

高压物理学报

快速增压法研究温度对铝和氯化钠 Grüneisen 参数的影响

王君龙,刘秀茹,张林基,何竹,洪时明

引用本文:

王君龙,刘秀茹,张林基,等. 快速增压法研究温度对铝和氯化钠 Grüneisen 参数的影响 [J]. 高压物理学报,2018,32(4):041301.

WANG Junlong, LIU Xiuru, ZHANG Linji, et al. Effect of Temperature on Grüneisen Parameters of Aluminum and Sodium Chloride by Rapid Compression Method [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4):041301.

[当期更多内容>>](#)

您可能感兴趣的其他文章:

[Bridgman 压砧上叶蜡石封垫预烧工艺与内加热方式的改进](#)

袁朝圣,刘秀茹,何竹,洪时明

DOI: 10.11858/gywlxb. 2016.04.002

[毫秒级快速压缩技术在材料科学中的应用](#)

刘秀茹,王君龙,陈丽英,洪时明

DOI: 10.11858/gywlxb. 2017.03.003

[碳化硅-金刚石超硬复合材料的弹性性质](#)

王志刚,徐亮,李绪海,王海阔,贺端威,孟川民

DOI: 10.11858/gywlxb. 2015.04.004

[不同加载压力下平面对顶砧间叶蜡石封垫力学状态的演变](#)

胡云,陈丽英,刘秀茹,彭小娟,苏磊,洪时明

DOI: 10.11858/gywlxb. 2015.06.001

[立方聚合氮\(cg-N\)的高温高压合成](#)

雷力,蒲梅芳,冯雷豪,戚磊,张雷雷

DOI: 10.11858/gywlxb. 20170672

快速增压法研究温度对铝和氯化钠 Grüneisen参数的影响^{*}

王君龙, 刘秀茹, 张林基, 何竹, 洪时明

(西南交通大学物理科学与技术学院, 材料先进技术教育部重点实验室, 四川成都 610031)

摘要:根据Grüneisen状态方程导出的偏导关系式 $\gamma=(K_s/T)(\partial T/\partial p)_s$ (其中 K_s 是绝热体积弹性模量),采用快速增压方法结合中值定理分别在297~494 K和312~608 K温度范围内研究了铝和氯化钠的Grüneisen参数 γ 随温度的变化关系。在平面对顶压砧模具上设计了内加热的样品组装方式,测量了不同温度下快速增压过程中样品的温升曲线和压力变化曲线,并对温升曲线进行了温度修正,使所得结果更接近绝热压缩过程。实验结果表明:铝和氯化钠在实验温度范围内、压力分别为2.17 GPa和1.46 GPa下,其 $\Delta T/\Delta p$ 值随着温度的升高而增大; γ 值随着温度的升高表现为波动的变化趋势,与温度没有明显的变化关系。

关键词:Grüneisen参数; 高温高压; 快速增压; 氯化钠; 铝

中图分类号: O522.2; O521.22 **文献标识码:**A

Grüneisen参数(即 γ 参数)是凝聚态物质的一个重要参数,对于研究物质的热力学性质、弹性和非谐振性有重要意义^[1]。在研究凝聚态物质高温高压特性时, γ 参数将弹性性质与热力学性质联系起来,为研究多种热力学量的高温高压效应和建立物质的状态方程提供了重要途径^[1-2]。在地球物理研究中, γ 参数与地球内部压力、温度有关,其取值直接影响到由地震波和高温高压实验数据推断地球深部的可能物质组成及热力学状态的结果^[3]。

1912年,德国物理学家Grüneisen提出一种描述物质热贡献的特性方程,即Grüneisen状态方程

$$p - p_c = (\gamma/V)(E - E_c)_V \quad (1)$$

式中: p 和 E 表示热压、热能, p_c 和 E_c 表示冷压、冷能, V 表示比容。并将参数 γ 定义为

$$\gamma = V(\partial p / \partial E)_V \quad (2)$$

式中:下标 V 表示定容, $\partial p / \partial E$ 表示压强随内能的变化率。因此 γ 也被称为Grüneisen参数^[1,4]。根据Grüneisen状态方程,如果冷压 p_c 、冷能 E_c 和 γ 参数已知,则可确定材料的状态方程。随后人们发展了多种理论和实验方法获取 γ 参数^[1-2]。在理论方面,人们利用分子动力学、晶格动力学、统计力学等方法对 γ 参数进行了大量研究,提出了多种 γ 参数表达式^[2,5-9]。然而通过不同理论获得的 γ 数据存在较大差别,理论方法求出的 γ 数据还存在模型难以检验等问题^[10]。在实验方面,人们利用超声测量技术、热弹性应力技术、快速增压技术等手段对 γ 参数进行了大量研究^[11-16]。快速增压技术是Boehler等^[17-18]根据Grüneisen微分方程导出的关系式((3)式)提出的一种测量 γ 参数的实验方法

$$\gamma = \frac{K_s}{T} (\partial T / \partial p)_s \approx \frac{K_s}{T} (\Delta T / \Delta p)_s \quad (3)$$

* 收稿日期: 2017-06-03; 修回日期: 2017-06-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助课题(2682016CX065, 2682014ZT31)

作者简介: 王君龙(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压物理研究. E-mail: jlwang@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 刘秀茹(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高压下亚稳材料的制备与相变研究.

