

文章编号: 1001-4888(2023)01-0057-11

隔热涂层应用于高温 SHPB 实验的可行性分析^{*}

李艳萍¹, 袁康博², 谭学明¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 陕西西安 710072; 2. 华南理工大学 工程力学系, 广东广州 510641)

摘要: 在分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)高温实验中,对弹性杆端和试样的温度进行控制,避免弹性杆端的过大温升和试样温度的过度下降,是保证实验结果准确性的关键。基于傅里叶导热定律,本文提出在试样与弹性杆间插入特定结构的隔热涂层来降低弹性杆与试样、高温炉之间的热交换效率,从而将弹性杆端和试样的温度控制在允许范围内。从理论分析着手,设计了一种可用于高温 SHPB 实验的隔热涂层,并通过数值模拟和实验对该方法进行了验证。结果表明:此隔热涂层在高温下强度大幅退化,在 400℃ 以上时,可将其近似看作试样与弹性杆间的一段空隙,忽略其对试样加载的影响。在 600℃ 实验环境下,弹性杆端温度最高达到 167℃,试样平均温度下降 2.24%。在 400℃ 和 600℃ 下分别采用本文实验方法和高温同步快速组装法对 45 钢进行加载,所得结果具有良好的一致性,表明本文方法合理可行。

关键词: SHPB; 高温; 高应变率; 隔热涂层; 可行性

中图分类号: O344.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-045

0 引言

分离式霍布金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)技术被广泛用于各种材料的动态力学性能测试^[1],为了满足各领域研究发展的需要,SHPB 技术被多次改进并应用于获得材料在高温环境下的动态力学响应。温度的引入给 SHPB 实验带来了不可避免的问题:由于材料的杨氏模量 E 及密度 ρ_0 与温度相关,加热试样引起的弹性杆纵向温度不均会造成弹性波速 C_0 ($C_0 = \sqrt{E/\rho_0}$) 或波阻抗 $\rho_0 C_0$ 的改变,扰乱应力波在杆中的传播,从而影响到实验结果的准确性。目前,对高温 SHPB 实验中温度梯度的处理方法可分为 3 种:

(1) 在不超过弹性杆阻抗发生变化的温度以下进行的实验,直接忽略温度梯度的影响。Klepaczko 等^[2]在研究杨氏模量随温度的变化规律时指出,当实验温度小于材料熔点的 20% 时,杨氏模量基本维持常量。例如采用某种马氏体时效钢或镍铬合金作为弹性杆,可以在高达 600℃ 的温度下维持稳定的波阻抗^[3]。目前,学者们普遍认同在实验温度低于弹性杆熔点温度的 20% 时可不需考虑温度梯度^[4]。

(2) 先按常温实验进行操作,再分析温度梯度对实验结果的影响并进行修正。Chiddister 等^[5]通过研究温度梯度存在时应力波的反射和透射规律,将弹性杆中的温度分布简化并推导出了修正值。Lindholm 等^[6]认为温度梯度可能导致波速和振幅的持续变化,他们建立了分析公式以校正应变片所采集的脉冲信号,并得到了高温下的应力-应变曲线。Campbell^[7]、夏开文^[8]、佟景伟^[9]等在其研究中也采用了类似的处理方法。

(3) 采用特殊实验技术降低弹性杆端温度梯度的影响。温度梯度的形成受热流密度、导热面积、时

^{*} 收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072287, 11872051); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZYGXZR057)

通信作者: 袁康博(1992—),女,博士后,助理研究员。主要研究领域:冲击动力学。Email: kangboyuan0528@scut.edu.cn

间、介质的导热系数等因素影响,因此要控制高温 SHPB 实验中的温度梯度,方法之一是对试样进行精准加热,如 Gilat 等^[10]采用了微型圆形燃烧器以及样品与棒之间的特殊连接装置来实现样品的快速加热,将高温热场集中到试样周围,通过降低弹性杆上的热量输入来达到控制温度梯度的目的。另一方法是 Eleiche 等^[11]所采用的变截面法,他们通过改变弹性扭杆的截面积使其波阻抗在不同温度下依然保持恒定,这种方法的局限性较大,对于不同的实验工况,须重新加工弹性杆以保证波阻抗在各截面上相同。

高温同步快速组装法(Rapid Assembly Technique)是目前高温 SHPB 实验最常用的方法,由 Frantzt 等^[12]提出并应用于 SHPB 实验。该方法先单独加热试样,再通过机械装置将试样与弹性杆组装后快速进行加载,这种方法的准确性高,重复性好,被学者们多次改进^[13,14]并迁移应用到分离式 Hopkinson 拉杆高温实验中^[15]。高温同步快速组装技术是通过把试样和弹性杆的接触时间(冷接触时间, CCT)控制在 50ms 内,从而使试样与杆端的温度梯度维持在可接受范围内^[16,17]。Li 等^[18]通过一种改进的电同步 SHPB 实验技术,成功将冷接触时间缩短到 5ms 以内。在长期的实验中,学者们普遍认为高温同步快速组装法能够较为准确地获得材料的动态压缩力学性能。

此外,还可以通过在弹性杆与试样间插入具有良好隔热性能的介质以降低二者的热交换,如 Lankford^[19]、肖大武^[20]等采用在试样与弹性杆之间插入陶瓷短棒的方法来限制温度梯度。理论上说,在弹性杆与试样之间插入第三种介质的做法有悖于一维应力假设,因此,为了保证实验结果的有效性,插入材料的属性须同时满足:具有良好的隔热性以有效限制温度梯度;杨氏模量对温度不敏感且波阻抗与弹性杆相近以满足一维应力波理论中的均匀性假设;与待测试样相比具有相当的硬度以满足一维应力波理论中的平截面假设。受以上条件的限制,此方法不可用于待测试样强度或硬度高于所插入隔热材料的情况。对于在高温下仍具有超高强度的待测材料而言,则难以找到符合以上条件的隔热材料。受各类热障涂层在航空、航天等工业领域应用的启发^[21,22],本文自制了一种隔热涂层,以该涂层作为隔热介质,可进行高强度、高硬度材料的 SHPB 高温实验。本文所提出的实验方法可在传统的 SHPB 实验系统上进行,无须借助较为复杂的同步组装装置,实验操作简单易行。本文借助数值模拟对弹性杆杆端、隔热涂层以及试样内部的温度分布进行分析,并将此方法与高温同步快速组装法所获实验结果进行对比,以验证其可行性。

