



BTW1 钢连铸板坯高温热塑性行为分析

孙 剑¹, 刘占礼¹, 李 杰¹, 张鹏飞², 郑京辉², 邢力勇¹

(1 河钢材料技术研究院, 石家庄 050023; 2 河钢集团舞钢公司, 平顶山 462500)

摘 要:以某钢厂生产的 BTW1 钢连铸坯为研究对象, 利用 Gleeble 3800 热模拟试验机开展高温拉伸试验, 通过对拉伸断口进行观察, 并利用金相显微镜和扫描电镜对组织进行分析。试验结果表明, BTW1 钢断面收缩率随加热温度升高呈现先下降后上升再下降的趋势, 断面收缩率在 1 000 °C 时达到最高值 68.3%, 在 950 °C 时仅为 29.23%, BTW1 钢断面收缩率在多个温度区间低于 40%, 高温热塑性极差, 裂纹敏感性强。当加热温度低于 800 °C 时, 由于未发生微带诱导塑性和动态再结晶现象, 导致热塑性较差, 断口形貌呈现塑性变形和脆性断裂共存; 当加热温度为 950 °C 时, 动态再结晶现象增加, 但混晶组织导致塑性下降, 断口形貌为典型的解理性脆断, 当加热温度为 1 000 °C 时, 动态再结晶过程明显, 形成均匀细小晶粒区域, 塑性显著提升, 断口为典型韧窝形貌; 当加热温度为 1 100 °C 时, 断口出现熔化区域, 但高温下仍保留部分韧窝结构。

关键词: BTW1 钢; 连铸板坯; 高温热塑性; 断面收缩率; 动态再结晶

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00077 **中图分类号:** TG145

High Temperature Thermoplastic Behavior of BTW1 Steel Continuous Casting Slab

Sun Jian¹, Liu Zhanli¹, Li Jie¹, Zhang Pengfei², Zheng Jinghui², Xing Liyong¹

(1 HBIS Group Technology and Research Institute, Shijiazhuang 050023, China;

2 HBIS Group Wusteel Company, Pingdingshan 462500, China)

Abstract: For a steel factory production of BTW1 continuous casting slab is taken as the research object, and high temperature thermoplastic test is carried out by Gleeble 3800 thermal simulation testing machine. The tensile fracture is observed and the microstructure is analyzed by metallographic microscope and scanning electron microscope. The test results show that the reduction of area of BTW1 steel decreases first, then increases and again decreases with the increase of heating temperature. The reduction of area reaches the highest value of 68.3% at 1 000 °C and only 29.23% at 950 °C. The reduction of area of BTW1 steel is lower than 40% in several temperature ranges, and the high temperature thermoplasticity is very poor, the crack sensitivity is strong. When the heating temperature is lower than 800 °C, the thermoplasticity is poor due to the absence of MBIP and DRX, and the fracture morphology shows the coexistence of plastic deformation and brittle fracture. When the heating temperature is 950 °C, the DRX phenomenon increases, but the mixed crystal structure leads to a decrease in plasticity, and the fracture morphology is typical brittle fracture. When the heating temperature is 1 000 °C, the DRX process is obvious, and the uniform fine grain region is formed, and the fracture is typical dimple morphology. When the heating temperature is 1 100 °C, a melting zone appears in the fracture, but part of the dimpled structure remains at high temperature.

Key Words: BTW1 Steel; Continuous Casting Slab; High Temperature Thermoplastic; Reduction of Area; Dynamic Recrystallization

BTW1 钢是一种在工业领域广泛应用的高锰合金耐磨钢, 由于其特殊的耐磨性和无磁性, 使其在金属材料领域占据一席之地。BTW1 钢因其出色的加工硬化性能、卓越的强度及其优异的冲击韧性被广泛应用于冶金、矿山、电力、铁路等行业的机械装备制造领域^[1-4]。但由于 BTW1 钢锰元素含量高, 两相区宽, 热敏感性强等钢种特性, 所以, 当前模铸生产高锰钢在国内外被广泛采用, 然而, 模铸工艺因

