

超快冷工艺对 X70 管线钢组织的影响

陈雨来, 张栋斌[✉], 余 伟, 郭 锦

北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083

[✉] 通信作者, E-mail: zhdb007@sohu.com

摘 要 通过热模拟机研究超快冷工艺中冷却速率和终轧温度对 X70 管线钢组织细化及马氏体/奥氏体小岛的影响. 随着冷却速率的增大, 铁素体晶粒尺寸减小, M/A 岛的体积分数先增大后降低, M/A 岛的尺寸变化则相反. 提高终轧温度, 铁素体晶粒尺寸略微增大, M/A 岛的体积分数增加; 但在 900~940 °C 范围内, 随着终轧温度的升高, 试样中 M/A 岛的体积分数略减小, 尺寸增大.

关键词 管线钢; 冷却; 微观组织; 晶粒细化

分类号 TG156.1

Influence of ultra-fast cooling on the microstructure of X70 pipeline steel

CHEN Yu-lai, ZHANG Dong-bin[✉], YU Wei, GUO Jin

National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: zhdb007@sohu.com

ABSTRACT The effects of cooling rate and finish rolling temperature on the microstructure refinement and martensite/austenite (M/A) islands in X70 pipeline steel were studied with a Gleeble thermal-mechanical simulation machine. When the cooling rate increasing, the grain size of ferrite decreases, the volume fraction of M/A islands increases first and then decreases, but the dimensional change of M/A islands is opposite to the volume fraction. With the finish rolling temperature rising, ferrite in the steel slightly grows up and the volume fraction of M/A islands increases; but when the finish rolling temperature increases from 900 to 940 °C, the volume fraction of M/A islands slightly decreases and the size of M/A islands increases.

KEY WORDS pipeline steel; cooling; microstructure; grain refinement

随着社会的进步, 人们逐渐认识到工业化大生产带来的能源短缺以及环境恶化等问题. 因此, 制造业提出了 4R 原则, 即减量化、再循环、再利用以及再制造^[1]. 超快速冷却技术利用细晶强化和相变强化相结合的机制, 提高了材料的强度、韧性、焊接性等性能.

目前, 一些钢厂实现了 Q235、Q345 升级以及部分高强钢、双相钢的超快冷工艺生产^[2], 但管线钢的超快冷工艺工业生产在国内还未实现. 由于管线钢中微观组织中马氏体/奥氏体 (M/A) 小岛的存在也是管线钢组织的一个重要特征^[3-4], 且这方面研究较少, 因此本文主要通过热模拟实验研究超快冷

工艺中冷却速率和终轧温度对 X70 管线钢组织细化和 M/A 岛的影响规律, 为实现管线钢的超快冷工艺工业化生产提供参考和借鉴.

1 实验方案

实验材料 X70 管线钢的化学成分见表 1, 试样尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. 实验在北京科技大学高效轧制工程研究中心实验室 Gleeble-3500 热模拟机上进行. 第一组试样以 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 加热到 $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温 3 min, 分别于 1000、900 以及 $830 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 处变形, 每道次应变量均为 0.3, 变形后分别以 40、80、120 和 $140 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冷速冷却至 $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 随后空冷 (2

℃ · s⁻¹) 至室温. 第二组试样以 10 ℃ · s⁻¹ 加热到 1150 ℃ 并保温 3 min, 分别于 1050 ℃ 以及终轧温度 T 处变形, 应变量均为 0.3, 终轧温度 T 分别设为 820、900、920 和 940 ℃, 终轧后以 80 ℃ · s⁻¹ 的冷速冷却至 550 ℃, 随后空冷 (2 ℃ · s⁻¹) 至室温. 热模拟实验工艺示意图如图 1 所示.

截取试样中间变形的部分, 沿轴向从中间切开, 预磨抛光后用 4%硝酸酒精侵蚀, 在实验室金相显微镜和 ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜下观察试样的显微组织, 并借助 ImageTool 软件测量统计试样的晶粒尺寸以及 M/A 岛的体积分数.

表 1 实验用 X70 管线钢的成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of X70 pipeline test steel

												%
C	Si	Mn	P	S	Al	V	Cr	Mo	Ti	Nb	Cu	Ni
0.055	0.19	1.47	0.005	0.014	0.032	≤ 0.01	0.01	0.17	0.012	0.054	0.20	0.20

