

材料与成形性能

## 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料热压缩试验与有限元模拟

胡建华, 王小花, 陈建勋, 桂海莲, 杨 晟, 李 靖

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 对 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行了热压缩试验, 并结合 DEFORM-3D 有限元软件分析了应变变化趋势和微观结构演变规律, 建立了其 Arrhenius 本构模型。试验过程中碳钢体积占 2/3, 不锈钢体积占 1/3, 应变速率为  $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ , 变形温度为  $1000 \sim 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过比较模拟和试验结果, 发现碳钢与不锈钢双金属材料应力-应变曲线与试验结果存在一定的比例关系而且复合材料中间区域的变形量大于两端。通过模拟可得出整体过程中不锈钢的平均晶粒比碳钢大。由于试验结果跟模拟结果存在一定的差别, 在物块外表面不能明确看出物体内部是否存在变化, 因此本模拟是有必要的。

**关键词:** 碳钢/不锈钢; 复合材料; 热压缩; 应变; 应力; 微观组织

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.029

**中图分类号:** TG335.5<sup>+</sup>9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0222-06

## Hot compression test and finite element simulation on 20 carbon steel/316L stainless steel composite material

Hu Jianhua, Wang Xiaohua, Chen Jianxun, Gui Hailian, Yang Sheng, Li Jing

(College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** For the 20 carbon steel/316L stainless steel composite material, the hot compression test was conducted by Gleeble-3500 thermal simulation testing machine combined with finite element software DEFORM-3D, the strain change trend and microstructure evolution laws were analyzed, and the Arrhenius constitutive model was established. During the test, the volume of carbon steel accounted for 2/3, the volume of stainless steel accounted for 1/3, the strain rate was  $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ , and the temperature was  $1000 \sim 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . By comparing the simulation and test results, it is found that there is a certain proportional relationship between the stress-strain curves of carbon steel and stainless steel bimetallic materials and the test results, and the deformation amount in the middle region of the composite material is greater than that at both ends. Through the simulation, it can be concluded that the average grain size of stainless steel is larger than that of carbon steel during the overall process. Due to certain differences between the test results and the simulation results, whether there is a change inside the object cannot be clearly seen on the outer surface of the object. So this simulation is necessary.

**Key words:** carbon steel/stainless steel; composite material; hot compression; strain; stress; microstructure

复合板是由两种或两种以上材料复合而形成的板材, 包括很多类型, 有金属类、木材类、彩钢类和岩棉类等, 复合板是为了不降低板材的功能, 同

时又能节约资源、压缩成本而产生的一种新型板材。金属类的复合板主要是由不同类型的金属制成, 相比于单一元素组成的金属材质, 金属类复合板能节约贵重的金属材料。此次研究的双金属复合板是由两种不同的金属材料制成, 大都以碳钢板为基体材料来承受工作压力, 充分利用碳钢板的良好的力学性能和价廉优势, 以耐腐蚀合金材料为内衬防腐层, 发挥耐腐蚀合金的耐蚀性能。双金属复合板可根据腐蚀介质的不同来选择相应的耐蚀合金材料作为内衬, 能达到耐蚀合金板材的耐腐蚀性能要求, 以确

收稿日期: 2022-10-02; 修订日期: 2023-01-03

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目 (202203021221158);  
山西省重点研发计划 (201903D121049)

作者简介: 胡建华 (1977-), 女, 博士, 副教授

E-mail: 2005022@tyust.edu.cn

通信作者: 王小花 (1998-), 女, 硕士研究生

E-mail: S202114210083@stu.tyust.edu.cn

保生产运营的安全性。

20 碳钢/316L 不锈钢复合材料具有不锈钢的耐腐蚀性和碳钢优异的强度和韧性的优点，是在腐蚀环境中广泛使用的不锈钢板的替代品，宋仁伯等<sup>[1]</sup>对 316L 不锈钢的变形抗力进行了系统的研究，分析了变形温度和变形速率对 316L 不锈钢变形抗力的影响，并建立了高温变形抗力模型。魏栋等<sup>[2]</sup>利用 DEFORM-3D 软件建立有限元模型，其中包括运动、摩擦、接触等重要的边界条件，并对冷轧过程进行了仿真，将有限元模拟结果与试验结果进行了对比分析，以此来证明模拟结果与试验结果的关联性。

