DOI: 10.3901/JME.2020.12.085

基于3D模拟的双相钢中组元相间变形协调性*

金 淼 张文彬 张庆玲 贾祺祥 郭宝峰 陈 雷
(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 双相金属材料通常可以兼顾两相的优点,但由于两相性能的异质性,使两相的变形不协调,受力状态及变形特征较为复杂。基于代表体元法(Representative volume element, RVE)构建奥氏体+铁素体双相钢 3D 仿真模型,进行不同两相比比例压缩变形的数值模拟,分析变形协调特性,讨论组元相微观性能与双相钢宏观性能间的关联规律。结果表明,两相的相内应力、应变分布不均,其中等效塑性应变呈正态分布,而等效应力则呈负偏态分布。在初始变形阶段,两相间表现出显著的变形不协调性;随变形量的增加,两相间的变形协调性得到改善并趋于稳定。两相的塑性应变与宏观应变基本满足线性关系,两相应变增量分别与宏观应变增量之差的比值为一个与相比比例相关的定值。引入与两相比比例相关的应变配分参数 K ,建立基于广义体积分数的应变混合公式,可更加准确地表征复相材料组元相应变与宏观应变间的关联规律,为分析复相材料相间变形协调行为提供理论支持。

关键词: 双相钢; 组元; 变形协调性; 应变配分; 代表体元法

中图分类号: TG142

Deformation Coordination between Component Phases in Duplex Steel Based on 3D Simulation

JIN Miao ZHANG Wenbin ZHANG Qingling JIA Qixiang GUO Baofeng CHEN Lei
(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Advanced metal materials with two constituent phases usually take advantage of the characteristics of two phases. However, uncoordinated deformation always exists between two phases due to the differences in the properties of each other, and meanwhile, the stress state and deformation characteristics are more complicated. Based on the representative volume element (RVE), a 3D model is constructed and austenite and ferrite distributed randomly in units via a program. Numerical simulations of different comparative phases are carried out, and the deformation coordination are analyzed. The deformation characteristics of individual phase between two constituent phases are discussed in order to clarify the mechanical response in macro-and micro-scale. The results show that both stress and strain distribution in individual phase are uneven. The equivalent plastic strain shows a Gaussian distribution, while the equivalent stress distributes in the negative skewness. In initial deformation stage, the deformation coordination between the two phases is unsatisfactory. As the deformation increases, the deformation coordination between both phases is improved and gradually tends to be stable. In approximately, a linear relationship is shown between the plastic strain in each individual phase and the macroscopic strain. The ratio of strain increment difference between each individual phase and overall duplex steel shows a phase fraction-dependent constant value. The strain distribution parameter K associated with the phase fraction is introduced, whereby the mixed law of strain based on the generalized phase fraction is established to modify classic strain mixing theory. It can more accurately characterize the correlation of composite materials between the change of component and the macroscopic strain, and provide theoretical support for analyzing the coordinated behavior of phase-to-phase deformation of composite materials.

Key words: duplex steel; constituent; coordination of deformation; strain partitioning; representative volume element

* 国家自然科学基金(51675467, 51675465)、河北省自然科学基金(E2016203284, E2019203560)和中国博士后科学基金(2016M600194, 2017T100712)资助项目。20190713 收到初稿, 20200225 收到修改稿