E-mail: xrliu@swjtu.edu.cn

何竹(1976—), 女, 博士, 讲师, 主要从事高压物理研究. E-mail: zhuhe@swjtu.edu.cn

式中: K_S 表示绝热体积弹性模量, 下标 S 表示绝热过程, $\partial T/\partial p$ 表示温度随压强的变化率, $\Delta T/\Delta p$ 表示温度与压力的增幅比。该方法要求满足两个条件: 一是增压速率尽可能快, 以接近绝热压缩过程; 二是增压幅度尽可能小, 使 $\Delta T/\Delta p$ 更接近其瞬时变化率 $\partial T/\partial p$ ^[17-18]。Boehler 等^[13] 使用该方法测量了一些流体物质、氯化钠和铅、铜、铁等金属物质的 γ 值。这种实验方法的局限性主要在于增压幅度 Δp 越小, ΔT 测量结果的不确定度越大。针对这一局限性, 本课题组提出了大幅度增压结合中值定理的方法测量 γ 参数^[19-20]。快速增压过程中温度随压力的变化关系 $T(p)$ 可以用二次曲线拟合, 根据微分中值定理, 曲线中点处切线的斜率 $\partial T/\partial p$ 等于二次曲线起点和终点对应的 $\Delta T/\Delta p$, 此时 $\partial T/\partial p$ 与 $\Delta T/\Delta p$ 不再是接近, 而是相等的关系。因此, 通过测量大幅度快速增压过程中温度和压力的变化值 ΔT 、 Δp , 就可以得到中点压力下温度随压力的瞬时变化率 $\partial T/\partial p$, 代入(3)式即可求得中点压力、温度下的 γ 值。由于大幅度增压过程中 ΔT 和 Δp 的有效位数增加, 使测量结果更加精确。本课题组在常温高压下采用大幅度增压结合中值定理的方法测量了氯化钠、铜、铁、铅等物质的 γ 参数^[19-22]。

关于温度对铝 γ 参数的影响, 理论和实验方面都有文献报道^[23-25]。Tolpadi 等^[23] 用晶格动力学方法计算了常压下铝在 30~300 K 之间的 γ 值, 发现随着温度的升高 γ 值先减小, 后保持不变接近常数 1.7。Bandyopadhyay 等^[14] 通过热力学方法计算了 89~300 K 之间铝 γ 值的变化情况, 发现其在 150~300 K 范围内与温度没有明显的变化关系。Gauster 等^[12] 利用热弹性应力技术测量了铝在 5~290 K 之间的 γ 值, 结果表明其在实验温度范围内接近常数 1.7。上述报道都是在室温以下研究温度对铝 γ 参数的影响, 为了进一步了解温度对 γ 参数的影响, 有必要开展室温以上铝 γ 值的测量。

关于温度对氯化钠 γ 参数的影响, Spetzler 等^[26] 通过超声技术测量了 0~0.8 GPa 范围内 573、823、1 073 K 温度下的 γ 值, 结果表明随着温度的增加氯化钠的 γ 值减小, 但其变化幅度很小。Boehler 等^[27] 通过快速增压法研究了氯化钠在 0~5 GPa、298~1 073 K 范围内 γ 值的变化情况, 发现随着温度的增加 γ 值在 1.6 附近, 但 γ 值随压力变化明显, 随着压力的增加而减小。Birch 等^[15] 利用超声和冲击波等实验获得的数据推测了 0~3 GPa、298~773 K 范围内 γ 值的变化情况, 发现随着温度的增加 γ 值没有明显的变化。蔡灵仓等^[28] 采用分子动力学方法研究了氯化钠在 0~60 GPa、298~1 073 K 范围内 γ 值的变化情况, 结果表明在该范围内温度变化对 γ 值影响小, γ 值随着压力的增加而减小。综上, 文献中关于温度对氯化钠 γ 参数影响的结论基本一致, 即 γ 值对温度变化不敏感^[27-29]。

本研究采用大幅度增压结合中值定理的方法测量不同温度下铝和氯化钠的 γ 参数, 进一步验证 γ 参数与温度的变化关系。在本课题组前期工作的基础上, 设计了内加热的样品组装方式, 采用大幅度增压结合中值定理的方法测量铝在 297~494 K 和氯化钠在 312~608 K 温度范围内的 γ 参数, 讨论温度对铝和氯化钠 γ 参数的影响。

1 实验方法

γ 参数测量实验在快速增压装置上进行^[19], 使用的高压模具为端面直径 26 mm 的硬质合金平面顶压砧, 样品组装详见图 1。封垫兼传压介质由上、下两片叶蜡石组成。样品为直径 4 mm、厚 1 mm 的氯化钠(成都科龙化工试剂厂, 纯度 99.995%)和铝(上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 纯度 99%)圆片。将两片样品叠放在叶蜡石中心孔即样品腔内。石墨片放在内、外两层云母片中间, 并用铜箔连接, 用于加热样品。位于石墨片和样品中间的云母片的作用是电绝缘和阻止快速增压过程中样品的热量损失。位于石墨片和压砧中间的云母片的作用是电绝缘和绝热。K 型热电偶(NiCr-NiSi 材质)安放

