

高压物理学报

冲击加载-卸载-再加载条件下Cr-Ni-Mo钢的层裂损伤

洪逸非 李绪海 吴凤超 张昭国 张建 陈森 王媛 俞宇颖 胡建波

Spall Damage of Cr-Ni-Mo Steel under Shock-Release-Reloading Conditions

HONG Yifei, LI Xuhai, WU Fengchao, ZHANG Zhaoguo, ZHANG Jian, CHEN Sen, WANG Yuan, YU Yuying, HU Jianbo

引用本文:

洪逸非, 李绪海, 吴凤超, 等. 冲击加载-卸载-再加载条件下Cr-Ni-Mo钢的层裂损伤[J]. 高压物理学报, 2024, 38(5):054101.

DOI: 10.11858/gywlb.20240757

HONG Yifei, LI Xuhai, WU Fengchao, et al. Spall Damage of Cr-Ni-Mo Steel under Shock-Release-Reloading Conditions[J].

Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5):054101. DOI: 10.11858/gywlb.20240757

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240757>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

飞秒激光驱动超高应变率加载下铝材料的层裂特性

The Spallation Characteristics of Al under Ultra-High Strain Rate Loading Driven by Femtosecond Laser

高压物理学报. 2022, 36(3): 034102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210904>

不同波形加载下[100]单晶铝层裂破坏的分子动力学模拟研究

Molecular Dynamics Simulation Study on Spallation Failure of [100] Single Crystal Aluminum under Different Waveform Loadings

高压物理学报. 2024, 38(3): 030106 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240786>

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>

强冲击下金属材料动态损伤与破坏的分子动力学模拟研究进展

Research Progress on Dynamic Damage and Failure of Metal Materials under Shock Loading with Molecular Dynamics Simulation

高压物理学报. 2021, 35(4): 040101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210747>

冲击载荷下Ni₅₂Ti₄₈合金的微观响应特性

Micro-Scale Response Characteristics of Ni₅₂Ti₄₈ Alloy under Shock Loading

高压物理学报. 2021, 35(4): 040107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210769>

平板撞击和磁驱动加载下铈镧合金的相变

Phase Transition of Cerium-Lanthanum Alloys under Planar Impact and Magnetically Driven Ramp Loading

高压物理学报. 2022, 36(6): 061102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220607>

冲击加载-卸载-再加载条件下 Cr-Ni-Mo 钢的层裂损伤

洪逸非^{1,2}, 李绪海², 吴凤超², 张昭国², 张 建¹, 陈 森², 王 媛², 俞宇颖², 胡建波²

(1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 基于一级轻气炮加载技术, 利用不同类型的多层复合飞片, 实现了冲击加载-卸载-再加载路径, 结合回收表征以及一维流体力学模拟, 对 Cr-Ni-Mo 钢在冲击加载-卸载-再加载路径下的层裂损伤行为进行了深入研究。结果表明, 在冲击加载-卸载-再加载路径下, 层裂面会重新闭合并形成微损伤带, 而孔洞位置仍然位于原奥氏体边界和板条群边界处, 裂纹仍保持穿晶+沿晶的混合断裂模式。此外, 第 1 层飞片与样品之间存在的较大阻抗差异会导致自由面速度中的再加载信号缺失。这些发现为深入理解 Cr-Ni-Mo 钢在复杂加载路径下的层裂行为提供了重要参考。

关键词: Cr-Ni-Mo 钢; 层裂; 冲击加载; 再加载; 加载路径

中图分类号: O346.4; O521.2

文献标志码: A

Cr-Ni-Mo 低合金钢以其优异的强度和韧性被广泛应用于航空航天、汽车、武器等各个领域^[1-4]。在极端服役条件下, 材料可能承受强冲击载荷, 层裂破坏是冲击载荷作用下典型的损伤失效模式^[5-6]。层裂破坏是由于两个传播方向相反的稀疏波在材料内部相遇, 叠加的拉伸应力达到材料破坏极限时引起材料破坏^[7]。对 Cr-Ni-Mo 高强钢在高应变率荷载下的动态层裂损伤失效进行研究具有重要的工程意义。截至目前, 已有大量研究探讨了多种因素, 如峰值应力^[8]、拉应力历史^[9]、各向异性^[10]、显微组织^[11]等, 对不同类型钢材料层裂行为的影响。在实际服役工况下, 影响层裂的因素很少是孤立的, 且在某些工况下存在二次加载^[12]。然而, 目前对多次加-卸载路径下层裂行为的研究大多数集中于 Cu 和 Ta 等韧性金属。Jones 等^[13]通过在单层飞片后粘接一个阻抗更高的再加载层实现了对层裂后 Cu 靶的再压实, 研究表明, 二次压缩加载可以使 Cu 靶完全压紧至零孔隙率状态, 同时在该过程中还出现层裂面再结晶现象。Hawkins 等^[14]采用单层和叠层飞片对 Cu 进行了一系列层裂及再压缩实验, 并与模拟进行对照, 发现再加载后的重新压实程度取决于再加载时的峰值应力。Gray 等^[15]采用对称碰撞和 2 种不同的叠层飞片结构, 将 Ta 样品加载到 3 种不同的峰值冲击应力, 发现自由面速度显示了类似典型层裂的“回拉”信号, 但回收后样品的形态差异较大。到目前为止, 合金钢的层裂再加载行为未见相关研究, 其变形机制也不明确。

为此, 本研究基于一级轻气炮加载技术, 通过设计多层复合飞片, 实现对 Cr-Ni-Mo 合金钢的冲击加载-卸载-再加载, 结合对回收样品的表征分析、一维流体力学模拟计算, 以揭示非简单冲击荷载下 Cr-Ni-Mo 合金钢的微观损伤机理和模式及其波系作用机制。

