



## 热处理工艺对锻造430F铁素体不锈钢组织和性能的影响

徐临超<sup>1</sup>, 叶赛男<sup>2</sup>, 王文权<sup>2</sup>, 张新戈<sup>2</sup>, 陆有<sup>2</sup>, 郭威<sup>2</sup>

(1 浙江工贸职业技术学院光电制造学院, 温州 325000; 2 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130025)

**摘要:**对轧制态430F铁素体不锈钢进行锻造及不同的锻后热处理工艺。通过对热处理后试验钢的金相组织、显微硬度、拉伸性能、断口分析等的研究探索了不同热处理工艺对锻后430F不锈钢组织与性能的影响。研究表明, 430F不锈钢经锻造后进行850 °C×4 h高温退火, 随炉冷却到550 °C出炉空冷, 然后再进行350 °C×10 h回火后炉冷, 其组织由铁素体单相组成, 基体内分布着大量细小且均匀的球状碳化物, 沿晶界析出的 $\sigma$ 相数量较少。试验钢的抗拉强度为516 MPa, 硬度为181HV, 伸长率达到29.9%, 其断口表面存在数量较多、形态规整的韧窝, 试验钢具有良好的塑性和韧性。

**关键词:**锻造; 热处理; 430F不锈钢; 显微组织; 力学性能

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00049 **中图分类号:**TG156. 2

## Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of Forged 430F Ferritic Stainless Steel

Xu Linchao<sup>1</sup>, Ye Sainan<sup>2</sup>, Wang Wenquan<sup>2</sup>, Zhang Xinge<sup>2</sup>, Lu You<sup>2</sup>, Guo Wei<sup>2</sup>

(1 College of Optoelectronic Manufacturing, Zhe Jiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou 325000, China; 2 School of Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Forging and different post-forging heat treatment processes for 430F ferritic stainless steel in rolled condition. The effects of microstructure and properties of the forging 430F stainless steel at different heat treatment processes are studied by metallurgical structure, microhardness, tensile properties and fracture analysis of the test steel after heat treatment. The study shows that 430F stainless steel after forging, 850 °C × 4 h high temperature annealing, cooling with the furnace, 550 °C out of the air-cooled, and then 350 °C × 10 h tempering, cooling with the furnace, the microstructure of its composition by the ferrite single-phase ferrite matrix, the distribution of a large number of fine and uniformly distributed spherical carbides along the grain boundary precipitation  $\sigma$ -phase number is the least. The tensile strength of the test steel is 516 MPa, the hardness is 181 HV, and the elongation rate reaches 29.9%. There are a large number of regular toughness nests on the fracture surface, and the test steel has good plasticity and toughness.

**Key Words:** Forging; Heat Treatment; 430F Stainless Steel; Microstructure; Mechanical Properties

不锈钢作为一种性能优异的金属材料,在石油化工、船舶制造、厨房用具、电器和建筑等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。按照成分组织可将不锈钢分为马氏体不锈钢、铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢等。现在国际上产量最高的不锈钢种类是富镍奥氏体不锈钢,但由于镍资源短缺导致成本价格升高,使得其发展应用受到限制<sup>[2-3]</sup>。而铁素体不锈钢含镍量低,成本较低,热膨胀系数小,耐腐蚀性能好,被广泛应用于汽车工业、家电业、化工、医药、能源、环保等工业领域<sup>[4-6]</sup>。

430不锈钢是最早使用的铁素体不锈钢种之

一,被广泛应用在家电、厨房器具及汽车零件等领域中<sup>[7-8]</sup>。但是该种不锈钢脆性较大,成形性能不够理想,限制了其更广泛的应用,所以,研发出成本低且具有优良综合性能的铁素体不锈钢具有重要意义<sup>[9]</sup>。目前,国内外学者针对通过不同热处理工艺改善铁素体不锈钢的组织与性能开展了较为广泛的研究。骆毅等<sup>[10]</sup>对446超级铁素体不锈钢进行800 °C时效处理,研究发现,在此条件下极易出现 $\sigma$ 脆性相,当 $\sigma$ 相呈网状连接时会使得材料的抗拉强度和延伸率急剧下降。马薇等<sup>[11]</sup>探究了不同的退火温度和保温时间对热轧态430铁素体不锈钢组织