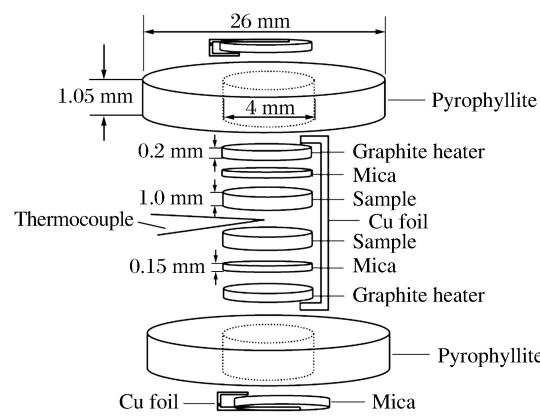


图 1 样品组装示意

Fig. 1 Diagram of sample assembly

在两片样品中间,用于测量样品温度。使用记录仪(GRAPHTEC GL900)同时记录快速增压过程中的油压和样品温度信号。利用铋在2.55 GPa的相变点对样品腔内的压力进行标定,通过标定的公式将油压换算成样品腔内的压力。铝和氯化钠的标定结果依次为(其中 p_{oil} 表示油压)

$$p(\text{GPa}) = -0.18149 + 0.20170 p_{\text{oil}} (\text{MPa}) \quad (4)$$

$$p(\text{GPa}) = -0.15154 + 0.16840 p_{\text{oil}} (\text{MPa}) \quad (5)$$

实验过程中先将样品加热到一定温度,然后实施快速增压,记录快速增压过程中样品的温升曲线和压力变化曲线,采用(6)式计算出中点压力及温度(p_m, T_m)对应的 γ 值

$$\gamma = (K_s/T_m)(\Delta T/\Delta p)_s \quad (6)$$

本研究主要讨论温度对 γ 参数的影响,为了避免压力不同引起 γ 值变化,快速增压实验设置的起始压力和压力上限是相同的,使不同温度下测量的 γ 值对应的压力(即快速增压的中点压力)尽量一致。样品铝和氯化钠的中点压力分别为 $p_m = (2.17 \pm 0.17) \text{ GPa}$ 和 $p_m = (1.46 \pm 0.08) \text{ GPa}$ 。

2 实验结果与讨论

本研究测量了6个不同温度下铝的 γ 参数,分别在室温及331、380、391、443、479 K下对样品铝进行快速增压,记录在快速增压和保压过程中样品的温度、压力随时间的变化曲线。实验过程中,热电偶测量点位于样品铝中心,热电偶温度上升的主要原因是样品经绝热压缩后温度上升,通过热传导使热电偶测量点的温度上升,因此热电偶测量的温度为样品的温度。热电偶直径为0.2 mm,由于测温点的质量小,可以忽略绝热压缩引起的热电偶温升效应。此外,本研究使用的是NiCr-NiSi材质的K型热电偶,关于压力对其测量温度的影响,普遍认为这种热电偶的性质与NiCr-NiAl材质的K型热电偶十分接近,在700 °C以下NiCr-NiAl热电偶的压力效应可以忽略不计^[30-31]。本实验的温度在700 °C以下,因此未考虑压力对热电偶测量温度的影响。

图2(a)为室温下快速增压过程中记录的样品铝的温度、压力随时间变化曲线,可以看出,压力和温度在数十毫秒内上升到最高点。在随后的保压过程中,尽管压力不变,温度却随着时间不断下降,温度下降曲线在各点的一阶导数反映了体系因热传导而引起的降温速率。原理上,通过实验记录的温升曲线 $T(t)$ 和升压曲线 $p(t)$ 可以得出 $T(p)$ 曲线,但由于增压时间比较短,温度上升比压力稍滞后,导致 $T(p)$ 曲线的准确性受影响,因此我们没有采用对 $T(p)$ 曲线求导的方法获得 $\partial T/\partial p$,而使用中值定理的方法计算中点压力和温度对应的 γ 值^[19]。为了使计算结果更加符合绝热压缩过程,数据处理过程中采用了温度修正,即分析保压过程中的降温曲线,提取出热传导引起的样品温度下降信息,通过积分推算出升温过程中由于热量散失而引起的温度差,然后对升温曲线进行温度补偿^[20]。实验记录的温升曲线和修正后的温升曲线如图2(b)所示,修正后的温度值比实验记录的温度值略高,并且其差值随着温度的升高而增大。根据压力上升曲线及修正后的温升曲线,分别得出 $\Delta p = 3.27 \text{ GPa}$ 和 $\Delta T = 20 \text{ K}$,如表1所示,其中 T_1 、 T_2 分别为起始温度和终点温度。绝热体积弹性模量 K_s 的取值参考了Sutton和Schmunk等的实验结果,即常温常压下 $K_s = 76.4 \text{ GPa}$ 、 $dK_s/dp = 5.19$ 、 $dK_s/dT = -0.0475 \text{ GPa/K}$ ^[32-33],推算获得中点压力、温度(2.30 GPa、297 K)下 $K_s = 88.16 \text{ GPa}$,最后代入(6)式计算出铝的 γ 值为1.82(见表1)。