韩栋等<sup>[3]</sup>提出了基于元胞自动机的板材的累积叠轧微观组织预测，在 DEFORM 后处理有限元软件中利用元胞自动机模拟了压缩和累积滚动，研究结果显示，该方法可有效改善合金的组织性能。由于本次研究对象碳钢/不锈钢复合材料在石油化工、海洋工程和建筑领域具有广阔的应用前景，而且许多制造技术已被广泛应用于不锈钢复合板的金属连接，如爆炸复合、热轧连接、扩散连接、累积滚焊、热压连接等。王顺等<sup>[4]</sup>对不同还原速率下的复合板界面结构的影响进行了研究，经探索发现易变形的碳钢先变形，难变形的不锈钢在某一点再开始变形，在压下率为 35% 时呈现出协调的变形趋势。到目前为止，许多专家只是对不锈钢热轧复合板的接头强度和力学性能进行了研究，但是对热压缩过程中复合材料粘结界面微观结构的研究较少。本文分析了 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料压制板的界面组织，研究了变形温度及应变速率对复合材料结合界面缺陷和再结晶的影响。

## 1 试样制备

使用冶金复合法<sup>[5]</sup>制备双层 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料试样，以 20 碳钢为基层，316L 不锈钢为复合层。试样为尺寸为  $\Phi 8\text{ mm}\times 11.78\text{ mm}$  的圆柱形试样，其中 20 碳钢的尺寸为  $\Phi 8\text{ mm}\times 8.2\text{ mm}$ ，316L 不锈钢的尺寸为  $\Phi 8\text{ mm}\times 3.58\text{ mm}$ ，20 碳钢/316 不锈钢复合材料的化学成分见表 1。将试验室制备的圆柱形试样在 Gleeble-3500 热模拟机上进行等温压缩试验<sup>[6-7]</sup>。将试样加热至  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，加热速度为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，保持 5 min，然后在 1000、1050 和  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  下保温 30 s，以确保温度的均匀性。在  $0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$  的应变率范围内，变形量为 50%。压缩试样期间，通过热模拟器监测和记录试样的温度变

化，并在变形后将试样在水中淬火。使用 4% 硝酸酒精溶液对复合层进行蚀刻以观察微观组织。

表 1 20 碳钢/316 不锈钢复合材料化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 20 carbon steel/316 stainless steel composite materials（%，mass fraction）

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
20 碳钢	0.19	0.23	0.59	0.025	0.02	0.15	0.25	0.01
316L 不锈钢	0.02	0.51	1.11	0.02	0.015	16.32	10.11	0.03

## 2 压缩过程的有限元模拟

### 2.1 有限元模型的建立

有限元模型由一个上模、一个下模、两个被轧中间体组成。在模拟前期通过软件 SolidWorks 建模，画出两个相接中间体，并导入 DEFORM 有限元软件中，建立的模型如图 1 所示。

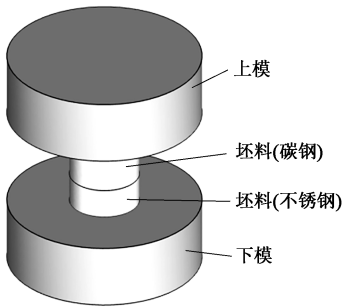


图 1 复合试样 DEFORM-3D 热压缩过程模拟  
Fig. 1 DEFORM-3D hot compression process simulation of composite specimen

