

温密物质特性研究进展与评述

陈其峰*, 顾云军, 郑君, 李江涛, 李治国, 权伟龙, 付志坚, 李成军

中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰波物理国家重点实验室, 绵阳 621900

* 联系人, E-mail: chenqf01@gmail.com, chenqf_iapcm@aliyun.com

2016-04-10 收稿, 2016-05-24 修回, 2016-05-24 接受, 2017-02-17 网络版发表

中国工程物理研究院发展基金(2013A0101001, 2014B0102003, 2015B0102001)、冲击波物理与爆轰波物理重点实验室基金(9140C670103150C67289)和国家自然科学基金(11674292, 11504352)资助

摘要 温密物质属于高能量密度物理的一部分, 包含着广泛而丰富的物理现象. 它是惯性约束聚变(ICF)、重离子聚变、Z箍缩动作等过程中物质存在和发展的重要阶段, 其热力学、光学和辐射等性质, 决定着该阶段物质的宏观流体运动, 以及物质与辐射场相互作用中的能量输运和转换. 因此, 温密物质性质的不断深入研究、相关参数如状态方程和辐射输运性质的不断精密化, 在ICF、Z箍缩等高新技术、以及地球、行星内部结构等研究中具有重要的科学意义和应用背景. 本文重点介绍和评述了在实验室条件下温密物质产生、诊断及数值模拟技术的研究进展, 以及冲击波物理与爆轰波物理重点实验室利用二级轻气炮驱动飞片撞击靶板产生强冲击波、压缩气体产生温密物质状态诊断与数值模拟技术的新进展, 最后对未来温密物质发展方向进行了展望、总结和建议.

关键词 温密物质, 状态方程, 输运性质, 诊断, 冲击波

温密物质(warm dense matter, WDM)特性研究是极具挑战性的一个研究领域^[1], 在惯性约束聚变(ICF)、重离子聚变和天体演化等方面具有强的工程应用背景和重要的科学意义, 因为它是上述过程物质存在和发展必然要经历的中间物质状态. 温密物质状态介于固态和经典理想等离子体之间, 通常来说, 其粒子数密度在 $10^{22}\sim 10^{25}/\text{cm}^3$, 温度在0.1~100 eV范围, 非理想耦合参数 $1<I<100$ (图1显示了温密铝在密度-温度平面分布以及目前冲击波手段所产生的温密区域). 在这一区域, 物质处于部分简并、强耦合和非理想等离子体状态^[2], 其物质特性(包括热力学特性、光学特性、电磁特性和辐射输运特性等)的理论描述非常困难, 因为WDM既不能用经典的等离子体理论、也不能用固态微扰理论进行准确描述. 为了适当刻画WDM, 需要在实验上产生并诊断温密物质状态, 获取其物性参数, 进而服务于WDM理论建模, 但由于

实验产生WDM具有瞬态与高能量密度特性, 因而如何约束WDM以及如何描述并准确诊断WDM状态也存在相当的难度、面临很大的挑战.

近年来, 由于在工程应用和基础科学方面的重要性, WDM特性研究正不断激发人们的极大兴趣和广泛关注. 从近年发表关于WDM的文章、研究WDM团队人员增长、大型科学装置建造、重大研究计划制定、及WDM各种专门研讨会的不断召开不难看出温密物质特性研究的重要性. 首先, 从近十几年关于WDM发表文章来看(图2), 在American Institute of Physics (AIP), American Physical Society (APS), Institute of Physics (IOP)和在Science Direct出版平台中, 用“warm dense matter”关键词检索到2000~2014年发表的文章共1249篇, 其中AIP: 502篇, APS: 236篇, IOP: 128篇, ScienceDirect: 204篇, 而且在物理类顶级刊物Physical Review Letters上就有69篇, 此方面的

引用格式: 陈其峰, 顾云军, 郑君, 等. 温密物质特性研究进展与评述. 科学通报, 2017, 62: 812~823

Chen Q F, Gu Y J, Zheng J, et al. Review and progress in the study of the properties of warm dense matter (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 812~823, doi: 10.1360/N972016-00471

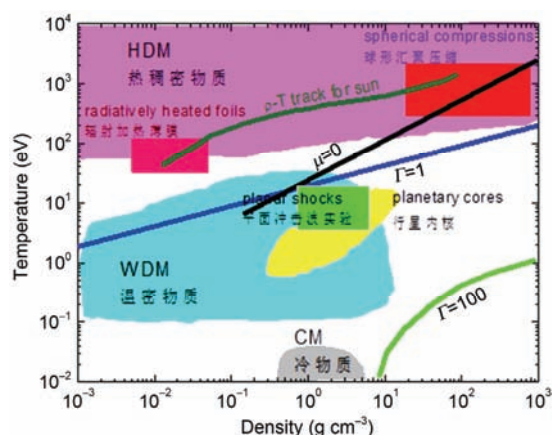


图1 (网络版彩色)温密物质在密度-温度平面分布

Figure 1 (Color online) Placement of the warm dense matter in the density-temperature space in relation to the plasma coupling parameter Γ and chemical potential $\mu=0$

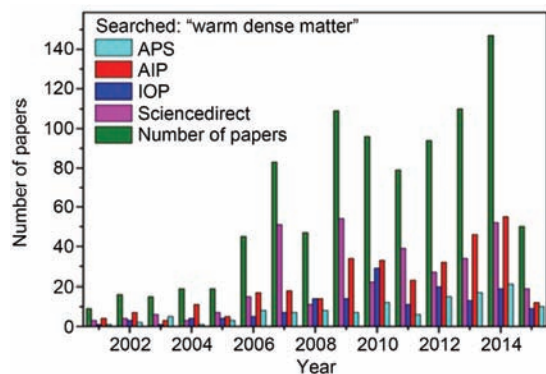


图2 (网络版彩色)近年在国际重要学术期刊发表文章情况

Figure 2 (Color online) The statistics of the published papers in the SCI Journals

发表文章还在逐年增长。其次,从近十年开展WDM研究人员来说,由2000年的400多人增长到2012年1700多人(图3),增长了3倍多,其人员分布中美国、法国、德国排在世界的前三位(图4),而中国则处在比较滞后位置,与上述发达国家有一定差距。此外,国际上大型科学装置建造、重大研究计划制定均有涉及WDM研究,比如美国的MaRie计划(玛丽计划)^[3]用单独的章节对WDM重要性进行了特别说明,欧洲HiPER计划所涉及6个研究领域中把WDM研究排在第2位。除了上述几方面之外,WDM各种专门研讨会的不断召开也显示了人们对此方面的积极关注。2002年,在美国能源部支持下,美国利弗摩尔国家实验室(LLNL)和加利福尼亚(California)大学以及德国Darmstadt大学等牵头组织召开了首次关于WDM的

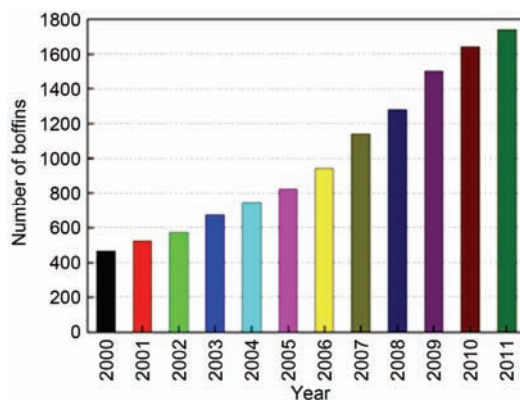


图3 (网络版彩色)近10年研究人员增长情况(统计发表SCI文章人员)

