

郑哲敏先生逝世周年纪念专刊

$W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金高速侵彻细观结构演化特性¹⁾

陈海华^{*,†} 张先锋^{*,2)} 赵文杰[†] 高志林[†] 刘 闯^{*} 谈梦婷^{*}
熊 玮^{*} 汪海英^{**} 戴兰宏^{**}

^{*}(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

[†](上海机电工程研究所, 上海 201109)

^{**}(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 为了探究 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体在侵彻过程中宏观变形行为与材料微细观结构之间的联系, 基于对两相流动模型的简化, 建立了考虑软、硬相密度、流速以及浓度差异的等截面直管两相流动演化模型. 类比宏观状态下侵彻弹体头部材料的流入流出特性, 选定分析区域, 建立两相细观结构下材料在分析区域的流入流出关系, 再结合细观结构演化方程, 给出了分析区域中浓度演化结果, 提出了表征材料浓度演化速率的流动稳定系数 t/l_{length} . 为了对比不同细观结构弹体的侵彻行为, 选取典型两相材料钨铜合金 ($W_{70}Cu_{30}$), 基于小口径弹道枪发射平台开展两种弹体侵彻半无限钢靶试验, 对比两种合金弹体细观结构演化行为. 结果表明, 硬相浓度分布总体上体现“中心浓, 边缘稀”的特点; 硬相的浓度越高, 密度越大, 驱动速度越快, 则流动稳定系数 t/l_{length} 值越小, 侵彻过程中弹体的流动稳定性越好, 弹体头部材料越容易形成连续的塑性流动带. 等截面直管两相流动演化模型可用于描述侵彻过程中弹体头部材料的流动稳定性, 揭示了侵彻过程中弹体头部变形与细观两相结构之间的关联机制.

关键词 高熵合金, 高速侵彻, 细观结构, 两相流动

中图分类号: O382, TJ410 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-22-128

EFFECT OF MICROSTRUCTURE ON FLOW BEHAVIOR DURING PENETRATION OF $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ HIGH-ENTROPY ALLOY PROJECTILE¹⁾

Chen Haihua^{*,†} Zhang Xianfeng^{*,2)} Zhao Wenjie[†] Gao Zhilin[†] Liu Chuang^{*} Tan Mengting^{*}
Xiong Wei^{*} Wang Haiying^{**} Dai Lanhong^{**}

^{*}(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[†](Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

^{**}(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In order to explore the relationship between the macro deformation behavior of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-

2022-03-25 收稿, 2022-05-31 录用, 2022-06-01 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (11790292, 12141202) 和国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金 (U1730101) 资助项目.

2) 张先锋, 教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: lynx@njjust.edu.cn

引用格式: 陈海华, 张先锋, 赵文杰, 高志林, 刘闯, 谈梦婷, 熊玮, 汪海英, 戴兰宏. $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金高速侵彻细观结构演化特性. 力学学报, 2022, 54(8): 2140-2151

Chen Haihua, Zhang Xianfeng, Zhao Wenjie, Gao Zhilin, Liu Chuang, Tan Mengting, Xiong Wei, Wang Haiying, Dai Lanhong. Effect of microstructure on flow behavior during penetration of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy projectile. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2140-2151

entropy alloy projectile and the micro structure of the material in the penetration, a two-phase flow evolution model of constant cross-section straight pipe is established. The model takes the differences of soft and hard phase density, velocity and concentration into consideration based on the simplification of the two-phase flow model. By analogy with the inflow and outflow characteristics of the materials at the head of the projectile in the macro state, the analysis area is selected. The inflow and outflow relationship of the materials in the analysis area under the two-phase microstructure is established. Combined with the microstructure evolution equation, the concentration evolution results in the analysis area are given. The flow stability coefficient t/l_{length} characterizing the concentration evolution rate of the materials is proposed. In order to compare the penetration behavior of projectiles with different microstructures, the typical two-phase material tungsten-copper alloy ($W_{70}Cu_{30}$) was selected to carry out the penetration test of two kinds of projectiles into semi-infinite steel target based on small caliber ballistic gun. The microstructure evolution behavior of the two kinds of alloy projectiles is analyzed. The results show that the distribution of hard phase concentration generally reflects the characteristics of "concentrated in the center and sparse at the edge". The higher the concentration of the hard phase, the higher the density and the faster the driving speed, the smaller the flow stability coefficient t/l_{length} . The better the flow stability of the projectile in the penetration, and the easier it is for the projectile head material to form a continuous plastic flow zone. The two-phase flow evolution model of constant cross-section straight pipe can be used to describe the flow stability of projectile head material in the process of penetration, and reveal the correlation mechanism between projectile head deformation and two-phase microstructure in the process of penetration.

Key words high-entropy alloy, high-speed penetration, microstructure, two-phase flow

引言

随着先进防护装备^[1-3]与侵彻武器^[4-5]的发展,侵彻工况的复杂程度进一步提升,侵彻过程中的新现象、新物理机制对于侵彻问题的研究提出了更大的挑战。各种新材料^[6-9]以及复合材料作为弹体材料的应用极大提高弹体侵彻性能的同时,也加剧了侵彻变形行为的复杂性,例如贫铀合金具有绝热剪切性质,在侵彻过程中保持尖锐的头部形状。陈小伟等发现了纤维增强金属玻璃等材料亦具有自锐效应^[10]。Liu 等^[11]设计了一种新型的多相钨基高熵合金材料,其多相结构促进了非均匀变形,使析出物与 FCC 基体之间产生了较大的应变梯度,在高速侵彻过程中表现出显著的自锐行为^[11-12]。对于这些复杂侵彻变形机理^[13-15]的分析一直是国内外穿甲/侵彻领域关注的重点。

弹体在高速侵彻半无限靶板的过程中,弹体不断侵彻进入靶体,弹靶界面的压力远远超过材料强度,弹坑的深度持续增加,同时弹体也在不断破碎而变短,通常采用类似流体动力学方法来描述弹体的侵彻作用过程,并将弹靶材料强度作为重要的影响因素引入侵彻模型,这是弹体侵彻流体动力学模型的基础^[16-18]。国内外的学者针对侵彻变形机理开展

