

齿轮钢中硫化锰夹杂物热变形行为研究

孙雅平¹, 杨 丽^{1*}, 李永亮², 杨玉厚²

(1. 唐山科技职业技术学院, 河北 唐山 063001; 2. 唐山钢铁集团有限责任公司 技术中心, 河北 唐山 063016)

摘 要:利用 Gleeble-1500 热-力学模拟试验机对齿轮钢试样进行压缩试验, 研究了不同变形温度、变形量对钢中硫化锰夹杂物形貌、尺寸及相对塑性的影响。研究发现, 在变形过程中, 硫化物的碎化与长大现象交替进行, 变形温度与变形量对硫化锰夹杂物的尺寸影响较大。随着变形量的增加, 低温时长宽比小于 2 的硫化物数量呈先降低后增多的趋势, 同时相对塑性呈现降低的趋势, 高温时长宽比小于 2 的硫化物数量呈先增大后降低的趋势, 相对塑性呈现增加的趋势。在实际轧制过程中选择低温大变形量或高温小变形量轧制制度, 能够获得数量较多, 长宽比较小的硫化锰夹杂物。

关键词: 齿轮钢; 硫化锰夹杂物; 变形量; 变形温度; 相对塑性

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)05-0186-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.05.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Research on hot deformation behavior of MnS inclusions in gear steel

Sun Yaping¹, Yang Li^{1*}, Li Yongliang², Yang Yuhou²

(1. Tangshan Vocational College of Science and Technology, Tangshan 063001, Hebei, China; 2. Technology Center, Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd, Tangshan 063016, Hebei, China)

Abstract: A compression test was conducted via a Gleeble-1500 thermo-mechanical simulator. The effects of different deformation temperatures and deformation on the size and relative plasticity of MnS inclusions in steel were studied. It is found that fragmentation and growth of MnS occurred alternately during the deformation process, and the temperature and the deformation greatly influence the size of MnS. With the increase of deformation, the quantity of MnS with an aspect ratio of less than two decreases first and then increases. The relative plasticity shows a trend to decrease at low temperatures. Nevertheless, the quantity and relative plasticity of MnS changed oppositely when gear steel was deformed at high temperatures. Choosing large deformation at low temperature or small deformation at the high-temperature rolling system in actual production can obtain many MnS inclusions with a small aspect ratio.

Key words: gear steel, MnS inclusions, deformation, deformation temperature, relative plasticity

0 引言

汽车齿轮主要安装在变速器与差速器中, 起传

动、调速作用, 在工作时主要受到交变载荷的冲击力、摩擦力、接触应力等多种应力的综合作用。随着时间和成本的要求越来越高, 齿轮生产厂家将齿

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX20191400004587)。

作者简介: 孙雅平, 1973 年出生, 女, 河北唐山人, 副教授, 本科, 主要研究方向为钢铁冶金生产工艺, E-mail: 425909397@qq.com; *通讯作者: 杨丽, 1983 年出生, 女, 河北唐山人, 副教授, 本科, 主要研究方向为钢铁冶金生产及分析, E-mail: tsyangli2009@163.com。

轮加工多种步骤整合到一台机床,使用一把刀具,该刀具十分昂贵,因此在齿轮钢中添加硫元素作为易切削元素,减少加工过程中对刀具的磨损。而钢在锻造或者轧制过程中,硫化物容易沿着轧制方向伸长,从而使钢的横向性能明显降低。同时齿轮工作时受到交变载荷的应力作用易在长条状硫化物尖端产生应力集中,成为裂纹源,并沿着硫化物扩展,最终造成齿轮的开裂失效^[1-3]。因此如何在易切削齿轮钢中获得长宽比小的球状或椭球状硫化物至关重要。

前人对于钢中 MnS 夹杂物在变形过程中的形貌控制进行了较多的研究。邵肖静^[4]等在研究非调质钢中 MnS 夹杂物的热变形行为时发现,随着变形温度的增加,长度大于 5 μm 的 MnS 数量呈减少趋势,变形量对 MnS 的相对塑性影响较大,随着变形量从 10% 增加到 50%, MnS 的相对塑性平均值从 2.26 减小到 0.30,同时变形速率对 MnS 夹杂物的长度和相对塑性没有明显的影响。此外,娄德春^[5-7]等认为硫化物的碎化是随着变形量呈周期性的变化,周期点和碎化程度与变形温度有关。