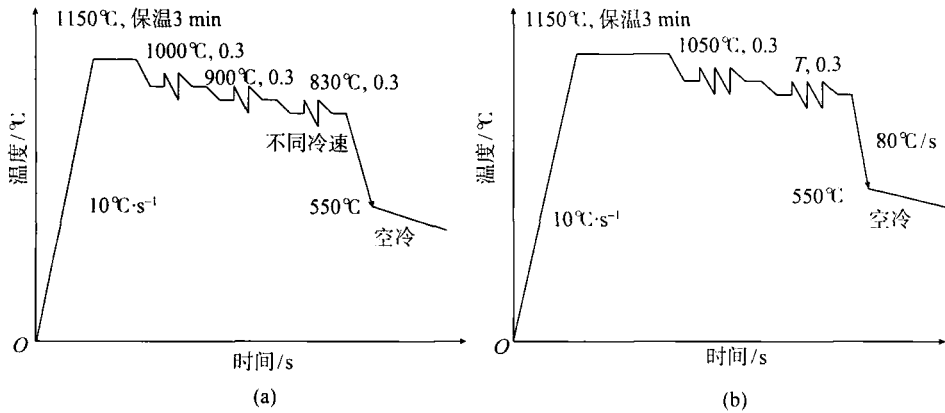


图 1 热模拟实验工艺示意图. (a) 冷却速率不同; (b) 终轧温度不同

Fig.1 Schematic schedules for thermal-mechanical simulation tests: (a) different cooling rates; (b) different finish rolling temperatures

2 实验结果

2.1 冷却速率对 X70 管线钢组织细化的影响

图 2 为不同冷却速率下试样的扫描电镜照片. 从得到的金相显微组织照片和图 2 中可以看出, 试样中的组织主要为多边形铁素体 + 针状铁素体, 针状铁素体含量很少, 其中的多边形铁素体和针状铁素体均很细小.

用 ImageTool 软件测得不同冷速下试样的晶粒尺寸, 如图 3 所示. 从图 3 中看出, 随着冷却速率的增大, 铁素体晶粒尺寸减小, 但是变化不大, 尤其是在冷却速率 80~120 ℃ · s⁻¹ 变化微弱.

2.2 冷却速率对 X70 管线钢 M/A 岛的影响

为了比较准确地确定 M/A 岛的体积分数, 采用图形处理方法, 并利用 ImageTool 软件测出亮白色 M/A 岛的的体积分数. 结果表明: 当冷却速率在 40~140 ℃ · s⁻¹ 的范围内, 随着冷却速率的增大, M/A 岛的体积分数呈现出先增大后减小的趋势, 在冷却速率为 120 ℃ · s⁻¹ 达到最大值. M/A 岛随冷却速率的变化曲线如图 4 所示.

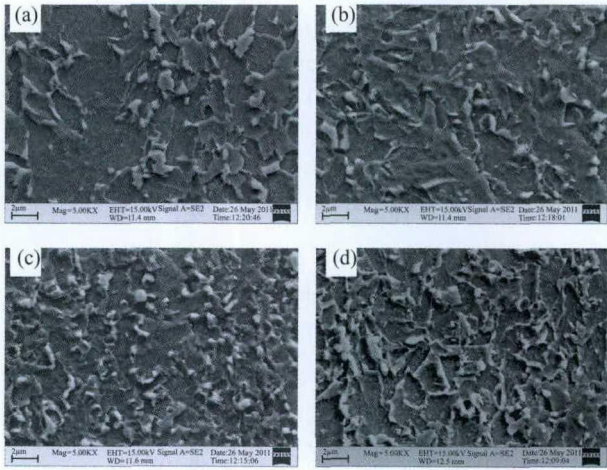


图 2 不同冷却速率下试样的扫描电镜照片. (a)40 ℃ · s⁻¹; (b) 80 ℃ · s⁻¹; (c) 120 ℃ · s⁻¹; (d) 140 ℃ · s⁻¹

Fig.2 SEM image of samples at different cooling rates: (a) 40 ℃ · s⁻¹; (b) 80 ℃ · s⁻¹; (c) 120 ℃ · s⁻¹; (d) 140 ℃ · s⁻¹

从 M/A 岛形状上看: 当冷却速率为 40 ℃ · s⁻¹ 时, M/A 岛以条状和多边形块状为主; 当冷却速率为 80 ℃ · s⁻¹ 和 120 ℃ · s⁻¹ 时, M/A 岛以点状和多边形块状为主; 当冷却速率为 140 ℃ · s⁻¹ 时, 试样

中的 M/A 岛以条状为主,但这里的条状相对冷速 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 来说不是很规则.从 M/A 岛大小上看,当冷却速率从 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,试样中晶粒尺寸在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的点状 M/A 岛增多;当冷却速率从 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 进一步提高, M/A 岛晶粒尺寸反而有所增大.