了较多的研究工作,形成了较多的经验、半经验公式、工程模型及理论解析模型。Rosenberg 等^[19]根据作用在弹体头部的力从中心到边缘的不均匀性改进了 A-T 模型,引入了等效横截面积。基于侵彻过程中压力场和速度场的模拟结果,文献 [20] 利用柱形空腔膨胀理论 (CET) 阐明了靶体阻力与侵彻速度的关系。孙庚辰等^[21]通过对长杆弹头部流动区的分析提出了长杆弹侵彻的一维模型。文献 [22] 通过引入弹靶交界面上的平均压力,改进了长杆弹侵彻模型。李永池等^[23]对弹靶材料流入与流出过程的分析,提出了包含未碎弹体区、破碎及反弹区、靶的破坏和扩孔区等多个区域的长杆弹侵彻简化模型。文献 [24] 根据侵彻体的不同状态将侵彻过程分为三种模式,这三种模式由靶体阻力和弹体的动态强度共同控制,弹体头部形状^[25]、长径比^[26-27]和靶体阻力^[25-26]等影响弹体侵彻能力的因素也被广泛研究。对穿甲问题分析时,将弹体材料侵彻时的流入、流出现象简化为一个变截面掉头弯管,弹体材料从上口流进,下口流出。在此基础上,文献 [28] 在穿甲的弯管模型基础上进一步发展了弯管-流线模型,将弹体头部内材料的流入流出区域视作流场,基于该模型可以计算出弹体头部各质点材料的运动速度。但目前对于侵彻问题的分析大多基于弹体^[29]在宏观上的变形,

缺乏对于其微观结构及其对侵彻行为影响的分析. 前期的研究表明 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金在高速侵彻过程中微观结构对材料流动特性影响显著^[12]. 本文从长杆弹侵彻流体动力学模型出发, 对现有的两相流动进行分析与简化, 选取特定的流动单元, 建立简化的两相流动模型, 探索不同初始浓度、初始驱动速度以及各相密度对材料中各相浓度演化的影响规律. 开展 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金和钨铜合金弹体对半无限厚钢靶的侵彻试验, 分析材料各相在弹体内部的分布特性, 研究各相在弹体内部不同位置处的演化规律, 分析不同位置处相浓度演化对侵彻状态与材料流动稳定性的影响, 阐明不同材料弹体侵彻时头部材料流动破坏与两相微观结构的关联, 为侵彻自锐机理的研究奠定基础.

1 等截面直管两相流动模型

在对单相流体流动问题的分析中, 常需要考虑的因素有流体的黏度、密度、速度以及引起垂直于流动方向流体参数变化的温度与压强. 对于两相流动而言, 各相的分布、相互之间的作用以及不同相之间的接触特性等都使得流动更为复杂. 在高速侵彻时, 弹靶界面的高压特性使弹体头部材料破碎进入流体状态, 在分析材料两相流动过程中, 主要考虑两相特性的浓度、各相的密度以及各相的流动速度等因素, 建立两相流动与弹体变形破坏特征的联系.

将侵彻过程中的弹体分为三个区, 分别为弹体未变形区、变形流动区和弹体材料流出区. 在 Li 等^[30] 对双相高熵合金 ($Fe_{50}Mn_{10}Co_{10}Cr_{10}$, 数字为质量的分数的) 的研究中, 塑性应变主要由变形早期较软且约束较少的面心立方 (FCC 相) γ 基体来调节. $WFeNiMo$ 高熵合金具有与之类似的微观结构, 且在高应变速率下经历相同的微观变形过程. 当合金受到高压时, 作为合金基体的 FCC 相 (软相) 首先发生变形, 而 BCC 相 (硬相) 响应滞后, 即在侵彻过程中 FCC 相形成流场, 如图 1(a) 所示. 之后 BCC 相在 FCC 相形成的流动区中运动, 流向弹体材料流出区, 如图 1(b) 所示. 本文将弹体材料的两相流动简化为研究在等截面直管内两相的运动, 其中 FCC 相为软相 (流动相), BCC 相为硬相 (颗粒相), 各相在等截面直管内随机分布.

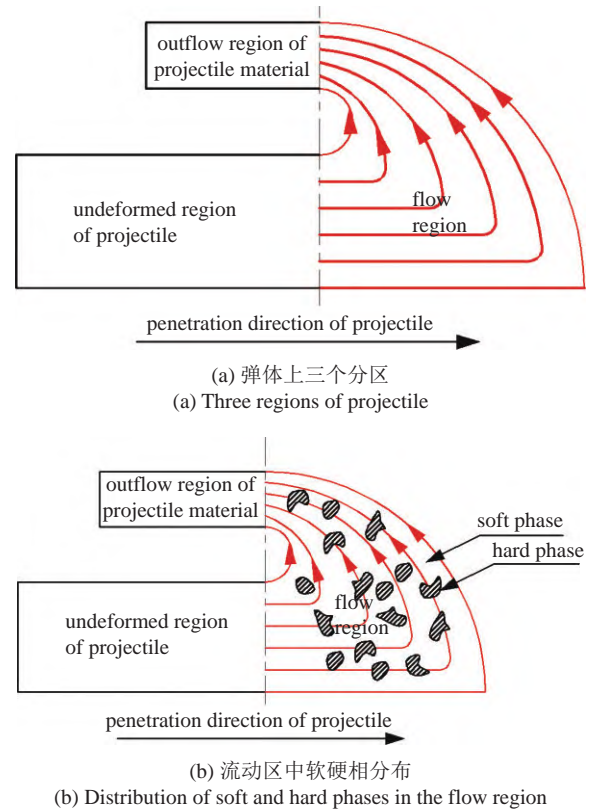


图 1 等截面直管内两相的流动

Fig. 1 Two-phase flow in a straight pipe with equal cross section

1.1 宏观状态弹体侵彻模型

根据弹靶界面压力平衡条件, Tate^[16-17]、Aleksievskii^[18] 和 Rosenberg 等^[19] 建立了经典的 A-T 模型

$$\frac{1}{2}\rho_p(v-u)^2 + Y_p = \frac{1}{2}\rho_t u^2 + R_t \quad (1)$$

式中, v 为弹体速度, u 为侵彻速度, ρ_p 为弹体材料密度, ρ_t 为靶体材料密度, R_t 为靶体阻力项, Y_p 为弹体的动态屈服强度

$$\left. \begin{aligned} Y_p &= (1 + \lambda)\sigma_{yp}(1 - \nu)/(1 - 2\nu) \\ R_t &= \sigma_{yt} \left[\frac{2}{3} + \ln \frac{2E_t}{(4 - e^{-\lambda})\sigma_{yt}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, σ_{yp} 为弹体材料的动态屈服强度, σ_{yt} 为靶体材料的动态屈服强度, ν 为泊松比, E_t 为靶体材料杨氏模量, λ 一般取 0.7^[17].

由此可以得到侵彻速度 u 与撞击速度 v 的关系: $u = u(v)$, u 也视作弹体材料从弹体未变形区进入变形流动区的速度.