* 收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3802303)

作者简介: 洪逸非(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事材料动态力学行为研究. E-mail: 317422@whut.edu.cn

通信作者: 李绪海(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事冲击波物理研究. E-mail: lixuhai@caep.cn

胡建波(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高压物理与力学研究. E-mail: jianbo.hu@caep.cn

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本实验所用材料为经过热处理的 Cr-Ni-Mo 钢。图 1 给出了其腐蚀后的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)照片和电子背散射衍射(electron back scattering diffraction, EBSD)表征结果。图 1(a) 表明, 样品的初始微观组织为典型的板条状马氏体组织, 具有多层级的显微组织结构。该多层级结构由原奥氏体晶粒(prior Austenitic grains, PAGs)组成, 每一个原奥氏体晶粒又由多个马氏体板条群(packet)构成, 每一个马氏体板条群则对应于马氏体相变过程中激活的一种相变变体。进一步地, 马氏体板条群由具有特定晶体取向、平行的板条束(block)组成^[16]。图 1(b) 中的反极图(inverse pole figure, IPF)显示, PAG 的平均尺寸约为 35 μm 。通过阿基米德排水法, 测得样品的初始密度 ρ_0 为 7.78 g/cm³。通过超声脉冲回波传输法测量了样品声速, 得到其纵波声速 C_L 为 5.96 km/s, 横波声速 C_T 为 3.19 km/s。根据公式 $C_T = \sqrt{C_L^2 - 4C_B^2}/3$ ^[17], 计算得到其体波声速 C_B 为 4.69 km/s。

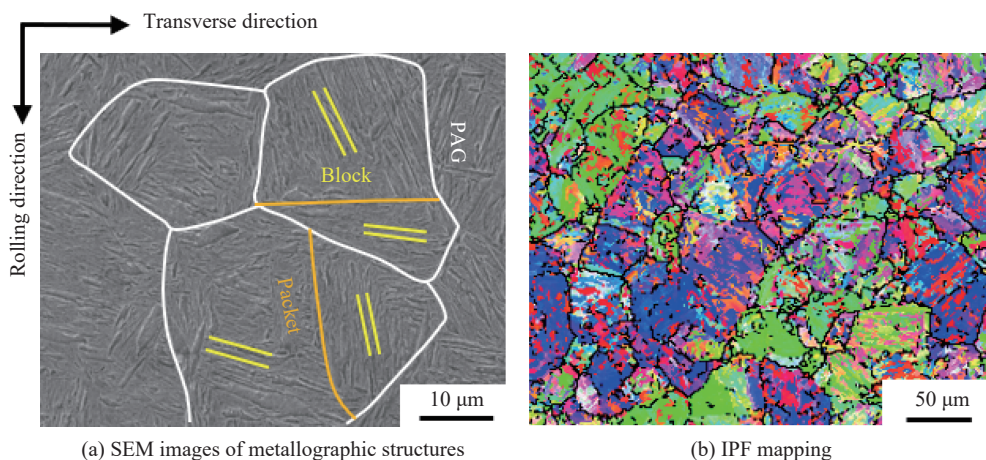


图 1 马氏体钢原始样的显微组织表征

Fig. 1 Microstructural characterizations of the martensitic steel

1.2 实验方法

基于 14 mm 口径一级轻气炮开展了 Cr-Ni-Mo 钢在加载-卸载-再加载路径下的层裂再压缩实验。图 2 为平板撞击实验装置示意图。将经过专门设计的叠层飞片粘接在聚碳酸酯弹托上, 通过高压压缩气体对飞片和弹托整体加速, 在靶室内平面碰撞样品。在膛口位置安装磁测速装置, 用于测量撞击前飞片的速度。采用多普勒光纤测速系统(Doppler pins system, DPS)记录样品后表面的自由面粒子速度历史。飞片直径为 13.0 mm, 样品直径为 12.0 mm, 将样品安装在样品环上。由于样品尺寸小于飞片尺寸, 因此, 撞击后样品环将阻挡飞片继续飞行, 以避免飞片对样品二次碰撞而影响样品回收。同时, 样品环还能够避免边侧稀疏波作用对样品产生干扰。样品由填充软材料的回收桶回收, 经切割、磨抛、腐蚀处理后进行相应的表征。

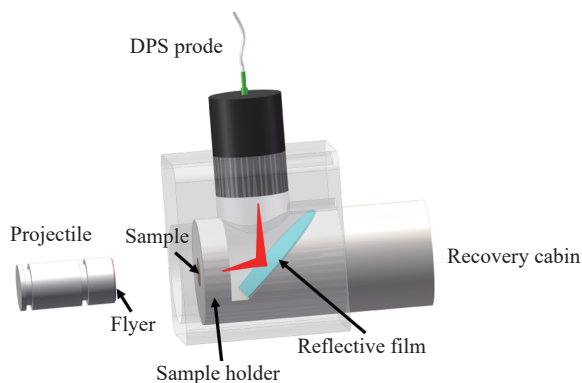


图 2 平板撞击实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the plate-impact experiment

1.3 多层复合飞片设计

为了实现对样品的冲击加载-卸载-再加载, 设计了“高-低-高”阻抗组合的多层复合飞片, 其构型如图 3(a) 和图 3(b) 所示。在构型 A 中: 采用高纯无氧铜飞片作为第 1 层飞片材料; 低阻抗聚碳酸酯(PC) 作为第 2 层飞片, 以确保卸载压力足够低; 而具有更高阻抗的 Ta 则用于再加载。实验构型 B 中, 除第 1 层飞片材料采用 Ta 以外, 其余 2 层飞片材料与构型 A 相同。如图 3(c) 所示, 实验构型 C 采用单层均质 Cu 飞片, 用于非对称碰撞层裂实验, 以与叠层飞片的复杂加载对比。3 层飞片之间采用环氧树脂胶粘合, 以确保飞片在加速和飞行阶段的整体强度。