0 前言

双相材料通常指材料内部存在两种具有不同力学性能的组元相,从而使得双相材料可以兼顾两相的优点^[1]。但两相因为力学性质的差异,在变形过程中变形程度往往不同,两相间变形通过相互协调才能满足宏观变形。由于两相间在变形时彼此存在着复杂的相互作用,使得两相间各自相内力学性能存在不均匀性,且难以计算,彼此间的变形协调特性难以表征。陈国兴等^[2]总结了当前双相材料的微观变形的研究现状,指明利用宏微观耦合建模深入分析双相材料变形行为是未来方向。对于双相钢而言,已有研究主要集中在不同变形条件下对材料的成形极限和断裂性能等宏观性能进行研究^[3-4],而较少涉及组元相内变形特性的探讨。此外,许多研究均表明双相钢中组元相的冶金特性,如两相比例^[5]、晶粒尺寸^[5-6]、组元分布^[6-7]等对其变形行为存有明显的影响,但针对组元相间的变形协调特性仍缺少量化表征。另一方面,近年来关于金属材料的变形不均匀性的研究也从宏观 DIC 应变分析^[8-9],介观晶粒演化^[10-11]和微观位错滑移^[10,12]等不同尺度予以了考量。利用先进分析技术(如 SEM 数字成像技术)通过对微观亚结构的分析^[13-14],表征不同变形阶段各组元相的流变特性,同时结合晶体塑性有限元法^[15],分析双相材料的变形行为,构建本构模型,实现了宏微观耦合。特别是在此基础上利用代表体元法(Representative volume element, RVE)针对性地研究材料局部微区变形特性。BASANTIA 等^[16]利用 RVE 模型,预测了铁素体-马氏体双相钢的应力应变关系。李子洋等^[17]基于 RVE 模型研究了双相钢在晶粒尺度下的变形不均匀分析。GOU 等^[18]建立了基于 DP600 钢不同区域的显微特征的 RVE 模型,系统探讨了微观性能的不均匀性。这些结果为双相/复相材料中组元相的协调变形行为研究提供了有力的技术思路 and 表征方法。

现以一种具有奥氏体和铁素体两相的双相钢为研究对象,基于代表体元法,通过二次开发对两相比例施以有效控制,建立了两相随机分布的 3D 有限元模型,利用开发程序导出变形过程中两相的力学特征,着重分析了各组元相内变形不均匀性、探讨了组元相间的协调变形规律,以阐明两组元变形与宏观变形间的关联关系,为合理调控双相材料的加工性能提供技术支撑。

1 双相钢力学性能的有限元建模

建立圆柱体室温下单向均匀压缩变形过程的模拟模型,如图 1a 所示,从圆柱体中心取出一个微元体进行代表体元建模。在微元体空间随机选取一定数量的形核点,计算微元体上有限元单元几何中心点与形核点距离,将最接近形核点的单元整合为同一集合,建立 voronoi 多面体集合,代表晶体的晶粒结构,赋予不同晶粒材料属性,形成两相组织的模拟模型。由于形核点是随机生成的,可实现奥氏体组元呈等轴状均匀分布在铁素体基体上这种组织状态的模拟建模。由于是均匀压缩变形,当忽略端部效应和温度的影响时,变形体内任一点均处于单向压缩状态。基于仿真模型的对称性,取微元体的 1/8 建立双相钢的宏观力学特性有限元分析模型,如图 1b 所示,共划分 512 个 voronoi 多面体体元,64 000 个六面体单元,图中 S1、S2、S3 分别为 3 个空间方向的对称面,S5、S6 为自由表面,在 S4 面施加均匀的位移约束,控制变形尺寸。通过二次开发,控制 voronoi 多面体体元,调节两相比例。由于是在室温下变形,在材料出现微裂纹前,可近似认为两相界面始终连接牢固,既无相间的错移滑动,也无开裂现象。

图 1 双相材料的 voronoi 代表体元模型

奥氏体相和铁素体相的弹性模量分别取为 193 kN/mm²、200 kN/mm²,泊松比均取为 0.3,铁素体相和奥氏体相的应力应变关系如图 2 所示^[6,19]。

图 2 奥氏体和铁素体的流动应力应变曲线

由于奥氏体性能高于铁素体, 因此本文中称奥氏体为“硬相”, 铁素体为“软相”。

提交计算完成有限元模拟, 从模拟结果文件中通过 Python 程序驱动, 导出所有单元在变形过程中的积分点力学性能信息, 进行统计整理。

2 双相钢变形中的应力应变分布特点

图 3 是相比例为 1:1, 变形量为 25%(对应的压缩应变为 0.288, 由于是单向压缩状态, 忽略弹性应变, 则该应变即为变形体的宏观等效塑性应变)时, 模拟所得微元体中的等效塑性应变云图。可见, 变形后微元体内的应变分布表现出明显的不均匀性, 提取两相的等效塑性应变体积分数, 见图 4。两相的等效塑性应变体积分数均符合正态分布, 分布函数可用式(1)表达

$$y = \frac{A}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right] \quad (1)$$

