和样品尺寸设计

磁驱动加载实验中, 要求在准等熵压缩波到达样品后界面前没有冲击波形成, 以确保测量到的样品剖面粒子速度历史可用于反演计算样品压力加载历史, 获取连续的样品动态响应数据。对于某样品材料, 先按阻抗匹配和压力波等需求选择驱动电极材料。其中为防止电极/样品界面反射波对加载波形成较大影响, 电极材料与样品声阻抗差别不能太大。而要在样品加载面形成预定的准等熵压缩波, 应控制流经电极的电流波形, 可用电作用量 Q 来描述电流波形^[15, 20], 即

$$Q(t) = \int_0^t j^2(\tau) d\tau, \quad j(\tau) = \frac{i(\tau)}{\delta_E} \quad (1)$$

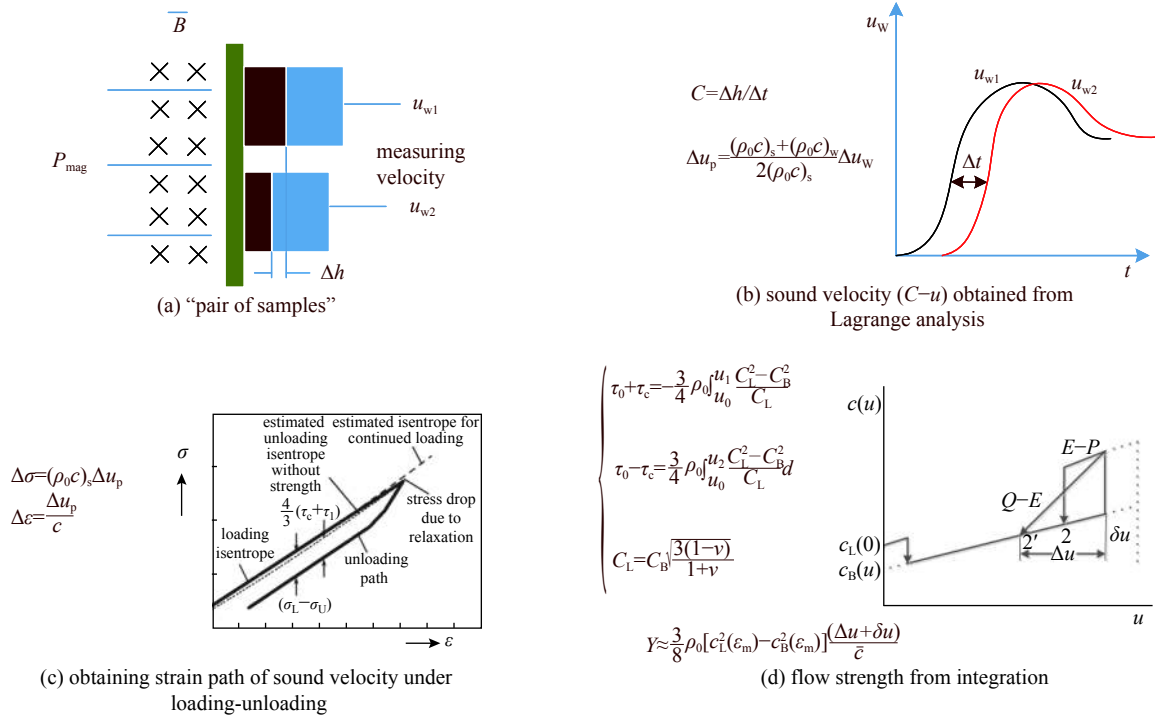


Fig. 1 Data processing method of magnetically-driven material dynamic properties experiment