根据 Wright-Frank 的侵彻模型^[31] 如图 2 所示, 由质量守恒定律得到

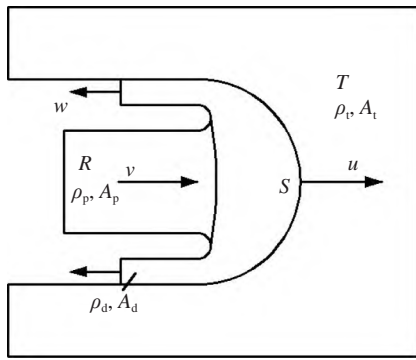


图 2 Wright-Frank 的侵彻模型^[31]

Fig. 2 Penetration model of Wright-Frank^[31]

$$\rho_p A_p (v - u) = \rho_d A_d (u + w) \quad (3)$$

式中, 未侵蚀部分密度为 ρ_p , 横截面积 A_p , 侵蚀部分

密度为 ρ_d , 抛出部分横截面积为 A_d . 假设弹体侵彻过程中材料不可压缩, 由此可以得出材料流出处速度 w 与瞬时撞击速度 v 之间的关系 $w = w(v)$.

1.2 细观尺度弹体侵彻材料流动演化模型

在侵彻过程中, 弹体状态的变化表现为弹体长度的减少以及破碎弹体材料的流入流出, 弹体材料在经过流动区时速度发生变化. 类比宏观状态下侵彻弹体头部材料的流入流出特性, 选定分析区域, 推导细观尺度上具有两相特征材料在分析区域的流入流出关系, 再结合细观尺度演化方程, 求出分析区域中浓度演化结果, 进而分析细观结构的两相特征对侵彻流动稳定性的影响, 推导流程如图 3 所示.

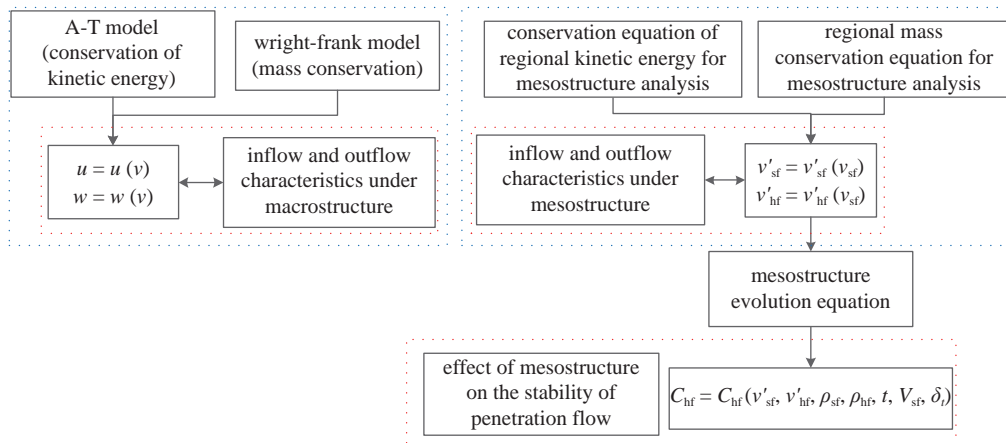


图 3 基于宏观侵彻模型的细观尺度结构演化推导过程

Fig. 3 Derivation of microstructure evolution based on macro penetration model

为了便于分析弹体的侵彻过程, 在两相流动模型中, 基本假设如下:

- (1) 在进入分析区域前, 假设整个接触界面全部为软相流动且在界面各处的流动速度都相等, 硬相在软相流体对其作用之前保持静止;
- (2) 在侵彻过程中两相中较弱的相首先发生屈服, 产生流动;
- (3) 在流入界面之前, 全部为软相流动, 软相流体的初始速度为分析区域两相流动的驱动速度;
- (4) 不考虑相与相之间的摩擦力、结合力等因素的影响;
- (5) 硬相在流体对其作用之前保持静止.

选取任意区域内具有代表性的两相进行分析, 如图 4 所示, 在此区域中硬相与软相随机分布, 根据软相和硬相含量的比值将此区域分为长度相等 (l_{length})、宽度比为软相与硬相比值的矩形区域 (如图 5), 两相以不同的速度流出该区域, 通过动能守恒

与质量守恒对此流动过程进行表征, 建立考虑密度、速度与浓度的基本方程

$$\rho_{sf} v_{sf}^2 = C_{sf} \rho_{sf} v_{sf}'^2 + C_{hf} \rho_{hf} v_{hf}'^2 \quad (4)$$

$$\rho_{sf} v_{sf} = C_{sf} \rho_{sf} v_{sf}' + C_{hf} \rho_{hf} v_{hf}' \quad (5)$$

式中, ρ_{sf} 与 ρ_{hf} 分别代表软相密度与硬相密度, 对应流体中的流动相与颗粒相密度, C_{sf} 与 C_{hf} 代表软相 (流动相) 与硬相 (颗粒相) 的含量, v_{sf} 代表流入界面前的软相流速 (驱动速度), v_{sf}' 与 v_{hf}' 代表流出界面后的软相与硬相流速, 如图 6 所示.

分析区域中硬相浓度为

$$C_{hf+1} = \frac{(l_{\text{length}} - v'_{hf} t) C_{hf} w_{\text{width}}}{l_{\text{length}} w_{\text{width}}} + \frac{C_{hf} [v'_{sf} t (1 - C_{hf}) w_{\text{width}} + v'_{hf} t C_{hf} w_{\text{width}}]}{l_{\text{length}} w_{\text{width}}} \quad (6)$$

式中, C_{hf} 与 C_{hf+1} 分别为上一时刻分析区域中硬相

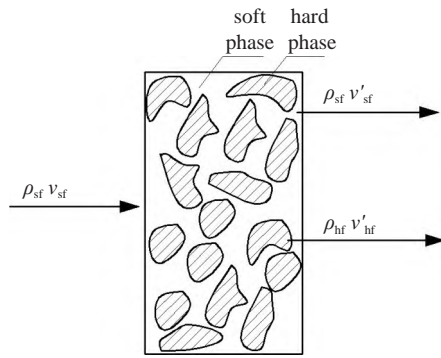


图 4 分析区域内两相流动特性

Fig. 4 Two-phase flow characteristics in the analyzed region

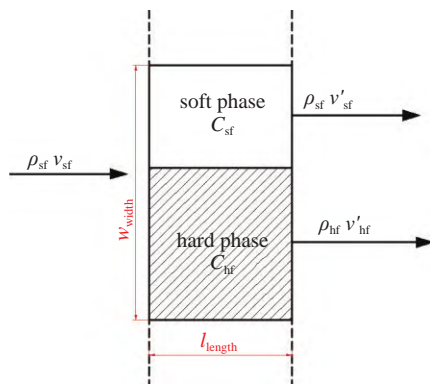


图 5 分析区域内两相流动的简化

Fig. 5 Simplification of two-phase flow in the analyzed region

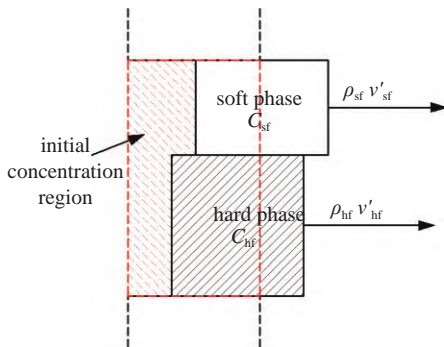


图 6 两相流动模型

Fig. 6 Two-phase flow model

浓度与此时分析区域中硬相浓度, t 为时间.