Figure 3 (Color online) The statistics of boffins in the SCI Journals during the past decade

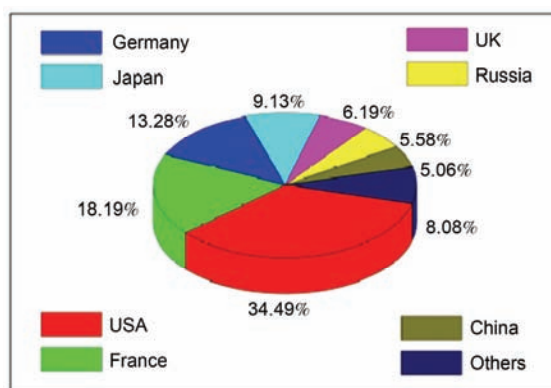


图4 (网络版彩色)近10年世界各地研究小组分布情况

Figure 4 (Color online) The distribution of research groups in the world during the past decade

研讨会,对在美国国家点火装置(NIF)上要开展的实验作了讨论和评述;2004年召开了第二次WDM研讨会,进一步确定了WDM研究的重要性,对未来在一些大型装置上开展WDM特性实验工作进行了总体规划,并总结和评述了现有的WDM实验及理论方法的优势和局限性^[4]。

当前,随着高压技术和高时空分辨技术的不断发展,在实验室产生温密物质并对其物质状态进行精确诊断已变为现实并取得一些重要进展;结合各种数值模拟技术,在WDM特性理论研究方面也取得了长足进步。下面就国际和国内关于WDM产生技术、状态诊断技术和数值模拟技术等方面研究进展进行简要介绍和评述,并对未来WDM研究方向进行了展望。

1 温密物质产生技术

总体来说,目前国际上关于产生WDM方法主要

有: (1) 力学碰撞技术(如气炮等); (2) 化爆/含能材料; (3) 电脉冲功率, 如爆丝法; (4) 激光包括短脉冲激光、高能密度激光、X射线自由电子激光(XFEL); (5) 离子束; (6) 同步辐射光源; (7) 静高压金刚石压砧(DAC)加激光等7种手段. 下面对其进行简要介绍.

1.1 力学碰撞产生WDM技术

力学碰撞技术是利用加载装置驱动飞片高速撞击靶样品产生强冲击波、对样品进行冲击压缩以达到温密物质所需的高温高密度状态, 它是当前产生WDM最有效、应用最广泛的技术手段. 根据驱动飞片方式的不同, 可以分为气炮驱动、激光驱动和磁驱动飞片撞击靶等方法, 所产生的WDM可以覆盖从GPa到TPa宽的压力范围. 在上述各种驱动飞片撞击靶方法中, 气炮驱动飞片撞击靶技术是用来研究WDM最早、最重要的技术手段之一. 激光和磁驱动飞片撞击靶虽具有产生WDM压力较高, 但体积小、温密状态维持时间短、测量数据分散性较大, 而气炮产生的WDM尽管压力相对较低, 但其驱动的冲击波具有平面性好的特点, 材料经冲击压缩后产生的WDM具有密度、压力、温度均匀和体积大的优点, 这些优点为WDM物性参数精确诊断提供了非常有利的条件, 因而其实验获取的数据被公认在动高压实验测量中具有较高的精度. 美国20世纪70年代就已经开始了利用二级轻气炮(two-stage light-gas gun)驱动飞片撞击靶技术开展冲击压缩液体产生WDM实验研究, 其中最具代表性的工作是以Nellis^[5]为首的科研团队关于冲击压缩氢(H₂)及其同位素氘(D₂)、惰性气体元素氦(He)、氩(Ar)和氙(Xe)、以及氮(N₂)、氧(O₂)等的状态方程(equation of state, EOS)实验研究, 尤其Nellis研究小组^[6]在二级轻气炮驱动多次反射冲击压缩液体氢和氘实验中, 首次实现了93~180 GPa压力区液氢和液氘电导率的测量, 并在140 GPa压力附近获得液体氢金属化相变的直接证据.

1.2 高性能炸药驱动产生WDM技术

高性能炸药驱动产生WDM技术是将炸药爆轰释放的化学能转变为动能进而驱动强冲击波压缩样品产生温密物质的实验方法, 它包括平面、柱面和球面汇聚3种不同的加载方式. 由于可以产生大体积WDM (具有cm³量级), 且温密状态维持时间长(ms量级)、达到温度较高、允许时间和空间尺度更好诊断,

因此, 该方法也是被用来研究WDM热动力学平衡性质最有效、最经济、最好方法之一, 但在柱面和球面加载条件下的数据处理和分析存在很大困难. 在此方面, 俄罗斯以Fortov为首的研究团队^[7]对WDM状态方程、电导率和辐射不透明度等开展了大量实验研究工作, 研究对象涉及固、液、气各种材料. 2000~2004年, Fortov和Ternovoi等人^[8~11]基于化爆平面驱动装置和冲击波反射技术, 开展了氢、氦、氩和氢氦混合气体多次冲击压缩实验研究, 压力测试分别达227, 200, 126和164 GPa. 2004年Grishechkin研究组^[12]利用化爆半球驱动装置结合气体预压缩技术, 对冲击压缩气体氩83~121 GPa压力区的压缩特性、温度和光吸收特性进行了测量. 2005年, Boriskov等人^[13]利用球面汇聚系统, 测量了冲击压缩液氩在20~110 GPa压力区的3个实验点, 实验确定的液氩主Hugoniot线上最大压缩比与Knudson等人^[14]强磁场驱动飞片实验结果一致. 2010年, Mochalov等人^[15]同时采用化爆平面和半球驱动装置对非理想氮等离子体的密度、温度和电导率进行了测量, 两种驱动装置所对应的最高测试压力分别为48.8和265 GPa. 为了拓展WDM压力范围, 俄罗斯科学家进一步发展建立了柱面和球面汇聚准等熵加载技术, 并应用在温密氩、氦、氩等离子体特性研究上, 获得了WDM在TPa压力附近的实验数据. 其中, Arinin和Zhernokletov等人^[16~18]利用柱面汇聚准等熵加载技术在液体氩和稠密气体氦中分别获得了1000和500 GPa的高压, Mochalov等人^[19~21]利用球面汇聚准等熵加载技术在稠密气体氩和氦中的最高加载压力分别达到2210和5000 GPa、等离子体密度分别达到4.5和8 g/cm³. 上述化爆半球、柱面及球面汇聚准等熵加载技术的使用, 极大地拓展了WDM研究区域, 但在半球装置驱动实验中, 由于只能测量样品中的平均冲击波速度, 因而最终获得等离子体热力学状态参数是平均效果, 而在柱面和球面汇聚准等熵加载实验中, 只能通过时间分辨的X-ray成像测量技术探测样品的体积变化用于确定其最大压缩密度, 最终的压力需要通过流体动力学程序结合状态方程理论模型给出, 目前还没有解决直接测量等离子体压力的诊断技术.

