

高压物理学报

G54钢的动高压性能实验研究

王波 裴红波 李绪海 高齐 何雨 陈咏龙 桂毓林

Experimental Study on Dynamic High Pressure Properties of G54 Steel

WANG Bo, PEI Hongbo, LI Xuhai, GAO Qi, HE Yu, CHEN Yonglong, GUI Yulin

引用本文:

王波, 裴红波, 李绪海, 等. G54钢的动高压性能实验研究[J]. 高压物理学报, 2024, 38(6):064102. DOI: 10.11858/gywlb.20240833

WANG Bo, PEI Hongbo, LI Xuhai, et al. Experimental Study on Dynamic High Pressure Properties of G54Steel[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6):064102. DOI: 10.11858/gywlb.20240833

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240833>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氦泡铝的层裂特性实验研究

Experimental Investigation of Spall Damage in Pure Aluminum with Helium Bubbles

高压物理学报. 2021, 35(5): 054101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210770>

烧结钕铁硼的层裂强度及断裂机理

Spall Strength and Fracture Mechanism of Sintered Nd-Fe-B

高压物理学报. 2019, 33(5): 054201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190746>

G50钢与G31钢动态力学性能的对比试验研究

Comparative Experimental Study on Dynamic Mechanical Properties of G50 Steel and G31 Steel

高压物理学报. 2021, 35(1): 014103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200569>

冲击载荷下金属材料的微结构-加载特性-层裂响应关系概述

Effects of Microstructure and Loading Characteristics on Spallation of Metallic Materials under Shock Loading

高压物理学报. 2021, 35(4): 040104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200648>

纯铁相变和层裂损伤的数值模拟

Numerical Simulation of Phase Transition and Spall of Iron

高压物理学报. 2018, 32(1): 014102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170528>

材料层裂研究的主要进展

Main Progress in Research on Material Spalling

高压物理学报. 2019, 33(5): 050301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180670>

G54 钢的动高压性能实验研究

王 波¹, 裴红波¹, 李绪海¹, 高 齐², 何 雨¹, 陈咏龙¹, 桂毓林¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

摘要: G54 钢是我国自主研发的一种新型超高强度钢, 具有较高的潜在应用价值。为了研究该材料的动高压性能, 为应用推广提供数据支撑, 采用火炮作为加载手段, 开展了 G54 钢的飞片对称碰撞实验。实验飞片速度为 600~1 400 m/s, 通过测量 G54 钢样品的背表面粒子速度-时间历史, 获得了典型的冲击相变及层裂信号。通过对粒子速度进行分析, 结合材料密度及声速测试结果, 获得了冲击压力为 13~23 GPa 下 G54 钢的 Hugoniot 弹性极限、层裂强度、冲击波速度-粒子速度 ($D-u$) 关系以及冲击相变点等动高压性能参数。对实验样品进行回收及金相分析发现, 随着飞片速度的增加, 材料层裂面的损伤机制逐渐从微孔洞聚合主导的韧性断裂向绝热剪切主导的韧性断裂转变。

关键词: G54 钢; 对称碰撞实验; Hugoniot 弹性极限; 冲击波速度-粒子速度关系; 层裂强度

中图分类号: O521.21; O346.4

文献标志码: A

超高强度钢一般指屈服强度高于 1.38 GPa 或抗拉强度大于 1.47 GPa 的钢材料, 此外, 还需兼顾适当的韧性。超高强度钢因具有高强度、高韧度的优点, 被广泛应用于航空、航天、海洋、能源以及国防装备领域, 是高端制造业的核心材料^[1]。

G54 钢是我国自主研发的一种新型二次硬化超高强度钢, 屈服强度极高, 具有较高的潜在应用价值。秦玉荣等^[2]采用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 研究了 G54 钢的动态压缩性能, 获取了 G54 钢在 5 000 s⁻¹ 应变率以内的动态应力-应变曲线及应变率敏感性能。冯九胜^[3]对包含 G54 钢在内的 4 种超高强度钢开展了冲击韧性试验和平面应变断裂韧性试验, 对其冲击功、平面断裂韧度和断口形貌进行了分析和比较。

