

# 铸态 Mn18Cr18N 钢多道次轧制和 热处理影响研究

刘 洁<sup>1</sup>, 李 娟<sup>2</sup>

(1. 晋中信息学院智能工程学院, 山西 太谷 030800; 2. 太原科技大学, 山西 太原 030024)

**摘 要:**对 Mn18Cr18N 电渣重熔钢进行三道次和五道次的轧制及固溶处理。借助电子背散射仪(EBSD)观察微观组织,发现随着轧制道次的增加,再结晶晶粒沿着晶界生长,呈现项链状分布,大角度晶界向小角度晶界逐渐迁移后趋于稳定,并出现大量剪切变形带,结果表明,较大的单道次压下量或较高的终轧温度有利于轧制后的 Mn18Cr18N 铸态奥氏体不锈钢再结晶。固溶处理后,发现晶粒细化并长大,退火孪晶增多,组织主要发生静态再结晶。对 Mn18Cr18N 钢进行力学性能测试,发现随着轧制道次的增加,抗拉强度由 950 MPa 增加至 1 090 MPa,屈服强度增加,断后伸长率由 43.46% 降至 29.55%,塑性降低;相应试样固溶处理后,抗拉强度由 904 MPa 降至 870 MPa,屈服强度降低,断后伸长率由 42% 升高到 48%,塑性提高,结果表明固溶处理改善了材料的组织和性能。

**关键词:**Mn18Cr18N 钢; 轧制道次; 固溶处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG335.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)06-0180-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Research on effects of multi-pass rolling and heat treatment of cast Mn18Cr18N steel

Liu Jie<sup>1</sup>, Li Juan<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Engineering, Jinzhong College of Information, Taigu 030800, Shanxi, China; 2. Taiyuan University of Sciences and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** Mn18Cr18N electro-slag remelting steel was rolled in three or five passes and subject to solid solution treatment. The microstructure observation by electron back scattering diffraction (EBSD) indicates that with the increase of rolling passes, the recrystallized grains grow along the grain boundaries and distributes into a chain structure, and the high angle grain boundaries gradually migrate to the small angle grain boundaries and then stabilize. A large number of shear deformation bands appear. A larger single pass deformation or a higher final rolling temperature is beneficial to the recrystallization of Mn18Cr18N as-cast austenitic stainless steel after rolling. After solid solution treatment, the grain becomes fine due to increasing annealing twin grain and static recrystallization. With the increase of rolling passes, the tensile strength is increased from 950 MPa to 1090 MPa, and elongation after fracture decreases from 43.46% to 29.55%. After the solid solution treatment, the tensile strength decreases from 904 MPa for 3-passes to 870 MPa for 5-passes, with the strength decreasing; and the elongation after fracture increases from 42% to 48% accordingly. The results shows that the solid solution treat-

收稿日期: 2021-02-28

基金项目: 山西省教育科学“十四五”规划项目(GH-22010)。

作者简介: 刘洁, 1987 年出生, 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向: 材料加工工程, E-mail: 429842384@qq.com。

ment can improve the microstructure and properties of the material.

**Key words:** Mn18Cr18N steel, rolling passes, solution treatment, microstructure, mechanical properties

## 0 引言

奥氏体不锈钢具有优良的综合性能, 广泛应用于电厂、医疗设备和核工业中<sup>[1]</sup>。当在奥氏体不锈钢中添加超过 0.4% 氮元素时, 它不仅能提高强度和塑性, 增加组织稳定性和耐腐蚀性, 而且能降低生产成本, 提高产品利用率<sup>[2]</sup>。目前对于高氮不锈钢热变形行为的研究, 大都采用热模拟压缩变形或轧制变形分析该钢在不同变形参数下的塑性变形行为及组织演变规律。张云飞<sup>[3]</sup>研究发现, 在 (950 ~ 1 200 °C) 热变形温度范围内, 高氮奥氏体钢为了降低因变形而产生的加工硬化, 可以减少应变速率和提高变形温度, 该软化机制由动态回复逐渐转变为动态再结晶。裴海祥<sup>[4]</sup>建立了 316LN 钢的本构方程, 同时发现升高变形温度将有利于动态再结晶形核, 并促进动态再结晶扩展。李建新<sup>[5]</sup>研究指出高氮奥氏体不锈钢 Mn17Cr19Ni0.6 塑性变形的重要机制为变形孪晶。综上所述, 微观结构及工艺条件等对高氮奥氏体不锈钢力学性能的影响已开展大量的研究工作, 而关于热轧和固溶处理方式对其力学行为的影响却鲜有报道, 仍然有待进行深入系统研究。