为了充分了解 MnS 夹杂物在钢基体变形过程中碎化的周期性变化,笔者利用 Gleeble-1500 热-力学模拟试验机在相同变形速率下对试样在不同温度、不同变形量下进行压缩变形,对 MnS 夹杂物的形貌与尺寸进行统计分析,根据应力-应变曲线对 MnS 夹杂物的碎化进行分析,最后根据 MnS 夹杂物与基体之间的相对塑性确定适宜的轧制参数,以便对实际生产中的轧制工艺进行理论指导。

1 试验材料和方法

为了研究变形温度及变形量对 MnS 夹杂物的影响,从 Cr-Ni-Mo 系齿轮钢连铸坯中取样并加工成 Ø8 mm×15 mm 的圆柱,按图 1 所示的加热和变形制度进行试验。试验钢化学成分如表 1 所示。试样首先以 10 °C/s 的加热速率加热到 1 300 °C,保温 180 s 以得到均匀的奥氏体组织,然后以 10 °C/s 的速率降温到变形温度后保温 30 s 以均匀试样温度,接着以 0.01 s⁻¹ 的变形速率分别进行压缩变形到变形量 20%、40%、60%,达到设定变形量后立刻水淬以保留奥氏体组织。将变形后的试样从剖面切开,经镶嵌、打磨、抛光后在光学显微镜下观察 MnS 夹杂物的形貌,每个试样连续拍摄五十个视场用来统计 MnS 夹杂物的长宽比及其分布。

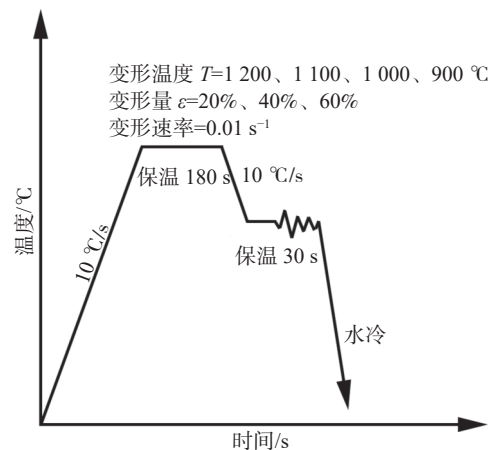


图 1 Gleeble-1500 热-力学模拟试验机加热及变形制度
Fig. 1 Heating and deformation schedule of Gleeble-1500 thermo-mechanical simulator

表 1 试验钢化学成分
Table 1 Chemical composition of test steel %

C	Si	Mn	P	S	Nb+Ti+Cr+Mo	Fe
≤0.25	≤0.6	≤2.0	≤0.018	≤0.01	≤0.2	余量

压缩过程中 MnS 与齿轮用钢基体间的相对塑性计算采用 Malkiewicz 与 Rudnik^[5-7] 的定义公式,即 MnS 相对塑性 ν 为:

$$\nu = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m} = \frac{2}{3} \frac{\ln \frac{\lambda}{\lambda_0}}{\ln \frac{h_0}{h}} \quad (1)$$

式中, ε_i 代表 MnS 真应变, ε_m 代表试验钢基体真应变, λ_0 和 λ 代表 MnS 轧制前后的长宽比, h_0 和 h 代表试样原始长度和压缩后长度。

2 试验结果与讨论

2.1 MnS 夹杂物分析

2.1.1 MnS 夹杂物形貌

基体的压缩变形温度和变形量对 MnS 夹杂物形貌的影响如图 2 所示,可以看出,在 20% 变形量下,随着温度升高, MnS 尺寸逐渐长大后减小,在 1 100 °C 时达到最大;在 40% 变形量下,随着温度升高, MnS 尺寸同样呈现先长大后减小的趋势,在 1 000 °C 时达到最大;在 60% 变形量下, MnS 尺寸呈现逐渐长大的趋势。在 900 °C 和 1 200 °C 时, MnS 夹杂物尺寸呈现规律性变化,900 °C 时,随着变形量增加, MnS 尺寸逐渐降低;在 1 200 °C 时随着变形量增加, MnS 尺寸逐渐升高;在 1 000 °C 和 1 100 °C 时, MnS 尺寸无明显的规律性。这说明在