其生产成本相对较高, 生产效率较为低下, 且产品质量难以稳定, 成为制约其进一步发展的主要因素^[5-6]。为了提高生产效率, 降低成本, 生产出性能稳定的高碳高锰钢产品, 研究并开发连铸生产高品质高碳高锰钢工艺是国内外冶金企业追求的主要方向之一, 但目前高碳高锰钢连铸生产仍存在生产安全隐患及铸坯质量缺陷频发的问题, 其中, 连铸坯纵裂问题是制约连铸高效、高质、安全生产的重

作者简介: 孙 剑(1994—), 男, 硕士, 工程师; **E-mail:** sunjian03@hbisco.com; **收稿日期:** 2024-03-29

通信作者: 李 杰(1983—), 男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** lijie@hbisco.com

要因素^[7-10]。连铸坯纵裂的产生与钢的高温力学性能密切相关,在连铸过程中,铸坯坯壳受到热应力、弯曲力、矫直力以及静压力等多种力的综合作用,如果这些力的作用超出了铸坯在高温下的强度极限,便容易引发裂纹的产生,这些裂纹在坯壳上萌生、扩展,对铸坯质量产生影响,甚至引发生产安全,从而严重影响产品的整体质量和生产稳定性^[11]。因此,本研究利用Gleeble热模拟试验机模拟高碳高锰钢BTW1连铸坯在连铸过程中不同冷却温度下的高温热塑性,从而预测连铸坯在不同温度下的变形行为,分析微观组织结构对热塑性的影响机理,进而更好控制其裂纹敏感性并有效指导连铸工艺,对于预防和减少纵裂的产生、优化连铸工艺、提升铸坯质量具有重要的理论指导意义。

1 试验材料及方法

高温力学性能一般在Gleeble实验机上进行,常见的方法分为加热法和凝固法,按照变形的形式,又分为拉伸和压缩两种^[12-13],本实验采用加热拉伸法。试样选取某钢厂连铸生产的249 mm×2 000 mm BTW1钢的板坯,经过100 t EAF→LF→VD→CC工艺生产,取样位置:试样长度方向与拉坯方向垂直,避开铸坯中心偏析、中心疏松和缩孔位置。BTW1钢种成分见表1。

研究利用Gleeble 3800热模拟试验机对BTW1钢连铸坯开展高温热塑性试验,将连铸坯材料加工成 $\phi 10$ mm×120 mm标准高温拉伸试样,表面磨光且两端各有10 mm螺纹。将试样以10 °C/s的速度加热至1 250 °C并保温3 min,以3 °C/s的速度降到测试温度后保温1 min,然后以0.001 s⁻¹的应变速率(E)对试样进行拉伸直至断裂。高温拉伸试验温度制度如图1所示,测试温度分别为:600、650、700、750、800、850、900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200、1 250 °C。拉伸断口通过ZEISS ULTRA 55扫描电镜进行断口形貌观察,此外,利用线切割截取拉伸断口,纵向截取断口剖面,磨抛后利用10%硝酸酒精对纵剖面进行腐蚀,通过AXio Imager.M2 m正立全自动显微镜及扫描电镜进行金相组织观察。

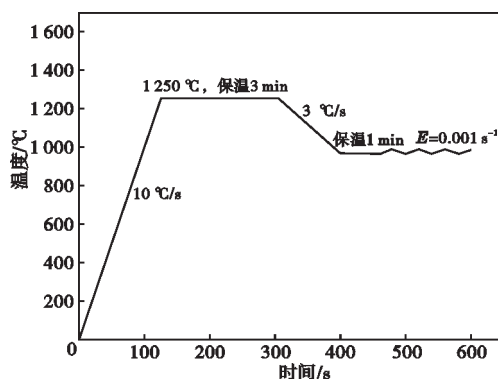


图1 高温拉伸试验温度制度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature regime in high temperature tensile test

