



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110196199 A

(43)申请公布日 2019. 09. 03

(21)申请号 201910408528.5

(22)申请日 2019.05.16

(71)申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

(72)发明人 李鹏辉 郭伟国 王建军 袁康博

(74)专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 王鲜凯

(51)Int.Cl.

G01N 3/32(2006.01)

G01N 3/18(2006.01)

G01N 3/02(2006.01)

G01N 3/06(2006.01)

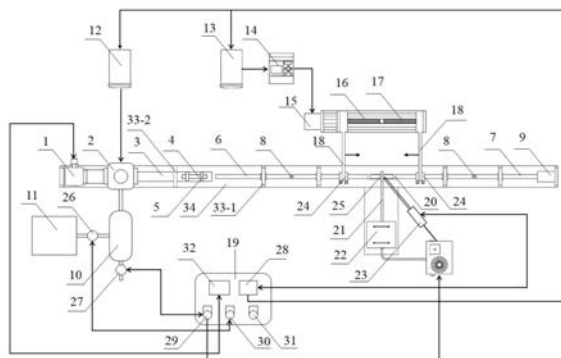
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统及方法

(57)摘要

本发明涉及一种利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统及方法,建立一套使用精确电磁驱动双向同步滑动组装系统和高频电磁感应快速加热方式的高温Hopkinson压杆系统和高温压缩试验方法。本装置在常规Hopkinson压杆上加装一套电磁控制装置、一套电磁驱动双向同步组装装置和两个高精度延时装置,可以精确控制高温动态压缩试验中各个过程的,包括撞击过程、加热过程、加载杆同步组装过程的启动和完成时间,进而可以精确控制整个试验过程的冷热接触时间。控制部件集成化模块设计,提高测试精度,可以精确地直接测试材料在高温下的动态压缩力学性能。



1. 一种利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统,其特征在于包括电磁控制阀(2)、炮管(3)、撞击杆(4)、聚四氟乙烯托弹器(5)、入射杆(6)、透射杆(7)和黏贴的入射杆(6)、透射杆(7)上的应变片(8);阻尼器(9)、发射气室(10)、气源(11)、步进电机(15)、正向螺杆(16)、反向螺杆(17)、驱动臂(18)、滑动套管(20)、感应加热线圈(21)、电磁感应加热机(22)、聚四氟乙烯卡箍(24)、支座(33)和平台(34);沿X主轴方向,电磁控制阀(2)、炮管(3)、入射杆(6)、透射杆(7)和阻尼器(9)通过支座(33)固定于平台(34)上,且各部件的轴心一致;其中,多个支座(33-2)与电磁控制阀(2)、炮管(3)和阻尼器(9)为固定连接,多个支座(33-1)与入射杆(6)和透射杆(7)为滑动连接;电磁控制阀(2)与炮管(3)和发射气室(10)连接,撞击杆(4)外部设有两个聚四氟乙烯托弹器(5),置于炮管(3)内,与炮管(3)形成滑动连接;入射杆(6)与透射杆(7)之间的端口上各设有一滑动套管(20),两个滑动套管(20)之间为试样(25),试样(25)上与高频电磁感应加热机(22)连接的环绕感应加热线圈(21);双向同步驱动组装系统位于入射杆(6)和透射杆(7)的一侧,步进电机(15)连接正向螺杆(16)和反向螺杆(17)同步旋转,两根高强度驱动臂(18)一端的内螺纹,分别与正向螺杆(16)、反向螺杆(17)螺纹配合,另一端分别套在入射杆(6)和透射杆(7)上,通过推动固定在入射杆(6)和透射杆(7)上的聚四氟乙烯卡箍(24),从而推动入射杆(6)和透射杆(7)做同步相对运动和相离运动。

2. 根据权利要求1所述利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统,其特征在于:在电磁控制阀(2)上设有压力传感器(1),输出信号连接数显压力表(32)。

3. 根据权利要求1所述利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统,其特征在于:在试样(25)上捆绑热电偶丝(35),与温度传感器(23)连接,温度传感器(23)输出信号连接温控仪(28)。

4. 根据权利要求1所述利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统,其特征在于:在发射气室(10)上设有减压电磁阀(27)和增压电磁阀(26),分别与减压开关(29)增压开关(30)连接和控制。

5. 根据权利要求1或2或3所述利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统,其特征在于:在电磁控制阀(2)连接高精度发射延时器(12);在步进电机(15)上设有可编程控制器(14),并受同步延时器(13)控制;由温控仪(28)连接控制电磁感应加热机(22),启动感应加热线圈(21)对试样(25)加热,同时连接控制发射延时器(12)和同步延时器(13),选择合适的延迟时间,实施加热、同步推送和启动发射之间的自动配合。

6. 一种利用权利要求1~5所述任一项利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统的方法,其特征在于步骤如下:

步骤1:将试样(25)用热电偶丝(35)捆绑与滑动套管(20)的中心区域,滑动套管(20)两端分别套在入射杆(6)和透射杆(7)上,保证试样(25)距离入射杆(6)的加载端面 and 透射杆(7)的加载端面;调整高频感应加热机(22)和感应加热线圈(21)的位置,使得试样(25)完全处于感应加热线圈(21)的中心位置;

步骤2:根据试验要求的应变率和撞击速度,调节控制台(19)的增压开关和减压开关,使发射气室(10)的内部压力保持在预定发射压力P;设置控制台(19)的温控仪(28)为预定加热温度和保温时间;设定发射延时器(12)的延时时间为 T_1 ,同步延时器(13)的延时时间为 T_2 ;

步骤3: 点击控制台 (19) 的启动开关 (31), 启动高频感应加热机 (22), 对试样 (25) 开始加热, 当试样 (25) 到达预定试验温度, 触发控制台 (19) 的温控仪 (28) 工作, 开始保温过程; 保温时间到达后, 温控仪 (28) 释放触发信号, 同时触发发射延时器 (12) 和同步延时器 (13) 开始延时过程;