### 2.2 各参数的设定

将上模、下模定义为刚体，中间两个轧件定义为塑性体。在 DEFORM-3D 有限元软件中设置轧件的温度为  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>。上中间体碳钢轧件的网格划分数量为 50000 个，下中间体不锈钢轧件的网格划分数量为 32000 个。接触关系中的摩擦类型选定剪切摩擦，摩擦因数为 0.7，上中间体和下中间体的接触关系定义为不可分离，上模和上中间体及下模和下中间体的接触关系定义为可分离。上模移动速度为  $1.178\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其他物体的移动速度均为  $0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在模拟控制过程中，采用拉格朗日增量算法，将移动主体设为上模，一共移动 60 步，每两步保存 1 次，每步移动 0.1 mm，这里每步移动的距离应是前面最小网格数的  $1/5\sim 1/3$ 。

### 2.3 模拟工程分析

晶粒越细小均匀，金属的强度和塑韧性就越好，因此，研究再结晶在本次模拟中是必要的。热压缩

后的坯料在不同区域会发生不同程度的变化,为了更直观地分析数值模拟结果,更清楚碳钢与不锈钢两种材料在热压缩过程中各自的变形程度,取其1/2剖面上的几个点,如图2所示,点P1在接触层,点P2、点P3分别在碳钢和不锈钢总长的1/3处,点P4、点P5分别在碳钢和不锈钢总长的2/3处,表2为各点的坐标,其中的对象1为碳钢,对象2为不锈钢。图3为整个模拟过程流程图。

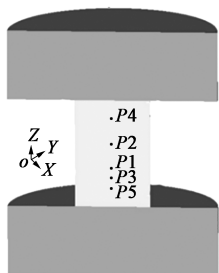


图2 坯料各点分布图

Fig. 2 Distribution diagram of each point on blank

表2 坯料各点的坐标

Table 2 Coordinates of each point on blank

点	X	Y	Z	对象
P1	13.445	9.9016	11.2165	2
P2	13.445	9.9016	13.9300	1
P3	13.445	9.9016	10.0100	2
P4	13.445	9.9016	16.6700	1
P5	13.445	9.9016	8.8100	2

### 3 模拟结果以及对比分析

#### 3.1 应力、应变值结果分析

图4为材料应力、应变的试验值和模拟值的对比分析,结果显示,元胞自动机法模拟的20碳钢/316L不锈钢复合材料的应力-应变曲线与试验结果存在一定的比例关系,模拟值大约为试验值的2倍,

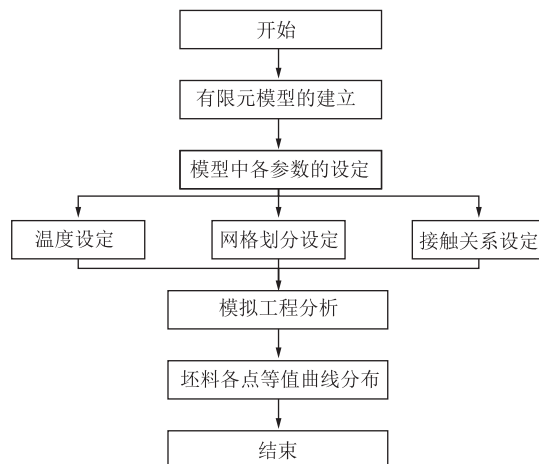


图3 模拟过程流程图

Fig. 3 Flow chart of simulation process

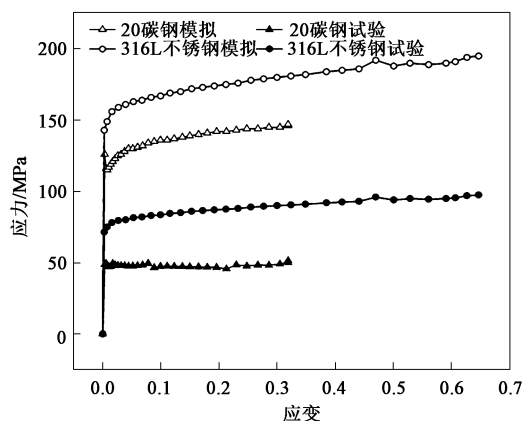


图4 材料试验和模拟的应力值、应变值对比

Fig. 4 Comparison between experimental and simulated values of stress and strain

20碳钢的整体应力值比316L不锈钢小<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 等效应变等值曲线分布