图 1 磁驱动材料动态实验数据处理方法

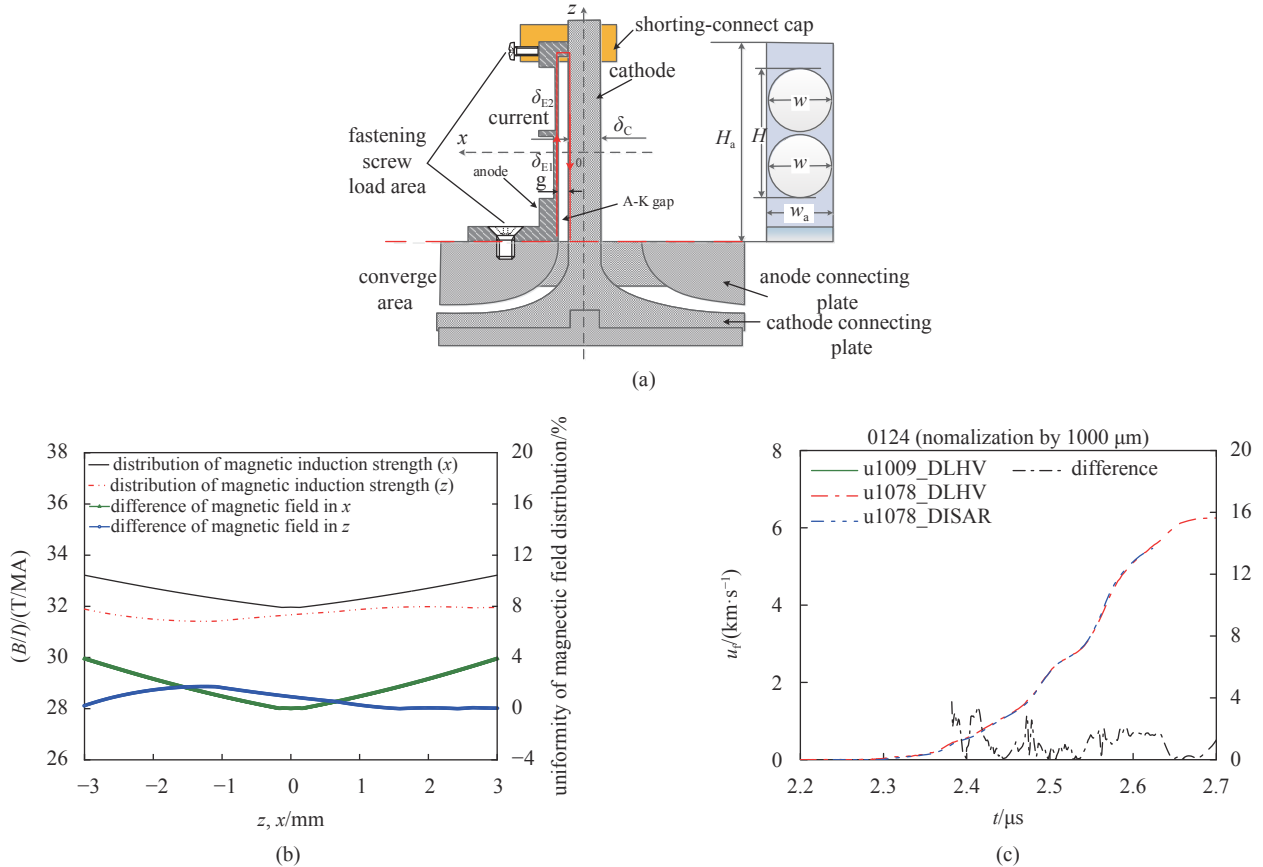


Fig. 2 Typical load configuration, electromagnetic field simulation and measurement result

图 2 典型负载结构、电磁场模拟和诊断结果

式中： j 为流经电极的平均面电流密度； i 为电流幅值； δ_E 为电极厚度。电作用量可用于表征某一电极材料的烧蚀情况，一般采用材料的爆炸电作用量 Q_b 来表征材料全部烧蚀需要的电作用量。

应力波在电极中传播和电极/样品界面发生反射和透射时, 应力和粒子速度在不同界面上的反射和透射关系^[21]如式(2)和(3)所示。

$$\begin{cases} dp_T = \frac{2dp_I}{1 + (\rho_0 C_L)_E / (\rho_0 C_L)_S} = \frac{2(\rho_0 C_L)_E (\rho_0 C_L)_S}{(\rho_0 C_L)_E + (\rho_0 C_L)_S} du_I \\ du_T = \frac{2(\rho_0 C_L)_E}{(\rho_0 C_L)_E + (\rho_0 C_L)_S} du_I \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} dp_R = \frac{(\rho_0 C_L)_S - (\rho_0 C_L)_E}{(\rho_0 C_L)_E + (\rho_0 C_L)_S} dp_I = \frac{(\rho_0 C_L)_S - (\rho_0 C_L)_E}{(\rho_0 C_L)_E + (\rho_0 C_L)_S} (\rho_0 C_L)_S du_I \\ du_R = \frac{(\rho_0 C_L)_E - (\rho_0 C_L)_S}{(\rho_0 C_L)_E + (\rho_0 C_L)_S} du_I \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为压力幅值; ρ_0 为材料初始密度; C_L 为材料 Lagrange 声速; u 为材料中的粒子速度; 下标 I, R, T 分别代表入射、反射和透射; 下标 E, S 分别代表电极和样品。