变形过程中 MnS 的长大和碎化同时发生,在不同温度和不同变形量下,长大和碎化分别占据主要地位。从图中可以看出,随着温度的增加,MnS 达到碎化状态所需变形量在逐渐降低。在 900 °C-60% 和

1 200 °C-20% 时,MnS 夹杂物的尺寸较小,数量较多,且此时形貌比较规则,呈椭圆形或圆形,说明此时碎化在变形过程中占据主要地位,实际轧制过程中宜选用低温大变形量或者高温小变形量轧制制度。

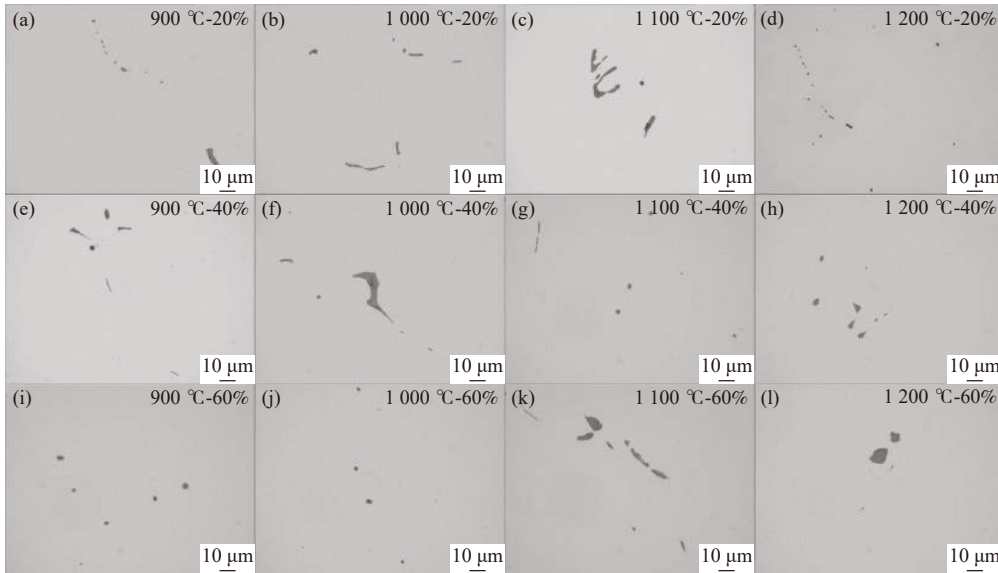


图 2 变形温度和变形量对 MnS 夹杂物形貌的影响

Fig. 2 Effect of deformation temperature and deformation amount on morphology of MnS inclusions

2.1.2 MnS 夹杂物尺寸分布

根据试验结果,统计了不同变形参数下 MnS 的长宽比及其分布情况,如图 3 所示。在 900 °C 下,随着变形量的增加,长宽比小于 2 的 MnS 数量大大增加,MnS 的状态由长大变为碎化;而在 1 200 °C 下,随着变形量的增加,长宽比小于 2 的 MnS 数量呈现降低的趋势,MnS 的状态由碎化变为长大,在 1 200 °C-40% 下进行压缩变形时,虽然长宽比小于 2 的 MnS 数量较多,同时长宽比大于 4 的 MnS 数量同样较多。长宽比小于 2 的 MnS 可以视为圆形或者椭圆形,在 900 °C-60% 和 1 200 °C-20% 时能够获得较多数量的长宽比小于 2 的 MnS,这与 MnS 夹杂物形貌分析结果一致。

2.2 应力应变分析

图 4 为试样在不同变形条件下的应力应变曲线图。从图 4 中可以看出,随着压缩变形的进行,应力随着应变逐渐增加而逐渐增加,当应力增加到一定值后,增加趋势放缓,最终成为一条平缓的平直曲线,达到稳定的状态。这是由于在变形的初期,应变引起位错密度的增加,导致基体的加工硬化,此时应力快速增加,随着变形的增加,动态回复也逐渐增加,使得位错相互抵消,位错密度降低,动态回复造成的

软化效果抵消了部分加工硬化效果,使得应力上升趋势放缓,在变形的后期发生动态再结晶,使得应力不在增加甚至出现下降的趋势。MnS 夹杂物在凝固过程中由于偏析多在奥氏体晶界处析出,然后在轧制过程中被拉伸变长,由于动态再结晶,晶界的移动将会使得拉长的 MnS 夹杂物分割、断裂,最终碎化^[8]。