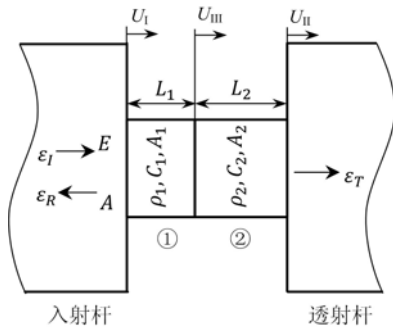


图 1 插入隔热材料与试样简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of inserted thermal insulation material and specimen

1 理论分析

图 1 为加入隔热材料时的高温 SHPB 实验示意图。图中被加载的 2 种材料①和②分别代表插入的隔热材料及待测试样; ρ 、 C_0 、 A 、 ρ_1 、 C_1 、 A_1 和 ρ_2 、 C_2 、 A_2 则分别表示弹性杆以及 2 种被加载材料的密度、弹性波速以及初始横截面积; L_1 、 L_2 分别为隔热材料和待测试样的初始厚度; ϵ_I 、 ϵ_R 、 ϵ_T 分别表示弹性杆上的入射波、反射波、透射波; E 为弹性杆的弹性模量。以一维应力假设为前提,当作用在杆端的应力达到平衡时,界面 I 和界面 II 上的载荷 P_1 、 P_2 可表示为

$$P_1(t) = EA[\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t)] \quad (1)$$

$$P_2(t) = EA\epsilon_T(t) \quad (2)$$

此时,作用在界面 I 和界面 II 的应力 σ_1 、 σ_2 为

$$\sigma_1(t) = \frac{EA}{A_1}[\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t)] \quad (3)$$

$$\sigma_2(t) = \frac{EA}{A_2}\epsilon_T(t) \quad (4)$$

界面 I 和界面 II 的位移 U_I 、 U_{II} 可分别由入射杆和透射杆上的信号转换获得：

$$U_I(t) = C_0 \int_0^t [\epsilon_I(t) - \epsilon_R(t)] dt \quad (5)$$

$$U_{II}(t) = C_0 \int_0^t \epsilon_T(t) dt \quad (6)$$

用 ΔL_1 、 ΔL_2 分别表示隔热材料与待测试样加载变形后的厚度，则隔热材料的应变 ϵ_1 ，待测试样的应变 ϵ_2 以及二者的总体应变 ϵ_0 可表示为

$$\epsilon_1(t) = \frac{\Delta L_1(t)}{L_1} = \frac{U_I(t) - U_{III}(t)}{L_1} \quad (7)$$

$$\epsilon_2(t) = \frac{\Delta L_2(t)}{L_2} = \frac{U_{III}(t) - U_{II}(t)}{L_2} \quad (8)$$

$$\epsilon_0(t) = \frac{\Delta L_1(t) + \Delta L_2(t)}{L_1 + L_2} = \frac{U_I(t) - U_{II}(t)}{L_1 + L_2} \quad (9)$$

联立式(5)~(9)，试样的应变 ϵ_2 可表示为

$$\epsilon_2(t) = \frac{\epsilon_0(t)(L_1 + L_2) - \epsilon_1(t)L_1}{L_2} = \frac{C_0 \int_0^t [\epsilon_I(t) - \epsilon_R(t) - \epsilon_T(t)] dt}{L_2} - \frac{\epsilon_1(t)L_1}{L_2} \quad (10)$$

根据式(10)可知，要获得待测试样的应变，则需要消除式中的第二项，对此有以下 2 种情况：

(1) 当 $\epsilon_1(t) \rightarrow 0$ ，即在加载试样的应力水平下，插入的隔热材料基本不发生塑性变形，其应变可忽略不计，如图 2 所示。在此情况下，插入材料的硬度、强度、杨氏模量等须大于待测试样。为了减小因波阻抗不匹配对应力波传播的影响，应尽量选用波阻抗与弹性杆材料相近的隔热材料，从而可将插入的隔热材料直接视为弹性杆的一部分，如 Lankford^[19]、肖大武^[20]等采用陶瓷材料作为隔热杆进行实验。

(2) 插入材料在待测试样发生塑性变形前便已完全失效，如图 3 所示。Tasdemirci 等^[23]对多层结构材料的研究表明，材料的塑性变形可使各组分内的应力分布更为均匀，从而有利于试样两端的应力平衡，即当插入涂层材料的波阻抗足够小，可将其看作试样与弹性杆之间与其厚度相等的一段空隙，在此情况下，会有部分入射波在到达入射杆端面后完全反射。当入射杆与透射杆相接触，入射波剩余部分传入透射杆，幅值不变。如图 4 所示，假设插入隔热材料的厚度为 L_g ，弹性波速与质点速度分别为 c 和 V_p ，由 $V_p = 2c\epsilon_i$ ^[24]，损失的脉宽(反射波脉宽 T_r)可表示为

$$T_r = \frac{L_g}{2c\epsilon_i} \quad (11)$$

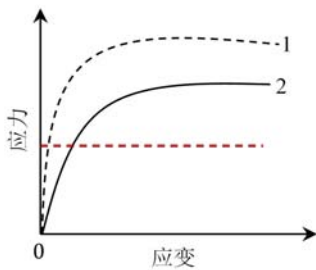


图 2 插入材料的杨氏模量大于待测试样
Fig. 2 The Young's modulus of the inserted material is greater than the specimen