根据上述应力波传播关系, 可先由需求的样品压力波 $p_S(\tau)$ 计算电极/样品界面电极中的入射压力波 $p_{ES}(\tau)$, 再由简单波传播关系反推电极加载面的磁压力波 $p_E(\tau)$, 确定对应电流波形的电作用量 $Q(T)$ 。

$$dp_{ES}(\tau) = \frac{(\rho_0 C_L)_S + (\rho_0 C_L)_E}{2(\rho_0 C_L)_S} dp_S(\tau), \quad \tau_E(p) = \tau_{ES}(p) - \frac{\delta_E}{C_L^E(p)} \quad (4)$$

$$Q(T) = \int_0^T \frac{i^2(\tau)}{\delta_E^2} d\tau = \int_0^T \frac{2p_E(\tau)}{\mu_0 \delta_E^2} d\tau \quad (5)$$

式中: μ_0 为真空磁导率。为保证实验中电极保持较低温度, 一般要求压力峰值时刻 t_p 的电作用量 $Q(t_p)$ 应不大于电极材料的爆炸电作用量 Q_b , 则电极最小厚度为

$$\delta_{Emin} = \sqrt{\int_0^{t_p} \frac{2p_E(\tau)}{\mu_0 Q_b} d\tau} \quad (6)$$

由式(6)可知, 如果 Q_b 较高, 则可以适当降低电极厚度 δ_E , 可增加样品厚度差, 降低获取材料动态特性的不确定度。如要在样品中获得更高压力, 分析式(3)可知电极材料本身的声阻抗(材料对因扰动而引起的质点振动的阻尼特性)较低更好。如表 1 所示, 金属铜和银电阻率低, 爆炸电作用量大, 但银的声阻抗太高, 加载到样品上的压力并不高, 铝由于其较低的电阻率和声阻抗, 和铜一起成为磁驱动加载中常选用的电极材料。

表 1 几种金属材料特性数据^[22]
Table 1 Several metal properties data

material	density/(g·cm ⁻³)	initial sound velocity/(cm·μs ⁻¹)	resistivity Ω /(μΩ·cm)	explosive action/(MA ² ·cm ⁻⁴)
aluminum	2.70	0.525	2.82	658
copper	8.95	0.396	1.77	1730
silver	10.50	0.324	1.59	1120
gold	19.30	0.307	2.44	830
tungsten	19.30	0.404	5.60	750
molybdenum	10.20	0.516	5.70	740
uranium	18.70	0.251	28.00	350

另外, 为使得获取准等熵加载速度历史未受边界扰动, 在磁驱动压力波峰值到达后自由面之前仍有宽度 w_e 的一维平面加载区域, 电极和样品直径 D 应满足

$$D \geq w_e + 2c(\rho_0)t_p \quad (7)$$

对于装置电流波形调节水平有限的情形, 一般将电流波形加载电极形成冲击波的位置($(x_L)_{shock-up}$)确定在样品后界面, 以避免在样品中形成冲击波, 并以此确定电极尺寸和样品尺寸。首先, 将样品中压力波会聚等效为电极中会聚, 计算样品厚度 δ_S 对应的等效电极厚度 δ_{ES} , 等效电极厚度与电极厚度之和应不大于冲击波形成位置

$$\delta_{ES}(p) = \frac{\delta_S C_L^E(p)}{C_L^S(p)}, \quad \delta_E + \frac{\delta_S C_L^E(p)}{C_L^S(p)} \leq (x_L)_{shock-up} \quad (8)$$

当样品厚度和加载压力确定时, 电极最大厚度 $\delta_{E_{max}}$ 可按下式估算

$$\delta_{E_{max}} \approx (x_L)_{shock-up} - \text{MAX} \left[\frac{\delta_S C_L^E(p)}{C_L^S(p)} \right] \quad (9)$$

同样, 若先确定了电极厚度, 则样品最大厚度 $\delta_{S_{max}}$

$$\delta_{S_{max}} = \text{MIN} \left[\frac{C_L^S(p)}{C_L^E(p)} \right] \left[(x_L)_{shock-up} - \delta_E \right] \quad (10)$$

为使速度历史可用于解读材料动态特性, 要求整个加载过程中样品/窗口间的反射波未到达加载面对加载历史造成影响, 如图 3 所示, 则样品厚度应满足

$$\text{MIN} \left[t + \frac{2\delta_E - x_{peak}}{C_L^E(p(t))} + \frac{2\delta_S}{C_L^S(p(t))} \right] \geq t_{peak} \quad (11)$$