2 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金与钨铜合金弹体高速侵彻细观结构演化分析

为了探究弹体侵彻的细观结构演化行为, 利用 $\Phi 14.5$ mm 的滑膛弹道枪发射 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金和钨铜合金 ($W_{70}Cu_{30}$) 弹体侵彻半无限厚 45 号钢靶, 对比分析两种合金细观结构演化行为. 选取的钨铜合金与 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金在细观状态下都具有明显的两相随机分布结构, 但细观结构的

组分、含量与力学特性都有显著区别, 通过对比两者侵彻半无限靶的细观结构演化与宏观变形行为的联系, 进而揭示细观结构对侵彻流动稳定性的影响规律. 弹体尺寸为 $\Phi 7 \times 50$ mm, 如图 7 所示. 在距离枪口一定距离布置半无限厚钢靶, 钢靶置于靶架上, 通过高速相机记录弹体的撞靶作用过程, 试验布局如图 8 所示. $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体尺寸与钨铜合金相同, 试验采用次口径发射技术, 采用铝弹托固定弹体, 如图 9 所示. 为了减小靶体边界效应对弹体侵彻的影响, 靶体与钨铜合金弹体侵彻试验都选用直径 200 mm、厚度为 150 mm 的圆柱形 45 钢.

总共进行了 5 发侵彻试验, 分别为 3 发钨铜合金弹体和 2 发 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体, 由高

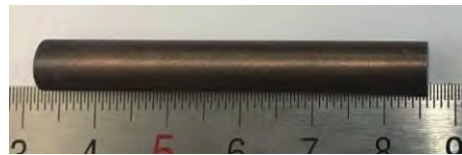


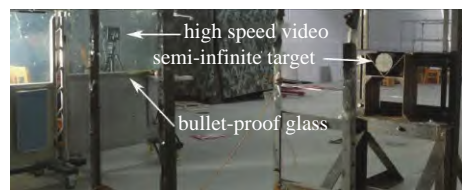
图 7 钨铜合金弹体

Fig. 7 Tungsten-copper alloy projectile



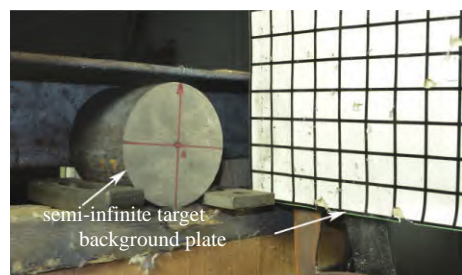
(a) 14.5 mm 弹道枪

(a) 14.5 mm ballistic gun



(b) 靶体与高速摄像

(b) Target and high speed camera



(c) 靶体与背景板

(c) Target and background plate

图 8 试验布局

Fig. 8 Test layout

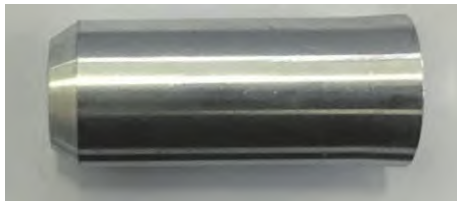
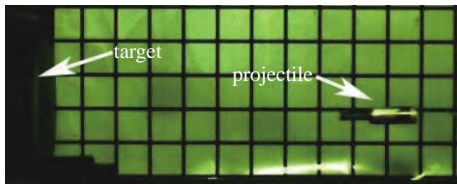


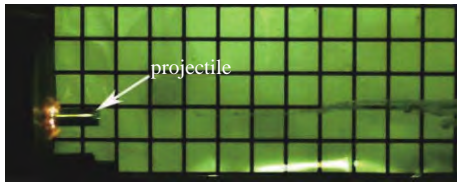
图 9 铝弹托

Fig. 9 Aluminum sabot

速相机拍摄的结果可以判断弹体飞行姿态平稳, 如图 10 所示, 并且通过对图像的处理可以求得弹体撞击速度. 侵彻试验结果如图 11 与图 12 所示, 弹体侵彻弹道较为准直, 弹体头部为典型的蘑菇形, 弹坑表面光滑且有明显的材料残留痕迹.



(a) 弹体飞行姿态
(a) Projectile flying attitude



(b) 弹体撞击靶体瞬间的姿态
(b) The projectile attitude hit the target

图 10 弹体飞行姿态

Fig. 10 Projectile flying attitude



(a) $V_0 = 790$ m/s



(b) $V_0 = 905$ m/s



(c) $V_0 = 1079$ m/s

图 11 钨铜合金弹体侵彻后靶体状态

Fig. 11 Target of tungsten-copper alloy projectile after penetration



(a) $V_0 = 905$ m/s



(b) $V_0 = 1079$ m/s

图 12 钨铜合金侵彻后残余弹体状态

Fig. 12 Residual projectile of tungsten-copper alloy projectile after penetration

从图 13 和图 14 可以观察到 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金侵彻弹道表面呈现出不规则的鱼鳞状纹路, 且靶体表面开坑阶段的坑口直径较大, 靶体的隧道区整体呈现为锥形, 而弹体头部保持较为尖锐的形状.



(a) $V_0 = 1090$ m/s

图 13 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体侵彻后靶体状态^[29]

Fig. 13 Target of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy projectile after penetration^[29]



(b) $V_0 = 1330$ m/s

图 13 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体侵彻后靶体状态^[29] (续)

Fig. 13 Target of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy projectile after penetration^[29] (continued)



(a) $V_0 = 1090$ m/s



(b) $V_0 = 1330$ m/s

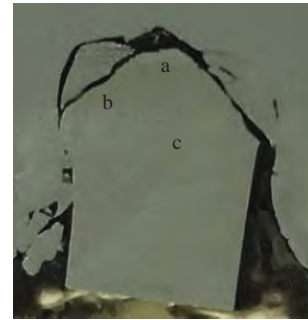
图 14 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金侵彻后残余弹体状态^[29]

Fig. 14 Residual projectile of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy projectile after penetration^[29]

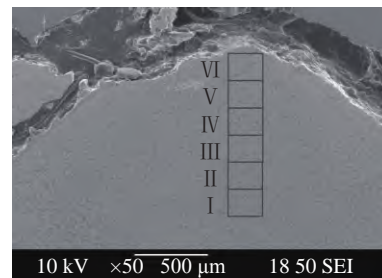
2.1 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体各相浓度演化

将 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金视为两相结构进行分析, 通过对原始材料细观相图的处理可得, FCC 相含量与 BCC 相含量之比为 4:6. 以原始状态两相浓度为基准, 对侵彻后的 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金残余弹体各部位的 BCC 相浓度进行统计.

