



·脉冲功率技术·

磁驱动加载装置负载区降温系统设计及应用*

邓顺益, 马 骁, 傅 华, 李 涛, 种 涛

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在材料物性研究中, 压力和温度是两个基础的物理量, 国内磁驱动加载装置具有压力调节能力, 暂不具备样品降温控制技术, 针对这一现状设计了一套配合磁驱动加载装置负载区的样品初始降温系统, 结合设计的电极板结构和测试探针工装, 使负载区电极板与样品、样品与探针固定于设定位置; 通过往电极板和探针工装形成的密闭气室内注入压缩低温液氮达到对样品降温的目的; 通过真空泵, 抽出电极板和探针工装形成的密闭气室内的空气, 避免测速探针由于低温凝结空气中的水汽而无法工作。基于该系统开展了低温下铋的斜波压缩实验, 获得了 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初始温度下铋的动力学响应数据, 验证了降温系统的可靠性。

关键词: 降温系统; 斜波加载; 铋; 温度

中图分类号: TG113.25

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220103

Design and application of cooling system in loading area of magnetically driving device

Deng Shunyi, Ma Xiao, Fu Hua, Li Tao, Chong Tao

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-103, Mianyang 621900, China)

Abstract: Pressure and temperature are two of the most critical factors in the study of material properties. The magnetically driving device has the ability of pressure regulation, but does not have the sample cooling control technology temporarily in our country. Therefore, a set of cooling system matching with the loading area of the magnetically driving device is designed. Combined with the designed electrode plate structure and the test probe, the electrode plate and the probe in the load area are fixed in the right position. The purpose of cooling the sample is achieved by injecting compressed low-temperature liquid nitrogen into the closed gas chamber formed by the electrode plate and the probe tooling. Through the vacuum pump, the air in the closed air chamber formed by the electrode plate and the probe tooling is extracted to avoid failure of the velocity measuring probe due to the water vapor in the low-temperature condensed air. Based on the system, the ramp wave compression experiment of bismuth at low temperature is carried out, and the dynamic response data of bismuth at the initial temperature of $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ are obtained, which verifies the reliability of the cooling system.

Key words: cooling system, ramp wave loading, bismuth, temperature

为了深入、全面地研究材料物性, 需要不同热力学路径的实验加载手段及配套的测试技术来获取丰富的实验数据, 经过科技工作人员长期的努力, 人们已经建立了多种实验加载装置。实验技术总体上可分为静高压压缩、冲击加载和斜波压缩三种。静高压实验中样品压缩速率慢, 实验中可精确控制压缩过程的温度、近似认为是一个等温过程, 每发实验压缩过程在压力-比容热力学平面上对应一条等温线。冲击加载实验中样品压缩率很快, 样品热传导需要的时间远大于其变形速率, 因此以认为是一个绝热的过程, 每发实验压缩过程在压力-比容热力学平面上对应一条 Hugoniot 线。斜波压缩实验中样品经历连续的变形过程, 样品中温升较低, 每发实验压缩过程在压力-比容热力学平面上对应一条准等熵线。热力学平面上等熵线位于等温线和 Hugoniot 线之间, 因此, Asay^[1] 认为斜波加载实验技术是联系静高压压缩和冲击压缩技术的重要桥梁。实现斜波压缩的方法主要有斜波发生器技

* 收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-06-06

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金项目(6142A03192007)

联系方式: 邓顺益, eligar@sina.com。

通信作者: 种 涛, maoda318@163.com。

术^[2]、阻抗梯度飞片加载技术^[3]、激光驱动斜波加载^[4]和磁驱动斜波技术^[5]四种方法,其中磁驱动斜波加载技术压力波形平滑,加载波形可控,已实现了 TPa 峰值加载压力,自建立以来受到科研人员广泛关注。国内外建立的磁驱动斜波加载装置有美国的 Z 装置^[6]、VELOCE 装置^[6],法国的 GEPI 装置^[7],中国的 10 MA 脉冲大电流装置^[8]、CQ 系列(CQ-1.5^[9],CQ-4^[10],CQ-7)装置。基于以上装置,人们开展了大量的材料动力学特性研究^[11-18]。