在模拟过程中将坯料与上、下模具定义为可分离,所以上、下模具接触之后受到的摩擦力较大,阻碍了坯料上、下两端变形,导致中心部位的变形量较大,所以随着变形量的增加,坯料出现了鼓肚现象,

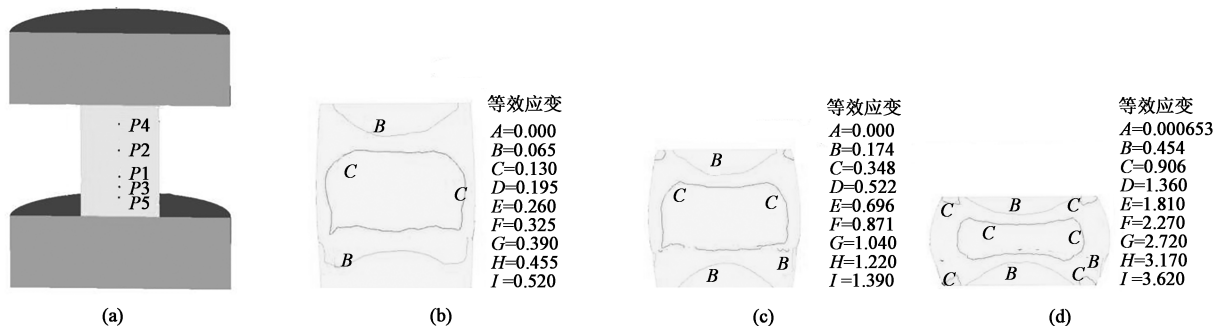


图5 不同变形量下的等效应变场

(a) 0% (b) 10% (c) 20% (d) 50%

Fig. 5 Equivalent strain fields at different deformation amounts

图5为变形量分别为0%、10%、20%和50%的等效应变等值曲线分布图<sup>[10]</sup>,可以看出坯料上、下两端为难变形区,变形量较小,而碳钢和不锈钢的中间区域由于接触关系定义为不可分离,可近似看为无摩擦力的影响,其与上、下模具也无直接接触,所以变形阻碍也小,因此,中间区域的变形量大于两端。

### 3.3 流变应力曲线系统

材料的流变应力与应变之间有着重要关系,同时,流变应力也受温度和应变速率的影响。如图6所示,在1100℃下,应变速率为 $1\text{ s}^{-1}$ 时,流变应力在前期会随着应变的增加而迅速增加,此时加工硬化占主导,在变形过程中材料的加工硬化率与位错密度成正比,当位错达到临界值时,材料开始发生动态再结晶,此时软化作用占主导,因而流变应力会随着应变的增加而缓慢增加,逐渐趋于稳定<sup>[11]</sup>。

### 3.4 压缩变形结果分析

试验测得压缩后的总高度为5.82 mm,碳钢的高度为4.52 mm,不锈钢的高度为1.3 mm,该数据显示碳钢压缩了45%,不锈钢压缩了64%,而利用DEFORM-3D软件测得碳钢的压下量为60%,不锈钢的压下量为45%,如图7所示<sup>[12]</sup>。因此,试验结果跟模拟结果存在一定的差别,试验测得不锈钢的压下量比碳钢大,然而模拟得到的结果是碳钢的压下量比不锈钢大,产生这种现象的原因为:由于试样的应力分布不均匀,不同区域的变形量不同,