在低温(900 °C)进行压缩变形时,由于动态回复与动态再结晶不明显,因此在变形的初期只发生夹杂物的长大现象,当变形量达到 60% 时,基体中开始出现动态再结晶才会出现夹杂物的碎化现象。在 1 200 °C 时进行压缩变形,应变在 20% 时已经出现明显的动态再结晶,在晶界的移动下拉长的 MnS 夹杂物被分割而碎化,但是已经碎化的 MnS 在后续变形的过程中会继续发生长大现象,因为高温时合金元素的扩散速度较快,MnS 的 Ostwald 熟化现象能够进行的比较充分^[9-10]。

2.3 MnS 夹杂物相对塑性

MnS 夹杂物的相对塑性指的是在变形过程中 MnS 相对于基体的变形能力,与 MnS 的形貌、尺寸有重要关系,如相对塑性越大,在基体变形过程中 MnS 更易变形,易于沿轧制方向伸长呈长条状,如

相对塑性较小, 说明 MnS 的变形能力较弱, 在基体变形的过程中仅轻微变形甚至保持原始形貌。因此, 选择 MnS 夹杂物相对塑性较小的热变形参数十分重要。

根据公式(1)计算了试样在压缩变形后统计的 MnS 夹杂物的相对塑性值, 并绘制了图 5。从图中可知, 随着变形温度或者变形量的增加, MnS 夹杂物的相对塑性逐渐降低, 从 1.6 降低到 0.25, 说明

MnS 的平均长宽比逐渐降低, 高温、大变形量能够降低 MnS 的相对塑性值。值得注意的是, 从图 3(d) 中可以看出, 在 1 200 °C 进行压缩变形时, 变形量为 20% 和 40% 仍然能够保持较多数量的长宽比小于 2 的 MnS, 当变形量为 60% 时, MnS 的数量大量减少, 说明在较高温度且大变形量时, MnS 夹杂物发生了粗化, 此时相对塑性值有些许回升。