式(9)、式(10)和式(11)中 MAX[] 和 MIN[] 分别为相应范围内的最大值和最小值, x_{peak} 和 t_{peak} 分别为峰值压力波与磁扩散前沿交汇的 Lagrange 位置和时刻。

对于较薄样品, 加载过程中压力波被压缩得不严重, 式(11)左边项最小值可用初始时刻压力的初始参数估算, 从而给出最小样品厚度为

$$\delta_{S_{min}} = \frac{C_{L0}^S t_{peak}}{2} - \frac{C_{L0}^S (\delta_E - x_{peak}/2)}{C_{L0}^E} \quad (12)$$

上述估算公式分别用于磁驱动准等熵实验电极厚度 δ_E 和样品厚度 δ_S 设计, 由于有一定的近似和假设, 尺寸的精确设计还可通过磁驱动模拟计算^[23] 校验。

1.3 电流波形设计流程与实现

大多数材料的拉格朗日声速随压力增加而增加, 平滑上升的磁压力波将在电极和样品内逐渐会聚。为防止电极和样品在磁驱动准等熵加载过程中形成冲击波, 加快电极内部温升, 影响材料动态特性解读, 必须控制加载电流波形。电流波形调节方案设计流程(图 4)为: 由实验目的推导对应负载结构的理想加载电流波形; 结合装置参数设计包括水开关和预脉冲开关的运行模式、激光开关触发时序和电容器充电电压等装置参数; 开展全电路模型^[24] 计算, 与计算得到的理想加载电流波形比较; 通过迭代优化计算确定放电时序。

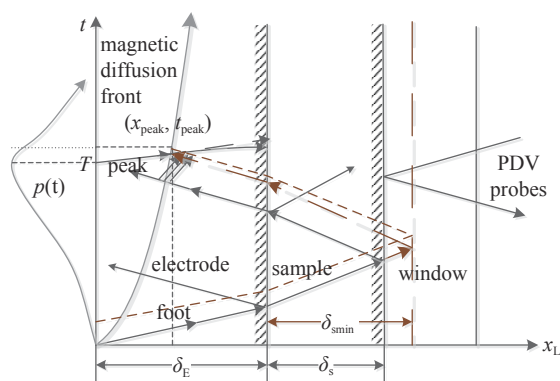


Fig. 3 Influence of reverberation wave acting on the loading history in magnetically-driven experiments

图 3 磁驱动加载中材料界面反射波对加载历史的影响

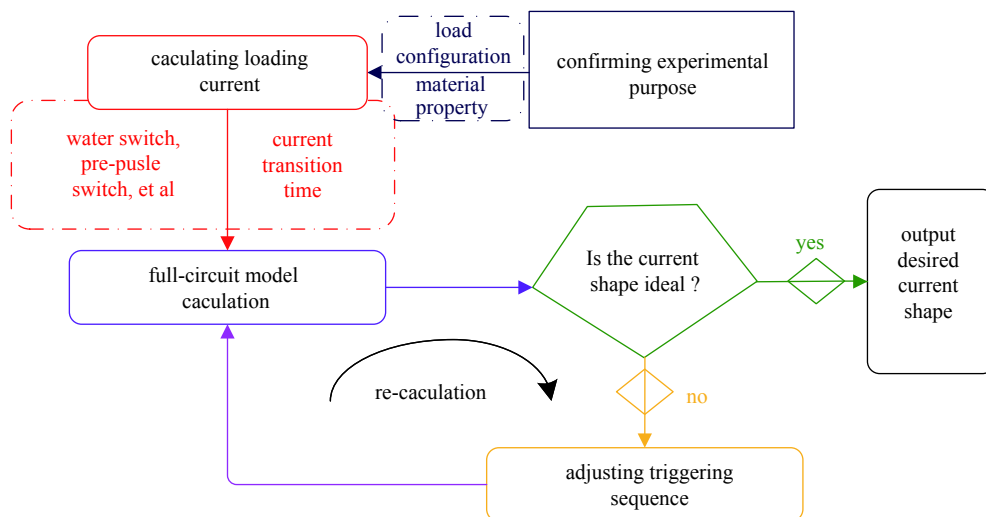


Fig. 4 Design method of current shape adjusting

图 4 电流波形调节方案设计方法

装置 24 路可分成 12 组分时放电, 每组触发时间由激光触发开关控制。装置支路结构如图 5 所示, 开展实验时首先对 Marx 发生器电容器充电, 串并联的电容器末端在 Marx 开关接通后流入中间储能器, 在激光开关一侧形成

