

高温条件下高速碰撞试验技术研究

徐伟芳, 张方举, 胡文军, 胡绍全, 李上明, 陈军红, 孙爱军, 吕明

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 建立高温条件下结构的高速碰撞试验技术。**方法** 基于理论和试验方法, 研究影响试样加热/保温、碰靶速度和姿态的关键因素, 利用次口径发射技术和电炉技术实现试样的加热、保温和加速。采用间接方法测试试样碰靶时的温度, 联合应用次口径发射技术和靶体, 控制试样的碰靶姿态, 并利用高速摄影技术对其进行测试。通过薄壁圆柱筒的高温高速碰靶验证高温试验技术的有效性。**结果** 建立了加热、加速和姿态控制一体化的高温高速碰撞试验技术, 获得了不同尺寸薄壁圆柱筒不同姿态碰靶时的高温冲击动力学响应。正碰时, 撞击端墩粗, 尾端收缩, 尾端的凹陷大于碰撞端的变形; 侧碰时, 圆筒呈马鞍状; 角碰时的变形为楔形。随着圆筒的强度和刚度的降低, 圆筒的变形增加, 整体发生坍塌, 出现大量的皱褶。**结论** 建立的试验技术切实有效, 可以用于高温条件下结构高速碰撞效应的研究。

关键词: 高温; 高速; 撞击; 薄壁圆柱筒

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.002

中图分类号: TB123 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)11-0007-05

High Velocity Impact Experiment Technique at Elevated Temperature

*XU Wei-fang, ZHANG Fang-ju, HU Wen-jun, HU Shao-quan, LI Shang-ming,
CHEN Jun-hong, SUN Ai-jun, LYU Ming*

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To build a high velocity impact experiment technique of structures at elevated temperature. Methods Key issues affecting heating, insulating, impact velocity and gesture were studied based on theory and experiment. Based on the combination of the subcalibre technique and heater technique, the technique of heating, insulating, and accelerating sample was built. The temperature was measured indirectly. And the gesture controlling technique was combined with the target to control the gesture of sample. High speed photography was used to measure the gesture. All the techniques were validated by cylinder impact tests at elevated temperature and high velocity. **Results** A technique which integrated heating, insulating, accelerating and gesture controlling was built. And the impact dynamical responses of vary dimensions thin cylinders were gained. In front impact, the impacting end was upset while the other end was contracted, and the cave of impacting end was shallower than the opposite end. In lateral impact, the cylinder was saddle-like. In angle impact, it deformed into a wedge shape. With the decrease of cylinder strength and rigidity, deformation of the cylinder increased with overall collapse and many folds. **Conclusion** The experimental technique is effective, and could be used to study high velocity impact responses of structures at high temperature.

KEY WORDS: elevated temperature; high velocity; impact; thin cylinder

收稿日期: 2015-08-21; 修订日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602257)

作者简介: 徐伟芳(1974—), 男, 四川人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为冲击动力学。

随着时代的进步和科学技术的发展,产品在异常事故下的安全性日益受到关注,逐渐成为产品研制的关键技术指标之一。异常事故安全性是指产品因异常高速碰撞或/和火烧下防止爆炸和有害物质泄漏的能力,国内外对此开展了大量的研究^[1-5],制定了不少的安全性规范。如 GB 11806《放射性物质安全运输规程》,以 IAEA 发布并不断修改完善的放射性材料安全运输规程为基础,规定了国内放射性物质安全运输的相关技术要求。在异常事故中,高速碰撞往往伴随着高温发生,高温效应和高速撞击响应相互耦合和相互影响。在 GB 11806 以及已有产品异常事故下安全性的研究中,通常将高速撞击和高温作用下结构的安全性进行解耦,开展单独研究或序贯研究^[3,6-8],单独研究或序贯研究均不能反映高温和高速的耦合效应,因此开展产品高温高速撞击同时作用下的安全性显得尤为重要。