目前, 针对 G54 钢的材料性能研究多集中于中低应变率范围, 缺乏对高应变率及高压条件下材料性能的系统研究, 限制了其在强冲击、高应变率及高压条件下的应用性能预估。为此, 亟需对 G54 钢开展动高压性能实验研究以评估其动态力学性能。动高压性能研究中最常用的是飞片对称碰撞方法^[4], 即通过火炮、气炮或磁驱动等加载平台驱动飞片高速撞击试样^[5-7], 产生平面冲击波, 通过测量平面冲击波的相关参数获得样品的动高压特性。平面冲击波的测量方法包括锰铜压力计方法^[8]、电容器方法^[9]及自由面速度测量方法^[10]等。本研究拟采用火炮加载, 通过自由面速度测量方法, 获取 G54 钢在 10⁴~10⁵ s⁻¹ 应变率范围、13~23 GPa 冲击压力条件下的动高压材料性能。对碰撞后的样品进行回收, 观察样品的层裂现象, 通过对层裂面开展金相分析, 获得 G54 钢的层裂断裂主导因素, 以期 G54 钢材料的高压性能研究及应用推广提供实验数据支撑。

1 实验方法

1.1 实验原理

根据冲击波理论, 冲击波间断面两侧满足质量、动量和能量守恒关系, 可以得到

* 收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-07-22

作者简介: 王 波 (1988—), 男, 博士, 工程师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: bowang_my@163.com

通信作者: 何 雨 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: hexiaoyu@mail.ustc.edu.cn

$$\begin{cases} \rho_0(D-u_0) = \rho_a(D-u) \\ p-p_0 = \rho_0(D-u_0)(u-u_0) \\ E_a-E_0 = \frac{1}{2}(p+p_0)\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_a}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ_0 、 ρ_a 分别为冲击波阵面前、后的材料密度, D 为冲击波波速, u_0 、 u 分别为冲击波阵面前、后的粒子速度, p_0 、 p 分别为冲击波阵面前、后的压力, E_0 、 E_a 分别为冲击波阵面前、后的内能。测量 ρ_a 、 D 、 u 、 p 和 E_a 这 5 个参数中的任意 2 个, 就能确定冲击方程组的解。本研究采用自由面速度测量方法, 测量 D 和 u 2 个参数, 从而获得冲击波状态参数, 完成材料的动高压特性研究。采用与样品相同材料的飞片进行对称碰撞, 典型碰靶及层裂发生过程如图 1 所示。

图 2 给出了样品及飞片内各过程的应力-速度(σ - v)曲线。当 $t < 0$ 时, 即撞击发生前, 靶片处于静止状态, 飞片和弹托以同一速度向靶片运动, 处于状态 A; $t = 0$ 时, 飞片撞击试样(靶片), 在飞片和靶片中同时产生反向运动的 2 组相同结构的压缩波系, 包含弹性波和冲击波, 若冲击速度足够高, 冲击波后还将跟随相变波, 其中, OB 为弹性前驱波, 状态 B 对应的应力即为 Hugoniot 弹性极限, BC 为冲击波。上述压缩波到达试样自由面时, 将从自由面反射稀疏波 CD , 状态 D 对应的背表面粒子速度达到最大值。由于飞片直接黏结在实心弹托上, 压缩波到达飞片背面的卸载波并不完全卸载到 O, 而是卸载到状态 E, 飞片的波阻抗为基板的 10 倍以上, 状态 C 到状态 E 的卸载波可以卸掉大部分的压应力。此外, 波在基板内往返一次的时间远大于实验过程, 因此, 不影响实验信号的解读。从飞片和靶片背表面反射的稀疏波在靶片中心位置相遇, 形成拉应力区域, 一旦拉伸应力超过材料破坏要求的阈值且作用时间足够长, 材料内部即可发生层裂破坏, 出现裂缝, 同时向裂缝两边传播拉伸波 DF 及 EG , 状态 F 和状态 G 对应的应力即为层裂强度, 对应的速度差即为裂缝拉开的速度。