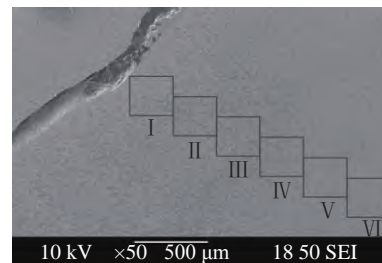
选取剩余弹体三个典型位置 (头部轴向、头部径向、弹体中部) 材料细观特性, 分别在每个方向上截取相等的统计区域 (图 15), 通过图像处理软件计算出所选区域内的像素点数, 再计算出浅色的 BCC 相所占的像素点数, BCC 相所占像素点数与该区域



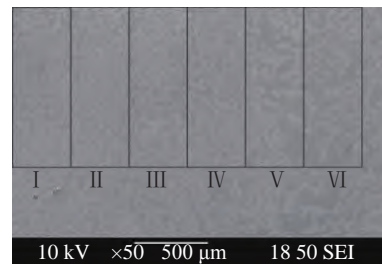
(a) 剩余弹体
(a) Residual projectile



(b) 头部轴向 (a 区)
(b) Axial direction of head (region-a)



(c) 头部径向 (b 区)
(c) Radial direction of head (region-b)



(d) 弹体中部 (c 区)
(d) Middle part of projectile (region-c)

图 15 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金残余弹体^[29] 相浓度分布

Fig. 15 Phase concentration distribution of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy residual projectile^[29]

总像素点数的比值为 BCC 相的浓度, 三处的相浓度分布情况如表 1 所示.

结合 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金残余弹体典型位置细观结构分析结果, BCC 相的浓度在三处的演化结果存在显著差异: 在头部轴向处 (位置 a), 从弹靶接触点向弹尾方向, 材料中 BCC 相的浓度从

表 1 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金残余弹体相浓度分布

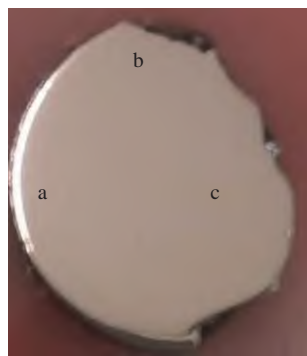
Table 1 Phase concentration distribution of $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy residual projectile

| Region | | I | II | III | IV | V | VI |
|-------------------------------|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| axial direction of head (a) | BCC phase | 8317 | 8420 | 7866 | 8006 | 7775 | 7379 |
| | total | 10212 | 10212 | 10212 | 10323 | 10340 | 10323 |
| | percentage | 81.4% | 82.5% | 77.0% | 77.6% | 75.2% | 71.5% |
| radial direction of head (b) | BCC phase | 12402 | 11709 | 14368 | 15145 | 16901 | 16341 |
| | total | 19880 | 20306 | 20306 | 20448 | 20448 | 20163 |
| | percentage | 62.4% | 57.7% | 70.8% | 74.1% | 82.7% | 81.0% |
| middle part of projectile (c) | BCC phase | 66366 | 70786 | 61455 | 58663 | 53335 | 46082 |
| | total | 11699 | 112908 | 112326 | 112326 | 112908 | 109431 |
| | percentage | 59.4% | 62.7% | 54.7% | 52.2% | 47.2% | 42.1% |

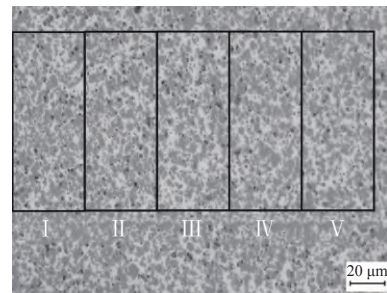
71.5% 增至 81.4%; 在弹体中部 (位置 b), 从弹身内侧往外侧, 浓度从 59.4% 减小至 42.1%; 在头部径向处, 从头部内侧往外侧 (位置 c), 浓度从 81.0% 减小至 62.4%. 弹体头部的硬相浓度远高于原始状态中硬相的浓度 (60%). 从总体上看, 硬相在弹体头部表现为向内部集聚, 即呈现“中心浓, 边缘稀”的特点.

2.2 钨铜合金弹体各相浓度演化

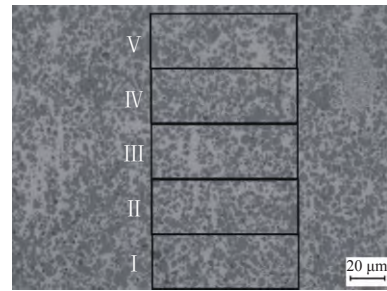
在弹体上选取与 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金残余弹体相类似三处位置, 对其中钨相 (硬相) 浓度进行分析, 如图 16 所示, 区域 a 取头部轴向, 区域 b 取头部径向, 区域 c 取弹体中部. 三个区域钨相浓度分布情况如表 2 所示, 在头部轴向方向上, 从弹靶接触点向弹尾方向, 材料中钨相的浓度总体呈下降趋势; 在弹体中部, 浓度从 71.3% 减小至 63.2%; 在头部径向处, 从弹体内侧往外侧, 浓度总体也呈现下降趋势. 弹体头部的钨相浓度与 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金的 BCC 相浓度分布类似, 均呈现“中心浓, 边缘稀”的特点.



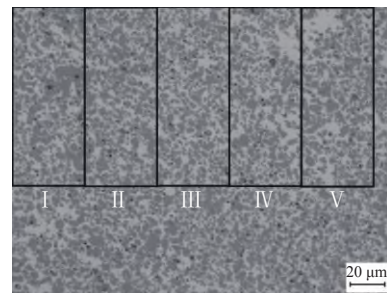
(a) 剩余弹体
(a) Residual projectile



(b) 头部轴向 (a 区)
(b) Axial direction of head (region-a)



(c) 头部径向 (b 区)
(c) Radial direction of head (region-b)



(d) 弹体中部 (c 区)
(d) Middle part of projectile (region-c)

图 16 钨铜合金残余弹体相浓度分布

Fig. 16 Phase concentration distribution of tungsten-copper alloy residual projectile

表 2 钨铜合金残余弹体相浓度分布

Table 2 Phase concentration distribution of tungsten-copper alloy residual projectile

| Region | | I | II | III | IV | V |
|-------------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| axial direction of head (a) | BCC phase | 98532 | 101109 | 89100 | 97498 | 99027 |
| | total | 131904 | 140067 | 138171 | 138171 | 138060 |
| | percentage | 74.7% | 72.2% | 64.5% | 70.6% | 71.7% |
| radial direction of head (b) | BCC phase | 230581 | 214228 | 193637 | 215289 | 199344 |
| | total | 344256 | 346480 | 343964 | 336030 | 343380 |
| | percentage | 67.0% | 61.8% | 56.3% | 64.1% | 58.1% |
| middle part of projectile (c) | BCC phase | 98143 | 95875 | 90509 | 88635 | 80767 |
| | total | 137588 | 138060 | 137088 | 136512 | 127827 |
| | percentage | 71.3% | 69.4% | 66.0% | 64.9% | 63.2% |