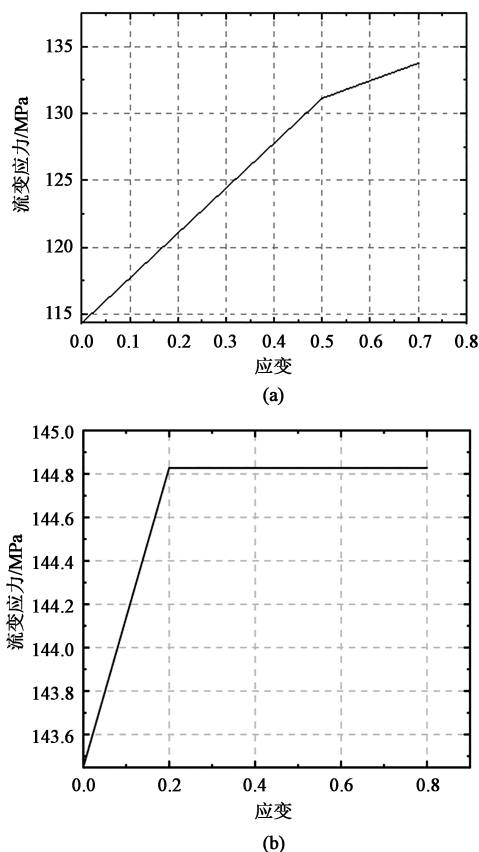


图6 20 碳钢 (a) 和 316L 不锈钢 (b) 的流变应力曲线  
Fig. 6 Flow stress curves of 20 carbon steel (a) and 316L stainless steel (b)

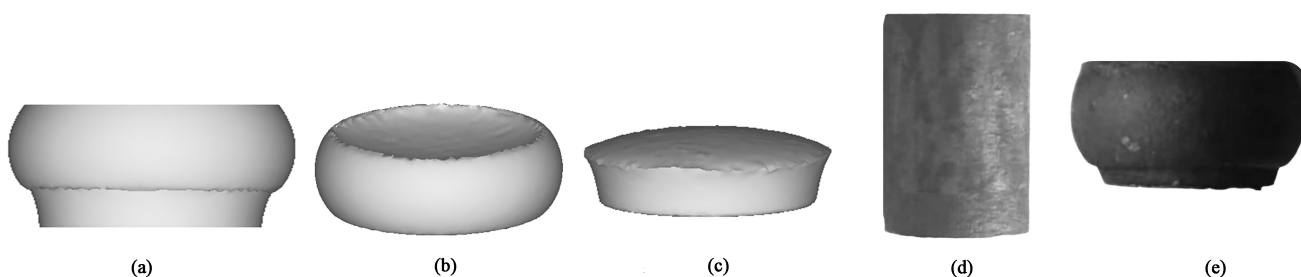


图7 压缩变形结果图

(a) 整体压缩变形 (b) 碳钢压缩变形 (c) 不锈钢压缩变形 (d) 整体实物图 (e) 整体压缩变形实物图

Fig. 7 Diagrams of compression deformation result

(a) Overall compression deformation (b) Compression deformation of carbon steel (c) Compression deformation of stainless steel  
(d) Overall physical diagram (e) Physical diagram of overall compression deformation

中心部分的等效应力大于两侧部分,进而导致中心处的应变大于两侧,从而引起内部能量不同及位错变化不同,这也揭示了动态再结晶形核过程不均匀的原因。而且,在试验过程中复合材料要结合,与各自的性质有很大的关系,两种材料的弹性模量、屈服强度、变形抗力均不同,在进行压缩时,变形抗力小的碳钢先产生塑性变形,所以在变形过程中,

20 碳钢先变形,且变形程度大,发生再结晶,晶粒细化,316L 不锈钢后变形。因而,双层金属界面间出现滑移,不利于基层、覆层协同变形。由于在物块外表面不能明确看出物体内部是否存在变化,所以进行模拟是必要的。