式中, δ 为标准差, μ 为期望值, 其数据如表 1 所示, A 为系数。

图 3 等效应变云图

图 4 等效应变统计图

发现两相吸收应变明显不同, 硬相奥氏体内的平均等效塑性应变低于软相铁素体, 使得奥氏体的平均等效塑性应变较材料的宏观塑性等效应变低了 8%, 而铁素体则高出了 6%。另一方面, 奥氏体等效塑性应变分布函数的标准差小于铁素体(表 1), 但

两相的平均等效塑性应变不同, 因此采用统计学的变异系数对其分布的离散性分析。计算得奥氏体等效塑性应变分布函数的变异系数为 0.147 大于铁素体的 0.136。这表明硬相奥氏体自身内部的应变分布比软相铁素体分散。

表 1 两相等效塑性应变正态分布参数

分布参数	期望值 μ	标准差 δ
铁素体	0.304	0.041 4
奥氏体	0.264	0.038 8

即使是同一相内, 也存在明显的应变分布不均匀现象。图 5 给出了微元体截面上两相的等效塑性应变云图。图中基体为铁素体, 块状区域(黑线包围区域)为奥氏体。可发现, 铁素体中的高应变区主要分布在远离相界处, 而相界附近的应变则相对较低; 奥氏体中的应变分布规律则与铁素体相内相反。显然, 两相内各自这种应变分布规律是两相彼此间相互作用的结果。铁素体在接近奥氏体的区域, 由于奥氏体的阻碍作用, 应变减小, 此分析与 DAS 等^[20]的分析近似; 而奥氏体在接近铁素体的区域, 由于铁素体的带动作用, 应变明显增大。由此推断, 两相组织分布越均匀, 则两相间的相互作用就越均匀, 进而使得两相内部的应变分布越均匀, 更有利于提高材料的整体变形性能。

图 5 微元体截面上两相的等效应变云图

图 6 是模拟所得微元体中的等效应力云图, 一定程度变形后微元体内的应力分布也存在不均匀。分别提取两相的等效应力体积分数, 结果如图 7 表示。尽管两相的等效塑性应变体积分数均呈正态分布, 但由于两相的流变应力应变的非线性, 使得两相的等效应力体积分数未呈正态分布。从总体上看, 在应力分布区间内, 高值应力所占的体积分数更多, 呈现出高峰向右偏移, 长尾向左延伸的负偏态分布(或称左偏态分布)。铁素体相和奥氏体相的平均等效应力分别约为 663 MPa 和 1 446 MPa, 此时宏观应力通过支反力计算可知为 1 018 MPa。可见, 奥氏体相的平均应力高出宏观应力 35%, 铁素体相的

平均应力低于宏观应力 42%。

图6 等效应力云图

图7 等效应力分布统计图

3 双相钢的变形协调性

由上述分析可知, 双相钢变形时两相相内表现出明显的不均匀性, 同时相间表现出不协调性。在此通过两相正态分布的变异系数对相间的变形均匀性予以评估, 采用两相的等效塑性应变比对相间协调性予以评估, 并对比分析两相比例的影响。其中两相的等效塑性应变比 G 为软相铁素体的等效塑性应变比硬相奥氏体, 其表达式为

$$G = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_a} \quad (2)$$

式中, G 为两相等效塑性应变比, 下标 f 为软相铁素体, 下标 a 为硬相奥氏体。

图8是两相等效塑性应变正态分布的变异系数随宏观应变的变化规律, 可发现, 两相的变异系数在变形初期(宏观应变小于 0.05)时快速下降而后逐渐趋于平缓。奥氏体的变异系数大于铁素体, 表明奥氏体内应变分布比铁素体分散, 即硬相奥氏体内变形更不均匀。不同相比例下, 当材料变形到一定程度时(某一应变值下)时, 两相的应变分布变异系数均随奥氏体体积分数的增加而下降, 即两相内部应变分布均随硬相含量的增加而更集中。

图8 两相变形过程中的变异系数

变形过程中两相的平均等效塑性应变随宏观真应变的变化曲线如图9所示, 从图中可以看出, 在整个变形过程中, 软相(铁素体)的等效塑性应变与宏观真应变间始终保持着较好的线性关系, 硬相(奥氏体)在变形初期等效塑性应变明显偏小, 呈非线性增长, 当宏观应变达到一定值后(该值与相比比例有关), 其等效塑性应变亦随宏观真应变呈良好的线性增长。此现象表明在变形的初始阶段, 软相承担了绝大部分的塑性应变, 只有当变形达到一定量值后, 才能带动硬相变形, 该现象与 ARMAKI 等^[21]和何东^[22]的研究结果相同。