温度和压力是材料物性研究中最重要两个物理量,获取不同热力学路径下材料动力学响应数据,对检验各种物理模型及其参数的适用性具有重要意义。在冲击动力学研究中,描述极端条件下材料强度特性的本构关系基本都包含温度的影响,开展温度对材料强度影响研究,对深刻认识材料动力学行为有重要的科学意义。材料在一定的温度、压力条件下发生结构相变,如水随温度变化而发生的汽化或者凝固,材料热力学相变常由压力-温度相图描述,相图给出各相区的压力和温度范围以及发生相变的临界条件,宽范围、高精度的实验数据是准确建立相图的基础。为了获取更宽温度和压力范围的实验数据,一方面可以改变不同发次实验的加载压力,另一方面可以改变样品初始温度进而使材料动态加载过程对应的热力学路径发生偏移,进而拓展实验数据覆盖的热力学范围。静高压实验和冲击加载实验技术都已经和压力、温度控制技术相结合,技术成熟度都很高,前期人们已经开展了大量的材料物性实验研究^[19-32]。磁驱动斜波加载实验可以通过调节加载电压来控制实验加载压力,但由于其负载区空间非常小、样品厚度非常薄(一般小于 1.8 mm)、绝缘及放电时极端的电磁环境等问题,现阶段关于与电磁加载装置负载区配套的温度控制技术的工作非常少,公开文献显示只有美国 Z 装置和中国 CQ-4 装置设计了与之配套的升温系统。Bastea 设计了与 Z 装置配套的升温系统,工作范围是室温到 400 °C,并基于此系统完成了锡的液-固相变实验,需说明理论上冲击加载实验无法实现锡的液-固相变^[33]。蔡进涛^[33]和种涛^[34]设计了与 CQ-4 装置配套的升温系统,由于绝缘技术的限制,只能预设样品初始温度到 180 °C。基于结合升温系统和 CQ-4 装置,蔡进涛^[33]开展了多种含能材料的斜波压缩实验,研究了温度对含能材料声速、模量等影响,种涛^[33]完成了不同初始温度下铁和铋的斜波加载实验,开展了初始温度对其相变特性的影响研究。现阶段公开文献显示,国内外所有磁驱动斜波加载装置都没有配套的样品初始降温系统。

为了更加拓宽磁驱动斜波加载装置 CQ-4 实验数据覆盖的热力学范围,本文设计了一套与之负载区配套的样品初始降温系统,该系统温度调节范围为室温到-80 °C,调节精度为 0.1 °C。基于该系统开展了不同初始温度下铋的斜波压缩实验,获得了不同初始温度下铋的动力学响应数据,验证了降温系统的可靠性。

1 变温系统设计

CQ-4^[9]装置是一种基于低电感电容器储能的小型脉冲电流发生装置,装置放电上升沿 400~600 ns,峰值电流可达 4 MA。由基于 CQ-4 装置的斜波压缩实验设计方法^[34]可知,斜波压缩实验对负载区极板材料、极板构型及尺寸、样品尺寸有严格要求,这对变温系统的设计带来了诸多限制:首先,实验电极板尺寸约 10 mm×30 mm×1 mm,样品厚度约 0.6~2.0 mm,可见布置变温系统模块的空间很小,尤其是厚度方向;第二,样品与极板接触,电极板材质为热导率很高的纯铝(或铜),整个电极板与不锈钢电极盘连接,因此实验负载区热损耗巨大;第三,磁驱动斜波加载实验中负载区处于极端复杂的电磁环境,故这里只能采用非接触、抗电磁干扰的光测手段,由于降低负载区温度,空气中的水蒸气会凝结在样品(或测试窗口)和速度测试探头表面,测试激光无法正常传播,影响实验正常开展。