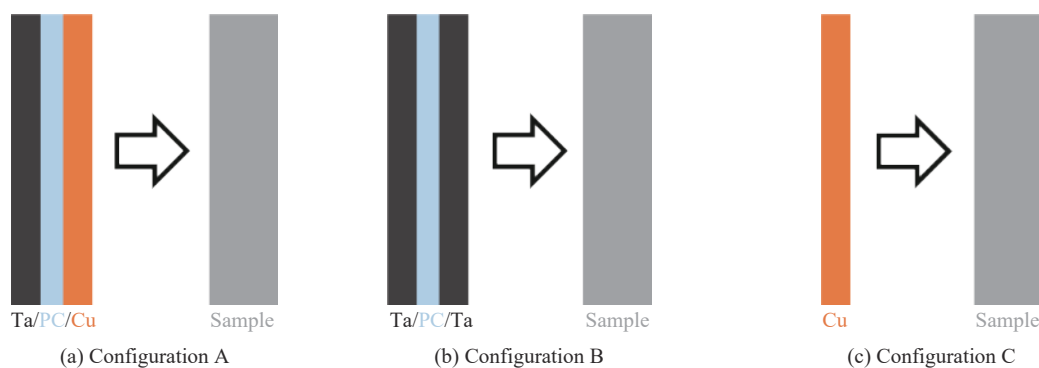


图 3 用于层裂和层裂再压缩的实验构型(通过“高-低-高”阻抗组合飞片设计实现对样品的冲击加载-卸载-再加载, 样品为 Co-Ni-Mo 低合金马氏体钢)

Fig. 3 Layered flyers composed of high-low-high impedance materials for spall and spall recompression experiments (Sample: Co-Ni-Mo low alloy martensitic steel)

2 结果与讨论

2.1 自由面速度解析

利用不同类型的复合飞片在同一碰撞速度下进行一系列平板撞击实验, 获得了相应的自由面速度历史数据, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 自由面速度时程曲线可以分为动态压缩、拉伸、层裂以及随后的再压缩过程, 由 $O \sim I$ 标记。 OA 代表弹性前驱波, A 点表示 Hugoniot 弹性极限 (Hugoniot elastic limit, HEL)。随后的塑性波 BC 逐渐发展成为稳定的应力峰值平台 (CD)。当冲击波到达样品自由面时反射稀疏波, 自由面速度开始下降 (DE)。该稀疏波与飞片自由面反射的稀疏波具有相反的传播方向。当两列稀疏波在样品中心交汇时, 在样品内部产生拉伸应力区。当拉伸应力足够大时, 样品内部发生层裂, 形成新的界面。新界面的出现导致压缩波形成并向自由面传播, 致使自由面速度再次上升 (EF)。随后的振荡周期为典型的层裂信号^[18]。1.2 μs 时自由面速度上升 (HI) 与层裂信号不同, 是由再加载层的 Ta 飞片产生的压缩波导致的。Ta/PC/Ta 飞片加载后的信号中未观察到再加载信号, 这与飞片及样品阻抗不匹配有关, 详细讨论见 2.3 节。

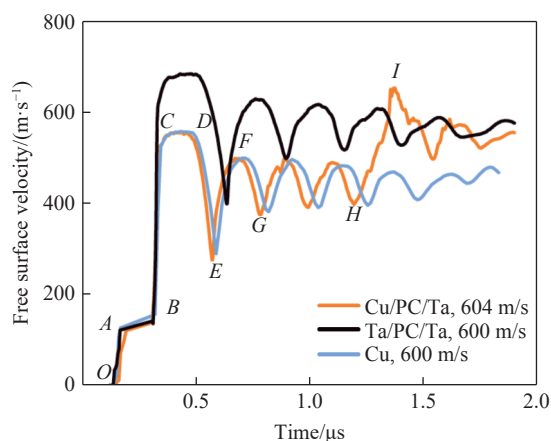


图 4 不同飞片加载下的自由面速度历史

Fig. 4 Free surface velocity histories of experiments with different flyers

给定冲击波状态下的波后应力 σ_i 和密度 ρ_i 可以用文献 [19] 所述方法计算

$$\sigma_i - \sigma_{i-1} = \rho_{i-1} (u_{p,i} - u_{p,i-1})(u_{s,i} - u_{p,i-1}) \quad (1)$$

$$\rho_i = \frac{\rho_{i-1} (u_{s,i} - u_{p,i-1})}{u_{s,i} - u_{p,i}} \quad (2)$$

式中: i 取 0、1、2, 分别代表未冲击状态、弹性冲击状态(点 A)以及塑性冲击状态(点 C); u_p 和 u_s 分别为粒子速度和冲击波波速。各个冲击态对应的粒子速度可以通过 $u_{fs}/2$ 估计, 其中 u_{fs} 为自由面速度。对于初始状态($i=0$), 峰值应力和粒子速度为零, ρ_0 为样品的初始密度。弹性波($i=1$)相对较弱, 其波速可以近似为常压条件下的纵波声速 C_L 。