针对铸态 Mn18Cr18N 钢锭进行多道次热轧制试验, 借助电子背散射仪 (EBSD) 对其微观组织结构演变进行表征, 并分析其变形后试样力学性能, 揭示了 Mn18Cr18N 钢铸态组织直接塑性变形过程中组织演变规律及其对变形后试样力学性能影响规律, 为该钢直接塑性成形高性能零件的工艺设计和过程控制提供了科学依据。

## 1 试验方案

试验采用 100 mm×90 mm×12 mm (长×宽×高) 的 Mn18Cr18N 电渣重熔钢坯, 其化学成分见表 1。

表 1 Mn18Cr18N 钢的化学成分  
Table 1 Chemical composition of Mn18Cr18N steel %

Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Al	N	Ti	Fe
19.3	0.6	0.2	20.1	0.02	0.03	0.6	0.016	其他

### 1.1 轧制过程

铸坯在电阻加热炉中 1 200 °C 温度下保温 15 min 后, 立刻进行总压下量为 50% 的三、五道次

轧制变形, 轧辊直径是 320 mm, 轧后空冷。此过程顺利, 未发生未咬入、轧辊弹跳等状况。其中, 轧制的速度为 0.2 m/s, 道次的平均间隔时间为 10 s。取轧板上 RD-ND 截面试样, 采用电子背散射 EBSD 进行取向分析。利用拉伸试验机对试样进行力学性能测试。

### 1.2 固溶过程

把轧制后的试样在 KBF1400 箱式电阻炉内加热到 1 050 °C, 保温 2 h, 出炉后水冷, 取出固溶处理后的试样, 分析固溶处理后的微观组织, 利用拉伸试验机对试样进行力学性能测试。

## 2 结果与讨论

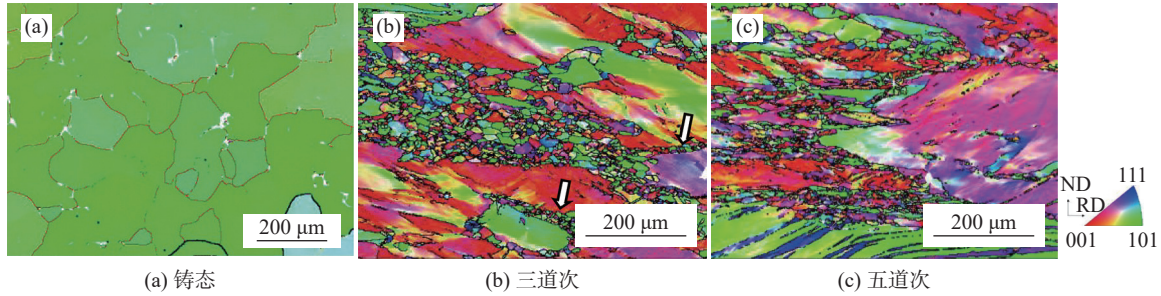
### 2.1 不同道次对微观组织的影响

图 1 为不同状态下 Mn18Cr18N 铸态不锈钢的 IPF 图。从图 1(a) 中可以看到, 铸造结构中含有柱状晶体, 组织内部取向颜色较为单一, 此取向偏向 <101> 与 <111> 之间。图 1(b) 中为轧板经总压下量为 50% 的三道次变形的 IPF 图。原始铸态组织沿着变形方向而拉长。由于每道次压下量较小, 道次间停留时间仅为 10 s, 不足以激发再结晶形核。因此, 在以多道次小应变累加的轧制工艺变形过程中, 组织中再结晶体积分数较低。其中的大块铸态组织被等轴状再结晶晶粒分割; 晶粒取向发生改变, 颜色随机分布。而从图中箭头可以看到, 原始粗晶界处形成了一定数量的细晶, 而未再结晶的大晶粒晶界呈锯齿状。组织内部取向颜色偏向于 <101> 和 <001> 取向。经过五道次变形后, 大块原始铸态粗晶逐渐被细小的晶粒分割, 铸态组织内出现 <111> 取向的变形带 (图 1(c))。微观结构表明, 三、五道次轧制后试样处于变形硬化状态。