图2(c)给出了380 K温度下快速增压过程中 $T(t)$ 和 $p(t)$ 测量曲线。与常温下(见图2(a))相比,压力到达最高点比温度到达最高点的时间滞后得更多,我们推测这是由于高温状态下样品的散热比常温时快。对温升曲线进行修正时,其温度范围为从起始温度(即380 K)到最高温度。修正前、后的温升曲线如图2(d)所示,与常温下快速增压过程的温度修正曲线(见图2(b))相比,高温下温升曲线的温度修正幅度更大。根据压力上升曲线及修正后的温升曲线,分别得出 $\Delta p = 3.68 \text{ GPa}$ 和 $\Delta T = 26 \text{ K}$ 。绝热体积弹性模量 K_s 参考了Sutton和Schmunk等的实验结果,即常温常压下 $K_s = 76.4 \text{ GPa}$ 、 $dK_s/dp = 5.19$ 、 $dK_s/dT = -0.0475 \text{ GPa/K}$ ^[32-33],推算获得中点压力、温度(2.0 GPa、393 K)下 $K_s = 82.04 \text{ GPa}$,最后代入(6)式计算出对应的 γ 值为1.48。采用相同的数据处理方法得到其他4组实验对应的 γ 值,实验参数及结果如表1所示。

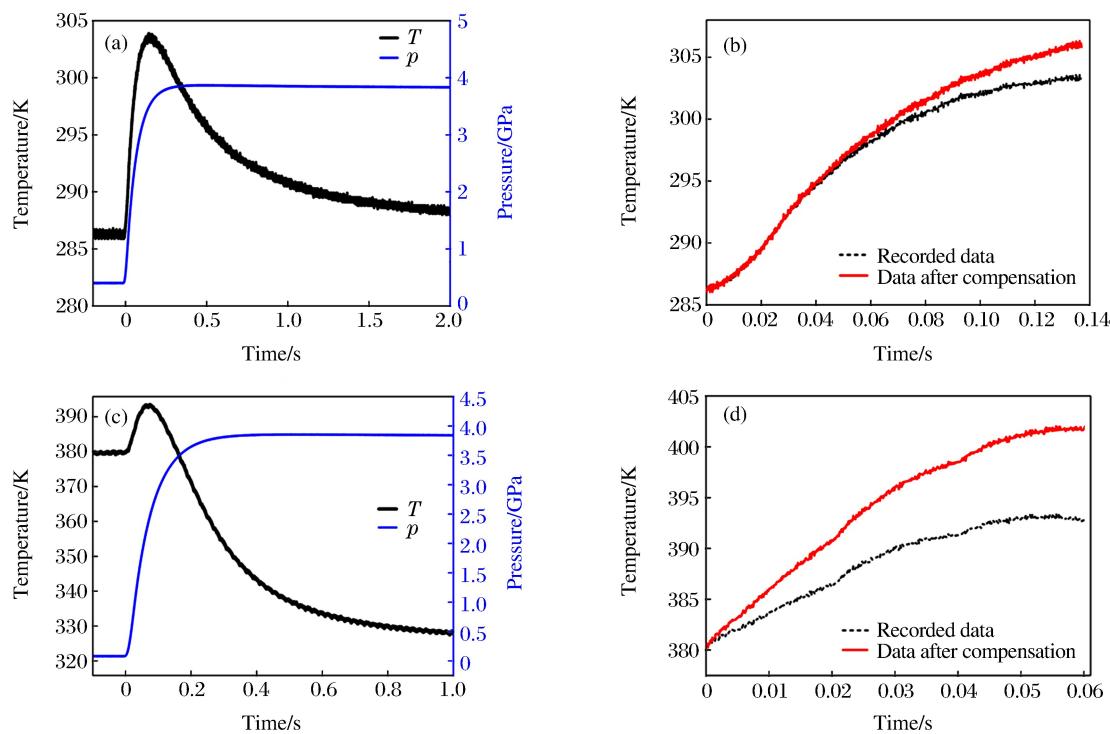


图2 室温下快速增压过程中样品铝的压力、温度随时间变化曲线(a),以及修正前、后的温升曲线(b);

380 K 温度下快速增压过程中样品铝的压力、温度随时间变化曲线(c),以及修正前、后的温升曲线(d)

Fig. 2 $T(t), p(t)$ curves of Al during rapid compression at room temperature (a) and the recorded and corrected $T(t)$ curves (b); $T(t), p(t)$ curves of Al during rapid compression at 380 K (c) and the recorded and corrected $T(t)$ curves (d)表1 样品铝的实验参数及 γ 值Table 1 Experimental parameters and γ values of Al

No.	$T_1 /$ K	$T_2 /$ K	$T_m /$ K	$\Delta p /$ GPa	$p_m /$ GPa	$K_s^{[32-33]} /$ GPa	$\frac{\Delta T}{\Delta p} / (K \cdot GPa^{-1})$	γ
1	287	307	297	3.27	2.30	88.16 ± 0.21	6.12 ± 0.14	1.82 ± 0.05
2	331	357	344	3.68	2.17	85.25 ± 0.20	7.07 ± 0.16	1.75 ± 0.04
3	380	406	393	3.68	2.00	82.04 ± 0.20	7.07 ± 0.16	1.48 ± 0.04
4	391	417	404	3.64	2.10	82.04 ± 0.20	7.14 ± 0.16	1.45 ± 0.04
5	443	469	456	3.49	2.23	80.24 ± 0.19	7.45 ± 0.17	1.31 ± 0.03
6	479	509	494	3.46	2.19	78.23 ± 0.19	8.67 ± 0.20	1.37 ± 0.03