对于塑性阶段的冲击波波速, $u_{s,2}$ 可以由下式导出

$$u_{s,2} = \frac{d_s}{\frac{d_s}{u_{s,1}} + \Delta t} \quad (3)$$

式中: d_s 为样品厚度, Δt 为弹性波和塑性波到达自由面的时间差。

由于难以直接测量样品内部应力, 通常通过声学近似方法从测量的 $u_{fs}(t)$ 中获得层裂强度^[20]

$$\sigma_{sp} = \rho_0 C_L \Delta u \frac{1}{1 + \frac{C_L}{C_B}} \quad (4)$$

式中: σ_{sp} 为层裂强度, Δu 为图 4 中点 D 的自由面速度与点 E 的自由面速度之差, C_B 为常压条件下的体波声速。

冲击加载实验的各项参数及计算结果见表 1, 其中: d_f 为飞片厚度, d_s 为样品厚度, u_{imp} 为飞片加载速度, σ_H 为峰值应力。

表 1 平板撞击实验参数及结果
Table 1 Parameters and results of plate-impact experiments

Shot No.	Flyer	d_f/mm	d_s/mm	$u_{imp}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	σ_H/GPa	σ_{sp}/GPa
1	Cu/PC/Ta	0.51/0.40/0.50	1.21	604	9.34	5.79
2	Ta/PC/Ta	0.50/0.39/0.50	1.20	600	12.27	5.82
3	Cu	0.50	1.19	600	9.32	5.48

2.2 样品回收表征与分析

为了研究靶板的内部变形、损伤行为及其微观机制, 对回收样品进行了光学显微成像分析。采用电火花切割技术将回收样品沿直径方向切割, 并对其剖面进行表面研磨和抛光, 最后利用光学显微镜(optical microscope, OM)对样品横截面上的损伤分布特征进行观察和分析。图 5(a)~图 5(d) 为经不同类型飞片加载后样品内部横截面损伤的光学显微照片。可以看出, 在所有样品边缘均出现裂纹, 这是由边侧稀疏波的作用导致的。单层 Cu 飞片加载后, 样品中间位置发生了完全层裂。而经叠层飞片加载后, 样品的中间部分产生由微小裂纹(见图 5(b) 和图 5(c))构成的微损伤带, 如图 5(a) 中白色虚线标注区域所示。

参考文献 [21] 所述方法定义损伤度, 即样品损伤面积与截面面积的比值, 并对损伤度沿撞击面不同距离的变化情况进行统计分析, 结果如图 6 所示。结果表明, 在相同的碰撞速度下, 单层简单飞片加载下样品的损伤度显著大于叠层飞片加载下样品的损伤度。此外, Ta/PC/Ta 飞片加载后样品的微损伤带更靠近样品撞击面。这是由于第 1 层飞片与样品之间的阻抗和波速特性差异较大, 导致稀疏波交汇位置显著不同, 从而影响层裂面位置。

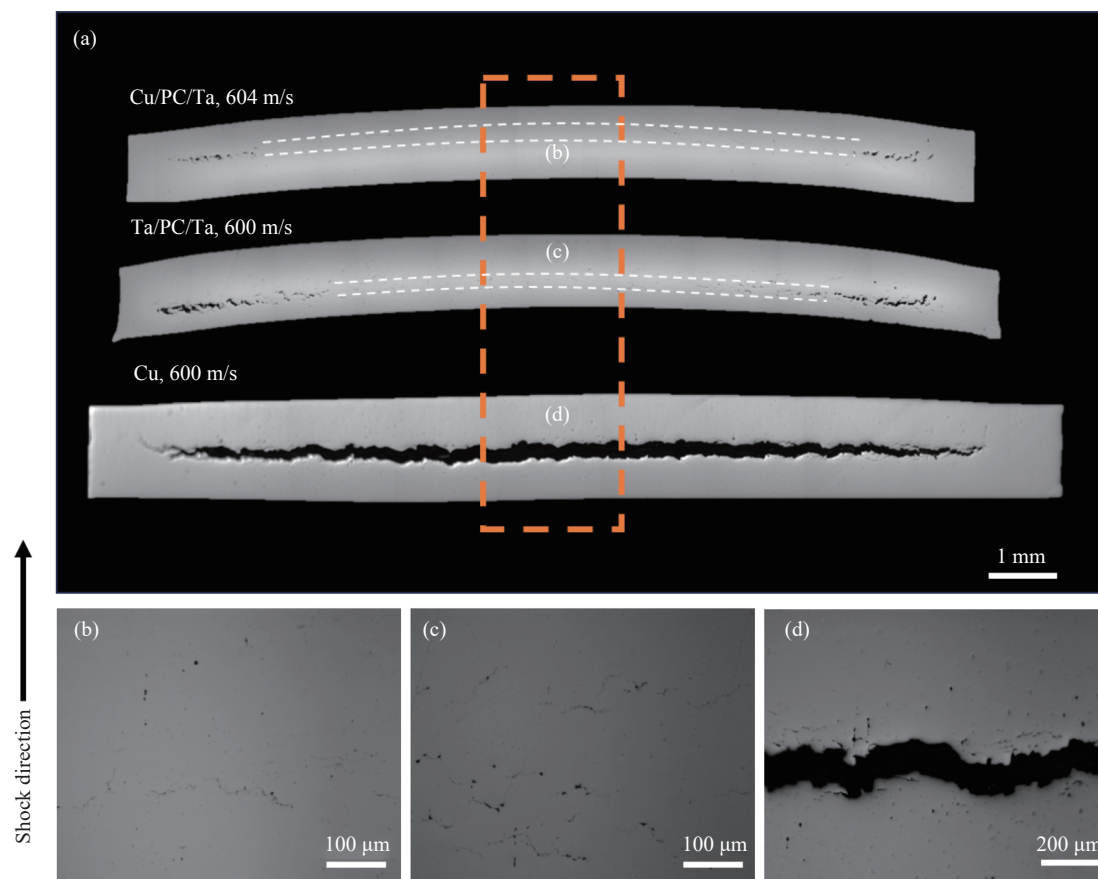


图 5 (a) 回收样品整体光学显微镜照片, (b)~(d) Shot 1、Shot 2 和 Shot 3 的局部光学显微镜照片

Fig. 5 (a) Optical microscope photographs of the recovered samples; (b)~(d) zoom-in views for Shot 1, Shot 2 and Shot 3