图 2 为不同状态下 Mn18Cr18N 钢的取向差分布, 与图 1 中的取向相对应。原始铸态下, 晶界的取向差在小于 15°, 20° ~ 25°, 50° 和 60° 取向上呈现较高频率, 说明组织内含有较大结构的柱状晶体 (见图 2(a))。由图 2(b) 可见, 在三道次轧制过程中, 晶粒的取向分布呈现连续型分布。五道次的轧制过程中, 小角度晶界同样向大角度晶界连续性迁移转变。在高温下, 具有大角度晶界的动态再结晶的晶粒呈

现长大趋势,晶粒趋于等轴状(如图1(b)),再结晶含量增加<sup>[6]</sup>。多道次小应变累加的连续轧制工艺对再结晶程度有很大影响。新形核小晶粒出现在变形带和大晶粒晶界周围。对应图1(b)可以看到三道次内部再结晶晶粒沿晶界周围生长,呈典型的项链状;而五道次轧制后终轧温度不断降低,往返碾压下

组织内没有足够能量来促进亚晶的生成、长大、合并,大角度晶界相对三道次的比例要低,组织的再结晶能力变弱,此时,相对三道次的平均取向差,表现为大量取向差较小的亚晶界(图2(c))。总的来看,随着道次的增加,平均取向差从31.5°快速降到10°和9°,组织表明动态再结晶晶粒体积分数显著下降。



黑色线为>15°大角度晶界,红色线为2~15°的小角度晶界

图1 不同状态下 Mn18Cr18N 钢的 IPF 图

Fig. 1 IPF diagrams of Mn18Cr18N steel under different states

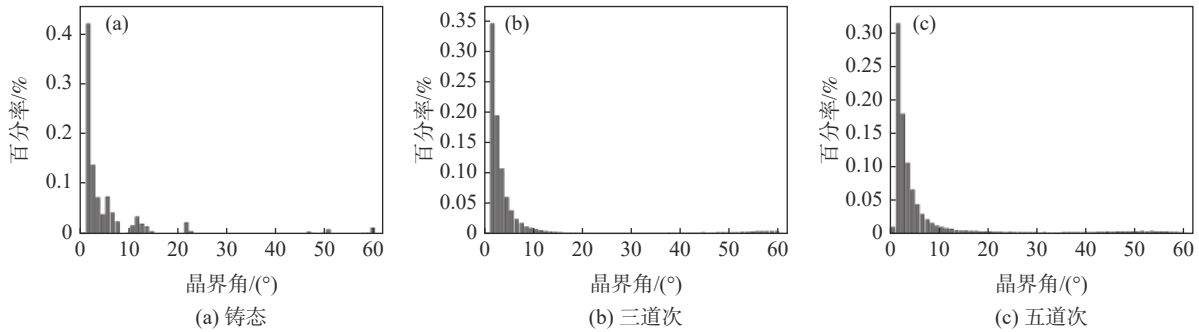


图2 不同状态下 Mn18Cr18N 钢的取向差分布

Fig. 2 Grain boundary orientation distribution maps of Mn18Cr18N steel under different states

Mn18Cr18N 钢为低层错能的金属,其主要变形机制为位错滑移和孪生切变。在轧制过程中,温度、压下量、道次等对热轧件的组织具有一定影响。多道次轧制后,由于每道次的压下量较小且温度较低,组织内部晶粒发生畸变而产生回复,一些新生再结晶晶粒沿着晶界和三晶交界处逐渐转动形成,从图2(b)中可以看到小角度晶界的取向差较多。而五道次下大量位错聚集在晶粒内,小角度晶界增多,组织内部出现明显的剪切带。剪切带的形成具有较高的储存能,这也可作为潜在的再结晶形核点<sup>[7]</sup>。结果表明,较大的单道次压下量或较高的终轧温度对轧制后的 Mn18Cr18N 铸态奥氏体不锈钢细化再结晶是有意义的。