1.3 脉冲功率产生WDM技术

电脉冲功率技术, 如爆丝法, 是用来开展温密物质电导率实验研究最有效方法. 美国以DeSilva为首

的科研团队^[22]利用该方法针对金属WMD电导率测量开展了大量的工作,具体涉及Al, W, Fe, Cu, Ti, Ag, Zn, Mo和Ta等多种材料,所产生的WDM密度从在0.01倍固体密度到固体密度,温度在1~3 eV范围内.美国圣地亚国家实验(SNL)在脉冲功率Z机器上利用磁加载技术,建立了准等熵压缩实验平台,为搭建冲击压缩和准静态等温压缩实验之间桥梁起了重要作用.以Knudson为首的团队^[14]利用该实验平台开展了系列准等熵压缩实验研究,其中最有代表性的工作是2015年在*Science*杂志发表实验直接观测到液态氙从绝缘体到金属相变的研究成果,其实验结果为理论建模和构造行星内部结构提供了科学依据.

1.4 强激光产生WDM技术

强激光也是用来产生温密物质有效手段之一,包括利用强激光直接辐照靶(直接驱动)和利用强激光加热高Z材料黑腔产生的X射线辐照靶(间接驱动)两种方式.但由于其产生的WDM体积小、温密物质状态维持时间短、以及相关实验对驱动器能力、精密制靶和诊断技术等方面的要求都很高,直到20世纪80年代中后期,随着大型激光装置的建立、均匀稳定的局域热动平衡(LTE)等离子体样品的实验室制备和光谱测量技术不断进步,利用该方法开展WDM研究才开始得到快速发展.1991~1996年期间, Perry等人^[23,24]利用Nova激光装置发展了双背光技术,测量了铝、铌温密物质的不透明度.1997~2004年,以Da Silva等人^[25]、Boehly等人^[26]、Mostovych等人^[27]为首的研究小组分别用Nova激光、Nike激光和OMEGA激光驱动对液氙进行冲击压缩,分别获得了~300, 100~600和~900 GPa冲击压力.2015年, Nora等人^[28]发表了基于OMEGA激光结合球心冲击波汇聚产生Gbar压力方面的研究工作,但其压力是通过辐射流体动力学模拟推断出来的. Kritcher等人^[29]在NIF上建立了测量材料物性的实验平台,他们利用球面汇聚冲击波方法对材料状态方程压力测试覆盖100 Mbar-Gbar的超高压.国内利用强激光开展WDM实验主要集中在中工程物理研究院(以下简称中物院)的有关单位,以等离子体辐射性质研究为主.2006年中物院激光聚变研究中心通过优化实验靶设计,在神光II激光输出能量为2.5 kJ的条件下,获得了~95 eV温密铝等离子体的透射谱测量结果^[30],为校验和改进相关理论模型提供了基准数据;最近,他们进一步开展了高压密度均

匀强耦合等离子体的产生以及高谱分辨和高时间分辨X射线光谱的实验测量,建立了强耦合等离子体吸收边特性实验技术,为后续大规模深入开展WDM辐射性质研究奠定了重要基础.

1.5 静高压金刚石压砧预压缩结合强激光冲击压缩产生WDM技术

静高压金刚石压砧(DAC)预压缩结合高功率脉冲激光冲击压缩技术(DAC+强激光)是近年来发展起来研究WDM性质的新型实验手段之一.该方法先用DAC技术对样品进行等温压缩,使其到达较高的密度,然后在此基础上再进一步利用强激光驱动冲击波对样品进行冲击压缩,从而达到高的压力和密度状态.在此方面,以Cellier和Loubeyre等人^[31,32]的研究工作最具代表性.2010年Cellier等人^[31]在*Physical Review Letters*上发表了利用DAC+强激光开展的关于温密氦反射率、电导率及绝缘体到金属相变的研究工作,涉及的温密区间为密度0.7~1.5 g/cc、温度1~6 eV.2012年, Loubeyre等人^[32]用DAC+强激光冲击压缩开展了氢和氙状态方程研究,压力范围达到175 GPa.尽管DAC+强激光在拓展材料(尤其是低Z材料)温密区间方面取得了重要进步,但其同样面临产生WDM的体积小、温密状态持续时间短和测量数据分散性大等问题.

1.6 离子束产生WDM技术

重离子束产生的温密物质具有较大体积(~0.5 mm³)、物理条件相同、高熵、高密度、能量沉积精确控制(<~5%)、任意靶材、有效靶诊断、长寿命(10~100 ns)、高打靶频次等特点,现已被广泛用在WDM研究上.利用这种实验技术可以获得宽的温密区域(覆盖6个量级压力,4个量级密度范围),而且,用强重离子加热与热膨胀技术(HI-HEX),还可以产生极其难以获得的高熵态而没有任何冲击波产生,这种高熵是仅有在地下核爆才能达到的状态^[33,34],至今,这些区域还没有被人们研究过.因此, HI-HEX方法提供了研究物质相图一种新的方法.目前,国际上仅有德国、美国、日本和俄罗斯等具备利用重离子束开展WDM研究能力,而我国在此方面则尚处于起步阶段.

1.7 同步辐射光源产生WDM技术

同步辐射光源由于具有强X射线谱可调的特点,

这种光源可以用来探测获取WDM结构、电荷态和辐射不透明度等重要信息,它既是获取WDM信息有效方法之一,也是产生WDM的重要手段.这方面工作主要以在美国APS (advanced photon source at argonne), LCLS (LINAC coherent light source at SLAC)和欧洲ESRF (European synchrotron radiation facility at grenoble, France)光源上开展的研究工作具有代表性,涉及的研究内容包括^[35,36]: (1) 在熔化温度以下用衍射测量热晶体诱导产生的声子模; (2) 在熔化温度以上热晶体的失稳; (3) 在熔化温度以上WDM固液相变; (4) 涉及表面烧蚀过程的研究.

综上所述,目前国内外关于WDM产生方法各种各样,就其上面所列7中产生方式中各有优劣,其中强激光是产生WDM覆盖温密区较宽方法之一,也是实验室条件下可以产生WDM压力上限最高方法,如图5对于铅的研究所达到压力范围所示^[4],它可以产生与核爆相比拟的压力.目前美国人在NIF上利用球面汇聚冲击波方法对材料状态方程测试覆盖100 Mbar~1 Gbar的超高压,辐射温度达到~300 eV^[29].但其产生的WDM体积小、温密物质状态维持时间短、微靶丸制作和诊断存在一定困难.高性能炸药驱动球面汇聚产生WDM具有体积大,维持时间长,允许

时间和空间尺度更好诊断,它可以达到压力上限约10 Mbar,超过目前Z箍缩达到压力上限,但其温度低于几个电子伏(eV).力学碰撞方法如轻气炮方法产生WDM具有密度、压力、温度均匀、体积大的优点,其实验获取的数据被公认在动高压实验测量中具有较高的精度.但它达到压力上限10 Mbar以下,温度仅有几个eV.离子束方法(如图5中SIS-18和SIS-100所示),目前被认为是用等熵实验获得覆盖温压(压力跨越从1 bar~1 Mbar)范围最为宽广手段.因此,未来,强激光、重离子束、同步辐射光源、自由电子激光、脉冲功率Z机器和含能材料将在产生WDM及有效获得其信息方面起重要作用.