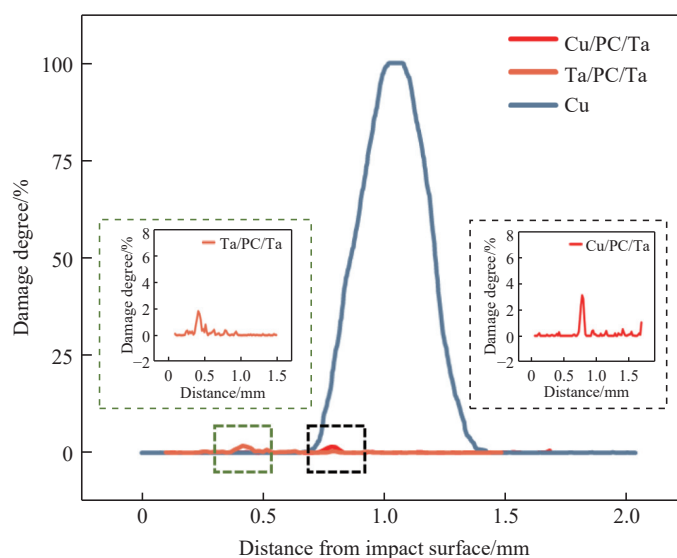


图 6 沿撞击方向不同位置的损伤度分布

Fig. 6 Damage degree as a function of distance from the impact surface for different shots

为了进一步探究损伤机理, 利用 EBSD 对回收样品的横截面区域进行表征, 结果如图 7 所示。对于单层 Cu 飞片加载的样品(见图 7(h)), 其裂纹沿着不同晶界类型扩展, 包括原奥氏体晶界和马氏体板条群边界。同时, 还观察到剪切裂纹(白色框线), 其路径与显微组织无关。对于经叠层飞片加载的回收样品(见图 7(b) 和图 7(e)), 其内部孔洞在原奥氏体晶界处和板条群边界处形核(见白色圆圈), 且裂

纹沿着相同路径扩展, 与简单飞片加载的样品相比, 该样品中未观察到剪切裂纹。Kernel 平均取向差 (Kernel average misorientation, KAM) 图 (见 图 7(c)、图 7(f) 和 图 7(i)) 显示, 所有样品在裂纹附近及孔洞周围都存在较为严重的塑性变形, 这种局域化的塑性变形有利于孔洞的成核、生长和连通, 并最终导致裂纹的形成和传播^[22]。层裂再压实后的孔洞位置与形貌未发生显著改变, 表明当前再加载的压力水平并未使孔洞完全闭合。