发射延时器 (12) 经历延时时间 T_1 后, 触发电磁控制阀 (2) 开启, 发射气室 (10) 内的气室瞬间释放, 推动撞击杆 (4) 在炮管 (3) 内高速运动, 在炮管 (3) 出口处撞击入射杆 (6) 的撞击端, 产生压缩应力波以弹性波速 C_0 沿入射杆 (6) 向加载端传递;

在发射过程进行的同时, 同步延时器 (13) 在到达延时时间 T_2 之后触发可编程控制器 (14) 运行预先设置好的程序, 控制步进电机 (15) 带动正向螺杆 (16) 和反向螺杆 (17) 以预定转速和预定行程转动, 从而带动两根驱动臂 (18) 做同步等速相向运动, 拖动入射杆 (6) 和透射杆 (7) 同时同步向试样 (25) 运动, 夹紧试样; 试样 (25) 被夹紧在入射杆 (6) 和透射杆 (7) 的加载端面中心位置, 整个过程试样 (25) 始终位于感应加热线圈 (21) 的加热区域内, 而入射杆 (6) 和透射杆 (7) 保持在加热区域之外, 通过精确控制 T_1 和 T_2 , 使得在试样 (25) 被夹紧的同时, 压缩应力波刚好传递至试样 (25) 处, 对试样 (25) 进行动态加载;

加载完毕后, 可编程控制器 (14) 继续运行预定程序, 控制步进电机 (15) 反向转动, 驱动两根驱动臂 (18) 拖动入射杆 (6) 和透射杆 (7) 做同步相离运动, 同时触发控制台 (19) 的温控仪 (28) 关闭加热功能, 保证入射杆 (6) 和透射杆 (7) 不被感应加热线圈 (21) 加热, 始终处于室温;

步骤4: 撞击产生的压缩应力波由粘贴在入射杆 (6) 上的应变片 (8) 采集记录为入射波, 压缩应力波传递至试样 (25) 与入射杆 (6) 的接触界面, 部分应力波反射回来被入射杆 (6) 上的应变计 (8) 再次记录下来作为反射波, 部分应力波进入试样 (25) 后进入透射杆 (7), 由透射杆 (7) 上应变计 (8) 记录为透射波; 根据一维应力波理论可以获得材料在高温动态压缩载荷下的应力应变曲线, 数据处理的相关公式如下:

$$\varepsilon_s(t) = \frac{2C}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2C}{L} \varepsilon_R(t)$$

$$\sigma_s(t) = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \varepsilon_T(t)$$

其中 C 为弹性波波速, L 为试样的长度, E 为加载杆的弹性模量, A 为加载杆的横截面积, A_s 为试样的横截面积。

利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统 及方法

技术领域

[0001] 本发明属于基于分离式Hopkinson压杆 (SHPB) 技术,涉及一种利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统及方法,利用双向电磁驱动实现同步组装的量化高温高应变率压缩试验技术。

背景技术

[0002] 分离式Hopkinson压杆 (SHPB) 作为目前测试材料和结构高应变率压缩力学性能的关键试验技术,在动态测试领域应用非常广泛。传统的SHPB设备常用于金属材料、复合材料、岩石混凝土、陶瓷等材料在常温下的动态力学性能测试。然而随着新材料的不断发展,越来越多的材料(尤其以金属材料和陶瓷材料为代表)广泛应用在高温、高应变率加载的极端环境下,对材料的高温动态性能提出了更高的要求。因此,急需发展一种Hopkinson杆在高温环境下的材料动态测试技术,以准确测定材料在高温环境下的动态力学性能。

[0003] 当温度大于大约 $0.2T_m$ (熔点温度)时,金属材料的弹性模量随温度增加几乎直线下降。利用常规分离式Hopkinson压杆进行高温压缩试验时,试样被直接加持在入射杆和透射杆中间。在加热试样的同时,入射杆和透射杆的杆端也被加热,从而引起温度梯度分布。温度梯度的分布将引起弹性模量的梯度分布,严重影响应力波在入射杆和透射杆中的传播。同时,加载杆长期工作在高温环境下将严重影响加载杆的强度和使用寿命。因此,国内外众多学者针对常规Hopkinson压杆进行了高温试验下的改进研究。有学者提出一种组合式隔热陶瓷短杆高温SHPB实验技术,在试件端面和压杆之间各加一直径与压杆相同的长度为100mm的A95陶瓷短杆,通过套管进行装配,套管的内径和压杆相同,可在压杆上自由滑动。试样通过套管内的两个簧片支撑定位,试样上的温度通过直接贴在试样表面的热电偶进行测定。该技术可以避免金属加载杆上的温度梯度,但是引入陶瓷杆造成波阻抗不匹配,影响应力波的传播。文献1:郭伟国,高温分离式Hopkinson压杆技术及其应用[J].实验力学,2006,21(4):447-453.提出了一种带有气压驱动同步组装机构的高温Hopkinson压杆试验方法,如图4所示。该装置包括炮管3、撞击杆4、聚四氟乙烯托弹器5、入射杆6、透射杆7、应变片8、阻尼器9、发射气室10、铝合金滑动支座33-1、铝合金固定支座33-2、铝合金平台34、热电偶丝35、辐射加热炉36、套管37、气动活塞杆38。利用热电偶丝35将试样固定于套管37上,置入辐射加热炉36内对试样进行局部加热,试样达到预定温度时,开启气炮,发射气室10的压力一方面推动撞击杆4运动去撞击入射杆6,另一方面通过同步组装系统推动透射杆7向试样方向运动。通过调整驱动气动活塞杆38的气压,可使加载应力波到达试样的同时,入射杆6、透射杆7和试样刚好紧密接触。该装置中,当试样温度约为 900°C 时,处在高温炉内的少许杆端温度常在 300°C 以下。文献2:Zhang C,Suo T,Tan W,et al.An experimental method for determination of dynamic mechanical behavior of materials at high temperatures[J].International Journal of Impact Engineering,2017,102:27-35.提出一种改进的气动驱动入射杆和透射杆同步运动的高温