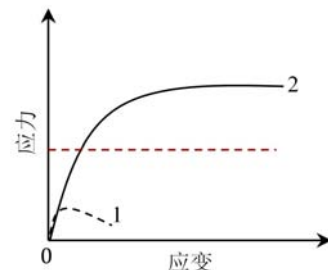


图 3 插入材料在待测试样发生塑性变形前已完全失效
Fig. 3 The inserted material is completely failed before the plastic deformation of specimen

为了保证入射波在通过隔热材料后仍保有足够的脉宽以对试样进行加载，应在满足隔热要求的前提下尽量减小隔热涂层的厚度，此外，在实验前应根据式(11)确认实验所用撞击杆长度是否可获得足够脉宽的入射波。

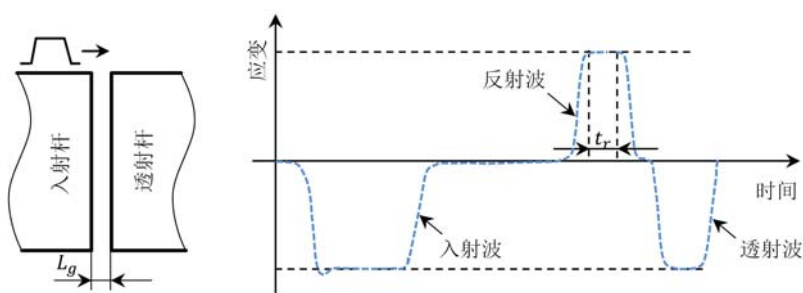


图 4 入射杆与透射杆间存在空隙时的加载波形

Fig. 4 Pulses in presence of a gap between the incident bar and transmitted bar

2 应用隔热涂层的高温 SHPB 实验

2.1 本文采用的隔热涂层

为了验证插入低波阻抗隔热材料的方法能否有效进行高温 SHPB 实验,选取 ZS-1 型涂料作为插入的隔热材料,该涂料由硅酸盐溶液、纳米级空心陶瓷微珠以及硅酸铝纤维等混合而成。其中,空心陶瓷微珠占比 80% 以上,单个体积在 80 目(约 $200\mu\text{m}$) 以上。这些散落的微珠构造相当于大量的微型的保温瓶,其腔体内的空气在受热后可使热对流大幅降低。此外,在制作陶瓷微珠的材料中加入了能释放带有相同电荷离子的活性材料,这些离子发射的电磁波对热能发出的电磁波能起到屏蔽作用,从而更有效地阻止热量传递。ZS-1 本身强度较低且干燥后会呈现明显脆性,每次加载后均会受到破坏,每次实验前重新涂刷会大幅降低实验效率。由于 ZS-1 型涂层对金属有良好的附着性,选取铝箔(AF)作为基底提前涂刷以实现隔热涂层的可替换性。铝箔的导热系数较大,其厚度不宜过大,实验所使用的铝箔厚度为 0.02mm 。由于铝箔较软,凝固后脆性的 ZS-1 型隔热涂层在受到轻微外力的情况下也极易开裂或脱落,为避免这一情况的发生,选取物理隔热性能良好且具有一定厚度的铁氟龙(PTFE),在涂刷 ZS-1 前先将其贴于铝箔另一面。批量制作以减小因涂刷不均造成的差异。图 5 为此隔热层的结构示意图,下文将其简称为 TIL(Thermal Insulation Layer)。TIL 各组分参数见表 1。

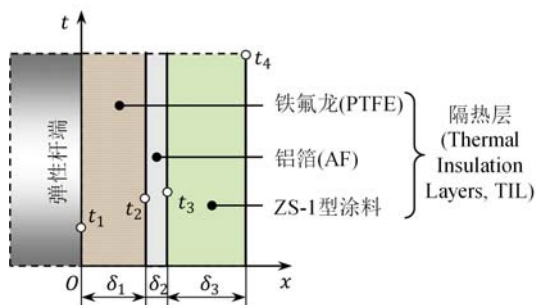


图 5 自制隔热涂层(TIL)的结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structure of TIL

表 1 自制隔热涂层(TIL)各组分材料参数

Tab. 1 Material parameters of the components of TIL

材料	厚度 δ/mm	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
铁氟龙 (PTFE)	0.13	2.1	0.25	960
铝箔 (AF)	0.02	2.7	237	880
ZS-1 型涂料 (ZS-1)	0.15	1.2	0.03	1500~2000

适用于本实验的隔热材料须同时满足隔热性能与机械性能的要求。材料的隔热性能与厚度相关,考虑到本文第 1 节末对加载脉宽所提出的要求,选用的隔热材料厚度应尽可能小,以减小入射波的脉宽损失。为了找到隔热效率与厚度之间的折中点,将不同结构的隔热涂层保护下的弹性杆端部置入

600℃高温炉内,用提前放置在杆端的热电偶观察杆端的温度变化,结果如图6所示,厚度最小的单层TIL在大约90s内可维持杆端温度在200℃以下。大多数材料的力学性能会随着温度的升高而退化,由于本文中的实验环境均为高温,因此,选用的隔热材料只需在实验温度下能视为空隙即可。在TIL的组分中:PTFE在高温下会软化,327℃时完全失去力学强度;铝的熔点为600℃,厚度仅0.02mm;ZS-1型涂料在干燥后表现出明显脆性,生产商测定其静压缩强度小于80MPa。为了验证温度对TIL机械强度的影响,分别将TIL置于200℃、400℃、600℃的高温下,保温1min后进行加载,结果如图7所示。在200℃下,由于TIL仍具有一定的力学强度,插入TIL对应力波传播的影响较为显著,反射波与透射波的幅值相较于入射波发生了明显变化。当温度升高至400℃,反射波和透射波的幅值已增大至与入射波几乎相同。在时间轴上,反射波和透射波已不存在重叠部分,此时的透射波脉宽较小,约为0.07ms。当温度到达600℃,透射波的脉宽将进一步增加至约0.13ms。此时的情况与图4接近,可将TIL视为弹性杆与试样间的空隙处理。