2 温密物质诊断技术

国际上目前主要用的高时空分辨光学诊断和谱学诊断能力包括:光学光谱仪、光纤Doppler Visar、条纹相机、硬X射线照相技术、质子照相、同步辐射光源、X射线汤姆逊散射、在WDM中的k-韧致吸收谱、X射线切片照相、Langmuir波的衰减、温密物质康普顿散射剖面、自由电子激光、薄膜量热计、非弹性X射线散射技术等.下面主要对利用冲击波手段产生WDM诊断技术作一些简要介绍.

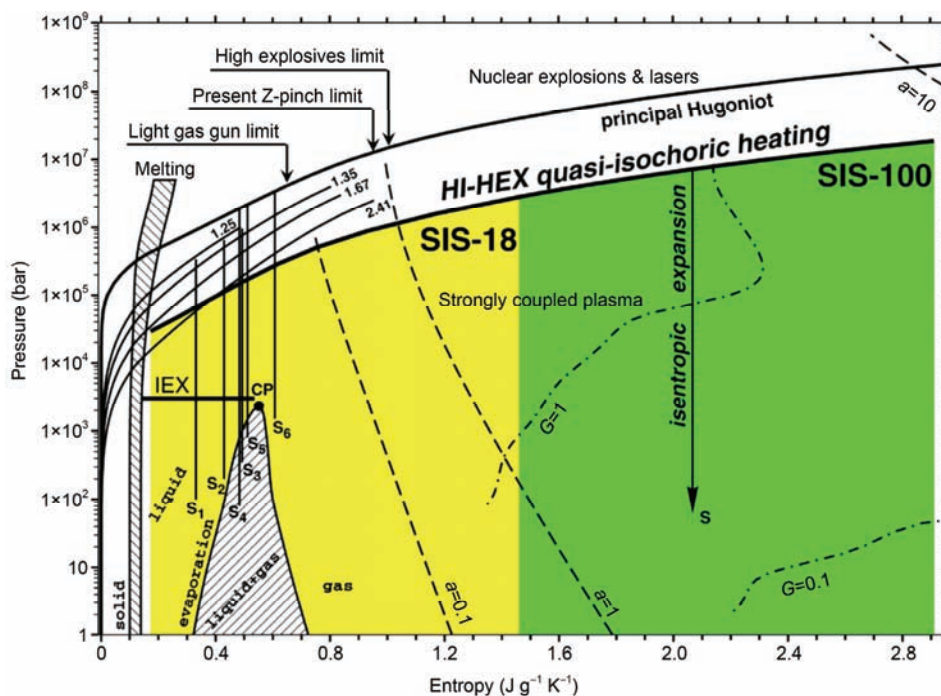


图5 (网络版彩色)用各种实验技术研究铅所达到压力范围^[4]

Figure 5 (Color online) The experimentally studied pressure-entropy regions using different techniques for lead^[4]

2.1 光学诊断

用光学方法诊断压缩产生的WDM主要目的是获取一些宏观参数,包括声速、冲击波速度、粒子速度与温度等.在实验中,通常用任意反射速度干涉系统(Visar)结合光学条纹光学辐射高温计(SOP)实现对这几个量的测量^[37].对于冲击压缩过程,通过测量的冲击波速度和粒子速度,进而根据Rankine-Hugoniot关系导出WDM状态方程;对于等熵压缩过程,通过测量的粒子速度和声速,再根据下面公式导出压力和比容:

$$P(u_p) = \int_0^{u_p} \rho_0 C_L(u_p) du_p, V(u_p) = V_0 \left(1 - \int_0^{u_p} \frac{du_p}{C_L} \right),$$

式中, u_p 为粒子速度, C_L 是拉格朗日声速, V_0 和 ρ_0 是初始比容与密度($V_0=1/\rho_0$).

2.2 激光驱动X射线诊断

尽管光学诊断WDM宏观特性与状态方程的导出已经近20年了,但对WDM微观特性诊断仍然极其有限,因为光学诊断记录的主要是WDM的表面性质. X射线由于能够穿透材料去研究它的微观结构变化与性质,因而在诊断WDM微观特性方面展现了非常诱人的前景,目前主要有4种诊断技术: (1) 通过X射线照相术的吸收测量离子密度方法; (2) 通过X射线衍射探测WDM结构; (3) 利用Thomson 散射测量电子数密度和温度; (4) 利用X射线近边吸收谱(XNEAS)与局域有序和化学键的敏感性来探测WDM微结构改变. 尽管X射线在诊断WDM微观特性方面具有特殊优势,但WDM所具有的瞬时特性却对X射线源的时间分辨提出了很高的要求(要求到皮秒级),随着科学技术的不断进步和大型激光装置的建立,利用激光驱动产生X射线进而用于WDM特性研究逐渐变为现实. 目前,短脉冲激光驱动的X射线源已经能够在几个ps内传送高光子流,以约 $10^{16} \sim 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的强度与样品作用,产生大量高能电子并穿入样品产生 K_α 射线,所发射光子的能量在3~60 keV,且依赖于样品材料,其从激光到X射线转化效率一般在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ ^[38,39],它可以对WDM结构、离子密度、电荷态和辐射不透明度等信息进行有效诊断.

2.3 WDM超快诊断技术

光学中的超快诊断技术有许多,其中用的较多

的是短脉冲激光和X射线自由电子激光(XFEL),我们知道, XFEL可以用来探测WDM体系中离子、原子、分子在0.01 nm空间与飞秒(fs)时间尺度的结构和动力学过程. 它可以产生具有峰值功率10~100 GW、波长范围从0.01~100 nm、几个fs~100 fs相干光子的脉冲周期^[40]. 温密物质由于具有高瞬态、对可见光不透明的特点,因此, XFEL是获取WDM结构、电荷态和辐射不透明度等重要信息的有效工具. 目前,最具有代表性的是美国的LCLS,它为通向超快X射线诊断科学新领域奠定了基础,它已服务于光学与原子分子物理、凝聚态物理、极端条件下物质、化学与软物质及生物学5个领域^[41],尤其是它近来对WDM结构、状态方程、吸收谱和动力学性质的超快诊断起了至关重要的作用.

3 温密物质特性数值模拟技术

以美国、俄罗斯为代表的核大国都各自发展建立了相应的数值模拟技术和计算软件,并对各自数据库(美国: Sesame^[42]; 俄罗斯: DATABASE/RFNC-VNIIEF^[43])进行了更新和扩充. 按照理论计算方法来分,其数值模拟技术主要包括从头算(第一性原理)、平均原子(或离子)模型、分子动力学和基于各种等离子体模型的理论模拟技术,下面就这些方法所用的一些模拟技术进行介绍.