1.2 实验装置

本实验在 57 mm 口径火炮上进行, 实验装置如图 3 所示, 装置实物如图 4 所示。将薄片状的 G54 钢飞片安装在弹托上, 实验弹托为低阻抗的轻质材料。利用 57 mm 口径火炮将弹托发射至终点弹道速度 v , 撞击薄片状、厚度为飞片厚度的 2 倍、直径略小于飞片直径的 G54 钢样品。将样品安装在炮口的弹托上, 并在样品的后方和侧面布置测速探头, 分别测量样品的自由表面粒子速度和飞片撞击速度。

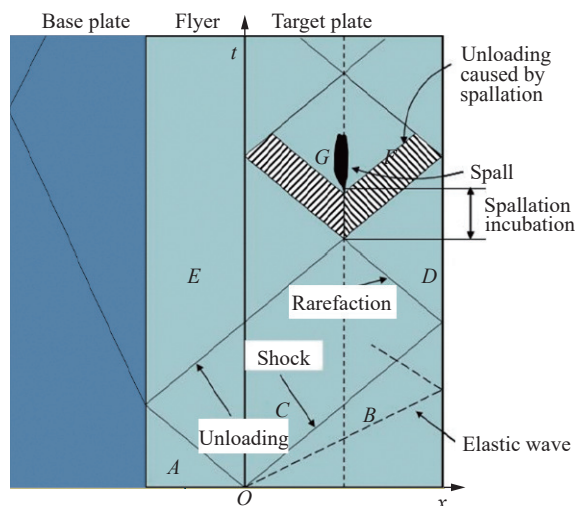


图 1 飞片撞击靶板发生破坏的过程

Fig. 1 Failure process of target plate under flyer impact

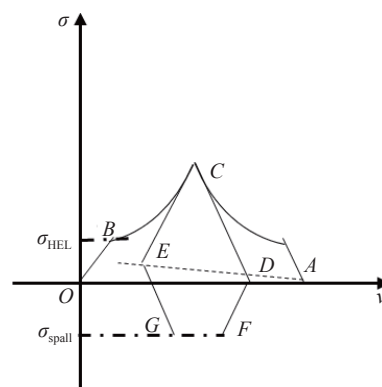


图 2 碰靶过程的 σ - v 曲线

Fig. 2 σ - v curve for impact target process

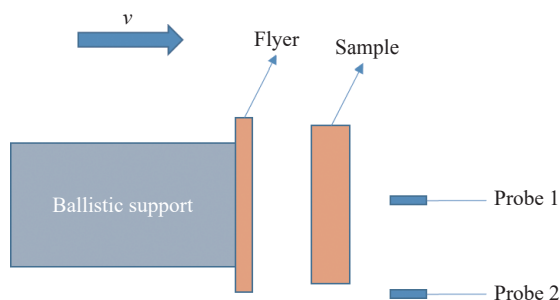


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental device

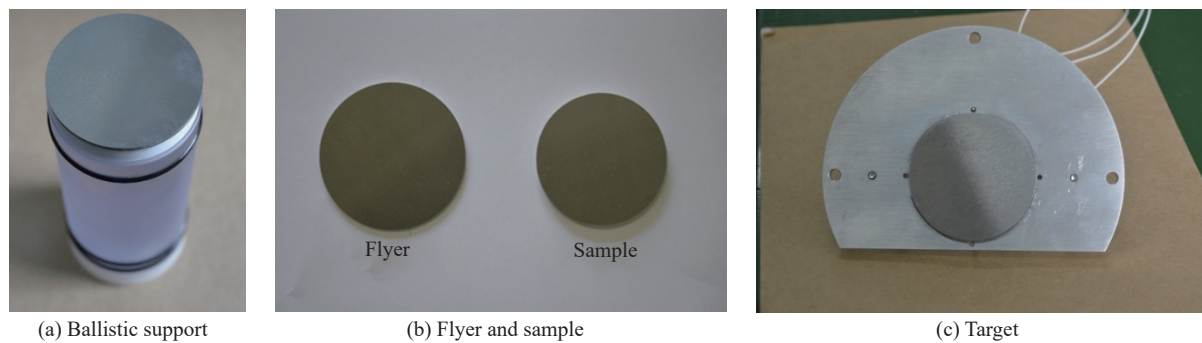


图 4 实验装置实物

Fig. 4 Photograph of the experimental device

2 结果与分析

2.1 常温常压参数

通过粒子速度波形可以反推材料的冲击响应性能, 为了实现这一目的, 需要首先获得材料的常温常压参数。采用排水法测量密度, 超声回波法确定纵波和横波波速, 从而反推弹性模量、泊松比、体波波速等参数。在一维应变条件下, 纵波波速为

$$C_{L0} = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (2)$$

横波波速为

$$C_{T0} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (3)$$

体波波速为

$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{3(1-2\nu)\rho}} \quad (4)$$

从而反推出泊松比

$$\nu = \frac{(C_{L0}/C_{T0})^2 - 2}{2(C_{L0}/C_{T0})^2 - 2} \quad (5)$$

式中: ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, C_{L0} 为纵波波速, C_{T0} 为横波速度, C_0 为体波波速。实测结果如表 1 所示。

表 1 常温常压下 G54 钢的材料参数

Table 1 Parameters of G54 steel at room temperature and pressure

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_{L0}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_0/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	E/GPa	$C_{T0}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	ν
7 970	5.777	4.555	194.77	3.077	0.302

2.2 自由面粒子速度

本研究获得了 660~1431 m/s 飞片速度下 G54 钢样品的自由面粒子速度波形, 如图 5 所示。各自自由面粒子速度曲线中均可观察到典型的弹性前驱波、塑性冲击波(相变冲击波)以及层裂卸载波形, 与图 1 和图 2 所示的分析波形一致, 除 660 m/s 弹速的实验未产生相变外, 其他实验中 G54 钢材料都发生了相变, 可观察到相变逐步完成及相变波速不断提升的过程。