2 试验结果与讨论

2.1 高温热塑性试验

在连铸生产工艺中,由于初生的凝固坯壳较为脆弱,裂纹缺陷易在凝固坯壳萌生,所以,钢在高温下的力学行为是导致铸坯裂纹最为内在的影响因素^[14-15]。BTW1钢在不同加热温度下的抗拉强度曲线和高温热塑性曲线如图2所示,从图2(a)中可以看出,抗拉强度随加热温度增加呈现逐渐下降趋势,加热温度从600 °C加热至接近固相线温度的1 250 °C时,抗拉强度从520 MPa逐渐下降至0 MPa。此外,铸坯断面收缩率是表征钢的延展性和评估钢的可成形性及裂纹敏感性的重要指标^[16-19],图2(b)为不同加热温度下的断面收缩率变化情况,从图2(b)中可以看出,BTW1钢断面收缩率随加热温度升高呈现先下降再上升后下降的过程,其中在800~900 °C和1 000~1 100 °C两个温度区间断面收缩率高于40%,在1 000 °C时断面收缩率达到最大值68.3%,当加热温度为950 °C时,断面收缩率仅为29.23%,断面收缩率在此温度附近有明显的下降再上升的趋势,说明BTW1钢在此高温区内塑性较差,易产生裂纹,引起材料脆断,并且BTW1钢断面收缩率在整个加热温度区间基本低于60%,且在多个温度区间低于40%。有研究认为,当断面收缩率小于60%时,说明钢的塑性差,易产生裂纹,当断面收缩率低于40%时,铸坯易出现横向开裂^[20],试验结果说明BTW1钢的高温热塑性极差,裂纹敏感性强,在连铸

表1 BTW1钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of BTW1 steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Al	O	N	%
0.95	0.15	8.50	0.020	0.002	2.10	0.28	0.032	0.015	0.000 8	0.007	

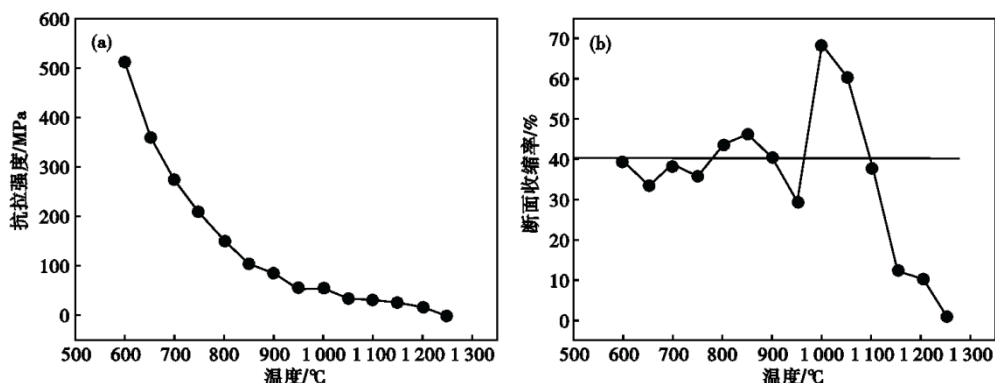


图2 BTW1钢在不同加热温度下的力学性能: (a)抗拉强度曲线, (b)高温热塑性曲线

Fig. 2 Mechanical properties of BTW1 steel at different heating temperatures : (a) tensile strength curve, (b) high temperature thermoplastic curve

浇注过程中极易产生裂纹缺陷。

BTW1钢在不同加热温度下的应力应变曲线如图3所示,随着应变的逐渐增大,应力也相应增加,并且出现加工硬化的特性,随着应力增加率逐渐减小,材料开始出现动态再结晶现象导致部分动态回复,从而产生均匀的塑性变形,出现颈缩现象,当应力值达到最大值时,颈缩区域产生较大的应变量,随之发生动态再结晶现象,拉伸温度在700~1200 °C下的应力应变曲线在试样热变形过程中进行着加工硬化与回复再结晶软化两个相反的过程。研究发现高锰钢的热塑性受微带诱导塑性(MBIP)和动态再结晶(DRX)作用的影响^[21-22],当拉伸温度低于800 °C时,由于MBIP和DRX作用都未发生,所以从拉伸温度为700 °C和800 °C的应力应变曲线可以发现,应力到达峰值后下降较快,从图4(a)也可以看出,750 °C时Gleeble拉伸断口附近组织为均匀粗大的奥氏体组织,未发现细小的动态再结晶组织;当拉伸温度为900 °C时,曲线的峰值降低,极值点数量增加,应力达到峰值后下降缓慢,这表明在硬化过程中,材料内部已经发生了一定程度的再结晶现象,如图4(b)所示,900 °C时Gleeble拉伸断口附近组织开始出现少量细小动态再结晶晶粒,由于动态再结晶产生的细小晶粒与粗大未变形的晶粒混合,由混晶构成的显微组织会降低材料的力学性能,导致此温度下高温热塑性开始下降;当拉伸温度为950 °C时,应力应变曲线的峰值继续降低,拉伸断口附近组织如图4(c)所示,从图4(c)中可以看出,动态再结晶产生的细小晶粒进一步增加,混晶程度持续加大,显微组织呈现非均匀状态,混晶构成的显微组织显著降低材料的力学性能,导致高温热塑性持续变差^[23];当拉伸温