图9 不同相比比例两相平均等效塑性应变

不同相比比例下两相塑性应变比随宏观应变的变化规律, 如图10所示。在初始变形阶段, 因为软相承担了较大部分的塑性应变, 两相间的变形不协调性十分为明显, 随着应变的增加两相的塑性应变趋于线性增加, 应变比迅速下降, 逐渐趋于稳定, 即各相比例下, 两相的塑性应变比逐渐趋于某一定值。依据此规律, 对两相应变比 G 与宏观应变之间通过建立式(3)进行量化描述

$$G = k[1 - \exp(-t\varepsilon_z)]^{-1} \quad (3)$$

式中, k 为两相变形协调的稳定系数, t 为与奥氏体含量相关的材料系数, 下标 z 代表宏观变量, 其结果如表2所示。在相同的变形条件下, 奥氏体含量越多, G 值越靠近于1, 两相之间的应变协调性越好。

图 10 两相平均等效塑性应变比

表 2 不同相比例两相塑性应变比参数

奥氏体体积分数(%)	30	50	70
k 值	1.255	1.238	1.222
r 值	35.34	79.35	96.52

4 两相材料应变配分关系的讨论

前述研究表明,当变形量达到一定值后,两相的塑性应变均随宏观应变呈良好的线性关系,因此各相的塑性应变增量与宏观应变增量的差值之比近似为一定值,通过引入应变配分参数 K 建立式(4)表达两相塑性应变增量与宏观增量的关系

$$\frac{|\Delta\varepsilon_f - \Delta\varepsilon_z|}{|\Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_z|} = K \frac{\varphi_a}{\varphi_f} \quad (4)$$

式中, φ 代表相的体积分数, K 为应变配分参数。显然, K 值与变形过程无关,是关于相比例 C 的函数,如式(5)所示

$$K = F(C) \quad (5)$$

相比例 C 定义为奥氏体与铁素体体积分数的比值

$$C = \frac{\varphi_a}{\varphi_f} \quad (6)$$

对式(4)进行推导得式(7)

$$\frac{\Delta\varepsilon_f - \Delta\varepsilon_z}{\Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_a} + \frac{\Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_a} = K \frac{\varphi_a}{\varphi_f} + 1 \quad (7)$$

整理可得式(8)

$$\frac{\varphi_f}{\varphi_f + K\varphi_a} \Delta\varepsilon_f + \frac{K\varphi_a}{\varphi_f + K\varphi_a} \Delta\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_z \quad (8)$$

在变形过程中,通常认为各相应变增量与体积分数乘积的总和为宏观应变增量,即满足式(9),称之为经典应变混合法则^[23]

$$\sum \varphi_i \Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_z \quad (9)$$

式中,下标 i 代表各组元相。

考虑两相之间的相互影响和相比例关系,通过应变配分参数 K ,引入广义体积分数,如式(10)所示

$$\varphi'_f = \frac{1}{\varphi_f + K\varphi_a} \varphi_f \quad \varphi'_a = \frac{K}{\varphi_f + K\varphi_a} \varphi_a \quad (10)$$

式中, φ'_f 代表铁素体广义体积分数, φ'_a 代表奥氏体广义体积分数。可将式(8)改写成与应变混合法则对仗的表达式(11)

$$\varphi'_f \Delta\varepsilon_f + \varphi'_a \Delta\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_z \quad (11)$$

为建立不同相比例条件下,应变配分参数 K 的变化规律,进行了 5 组相比例的模拟试验,建立不同相比例下的式(4),得出不同相比例的应变配分参数 K ,如图 11 所示。可见,随着硬相奥氏体体积分数的增加, K 逐渐下降,二者对应的量化关系通过回归计算可得

$$K = 1.26 \times [1 - 0.088 \exp(0.39 \times C)] \quad (12)$$

依据式(12)可量化求解得出本试验钢(两相流变曲线见图 2)不同相比例下两相间的应变配分参数 K 。结合式(8)和图 11 不难发现,只有当奥氏体与铁素体相比例约为 2.2,即 K 近似为 1 时,两相的应变关系符合经典混合法则(式(9))表达。但对于其他相比例条件, K 值不等于 1 时,通过广义体积分数式(10)的引入可更准确地表达两相间的应变关系。从而可较为准确地求解出不同变形阶段两相间的应变配分规律,为通过调整两相比例来调控两相变形协调性提供技术参考。