3 弹体高速侵彻细观两相浓度演化特性分析

以 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金为研究对象, 合金 BCC 相中 W, Fe, Ni, Mo 四个元素的体积分数^[11] 分别为 57.4%, 4%, 2% 和 36.6%, 这四种元素的密度分别为 19.35 g/cm^3 , 7.86 g/cm^3 , 8.9 g/cm^3 和 10.2 g/cm^3 , 根据混合准则可以求得 BCC 相的密度为 15.3 g/cm^3 , 同理可以求得 FCC 相的密度为 8.9 g/cm^3 , BCC 相与 FCC 相的初始浓度分别为 60% 与 40%. 假设两相都以恒定的速度向右流动, 将 BCC 相简化为长度 l_{length} 、宽度 $0.6w_{\text{width}}$ 的矩形区域, 同样地, FCC 相简化为长度 l_{length} 、宽度 $0.4w_{\text{width}}$ 的矩形区域 (图 6). BCC 相与 FCC 相的移动速度分别为 v'_{hf} 与 v'_{sf} , 两相向右逐渐流出分析区域, 区域剩余部分为原始浓度区, 默认该区域 FCC 相与 BCC 相的浓度比保持 4:6, 通过计算分析该区域中 FCC 相与 BCC 相的浓度情况, 则得出浓度随时间的演化, 计算流程如图 17 所示. 在分析区域中, 由于软相流速高于硬相, 随着两者流出分析区域, 硬相浓度逐渐升高, 并趋向于 1, 两相流动趋向于单相流体流动, 这个过程消耗的时间越短 (t/l_{length}), 则说明弹体越快进入单相流动状态, 侵彻流动稳定越高.

图 18 为不同驱动速度下材料中 BCC 相的浓度演化, 以 t/l_{length} (单位长度时间) 作为横坐标, 以 BCC 相的浓度作为纵坐标, 在 t/l_{length} 为 0 时, BCC 相初始浓度为 0.6. 以 C_{BCC} 相达到趋近于 1 的

t/l_{length} 值作为参考标准, 即 BCC 相在最短单位长度时间内最接近充满整个区域, 则该状态下材料最快

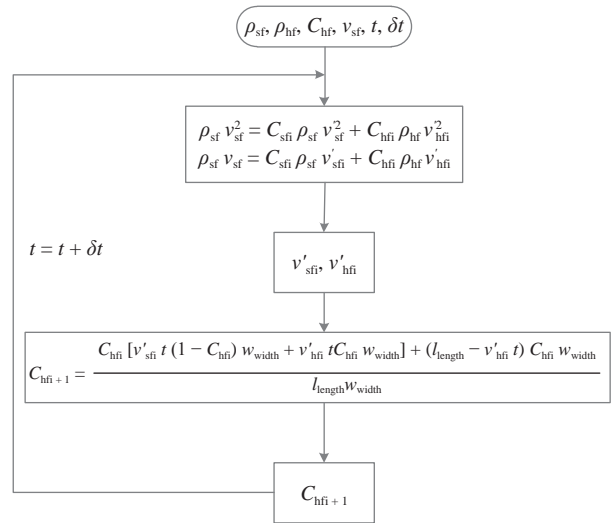


图 17 各相浓度演化计算流程

Fig. 17 Calculation process of concentration evolution

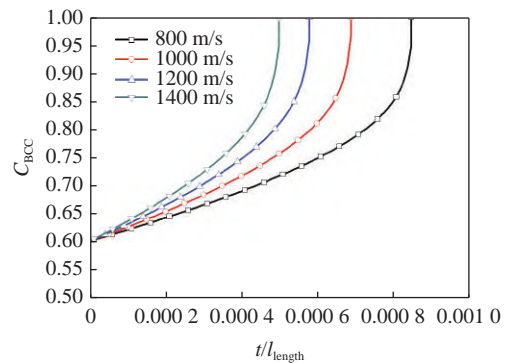


图 18 不同驱动速度下 BCC 相的浓度演化

Fig. 18 Phase evolution of BCC phase by different driven velocities

达到稳定. 通过计算可知驱动速度越大, 分析区域中材料越快达到稳定, 则材料的流动稳定性越好. 对钨铜合金弹体进行分析, 钨铜合金中钨的密度为 19.25 g/cm^3 , 铜的密度为 8.96 g/cm^3 , Cu 相较 W 相更软, 以 Cu 作为驱动元素对合金中钨铜两相流动进行计算, 计算结果如图 19 所示. 可以看出, 钨铜合金与高熵合金硬相 (W 相与 BCC 相) 的浓度演化规律类似, 即随着驱动速度的升高, 流动达到稳定状态的 t/l_{length} 值降低, 流动稳定性提升.

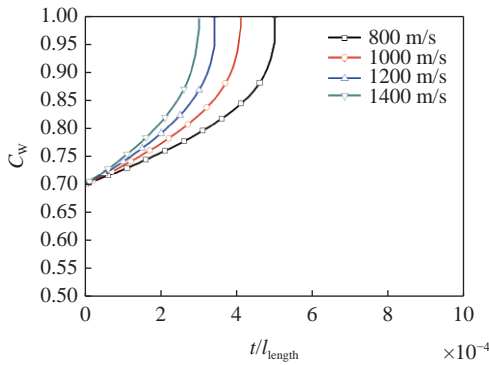


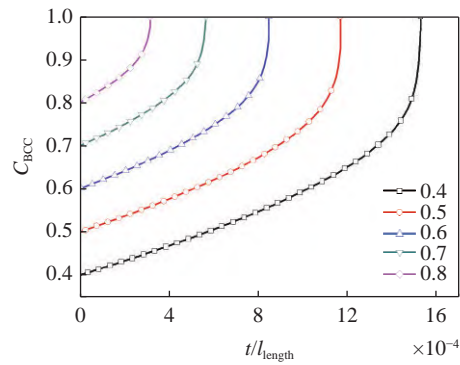
图 19 不同驱动速度下 W 相的浓度演化图

Fig. 19 Phase evolution of W phase by different driven velocities

下面就不同初始浓度与不同的两相密度对弹体头部材料流动稳定的影响进行分析. 以 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金为例, 其中 FCC 相驱动速度取为 800 m/s , 分别取 BCC 相的浓度为 $0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 和 0.8 , 考察初始浓度对浓度演化的影响. 计算结果如图 20 所示, 在相同驱动速度下, 区域中硬相浓度越高, C_{BCC} 增长速度越快, 则材料越快达到稳定.