为了克服上述三个限制因素,设计的降温系统结构主体包含两个部分:一种加载区电极板和一种探针工装。加载区电极板示意图如图 1(a)所示,电极板摆放样品位置为柱体气室 1,柱体气室外为八面体气室 3,两气室高度相同,其中 2 为上端预留密封圈槽。电极板四角打细螺纹孔,用于对探针工装的定位固定。电极板实物图如图 1(b)所示,其材质为硬铝。探针工装示意图如图 1(c)所示,中间 3 为上端沉孔下端柱体的探针固定柱,用于固定探针离样板的距离和垂直度,探针固定柱外缘加工沉槽,沉槽与垂直向下的真空泵接口形成一个“Z”字型抽真空通道;探针工装上表面左右对称位置上打通孔,上端设计转接口,形成充气通道 1 和 2;探针工装四角同加载区电极板对应位置打固定螺钉通孔。探针工装实物图如图 1(d)所示,其材质为不锈钢。

为了详细介绍降温斜波压缩实验的具体实施步骤,实验电极板组装置示意图见图 2(a)所示。首先,将样品安装于电极板中心气室。然后,将光学测试探针插入探针工装,直至无法继续深入,上端用真空封泥封死。第三,在加载区电极靶两密封圈槽内放入密封圈,将带有光学测试探针的探针工装置于加载区电极靶上端,用四颗细螺纹螺钉将两者紧密连接。第四,将真空泵抽气管与探针工装上的真空抽气孔 2 连接,利用真空泵将样品气室的气压降