3.1 从头算(第一性原理)数值模拟

第一性原理方法主要有两种模拟技术(从头算量子分子动力学QMD和路径积分蒙特卡罗方法PIMC)用在热的、被压缩物质研究上. 其中, QMD计算到温度~2 eV, 压力到~10 Mbar以上其数值处理技术存在一定困难; PIMC在同样压力下可适应更高温度,但目前只能模拟低Z元素如氢、氦. 如果把PIMC方法拓展到比氢元素更重的原子,再结合QMD技术,就可以用来研究温密物质的结构、电子及振动性质. 近年来,国内在温密物质量子分子动力学模拟方面,首先取得突破的是国防科技大学袁建民和戴佳钰所在科研小组^[44,45],他们利用布朗运动的思想建立了量子朗之万分子动力学(quantum Langevin molecular dynamics, QLMD)模型,拓展了第一原理的应用范围. 但有关多组分混合物高温高密度状态的第一性原理的计算还非常少.

3.2 有限温度平均原子方法

有限温度平均原子方法起源于1949年Feynmen基于Thomas-Fermi理论提出的“原子盒”模型,该模型最初是用来研究金属、液态金属和熔融盐等凝聚态问题的简化方法.1979年Lieberman^[46]进一步提出了统计自洽场的INFERNO电子状态方程模型,但由于其处理低温高密度区存在突变的缺陷,因而在过去并没有得到很好的应用.2004年,Wilson等人^[47]对INFERNO模型进行了改进,解决了其在处理低温高密度区存在突变的缺陷,改进后的模型为PURGATORIO.尽管PURGATORIO模型对束缚态和连续态电子处理用完全量子力学方法,但不满足维里定理.为此,Perrot提出了改进型的量子平均原子模型AJCI,该模型既满足变分原理又满足维里定理.后来,法国CEA的研究小组针对AJCI模型研发了VAAQP计算程序^[48,49],并且应用到多种单质金属Al, Fe, Cu和Pb温密区状态方程计算上^[50,51].因平均原子模型是单中心模型,没有考虑近邻离子间相互影响所带来的多中心效应,它目前还只能用于纯物质而不能直接应用于混合物的性质计算,如果要用其计算混合物性质则必须采用某种设定的混合规则;此外,平均原子模型对于中Z原子计算结果较好,但对低Z却不太适合.因此,未来这方面的理论工作者,需要发展从单离子嵌入电子的凝胶模型到多离子的多中心系综模型,即“Paradiso”模型^[52],使之真正能够解决混合物温密区物态方程计算.

3.3 分子动力学方法

随着计算机技术的飞速发展,经典分子动力学(MD)和经典蒙特卡罗方法(MC)模拟尺度不断增大,用3D ALE-AMR 程序可以模拟稠密物质实验并向 10^{18} (exa-scale)计算速度方向迈进^[53],这种方法模拟的关键在于构造相互作用势,其模拟结果的可靠性强烈地依赖于粒子间相互作用势的精确程度,而在温稠物质区,粒子间相互作用非常复杂,目前还难以对其进行精确描述.因此,上述动力学方法能够解决WDM问题非常有限,需要发展能够精确描述温密区多体相互作用势的模型,才能为大规模开展WDM特性模拟奠定基础.

3.4 基于各种等离子体模型的理论模拟技术

俄罗斯、美国和德国等基于各种等离子体模型发

展建立了一系列理论模拟技术,其中,俄联邦核中心(RFNC-VNIIEF)以Sapozhnikov为首的研究团体(共20多人)^[54]发展建立了TUR软件包用来构建和研究状态方程,它由4个库组成,即由专用的程序库(SCL)、描述材料的热力学特性的理论模型库(TML)、状态方程库(EOSL)和特殊材料EOS常数数据库(CSL)4个库构成.以Gryaznov为首团队,发展建立了基于Saha方程的热稠密物质系列化模拟技术,目前已经从Saha-4发展到Saha-S,计算的热稠密等离子体范围可以拓展到天体内部压力温度环境.美国利弗莫尔国家实验室最近对原有CHEETAH软件^[55]进行了改进和发展,使其能支持多种元素、稠密爆轰产物和气相反应宽区域热力学状态的计算.德国以Redmer为首研究团队,基于部分电离等离子体模型(PIP)和线性响应理论,发展建立了COMPTRA04程序,该程序可以用来计算等离子体组分和输运系数(电导率、热导率和热功率).

综上所述可以看出,尽管世界各国针对WDM特性研究已经发展建立了各种理论模拟技术和计算程序,但不同的理论方法适用范围不同,并不能解决整个温密区的物质特性数值模拟问题.近期,Militzer和Driver^[56]发展了低温区DFT-MD结合高温区PIMC方法,实现了对低Z元素Ne, O等状态方程较宽温压区域模拟^[57],但该方法用于描述高温密全区域的EOS尚有一定困难.总体来说,当前状态方程理论研究还主要存在如下问题(图6^[58]):(1) 在宽广的温度密度范围内无法用单一的物理模型描述,需要分区域建立模型;(2) 不同区域的物理模型之间存在较大的“间隙区”,很难拼接;(3) 在部分离解与离电区,多组分等离子体相互作用太复杂,目前尚没有精确的处理方法;(4) 温密区存在“空白区”,缺乏连接各个温密区的综合理论模型.

4 LSD实验室关于多次冲击压缩气体产生WDM特性研究进展

众所周知,氢、氦等气体常态下具有极低的初始密度($10^{-4} \sim 10^{-3}$ g/cm³量级),在目前气炮驱动能力下(飞片速度小于7 km/s),通过单次冲击压缩最高压力不到1 GPa,无法进入温密物质区.冲击波多次反射压缩技术是解决上述低密度气体材料温密物质产生的有效手段,且可以在单发实验中覆盖较宽的温度密度区间.但如何实现多次反射压缩、以及如何

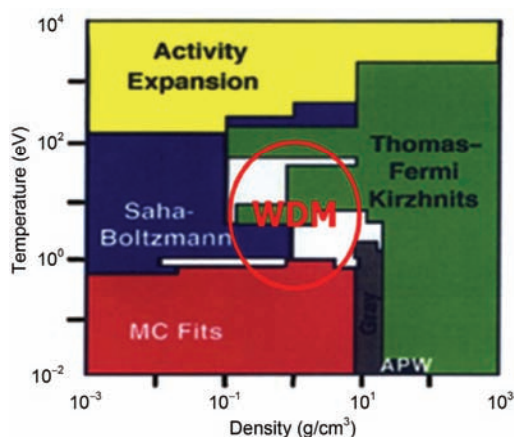


图6 (网络版彩色)各种理论模型适应范围^[55]

Figure 6 (Color online) The adaptive density-temperature regime for the various theoretical models^[55]