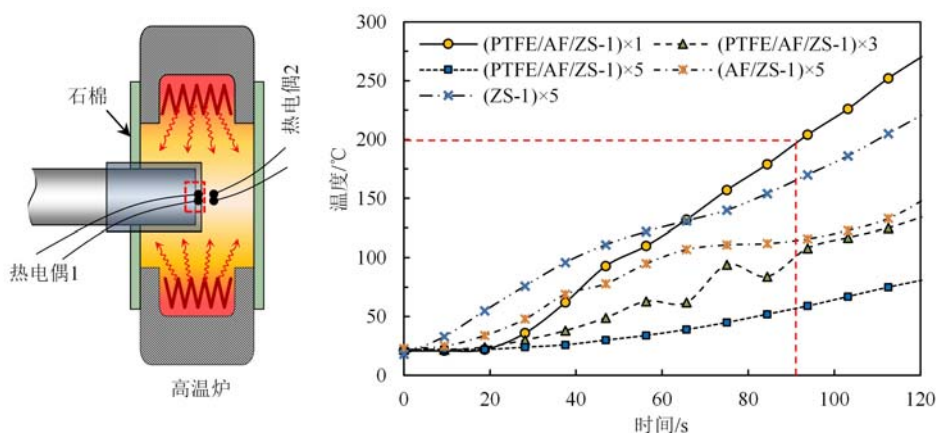


图6 不同结构隔热涂层保护下的弹性杆杆端在600℃环境中的温度变化

Fig. 6 Temperature evolution of elastic bar ends under the protection of thermal insulation layers of different structures in the environment of 600℃

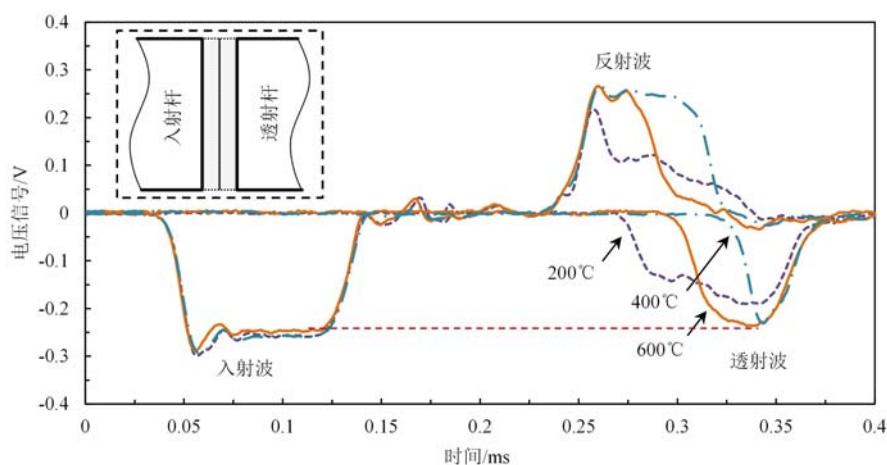


图7 自制隔热涂层(TIL)在200℃、400℃、600℃下加载的特征波形

Fig. 7 Pulses of loading TIL at 200℃, 400℃, 600℃ respectively

2.2 实验及操作步骤

实验采用直径为19mm的分离式霍布金森压杆(SHPB)装置,撞击杆长度为300mm、入射杆与透射杆长均为1200mm,所有的弹性杆材质均为马氏体时效钢(18Ni350),其弹性模量为195GPa,弹性波速为4910m/s。对于插入隔热涂层的高温SHPB实验,弹性杆杆端、试样、隔热涂层的温度需满足以下要

求:弹性杆杆端始终在允许温度 200℃ 以下;待测试样达到实验要求的温度且尽量均匀;插入的隔热涂层达到一定的温度以确保其可被看作试样与弹性杆之间的空隙。为了满足以上 3 个不同位置的温度要求,可按照图 8 所示顺序进行操作:

(1) 在与试样两端接触的入射杆和透射杆端面及侧面包裹隔热涂层,于加载方向上的各个界面使用二硫化钼润滑以减小摩擦。将试样用热电偶丝固定在限位滑套上,调整试样与两弹性杆的相对位置以确保同轴加载,调整高温炉与限位滑套的位置,调整两弹性杆间距为 12cm。

(2) 启动高温炉,加热试样至预定温度并保温 5min,在保温结束前 1min 将弹性杆杆端推入高温炉中,根据提前标示的距离,使弹性杆端部与试样保持固定距离 1.5cm。

(3) 到达保温时间后,快速拉动牵引杆(或直接用手推动透射杆与试样、入射杆接触)完成试样与弹性杆的组装,释放撞击杆完成加载。这一过程可严格控制在 2s 以内,实际操作中用时约为 1s。