为研究同位素热源异常高空返回在高温和高速碰撞联合作用时的安全性,美国基于空气炮研制了同位素能源撞击试验机(Isotope Fuels Impact Tester, IFIT)^[9],旨在实现高温和高速同时作用时,防止放射性物质的泄漏对环境造成破坏。因此,IFIT 不仅要实现高温和高速的作用,还要实现密封放射性物质的功能,其结构非常复杂,包含空气炮、激发设备、试样、撞击室和回收装置,每个部件又由许多小结构构成。对于通用电源 GPHS-RTG 的整体结构,首先将 GPHS-RTG 加热至设定温度(>1000 °C),然后利用远程控制技术将其快速安装在火箭橇上,并加速火箭橇。当火箭橇加速到试验速度后,分离 GPHS-RTG 与火箭橇,GPHS-RTG 将单独与靶体发生碰撞^[10];或者采用“逆弹道”的方法利用火箭橇将靶体加速到设定速度后,撞击固定安装的 GPHS-RTG。对于无放射性材料的产品来说,上述试验方法结构复杂、操作测试不便和扩展性差,工程实现的成本较高、周期长。对于高温条件下,高速撞击试验涉及加热及温度测试、姿态控制及其测试和试样加速及速度测试等关键技术。文中拟通过对上述三个关键技术的研究以建立方便易控制多用途的高温高速撞击试验装置。

1 试验系统

高温条件下结构高速撞击试验系统以空气炮为基础,结合了次口径发射技术和加热/保温技术,分为空气炮、试样组件、分离器、高速摄影、测速系统和靶体等几部分,如图 1 所示。其试验原理为:利用空气炮快速释放压缩到指定压力的空气,驱动已加热至试验温度的试样,以设定姿态高速撞击靶体。其中,试样组件主要起着弹托和加热的作用,碰靶姿态和碰靶速度分别由高速摄影和测速系统检测。

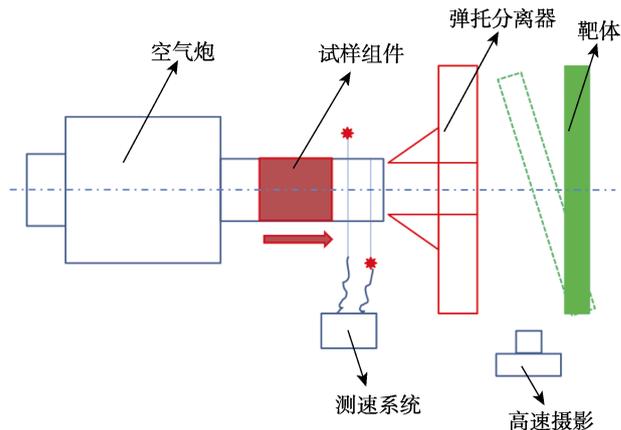


图 1 试验系统分布

2 关键控制技术

2.1 速度控制技术

在利用空气炮开展高速碰撞试验中,如果不考虑各种能量损耗,压缩气压和试样质量决定了试样的碰靶速度,可以将空气炮驱动试样的试验简化为如图 2 所示的分析模型^[11]。在不考虑各种摩擦和损耗时,试样运动可用式(1)所示的牛顿运动方程表示。

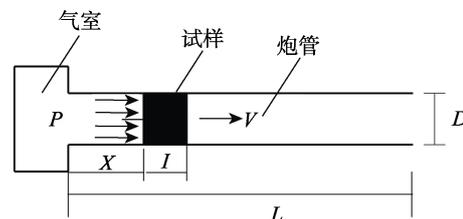


图 2 简化的空气炮模型

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} v = pA \quad (1)$$

式中： p 为气体压力； x 为试样的运动距离； A 为试样横截面积； m 为试样质量。

假设气体推动试样的运动过程,为理想气体的绝热膨胀过程,其描述方程为:

$$pV = \frac{M}{\mu} RT \quad (2)$$

$$p_0 V_0^\gamma = p(V_0 + A \cdot x)^\gamma \quad (3)$$

式中： V_0 、 V 为气体的初始体积和某一时刻的体积； M 、 μ 为气室中的充气质量及其摩尔数； T 为气体的温度； γ 为气体的绝热指数。

实际试验中存在多种能量损耗,如摩擦等,如果不考虑其形式,则可以通过附加质量的方法考虑各种能量损耗,具体方法将试样的质量由 m 增加到 m' ,假设 $m' = \phi m$,此时试样的运动方程式(1)变为:

$$(\phi m) \frac{dv}{dt} = pA \quad (4)$$

式中： ϕ 为虚拟质量系数， $\phi = K + \frac{1}{3} \frac{M}{m}$ ； K 大约在 1.0~1.1 之间，由试验确定； M 由式 (2) 确定，即 $M = \frac{p_0 V_0}{RT} \mu$ ； $R=8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

根据式 (3) 和式 (4)，联合求解获得试样离开炮管的速度，即：

$$v_L^2 = \frac{2p_0 V_0^\gamma}{\phi m(\gamma-1)} \left[1 - \frac{V_0^{\gamma-1}}{(V_0 + A \cdot L)^{\gamma-1}} \right] \quad (5)$$