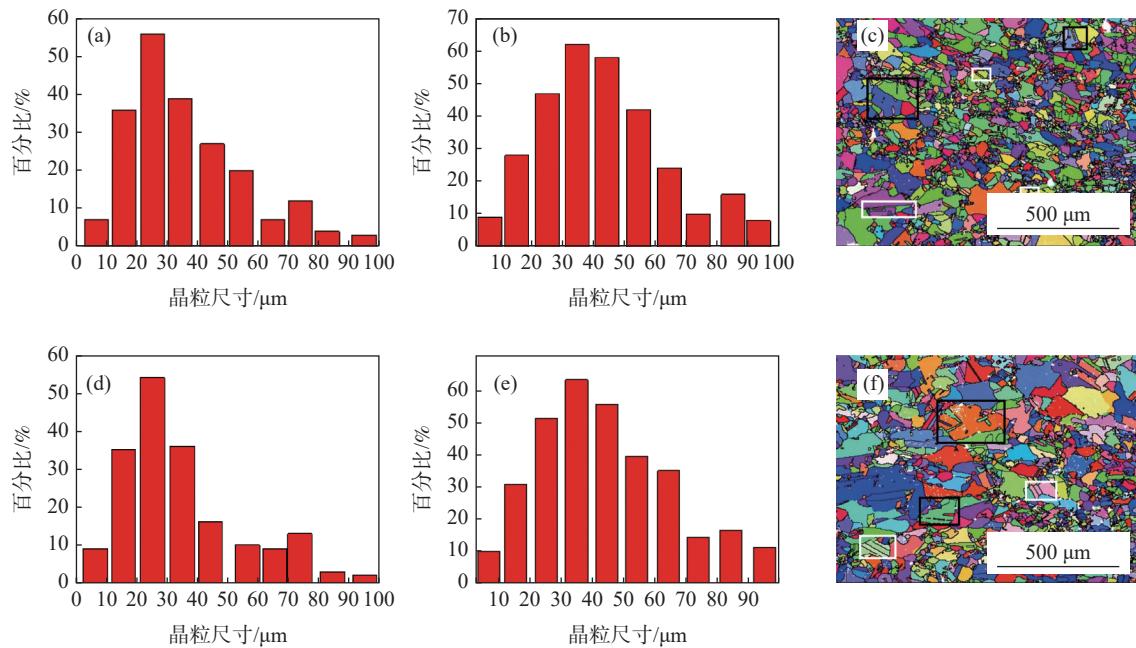
### 2.2 固溶热处理对微观组织的影响

根据生产实际,在随后的固溶处理过程中,分别

对三道次和五道次轧板进行了固溶处理。固溶处理后,组织连续进行动态再结晶和静态再结晶。对比轧制后和固溶后的晶粒尺寸,不管是三道次或者五道次轧制,明显发现固溶处理后晶粒尺寸为10~30 μm的小晶粒占比降低,30~100 μm的大晶粒占比增加。在高温下经过一段时间后,完全静态再结晶晶粒长大。由图3(c)(f)可以看到,固溶处理后获得较均匀的完全再结晶结构,取向随机分布。由图4的统计结果可以明显看到,相比于轧制后,固溶后的再结晶比例增加,变形晶粒减少。同时,孪晶比例也随之增加。这是由于在晶粒回复阶段,低层错能材料的大角度晶界发生迁移,组织内易形成退火孪晶,且随着再结晶晶粒的长大而增多<sup>[8]</sup>。在固溶过程中,组织内部会出现不同形态的孪晶,有的孪晶贯穿整个晶粒(图中白框处),有孪晶是中止于晶粒内部(图

中黑框处)。高钰璧<sup>[9]</sup>研究发现穿晶型孪晶形成由层错决定, 而中止型孪晶是不全位错按极轴运动的

结果。孪晶的存在在一定程度上促进动态再结晶, 消耗变形储能, 细化晶粒<sup>[10]</sup>。



(a) 三道次, 轧制; (b)、(c) 三道次, 固溶状态; (d) 五道次, 轧制; (e)(f) 五道次, 固溶状态

图 3 Mn18Cr18N 钢对应的晶粒尺寸和与其 IPF 图

Fig. 3 The corresponding grain size and IPF maps of Mn18Cr18N steel under different conditions