压缩试验方法,包括撞击杆4、入射杆6、透射杆7、发射气室10、气源11、试样25、气动活塞杆38、气阀39、MoSi₂高温炉40、闪光灯41、高速摄影机42、发射气阀43、气路控制器44。该装置利用两个活塞组成同步系统,发射气阀43同时控制发射气室和同步气室,用于同步组装和发射撞击杆。采用加热源为MoSi₂的超高温炉对试样加热,加热炉设有观察窗口和保护气通气孔,可通过通气孔将保护气通入高温炉中形成惰性气体环境,可通过观察窗口记录试样的超高温动态测试过程。

[0004] 针对目前利用Hopkinson压杆进行高温动态压缩试验的方法的研究现状,还存在几个关键性的技术难点:一)采用在线加热的方法,包括快速加热方法、隔热加热方法等,由于加热过程试样与加载杆持续接触,无法很好地避免加载杆中和试样中的温度梯度分布,隔热杆的应用也引入了波阻抗不匹配的影响,同时此类方法难以实现超高温下的动态加载;二)采用离线加热,气动驱动组装的方法,可以将试样加热到很高的温度,避免加载杆被同时加热,提高了测试的精度。但是目前此类气动同步驱动的方法,存在着几点不足:1)当进行高应变率试验时,要想缩短冷热接触时间,必须通过大幅增大同步驱动活塞的气压来加快推动加载杆的运动速度以顺利完成组装,这将会对试样造成一个提前冲击加载,导致试样发生提前的塑性变形甚至产生损伤破坏,从而影响测试的准确性或导致试验失败;2)气动驱动的方式试验稳定性较差,其动作时间是由连接气缸的气管长度控制的。利用气体在不同长度的气管中的传递时间难以精确控制发射系统和同步组装系统的激发时间,造成冷接触时间无法精确控制,容易引起试验结果可重复性较差;3)气动驱动入射杆和透射杆同时运动的方法对两组气动驱动机构的同步性要求非常高,必须要保持入射杆和透射杆的运动开始时间、整个运动过程的时间相同,才能保证加载杆与试样的组装过程顺利完成,增大了试验测试的难度和可重复性;4)该类型装置操作较为复杂,集成化和仪器化程度较低,无法量化控制,不利用技术的推广和广泛应用。

[0005] 目前发展起来的气动同步组装方式存在着难以精确控制组装过程和冷接触时间的问题,操作方式难以量化和标准化,设备仪器化程度较低。同时必须通过增大同步驱动的气压来加快推动加载杆的运动速度以缩短冷热接触时间,将会对试样造成提前冲击加载,导致试样发生提前的塑性变形甚至产生损伤破坏。因此,需要对高温Hopkinson压杆试验技术中的加热和组装问题进行重新设计,发展一套精确控制、标准化操作的高温加热和组装装置,从而保证组装过程时间以及冷接触时间的量化控制。

发明内容

[0006] 要解决的技术问题

[0007] 为了避免现有技术的不足之处,本发明提出一种利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统及方法,解决分离式Hopkinson压杆在进行高温动态压缩试验时,必须避免加载杆与试样发生热交换导致温度梯度场的产生的问题。

[0008] 技术方案

[0009] 一种利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统,其特征在于包括电磁控制阀2、炮管3、撞击杆4、聚四氟乙烯托弹器5、入射杆6、透射杆7和黏贴的入射杆6、透射杆7上的应变片8;阻尼器9、发射气室10、气源11、步进电机15、正向螺杆16、反向螺杆17、驱动臂18、滑动套管20、感应加热线圈21、电磁感应加热机22、聚四氟乙烯卡箍24、支座

33和平台34;沿X主轴方向,电磁控制阀2、炮管3、入射杆6、透射杆7和阻尼器9通过支座(33)固定于平台(34)上,且各部件的轴心一致;其中,多个支座(33-2)与电磁控制阀2、炮管3和阻尼器9为固定连接,多个支座(33-1)与入射杆(6)和透射杆(7)为滑动连接;电磁控制阀2与炮管3和发射气室10连接,撞击杆4外部设有两个聚四氟乙烯托弹器5,置于炮管3内,与炮管3形成滑动连接;入射杆6与透射杆7之间的端口上各设有一滑动套管20,两个滑动套管20之间为试样25,试样25上与高频电磁感应加热机22连接的环绕感应加热线圈21;双向同步驱动组装系统位于入射杆6和透射杆7的一侧,步进电机15连接正向螺杆16和反向螺杆17同步旋转,两根高强度驱动臂18一端的内螺纹,分别与正向螺杆16、反向螺杆17螺纹配合,另一端分别套在入射杆6和透射杆7上,通过推动固定在入射杆6和透射杆7上的聚四氟乙烯卡箍24,从而推动入射杆6和透射杆7做同步相对运动和相离运动。

[0010] 在电磁控制阀2上设有压力传感器1,输出信号连接数显压力表32。

[0011] 在试样25上捆绑热电偶丝35,与温度传感器23连接,温度传感器23输出信号连接温控仪28。

[0012] 在发射气室10上设有减压电磁阀27和增压电磁阀26,分别与减压开关29增压开关30连接和控制。

[0013] 在电磁控制阀2连接高精度发射延时器12;在步进电机15上设有可编程控制器14,并受同步延时器13控制;由温控仪(28)连接控制电磁感应加热机(22),启动感应加热线圈(21)对试样(25)加热,同时连接控制发射延时器12和同步延时器13,选择合适的延迟时间,实施加热、同步推送和启动发射之间的自动配合。

[0014] 一种利用权利要求1~5所述任一项利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统的方法,其特征在于步骤如下:

[0015] 步骤1:将试样25用热电偶丝35捆绑与滑动套管20的中心区域,滑动套管20两端分别套在入射杆6和透射杆7上,保证试样25距离入射杆6的加载端面和透射杆7的加载端面均为20mm;调整高频感应加热机22和感应加热线圈21的位置,使得试样25完全处于感应加热线圈21的中心位置;

[0016] 步骤2:根据试验要求的应变率和撞击速度,调节控制台19的增压开关和减压开关,使发射气室10的内部压力保持在预定发射压力P;设置控制台19的温控仪28为预定加热温度和保温时间;设定发射延时器12的延时时间为 T_1 ,同步延时器13的延时时间为 T_2 ;