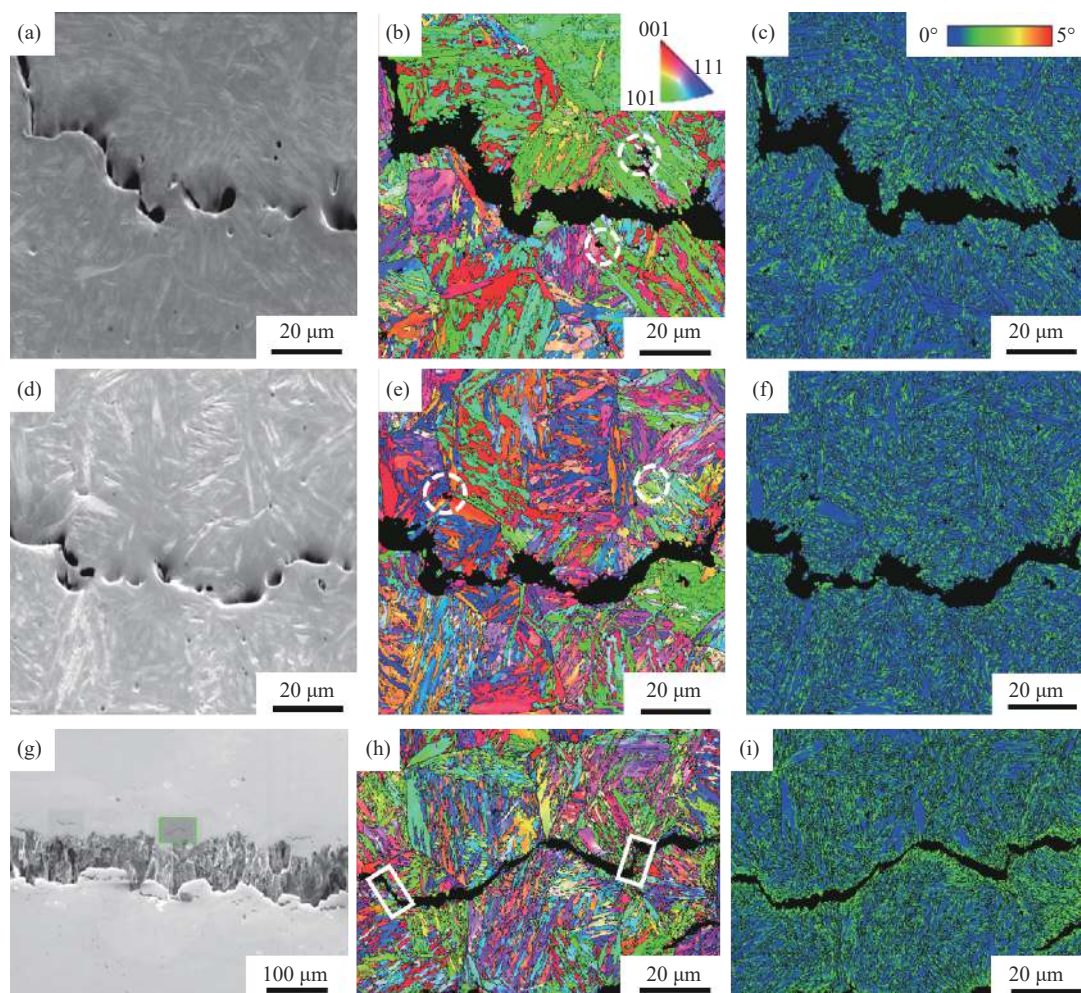


图 7 不同类型飞片加载后马氏体钢的显微组织: (a)~(c) Shot 1 中样品的局部 SEM 照片及其对应的 IPF 图和 KAM 图, (d)~(f) Shot 2 中样品的局部 SEM 照片及其对应的 IPF 图和 KAM 图, (g)~(i) Shot 3 中样品的局部 SEM 照片及其对应的 IPF 图和 KAM 图

Fig. 7 Microstructural characteristics of the recovered samples for different shots: (a)~(c) SEM micrograph and its IPF and KAM maps of shot 1; (d)~(f) SEM micrograph and its IPF and KAM maps of shot 2; (g)~(i) SEM micrograph and its IPF and KAM maps of shot 3

2.3 波系作用分析

通过一维流体力学模拟分析冲击加载-卸载-再加载路径下 Cr-Ni-Mo 钢的波系结构及相互作用, 计算程序参考文献 [23-24]。

数值模拟中, 材料的压缩特性采用 Mie-Grüneisen 状态方程 (equation of state, EOS) 描述

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{1}{2} \gamma_0 \right) \mu - \frac{1}{2} \alpha \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - \frac{S_2 \mu^2}{\mu + 1} - \frac{S_3 \mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) \bar{E} \quad (5)$$

式中: p 为压力, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 为相对压缩度, c 为零压声速, γ_0 为 Grüneisen 系数, α 、 S_1 、 S_2 、 S_3 为常数, $\bar{E}$ 为单位体积内能。

采用 Steinberg-Guinan 本构模型描述材料在压力条件下的响应, 屈服强度 Y 和剪切模量 G 分别表示为

$$G = G_0 \left[1 + \frac{G'_p}{G_0} \frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (6)$$

$$Y = Y_0 \left[1 + \frac{Y'_p}{Y_0} \frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right] (1 + \beta \varepsilon)^n \quad (7)$$

式中: Y_0 和 G_0 分别为初始屈服强度和初始剪切模量; T 为温度 (单位 K); β 和 n 分别为材料的应变硬化系数和硬化指数; $\eta = v_0/v$ 为材料的压缩比, v_0 和 v 分别为初始比容和当前比容; G'_p 为 G 关于 p 的导数, 即 dG/dp ; G'_T 为 G 关于 T 的导数, 即 dG/dT ; Y'_p 为 Y 关于 p 的导数, 即 dY/dp 。

Mie-Grüneisen 状态方程参数见 表 2。Steinberg-Guinan 本构模型参数见 表 3。

表 2 Cr-Ni-Mo 钢的 Mie-Grüneisen 状态方程参数
Table 2 Mie-Grüneisen EOS parameters for Cr-Ni-Mo steel

$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	γ_0	S_2	S_3
7.78	4.69	1.49	1.93	0	0

表 3 Cr-Ni-Mo 钢的 Steinberg-Guinan 本构模型参数
Table 3 Steinberg-Guinan constitutive model parameters for Cr-Ni-Mo steel

Y_0/GPa	$Y_{\max}/\text{GPa}$	G_0/GPa	β	n	G'_p	$G'_T/(\text{GPa} \cdot \text{K}^{-1})$	Y'_p
1.5	3	77	43	0.35	1.74	-3.5×10^{-3}	7.7×10^{-3}

不同类型飞片加载后样品的自由面速度历史及应力分布演变如图 8 所示。单层 Cu 飞片与 Ta/PC/Ta 飞片加载下自由面速度历史呈现典型的层裂振荡信号, 而 Cu/PC/Ta 飞片加载下自由面速度历史出现再加载信号 (图 8(a)), 与实验结果一致。

3 种不同飞片加载下样品的最大拉伸应力区均靠近样品中心, 约在撞击后的 $0.4 \mu\text{s}$ 产生, 这是由第 1 层飞片造成的。飞片与靶材撞击后会在飞片中产生左行的压缩波, 压缩波穿过 PC 层到达 Ta 层后会反射压缩波并向靶材传播, 压缩波到达样品碰撞面时会导致样品发生再压缩, 如图 8(b) 和 图 8(c) 所示。Cu/PC/Ta 飞片加载下样品中再加载的压缩波会传到自由面, 而 Ta/PC/Ta 飞片加载下样品中没有出现此现象, 这是由于第 1 层飞片与样品阻抗失配。应力波在不同介质界面上的反射和透射关系^[25] 为

$$\begin{cases} m = \frac{(\rho_0 C_0)_1}{(\rho_0 C_0)_2} \\ A = \frac{1-m}{1+m} \\ B = \frac{2}{1+m} \end{cases} \quad (8)$$