度到1000 °C时,应力应变曲线出现了大量的极值点,证明此温度持续发生动态再结晶过程,从图4(d)中也可以看出,断口附近处发现大量细小均匀的小晶粒,这是由于温度提高导致动态再结晶产生的细小晶粒快速在晶内和晶界处形核,晶粒相互碰撞后停止长大,形成拉伸范围内均匀弥散的细小晶粒区域,导致塑性提升,断面收缩率达到最高的68.3%;当温度继续提高后,温度逐渐接近试验钢种的固相线温度,导致拉伸区域出现部分熔化现象,晶界熔化导致应变曲线峰值下降,塑性迅速开始下降。

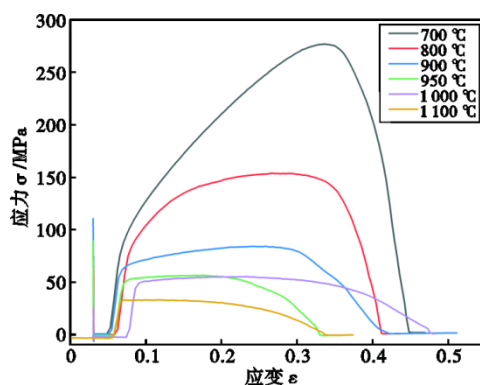


图3 BTW1钢在不同加热温度下的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of BTW1 steel at different heating temperatures

2.2 试样断口形貌及组织

选取700、950、1000、1100 °C拉伸断口形貌进行观察,如图5所示,图5(a)为700 °C时拉伸断口形貌,微观形貌呈现韧窝状并伴随着部分解理状,这表明材料在拉伸过程中同时发生了塑性变形和脆性断裂,在扫描电镜下700 °C时拉伸断口附近组织

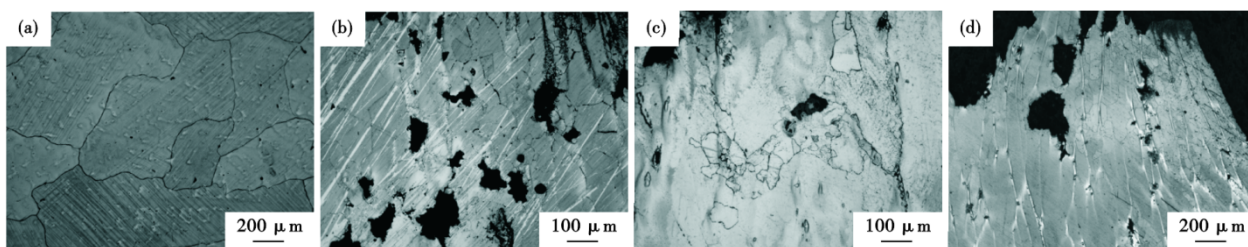


图4 不同加热温度 Gleeble 拉伸断口附近金相组织:(a)700 °C,(b)900 °C,(c)950 °C,(d)1 000 °C

Fig. 4 Microstructure near Gleeble tensile fracture at at different heating temperatures : (a) 700 °C , (b) 900 °C , (c) 950 °C , (d) 1 000 °C