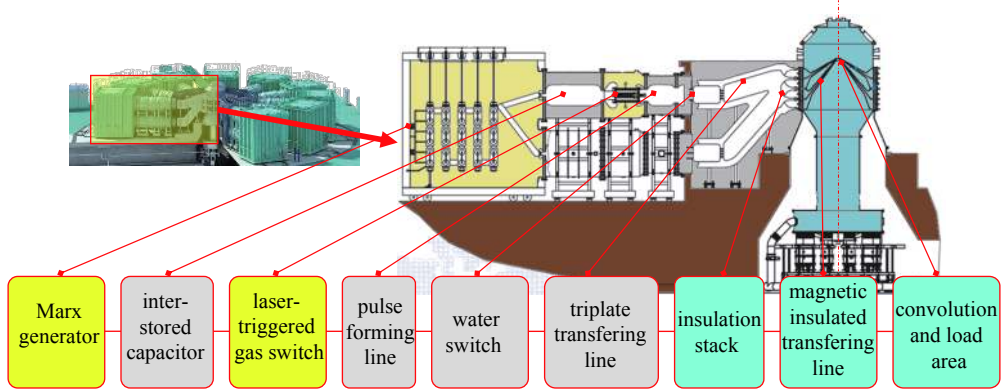


Fig. 5 Schematic diagram of one of 24 branch structure of 10 MA facility

图 5 10 MA 装置各支路结构示意图

MV 以上负高压。每组激光器同时控制两个相邻的激光开关,当激光在预定时间进入激光开关时,开关触发闭合,中间储能器的电流将注入形成线,电压接近峰值时刻自击穿水介质开关闭合,并经水介质传输线汇入绝缘堆和真空磁绝缘传输线,经负载汇流区汇入负载区,在电极上形成需要的电流波形。

2 实验测量结果与分析

分析每次实验测量的波剖面速度历史,分别得到各个样品的准等熵加载弹性极限对应的测量界面速度 $u_M(\text{IEL})$ 、原位粒子速度 $u_p(\text{IEL})$ 和准等熵加载弹性极限应力 $\sigma(\text{IEL})$ 。应用公式(13),由应力计算准等熵加载屈服强度 $Y(\text{IEL})$,处理和计算结果分别如表 2 所示,退火 Ta 和未退火 Ta 的准等熵加载屈服强度相当。

$$Y(\text{IEL}) = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \sigma(\text{IEL}) \quad (13)$$

表 2 金属 Ta 准等熵加载强度实验材料、厚度和获取的强度特性

Table 2 Parameters of quasi-isentropic compression experiment of Ta and its strength properties obtained

experiment No.	thickness / μm	peak velocity $u_M/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	peak pressure /GPa	$u_M(\text{IEL}) /(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_p(\text{IEL}) /(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\sigma(\text{REL})$ /GPa	$Y(\text{IEL})$ /GPa	$Y(\text{flow})$ /GPa	strain rate / (10^5 s)
shot297 ^a	919/1011	0.68	28.7	0.070	0.0458	2.61	1.27	1.85	4.1
shot299 ^b	582/989	1.63	81	0.079	0.0517	2.95	1.44	3.16	6.7
shot397 ^b	544/1099	2.19	119	0.075	0.0491	2.80	1.37	3.75	7.8

Note: a—annealing Ta; b—un-annealing Ta.

图 6(a) 是 shot299 实验获取的样品/窗口界面速度,结合窗口材料的高压状态方程和折射率系数变化特性反演计算样品的原位粒子速度。如图 6(b) 所示,对于反射波未影响有效加-卸载速度历史时,如窗口材料的粒子速度 u_w 和纵波声速 C_w 的关系已知,则可采用简单波积分计算样品的原位粒子速度和纵波声速数据,其中各物理量的微分关系分别为

$$C_s(u_w) = \frac{\Delta h}{\Delta t(u_w)}, C_w(u_w) = \frac{1}{\rho_{0w}} \frac{dp(u_w)}{du(u_w)}, \Delta u_p = \frac{(\rho_0 C)_s + (\rho_0 C)_w}{2(\rho_0 C)_s} \Delta u_w \quad (14)$$