式中: 下标 1 和 2 代表两种不同介质; m 为两种介质的阻抗比; A 和 B 分别为反射系数和透射系数, 完全由 m 确定。

Ta、Cu 和钢的阻抗分别为 5.69 、 3.49 和 $3.65 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{s})$, Ta 与 Cu 的阻抗差大于 Ta 与钢的阻抗差, 导致钢的透射波强度小于 Cu。因此, Cu/PC/Ta 飞片加载样品时, 再加载的压缩波能传播至自由面, 如图 8(b) 所示; 而 Ta/PC/Ta 飞片加载样品时, 再加载的压缩波只能传播至样品碰撞面, 如图 8(c) 所示。在宏观上表现为 Cu/PC/Ta 飞片加载样品时, 自由面速度在 $1.1 \mu\text{s}$ 时再次上升, 产生再加载信号, 同时层裂面被重新压实; 而 Ta/PC/Ta 飞片加载样品时, 层裂面被重新压实, 自由面速度只呈现层裂振荡信号。

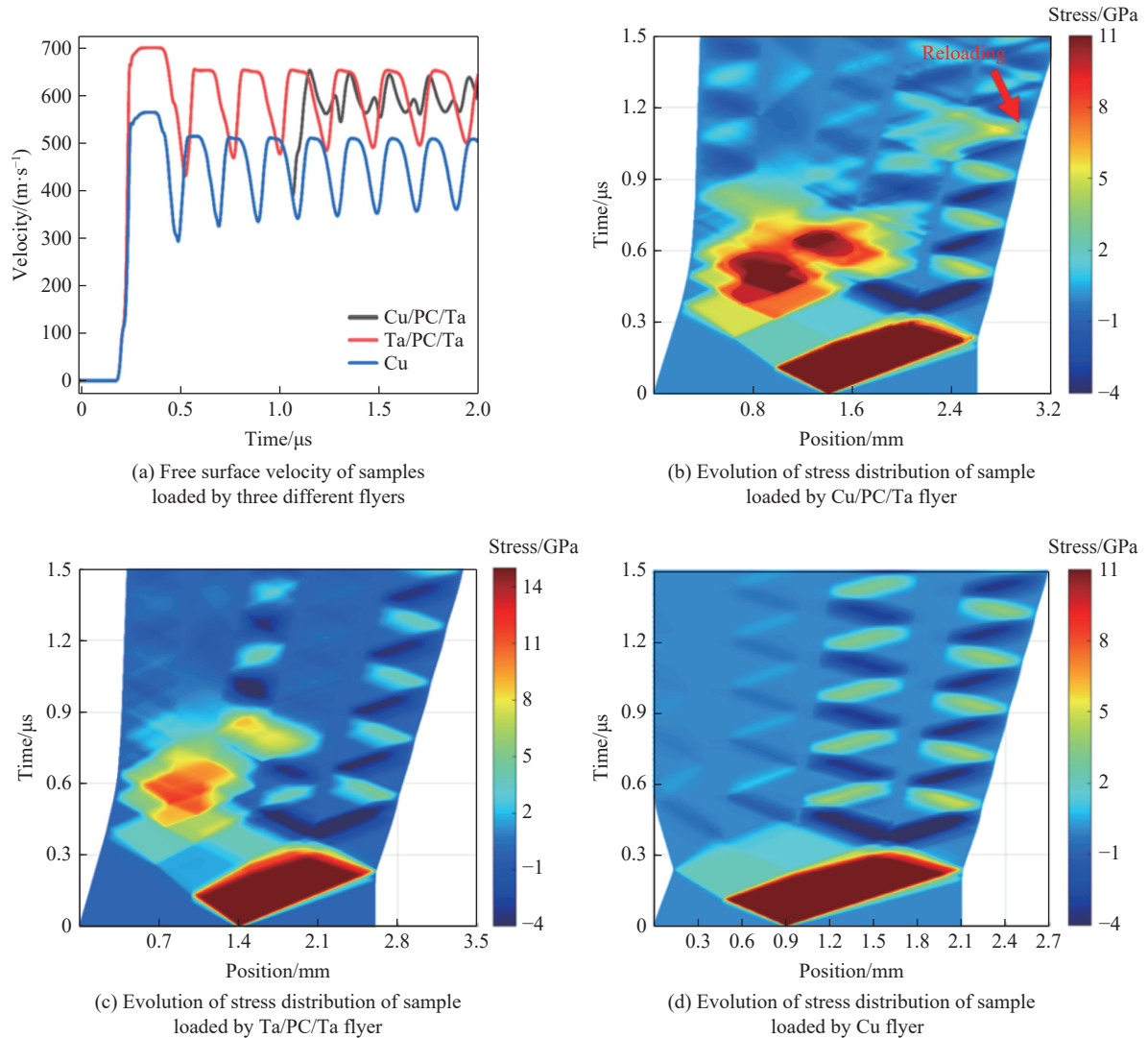


图 8 一维流体力学模拟结果

Fig. 8 One-dimensional hydrodynamics simulation results

3 结 论

采用不同类型的叠层飞片, 结合一级轻气炮加载技术、回收表征以及基于一维流体力学模拟的波系分析, 对 Cr-Ni-Mo 钢在冲击加载-卸载-再加载路径下的层裂特性进行了探索, 得到以下结论:

- (1) 冲击加载-卸载-再加载路径下, Cr-Ni-Mo 钢的层裂面会重新闭合, 并产生一条由微裂纹组成的微损伤带;
- (2) 重新压实后的孔洞仍位于原奥氏体边界和板条群边界处, 裂纹仍然保持兼具穿晶与沿晶断裂特性的混合损伤模式;
- (3) “高-低-高”阻抗组合的多层复合飞片加载样品时, 第 1 层飞片与样品之间过大的阻抗差异会导致自由面速度信号中的再加载信号缺失, 这是由于阻抗失配导致应力波透射强度衰减。

参考文献:

- [1] DU Y F, LU H H, SHEN X Q. Coupled effects of banded structure and carbide precipitation on mechanical performance of Cr-Ni-Mo-V steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832: 142478.