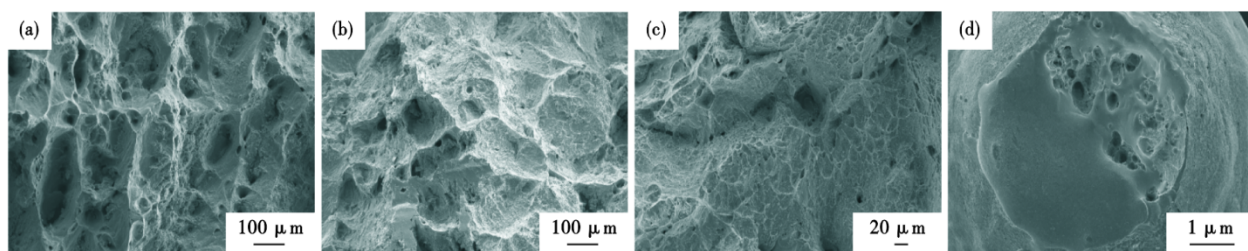


图5 BTW1 钢 Gleeble 不同加热温度下断口形貌:(a)700 °C,(b)950 °C,(c)1 000 °C,(d)1 100 °C

Fig. 5 Fracture morphology of BTW1 steel Gleeble at different heating temperatures : (a) 700 °C , (b) 950 °C , (c) 1 000 °C , (d) 1 100 °C

形貌如图6所示,从图6中可以看出,组织为大颗粒的奥氏体组织,并且在晶界处发现析出的碳化物组织,在拉伸过程中,由于碳化物的硬度和脆性通常较高,易导致局部应力集中,当拉伸应力达到一定程度时,裂纹易在晶界处或碳化物颗粒内部萌生,这些裂纹会沿着解理面扩展,从而形成部分解理状断裂形貌;图5(b)为950 °C时拉伸断口形貌,微观形貌呈现发光的小刻画及河流条纹状,在中心处出现亮白色脆性区,几乎没有发现韧窝出现,为典型解理性脆断,且断口直径较大,基本未发生颈缩现象,断面收缩率仅为29.23%;图5(c)为1 000 °C时断口形貌,从图5(c)中可以看出,断口形貌呈现微孔聚集型,在断口上存在大量显微微坑,为规则的韧窝状,且韧窝较为集中,断面收缩率较950 °C试样出现明显的颈缩现象,为典型的塑性断裂;图5(d)为1 100 °C时断口形貌,此时,断口上出现明显的熔化区域,这是由于在接近固相线的高温下,部分材料已经开始发生熔化形成液态相,这些液态相在断裂过程中沿晶界或相界扩展形成特定的断口形貌,此外,由于高温下材料的塑性增强,断口上出现部分韧窝结构,这些韧窝是由于在拉伸过程中,材料内部发生塑性变形和微孔聚集型断裂而形成。

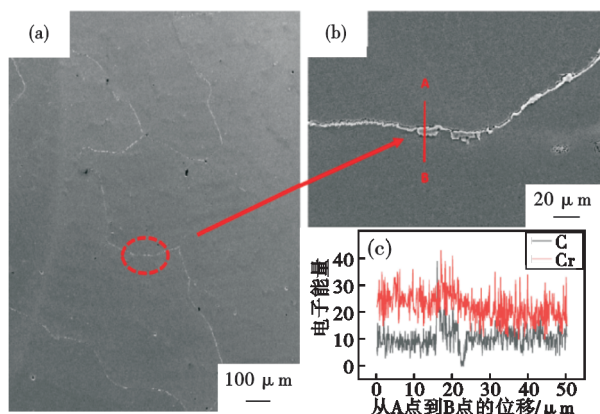


图6 700 °C时 Gleeble 拉伸断口附近微观形貌:(a)50×,(b)200×,(c)线扫描

Fig. 6 Microstructure near Gleeble tensile fracture at 700 °C : (a) 50×, (b) 200×, (c) line scan

3 结论

(1)BTW1 钢断面收缩率随加热温度升高呈现先下降后上升再下降的趋势,1 000 °C时达到最高值68.3%。当加热温度为950 °C时,断面收缩率急剧下降至29.23%,表明此温度下塑性较差,易产生脆断。

(2)总体而言,BTW1 钢在整个加热温度区间的断面收缩率基本低于60%且在多个温度区间低于40%,说明BTW1 钢的高温热塑性极差,裂纹敏感性强,在连铸浇注过程中极易产生裂纹缺陷。

(3)BTW1 钢在不同加热温度下的应力应变行为表现出加工硬化和动态回复再结晶的特征。在加热温度低于 800 °C 时,由于未发生微带诱导塑性和动态再结晶,导致热塑性较差。随着温度升高,动态再结晶现象更为明显,但混晶组织导致塑性下降。当加热温度达到 1 000 °C 时,动态再结晶过程明显,形成均匀细小晶粒区域,塑性显著提升,当温度接近固相线时,