### 3.5 组织演变分析

将变形量为50%的试样在热变形后水冷至室



温,以保留热压缩过程的微观组织,并使用 4% 硝酸酒精溶液对复合层进行蚀刻,图 8 为碳钢/不锈钢复合材料的复合界面的金相显微组织形貌。从试样界面两侧的变形区组织可以看出,在碳钢层和不锈钢层中间存在一个结合界面,可以观察到 20 低碳钢的晶粒比不锈钢小。

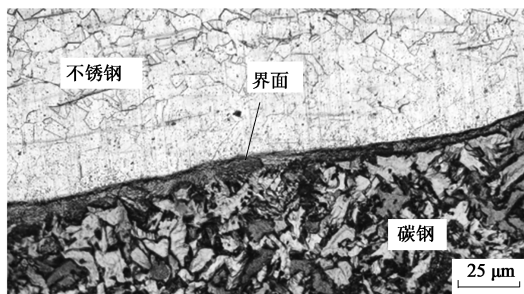
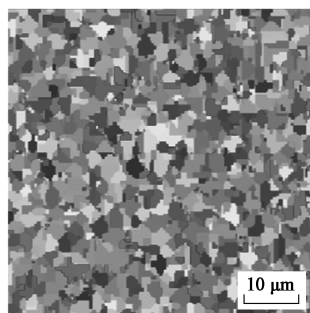


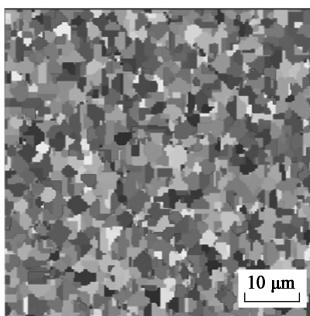
图 8 热压缩后界面两侧的微观组织

Fig. 8 Microstructures on both sides of interface after hot compression

元胞自动机方法是用来描述复杂系统在离散空间-时间上变化规律的数学算法,元胞自动机模型由元胞空间、邻居类型、边界条件和元胞状态等 4 个基本要素组成。基于固溶态的显微组织,采用元胞自动机模拟了 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料压缩后分界面两侧的变形区晶粒组织大小,如图 9 所示,



(a)



(b)

图 9 元胞自动机模拟的晶粒组织

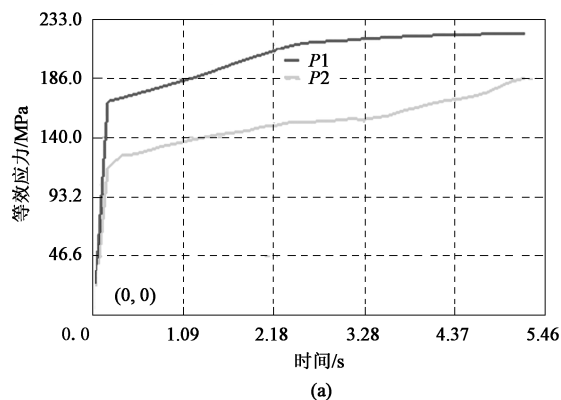
(a) 20 碳钢 (b) 316L 不锈钢

Fig. 9 Grain structures simulated by cellular automaton

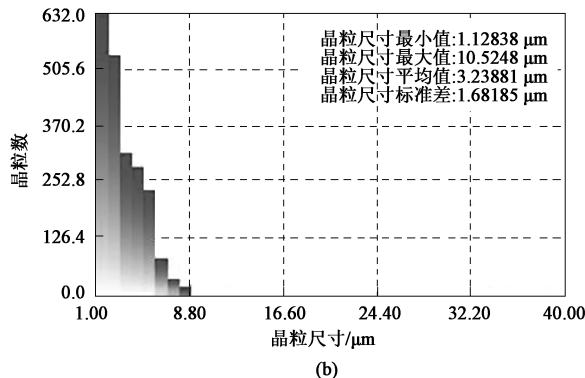
(a) 20 carbon steel (b) 316L stainless steel