如前所述,为了研究温度对铝 γ 参数的影响,我们使不同温度下的快速增压实验对应的中点压力尽量一致,即 $p_m = (2.17 \pm 0.17)$ GPa。由于快速增压实验设备(含油压系统、压力和温度传感器等)自身精度的限制,使实验结果存在误差。过去在相同设置下多次重复实验所记录的数据表明,压力增幅和温度增幅的相对误差分别为4.4%和2.1%。压标物质铋的I-II相变压力为 (2.55 ± 0.006) GPa,即相对误差为0.24%^[34]。误差分析时,考虑了压力误差对绝热体积弹性模量 K_s 的影响,忽略了温度误差对 K_s 的影响。综合以上因素,得出 K_s 、 $\Delta T/\Delta p$ 、 γ 误差线,如表1所示。图3(a)和图3(b)分别给出了2.17 GPa压力下铝的 $\Delta T/\Delta p$ 和 γ 参数随温度的变化曲线,其中: $\Delta T/\Delta p$ 值随着温度的升高而增加; γ 值随着温度的升高先减小后小幅增大,表现为波动的变化趋势。图3(b)还给出了文献报道的铝 γ 值在常压下随温度的变化数据。由于压力对铝 γ 值的影响较大^[18,35],不同压力下获得的 γ 值不同,本研究主要对比温度对铝 γ 参数的影响。结合文献报道^[12,14,23]和实验结果,我们认为保持压力不变、在低于500 K的温度范围内,随着温度的升高铝的 γ 值表现为波动性,与温度不存在明显的变化关系。但值得

注意的是在297~456 K温度范围内,铝 γ 值与温度有较明显的负相关性,减小幅度约为0.23/100 K。与压力误差引起的 γ 参数变化量相比,该值不能忽略,后续工作中将结合理论计算探讨这种负相关性的机理。热压和热能可以分解为晶格振动和电子热运动的贡献,相应地 γ 参数也可以分解为晶格 γ 参数和电子热运动 γ 参数两部分。100 K以下铝 γ 参数的低温数据也出现负相关性,一般认为这可能是由于温度对金属铝价电子热运动贡献的影响^[14]。