图 11 K 参数随相比例的变化

此外,双相或多相材料的界面^[24-25]、组元相间性质的差异等因素均会对相间变形协调性产生影响,关于这些方面的建模与分析表征仍需进一步研究。

5 结论

(1) 双相钢变形过程中,两相的等效塑性应变体积分数均符合正态分布,而等效塑性应力体积分数满足呈负偏态分布。各组元相内存在应变梯度,铁素体软相内的高应变区远离两相相界,低应变区在相界附近;奥氏体硬相内的应变分布规律与铁素体相反。软相相内应变分布比硬相均匀,随硬相体

积分数的增加,两相的相内应变分布越均匀。

(2) 引入两相应变比量化表征了两相间的变形协调性。组元相间变形协调性随变形程度的增加而改善并逐渐趋于平稳;随硬相体积分数的增加,相间协调性增加。

(3) 变形一定程度后,两相内的塑性应变与宏观应变近似满足线性关系。引入与两相比比例相关的应变配分参数 K , 基于广义体积分数的应变混合法则可更加准确的预测不同相比比例下组元间的应变配分规律。

参 考 文 献

- [1] 董允, 贾艳琴, 徐立红. 奥贝双相钢力学性能及塑变分析[J]. 河北工业大学学报, 2000, 29(1): 67-70.
DONG Yun, JIA Yanqin, XU Lihong. Mechanical properties and plastic transformation analysis of aube dual phase steel[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2000, 29(1): 67-70.
- [2] 陈国兴, 彭艳, 刘才溢, 等. 双相材料微观变形行为研究综述[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(1): 396-402.
CHEN Guoxing, PENG Yan, LIU Caiyi, et al. A review of microscopic deformation behavior of biphasic materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(1): 396-402.
- [3] 蔡恒君, 胡靖帆, 宋仁伯, 等. 高应变速率条件下 1200 MPa 级冷轧双相钢塑性变形微观机理的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 23-29.
CAI Hengjun, HU Jingfan, SONG Renbo, et al. Plastic deformation microscopic of cold rolled dual phase steel DP1200 under high strain rate deformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 23-29.
- [4] 孔政, 孔宁, 张杰, 等. 双相钢的力学性能和对成形极限的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 140-146.
KONG Zheng, KONG Ning, ZHANG Jie, et al. Mechanical property of dual duplex steel and its effect on the forming limit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 140-146.
- [5] 魏兴, 付立铭, 刘世昌, 等. 双相钢组成相的变形行为及其影响因素[J]. 材料研究学报, 2013, 27(6): 665-672.
WEI Xing, FU Liming, LIU Shichang, et al. The deformation behavior of constituent phases and the affected factors in dual-phase steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2013, 27(6): 665-672.
- [6] KOYAMA T. Image-based calculation of stress-strain curve of the two-phase microstructure on the basis of the modified secant method[J]. ISIJ International, 2012, 52(4): 723-728.
- [7] ISMAIL K, PERLADE A, JACQUES P J, et al. Impact of second phase morphology and orientation on the plastic behavior of dual-phase steels[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 118: 130-146.
- [8] 任春影, 万印, 初广香, 等. 钢板拉伸颈缩致断裂的应变局部化过程[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 150-155.
REN Chunying, WAN Yin, CHU Guangxiang, et al. Strain localization process of steel plate in tensile from necking to fracture[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(1): 150-155.
- [9] 杜泓飞, 曾攀, 雷丽萍, 等. 研究 NiTi 合金相变局部化现象的宏观原位多场测试方法及分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(24): 15-23.
DU Hongfei, ZENG Pan, LEI Liping, et al. Experimental design and analysis for in situ macroscopic multi-fields measurements on transformation localization in NiTi alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(24): 15-23.
- [10] 詹梅, 李宏伟, 孙新新, 等. 基于晶体塑性的难变形材料不均匀变形多尺度建模研究进展[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1): 1-14.
ZHAN Mei, LI Hongwei, SUN Xinxin, et al. Research progress of the multi-scale modeling of heterogeneous deformation for hard-to-deform material based on crystal plasticity[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 1-14.
- [11] 陈飞, 崔振山, 董定乾. 微观组织演变元胞自动机模拟研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 30-39.
CJEN Fei, CUI Zhenshan, DONG Dingqian. Research progress in cellular automaton simulation of micro-structure evolution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 30-39.
- [12] 高维林, 白光润, 周志敏. 金属塑性变形中位错组态演化模型及其应用[J]. 中国科学, 1994, 24(11): 1225-1232.
GAO Weilin, BAI Guangrun, ZHOU Zhimin. Dislocation configuration evolution model of metal plastic deformation and its application[J]. Scientia Sinica, 1994, 24(11): 1225-1232.
- [13] OSOSKOV Y, WILKINSON D S, JAIN M, et al. In-situ measurement of local strain partitioning in a commercial dual-phase steel[J]. International Journal of Materials Research, 2007, 98(8): 664-673.
- [14] GHADBEIGI H, PINNA C, CELOTTO S, et al. Local plastic strain evolution in a high strength dual-phase

- steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527: 5026-5032.
- [15] CHOI S H, KIM E Y, WOO W, et al. The effect of crystallographic orientation on the micromechanical deformation and failure behaviors of DP980 steel during uniaxial tension[J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 45: 85-102.
- [16] BASANTIA S K, SINGH V, BHATTACHARYA A, et al. Prediction of tensile behaviour of ferrite-martensite dual phase steel using real microstructure-based RVE simulations[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5: 18275-18280.
- [17] 李子洋, 章海明, 崔振山, 等. 316LN 混晶组织微区塑性变形全场晶体塑性模拟研究[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(6): 208-215.
- LI Ziyang, ZHANG Haiming, CUI Zhenshan, et al. Study on full-field crystal plasticity simulation of grain-level plastic deformation for 316LN steel with mixed-grain structure[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25(6): 208-215.
- [18] GOU Ruibin, DAN Wenjiao, ZHANG Weigang. Research on grain feature parameters based on inhomogeneous plastic deformation in microstructure of ferrite/martensite dual phase steels[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 2089-2094.
- [19] 彭梦都. 高氮奥氏体钢变形行为研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2018.
- PENG Mengdu. Study on deformation behavior of high nitrogen austenitic steel[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2018.
- [20] DAS A, TARAFDER S, SIVAPRASAD S, et al. Influence of microstructure and strain rate on the strain partitioning behaviour of dual phase steels[J]. *Materials Science & Engineering*, 2019, 754: 348-360.
- [21] ARMAKI H G, MAAß R, BHAT S P, et al. Deformation response of ferrite and martensite in a dual-phase steel[J]. *Acta Materialia*, 2014, 62: 197-211.
- [22] 何东. 双相多晶钛合金微观塑性变形机理与组织演化的定量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- HE Dong. Quantitative research on micro-plastic deformation mechanism and microstructure evolution of polycrystal-dual phase titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [23] TOMOTA Y, TAMURA I, KUROKI K, et al. Tensile deformation of two-ductile-phase alloys: Flow curves of α - γ Fe-Cr-Ni alloys[J]. *Material Science and Engineering*, 1976, 24(1): 85-94.
- [24] NGUYEN B N, KURTZ R J, GAO Fei. Modeling the effects of helium-vacancy clusters on the stress-strain response of a grain boundary in iron by a mechanistic finite element approach informed by molecular dynamics data[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, 526: 151766.
- [25] TOUDESCHKY H H, ANBARLOOIE B, KADKHODA-POUR J. Micromechanics stress-strain behavior prediction of dual phase steel considering plasticity and grain boundaries debonding[J]. *Materials and Design*, 2015, 58(5): 167-176.
-
- 作者简介: 金淼, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进金属材料的塑性成形理论与技术。
E-mail: jmiao@ysu.edu.cn
- 陈雷(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复相难变形材料的塑性理论。
E-mail: chenlei@ysu.edu.cn