通过二者对比分析可看出不锈钢的晶粒尺寸比碳钢大。经过试验和模拟结果对比分析均得出了不锈钢晶粒要比碳钢大的结论<sup>[13]</sup>。

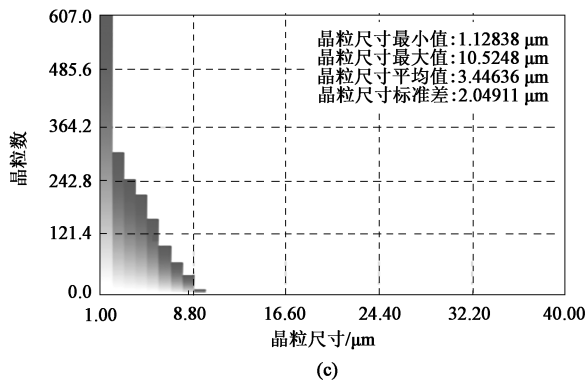
如图 10 所示,为探究复合材料在整体压缩试验过程中变形量对两侧金属组织结构的影响,在有限元模拟过程中,在压缩件接触层两侧分别取点  $P_1$ 、点  $P_2$  来研究两点的轨迹和两点处晶粒尺寸分布。由图 10 可知,在变形温度为 1000 °C、应变速率为



(a)



(b)



(c)

图 10 追踪点轨迹及晶粒大小直方图

(a) 追踪点轨迹图 (b) 20 碳钢晶粒大小直方图

(c) 316L 不锈钢晶粒大小直方图

Fig. 10 Trace point trajectories and grain size histograms

(a) Trajectory diagram of trace points

(b) Histogram of grain size for 20 carbon steel

(c) Histogram of grain size for 316L stainless steel

0.1 s<sup>-1</sup> 时, 碳钢在第 24 步的变形量为 20% 时, 平均晶粒尺寸最小, 为 3.23881 μm, 不锈钢在第 18 步的变形量为 15% 时平均晶粒尺寸最小, 为 3.44636 μm。可以看出, 整体过程中碳钢所受的应力比不锈钢小, 碳钢的平均晶粒比不锈钢小<sup>[14]</sup>, 碳钢的组织比不锈钢更细密均匀。

## 4 结论

(1) 元胞自动机法模拟的 20 碳钢/316L 不锈钢复合材料的应力-应变曲线与试验结果存在一定的比例关系, 模拟值大约为试验值的 2 倍, 20 碳钢的整体应力值比 316L 不锈钢小。

(2) 在变形温度和应变速率一定的情况下, 流变应力在前期会随着应变的增加而迅速增加, 此时加工硬化占主导, 在变化过程中材料的加工硬化率与位错密度成正比, 当位错达到临界值时, 材料开始发生动态再结晶, 此时软化作用占主导, 因而, 流变应力会随着应变的增加而缓慢增加, 逐渐趋于稳定。

(3) 试验结果跟模拟结果存在一定的差别。试验测得 316L 不锈钢的变形量比 20 碳钢大, 由于试样的应力分布不均匀, 中心部分的等效应力大于两侧部分, 两种材料的弹性模量、屈服强度、变形抗力均不同, 导致碳钢的变形量比不锈钢大, 所以本模拟的必要性是可以清晰观察物体的内部变形。