**基金项目:** 长春市科技局项目—不锈钢锻造热处理及镜框行为公差控制技术 & 研发(2022C028)

**作者简介:** 徐临超(1984—),男,硕士,讲师; **E-mail:** xlc@zjtc.edu.cn; **收稿日期:** 2024-03-09

**通信作者:** 王文权(1971—),男,博士,教授; **E-mail:** 1900508539@qq.com

和性能的影响,发现铁素体晶粒尺寸会随着温度升高及保温时间的延长呈先减小后增大趋势,黑色析出相先减少后增多,最佳工艺为退火温度 850 °C,保温时间 10 min。李筱等<sup>[12]</sup>对热轧态 SUS410L 钢进行不同的退火处理,研究发现,当温度为 700 °C,保温 480 min 时晶粒再结晶不完全,当温度为 750 °C、保温时间为 480 min 时基本完成再结晶,综合力学性能最佳。

相较于 430 不锈钢,430F 铁素体不锈钢中 S 元素添加量更高,使得其具有更为优良的易切削性能,被广泛应用在自动车床、家用器具及螺栓螺母等零件中。但由于 S 元素过高会降低材料的塑性和韧性,在高温下易与 Mn、Mo 形成 MnS、MoS 等硫化物,这些夹杂物会增强材料的易切削性能,减少工具磨损,但同时这些析出物普遍尺寸偏大,在轧制过程中被加工成长条状,对材料的性能和使用寿命造成严重的影响,所以,通过进一步热处理改善 430F 不锈钢的力学性能尤为重要。本实验通过适当的锻造工艺有效地消除轧制态 430F 铁素体不锈钢的方向性,并起到细化晶粒、均匀化成分、改善力学性能的作用。退火和回火是铁素体不锈钢的主要热处理方式,采用退火可以有效消除试样加工过程中产生的内应力,从而获得更为理想的再结晶组织,回火可以明显提高不锈钢的韧性,从而改善铁素体不锈钢的综合性能<sup>[11]</sup>。本文以锻态 430F 铁素体不锈钢为研究对象,对其进行不同的退火及回火处理,然后通过对金相组织的观察及拉伸性能的测试研究了不同的热处理工艺对锻态 430F 不锈钢组织与力学性能的影响,为铁素体不锈钢在工业领域的实际生产与应用提供理论参考与实验支撑。

## 1 试验材料及方法

试验材料选用 430F 不锈钢热轧棒料,化学成分见表 1。热轧态 430F 不锈钢的金相组织如图 1 所示,组织为铁素体和马氏体,铁素体有明显方向性,晶粒比较粗大,存在沿轧制方向呈长条状分布的夹杂物。

表 1 430F 不锈钢的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Mo
0.127	0.473	0.710	0.356	0.002	16.00	0.065	0.316

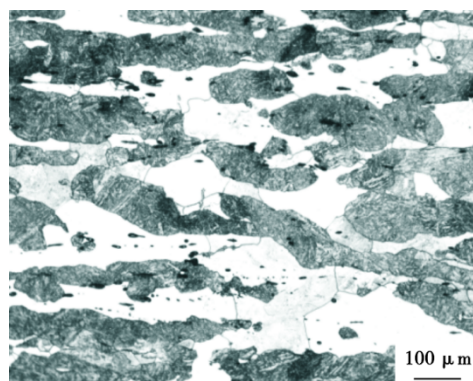


图 1 热轧态 430F 铁素体不锈钢金相组织

Fig. 1 Metallographic microstructure of 430F ferritic stainless steel in hot rolled condition

对 430F 铁素体不锈钢进行不同的锻造及热处理试验,具体工艺方案见表 2,锻后坯料为直径 250 mm、高 57 mm 的圆柱体。采用电火花切割机在锻件中心处沿锻造方向分别切取 4 个 10 mm×10 mm 截面尺寸的金相试样,镶嵌后用砂纸打磨抛光,采用苦味酸:盐酸:酒精比例为 4 g:5 ml:100 ml 的混合溶液腐蚀表面,采用 Axio Imager 蔡司智能显微镜和东芝 Foundry Master 光谱仪对试样进行微观组织形貌的观察。采用 HVS-1000A 硬度计测量不同试样硬度。沿锻造方向切取尺寸为 37 mm×10 mm×1.5 mm 的板状拉伸试样,同种热处理试样制作三根拉伸试样,并利用美国 MTS-10 拉伸试验机进行室温下抗拉强度及伸长率测试,拉伸速率为 1 mm/min,以三根试样的平均值作为测量结果。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同热处理工艺对显微组织的影响