[0017] 步骤3:点击控制台19的启动开关31,启动高频感应加热机22,对试样25开始加热,当试样25到达预定试验温度,触发控制台19的温控仪28工作,开始保温过程;保温时间到达后,温控仪28释放触发信号,同时触发发射延时器12和同步延时器13开始延时过程;

[0018] 发射延时器12经历延时时间 T_1 后,触发电磁控制阀2开启,发射气室10内的气室瞬间释放,推动撞击杆4在炮管3内高速运动,在炮管3出口处撞击入射杆6的撞击端,产生压缩应力波以弹性波速 C_0 沿入射杆6向加载端传递;

[0019] 在发射过程进行的同时,同步延时器13在到达延时时间 T_2 之后触发可编程控制器14运行预先设置好的程序,控制步进电机15带动正向螺杆16和反向螺杆17以预定转速和预定行程转动,从而带动两根驱动臂18做同步等速相向运动,拖动入射杆6和透射杆7同时同步向试样25运动,夹紧试样;试样25被夹紧在入射杆6和透射杆7的加载端面中心位置,整个过程试样25始终位于感应加热线圈21的加热区域内,而入射杆6和透射杆7保持在加热区域

之外,通过精确控制 T_1 和 T_2 ,使得在试样25被夹紧的同时,压缩应力波刚好传递至试样25处,对试样25进行动态加载;

[0020] 加载完毕后,可编程控制器14继续运行预定程序,控制步进电机15反向转动,驱动两根驱动臂18拖入入射杆6和透射杆7做同步相离运动,同时触发控制台19的温控仪28关闭加热功能,保证入射杆6和透射杆7不被感应加热线圈21加热,始终处于室温;

[0021] 步骤4:撞击产生的压缩应力波由粘贴在入射杆6上的应变片8采集记录为入射波,压缩应力波传递至试样25与入射杆6的接触界面,部分应力波反射回来被入射杆6上的应变计8再次记录下来作为反射波,部分应力波进入试样25后进入透射杆7,由透射杆7上应变计8记录为透射波;根据一维应力波理论可以获得材料在高温动态压缩载荷下的应力应变曲线,数据处理的相关公式如下:

$$[0022] \quad \varepsilon_s(t) = \frac{2C}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt$$

$$[0023] \quad \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2C}{L} \varepsilon_R(t)$$

$$[0024] \quad \sigma_s(t) = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \varepsilon_T(t)$$

[0025] 其中C为弹性波波速,L为试样的长度,E为加载杆的弹性模量,A为加载杆的横截面积, A_s 为试样的横截面积。

[0026] 有益效果

[0027] 本发明提出的一种利用双向电磁驱动同步组装的高温Hopkinson压杆试验系统及方法,建立一套使用精确电磁驱动双向同步滑动组装系统和高频电磁感应快速加热方式的高温Hopkinson压杆系统和高温压缩试验方法。本装置在常规Hopkinson压杆上加装一套电磁控制装置、一套电磁驱动双向同步组装装置和两个高精度延时装置,可以精确控制高温动态压缩试验中各个过程的,包括撞击过程、加热过程、加载杆同步组装过程的启动和完成时间,进而可以精确控制整个试验过程的冷热接触时间。控制部件集成化模块设计,提高测试精度,可以精确地直接测试材料在高温下的动态压缩力学性能。

[0028] 本发明的有益效果是:1) 使用加热范围可精确控制的高频感应加热系统,可实现对金属试样高达600℃/min速率的快速加热。通过控制感应加热线圈21的宽度可严格控制加热范围,不会对试样之外的其他装置尤其是加载杆加热。加热过程中试样与加载杆分离,高频感应加热系统可仅对试样本身加热而无热辐射传递至加载杆,保证加载杆始终保持在室温状态;2) 本发明采用一套电磁驱动双向同步滑动组装系统,通过可编程控制器14可以精确控制螺纹杆的转速和转向,从而可以控制驱动臂18的运动速度、运动形成和运动方向,在组装过程中控制两个驱动臂18做等速同步相向运动,加载结束后控制两个驱动臂18做等速同步相离运动,实现自动化控制;3) 本发明采用高精度延时器和可精确调速的双向电磁驱动同步组装机构,可以精确控制Hopkinson压杆高温动态压缩试验中撞击杆的发射时间、电磁驱动双向同步滑动组装系统的启动时间和组装时间,可以精确调节入射杆和透射杆相向运动的速度和时间,从而可以精确控制高温压缩试验中冷热接触时间,不需要通过提高入射杆和透射杆的运动速度来缩短冷热接触时间,对试样无任何提前加载;4) 本发明采用集成化、模块化设计,自动控制程度高,实现量化、标准化、高可重复性的试验操作,有利

于技术的推广和应用。

附图说明

[0029] 图1是本发明提出的利用双向电磁驱动实现同步组装的定量化高温Hopkinson压杆试验技术的示意图。

[0030] 图2是本发明中的电磁驱动双向同步滑动组装装置的示意图。

[0031] 图3是本发明中试样固定方式的示意图。

[0032] 图4是文献1提出的一种带有气压驱动同步组装机构的高温Hopkinson压杆试验方法。

[0033] 图5是文献2提出的一种改进的气动驱动入射杆和透射杆同步运动的高温压缩试验方法。

[0034] 图中,1-压力传感器、2-电磁控制阀、3-炮管、4-撞击杆、5-聚四氟乙烯托弹器、6-入射杆、7-透射杆、8-应变片、9-阻尼器、10-发射气室、11-气源、12-发射延时器、13-同步延时器、14-可编程控制器、15-步进电机、16-正向螺杆、17-反向螺杆、18-驱动臂、19-控制台、20-滑动套管、21-感应加热线圈、22-高频电磁感应加热机、23-温度传感器、24-聚四氟乙烯卡箍、25-试样、26-增压电磁阀、27-减压电磁阀、28-温控仪、29-减压开关、30-增压开关、31-启动开关、32-数显压力表、33-1-铝合金滑动支座、33-2-铝合金固定支座、34-铝合金平台、35-热电偶丝、36-辐射加热炉、37-套管、38-气动活塞杆、39-气阀、40-MoSi₂高温炉、41-闪光灯、42-高速摄影机、43-发射气阀、44-气路控制器。