- [2] HAI C, ZHU Y T, FAN E D, et al. Effects of the microstructure and reversed austenite on the hydrogen embrittlement susceptibility of Ni-Cr-Mo-V/Nb high-strength steel [J]. *Corrosion Science*, 2023, 218: 111164.
- [3] ZHAO X Y, LI H J. Experimental study on the dynamic behavior of a Cr-Ni-Mo-V steel under different shock stresses [J]. *Metals*, 2023, 13(4): 663.
- [4] MAROPOULOS S, RIDLEY N, KARAGIANNIS S. Structural variations in heat treated low alloy steel forgings [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 380(1/2): 79–92.
- [5] JONES D R, FENSIN S J, NDEFURU B G, et al. Spall fracture in additive manufactured tantalum [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(22): 225902.
- [6] ZHANG N B, XU J, FENG Z D, et al. Shock compression and spallation damage of high-entropy alloy $\text{Al}_{0.1}\text{CoCrFeNi}$ [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 128: 1–9.
- [7] 蔡洋, 李超, 卢磊. 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 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(4): 040104.
CAI Y, LI C, LU L. Effects of microstructure and loading characteristics on spallation of metallic materials under shock loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(4): 040104.
- [8] LI C, LI B, HUANG J Y, et al. Spall damage of a mild carbon steel: effects of peak stress, strain rate and pulse duration [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 660: 139–147.
- [9] LI C, YANG K, TANG X C, et al. Spall strength of a mild carbon steel: effects of tensile stress history and shock-induced microstructure [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 754: 461–469.
- [10] LI C, HUANG J Y, TANG X C, et al. Effects of structural anisotropy on deformation and damage of a duplex stainless steel under high strain rate loading [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 705: 265–272.
- [11] EUSER V K, JONES D R, MARTINEZ D T, et al. The effect of microstructure on the dynamic shock response of 1045 steel [J]. *Acta Materialia*, 2023, 250: 118874.
- [12] BECKER R, LEBLANC M M, CAZAMIAS J U. Characterization of recompressed spall in copper gas gun targets [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(9): 093512.
- [13] JONES D R, FENSIN S J, MORROW B M, et al. Shock recompaction of spall damage [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(24): 245901.
- [14] HAWKINS M C, THOMAS S A, FENSIN S J, et al. Spall and subsequent recompaction of copper under shock loading [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(4): 045902.
- [15] GRAY G T, BOURNE N K, LIVESCU V, et al. The influence of shock-loading path on the spallation response of Ta [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(11): 112031.
- [16] YU L, XIAO X Z, CHEN L R, et al. A hierarchical theoretical model for mechanical properties of lath martensitic steels [J]. *International Journal of Plasticity*, 2018, 111: 135–151.
- [17] 李英华, 常敬臻, 张林, 等. 氦泡铝的层裂特性实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(5): 054101.
LI Y H, CHANG J Z, ZHANG L, et al. Experimental investigation of spall damage in pure aluminum with helium bubbles [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(5): 054101.
- [18] KANEL G I, UTKIN A V. Estimation of the spall fracture kinetics from the free-surface velocity profiles [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1996, 371(1): 487–490.
- [19] ZHANG N B, LIU Q, YANG K, et al. Effects of shock-induced phase transition on spallation of a mild carbon steel [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 213: 106858.
- [20] KANEL G I. Spall fracture: methodological aspects, mechanisms and governing factors [J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163(1/2): 173–191.
- [21] QI M L, BIE B X, ZHAO F P, et al. A metallography and X-ray tomography study of spall damage in ultrapure Al [J]. *AIP Advances*, 2014, 4(7): 077118.
- [22] CHENG J C, QIN H L, LI C, et al. Deformation and damage of equiatomic CoCrFeNi high-entropy alloy under plate impact loading [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 862: 144432.
- [23] 孙毅, 向士凯, 耿华运, 等. 自动校准的多相状态方程建模方法及其在锡中的应用 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(2): 021301.
SUN Y, XIANG S K, GENG H Y, et al. Automated calibrated modeling method of multiphase equations of states: applied to tin [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(2): 021301.
- [24] WU F C, LI X H, SUN Y, et al. Multi-phase modeling on spall and recompaction process of tin under double shockwaves [J].

[The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences](#), 2023, 26(3): 1.

[25] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 45–47.

WANG L L. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 45–47.

Spall Damage of Cr-Ni-Mo Steel under Shock-Release-Reloading Conditions

HONG Yifei^{1,2}, LI Xuhai², WU Fengchao², ZHANG Zhaoguo², ZHANG Jian¹, CHEN Sen²,
WANG Yuan², YU Yuying², HU Jianbo²

(1. *State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;*

2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: In this work, plate-impact experiments, postmortem characterizations and one-dimensional hydrodynamic simulations were conducted to investigate the spall behavior of Cr-Ni-Mo steel under complex shock loading paths. Multi-layer flyers were utilized to generate the complex shock-release-reloading paths. Re-closed spall plane and mitigated damage zones were observed after recompression. Voids nucleate at the austenite grain boundaries and packet boundaries, which is consistent with the observations in single-shock experiments. The damage behavior is characterized by a mixed mode with both transgranular and intergranular characteristics. Moreover, notable impedance mismatch between different flyer layers can lead to the absence of reloading signal in the free surface velocity profiles. These findings can provide us insights into the spall behavior of Cr-Ni-Mo steel under complex loading conditions.

Keywords: Cr-Ni-Mo steel; spall; shock loading; reloading; loading path