对多次压缩全过程物质状态进行诊断具有极大的挑战性,也是国际上面临的共同难题.在此方面,中物院流体物理研究所冲击波与爆轰物理重点实验室(LSD)温密物质团队开展了系列化研究工作:(1)发展建立了同时考虑离解和电离化学反应的流体状态方程自洽变分理论模型(SFVT)、以及结合线性响应理论(LRT)的输运性质计算模型,初步解决了高密度下稠密多元等离子状态和输运参数预测问题^[59~66];(2)利用流体力学程序数值模拟结合SFVT预测的状态方程,建立了满足多次反射压缩条件的包含了飞片、基板、气体样品(如He气)和复合窗口在内的6层介质靶优化设计技术,解决了如何针对气体物质利用多次反射压缩技术产生温密物质问题;(3)提出了利用反射膜(Al)+氟化锂(LiF)+蓝宝石(Al_2O_3)的复合窗口结合光学多通道辐射高温计(MCOP)、激光多普勒速度干涉仪(DPS)、光谱仪+条纹扫描相机(SOP)联合诊断的物理设计思想,成功研制了靶装置(图7),在单发实验中实现了冲击压缩气体光辐射历史、界面粒子速度剖面和时间分辨光谱的多信息量同步测量,解决了国内外共同面临的气炮加载初始低密度气体产生温密物质、以及气体从绝热到准等熵多次压缩全过程物质状态直接诊断的难题;(4)在上述工作基础上,系统开展多种典型气体材料在温密区的物态方程和光谱特性研究,在国际上率先实现了对低Z氖、氦气体1~10次压缩、氩1~4次压缩和高Z氙1~2次压缩状态的直接诊断,获得百万大气压以上的较宽温密区状态方程及光谱数据^[67~73].作为结果的一个展示,图8给出了1~4次压缩稠密氩产生温密物质温

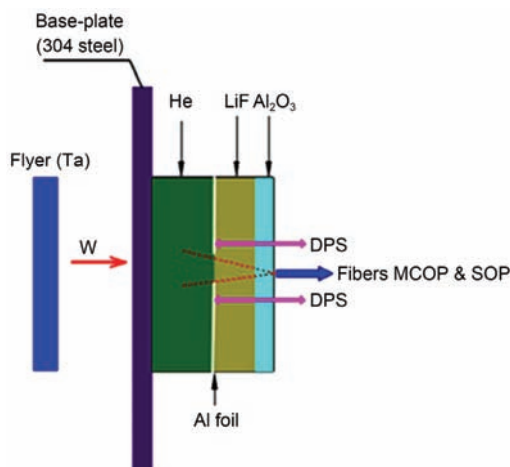


图7 (网络版彩色)温密稠密物质产生与多层介质诊断靶装置示意图

Figure 7 (Color online) The multilayer medium target configuration used in the diagnostics and creating of warm dense matter

密区间以及非理想耦合参数 Γ 和简并度 θ 的分布。

5 总结、展望与建议

温密物质特性研究在构造行星和地球内部结构物理模型以及惯性约束聚变和Z箍缩等研究中具有重要的科学意义与应用背景,但是在WDM区域包括状态方程、液-汽边界、蒸发相变潜热、蒸发速率、表面张力、功函数、电导率、热功率、扩散与黏性、电场梯度、金属-绝缘体相变和等离子体组分等在内的许多性质和现象均是未知的,而美国的MaRIE计划把温密物质区称为“无人地带”,并指出“目前还

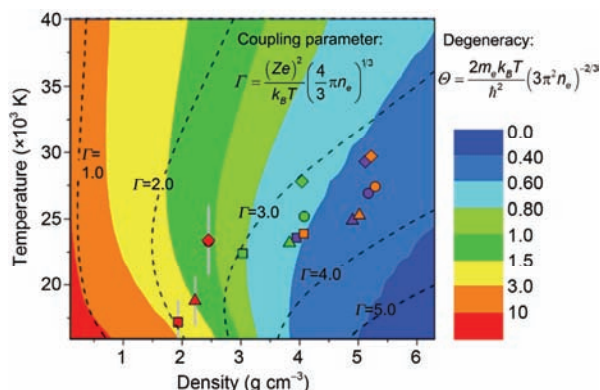


图8 (网络版彩色)测量的稠密氩4次压缩实验进入温密区及简并度和耦合参数分布情况(“■、▲、●、◆”分别代表4发实验点)

Figure 8 (Color online) The four shock compressions enter into the density-temperature regime and degenerate (θ) and coupling parameters (Γ) for warm dense argon (“■, ▲, ●, ◆” refer to four shot experimental points, respectively)

没有多少手段可以产生和表征这些物质,不论是在初始的压缩阶段还是随后的卸载过程”。当前,正处于温密物质实验和理论基础的奠基期,在实验和理论上的任何突破均有可能取得原创性研究成果,而国内各种高压产生技术及大科学装置(如上海同步辐射光源、中国科学院近代物理研究所重离子加速器以及中物院相关研究所的系列化加载实验平台)为实现上述突破提供了良好的机遇。因此,我们应该抓住时

机,充分利用各种加载手段尤其是利用中物院流体物理研究所的气炮、化爆(包括平面、柱面、球面汇聚化爆准等熵加载)、DAC+强激光、脉冲功率、离子加速器和大科学装置聚龙一号磁驱动准等熵压缩以及中物院激光聚变中心神光系列强激光实验加载平台,根据各自加载手段的优势互补特点,针对温密物质产生和约束机理、相图、辐射输运、状态诊断、特性描述及综合理论建模开展研究工作。

参考文献

- Graziani F, Desjarlais M P, Redmer R, et al. *Frontiers and Challenges in Warm Dense Matter*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014
- Koenig M, Benuzzi-Mounaix A, Ravasio A, et al. Progress in the study of warm dense matter. *Plasma Phys Control Fusion*, 2005, 47: B441–B449
- Hockaday M Y. MaRIE 1.0: Matter Radiation Interaction in Extremes 1.0. Technical Report, Los Alamos National Laboratory, 2013, doi: 10.2172/1088908
- Lee R W, Kalantar D, Molitoris J. Warm Dense Matter: An Overview. Technical Report, Lawrence Livermore National Laboratory, 2004, doi: 10.2172/15009836
- Nellis W J. Dynamic compression of materials: Metallization of fluid hydrogen at high pressures. *Rep Prog Phys*, 2006, 69: 1479–1580
- Weir T A, Mitchell C, Nellis W J. Metallization of fluid molecular hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar). *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 1860–1863
- Fortov V E. Intense shock waves and nonideal plasma physics. *AIP Conf Proc*, 2006, 845: 3–17
- Fortov V E, Ternovoi V Y, Kvitov S V, et al. thermodynamic properties and electrical conductivity of hydrogen at multiple shock compression up to 150 GPa pressure ionization. *AIP Conf Proc*, 2000, 505: 49–52
- Ternovoi V Y, Filimonov A S, Pyalling A A, et al. Thermophysical properties of helium under multiple shock compression. *AIP Conf Proc*, 2002, 620: 107–110
- Fortov V E, Ternovoi V Y, Zhernokletov M V, et al. Pressure-produced ionization of nonideal plasma in a megabar range of dynamic pressures. *J Expt Theor Phys*, 2003, 97: 259–278
- Ternovoi V Y, Kvitov S V, Pyalling A A, et al. Experimental determination of the conditions for the transition of Jupiter’s atmosphere to the conducting state. *JETP Lett*, 2004, 79: 6–9
- Grishechkin S K, Gruzdev S K, Gryaznov V K, et al. Experimental measurements of the compressibility, temperature, and light absorption in dense shock-compressed gaseous. *JETP Lett*, 2004, 80: 398–404
- Boriskov G V, Bykov A I, II’Kaev R I, et al. Shock compression of liquid deuterium up to 109 GPa. *Phys Rev B*, 2005, 71: 092104
- Knudson M D, Desjarlais M P, Becker A R, et al. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium. *Science*, 2015, 348: 1455–1460
- Mochalov M A, Zhernokletov M V, II’Kaev R I, et al. Measurement of density, temperature, and electrical conductivity of a shock-compressed nonideal nitrogen plasma in the megabar pressure range. *J Expt Theor Phys*, 2010, 110: 67–80
- Arinin V A, Mikhailova O L, Mochalov M A, et al. Quasi-isentropic compression of liquid argon at pressure ≈ 1000 GPa. *JETP Lett*, 2008, 87: 209–212
- Zhernokletov M V, Gryaznov V K, Arinin V A, et al. Quasi-isentropic compression of dense gaseous helium at pressures up to 500 GPa. *JETP Lett*, 2012, 96: 432–436
- Zhernokletov M V, Arinin V A, Buzin V N, et al. Quasi-isentropic compression of gaseous helium in pressure range from 130–460 GPa. *AIP Conf Proc*, 2012, 1426: 1411–1413
- Mochalov M A, II’Kaev R I, Fortov V E, et al. Measurement of the compressibility of a deuterium plasma at a pressure of 1800 GPa. *JETP Lett*, 2010, 92: 300–304
- Mochalov M A, II’Kaev R I, Fortov V E, et al. Measurement of quasi-isentropic compressibility of helium and deuterium at pressures of 1500–2000 GPa. *J Expt Theor Phys*, 2012, 115: 614–625
- Mochalov M A, II’Kaev R I, Fortov V E, et al. Measurement of the quasi-isentropic compressibility of a helium plasma at a pressure of about 5000 GPa. *JETP Lett*, 2012, 96: 158–163