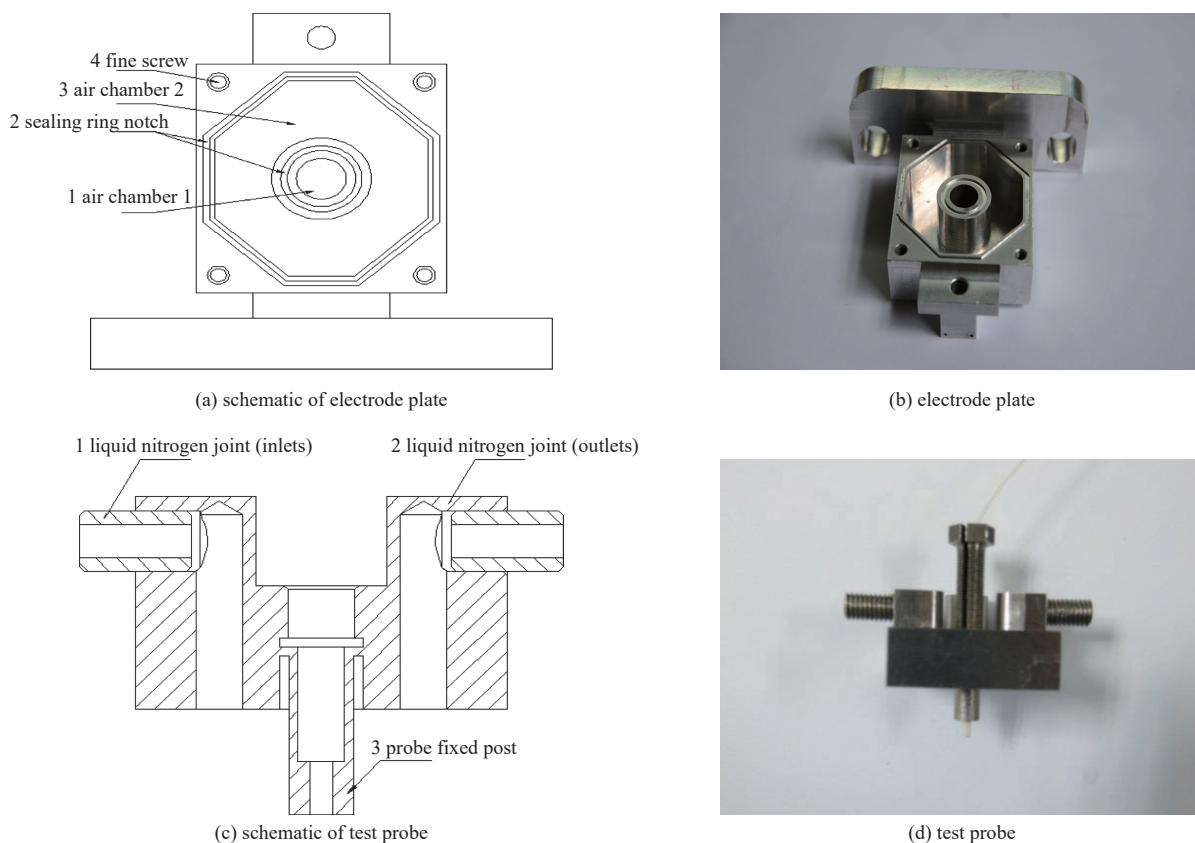


Fig. 1 Electrode plate and test probe in loading area in cooling experiment

图1 降温实验负载区布局图

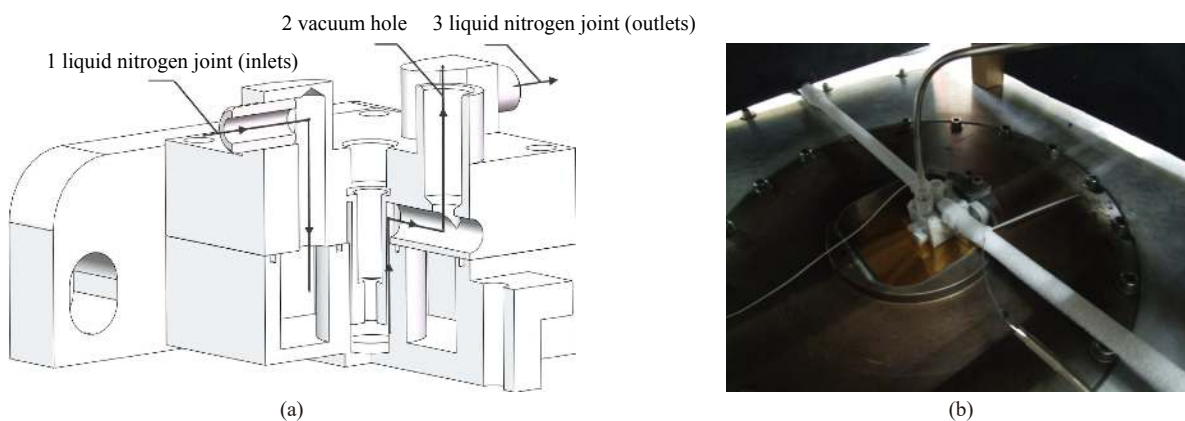


Fig. 2 Layout of loading area in cooling experiment

图2 降温实验负载区布局图

至 0.3 Pa 以内。第五, 将压缩氮气注入、回收气管与探针工装上的氮气接口 1, 2 相连接, 向气室 2 内注入压缩氮气, 温度控制系统通过低温氮气的流速控制靶室内的温度。待样品靶室内的温度达到目标温度, 稳定一段时间后开展实验。前期验证实验结果显示, 首先使样品气室中真空度小于 0.3 Pa 并一直保持, 然后向气室 3 中充低温压缩氮气控制负载区温度在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 激光测速系统在样品表面的回光正常。实验中由于抽真空和充压缩氮气, 去除了空气中的水蒸气, 从而避免了低温水汽凝结的问题。降温斜波压缩实验实物图见图 2(b) 所示。

2 物理实验

本文基于磁驱动加载装置 CQ-4 设计了一套含能材料初始温控系统, 该系统温度调节范围为室温到 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 调节精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度控制模块的温度调节精度和热电偶工作精度都是 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此该系统的调节精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外, 现阶段与温控模块匹配的热电偶工作下限温度为 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此该系统温度调节范围为室温到 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。验证实

验显示,降温系统的降温能力在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后还有余量,后期获取与温控模块匹配、工作温度更低的热电偶,系统的工作范围也将有一定的扩展。基于本文设计的预设样品降温实验技术,开展了初始温度 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 金属铋的斜波压缩实验,峰值压力约 5 GPa ,并获取了铋后表面速度曲线。实验加载电极材料是铝,尺寸均为 $1\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 35\text{ mm}$;实验样品为纯铋,由西北有色金属研究院研制。