具体实施方式

[0035] 现结合实施例、附图对本发明作进一步描述:

[0036] 本发明采用的具体结构如图1所示,沿装置轴向为常规Hopkinson压杆,入射杆6(与其他图中的编号重复)和透射杆7通过铝合金支座安装在铝合金平台34上作为加载杆,可调节杆件的同轴度和对中度。入射杆6和透射杆7上粘贴应变计8用来测试应变信号。撞击杆4外部装有两个聚四氟乙烯托弹器5,后放置于炮管3内,可以在炮管3内部自由滑动。炮管3的一端安装有电磁控制阀2,电磁控制阀2上安装一个压力传感器1,并连通发射气室10,作为发射装置。电磁控制阀2连接高精度发射延时器12,由发射延时器12可精确控制电磁控制阀2的启动时间,即撞击杆4的发射时间。滑动套管20套在入射杆6和透射杆7的端部,滑动套管20中间位置沿径向开有圆孔,利用热电偶丝35捆绑试样,固定在滑动套管20上,可以沿加载杆轴向自由滑动。在入射杆6和透射杆7侧方,安装有精确电动控制的双向同步驱动组装系统,包括同步延时器13、可编程控制器14、步进电机15、正向螺杆16、反向螺杆17、驱动臂18、聚四氟乙烯卡箍24。利用步进电机15的高速转动带动正向螺杆16、反向螺杆17同步旋转,两根高强度驱动臂18一端加工有内螺纹,分别与正向螺杆16、反向螺杆17螺纹配合,可沿螺杆轴向做高度同步的相向运动和相离运动。另一端开有通孔,分别套在入射杆6和透射杆7上,通过推动固定在入射杆6和透射杆7上的聚四氟乙烯卡箍24,从而推动入射杆6和透射杆7做同步相对运动和相离运动。加热时,入射杆6和透射杆7中间留有一定间距,远离加热区域。试样25通过滑动套管20固定,悬空在入射杆6和透射杆7中间。高温加热系统使用快速加热技术,包括感应加热线圈21、高频电磁感应加热机22、温度传感器23,可以将试样25

快速加热至很高的温度,可达1600℃以上。本系统将温控仪28、减压开关29、增压开关30、启动开关31、数显压力表32集成设计为系统控制模块,即控制台19,通过线缆与外部机构连接,实现远程设置和自动操控。

[0037] 具体实施例:装置包括压力传感器1、电磁控制阀2、炮管3、撞击杆4、聚四氟乙烯托弹器5、入射杆6、透射杆7、应变片8、阻尼器9、发射气室10、气源11、发射延时器12、同步延时器13、可编程控制器14、步进电机15、正向螺杆16、反向螺杆17、驱动臂18、控制台19、滑动套管20、感应加热线圈21、高频电磁感应加热机22、温度传感器23、聚四氟乙烯卡箍24、试样25、增压电磁阀26、减压电磁阀27、温控仪28、减压开关29、增压开关30、启动开关31、数显压力表32、铝合金滑动支座33-1、铝合金固定支座33-2、铝合金平台34、热电偶丝35。

[0038] 本发明中的装置主要包括4个部分,分别为传统Hopkinson压杆装置、高频电磁感应加热装置、电磁驱动双向同步滑动组装装置以及高精度延时控制系统。传统Hopkinson压杆装置主要包括压力传感器1、炮管3、撞击杆4、聚四氟乙烯托弹器5、入射杆6、透射杆7、应变片8、阻尼器9、发射气室10。弹性加载杆包括入射杆6和透射杆7,均采用直径为19mm、长度1200mm的圆形杆,材料为18Ni马氏体不锈钢。入射杆6和透射杆7通过铝合金滑动支座33-1安装在铝合金平台34上,炮管3和阻尼器9通过铝合金固定支座33-2固定在铝合金平台34,均可以调节高度和对中度。在入射杆6、透射杆7距离试样25连接端600mm的位置分别粘贴阻值为120欧姆的应变片8,采用惠斯通电桥半桥接法与超动态应变仪和高精度数据采集器连接作为数据采集系统。撞击杆4采用直径19mm、系列长度100mm-400mm的18Ni马氏体不锈钢圆形杆,外侧套有两个外径35mm、内径19mm的聚四氟乙烯托弹器5,并一同放入内径为35mm的炮管3内,可以沿炮管3自由滑动。阻尼器9固定在透射杆7的尾端后部,内部填充橡皮泥等缓冲材料,用于吸收透射杆7撞击后的能量。高频电磁感应加热系统包括滑动套管20、感应加热线圈21、高频电磁感应加热机22、温度传感器23、热电偶丝35。本发明采用离线加热方式,即加热过程仅对试样25进行加热,入射杆6和透射杆7均远离试样25。滑动套管20采用耐热非金属材料,长度为100mm,在沿长度中间位置的管壁上,沿径向开一对直径2mm通孔,方便使用热电偶丝35捆绑试样25,固定在滑动套管20的中心位置。滑动套管20两端分别套在入射杆6和透射杆7上,试样悬空于入射杆6和透射杆7中间,距入射杆6和透射杆7的加载端面的距离均为20mm。高频电磁感应加热系统的工作原理是在感应加热线圈21内输入低压高频大电流从而产生高频磁场,金属材料在高频磁场的作用下产生感应电流(涡流损耗)以及导体内磁场的作用磁滞损耗引起导体自身快速发热。高频电磁感应加热机22输入功率为30KW,振荡频率30-100KHz,与控制台19内的温控仪28连接可实现加热温度设定和自动温度控制的功能。感应加热线圈21为铜材线圈,线圈内径为30mm,加热区域的宽度可以通过调整感应加热线圈21的宽度来控制,可以保证仅试样25处于加热区域的高频磁场内,而入射杆和透射杆处于加热区域之外,不会被加热。试样25的温度由热电偶丝35测得,由温控仪28自动调节高频感应加热机22的加热功率,使试样25可以被快速加热并保温在指定温度。本发明在常规Hopkinson压杆侧面,加装了一套电磁驱动双向同步滑动组装装置,由可编程控制器14、步进电机15、正向螺杆16、反向螺杆17、驱动臂18、滑动套管20、聚四氟乙烯卡箍24组成。可编程控制器14可以编制程序,控制步进电机15的转速、转向和转动时间。步进电机15的转动带动正向螺杆16和反向螺杆17同时转动。正向螺杆16和反向螺杆17的直径为16mm,导程5mm,仅螺纹旋向相反,一端对接在一起成为一根丝杆。正向螺杆16上安装一个驱动滑