试样的出口速度与摩擦系数、气体释放速度以及炮管温度等密切相关。因此试验前，应根据试验条件，开展多次正式试验前的模拟试验，以标定虚拟质量系数 ϕ 。进而建立质量、气压与出口速度之间的关系式 (式 (5))，确定正式试验中达到设定速度的气压的关系式。

2.2 加热及测温技术

试样的加热方式可分为分离式加热和一体式加热。分离式加热是在空气炮外将试样加热到试验温度后，切断所有电源，再将加热后的试样装入空气炮中发射。离线加热存在以下几个不足：试样与环境的热交换大大降低了试样碰靶时的温度，增加了试样温度达到试验要求的难度，要确保试样温度达到试验的要求，则要求试样的初始温度远远高于试验温度，这无疑给试样增加温度冲击的考核环节。试验中，需要搬动超高温试样，容易诱发安全事故。由此可见，不宜采用分离式加热方式。一体式加热是在空气炮内部将试样加热到试验温度，然后切断电源，密封空气炮，最后释放高压气体以驱动试样。这是采用了次口径的方法设计了弹托，并在弹托内增加加热装置 (如图 3 所示)。在此方法中，加热装置同时起着保温和加热的作用。由于采用了一体式加热，试样在发射时虽已经停止加热，但是由于加热装置的保温作用，试样温度下降的速度远远低于分离式加热方法。同时，试验系统组装时避免了高温环境，提升了试验的安全性。

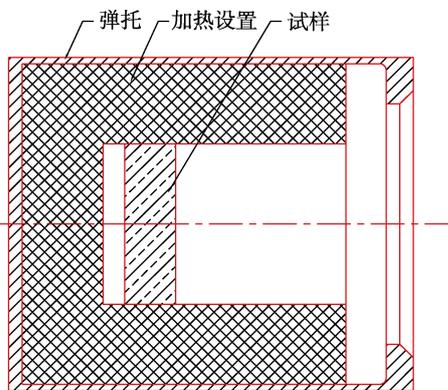


图 3 一体式加热方法

碰靶时试样温度是高温条件下高速碰撞试验中

测量的关键，也是难以测量的。试样在靶室与靶体发生高速碰撞后，弹托和加热装置将产生大量的碎片和粉尘。高速运动的碎片容易破坏安放于靶室内的仪器，因此测温等仪器和传感器不能安放于靶室内。同时大量的粉尘和碎片淹没了试样、防弹玻璃等，阻碍了红外光纤的传播，试样碰撞时的变形速度高于红外测温的响应速度，因此采用光学等非接触方法测试已不现实，必须寻求其他的方法测量试样的碰靶温度。传热学表明，放置于空气中的高温试样，其温度随着时间线性降低，因此可以间接通过降温时间来测试试样的碰靶温度，不过需对试样的温度下降的时间曲线进行标定。标定的具体方法是：首先将试样与加热装置组装好，置放于空气炮中加热，并使其温度高于碰靶要求温度，然后停止加热，监测试样温度的下降过程，确定试样温度降至要求温度的时间 Δt_0 ，最后以此时间 Δt_0 控制试样的发射时间 Δt ，结合 Δt 和温降曲线确定碰靶时的温度。值得说明的是，试样在空气炮中的加速过程仍在加热装置中保温，其温度下降可以忽略。当试样与加热装置分离后自由飞行，由于飞行时间极短，其温度下降也可以忽略。

2.3 姿态控制技术

试验中所用空气炮的内径为 250 mm，远大于试样的最大尺寸，同时为了实现不同的碰撞姿态，必须采用次口径发射技术，即弹托试验技术。这为加热装置的设计提供空间，但是有限的空间也限制了加热装置的设计。在加热装置内部，根据试样碰撞姿态的需求设计了内衬结构。试验时，将试样和加热装置安装于弹托内部，组成试样组件。当试样组件加速到试验速度时，经弹托分离器与其他结构分离的试样按照预定的姿态自由与靶体发生高速碰撞，同时可以结合调整靶体的安装状态，实现多种姿态的撞击试验。碰靶姿态通过高速相机进行监测。