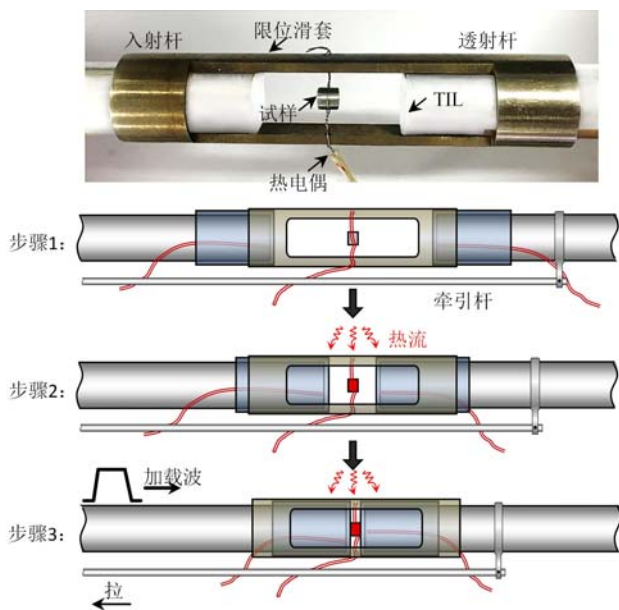


图 8 插入自制隔热涂层(TIL)的高温 SHPB 实验操作步骤示意图

Fig. 8 Schematic diagram of operating steps of SHPB at high temperature with TIL

2.3 数值模拟分析

利用有限元软件 ABAQUS/Standard 对实验中关键位置的温度进行模拟分析^[25]。模型采用八节点线性热传导单元(DC3D8),模型中的 SHPB 装置、试样及隔热涂层的尺寸均按照实验的实际参数设置。热传递主要有传导、对流、辐射 3 种形式。单独加热试样阶段产生的热交换主要为高温炉对试样的热辐射。将弹性杆端部推入高温炉并保持其与试样不接触时,主要考虑高温炉及试样对弹性杆端部的热辐射。试样保温结束,完成与弹性杆组装时发生的热交换主要包括:试样与隔热材料之间的热传导;试样以及弹性杆端部运动与高温炉内空气的强制对流以及组装后的自然对流;试样与高温炉的热辐射。其中,试样在保温后受热均匀,可看作温度均一的辐射源;热传导部分可根据各参与换热的材料的热力学参数进行设置;由于弹性杆端部原本已处于高温炉内,移动的距离很小,强制对流的作用很小,而组装完成后试样以及弹性杆端部与高温炉内空气相对静止,可看作自然对流换热,相对于其他传热方式而言,自然对流换热的表面传热系数很小,因此,本模型不考虑对流换热的影响。实际物体辐射热流量的计算采用斯忒藩-玻尔兹曼定律的经验修正公式 $\Phi = \epsilon A \sigma T^4$, 其中, Φ 为实际物体辐射热流量; A 为辐射表面积; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数; T 为温度。假设高温炉内温度均匀,为使模拟结果尽量保守,设置入射杆与透射杆进入高温炉内的部分外层为 600℃ 辐射源,并将试样视作黑体,取其表面发射率为 1。各材料参数见表 1 与表 2。

表 2 弹性杆与试样的材料参数

Tab. 2 Material parameters of elastic bars and specimen

材料	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
18Ni350 钢	8.1	36.50	460
45 钢	7.8	31.98	700

选取 3 种等厚度(0.3mm)的隔热涂层(PTFE、ZS-1 型隔热涂层、自制 TIL 隔热层),分析在它们的作用下弹性杆端部及试样内部的温度分布情况。设定弹性杆与各隔热涂层初始温度为 20℃,在 600℃ 的辐射下,弹性杆端面温度变化曲线如图 9 所示。在 60s 内,3 种隔热涂层均能将弹性杆杆端温度控制在允许范围内。

试样保温完成后将与带有隔热涂层的弹性杆进行组装,小体积的压缩试样在这一过程中温度会迅速下降。图 10 所示为试样与加装不同隔热材料的弹性杆组装后,其内部温度在不同时刻的分布情况,每组曲线由上至下分别对应试样与各隔热材料接触 1s、2s、3s 时试样中轴线上的温度分布曲线。取各试样中轴线上的平均温度,ZS-1、TIL、PTFE 在 1s 时分别使试样温度下降了 1.25%、2.24%、5.0%,在 2s 时下降 1.92%、3.74%、8.95%,在 3s 时下降 2.53%、5.29%、12.57%。ZS-1 型涂料极低的热导率使得试样在接触纯 ZS-1 以

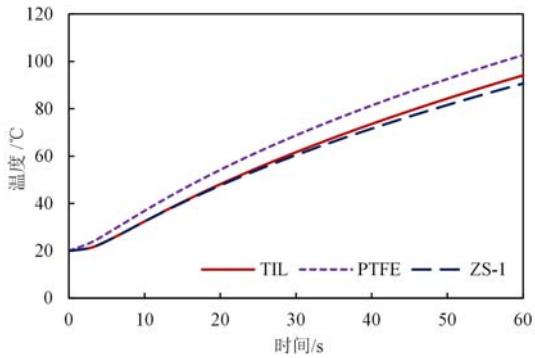


图 9 预热隔热涂层时弹性杆杆端的温度变化
Fig. 9 Temperature evolution at the end of elastic bars during the period of preheating thermal insulation materials

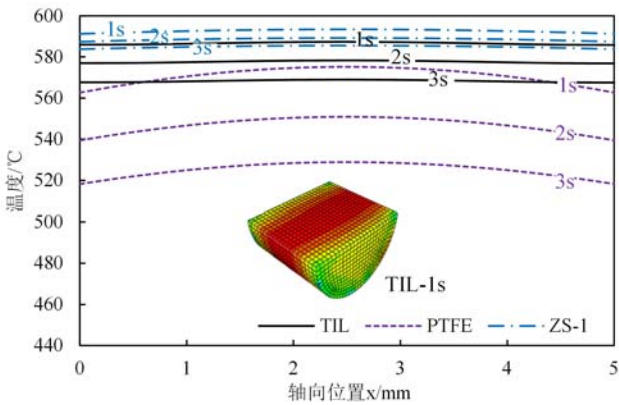


图 10 与加装不同隔热材料的弹性杆组装后
试样内部在不同时刻(1s、2s、3s)的温度分布
Fig. 10 Temperature distribution of the specimen after contacting with the elastic bars with different thermal insulation materials at different moments (1s, 2s, 3s)

及 ZS-1 作为主要成分的 TIL 后温度下降较缓慢,与二者接触的试样两端面中心点温度在 3s 时分别为 583.8℃、567.5℃,而相同条件下与 PTFE 接触的试样端面温度已下降至 518.2℃。实际操作中,试样与隔热涂层的接触时间均在 1s 左右,图 10 下方为模拟试样在与 TIL 保护下的杆端接触 1s 后轴向剖面的温度分布。由于界面处的热交换剧烈,试样两端温度下降更为明显,而中间的大部分区域温度仍保持在 587℃ 以上,此时试样平均温度为 586.6℃。通过 2.1 节的实验验证,插入的 TIL 在 400℃ 以上工作时可看作试样与弹性杆之间的空隙。图 11 为 TIL 隔热层与试样接触后 1s、2s、3s 时的温度分布。由图 11 可见,在 TIL 与试样相接触的区域,涂层的温度高于 500℃。图 12 更直观地描述了在 600℃ 的实验温度下插入 TIL 时各热交换界面附近(包括弹性杆端、隔热涂层、试样内部)在不同时刻的温度分布情况,曲线上方各图分别对应 1s 时 TIL、试样轴向切面以及弹性杆端部的温度分布。从图 12 上可以清晰看到,此时弹性杆端的最高温度为 128.3℃,试样轴向切面上的最低温度为 582.7℃,与试样接触的 TIL 中心处温度最低为 468.2℃,均满足实验要求。