如果反射波已影响到样品/窗口界面速度历史,则无法直接反推样品的原位粒子速度历史。但在样品和窗口材料状态方程已经比较准确时,可以借助数值模拟计算反射波的影响,还原样品速度粒子速度历史。常用的方法是转换函数方法 TFM,在认可数值模拟计算精度的情况下,通过计算先给出样品/窗口粒子速度 $u_w(t)$ 和对应的样品原位粒子速度 u_p 的关系,再处理得到频率域的关联函数,并转换得到转换函数,最后用转换函数对样品/窗口界面速度做卷积计算样品原位粒子速度剖面,通过原位粒子速度反演得到的金属 Ta 原位粒子速度 u 和加载-卸载 Lagrange 声速 $C(u)$ 如图 6(b) 所示,按式(15)对准弹性段声速进行积分^[2]得到材料在峰值压力的流动强度 Y 具体见表 2。

$$Y = \frac{3}{4} \rho_0 \int_{u_1}^{u_2} \frac{C^2(u) - C_B^2(u)}{C(u)} du \quad (15)$$

式中: ρ_0 是初始密度; $C(u)$ 是准弹性(QE)卸载段的 Lagrange 声速; $C_B(u)$ 是 Lagrange 体积声速; u_1, u_2 分别为 QE 段

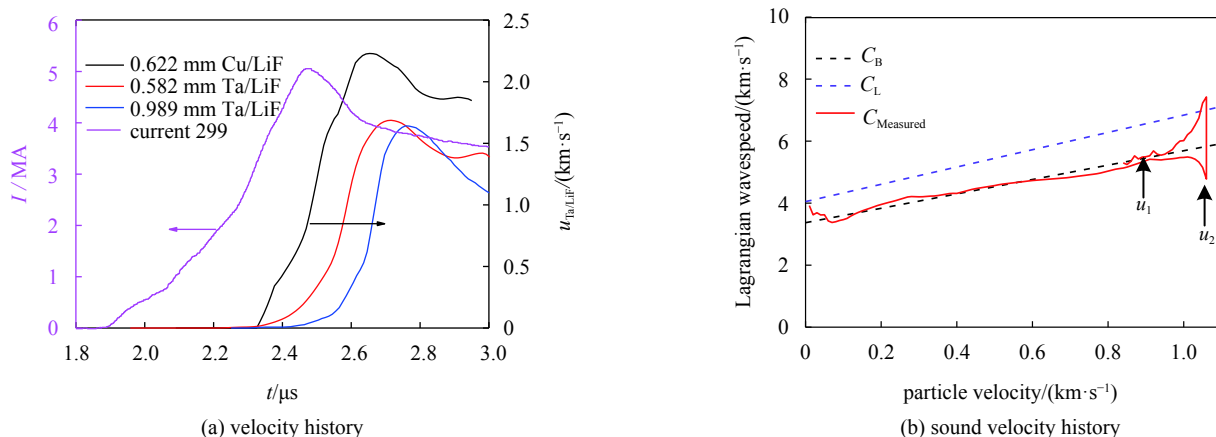


Fig. 6 Measured velocity history in shot 299 and loading-unloading sound velocity history from data processing

图 6 Shot299 实验测量平滑的波剖面速度历史及数据处理得到的加载-卸载声速历史

的起始和峰值原位粒子速度。

体积声速和纵向声速的关系为

$$C_L = C_B \sqrt{\frac{3(1-\nu)}{1+\nu}} \quad (16)$$

式中: ν 是泊松比, 本文中金属 Ta 取常数 0.339。在保证一定精度的前提下, 流动强度计算式为

$$Y \approx \frac{3}{8} \rho_0 [c_L^2(\epsilon_m) - c_B^2(\epsilon_m)] \frac{(\Delta u + \delta u)}{\bar{c}} \quad (17)$$

式中: ϵ_m 是峰值应变; \bar{c} 是 QE 区域的平均声速。

3 分析与讨论

准等熵加载强度实验要求有效的加-卸载波剖面速度测量, 对波形优化能力、峰值后的电流下降、速度测量和加卸载数据分析精度等都提出了更高要求。本文基于 10 MA 装置, 形成了压力峰值约 150 GPa, 应变率范围 $10^4 \text{ s}^{-1} \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ (平均应变率 $10^5 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$) 的准等熵加载路径控制能力。如图 7 所示, 获取了钽等材料 28.7/81/119 GPa 系列峰值压力, 应变率 $4.1/6.7/7.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 的流动强度分别为 1.85/3.16/3.75 GPa。