不同热处理工艺下 430F 铁素体不锈钢的轴向金相组织如图 2 所示。锻造后的组织如图 2(a)所

表 2 430F 不锈钢锻造热处理工艺

Table 2 430F stainless steel forging heat treatment process

样号	锻造工艺	锻后热处理工艺
Y1		无
Y2	采用反射炉透烧加热,出炉后三次锻粗四次拔长,始锻温度 1 150 °C,终锻温度 750 °C,锻后空冷,锻造比为 6	850 °C×4 h 高温退火,随炉冷却,550 °C 出炉空冷
Y3		850 °C×4 h 高温退火,随炉冷却,550 °C 出炉空冷,再进行 350 °C×10 h 回火,随炉冷却
Y4		850 °C×4 h 高温退火,随炉冷却,550 °C 出炉空冷,再进行 350 °C×20 h 回火,随炉冷却

示,由铁素体和珠光体双相组织构成,球状碳化物分布不均匀晶粒发生部分再结晶,呈大小不同的等轴状和长条状混晶形态,再结晶晶粒在形变带处优先形核,通过界面迁移向周围晶粒内部长大<sup>[13]</sup>。由于材料经过锻造塑性变形,增加了晶体内部缺陷,激活能升高,材料状态不稳定,做进一步退火处理以消除锻造过程中产生的残余内应力。Y2试样在经过850℃×4h高温退火后,组织转变为铁素体单相,铁素体晶粒已基本完成回复、再结晶,晶粒变细且基本呈等轴状,球状碳化物相对减少。为进一步提高组织的稳定性,改善材料的韧性,对Y3、Y4试样继续进行回火处理。Y3试样经过350℃×10h回火处理,晶粒尺寸变大,组织为铁素体单相,基体内分布着大量细小且均匀的球状碳化物。Y4试样由于回火时间过长,铁素体再结晶不充分,晶粒尺寸变小,球状碳化物明显减少且分布不均。

通常在铁素体不锈钢中主要产生的析出相包括 $\sigma$ 、 $\chi$ 、Lave和 $\alpha'$ 相,其中 $\sigma$ 相是一种Fe、Cr富集的金属间化合物,在600~950℃由铁素体相转化而成,形核点在晶界、不连续的孪晶带和位错上,这些位置附近的铁素体晶粒形变能大,为 $\sigma$ 相优先提供形核位置<sup>[14]</sup>。 $\chi$ 相是富Mo相,属于 $\sigma$ 相的过渡相,通常首先沿晶界析出,然后 $\sigma$ 相围绕着 $\chi$ 相形核长大<sup>[15]</sup>。Laves相成分主要为 $\text{Fe}_2\text{Mo}$ , $\alpha'$ 相即为475℃

脆性<sup>[16]</sup>。扫描电镜形貌如图3所示,四个试样均存在不同程度的沿铁素体晶界析出的亮白色析出相,并连接成网状。Y2试样的面扫描能谱图如图4所示,分析可知,该析出相属于富Cr的 $\sigma$ 相,属于体心立方结构的高硬度相,在形成过程中通常伴有较大体积效应,使材料的硬度、脆性增大<sup>[17]</sup>。Eric Johnson等<sup>[18]</sup>研究了25%的CD3MN铸态双相不锈钢等温时间相变规律,研究发现, $\sigma$ 相在700~900℃最易析出。Y2试样在850℃×4h高温退火下产生的析出相最多。

## 2.2 不同的热处理工艺对力学性能的影响

不同热处理下430F铁素体不锈钢的力学性能变化曲线如图5所示。由图5可知,经锻造后的试样抗拉强度和硬度较高,伸长率较低。Y2试样经高温退火处理,抗拉强度明显下降,但硬度并没有明显降低,伸长率也仅提高了14%。分析是由于较多的 $\sigma$ 相存在影响了材料的拉伸性能。 $\sigma$ 相属于脆性相,发生塑性变形时 $\sigma$ 相优先在晶界处析出并产生塞积,对晶粒间的位错运动产生阻碍,位错滑移的距离变短,产生强化作用<sup>[19]</sup>。Y3试样抗拉强度为516MPa,硬度为181HV,相较于Y2试样没有明显变化,但伸长率达到29.9%,提高约40%,塑性明显提升,力学性能最佳。Y4试样抗拉强度和伸长率较Y3试样均有所下降,硬度提高,可能由于回火时间