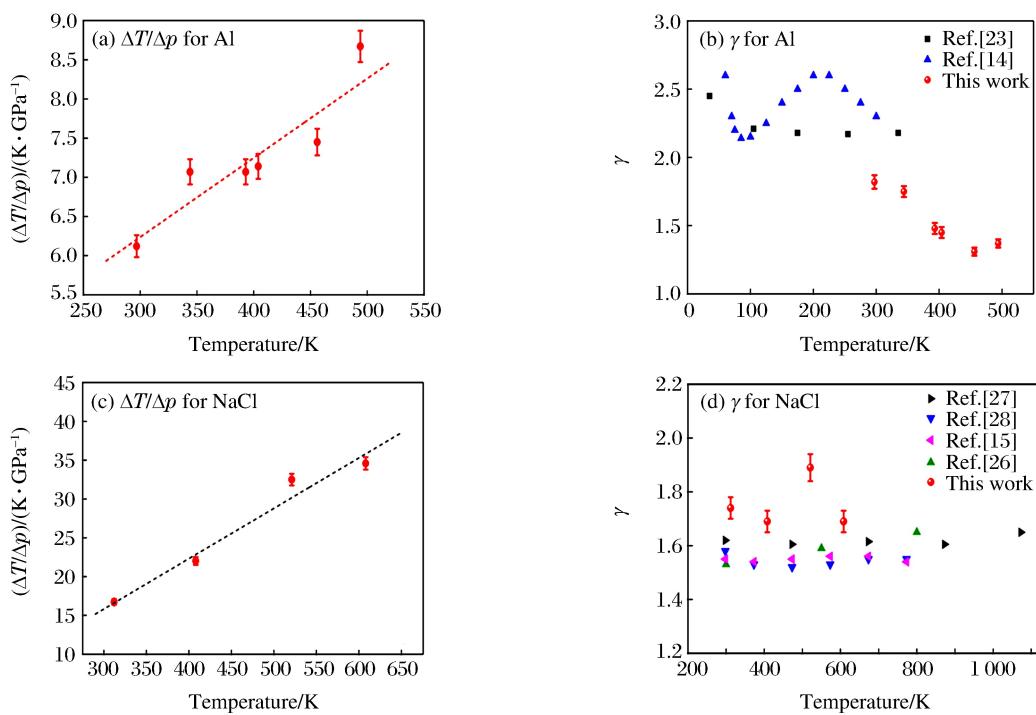


图3 样品铝及氯化钠的 $\Delta T/\Delta p$ 、 γ 随温度变化关系

Fig. 3 Temperature dependence of $\Delta T/\Delta p$ and γ for Al and NaCl

类似地,我们测量了不同温度下氯化钠的 γ 值,分别在291、385、488和566 K下对氯化钠样品进行快速增压实验。记录快速增压过程中样品的温度、压力上升曲线,中点压力为 (1.46 ± 0.08) GPa。图4(a)和图4(c)分别是在室温和488 K下施加快速增压时,记录的样品温度、压力随时间的变化曲线 $T(t)$ 和 $p(t)$ 。与图4(a)相比,图4(c)中压力到达最高点比温度到达最高点的时间滞后得更多,可能是由于高温状态下样品的散热比常温时快。参照保压过程中样品温度下降曲线,对增压过程中的温升曲线进行温度修正。两组实验修正前、后的温升曲线分别如图4(b)和图4(d)所示。与图4(b)相比,高温下温升曲线(见图4(d))的温度修正幅度更大。根据压力上升曲线及修正后的温升曲线分别计算出 Δp 和 ΔT ,代入(6)式计算得到1.46 GPa下332 K和553 K对应的 γ 值分别为1.74、1.89。绝热体积弹性模量 K_s 参考了Spetzler等的计算结果,即常温常压下 $K_s = 25.2$ GPa、 $dK_s/dp = 5.25$ 、 $dK_s/dT = -0.01113$ GPa/K^[26],推算获得相应的 K_s 值。不同温度下4组实验数据及计算得到的 γ 值如表2所示,采用与铝相似的误差分析方法,给出了 K_s 、 $\Delta T/\Delta p$ 、 γ 误差线,如表2和图3(c)、图3(d)所示。

图3(c)和图3(d)分别给出了氯化钠的 $\Delta T/\Delta p$ 、 γ 参数随温度的变化关系。图3(c)中 $\Delta T/\Delta p$ 值随着温度的升高而增大,与Boehler等^[27]报道的常压下 $\Delta T/\Delta p$ 值随温度的变化趋势是一致的。图3(d)中,随着温度的升高 γ 值在1.74附近波动,与温度没有明显的变化关系。图3(d)还给出了文献报道的氯化钠 γ 参数随温度变化的结果。由于压力对氯化钠的 γ 值影响较大^[15],不同压力下获得的 γ 值不同^[15,28],本研究主要对比温度对氯化钠 γ 参数的影响。关于温度对 γ 值的影响,本研究结论与文献报道^[15,26-28]基本一致,即当压力一定时,在312~608 K范围内氯化钠的 γ 值随温度的变化而波动,但与温度没有明显的变化关系,由此推测温度对氯化钠 γ 参数的影响比较弱。

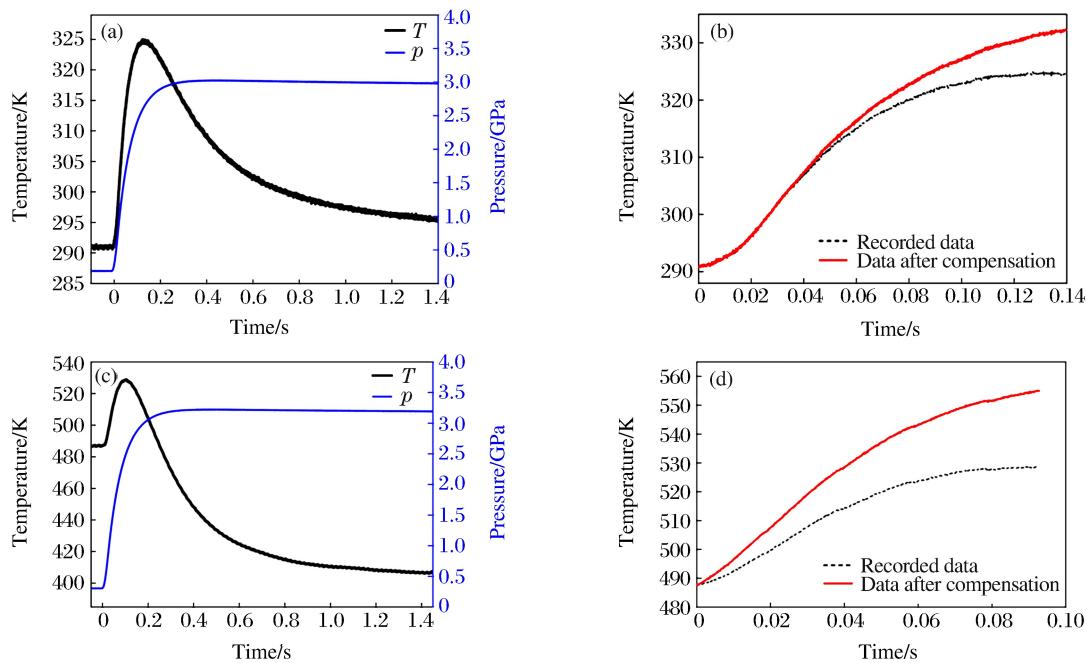


图4 室温下快速增压过程中氯化钠样品的压力、温度随时间变化曲线(a),以及修正前、后的温升曲线(b);
488 K 温度下快速增压过程中氯化钠样品的压力、温度随时间变化曲线(c),以及修正前、后的温升曲线(d)

Fig. 4 $T(t), p(t)$ curves of NaCl during rapid compression at room temperature (a) and the recorded and corrected $T(t)$ curves (b);
 $T(t), p(t)$ curves of NaCl during rapid compression at 488 K (c) and the recorded and corrected $T(t)$ curves (d)