臂18,反向螺杆17上安装一个相同的驱动臂18,正向螺杆16和反向螺杆17的整体正转和反转,将带动两个驱动臂18做沿螺杆轴向的直线相向运动和相离运动,两个驱动臂18的运动可保持高度同步性。两个驱动臂18一端加工有内螺纹分别与正向螺杆16和反向螺杆17配合,另外一端加工有直径为22mm的通孔,分别套在入射杆6和透射杆7上。聚四氟乙烯卡箍24为内径19mm,外径30mm的半开型圆环卡箍,开口处加工带螺纹孔的凸台,利用预紧螺丝可以调节卡箍的松紧程度。2个聚四氟乙烯卡箍24套在入射杆6上,放置位置为驱动臂18两侧各放置一个,同样在透射杆7上的驱动臂18两侧也各安装一个聚四氟乙烯卡箍24。4个聚四氟乙烯卡箍24均通过调整预紧螺丝来调节卡箍与加载杆之间的摩擦力,使得摩擦力处于适当的大小,使得两根驱动臂18能够通过卡箍拖动入射杆6和透射杆7运动,同时保证在加载过程中载荷较大时,入射杆6和透射杆7能克服摩擦力滑动,不影响应力波的传播。试样25加热至指定温度后,步进电机15带动正向螺杆16和反向螺杆17同时转动,使得驱动臂18驱动入射杆6和透射杆7做同步匀速相向运动,使得入射杆6和透射杆7与加热后的试样25接触并夹紧试样,完成同步组装过程。本装置将温控仪28、减压开关29、增压开关30、启动开关31、数显压力表32集成在统一的控制台19里。气源11与发射气室10的进气口之间连接一个增压电磁阀26,并与增压开关30连接,可以控制发射气室10的进气。发射气室10的出气口连接一个减压电磁阀27,与减压开关31连接,可以控制发射气室10的排气,降低发射气室10的压力,使其气压稳定在所需数值。启动开关31与高频电磁感应加热机22通过线缆连接。本装置在炮管3后端连接一个通径为50mm的电磁控制阀2,电磁控制阀2与发射气室10连通。高精度的发射延时器12与电磁控制阀2通过线缆连接,可以精确控制电磁控制阀2的开启和闭合时间,即控制撞击杆4发射的时间,控制精度为1ms。控制台19同时连接发射延时器12和同步延时器13。当试样25在被加热至指定温度后,控制台19中的温控仪28可控制高频电磁感应加热机22调节加热功率,自动进行保温,保温时间到达后可发出触发信号,同时触发发射延时器12和同步延时器13工作。同步延时器13的延时时间到达后触发可编程控制器14以及步进电机15工作,拖动入射杆6和透射杆7做同步匀速相向运动,夹紧试样25完成同步组装过程。此时,发射延时器12已经开始工作,触发电磁控制阀2开启,释放发射气室10内预定气压的气体,推动撞击杆4撞击入射杆6的撞击端,产生一压缩应力波,并沿入射杆6向入射杆6的加载端传播,使得在同步组装过程完成的同时,压缩应力波传递至入射杆6的加载端,对夹紧在入射杆6和透射杆7中间的试样25进行加载。设定发射延时器12的延时触发时间为 T_1 ,同步延时器13的延时触发时间为 T_2 ,电磁控制阀2开启到压缩应力波传递至试样25的时间间隔为 T_3 ,可编程控制器14工作到入射杆6和透射杆7相对运动夹紧试样25的时间间隔为 T_4 ,则该装置拉伸试验过程需满足: $T_1+T_3 \geq T_2+T_4$ 。高温试样25与常温加载杆接触的时间称为冷接触时间(CCT),则 $CCT = T_1+T_3 - (T_2+T_4)$ 。通过合理设置 T_1 和 T_2 ,可以精确量化控制冷接触时间,控制精度可以达到1ms,从而避免温度梯度对测试结果的影响,提高高温动态压缩测试的精度。

[0039] 具体测试步骤:

[0040] 步骤1:

[0041] 准备工作。将试样25用热电偶丝35捆绑与滑动套管20的中心区域,滑动套管20两端分别套在入射杆6和透射杆7上,保证试样25距离入射杆6的加载端面和透射杆7的加载端面均为20mm。调整高频感应加热机22和感应加热线圈21的位置,使得试样25完全处于感应

加热线圈21的中心位置。

[0042] 步骤2:

[0043] 试验参数设定。根据试验要求的应变率和撞击速度,调节控制台19的增压开关和减压开关,使发射气室10的内部压力保持在预定发射压力P;设置控制台19的温控仪28为预定加热温度,设置保温时间为5min;设定发射延时器12的延时时间为 T_1 ,同步延时器13的延时时间为 T_2 。

[0044] 步骤3:

[0045] 开始试验。点击控制台19的启动开关31,启动高频感应加热机22,对试样25开始加热,试样25温度由捆绑试样的热电偶丝35连接的温度传感器23测试得到。直至试样25到达预定试验温度,触发控制台19的温控仪28工作,开始保温过程,保温时间为5min。保温时间到达后,温控仪28释放触发信号,同时触发发射延时器12和同步延时器13开始延时过程。发射延时器12和同步延时器13预先设定的延时时间分别为 T_1 和 T_2 。发射延时器12经历延时时间 T_1 后,触发电磁控制阀2开启,发射气室10内的气室瞬间释放,推动撞击杆4在炮管3内高速运动,在炮管3出口处撞击入射杆6的撞击端,产生压缩应力波。压缩应力波以弹性波速 C_0 沿入射杆6向加载端传递。在发射过程进行的同时,同步延时器13在到达延时时间 T_2 之后触发可编程控制器14运行预先设置好的程序,控制步进电机15带动正向螺杆16和反向螺杆17以预定转速和预定行程转动,从而带动两根驱动臂18做同步等速相向运动,拖动入射杆6和透射杆7同时同步向试样25运动,夹紧试样。试样25被夹紧在入射杆6和透射杆7的加载端面中心位置,整个过程试样25始终位于感应加热线圈21的加热区域内,而入射杆6和透射杆7保持在加热区域之外。此时,通过精确控制 T_1 和 T_2 ,使得在试样25被夹紧的同时,压缩应力波刚好传递至试样25处,对试样25进行动态加载。加载完毕后,可编程控制器14继续运行预定程序,控制步进电机15反向转动,驱动两根驱动臂18拖动入射杆6和透射杆7做同步相离运动,同时触发控制台19的温控仪28关闭加热功能,保证入射杆6和透射杆7不被感应加热线圈21加热,始终处于室温。由于撞击杆4在相同发射气压下在炮管3内的运动时间几乎保持相同,压缩应力波在入射杆6中的传递时间为定值,电磁控制阀2以及可编程控制器14、步进电机15触发和工作时间也保持为定值,因此本发明实现了分离式Hopkinson压杆高温动态压缩试验中的各个历程时间的精确量化控制,通过合理调整发射延时器12的延时时间 T_1 和同步延时器13的延时时间 T_2 ,可以实现发射过程和同步组装过程的协调配合,可以精确控制整个试验过程中高温试样25与常温加载杆的冷热接触时间,成功将该冷热接触时间控制在5ms以下,从而大幅提高了测试准确性。

[0046] 步骤4:

[0047] 数据采集和处理。撞击产生的压缩应力波由粘贴在入射杆6上的应变片8采集记录为入射波,压缩应力波传递至试样25与入射杆6的接触界面,部分应力波反射回来被入射杆6上的应变计8再次记录下来作为反射波,部分应力波进入试样25后进入透射杆7,由透射杆7上应变计8记录为透射波。该系统满足一维应力波基本假定以及应力/应变均匀化假定,根据一维应力波理论可以获得材料在高温动态压缩载荷下的应力应变曲线,数据处理的相关公式如下:

$$[0048] \quad \varepsilon_s(t) = \frac{2C}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (1)$$

$$[0049] \quad \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2C}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

$$[0050] \quad \sigma_s(t) = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \varepsilon_T(t) \quad (3)$$