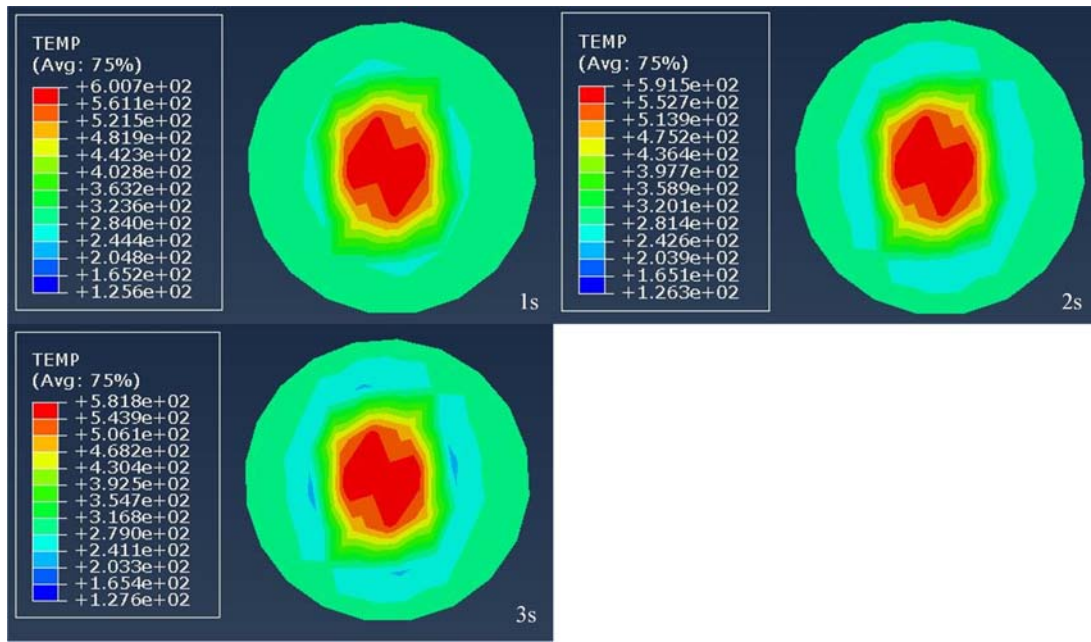


图 11 与试样接触后自制隔热涂层(TIL)在不同时刻(1s、2s、3s)的温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of TIL after contacting with the specimen at different moments (1s, 2s, 3s)

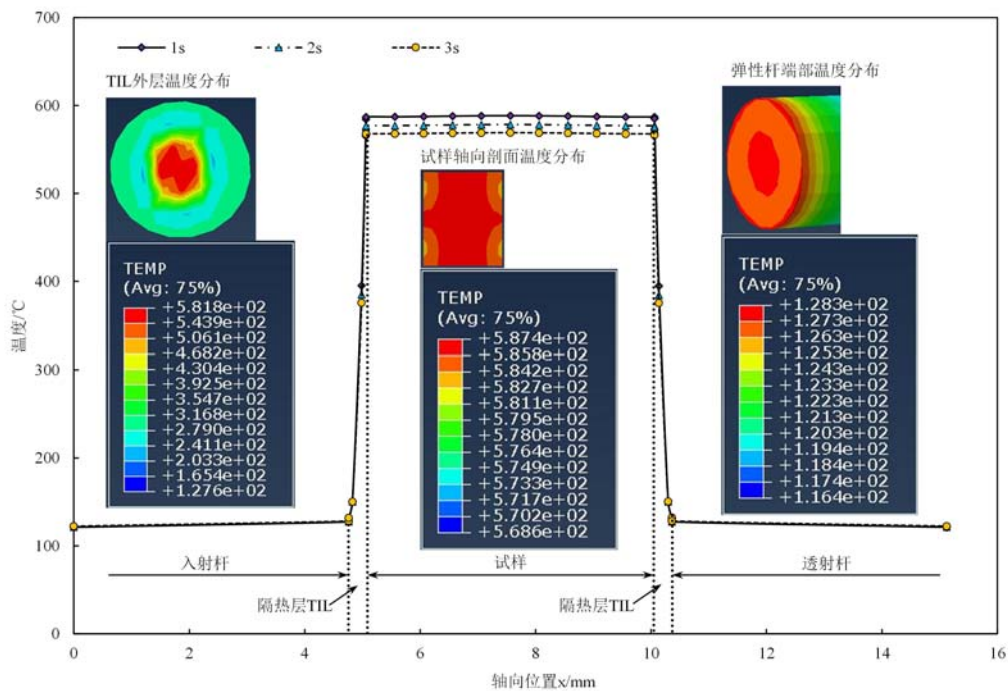


图 12 在 600°C 实验条件下组装完成后不同时刻(1s、2s、3s)热交换界面附近的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution around the heat exchange interfaces at 600°C at different moments (1s, 2s, 3s)

3 实验结果验证

选取直径为 6mm、高为 5mm 的圆柱形 45 钢试样,采用本文提出的方法分别在 400°C 及 600°C 下加载,同时采用高温同步快速组装法进行对照组实验,结果如图 13、图 14 所示。在 400°C 及 600°C 下,采用高温涂层与高温同步快速组装法所得 45 钢在 2700s^{-1} 应变率下的结果基本一致,包括屈服应力(由于图中 45 钢的屈服现象不明显,取弹性段和塑性段的线性拟合交点的值作为该材料的屈服强度,采用高温同步快速组装法所测结果为 657MPa,采用本文插入 TIL 隔热法的结果为 659MPa 和 673MPa)、应