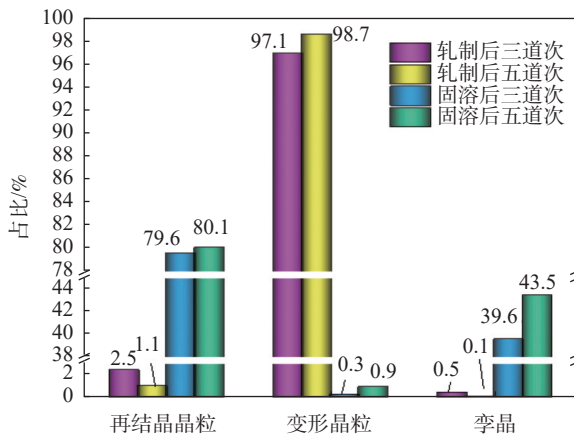


图 4 Mn18Cr18N 钢轧制及固溶后再结晶比例统计

Fig. 4 Recrystallization ratio of Mn18Cr18N steel under different conditions

### 2.3 力学性能

对 Mn18Cr18N 奥氏体不锈钢进行室温力学性能检测(见图 5), 其抗拉强度、屈服强度和断后伸长率见表 2。由图 5 和表 2 可以看出, 轧制后随着道次的增加, 抗拉强度由三道次的 950 MPa 增加至五道次的 1 090 MPa, 屈服强度由 864 MPa 增加至 1 015 MPa, 断后伸长率由 43.46% 降至 29.55%, 塑性变差。当道次增加, 板材的力学性能随着组织内

部与微结构的变化而发生相应的改变, 轧制后晶粒被轧成长条破碎状, 晶粒内部小角度晶界数量明显增加, 同时剪切带的出现也使得组织内部的强度明显高于单道次, 塑性反而下降。固溶后, Mn18Cr18 不锈钢在整个拉伸阶段内保持着较高强度和较好的塑性。随着道次增加, 抗拉强度逐渐由 904 MPa 降低至 870 MPa, 屈服强度由 579 MPa 降低至 533 MPa, 断后伸长率略微升高, 由 42% 至 48%。表明固溶处理能极大改善材料的组织和性能<sup>[11]</sup>。

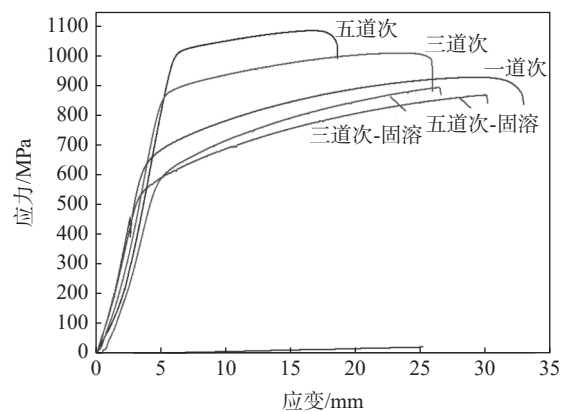


图 5 Mn18Cr18N 钢在不同压下率的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of Mn18Cr18N steel at different reduction rates

表2 Mn18Cr18N钢在不同状态下的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率

Table 2 Tensile strength, yield strength and total elongation of Mn18Cr18N steel obtained under different states

	轧制后			固溶后		
	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长 率/%	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长 率/%
三道次	950	864	43.46	904	579	42
五道次	1 090	1 015	29.55	870	533	48

### 3 结论

对比分析在总压下量为50%，温度为1 200℃多道次轧制和固溶后的铸态Mn18Cr18N钢的微观组织演变，结果如下：

1)在微观组织演变过程中，三道次轧制后组织

内部再结晶晶粒沿着晶界生长，呈现项链状分布，为早期的非连续动态再结晶，大角度晶界向小角度晶界逐渐迁移，后趋于稳定，晶界数量减少，出现大量剪切带；随着道次的增加，终轧温度不断降低，组织回复再结晶不充分，组织表现为大量取向差较小的亚晶界，组织内部产生剪切变形带。