表2 样品氯化钠的实验参数及 γ 值

Table 2 Experimental parameters and γ value of NaCl

No.	$T_1 /$ K	$T_2 /$ K	$T_m /$ K	$\Delta p /$ GPa	$p_m /$ GPa	$K_s^{[26]} /$ GPa	$\frac{\Delta T}{\Delta p} / (K \cdot GPa^{-1})$	γ
1	291	332	312	2.45	1.43	32.54 ± 0.08	16.73 ± 0.38	1.74 ± 0.04
2	385	431	408	2.09	1.42	31.42 ± 0.08	22.01 ± 0.51	1.69 ± 0.04
3	488	553	521	2.00	1.46	30.41 ± 0.07	32.50 ± 0.75	1.89 ± 0.05
4	566	649	608	2.40	1.54	29.70 ± 0.07	34.58 ± 0.80	1.69 ± 0.04

根据 Grüneisen 参数的基本定义式 $\gamma = V(\partial p / \partial E)_V$, 内能 E 通常正比于温度 T , γ 参数提供了一座连接压力 p 和温度 T 的桥梁, 相应地 γ 也应该是压力 p 和温度 T 的函数。高温高压条件下 γ 参数的测量方法大多是通过测量热力学参数的间接测量, 不同的理论模型推导出的 γ 参数计算公式适用于不同类型的固体材料和不同的物理过程。本研究采用快速增压法测量不同温度下的 γ 参数, 探索高温高压下 γ 参数的演变过程, 对研究物质的高温高压状态方程有一定的参考价值。关于 γ 参数与温度的相关性, 今后还需要在更宽的温度范围内展开研究。

3 结 论

采用快速增压方法分别在 297~494 K 和 312~608 K 温度范围内研究了温度对铝和氯化钠 γ 参数的影响。在平面对顶压砧模具上设计了内加热的样品组装方式, 测量了不同温度下快速增压过程中样品的温升曲线及压力变化曲线。利用保压过程中样品温度下降曲线, 对温升曲线进行了温度修正, 使所得结果更接近绝热压缩过程。实验中发现, 快速增压的起始温度越高, 压力到达最高点比温度到达最高点的时间滞后得越多, 温升曲线的温度修正幅度越大, 推测其原因是高温状态下样品的散热更快。实验结果表明, 铝和氯化钠在实验温度范围内、中点压力分别为 2.17 GPa 和 1.46 GPa 下, 其 $\Delta T / \Delta p$ 值随着温度的升高而增加, γ 参数随着温度的升高表现为波动的变化趋势, 与温度没有明显的变化关系。

参考文献:

- [1] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第2版. 北京:科学出版社,1999:25-29.
JING F Q. Introduction to experimental equation of state [M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,1999:25-29.
- [2] 吴强. 金属材料高压物态方程及 Grüneisen系数的研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2004:69-79.
WU Q. Studies on equation of state and Grüneisen parameter for metals at high pressures and temperatures [D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics,2004:69-79.
- [3] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论 [M]. 北京:科学出版社,1997:104-110.
XIE H S. Introduction to earth interior material science [M]. Beijing:Science Press,1997:104-110.
- [4] 汤文辉,张若棋. 物态方程理论及计算概论 [M]. 北京:高等教育出版社,2008:1-306.
TANG W H,ZHANG R Q. Introduction to theory and calculation of equation of state [M]. Beijing:Higher Education Press,2008:1-306.
- [5] IRVINE R D,STACEY F D. Pressure dependence of the thermal Grüneisen parameter, with application to the Earth's lower mantle and outer core [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,1975,11:157-165.
- [6] 张万箱. 固体的特征频率及系数的普遍表达式 [J]. 物理学报,1984,33(8):1120-1128.
ZHANG W X. General expressions of the characteristic frequency and Grüneisen coefficient for solids [J]. Acta Physica Sinica,1984,33(8):1120-1128.
- [7] QUAREN F,MULARGIA F. The validity of the common approximate expressions for the Grüneisen parameter [J]. Geophysical Journal International,1988,93:505-519.
- [8] VASCHENKO V Y,ZUBAREV V N. Concerning the Grüneisen constant [J]. Soviet Physics-Solid State,1963,5:653-655.
- [9] VÓCADLO N L,PRICE G D. The Grüneisen parameter—computer calculations via lattice dynamics [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,1994,82(3):261-270.
- [10] ANDERSON O L. The Grüneisen ratio for the last 30 years [J]. Geophysical Journal International,2000,143(2):279-294.
- [11] WU Q,JING F Q,LI X Z. Behaviour of Grüneisen parameter at high pressure and temperature inferred from shock compression data [J]. Applied Physics Letters,2002,19(4):528-530.
- [12] GAUSTER W B. Low-temperature Grüneisen parameters for silicon and aluminum [J]. Physical Review B,1971,4(4):1288-1296.
- [13] BOEHLER R,RAMAKRISHNAN J. Experimental results on the pressure dependence of the Grüneisen parameter:a review [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,1980,85(B12):6996-7002.
- [14] BANDYOPADHYAY J,GUPTA K P. Low temperature lattice parameters of Al and Al-Zn alloys and Grüneisen parameter of Al [J]. Cryogenics,1978,18(1):54-55.
- [15] BIRCH F. Equation of state and thermodynamic parameters of NaCl to 300 kbar in the high-temperature domain [J]. Journal of Geophysical Research,1986,91(B5):4949-4954.
- [16] 王筑明,谢鸿森,郭捷,等. 高压下铝的 Grüneisen参数的实验测量 [J]. 高压物理学报,1998,12(1):54-58.
WANG Z M,XIE H S,GUO J,et al. Measurement of Grüneisen parameter of aluminium at high pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1998,12(1):54-58.
- [17] BOEHLER R,GETTING I C,KENNEDY G C. Grüneisen parameter of NaCl at high compressions [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids,1977,38(3):233-236.
- [18] RAMAKRISHNAN J,BOEHLER R, HIGGINS G H, et al. Behavior of Grüneisen parameter of some metals at high pressures [J]. Journal of Geophysical Research,1978,83(B7):3535-3538.
- [19] HONG S M,CHEN L Y,LIU X R, et al. High pressure jump apparatus for measuring Grüneisen parameter of NaCl and studying metastable amorphous phase of poly (ethylene terephthalate) [J]. Review of Scientific Instruments,2005,76(5):053905.
- [20] 陈丽英. 快速大幅度增压法测量 NaCl 的 Grüneisen 参数 [D]. 成都:西南交通大学,2006.
CHEN L Y. Measuring Grüneisen parameter of NaCl by double-quick and larger range comperssion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2006.
- [21] HUANG D H,LIU X R,SU L,et al. Measuring Grüneisen parameter of lead by pressure-jump method [J]. Chinese Physics Letters,2007,24(8):2441-2443.
- [22] HUANG D H,LIU X R,SU L,et al. Measuring Grüneisen parameter of iron and copper by an improved pressure-jump method [J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2007,40:5327-5330.
- [23] TOLPAIDI S. Isobaric and isochoric Grüneisen parameters of Al and Cu [J]. Solid State Communications,1975,16(7):937-939.