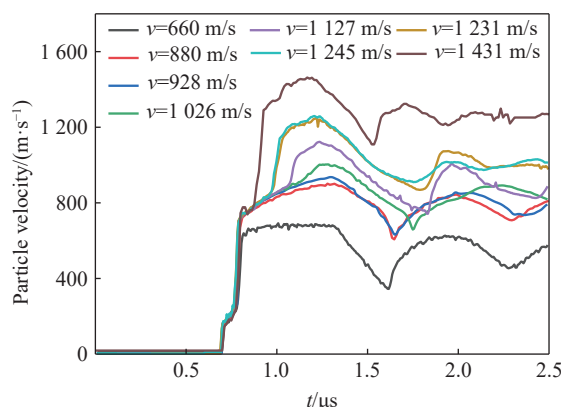


图 5 自由面粒子速度波形汇总

Fig. 5 Summary for free surface particle velocity

2.3 动高压特性数据处理

参考典型波形试验^[11]中各物理量的含义及数据处理方法,对实验结果进行处理。典型波形及各物理量的含义如图 6 所示。

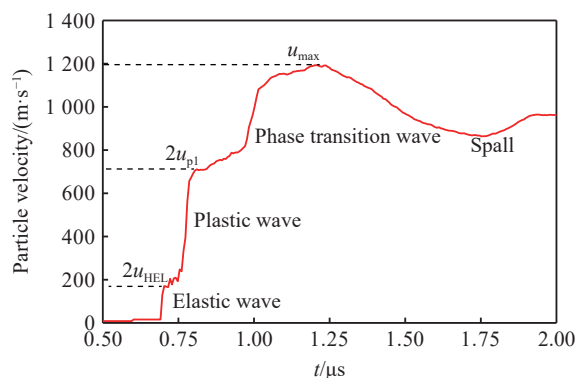


图 6 典型波形及物理量含义

Fig. 6 Typical waveforms and meanings of physical quantities

Hugoniot 弹性极限 σ_{HEL} 为

$$\sigma_{\text{HEL}} = \rho_0 C_e u_{\text{HEL}} \quad (6)$$

式中: C_e 为弹性前驱波波速,可由常温常压下的纵波波速 C_{L0} 代替; u_{HEL} 为弹性波阵面两侧的粒子速度间断,为自由面粒子速度波形中的 Hugoniot 弹性极限对应的速度拐点的 1/2。

层裂强度为

$$\sigma_{\text{spall}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 (u_{\text{max}} - u_{\text{spall}}) \quad (7)$$

式中: u_{max} 为自由面粒子速度的最大值, u_{spall} 为层裂信号第 1 个谷底的粒子速度。

发生冲击相变的压力为

$$\sigma_{\text{phase}} = \rho_0 C_e u_{\text{HEL}} + \rho_0 C_{\text{pl}} (u_{\text{pl}} - u_{\text{HEL}}) \quad (8)$$

式中: σ_{phase} 为发生冲击相变的压力, C_{pl} 为塑性波速, u_{pl} 为相变拐点对应的粒子速度。塑性波和相变波的波速由探针测得的波形到达时间计算获得。

结合之前获得的密度及声速等材料参数,反推获得材料冲击响应参数,如表 2 所示,其中: D_{PT} 为相变后的冲击波速, u_{p2} 为相变后的粒子速度。

表 2 数据处理结果
Table 2 Results of data processing

No.	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	$\sigma_{\text{phase}}/\text{GPa}$	$\sigma_{\text{spall}}/\text{GPa}$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$u/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{\text{PT}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{\text{p2}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
1	660	3.147 5		5.824 7	4.820	0.306		
2	880	3.058 6		5.067 9	5.041	0.315		
3	928	3.357 4		6.540 7	5.088	0.335		
4	1 026	3.339 8	13.50	7.394 6	4.886	0.342	3.447	0.474
5	1 127	3.591 1	14.55	8.198 5	5.277	0.340	3.938	0.530
6	1 231	3.443 5	14.22	8.175 8	5.274	0.333	4.182	0.589
7	1 245	3.374 9	13.79	6.075 5	5.106	0.329	4.264	0.597
8	1 431	3.155 5	14.54	6.266 5	5.028	0.352	4.673	0.699

根据实验数据, 获得 G54 钢的 Hugoniot 弹性极限 $\sigma_{\text{HEL}}=3.308 5 \text{ GPa}$, 层裂强度 $\sigma_{\text{spall}}=6.693 \text{ GPa}$ 。相较于类似的高强合金钢, 如无钴合金钢(Hugoniot 弹性极限为 2.35 GPa 、层裂强度为 4.07 GPa)^[11] 和 AF1410(Hugoniot 弹性极限为 2.74 GPa 、层裂强度为 4.67 GPa)^[12], G54 钢的屈服强度和层裂强度皆有明显提升。

对 G54 钢的冲击波速度和粒子速度按照相变前和相变后进行分段线性拟合, 可以得到相变前和相变后材料的冲击波速度-粒子速度 ($D-u$) 关系, 如图 7 所示。冲击波速度与粒子速度的线性关系可以表示为

$$D = \begin{cases} 4.524 + 1.636u & u \leq 0.352 \\ 1.051 + 5.278u & u \geq 0.474 \end{cases} \quad (9)$$

式中: D 和 u 的单位均为 km/s 。

2.4 层裂片金相分析

实验中获得了典型的层裂信号, 对层裂片进行了完整回收, 回收的飞片及样品形貌如图 8 所示, 可以看出, 样品沿厚度中线附近层裂, 层裂面上有明显的韧性断裂痕迹。