2)固溶状态下组织连续进行动态再结晶和静态再结晶，同时，固溶处理后晶粒尺寸为10~30 μm的小晶粒占比降低，故晶粒细化并长大。

3)随着道次的增加，试样的强度由950 MPa增加至1 090 MPa；断后伸长率由43.46%降至29.55%，塑性降低。固溶后，抗拉强度逐渐由904 MPa降低至870 MPa，屈服强度由579 MPa降低至533 MPa，强度降低；断后伸长由42%升高至48%，塑性略有提高。

### 参考文献

- [1] Sun Hongying, Sun Yongduo, Zhang Ruiqian, *et al.* Hot deformation behavior and microstructural evolution of a modified 310 austenitic steel[J]. *Materials and Design*, 2014, 64: 374–380.
- [2] Jiang Yi, Cheng Manlang, Jiang Haihong, *et al.* Microstructure and properties of 08Cr19Mn6Ni3Cu2N (QN1803) high strength nitrogen alloyed low nickel austenitic stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 264–274.  
(蒋一, 程满浪, 姜海洪, 等. 高强度含Ni奥氏体不锈钢08Cr19Mn6Ni3Cu2N (QN1803)的显微组织及性能[J]. *金属学报*, 2020, 56(4): 264–274.)
- [3] Zhang Yunfei, Zhao Yingli, Chang Jinbao, *et al.* Research on hot deformation behavior of low-nickel high nitrogen austenitic stainless steel[J]. *Shanghai Metals*, 2018, 40(6): 19–23.  
(张云飞, 赵英利, 常金宝, 等. 节镍型高氮奥氏体不锈钢热变形行为的研究[J]. *上海金属*, 2018, 40(6): 19–23.)
- [4] Pei Haixiang, Zeng Li, Wang Lixin, *et al.* Hot deformation behavior and structure evolution of high nitrogen ultra-low-carbon austenite stainless steel 316LN[J]. *Special Steel*, 2014, 35(6): 54–56.  
(裴海祥, 曾莉, 王立新, 等. 316LN高氮超低碳奥氏体不锈钢的热变形行为和组织演变[J]. *特殊钢*, 2014, 35(6): 54–56.)
- [5] Li Jianxin, Zhao Yingli, Wang Guoying, *et al.* Effect of cold rolling deformation on structure and property of high nitrogen austenitic stainless steel Mn17Cr19Ni0.6[J]. *Special Steel*, 2020, 41(1): 61–63.  
(李建新, 赵英利, 王国营, 等. 冷轧变形量对高氮奥氏体不锈钢Mn17Cr19Ni0.6组织和性能的影响[J]. *特殊钢*, 2020, 41(1): 61–63.)
- [6] Wang Yan. Effect of delta phase on hot deformation and recrystallization behavior of alloy GH4169[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.  
(王岩. δ相对GH4169合金高温变形及再结晶行为的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.)
- [7] Hayes J S, Kyte R, Prangnell P B. Effect of grain size on the tensile behavior of a submicron grained Al-3%Mg alloy produced by severe deformation[J]. *Materials Science and Technology*, 2000, 16(11): 1259–1263.
- [8] Yang Gang, Sun Lijun, Zhang Lina, *et al.* Annihilation of deformation twins and formation of annealing twins[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2009, 21(2): 39–43.  
(杨钢, 孙利军, 张丽娜, 等. 形变孪晶的消失与退火孪晶的形成机制[J]. *钢铁研究学报*, 2009, 21(2): 39–43.)
- [9] Gao Yubi, Ding Yutian, Chen Jianjun, *et al.* Behavior of cold work hardening and annealing softening and microstructure characteristics of GH3625 superalloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(1): 44–53.  
(高钰璧, 丁雨田, 陈建军, 等. GH3625合金冷变形硬化、退火软化行为及其组织特征[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(1): 44–53.)
- [10] Li Juan, Zhao Guanghui, Ma Lifeng, *et al.* Hot deformation behavior and microstructural evolution of as-cast 304L antibacterial austenitic stainless steel[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(2): 1847–1853.
- [11] Chen Xiaoqi, Pang Wuji, Shang Feng, *et al.* Effects of solution treatment on microstructure and properties of SAF 2507 duplex stainless steel prepared by powder injection molding[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(6): 203–206.  
(陈晓秋, 庞午骥, 尚峰, 等. 固溶处理对粉末注射成形SAF 2507双相不锈钢组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(6): 203–206.)