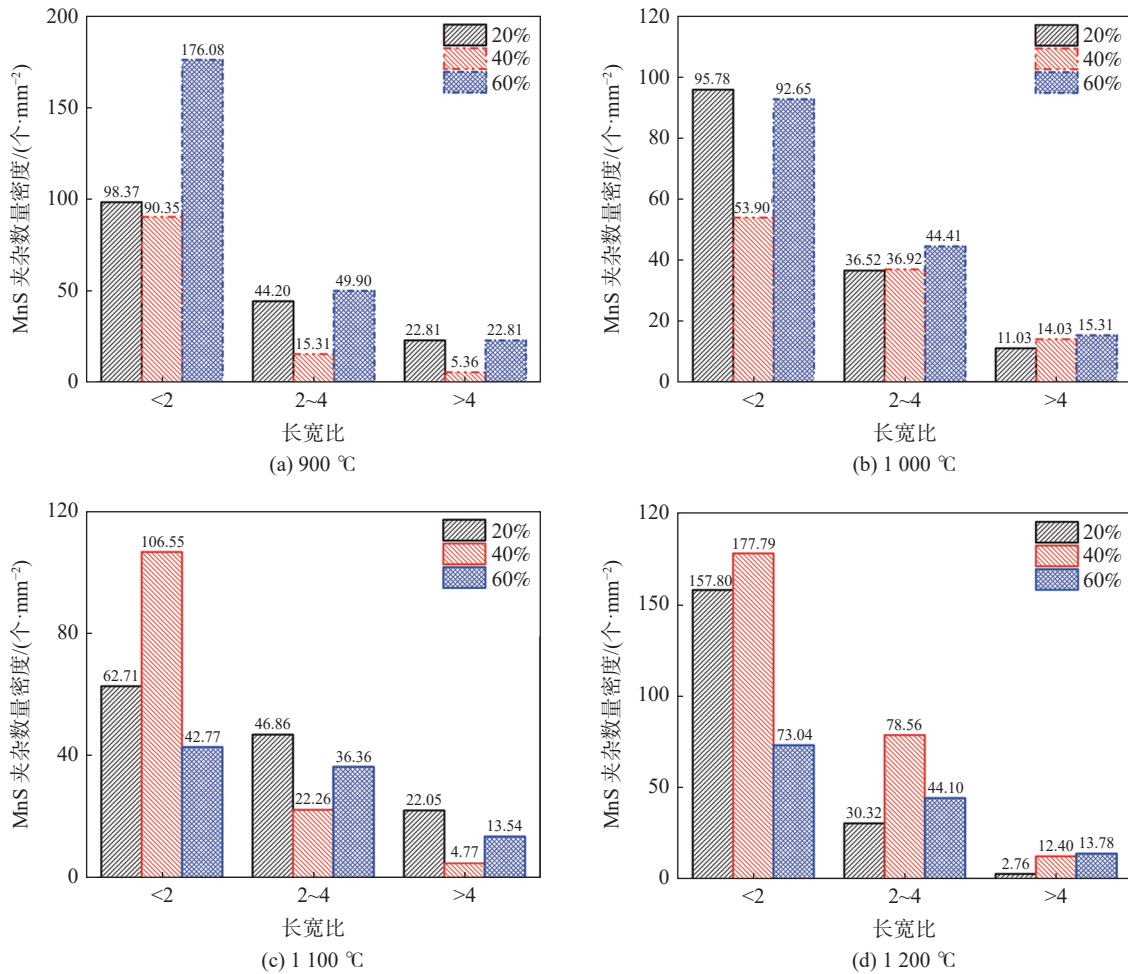


图 3 热变形参数对硫化物长宽比分布的影响

Fig. 3 Effect of thermal deformation parameters on the aspect ratio distribution of sulfide

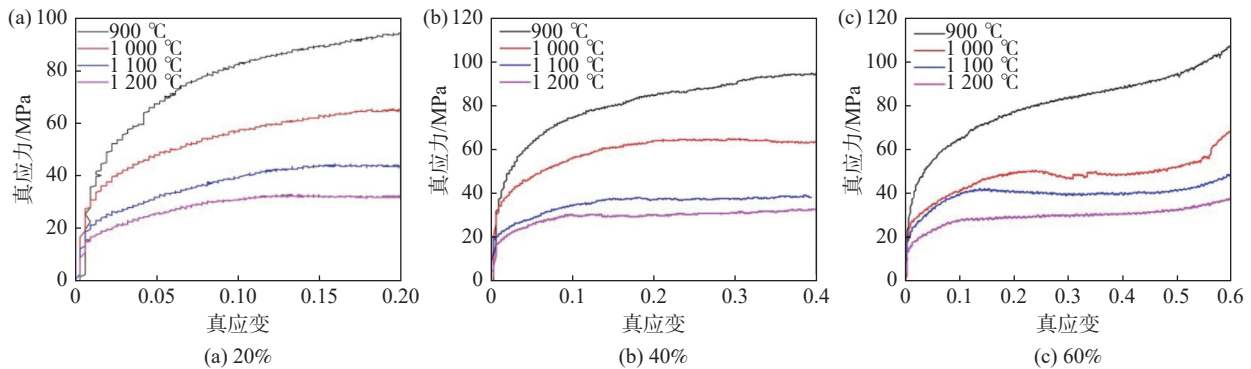


图 4 试验钢的真应力应变曲线

Fig. 4 True stress-strain curve of test steel

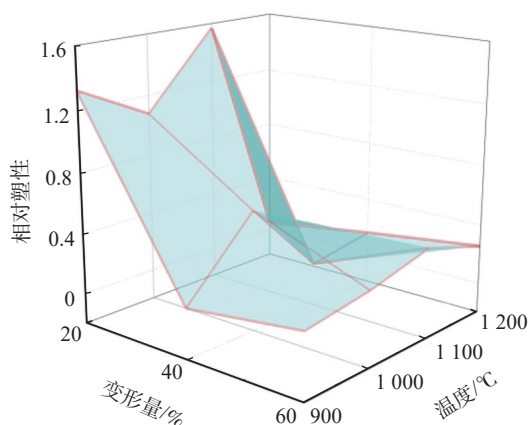


图5 变形参数对硫化物相对塑性的影响

Fig. 5 Effect of deformation parameters on relative plasticity of sulfide

高温、大变形量能够降低 MnS 的相对塑性值的机理是: 高温下, 合金元素扩散速度快, 促进了 MnS 的熔断和重新形核, 同时大变形量引发的动态再结

晶能够将拉长后的 MnS 切割, 促进 MnS 的碎化。由于低硫易切削钢在 1 000 °C 和 1 100 °C 下变形的无规律性, 考虑到实际轧制过程中变形温度和变形量不能精准控制, 应当避免在 1 000 ~ 1 100 °C 下进行轧制, 选择低温大变形量或者高温小变形量较为合适。