对回收样品进行了金相分析, 典型结果如图 9 所示。当飞片速度为 660 m/s 时, 样品层裂面附近未观察到绝热剪切相关的层裂破坏, 仅观察到微孔洞和孔洞聚合, 说明破坏前经历了微塑性变形, 损伤迅速钝化, 最终以微孔洞聚合的韧性破坏为主。当飞片速度增大到 880 m/s 时, 样品层裂面附近既存在微孔洞聚合主导的韧性破坏, 也存在微孔洞通过绝热剪切带连接聚合后形成的损伤带, 表明此时 2 种韧性损伤机制处于竞争状态。当飞片速度进一步增大到 1245 m/s 时, 层裂面的绝热剪切相关性进一步增强, 主层裂附近观察到未充分扩展的绝热剪切明亮带, 表明此时层裂损伤已经转变为由绝热剪切主导的韧性损伤。当飞片速度达到 1431 m/s 时, 层裂面两侧均可观察到明显的绝热剪切明亮带。

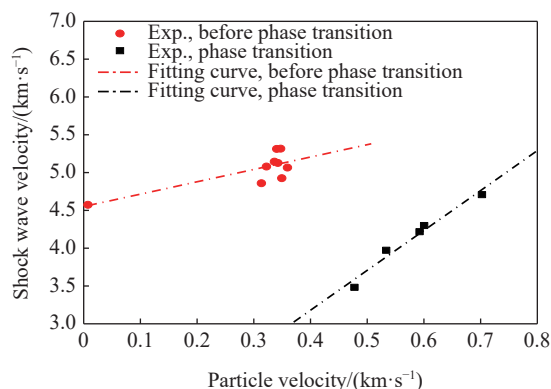


图 7 冲击波速度-粒子速度关系

Fig. 7 Shock wave velocity versus particle velocity

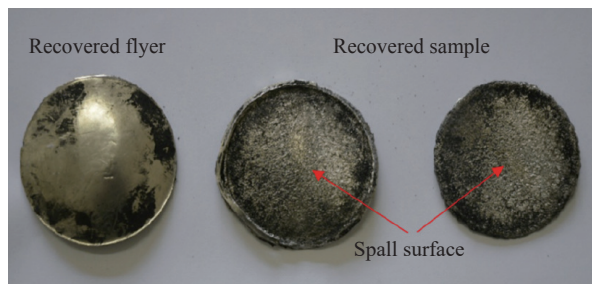


图 8 回收飞片及样品形貌