变硬化率以及塑性变形阶段的应力水平均具有良好的一致性。通过在弹性杆杆端放置的热电偶,可观察到杆端温度在实验过程中最高达到了 167°C ,也就是说,受限单层 TIL 的力学性能与隔热效率,可测定 45 钢在 $400^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 下的动态力学响应。随着实验温度从 400°C 上升至 600°C ,45 钢的流动应力反而有所增大,这可能与第三型应变时效现象有关^[26]。第三型应变时效在钢中非常常见^[27-29],对钢而言,如果不含有足够的合金元素,如 Al、V、Nb、Ti,则碳原子和氮原子不能全部形成碳化物和氮化物,这些自由的碳原子和氮原子与位错的相互作用会导致合金钢塑性流动行为出现应变时效^[14]。

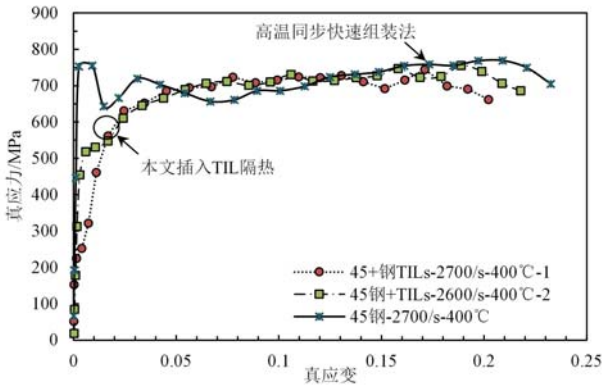


图 13 分别采用自制隔热涂层(TIL)及高温同步快速组装法所获 45 钢在 400°C 时的动态压缩响应曲线

Fig. 13 Dynamic response curves of 45 steel obtained by inserting TILs vs. rapid assembly technique at 400°C

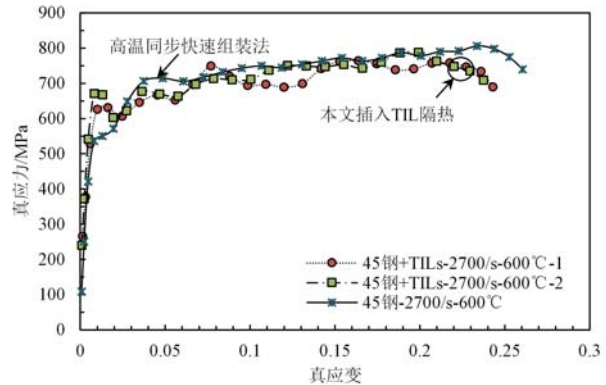


图 14 分别采用自制隔热涂层(TIL)及高温同步快速组装法所获 45 钢在 600°C 时的动态压缩响应曲线

Fig. 14 Dynamic response curves of 45 steel obtained by inserting TILs vs. rapid assembly technique at 600°C

4 结论

(1) 为验证本文提出的实验方法的可行性而自制的隔热涂层 TIL,其力学性能随温度升高会发生退化,在 400°C 以上完全失效后,可将其看作弹性杆与试样之间的空隙进行处理。

(2) 通过数值模拟和实验结果初步验证了实验操作步骤的合理性:在环境温度为 600°C 的实验条件下,弹性杆杆端温度低于 200°C (最高达到 167°C),在操作时间内(1s)试样平均温度下降约 2.24%。

(3) 分别采用本文提出的实验方法与高温同步快速组装法在 400°C 、 600°C 下对 45 钢进行加载,所得实验结果基本一致。本文的实验方法与采用的单层隔热涂层 TIL 可有效测定 45 钢在 $400^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 下的动态压缩力学性能。

需要注意的是,高温 SHPB 实验的有效温度范围受限隔热涂层不同的力学性能和隔热性能,在实际应用中,须根据不同待测材料及不同实验温度选择对应属性(材料、厚度)的隔热材料以满足实验需求。

参考文献:

- [1] 万璋,范立峰,王林,等. SHPB 实验过程中岩石变形破坏的实时物像同步分析[J]. 实验力学, 2017, 32(6):771-780 (WAN Zhang, FAN Lifeng, WANG Lin, et al. On the real-time physical image synchronization analysis for rock deformation and failure mode based on SHPB[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6): 771-780 (in Chinese))
- [2] Klepaczko J R, Rusinek A, Rodríguez-Martínez J A, et al. Modelling of thermo-viscoplastic behaviour of DH-36 and weldox 460-E structural steels at wide ranges of strain rates and temperatures, comparison of constitutive relations for impact problems[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(5):599-621.
- [3] Davoodi B, Gavrus A, Ragneau E. An experimental and numerical analysis of the heat transfer problem in SHPB at elevated temperatures[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(10):2101.
- [4] Lennon A M, Ramesh K T. A technique for measuring the dynamic behavior of materials at high temperatures[J].