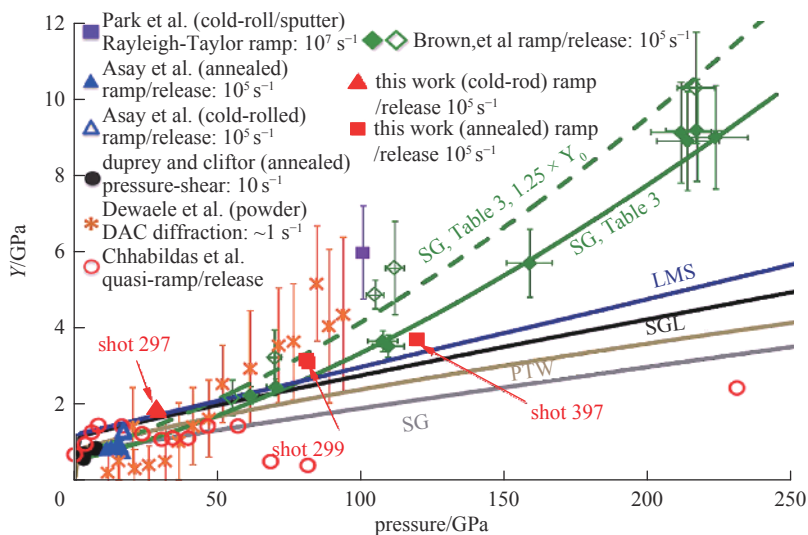


Fig. 7 Flow-strength properties of Ta in different peak pressure

图 7 金属 Ta 在 28.7/81/119 GPa 系列峰值压力下的流动强度特性

本文实验获取的金属 Ta 在准等熵加载下的流动强度数据与数据库及其他文献的实验数据^[25] 相比, 退火和未退火两种不同工艺钽在准等熵加载下的流动强度基本与 SG 模型的 Table3 基本吻合, 与国外的磁驱动准等熵结果更为接近 (平均应变率约 10^5 s^{-1}), 明显高于冲击加载的流动强度, 低于准静态加载获取的流动强度, 与应变率增高

强度会有所下降的理论预测一致。此外,流动强度随加载峰值压力升高有明显升高,由于加载应变率相差不大,本文研究中的实验数据还未体现出应变率的影响。

4 结 论

本文基于 10 MA 装置,通过调节负载电流波形实现样品加载路径控制,在 30~120 GPa 峰值压力、(4~8) $\times 10^5$ s⁻¹ 平均应变率加载下,开展金属钽的强度实验研究,获取了钽在系列峰值压力下的准等熵加载初始屈服强度和流动强度数据,与美国圣地亚国家实验室的磁驱动准等熵结果接近(平均应变率约 10^5 s⁻¹),明显高于冲击加载的流动强度,与应变率增高强度会有所下降的理论预测一致。实验获取的退火和未退火两种工艺钽样品的准等熵加载屈服强度相当,未见加工工艺对材料初始屈服强度的明显影响。因 10 MA 装置的加载能力有限,峰值加载压力最高仅能达到 200 GPa,且 24 个支路只有 12 台激光器用于调节波形,应变率可调节范围也制约了更加深入的精密实验,这些不足之处,后续工作中,需要从设计方法及装置升级等方面开展工作。本文获取的 Ta 的强度特性数据,验证了金属 Ta 在 $10^5\sim 10^6$ s⁻¹ 应变率的强度基本符合 SG 强度模型。建立的材料准等熵加载强度等动力学特性实验技术(峰值压力 30~120 GPa,平均应变率为 $10^5\sim 10^6$ s⁻¹)可用于开展其他材料准等熵加载实验,获取更广泛材料的高压加载动力学特性信息。后续将进一步优化提升装置的加载能力、波形调节能力及精度,拓宽加载压力及应变率范围,获取更高置信度的材料高压强度数据。

致 谢 感谢中国工程物理研究院流体物理研究所 10 MA 装置运行组成员对该研究工作给予的积极配合与帮助。

参考文献:

- [1] Lemke R W, Knudson M D, Davis J P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(6): 480-485.
- [2] 莫建军, 王桂吉, 孙承伟, 等. 金属钽的准等熵压缩特性试验研究[C]//第十二届全国实验力学学术会议论文集. 2009. (Mo Jianjun, Wang Guiji, Sun Chengwei, et al. Experimental study on quasi-isentropic compression characteristics of tantalum[C]//Proceedings of the 12th National Conference on Experimental Mechanics. 2009)
- [3] 张红平, 王桂吉, 李牧, 等. 准等熵压缩下金属钽的屈服强度分析[J]. 高压物理学报, 2011, 25(4): 321-326. (Zhang Hongping, Wang Guiji, Li Mu, et al. Yield strength analysis of tantalum in quasi-isentropic compression[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(4): 321-326)
- [4] Davis J P, Knudson M D. Multi-megabar measurement of the principal quasi-isentrope for tantalum[C]//Proceedings of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. 2009: 673-676.
- [5] Eggert J, Bastea M, Reisman D B, et al. Ramp wave stress-density measurements of Ta and W[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 955(1): 1177-1180.
- [6] Asay J R, Ao T, Vogler T J, et al. Yield strength of tantalum for shockless compression to 18 GPa[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 073515.
- [7] Asay J R, Vogler T J, Ao T, et al. Dynamic yielding of single crystal Ta at strain rates of $\sim 5 \times 10^5$ /s[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 073507.
- [8] Vogler T J. On measuring the strength of metals at ultrahigh strain rates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 053530.
- [9] Davis J P, Deeney C, Knudson M D, et al. Magnetically driven isentropic compression to multimegabar pressures using shaped current pulses on the Z accelerator[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12: 056310.
- [10] Alexander C S, Knudson M D, Hall C A. High accuracy Hugoniot measurements at multi-megabar pressure utilizing the Sandia Z accelerator[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 215: 012150.
- [11] Trainor R J, Parsons W M, Ballard E O, et al. Overview of the Atlas project[C]//Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 97CH36127). Baltimore, MD, USA: IEEE, 1997.
- [12] 王贵林, 李军, 张朝辉, 等. “阳”加速器磁驱动平面飞片实验和速度计算校验[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 015101. (Wang Guilin, Li Jun, Zhang Zhaohui, et al. Experiments and velocity validation of magnetically driven flyer plates on “Yang” accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 015101)
- [13] 王勐, 关永超, 宋盛义, 等. PTS装置分层真空轴向绝缘堆设计[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 777-781. (Wang Meng, Guan Yongchao, Song Shengyi, et al. Design of PTS vacuum insulator stack[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 777-781)
- [14] 王贵林. 磁驱动平面加载实验技术及其在高压物态方程研究中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 6. (Wang Guilin. Magnetic loading techniques and its applications in high-pressure EOS[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 6)
- [15] 王贵林, 郭帅, 沈兆武, 等. 基于聚龙一号装置的超高速飞片发射实验研究进展[J]. *物理学报*, 2014, 63: 196201. (Wang Guilin, Guo Shuai, Shen Zhaowu, et al. Recent advances in hyper-velocity flyer launch experiments on PTS[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 196201)
- [16] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Experimental configuration for isentropic compression of solids using pulsed magnetic loading[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(9): 3587-3595.
- [17] 马云, 胡绍楼, 汪小松, 等. 样品-窗口界面运动速度的VISAR测试技术[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(4): 290-294. (Ma Yun, Hu Shaolou, Wang Xiaosong, et al. VISAR measurement on interface velocity between shocked specimen and window[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(4): 290-294)

- [18] Weng Jidong, Wang Xiang, Tao Tianjiong, et al. Optic-microwave mixing velocimeter for superhigh velocity measurement[J]. [The Review of Scientific Instruments](#), 2011, 82: 123114.
- [19] Dolan D H. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry[J]. [The Review of Scientific Instruments](#), 2010, 81: 053905.
- [20] 章征伟, 王贵林, 张绍龙, 等. 电作用量在磁驱动固体套筒内爆设计分析中的应用[J]. [物理学报](#), 2020, 69: 050701. (Zhang Zhengwei, Wang Guilin, Zhang Shaolong, et al. Application of electrical action to design and analysis of magnetically driven solid liner implosion[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2020, 69: 050701)
- [21] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 45-50. (Wang Lili. Foundation of stress waves[J]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 45-50)
- [22] Tucker T J, Toth R P. Sandia National Laboratory report SAND-75-0041 (New Mexico: Sandia National Laboratory).
- [23] 王刚华, 王桂吉, 阚明先, 等. CQ-4装置电磁驱动能力分析[J]. [应用力学学报](#), 2013, 30(6): 932-935. (Wang Ganghua, Wang Guiji, Kan Mingxian, et al. Analysis of magnetic drive capability for CQ-4 device[J]. [Chinese Journal of Applied Mechanics](#), 2013, 30(6): 932-935)
- [24] 郭帆, 王贵林, 邹文康, 等. 聚龙一号装置磁驱动加载实验的全电路模拟[J]. [强激光与粒子束](#), 2018, 30: 125001. (Guo Fan, Wang Guilin, Zou Wenkang, et al. Full circuit calculation of magnetically driven experiment on PTS facility[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2018, 30: 125001)
- [25] Brown J L, Alexander C S, Asay J R, et al. Flow strength of tantalum under ramp compression to 250 GPa[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2014, 115: 043530.