3 试验结果

为分析试样尺寸对试样碰靶温度和姿态的影响，设计了两种尺寸的试样，分别以端部正碰、侧碰和端部角碰与靶体发生碰撞。共开展了 10 发试验，试样轴线与靶体碰撞面法线的夹角即撞击角度分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° ，碰撞速度为 90~95 m/s，碰撞时的温度不低于 1100°C 。对于相同材料的试样，试样的尺寸决定了试样的温度变化情况，当加热到相同温度然后停止加热，试样温度随时间的下降曲线也不相同 (如图 4 所示)。温降曲线表明，小试样从 1200°C 降低到 1100°C 的时间大约需要 3 min，而大试样的时间大于 4 min。因此，只要将停止加热至发射的时间 Δt_0 控制在 3 min 之内，就可以确保试样的碰靶温度不低于 1100°C 。典型碰靶姿态如图 5 所示，碰撞角及速度的测试结果见表 1。

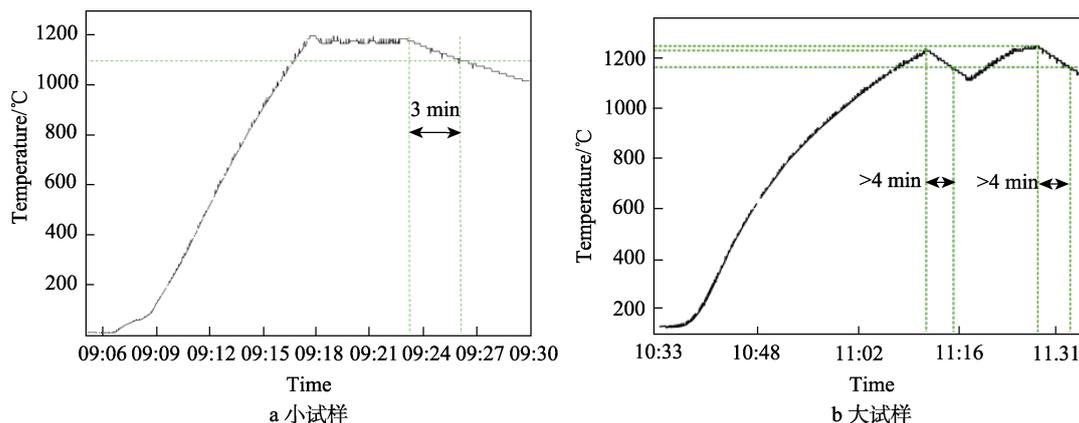


图4 温降曲线

表1 试验结果

试样编号	最高温度/°C	Δt_0	靶时温度/°C	碰撞速度/($m \cdot s^{-1}$)	实际碰撞角度/(°)
01-large	1200	1'24"	1160	93.8	0.0 - 4.8
02-large	1200	1'42"	1150	93.1	180.0 - 2.1
03-large	1200	1'50"	1150	94.8	90.0+10.0
04-large	1200	2'40"	1130	90.2	45.0+0.5
05-large	1200	2'40"	1130	91.8	135.0+2.8
06-small	1200	2'03"	1140	90.0	45.0+0.3
07-small	1200	1'30"	1160	94.5	0.0+0.8
08-small	1200	1'19"	1160	91.9	135.0+9.5
09-small	1200	2'44"	1120	91.6	180.0-1.5
10-small	1200	2'45"	1120	91.1	90.0+7.8