- International Journal of Plasticity, 1998, 14(12):1279–1292.
- [5] Chiddister J L, Malvern L E. Compression-impact testing of aluminum at elevated temperatures[J]. Experimental Mechanics, 1963, 3(4):81–90.
- [6] Lindholm U S, Yeakley L M. High strain-rate testing: tension and compression[J]. Experimental Mechanics, 1968, 8(1):1–9.
- [7] Campbell J D, Ferguson W G. The temperature and strain-rate dependence of the shear strength of mild steel[J]. Philosophical Magazine, 1970, 21(169):63–82.
- [8] 夏开文, 刘文彦. 30CrMnSiA 钢高温动态力学性质的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(4):310–316 (XIA Kaiwen, LIU Wenyan. Experimental study of dynamic properties of 30CrMnSiA steel at high temperature[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(4):310–316 (in Chinese))
- [9] 佟景伟, 高丛峰, 李鸿琦, 等. 温度梯度对拉伸 SHB 试验误差的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4):277–281 (TONG Jingwei, GAO Congfeng, LI Hongqi, et al. Numerical analysis on the error in the split Hopkinson tension bar test at temperature gradient[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4):277–281 (in Chinese))
- [10] Gilat A, Wu X. Elevated temperature testing with the torsional split Hopkinson bar[J]. Experimental Mechanics, 1994, 34(2):166–170.
- [11] Eleiche A M, Duffy J. Effects of temperature on the static and dynamic stress-strain characteristics in torsion of 1100-0 aluminum[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1975, 17(2):85–95.
- [12] Frantz C E, Follansbee P S, Wright W J. New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar [C]. 8th International Conference on High Energy Rate Fabrication, United State, San Antonio, 1984:1–18.
- [13] Nemat-Nasser S, Isaacs J B. Direct measurement of isothermal flow stress of metals at elevated temperatures and high strain rates with application to Ta and Ta-Walloys[J]. Acta Materialia, 1997, 45(3):907–919.
- [14] Wang J, Guo W G, Gao X, et al. The third-type of strain aging and the constitutive modeling of a Q235B steel over a wide range of temperatures and strain rates[J]. International Journal of Plasticity, 2015, 65:85–107.
- [15] Tan X, Guo W, Gao X, et al. A new technique for conducting split Hopkinson tensile bar test at elevated temperatures[J]. Experimental Techniques, 2017, 41(2):191–201.
- [16] Yang G, Guo W G, Liu K, et al. The accuracy analysis of SHPB experiment at high temperatures and high rates with pneumatically synchronous mechanism[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(9):1455–1460.
- [17] Li Y, Guo Y, Hu H, et al. A critical assessment of high-temperature dynamic mechanical testing of metals[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2):177–184.
- [18] Li P, Yuan K, Guo W, et al. Dynamic compressive behavior of a single crystal nickel-base superalloy at ultra-high temperature: mechanism investigation with a modified electric synchronous SHPB technique [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18:637–657.
- [19] Lankford J. Temperature-strain rate dependance of compressive strength and damage mechanisms in aluminium oxide[J]. Journal of Materials Science, 1981, 16(6):1567–1578.
- [20] 肖大武, 李英雷, 胡时胜. 组合式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验技术[J]. 高压物理学报, 2010(1):37–42 (XIAO Dawu, LI Yinglei, HU Shisheng. High temperature SHPB system with heat insulation for short ceramic bars[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010(1):37–42 (in Chinese))
- [21] 郭金利, 张雁恒, 卢宁, 等. 面向热障涂层内部界面缺陷的快速检测装置[J]. 实验力学, 2021, 36(4):471–479 (GUO Jinli, ZHANG Yanheng, LU Ning, et al. Rapid detection instrument for interface defects of thermal barrier coating[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(4):471–479 (in Chinese))
- [22] 曾宇春, 朱奇, 杨栋, 等. 热障涂层弹性模量和残余应力测试研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2):234–242 (ZENG Yuchun, ZHU Qi, YANG Dong, et al. Experimental measurement of elastic modulus and residual stress of thermal barrier coatings[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(2):234–242 (in Chinese))
- [23] Tasdemirci A, Hall I W. The effects of plastic deformation on stress wave propagation in multi-layer materials [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(11):1797–1813.
- [24] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教程[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007 (GUO Weiguo, LI Yulong, SUO Tao. Concise course of stress wave foundation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University

- Press, 2007 (in Chinese))
- [25] 李鹏辉, 郭伟国, 刘开业, 等. 材料超高温动态拉伸 SHTB 实验方法的有效性分析[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2):426—436 (LI Penghui, GUO Weiguo, LIU Kaiye, et al. Validity analysis of materials' dynamic tensile SHTB experimental technique at ultrahigh temperature[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2):426—436 (in Chinese))
- [26] 王建军, 袁康博, 张晓琼, 等. 第三型应变时效的提出与研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5):051101 (WANG Jianjun, YUAN Kangbo, ZHANG Xiaoqiong, et al. Proposition and research progress of the third-type strain aging[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5):051101 (in Chinese))
- [27] Nemat-Nassaer S, Guo W G. Thermomechanical response of DH-36 structural steel over a wide range of strain rates and temperatures[J]. Mechanics of Materials, 2003, 35(11):1023—1047.
- [28] Wang J J, Guo W G, Gao X S, et al. The third-type of strain aging and the constitutive modeling of a Q235B steel over a wide range of temperatures and strain rates[J]. International Journal of Plasticity, 2015, 65:85—107.
- [29] Jing L, Su X Y, Zhao L M. The dynamic compressive behavior and constitutive modeling of D1 rail way wheel steel over a wide range of strain rates and temperatures[J]. Results in Physics, 2017, 7:1452—1461.

Feasibility analysis of applying thermal insulation layers in high-temperature SHPB tests

LI Yanping¹, YUAN Kangbo², TAN Xueming¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Department of Engineering Mechanics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China)

Abstract: For Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests at high temperatures, controlling the temperature of the elastic bar ends and specimen to avoid the excessive temperature rise of elastic bars and excessive temperature drop of the specimen is significant to ensure the accuracy of experimental results. Based on Fourier's Law, an idea of inserting thermal insulation layers with a specific structure between the elastic bars and specimen is proposed to reduce the heat exchange efficiency of elastic bars/furnace and elastic bars/specimen. Thus the temperature of elastic bar ends and the specimen can be controlled within allowable range. In this paper, a kind of thermal insulation layer that can be used in high-temperature SHPB experiments were designed. The proposed method is verified by numerical simulations and experiments. The results indicate that the strength of the thermal insulation layer was degraded sharply above 400°C. Thus the thermal insulation layer can be regarded as a gap between specimen and elastic bar. As a result, the effects of inserting thermal insulation layer on stress wave propagation can be ignored. For a test conducted at 600°C, the temperature at the end of elastic bars were kept below 167°C, and the average temperature of the specimen decreased 2.24%. The stress-strain curves of 45 steel at 400°C and 600°C obtained by this method agree with that obtained by Rapid assembly technique, which demonstrates the feasibility of the proposed method.

Keywords: SHPB; high temperature; high strain rate; thermal insulation layer; feasibility