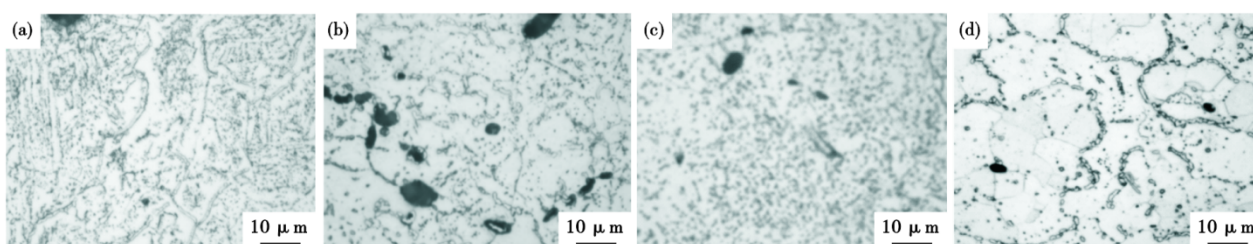


图2 不同热处理工艺下430F不锈钢的金相组织:(a)Y1试样,(b)Y2试样,(c)Y3试样,(d)Y4试样

Fig. 2 Microstructure of 430F stainless steel with different heat treatment processes: (a) Y1 sample, (b) Y2 sample, (c) Y3 sample, (d) Y4 sample

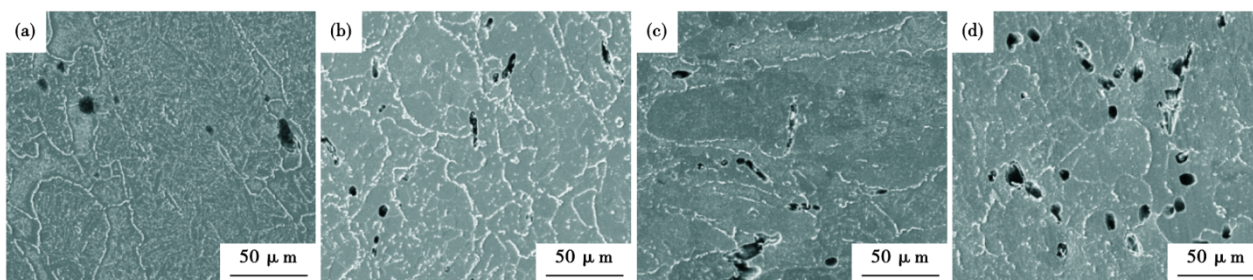


图3 不同热处理工艺下430F不锈钢的SEM形貌图:(a)Y1试样,(b)Y2试样,(c)Y3试样,(d)Y4试样

Fig. 3 SEM images of 430F stainless steel with different heat treatment processes: (a) Y1 sample, (b) Y2 sample, (c) Y3 sample, (d) Y4 sample