部分熔化现象导致塑性迅速下降。

(4)BTW1 钢在不同加热温度下,断口形貌变化明显。700 °C 时,BTW1 钢拉伸断口显示塑性变形和脆性断裂共存;950 °C 时为典型的解理性脆断;1 000 °C 时由于动态再结晶提升塑性,断口为典型韧窝形貌;而 1 100 °C 时,断口出现熔化区域,但高温下仍保留部分韧窝结构。

参考文献

- [1] 梁高飞,林常青,于艳,等. 高强塑性高锰钢的研究进展[J]. 铸造技术, 2009, 30(3): 404-407.
- [2] 赵培峰,国秀花,宋克兴. 高锰钢的研究与应用进展[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(4): 85-88+94.
- [3] 刘军刚,袁林,王玮,等. 耐磨钢生产研究现状与分析[J]. 山东冶金, 2011, 33(2): 7-9.
- [4] 潘胡江,杨新明,李光强,等. Ti 微合金化对高锰钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(2): 74-78.
- [5] 罗森,朱苗勇. 高锰钢凝固特性及连铸工艺研究现状[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 39-58.
- [6] 李建民. 高锰钢连铸坯质量控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [7] Raabe D, Springer H, Gutierrez-Urrutia I, et al. Alloy design, combinatorial synthesis, and microstructure-property relations for low-density Fe-Mn-Al-C austenitic steels[J]. JOM, 2014, 66(9): 1845-1856.
- [8] 满廷慧,彭伟,王子波,等. Fe-Mn-Al-C 低密度钢研究现状及展望[J]. 中国冶金, 2022, 32(1): 11-20.
- [9] Sozańska-Jędrasik L, Mazurkiewicz J, Borek W, et al. Carbides analysis of the high strength and low density Fe-Mn-Al-Si steels[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2018, 63(1): 265-276.
- [10] 刘建,周伟基,路辉,等. 中碳高锰钢铸坯纵裂原因分析及工艺优化[J]. 炼钢, 2020, 36(4): 75-80.
- [11] 王程明,孙晓冉,李秋瞳,等. 20CrMnTi 钢连铸坯的高温热塑性[J]. 河北冶金, 2023(8): 25-28.
- [12] 王宁涛,阮士朋,段路昭,等. SAE8640 合金钢 280 mm×325 mm 连铸坯的高温力学性能[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 68-70.
- [13] 张永军,韩静涛,孔俊其,等. SCM435 钢连铸坯高温热塑性研究[J]. 炼钢, 2010, 26(4): 50-54.
- [14] 高兴健. 连铸板坯高温力学性能研究及二冷工艺制度分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [15] 王勇,汪洪峰. 连铸坯裂纹与钢的高温力学性能的研究与实践: 第十八届(年)全国炼钢学术会议论文集[C]. 西安: 中国金属出版社, 2014: 61-67.
- [16] 孙岩,安治国,孙晓冉,等. 22MnB5 高温热塑性研究[J]. 河北冶金, 2021(11): 38-41+79.
- [17] 孙彦辉,倪有金,许中波,等. 中碳钢高温力学和冶金行为[J]. 北京科技大学学报, 2009(6): 708-713.
- [18] 樊雷,肖娟,李显,等. 应变速率对 Q460 连铸坯高温力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(8): 859-867.
- [19] Hwang J K. Revealing the small post-necking elongation in twinning-induced plasticity steels[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(19): 8285-8302.
- [20] Suzuki H G, Nishimura S, Yamaguchi S. Characteristics of hot ductility in steels subjected to the melting and solidification[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982, 22(1): 48-56.
- [21] Kim B, Jeong S, Park S J, et al. Roles of (Fe, Mn)₃Al precipitates and MBIP on the hot ductility behavior of Fe-30Mn-9Al-0.9C lightweight steels[J]. Metals and Materials International, 2019, 25(4): 1019-1026.
- [22] Steenken B, Rezende J L L, Senk D. Hot ductility behaviour of high manganese steels with varying aluminium contents[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(5): 567-573.
- [23] 王庆娟,张昭,杜忠泽,等. B55SiCr 钢的高温流变行为及动态再结晶临界条件[J/OL]. 钢铁, 1-12[2024-03-26].