- 22 DeSilva A W, Vunni G B. Electrical conductivity of dense Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Mo, Ta, and W plasmas. *Phys Rev E*, 2011, 83: 037402
- 23 Perry T S, Davidson S J, Serduke F J, et al. Opacity measurements in a hot dense medium. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 3784–3788
- 24 Perry T S, Springer P T, Fields D F, et al. Absorption experiments on X-ray-heated mid-Z constrained samples. *Phys Rev E*, 1996, 54: 5617–5630
- 25 Da Silva L B, Celliers P, Collins G W, et al. Absolute equation of state measurements on shocked liquid deuterium up to 200 GPa (2 Mbar). *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 483–486
- 26 Boehly T R, Hicks D G, Celliers P M, et al. Properties of fluid deuterium under double-shock compression to several Mbar. *Phys Plasmas*, 2004, 11: L49–L52
- 27 Mostovych A N, Chan Y, Lehecha T, et al. Reflected shock experiments on the equation-of-state properties of liquid deuterium at 100–600 GPa (1–6 Mbar). *Phys Plasmas*, 2001, 8: 2281–2286
- 28 Nora R, Theobald W, Betti R, et al. Gigabar spherical shock generation on the OMEGA laser. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 045001
- 29 Kritcher A L, Döppner T, Swift D, et al. Probing matter at Gbar pressures at the NIF. *High Energy Density Phys*, 2014, 10: 27–34
- 30 Xu Y, Zhang J Y, Yang J M, et al. A clean radiation environment for opacity measurements of radiatively heated material. *Phys Plasmas*, 2007, 14: 052701
- 31 Celliers M, Loubeyre P, Eggert J H, et al. Insulator-to-Conducting transition in dense fluid helium. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 184503
- 32 Loubeyre P, Brygoo S, Eggert J, et al. Extended data set for the equation of state of warm dense hydrogen isotopes. *Phys Rev Lett*, 2012, 86: 144115
- 33 Bieniosek F M, Barnard J J, Friedman A. Ion-beam-driven warm dense matter experiments. *J Phys: Conf Ser*, 2010, 44: 032028
- 34 Welch D R, Rose D V, Thoma C, et al. Integrated simulation of an ion-driven warm dense matter experiment. *Nucl Instrum Meth Phys Res A*, 2007, 577: 231–237
- 35 Kritcher A L, Neumayer P, Castor J, et al. Ultrafast X-ray thomson scattering of shock-compressed matter. *Science*, 2008, 322: 69–71
- 36 Glenzer S H, Redmer R. X-ray Thomson scattering in high energy density plasmas. *Rev Modern Phys*, 2009, 81: 1625–1663
- 37 Falk K, Collins L A, Gambo E J, et al. Combined X-ray scattering, radiography, and velocity interferometry/streaked optical pyrometry measurements of warm dense carbon using a novel technique of shock-and-release. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 056309
- 38 Brambrink E, Wei H G, Barbrel B, et al. X-ray source studies for radiography of dense matter. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 033101
- 39 Park H S, Izumi N, Key M H, et al. Characteristics of high energy K α and Bremsstrahlung sources generated by short pulse petawatt lasers. *Rev Sci Inst*, 2004, 75: 4048
- 40 Bostedt C, Boutet S, Fritz D M, et al. Linac coherent light source: The first five years. *Rev Modern Phys*, 2016, 88: 015007
- 41 Pellegrini C, Marinelli A, Reiche S. The physics of X-ray free-electron lasers. *Rev Modern Phys*, 2016, 88: 015006
- 42 Kashiwa B A. The MGGB Equation-of-State for Multifield Applications: A numerical recipe for analytic expression of Sesame EOS data. Report LA-14421, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2010
- 43 Levashov P R, Khishchenko K V, Lomonosov I V, et al. Database on shock-wave experiments and equations of state available via internet. *AIP Conf Proc*, 2004, 706: 87–90
- 44 Dai J Y, Hou Y, Yuan J M, Unified first principles description from warm dense matter to ideal ionized gas plasma: Electron-Ion collisions induced friction. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 245001
- 45 Dai J Y, Kang D D, Zhao Z X, et al. Dynamic ionic clusters with flowing electron bubbles from warm to hot dense iron along the Hugoniot curve. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 175701
- 46 Liberman A. Self-consistent field model for condensed matter. *Phys Rev B*, 1979, 20: 4981–4989
- 47 Wilson B, Sonnad V, Sterne P, et al. Purgatorio—A new implementation of the inferno algorithm. *J Quant Spectrosc Ra*, 2006, 99: 658–679
- 48 Sterne P A, Hansen S B, Wilson B, et al. Equation of state, occupation probabilities and conductivities in the average atom Purgatorio code. *High Energy Density Phys*, 2007, 3: 278–282
- 49 Blenski T, Cichocki B. Variational approach to the average-atom-in-jellium and superconfigurations-in-jellium models with all electrons treated quantum-mechanically. *High Energy Density Phys*, 2007, 3: 34–47
- 50 Piron R, Blenski T. Variational average atom in quantum plasmas (VAAQP) code and virial theorem: equation-of-state and shock-HUGONIOT calculations for warm dense Al, Fe, Cu, and Pb. *Phys Rev E*, 2011, 83: 026403
- 51 Piron R, Blenski T. Variational average-atom in quantum plasmas (VAAQP)—Recent progress, theorem and applications to the equation-of-state of warm dense Be. *High Energy Density Phys*, 2011, 7: 346–352
- 52 Libby S B. Warm Dense Matter Theory. Warm Dense Matter Winter School (PPT). Lawrence Berkeley National Laboratory, The University of California Berkeley, 2008
- 53 Koniges A, Eder E, Liu W, et al. Modeling Warm Dense Matter Experiments using the 3D ALE-AMR Code and the Move Toward Exascale Computing. International Fusion Science and Applications (IFSA), Bordeaux, 2011, LLNL-PROC-511851