Fig. 8 Morphology of the recovered flyer and samples

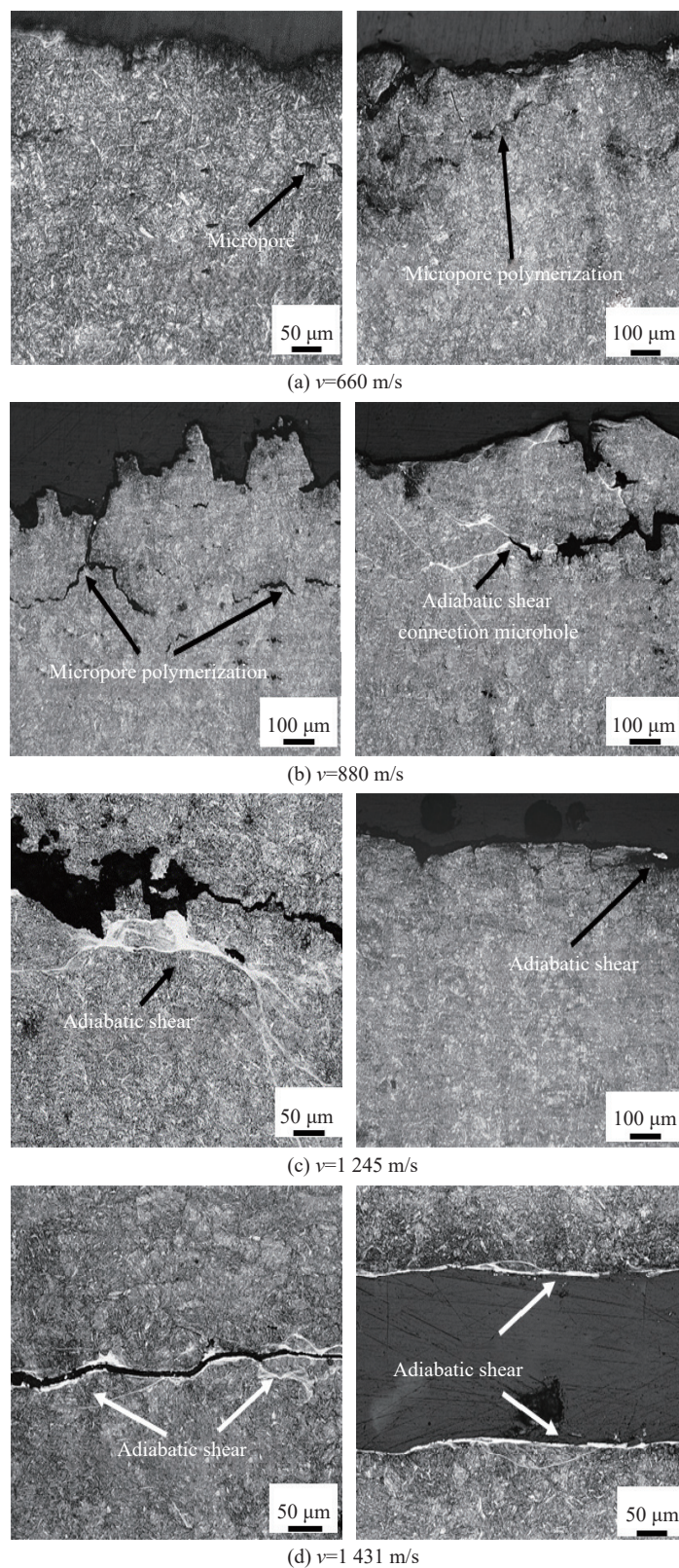


图 9 回收样品的金相照片

Fig. 9 Metallographic photograph of recovered sample

3 结 论

通过开展 G54 钢的飞片对称碰撞实验, 获得了飞片速度为 600~1400 m/s、冲击压力为 13~23 GPa 条件下, G54 钢的典型冲击相变及层裂信号, 得到以下主要结论:

(1) G54 钢的 Hugoniot 弹性极限 $\sigma_{\text{HEL}}=3.3085$ GPa, 层裂强度 $\sigma_{\text{spall}}=6.693$ GPa, 较类似材料强度有显著提升;

(2) G54 钢在 352~472 m/s 粒子速度范围内存在显著的相变过程, 相变前后的状态方程参数存在显著差异, 按照相变前和相变后进行分段线性拟合, 得到 G54 钢的 $D-u$ 关系在相变前为 $D=4.524+1.636u$, 相变后为 $D=1.051+5.278u$;