## 参考文献:

- [1] 宋仁伯, 项建英, 刘良元, 等. 316L 不锈钢的热变形抗力模型 [J]. 机械工程材料, 2010, 34 (6): 85-88.  
Song R B, Xiang J Y, Liu L Y, et al. Thermal deformation resistance model of 316L stainless steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34 (6): 85-88.
- [2] 魏栋, 楚志兵, 黄庆学, 等. 基于 DEFORM-3D 的皮尔格冷轧不锈钢管有限元模拟及分析 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (5): 89-95.  
Wei D, Chu Z B, Huang Q X, et al. Finite element simulation and analysis of pilger cold rolled stainless steel pipe based on DEFORM-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (5): 89-95.
- [3] 韩栋, 赵永庆, 曾卫东, 等. 基于元胞自动机的 TA15 板材累积叠轧微观组织预测 [J]. 稀有金属材料 and 工程, 2021, 50 (10): 3437-3445.  
Han D, Zhao Y Q, Zeng W D, et al. Microstructures prediction of TA15 sheet rolling based on cellular automata [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (10): 3437-3445.
- [4] Wang S, Zhao G H, Li Y G, et al. Effect of different reduction rates on the near-interfacial structure of pressed 304/Q235 composite plate [J]. Materials Research Express, 2020, 7 (6): 066531.
- [5] 黄晓斌. 冶金复合无缝钢管在工业管道中的应用 [J]. 特钢技术, 2013, 19 (1): 1-5, 18.  
Huang X B. Application of metallurgical composite seamless steel pipe in industrial pipeline [J]. Special Steel Technology, 2013, 19 (1): 1-5, 18.
- [6] Liu B X, An Q, Yin F X, et al. Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 11357-11377.
- [7] Yang X W, Li W Y, Feng Y, et al. Physical simulation of interfacial microstructure evolution for hot compression bonding behavior in linear friction welded joints of GH4169 superalloy [J]. Materials & Design, 2016, 104: 436-452.
- [8] 杨韵琴, 张文玮, 谭元标, 等. TB8 钛合金热压缩过程中动态再结晶组织的模拟 [J]. 热处理, 2021, 36 (4): 6-11.  
Yang Y Q, Zhang W W, Tan Y B, et al. Simulation of dynamic recrystallization microstructure of TB8 titanium alloy during hot compression [J]. Heat Treatment, 2021, 36 (4): 6-11.
- [9] 王海宁, 李萍, 张清. Mg-5Sm-2Gd 合金的热压缩行为 [J/OL]. 稀土: 1-7 [2023-04-14]. DOI:10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.20230013.  
Wang H N, Li P, Zhang Q. Hot compression behavior of Mg-5Sm-2Gd alloy [J/OL]. Chinese Rare Earths: 1-7 [2023-04-14]. DOI:10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.20230013.
- [10] 王天胜, 李鑫, 鲁世强, 等. TC21 钛合金热压缩失稳变形组织模拟和预测 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (5): 144-148.  
Wang T S, Li X, Lu S Q, et al. Simulation and prediction of deformation microstructure of TC21 titanium alloy under hot compression [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (5): 144-148.
- [11] 梅瑞斌, 史现利, 包立, 等. 不同加热轧制 AZ91 镁合金带材数值模拟及试验验证 [J]. 中国冶金, 2022, 32 (1): 112-120.  
Mei R B, Shi X L, Bao L, et al. Numerical simulation and experimental verification of AZ91 magnesium alloy strip rolling under different heating conditions [J]. China Metallurgy, 2022, 32 (1): 112-120.
- [12] Hu J H, Yang S, Huang Y L, et al. A new correction theory and verification on the reducing rate distribution for seamless tube stretch-reducing process [J]. Crystals, 2022, 12 (9): 1296-1296.
- [13] 吕泽华, Agamuradov D, 张志雄, 等. 热轧双覆层不锈钢/碳钢复合板组织与性能研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (7): 168-175.  
Lyu Z H, Agamuradov D, Zhang Z X, et al. Research on microstructure and properties of double cladding stainless steel/carbon steel clad plate by hot rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (7): 168-175.
- [14] Yang Y H, Jiang Z Z, Li S X, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of stainless steel/carbon steel laminated composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, (842): 142994.