- 54 Sapozhnikov A T, Mironova E E. TUR software package for constructing and investigating equation of state. AIP conf Proc, 2006, 849: 358–361
- 55 Glaesemann K R, Fried L E. Recent advance in modeling Hugoniot with cheetah. AIP Conf Proc, 2006, 845: 515–518
- 56 Driver K P, Militzer B. First-principles simulations and shock Hugoniot calculations of warm dense neon. Phys Rev B, 2015, 91: 045103
- 57 Militzer B, Driver K P. Development of path integral Monte Carlo simulations with localized nodal surfaces for second-row elements. Phys Rev Lett, 2015, 115: 176403
- 58 Ping Y, Correa A A, Ogitsu T, et al. Warm dense matter created by isochoric laser heating. High Energy Density Phys, 2010, 6: 246–257
- 59 Chen Q F, Cai L C, Zhang Y, et al. Self-consistent fluid variational theory for the dissociation of dense nitrogen. J Chem Phys, 2006, 124: 074510
- 60 Chen Q F, Zhang Y, Cai L C, et al. Self-consistent variational calculation of the dense fluid helium in the region of partial ionization. Phys Plasma, 2007, 14: 012703
- 61 Chen Q F, Cai L C, Zhang Y, et al. Self-consistent fluid variational theory for the equation of state and dissociation of dense hydrogen and nitrogen. J Phys Cond Matt, 2007, 19: 425209
- 62 Chen Q F, Cai L C, Zhang Y, et al. The dissociation and equation of state of dense fluid oxygen at high pressures and high temperatures. J Chem Phys, 2008, 128: 104512
- 63 Chen Q F, Cai L C, Gu Y J, et al. Ionization and equation of state of dense xenon at high pressures and high temperatures. Phys Rev E, 2009, 79: 016409
- 64 Chen Q F, Cai L C, Gu Y J, et al. Compressibility and isotope effect of fluid hydrogen. Phys Lett A, 2010, 374: 3875–3880
- 65 Chen Q F, Zheng J, Gu Y J, et al. Equation of state of partially ionized argon plasma. Phys Plasmas, 2011, 18: 112704
- 66 Chen Q F, Zheng J, Gu Y J, et al. Equation of state of dense neon and krypton plasmas in the partial ionization regime. Phys Plasma, 2015, 22: 122706
- 67 Gu Y J, Chen Q F, Zheng J, et al. Multishock comparison of dense gaseous H_2+He mixtures up to 30 GPa. J Chem Phys, 2009, 130: 184506
- 68 Zheng J, Gu Y J, Chen Z Y, et al. Measurements of the equations of state and spectrum of nonideal xenon plasma under shock compression. Phys Rev E, 2010, 82: 026401
- 69 Zheng J, Chen Q F, Gu Y J, et al. Hugoniot measurements of double-shocked precompressed dense xenon plasmas. Phys Rev E, 2012, 86: 066406
- 70 Gu Y J, Chen Q F, Zheng J, et al. The equation of state, shock-induced molecule dissociation, and transparency loss for multi-compressed dense gaseous H_2+D_2 . J Appl Phys, 2012, 111: 013513
- 71 Chen Q F, Zheng J, Gu Y J, et al. Thermophysical properties of multi-shock compressed dense argon. J Chem Phys, 2014, 140: 074202
- 72 Zheng J, Chen Q F, Gu Y J, et al. Thermodynamics, compressibility, and phase diagram: Shock compression of supercritical fluid xenon. J Chem Phys, 2014, 141: 124201
- 73 Zheng J, Chen Q F, Gu Y J, et al. Multishock compression properties of warm dense argon. Sci Rep, 2015, 5: 16041

Summary for “温密物质特性研究进展与评述”

Review and progress in the study of the properties of warm dense matter

CHEN QiFeng^{*}, GU YunJun, ZHENG Jun, LI JiangTiao, LI ZhiGuo, QUAN WeiLong, FU ZhiJian & LI ChengJun

National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

^{*} Corresponding author, E-mail: chenqf01@gmail.com, chenqf_iapcm@aliyun.com

Warm dense matter (WDM) belongs to a part of high energy density physics, which includes both extensive and rich physics phenomena. It is an important state of the evolution and presence of matters in inertial confinement fusion (ICF), heavy-ion fusion, Z-pinch processes and so on. In particular, thermodynamic, optical, and radiated characteristic of warm dense matter plays an important role in determining for the macro fluid movement of matter and determining for the energy transportation and transfer in the interactions of radiated field with matter in the evolution process. Therefore, further investigation of the properties of warm dense matter and precision improvements on its related parameters, such as equations of state and radiation transportation, are of science significant and applied background in many research fields such as ICF, Z-pinch, earth's and planetary interior structure. The important research progress in the techniques of production, diagnostics, and simulation of warm dense matter under the laboratory conditions are briefly introduced and reviewed. The topics on the techniques of creating WDM were discussed, including experimental capabilities and facilities enabling the synthesis and confinement of warm dense states. These experimental capabilities include energetic materials, short pulse and high-energy-density lasers, ion beams, static high-pressure diamond-anvil cells, radiation-synchrotron sources, and mechanical impact techniques such as gas-gun launchers. Advanced diagnostics required for the characterization and interrogation of warm dense states were employ in these experiments accordingly. A general review on the theoretical approaches and computational capabilities enabling the prediction of the thermodynamic properties of matter in the warm dense regime were given. These approaches include quantum-based finite-temperature methods based on density functional theory, finite-temperature average-atom method, molecular dynamics, and various plasma physics-based theoretical approaches. In our National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics (LSD), warm dense matter was created by multiple shock reverberation technique. The multi-shock compressed states were directly determined by the multi-wavelength channel optical transience radiance pyrometry (MCOP), Doppler pins system (DPS), streak optical pyrometer (SOP), and spectrum analyser. The gas sample is confined between a 304 steel baseplate at the impact end and a composite window at the other end. The strong plain shock wave was produced using the flyer plate impact accelerated up to about several km/s by a two-stage light gas gun on the target baseplate and introduced into the plenum gas sample, which was pre-compressed from environmental pressure to 20–40 MPa. The optical radiation histories recorded by two sets of MCOPs were used to determine shock velocity. Simultaneously, the particle velocity profiles of gas sample-window interface were measured with four DPSs and the time-resolved spectrum was determined by SOP. The states of multi-shock compression gas sample were determined from the measured shock velocities combining the particle velocity profiles. The multi-shock temperatures were obtained from the measured radiation histories and spectrum of warm dense matter. We performed the experiments on warm dense helium, deuterium, argon, and xenon to reach to above one hundred GPa. The experimental results are used to validate our developed self-consistent fluid variational theoretical model, to check the existing WDM theoretical model, and to create new theoretical ones. Finally, some suggestions, summary, and outlook in the future development tendency and direction of warm dense matter are presented.

warm dense matter, equation of state, transportation property, diagnostics, shock wave

doi: 10.1360/N972016-00471