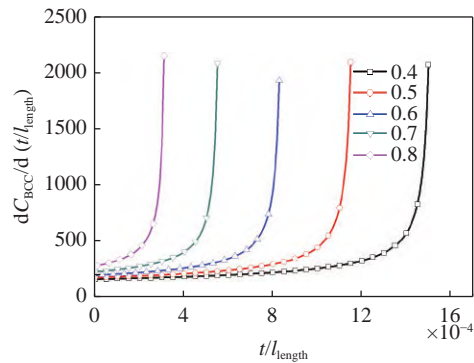
接下来分析密度对浓度演化的影响, V_{sf} 取 800 m/s , 以 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金 ($C_{\text{BCC}} = 0.6$) 为参照标准, 将钨铜合金中的 W 相组分取为 0.6 , 即钨铜合金 ($C_{\text{W}} = 0.6$) 与 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金 ($C_{\text{BCC}} = 0.6$) 作对比. 另一组取钨铜合金 ($C_{\text{W}} = 0.7$) 与 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金 ($C_{\text{BCC}} = 0.7$) 作对比. 高熵合金的 FCC 相密度与 BCC 相密度分别为 8.9 g/cm^3 与 15.3 g/cm^3 , 相应的钨铜合金中 Cu 相与 W 相的密度分别为 8.96 g/cm^3 与 19.25 g/cm^3 . 计算结果如图 21 所示, 在两个对照组中, 钨铜合金到达流动稳定的时间均较高熵合金更短, 两种合金软相密度相同, 钨铜合金中 W 相密度大于 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金中 BCC 相, 说明硬相的密度更大时, 合金在侵彻时更容易达到稳定状态.

材料在侵彻过程中的流动稳定性最终体现在弹



(a) BCC 相浓度随 t/l_{length} 的变化

(a) Change of BCC phase concentration with t/l_{length}



(b) BCC 相浓度增长率随 t/l_{length} 的变化

(b) Change of BCC phase concentration growth rate with t/l_{length}

图 20 初始浓度对硬相浓度演化的影响

Fig. 20 Effect of initial concentration on concentration evolution of hard phase

体头部变形与破坏状态的差异. 从试验结果来看, 钨铜合金 ($C_{\text{W}} = 0.7$) 侵彻后的残余弹体如图 22 所示, 弹体头部材料则出现了明显的流动特性, 头部材料持续流向弹尾, 形成连续的塑性流动带; $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金 ($C_{\text{BCC}} = 0.6$) 残余弹体如图 23 所示, 弹体头部形成较为尖锐的形状, 未发生持续的塑性流动, 残余弹体破碎严重. 从图 21 的计算结果来看, 钨铜合金 ($C_{\text{W}} = 0.7$) 硬相浓度趋向于 1 时的 t/l_{length} 值小

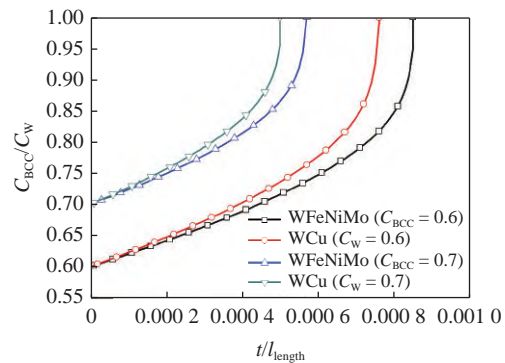
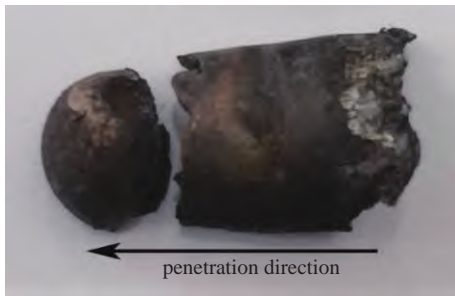
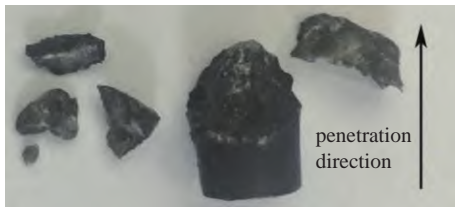


图 21 密度对硬相浓度演化的影响

Fig. 21 Effect of density on concentration evolution of hard phase

图 22 钨铜合金残余弹体 ($V_0 = 1079$ m/s)Fig. 22 Tungsten-copper alloy residual projectile ($V_0 = 1079$ m/s)图 23 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金残余弹体 ($V_0 = 1090$ m/s)Fig. 23 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ high-entropy alloy residual projectile ($V_0 = 1090$ m/s)

于 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金 ($C_{BCC} = 0.6$), 理论预测与试验结果相吻合, 在侵彻过程中钨铜合金弹体的流动稳定性较 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金弹体更好。

4 结论

本文通过对高速撞击试验后 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金和钨铜合金残余弹体的细观分析, 分析了高速侵彻下合金中相浓度的演化规律. 基于对两相流动模型的简化, 建立了考虑软、硬相密度差异, 软、硬相流速差异, 软、硬相浓度差异的两相流动演化模型, 提出了表征材料浓度演化快慢的流动稳定系数 t/l_{length} , 该系数越小, 则侵彻流动稳定性越好, 在侵彻过程中越容易失稳从而产生不均匀变形. 讨论了不同因素对侵彻状态下合金中各相浓度演化的影响, 分析了浓度演化与材料流动破坏的联系, 主要结论如下。

(1) 在弹体轴线方向上, 从弹靶接触点向弹尾方向, 硬相浓度逐渐减小; 在径向方向上, 从弹体内部往外部, 材料中硬相的浓度逐渐减小; 硬相浓度分布总体上体现“中心浓, 边缘稀”的特点。

(2) 两相流动中, 流动相驱动速度越高, 在特定区域中两相达到稳定所需时间越短, 更快到达稳定状态; 硬相的浓度越高, 密度越大, 驱动速度越快, 在高速侵彻状态中越快达到稳定。

(3) 高速侵彻时弹体内两相流动的稳定性与弹体头部材料的断裂形式相关, 稳定性越高, 则弹体材料从头部两侧反向流出时越难与弹体发生分离, 结合两相流动分析结果可知, 钨铜合金的稳定性高于 $W_{25}Fe_{25}Ni_{25}Mo_{25}$ 高熵合金, 与试验结果相符。