3 结论

1) 低温大变形量或高温小变形量能够获得数量较多、长宽比较小的 MnS 夹杂物, 不仅有利于 MnS 夹杂物的弥散分布, 同时对应的 MnS 夹杂物的相对塑性较小。

2) 在 1 000 °C 或 1 100 °C 时对试验钢进行轧制或锻造, MnS 的变形呈现无规律性, 由于实际生产过程中变形温度和变形量难以精准控制, 因此应当避免在 1 000~1 100 °C 范围内进行轧制或锻造。

参考文献

- [1] Yang Wen, Yang Xiaogang, Zhang Lifeng, *et al.* Review of control of MnS inclusions in steel[J]. *Steelmaking*, 2013, 29(6): 71-78.
(杨文, 杨小刚, 张立峰, 等. 钢中MnS夹杂物控制综述[J]. *炼钢*, 2013, 29(6): 71-78.)
- [2] Domizzi G, Anteri G, Ovejero-García J. Influence of sulphur content and inclusion distribution on the hydrogen induced blister cracking in pressure vessel and pipeline steels[J]. *Corrosion Science*, 2001, 43(2): 325-339.
- [3] Li Jilin, Feng Junning, Li Yongquan, *et al.* Morphologies and formation mechanism of MnS inclusion defects in cast steel[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(1): 74-77.
(李吉林, 冯俊宁, 李涌泉, 等. 铸钢中MnS夹杂缺陷的形貌及形成机制[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(1): 74-77.)
- [4] Shao Xiaojing, Lv Lige, Du Qian, *et al.* Thermal deformation behavior of MnS inclusions in non-quenched and tempered steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(5): 144-147.
(邵肖静, 吕利鸽, 杜倩, 等. 非调质钢中MnS夹杂物的热变形行为[J]. *金属热处理*, 2018, 43(5): 144-147.)
- [5] Lou Dechun, Cui Kun, Wu Xiaochun, *et al.* Behavior of MnS during hot deformation[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1996, (6): 11-14.
(娄德春, 崔昆, 吴晓春, 等. 硫化锰夹杂物的热变形行为[J]. *钢铁研究学报*, 1996, (6): 11-14.)
- [6] Lou Dechun, Cui Kun, Wu Xiaochun, *et al.* Numerical simulation of the deformation behavior of inclusions in S-RE system free-cutting steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1997, (1): 12-15.
(娄德春, 崔昆, 吴晓春, 等. 硫复合系易切削钢中夹杂物热变形行为的数值模拟[J]. *机械工程材料*, 1997, (1): 12-15.)
- [7] Lou Dechun, Cui Kun, Wu Xiaochun. Effect of technology rolling parameters on relative plasticity of slags MnS[J]. *Research on Iron & Steel*, 1996, (5): 27-29.
(娄德春, 崔昆, 吴晓春. 轧制工艺参数对硫化锰夹杂物相对塑性的影响[J]. *钢铁研究*, 1996, (5): 27-29.)
- [8] Lu Jinlong. Research on formation mechanism and control process of MnS in Non-quenched and tempered steel for heavy crankshaft[J]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020: 91.
(鲁金龙. 大规格曲轴用非调质钢中MnS形成机理及控制工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020: 91.)
- [9] Lv Naibing, Ma Yue, Liu Ke, *et al.* Nucleation, growth and maturation analysis of MnS during solidification in axle steel ingots[J]. *Iron and Steel*, 2020, (7): 58-64.
(吕迺冰, 马跃, 刘珂, 等. 车轴钢铸锭中MnS的生成、长大、熟化规律分析[J]. *钢铁*, 2020, (7): 58-64.)
- [10] Yong Qilong, Liu Qingyou, Liu Su, *et al.* Theoretical analysis on controlled element of Ostwald ripening process of manganese sulfide in steels[J]. *Special Steel*, 2004, 25(6): 7-7.
(雍岐龙, 刘清友, 刘苏, 等. 硫化锰在钢中的Ostwald熟化过程的控制性元素的理论分析[J]. *特殊钢*, 2004, 25(6): 7-7.)