(3) 通过对回收样品进行金相分析, 可以明显观察到 G54 钢的层裂损伤主导机制从微孔洞聚合的韧性损伤向绝热剪切主导的韧性损伤转变的过程。

实验结果可为 G54 钢的高压性能研究及应用推广提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 李先雨. M54 钢的静动态力学行为及毁伤效应研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2022: 1-17.
LI X Y. Investigation on static and dynamic mechanical behaviors and damage effect of the M54 steel [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2022: 1-17.
- [2] 秦玉荣, 苏杰, 杨卓越, 等. 三种超高强度钢的动态力学性能 [J]. 金属热处理, 2014, 39(12): 83-86.
QIN Y R, SU J, YANG Z Y, et al. Dynamic mechanical properties of three kinds of ultrahigh strength steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(12): 83-86.
- [3] 冯九胜. 四类高强钢的冲击韧性和平面应变断裂韧性研究 [J]. 中国材料进展, 2018, 37(4): 313-316.
FENG J S. Study on impact toughness and plane strain fracture toughness of four kinds of high-strength steels [J]. Materials China, 2018, 37(4): 313-316.
- [4] 谭华. 实验冲击波物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
TAN H. Experimental shock wave physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.
- [5] 谭叶, 俞宇颖, 戴诚达, 等. 反向碰撞法测量 Bi 的低压 Hugoniot 数据 [J]. 物理学报, 2011, 60(10): 106401.
TAN Y, YU Y Y, DAI C D, et al. Measurement of low-pressure Hugoniot data for bismuth with reverse-impact geometry [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 106401.
- [6] 董石, 孟川民, 肖元陆, 等. 反应气体驱动二级轻气炮技术的初步研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 182-186.
DONG S, MENG C M, XIAO Y L, et al. Preliminary study of two-stage light gas gun using reactive gas as driving energy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(2): 182-186.
- [7] 曹落霞, 胡海波, 陈永涛, 等. 磁驱动飞片加载下纯铁的冲击相变和层裂特性 [J]. 高压物理学报, 2015, 29(4): 248-254.
CAO L X, HU H B, CHEN Y T, et al. Shock-induced phase transition and spallation in pure iron under magnetically driven flyer plate loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015, 29(4): 248-254.
- [8] 张万甲, 杨中正. 93 钨合金断裂特性研究 [J]. 高压物理学报, 1995, 9(4): 279-288.
ZHANG W J, YANG Z Z. Studies on the fracture behaviour for 93 tungsten alloy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1995, 9(4): 279-288.
- [9] KINSLOW R. High-velocity impact phenomena [M]. New York: Academic Press, 1970.
- [10] 裴晓阳, 彭辉, 贺红亮, 等. 延性金属层裂自由面速度曲线物理涵义解读 [J]. 物理学报, 2015, 64(3): 034601.
PEI X Y, PENG H, HE H L, et al. Discussion on the physical meaning of free surface velocity curve in ductile spallation [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 034601.
- [11] 桂毓林, 王彦平, 刘仓理, 等. 无钴合金钢的冲击响应实验研究 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(2): 127-131.
GUI Y L, WANG Y P, LIU C L, et al. An experimental study on shock response of no-Co steel [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 127-131.
- [12] 桂毓林, 刘仓理, 王彦平, 等. AF1410 钢的层裂断裂特性研究 [J]. 高压物理学报, 2006, 20(1): 34-38.

GUI Y L, LIU C L, WANG Y P, et al. Spall fracture properties of AF1410 steel [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(1): 34–38.

Experimental Study on Dynamic High Pressure Properties of G54 Steel

WANG Bo¹, PEI Hongbo¹, LI Xuhai¹, GAO Qi², HE Yu¹, CHEN Yonglong¹, GUI Yulin¹

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;*

2. *Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China*)

Abstract: G54 steel is a new type of ultra-high strength steel independently developed in China, which has strong potential application value. In order to study the dynamic high-pressure performance of the material and provide data support for its application and popularization, the flyer symmetric impact experiments of G54 steel were conducted by using artillery as loading means. The experimental flyer velocities ranged from 600 m/s to 1 400 m/s. By measuring the velocity-time history of particles on the back surface of G54 steel samples, the typical impact transformation and spallation signals were obtained. By analyzing particle velocities, material density and sound velocity measurements, the Hugoniot elastic limit, spallation strength, shock wave velocity-particle velocity ($D-u$) relationship and impact transformation point of G54 steel under impact pressure of 13–23 GPa were obtained. The metallographic analysis results of the recovered sample show that the damage mechanism of the spallation surface changes from ductile fracture dominated by micropore polymerization to ductile fracture dominated by adiabatic shear with the increase of flyer velocity.

Keywords: G54 steel; symmetric collision experiment; Hugoniot elastic limit; shock wave velocity-particle velocity relation; spall strength