参 考 文 献

- 1 谈梦婷, 张先锋, 包阔等. 装甲陶瓷的界面击溃效应. 力学进展, 2019, 49: 392-427 (Tan Mengting, Zhang Xianfeng, Bao Kuo, et al. Interface defeat of ceramic armor. *Advances in Mechanics*, 2019, 49: 392-427 (in Chinese))
- 2 Sun YX, Wang X, Ji C, et al. Experimental investigation on anti-penetration performance of polyurea coated ASTM1045 steel plate subjected to projectile impact. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 18
- 3 李想, 严子铭, 柳占立等. 基于仿真和数据驱动的先结构材料设计. 力学进展, 2021, 51(1): 82-105 (Li Xiang, Yan Ziming, Liu Zhanli, et al. Advanced structural material design based on simulation and data-driven method. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(1): 82-105 (in Chinese))
- 4 陈海华, 张先锋, 刘闯等. 高熵合金冲击变形行为研究进展. 爆炸与冲击, 2021, 41(4): 30-53 (Chen Haihua, Zhang Xianfeng, Liu Chuang, et al. Research progress on impact deformation behavior of high-entropy alloys. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 30-53 (in Chinese))
- 5 陈海华, 张先锋, 熊玮等. WFeNiMo 高熵合金动态力学行为及侵彻性能研究. 力学学报, 2020, 52(5): 1443-1453 (Chen Haihua, Zhang Xianfeng, Xiong Wei, et al. Dynamic mechanical behavior and penetration performance of WFeNiMo high-entropy alloy. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(5): 1443-1453 (in Chinese))
- 6 李建国, 黄瑞端, 张倩等. 高熵合金的力学性能及变形行为研究进展. 力学学报, 2020, 52(2): 333-359 (Li Jianguo, Huang Ruirui, Zhang Qian, et al. Mechanical properties and behaviors of high entropy alloys. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(2): 333-359 (in Chinese))
- 7 陈泽坤, 蒋佳希, 王宇嘉等. 金属增材制造中的缺陷、组织形貌和成形材料力学性能. 力学学报, 2021, 53(12): 3190-3205 (Chen Zekun, Jiang Jiayi, Wang Yujia, et al. Defects, microstructures and mechanical properties of materials fabricated by metal additive manufacturing. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(12): 3190-3205 (in Chinese))
- 8 侯先苇, 熊玮, 陈海华等. 两种典型高熵合金冲击释能及毁伤特性研究. 力学学报, 2021, 53(9): 2528-2540 (Hou Xianwei, Xiong Wei, Chen Haihua, et al. Impact energy release and damage characteristics of two high-entropy alloys. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(9): 2528-2540 (in Chinese))
- 9 卜叶强, 王宏涛. 多元合金中的化学短程有序. 力学进展, 2021, 51(4): 915-919 (Bu Yeqiang, Wang Hongtao. Short-range order in multicomponent alloys. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(4): 915-919 (in Chinese))
- 10 焦文俊, 陈小伟. 长杆高速侵彻问题研究进展. 力学进展, 2019, 49: 312-391 (Jiao Wenjun, Chen Xiaowei. Review on long-rod penetration at hypervelocity. *Advances in Mechanics*, 2019, 49: 312-391 (in Chinese))

- 11 Liu XF, Tian ZL, Zhang XF, et al. "Self-sharpening" tungsten high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2020, 186: 257-266
- 12 Chen HH, Zhang XF, Liu C, et al. Theoretical analysis for self-sharpening penetration of tungsten high-entropy alloy into steel target with elevated impact velocities. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(6): 14
- 13 Jiao WJ, Chen XW. Influence of the mushroomed projectile's head geometry on long-rod penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148(2): 103769
- 14 Rubin MB. A simplified and modified model for long rod penetration based on ovoids of Rankine. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 156(2): 103927
- 15 Tang Q, Chen X, Deng Y, et al. An approximate compressible fluid model of long-rod hypervelocity penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155: 103917
- 16 Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1967, 15(6): 387-399
- 17 Tate A. Long rod penetration models—Part II. Extensions to the hydrodynamic theory of penetration. *International Journal of mechanical sciences*, 1986, 28(9): 599-612
- 18 Alekseevskii VP. Penetration of a rod into a target at high velocity. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 1966, 2(2): 63-66
- 19 Rosenberg Z, Marmor E, Maysel M. On the hydrodynamic theory of long-rod penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 10(1-4): 483-486
- 20 Walker JD, Anderson Jr CE. A time-dependent model for long-rod penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 16(1): 19-48
- 21 孙庚辰, 吴锦云, 赵国志等. 长杆弹垂直侵彻半无限厚靶板的简化模型. *兵工学报*, 1981, 2(4): 1-8 (Sun Gengchen, Wu Jinyun, Zhao Guozhi, et al. A simplified model of the penetration of the long-rod penetrator against the plates with semi-infinite thickness at normal angle. *Acta Armamentarii*, 1981, 2(4): 1-8 (in Chinese))
- 22 Zhang LS, Huang FL. Model for long-rod penetration in to semi-infinite targets. *Journal of Beijing University of Science and Technology*, 2004, 13(3): 285-289
- 23 李永池, 吴立朋, 罗春涛. 侵彻力学的一种新理论分析方法. *力学与实践*, 2009, 31(2): 22-26 (Li Yongchi, Wu Lipeng, Luo Chuntao. A new theoretical model for armor-piercing mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2009, 31(2): 22-26 (in Chinese))
- 24 Lu ZC, Wen HM. On the penetration of high strength steel rods into semi-infinite aluminium alloy targets. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 1-10
- 25 Rosenberg Z, Malka-Markovitz A, Kositski R. Inferring the ballistic resistance of thick targets from static deep indentation tests. *International Journal of Protective Structures*, 2018, 9(3): 347-361
- 26 Anderson CE, Walker JD, Hauver GE. Target resistance for long-rod penetration into semi-infinite targets. *Nuclear Engineering and Design*, 1992, 138(1): 93-104
- 27 Rosenberg Z, Dekel E. The relation between the penetration capability of long rods and their length to diameter ratio. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(2): 125-129
- 28 陈海华, 张先锋, 刘闯等. 基于弯管-流线模型的长杆弹侵彻头部材料流动过程分析. *兵工学报*, 2019, 40(9): 1787-1796 (Chen Haihua, Zhang Xianfeng, Liu Chuang, et al. Analysis of material flow around projectile nose by elbow-streamline model during long-rod projectile penetrating into steel target. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(9): 1787-1796 (in Chinese))
- 29 Chen HH, Zhang XF, Dai LH, et al. Experimental study on WFeNiMo high-entropy alloy projectile penetrating semi-infinite steel target. *Defence Technology*, 2021, doi: 10.1016/j.dt.2021.06.001
- 30 Li Z, Tasan CC, Pradeep KG, et al. A TRIP-assisted dual-phase high-entropy alloy: grain size and phase fraction effects on deformation behavior. *Acta Materialia*, 2017, 131: 323-335
- 31 Wright TW, Frank K. Approaches to Penetration Problems. Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, Ballistic Research Laboratory, 1988