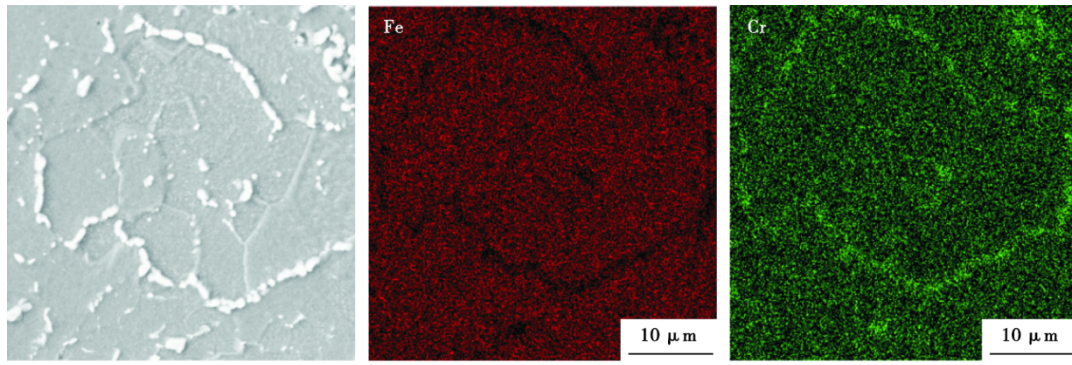


图4 Y2试样的面扫描能谱图  
Fig. 4 Surface scanning energy spectrum of Y2 sample

过长造成。

### 2.3 断口形貌对比分析

不同试样的冲击断口形貌如图6所示。Y1、Y2、Y4试样均为脆性断裂和韧性断裂的混合断裂，Y1试样断口存在明显的解理台阶和河流花样，韧窝数量较少，Y2、Y4仅在部分区域存在着少量的小直径韧窝。Y3试样为韧性断裂，表面分布着大小不同的韧窝，韧窝较深，数量增多，在四个试样中韧性最佳。韧窝处的面扫描能谱图如图7所示，由图7可知，MnS、MoS呈细小球状均匀分布在韧窝中心处，显著改善高含量的S元素对材料力学性能产生的影响。

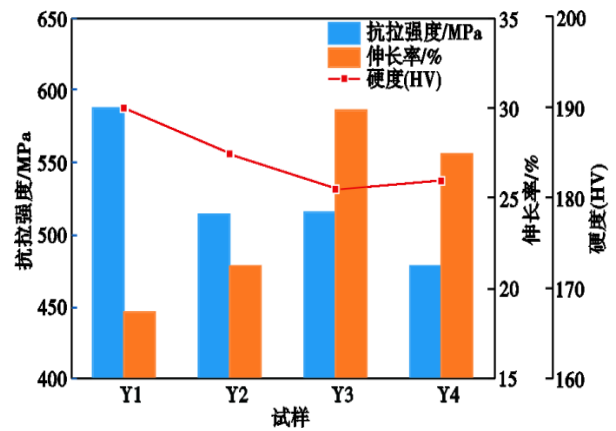


图5 不同热处理工艺下430F不锈钢的拉伸性能变化曲线  
Fig. 5 Variation curve of tensile properties of 430F stainless steel under different heat treatment processes

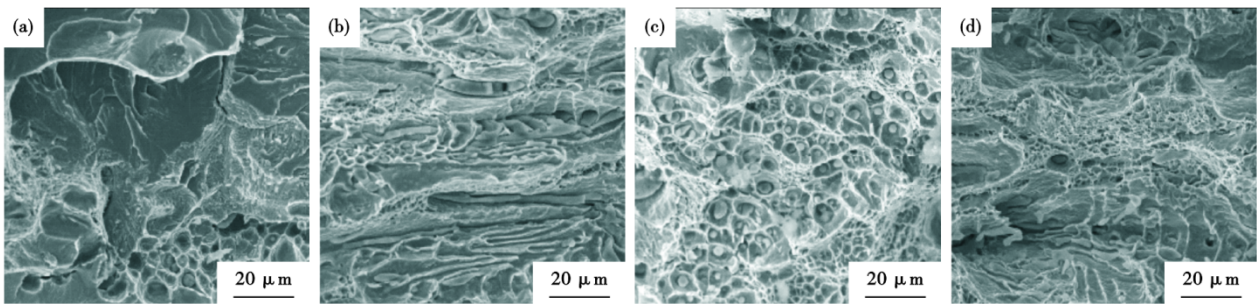


图6 不同热处理工艺下锻造430F不锈钢的冲击断口形貌: (a)Y1试样, (b)Y2试样, (c)Y3试样, (d)Y4试样  
Fig. 6 Impact fracture morphology of forged 430F stainless steel under different heat treatment processes: (a) Y1 sample, (b) Y2 sample, (c) Y3 sample, (d) Y4 sample