不同初始温度下铋的后表面速度历史见图3,其中室温和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初始温度铋的实验数据引用自文献[18]。首先,三条速度波剖面整体趋势、时序基本相同,都出现了明显的弹性波、塑性波和相变波三波结构,这是由铋在斜波压缩过程中先后发生弹塑性转变和相变引起的。其次,初始温度对铋的相变有影响,常温和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 实验结果基本重合,相变起始对应的特征速度拐点约为 251.6 m/s ,对应压力约 2.53 GPa ,而在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时特征速度约为 272.0 m/s ,对应压力约 2.76 GPa ,相变起始压力提高了约 9.1% ,可得降低铋样品的初始温度使其相变起始压力明显增加。第三,三发实验速度波剖面都在相变起始处都有一个小的速度转折波形,这可能对应较窄的II相区。

3 结论

建立了一套配合电磁加载装置CQ-4负载区的预设样品初始温度系统,通过特制结构的电极板和测试探针工装设计,达到了样品室高真空、负载区可控降温的目的,从而克服了测试探针由于低温凝结空气中的水汽而无法使用的问题。基于该系统,开展了 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初始温度下铋的斜波压缩实验,获得了较低初始温度下铋的动力学响应数据,验证了降温系统的可靠性。

致谢 感谢吴刚、胥超和税荣杰等人在实验运行和测试方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] Asay J R, Hall C A, Knudson M D. Recent advances in high-pressure equation-of-state capabilities[R]. SAND2000-0849C, 2000.
- [2] Barker L M, Hollenbach R E. Shock-wave studies of PMMA, fused silica, and sapphire[J]. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(10): 4208-4226.
- [3] Barker L M. High-pressure quasi-isentropic impact experiments[M]//Asay J R, Graham R A, Straub G K. *Shock Waves in Condensed Matter-1983*. Amsterdam: Elsevier, 1984.
- [4] Smith R F, Eggert J H, Saculla M D, et al. Ultrafast dynamic compression technique to study the kinetics of phase transformations in bismuth[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 065701.
- [5] 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.
- [6] Ao T, Asay J R, Chantrenne S, et al. A compact strip-line pulsed power generator for isentropic compression experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 013903.
- [7] Hereil P L, Lassalle F, Avriilaud G. GEPI: an ice generator for dynamic material characterisation and hypervelocity impact[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 706(1): 1209-1212.
- [8] 夏明鹤, 计策, 王玉娟, 等. PTS装置工作模式及波形调节[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2768-2772. (Xia Minghe, Ji Ce, Wang Yujuan, et al. Operation models and waveform shaping of primary test stand[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2768-2772)
- [9] Wang Guiji, Sun Chengwei, Tan Fuli, et al. The compact capacitor bank CQ-1.5 employed in magnetically driven isentropic compression and high velocity flyer plate experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 053904.
- [10] Wang Guiji, Luo Binqiang, Zhang Xuping, et al. A 4 MA, 500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 015117.
- [11] Davis J P, Hayes D B, Asay J R, et al. Investigation of liquid-solid phase transition using isentropic compression experiments (ICE)[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 620(1): 221-224.
- [12] Davis J P, Hayes D B. Isentropic compression experiments on dynamic solidification in tin[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 706(1): 163-166.
- [13] Hare D E, Forbes J W, Reisman D B, et al. Isentropic compression loading of octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX) and the pressure-induced phase transition at 27 GPa [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(6): 949-951.

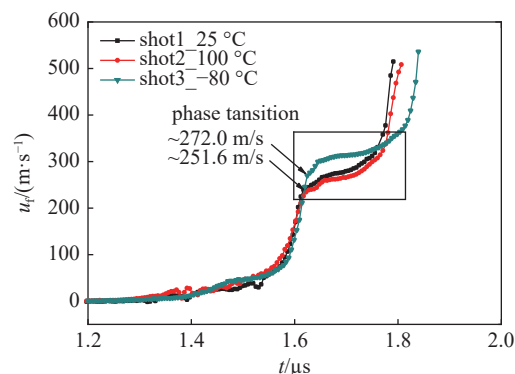


Fig. 3 Experimental data of ramp wave loading on Bi with different initial temperature