[0051] 其中C为弹性波波速,L为试样的长度,E为加载杆的弹性模量,A为加载杆的横截面积,A_s为试样的横截面积。

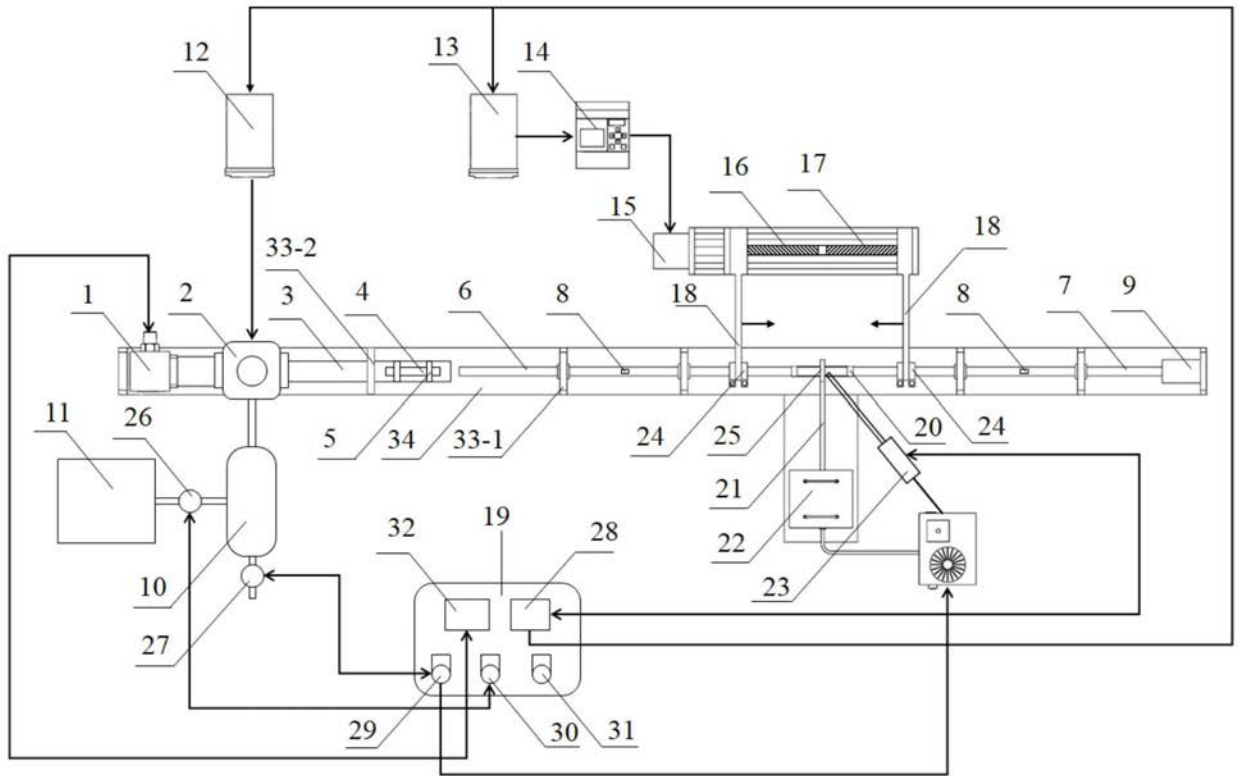


图1

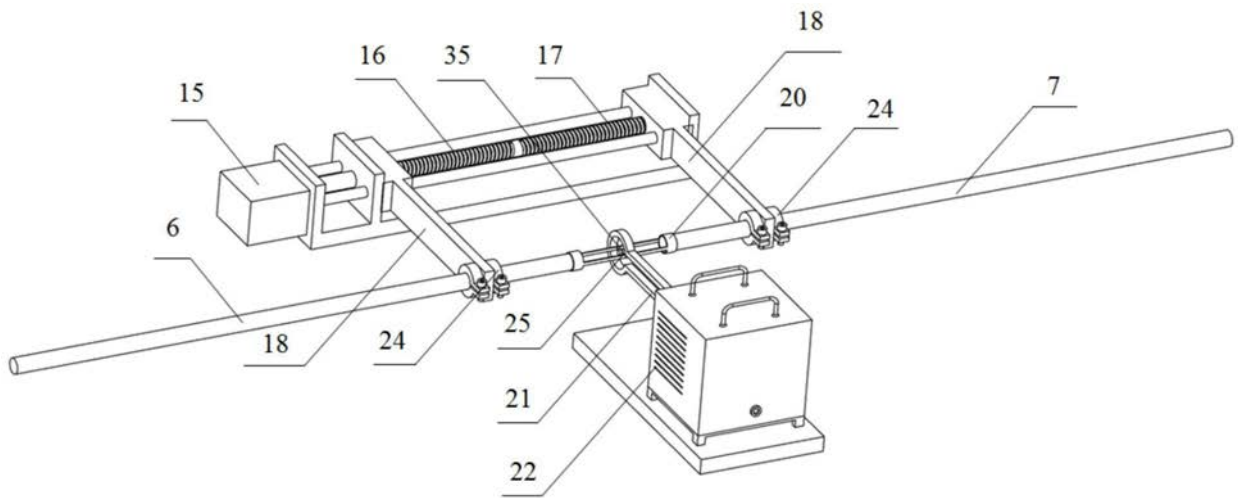


图2

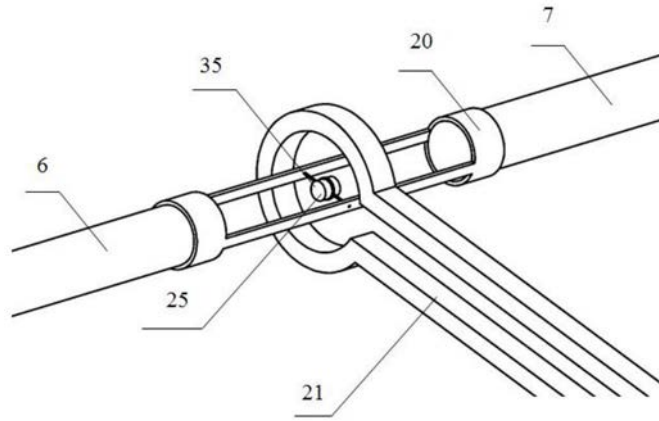


图3

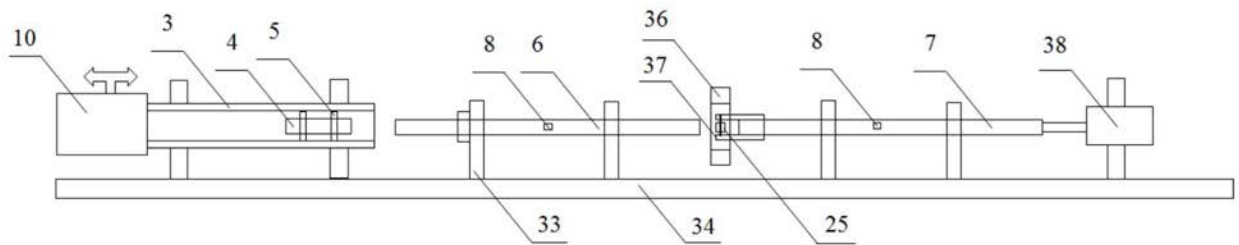


图4

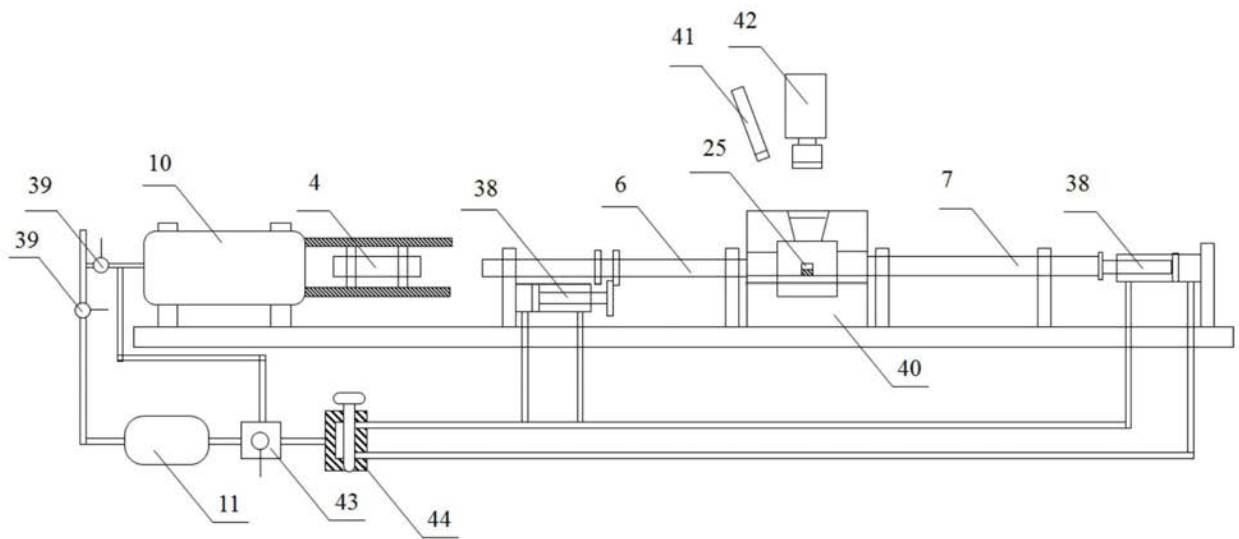


图5