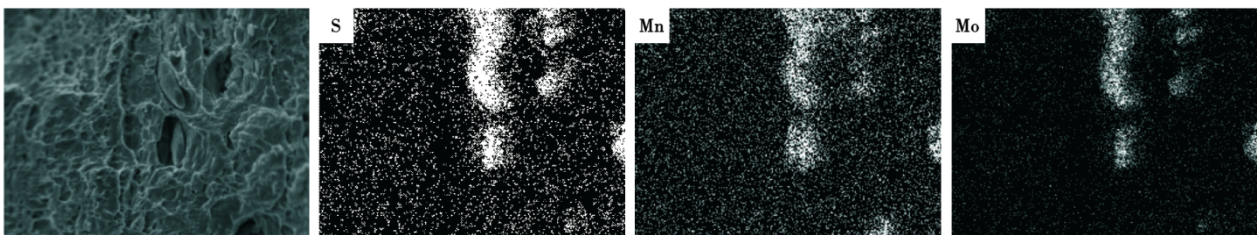


图7 韧窝处面扫描能谱图  
Fig. 7 Surface scanning energy spectra at the tough nest

### 3 结论

(1)锻造态430F不锈钢在经过850 °C×4 h高温退火随炉冷却,550 °C出炉空冷,再进行350 °C×10 h回火炉冷后,其抗拉强度为516 MPa,硬度为181HV,伸长率达到29.9%,塑性明显提高,且其断口表面存在数量较多、尺寸较大的韧窝,韧性最好。确定此工艺为最佳热处理工艺。

(2)锻造态430F不锈钢进行850 °C×4 h高温退火随炉冷却,550 °C出炉空冷,再进行350 °C×10 h回火炉冷后,其抗拉强度为516 MPa,硬度为181HV,伸长率达到29.9%,塑性明显提高,且其断口表面存在数量较多、尺寸较大的韧窝,韧性最好。确定此工艺为最佳热处理工艺。

#### 参考文献

- [1] 刘亚丕,牛振标,周焊峰,等. 现代不锈钢材料:结构、性能、特点和应用[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(3): 71-78.
- [2] 张松泓,刘美洲. 退火温度对00Cr26Mo1Ti不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(22): 123-125.
- [3] 李国平,裴海祥,李建春,等.  $\sigma$ 相对S32760超级双相不锈钢组织和性能的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 364-370.
- [4] 李文琪. 热轧和退火工艺对AISI430铁素体不锈钢组织和性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [5] 陈 闯. 轧制及热处理对铁素体不锈钢组织、性能的影响[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- [6] Li J C, Wu T Y, Riquier Y.  $\delta$  phase precipitation and its effect on the mechanical properties of a super duplex stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 1994, 174(2): 149-156.
- [7] Wang T, Lv W J, Xiao W T, et al. Investigation on hydrogen embrittlement sensitivity of hot-rolled and annealed microstructure to AISI 430 ferritic stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(3): 1728-1736.
- [8] Wang Y, Fan G. Application of new heat treatment technologies in high performance stainless steel development and production[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 7(2): 7-12.
- [9] Huh M Y, Engler O. Effect of intermediate annealing on texture, formability and ridging of 17%Cr ferritic stainless steel sheet[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 308(1-2): 74-87.
- [10] 骆 毅,李文琪,梁 伟,等. 时效处理对446超级铁素体不锈钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 129-131+135.
- [11] 马 薇,张立军. 退火工艺对汽车用430铁素体不锈钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(6): 57-61.
- [12] 李 筱,卫英慧,卫争艳,等. 退火工艺对铁素体不锈钢SUS410L热轧钢板组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2019, 40(2): 63-66.
- [13] 李聚宝,李 岩,张有余,等. 双相区热处理对430铁素体不锈钢热轧板组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(1): 62-66.
- [14] Lu H H, Guo H K, Liang W, et al. High-temperature Laves precipitation and its effects on recrystallisation behaviour and Lüders deformation in super ferritic stainless steels[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108477.
- [15] 郑世豪,解志文,宁礼奎,等. 退火工艺对29Cr-4Mo超级铁素体不锈钢微观组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(8): 2935-2942.
- [16] 姜 方,张孟均,王 刚,等. 热处理温度对含钼铁素体不锈钢0Cr17Mo2S组织及性能的影响[J]. 特殊钢, 2019, 40(4): 48-50.
- [17] 李 娜,白政民,葛新峰. 锻造及热处理对4Cr5MoSiV1模具钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(15): 87-89.
- [18] Johnson E, Kim Y J, Scott Chumbley L, et al. Initial phase transformation diagram determination for the CD3MN cast duplex stainless steel[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(10): 1351-1354.
- [19] 袁美怡,赵天天,龙际银,等. 热处理对含铌Cr17不锈钢组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1): 68-72.