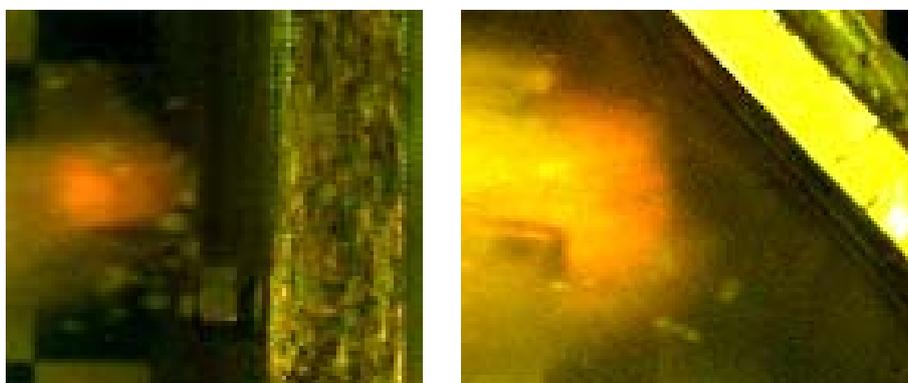


图5 高速摄影记录的典型碰撞姿态

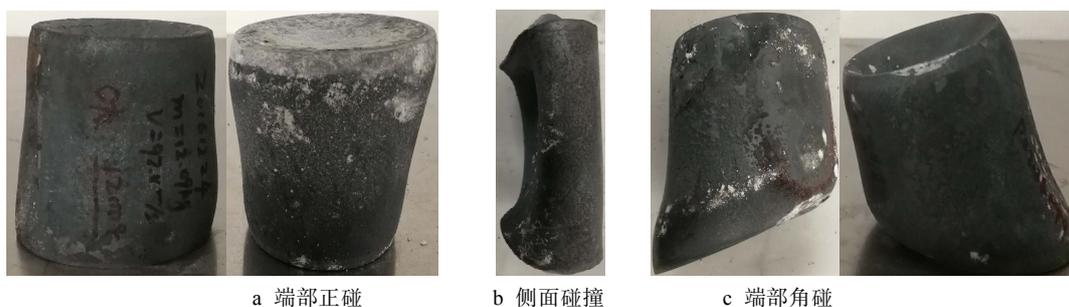


图6 大试样的最终变形

不同尺寸的薄壁圆筒在高温条件下经受高速碰撞后的变形状态分别如图6和图7所示。图3表明，

大尺寸试样正碰时，碰撞端墩粗，尾端收缩，两端发生凹陷变形，且尾端的凹陷大于碰撞端的变形；侧碰



图 7 小试样的最终变形

时, 试样整体呈马鞍状, 碰撞侧呈扁平状; 端部角碰时, 碰撞端的变形呈楔形, 楔形的角度与碰撞角密切相关, 尾部也发生凹陷。小试样的整体刚度和强度远远低于大试样, 在相同的撞击条件下, 图 7 中小试样的变形比大试样的大得多。端部正碰和端部角碰时, 试样整体坍塌失稳, 出现了褶皱, 不过侧碰时的变形与大试样的相似。

4 结语

结合理论和试验, 研究了高温条件下结构高速碰撞时的速度、姿态和温度控制技术及其测量技术, 综合应用次口径发射技术和电炉技术, 建立了高温条件下的高速撞击试验技术。薄壁圆柱筒的高温高速撞击试验验证了该试验技术的有效性, 获得了温度不低于 1100 °C、速度不低于 90 m/s 时, 薄壁圆筒以不同姿态撞击下刚性靶体的动力学响应。整体刚度较大的大尺寸薄壁圆筒与刚性靶正碰时, 碰撞端墩粗, 尾端收缩, 两端发生凹陷变形, 尾端的凹陷大于碰撞端的凹陷变形; 侧碰时, 试样整体变形成马鞍状, 碰撞侧的变形呈扁平状; 端部角碰时, 碰撞端的变形呈楔形, 与碰撞角密切相关, 尾部也发生凹陷。整体刚度偏弱的小尺寸薄壁圆筒碰撞时整体坍塌, 出现了大量的褶皱。

参考文献:

[1] Regulatory Guide 7.6, Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels[S].

- [2] 胡宇鹏, 罗群生, 尹霞, 等. BWBZX-1 保温包装设计验证[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 33-38.
- [3] LINDGREN E R, SORENSON K B, RECHARD R P, et al. Full-Scale Accident Testing in support of Spent Nuclear Fuel Transportation[R]. Albuquerque: Sandia National Labs, 2014.
- [4] 李娜, 刘剑钊, 张思才, 等. 抗事故包装箱碰撞过程靶体等效方法研究[J]. 包装工程 2016, 37(1): 25-28.
- [5] 徐伟芳, 谢若泽, 钟卫洲. 抗事故包装箱的跌落冲击分析技术[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 25-30.
- [6] LO FRANO R, PUGLIESE G, NASTA M. Structural Performance of an IP2 Package in Free Drop Test Conditions: Numerical and Experimental Evaluations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280: 1025-1028.
- [7] ROMANOSKI G R, PIH H. Impact test characterization of carbon-carbon composites for the thermoelectric space power system [C]// 10th International Conference on Composite Materials. Vancouver: [s.n.], 1995: 575-82.
- [8] 马红, 李明海, 文勇. 火烧试验包装箱内部温度无损测试研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 281-284.
- [9] C E F, J W T, D B C, Isotope Fuels Impact Tester, LA-6013[R]. N Mex: Los Alamos Scientific Lab, 1978.
- [10] Environmental Assessment of General-purpose Heat Source Safety Verification Testing[R]. NM: USDOE Albuquerque Operations Office, 1995.
- [11] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.