图3 不同初始温度铋的斜波加载实验速度曲线

- [14] Hare D E, Reisman D B, Garcia F, et al. The isentrope of unreacted LX-04 to 170 kbar[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 706(1): 145-148.
- [15] Baer M R, Hall C A, Gustavsen R L, et al. Isentropic loading experiments of a plastic bonded explosive and constituents[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 034906.
- [16] 种涛, 莫建军, 郑贤旭, 等. 斜波压缩下RDX单晶的动力学特性[J]. *物理学报*, 2020, 69: 176101. (Chong Tao, Mo Jianjun, Zheng Xianxu, et al. Dynamic behaviors of RDX single crystal under ramp compression[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69: 176101)
- [17] Cai J T, Zhao F, Wang G J, et al. Experimental research on elastic-plastic transition and α to γ phase transformation of RDX crystal under ramp loading[C]//Proceedings of the 2015 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Qingdao, 2015.
- [18] 种涛, 谭福利, 王桂吉, 等. 磁驱动斜波加载下铋的 I - II - III 相变实验[J]. *高压物理学报*, 2018, 32: 051101. (Chong Tao, Tan Fuli, Wang Guiji, et al. I - II - III phase transition of bismuth under magnetically driven ramp wave loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32: 051101)
- [19] Zhang Qingling. Adsorption mechanism of different coal ranks under variable temperature and pressure conditions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 18(3): 395-400.
- [20] Degheidy A R, Elkenany E B. Mechanical properties of Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/GaAs system at different temperatures and pressures[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24: 094302.
- [21] Zhou Yongsheng, Jiang Haikun, He Changrong. Experiments of brittle-plastic transition and instability modes of Juyongguan granite at different temperatures and pressures[J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 17(2): 169-182.
- [22] Wu Yuxiao, Yang Ruiبو, Li Shusuo, et al. Surface recrystallization of a Ni₃Al based single crystal superalloy at different annealing temperature and blasting pressure[J]. *Rare Metals*, 2012, 31(3): 209-214.
- [23] Li Weiguo, Wang Ruzhuan, Li Dingyu, et al. Effect of the cooling medium temperature on the thermal shock resistance of ceramic materials[J]. *Materials Letters*, 2015, 138: 216-218.
- [24] Zhang Xiaoqiang, Gao Huiying, Fu Guozhong, et al. Reliability analysis of filtering reducers considering temperature correction and shock load of space[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2018, 23(3): 456-464.
- [25] Lyzenga G A, Ahrens T J, Nellis W J, et al. The temperature of shock-compressed water[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1982, 76(12): 6282-6286.
- [26] Gurrutxaga-Lerma B, Shehadeh M A, Balint D S, et al. The effect of temperature on the elastic precursor decay in shock loaded FCC aluminium and BCC iron[J]. *International Journal of Plasticity*, 2017, 96: 135-155.
- [27] Godwal B K, Ng A, Dasilva L. Shock melting and Hugoniot calculations for gold[J]. *Physics Letters A*, 1990, 144(1): 26-30.
- [28] Li Dingyu, Li Weiguo, Wang Ruzhuan, et al. Influence of thermal shock damage on the flexure strength of alumina ceramic at different temperatures[J]. *Materials Letters*, 2016, 173: 91-94.
- [29] Ahn J H, Forster C F. The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(6): 589-594.
- [30] Zhang Ningchao, Liu Fusheng, Peng Xiaojian, et al. Light emission properties of sapphire under shock loading in the stress range of 40-120 GPa[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, 56(3): 562-567.
- [31] Fritz J, Wünnemann K, Reimold W U, et al. Shock experiments on quartz targets pre-cooled to 77 K[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(6): 440-445.
- [32] Bastea M, Bastea S, Emig J A, et al. Kinetics of propagating phase transformation in compressed bismuth[J]. *Physical Review B*, 2005, 71: 180101.
- [33] 蔡进涛. 固体炸药的磁驱动准等熵加载实验技术及动力学行为研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018. (Cai Jintao. Experimental techniques and dynamic behavior reseaches on solid explosives under magnetically driven quasi-isentropic compression[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018)
- [34] 种涛. 斜波加载下铋、锡等典型金属材料的相变动力学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018. (Chong Tao. Study on kinetics of phase transition of metals under ramp wave loading[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018)