- [24] HUZAN E, ABBISS C P, JONES G O. Thermal expansion of aluminium at low temperatures [J]. Philosophical Magazine, 1961, 6(62): 277-285.
- [25] SINGH V P, HEMKAR M P. Dynamical study for the Grüneisen parameters in FCC metals [J]. Journal of Physics F: Metal Physics, 1977, 7(5): 760-768.
- [26] SPETZLER H, SAMMIS C G, O'CONNELL R J. Equation of state of NaCl; ultrasonic measurements to 8 kbar and 800 °C and static lattice theory [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1972, 33(9): 1727-1750.
- [27] BOEHLER R. Adiabats $(\partial T / \partial P)_s$ and Grüneisen parameter of NaCl up to 50 kilobars and 800 °C [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B8): 7159-7162.
- [28] CAI L C, CHEN Q F, CUI S X, et al. The Grüneisen parameter of NaCl at high pressures and temperatures: a molecular dynamics study [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(2): 514-516.
- [29] CUI S X, CAI L C, HU H Q, et al. Melting behavior and the Grüneisen parameter of NaCl at high pressures: a molecular dynamical study [J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(3): 331-341.
- [30] CHENG V M, ALLEN P C, LAZARUS D. Pressure coefficient of thermoelectric power of platinum/platinum-10% rhodium and Chromel/Alumel thermocouples [J]. Applied Physics Letters, 1975, 26(1): 6-7.
- [31] 陈丽英. 快速增压发测量物质的等熵压缩曲线及 W-J 参数 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
CHEN L Y. Measuring of the isentropic compression curve and W-J parameter via a pressure jump method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [32] SUTTON P M. The variation of the elastic constants of crystalline aluminum with temperature between 63 K and 773 K [J]. Physical Review B, 1953, 91(4): 816-821.
- [33] SCHMUNK R E, SMITH C S. Pressure derivatives of the elastic constants of aluminum and magnesium [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1959, 9(2): 100-112.
- [34] 张书霞. 高温高压合成实验所用传压介质的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
ZHANG S X. A study on pressure medium for high pressure and high temperature experiment [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [35] ZHANG T, WU M Q, HE M, et al. A study and comparison of calculating Grüneisen parameter using different methods [J]. Advanced Materials Research, 2011, 146/147: 1102-1107.

Effect of Temperature on Grüneisen Parameters of Aluminum and Sodium Chloride by Rapid Compression Method

WANG Junlong, LIU Xiuru, ZHANG Linji, HE Zhu, HONG Shiming

(School of Physical Science and Technology, Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education of China, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this work, we measured the Grüneisen parameter γ of aluminum in 297–494 K under 2.17 GPa and the γ of sodium chloride in 312–608 K under 1.46 GPa, based on the Grüneisen differential equation $\gamma = (K_s/T)(\partial T / \partial p)_s$ (where K_s is the adiabatic elastic bulk modulus), combining the rapid compression method with the mean value theorem. A setup for internal heating was designed to produce high temperature in the sample chamber and the rapid compression on sample at different temperatures was carried out in a Bridgman anvil by a self-made rapid compression apparatus. The curves of temperature and pressure rise of the sample were recorded during rapid compression. For compensating the heat loss due to heat conduction, the temperature-rise curve was modified according to the cooling rate of the sample during the pressure-holding process. The temperature-rise curve after compensation is closer to that of adiabatic compression. It was found that for aluminum under 2.17 GPa and sodium chloride under 1.46 GPa, the $\Delta T / \Delta p$ increases with the increasing temperature while the Grüneisen parameters fluctuate, showing no obvious relationship with temperature in the experimental temperature range.

Keywords: Grüneisen parameter; high temperature high pressure; rapid compression; NaCl; Al