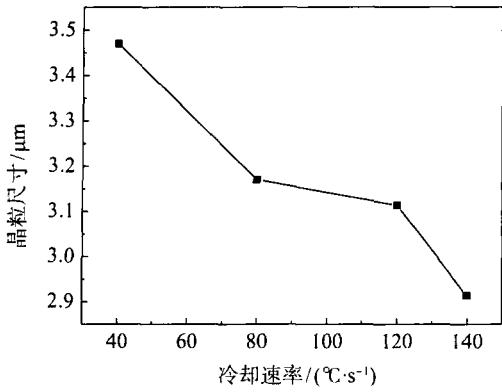


图 3 冷却速率对铁素体晶粒尺寸的影响

Fig.3 Influence of cooling rate on the grain size of ferrite

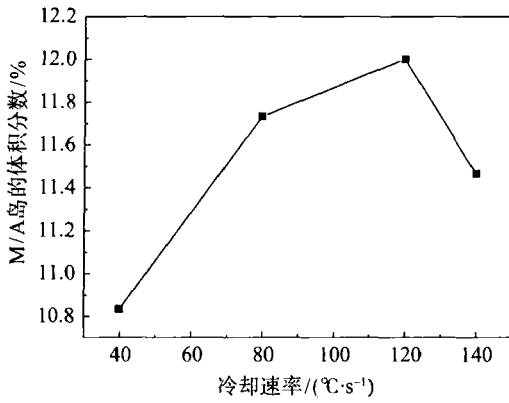


图 4 冷却速率对 M/A 岛的体积分数的影响

Fig.4 Influence of cooling rate on the volume fraction of M/A islands

2.3 终轧温度对 X70 管线钢组织细化的影响

如图 5 所示为不同终轧温度下试样的金相显微组织照片,图中 AF 指针状铁素体, QF 指准多边形铁素体.从图 5 中可以看出,四种不同终轧温度下试样的组织主要为针状铁素体 + 多边形铁素体 + 准多边形铁素体.从组织的构成上分析,终轧温度为 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样中准多边形铁素体明显增多,且其晶粒尺寸为 $4\sim 8\text{ }\mu\text{m}$,明显大于其余三个试样中准多边形铁素体的晶粒尺寸.

从组织的细化程度上看,测得终轧温度为 $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样中多边形铁素体平均晶粒尺寸约为 $2.61\text{ }\mu\text{m}$,针状铁素体的平均板条宽度约为 $1.46\text{ }\mu\text{m}$,而终轧温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时三个试样的多边形铁素体平均晶粒尺寸和针状铁素体的平均板条宽度

比 $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时大,但相差不超过 $0.6\text{ }\mu\text{m}$;终轧温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时三个试样的针状铁素体纵横比比 $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ 小,并且随着终轧温度的升高,针状铁素体有变短变宽的趋势.

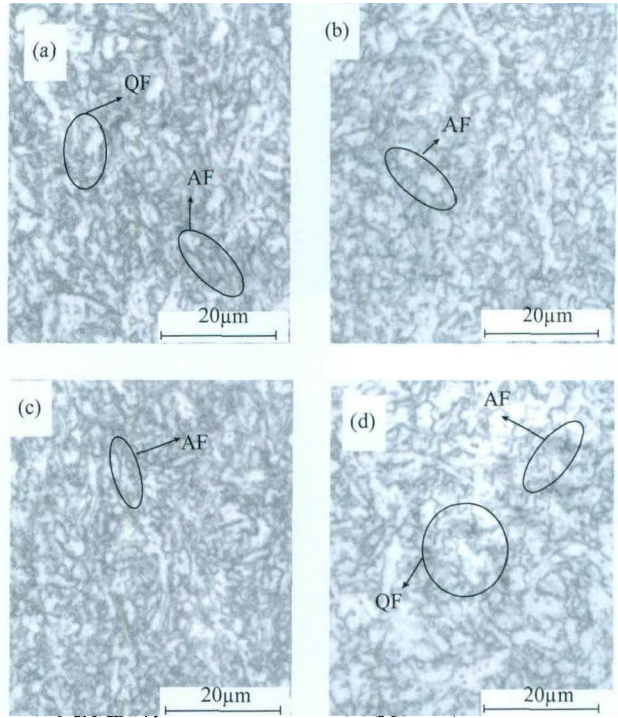


图 5 不同终轧温度下试样的金相显微组织照片. (a) $820\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $900\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $920\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $940\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig.5 Optical micrographs of samples at different finish rolling temperatures: (a) $820\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $900\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $920\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $940\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.4 终轧温度对 X70 管线钢 M/A 岛的影响

参照 2.2 节中的方法测量不同终轧温度下试样中 M/A 岛的体积分数, M/A 岛含量随终轧温度的变化曲线如图 6 所示.从 M/A 岛数量上看:高温终轧 ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$) 试样中的 M/A 岛的体积分数比正常终轧温度 ($820\text{ }^{\circ}\text{C}$) 试样高;而在高温终轧温度范围内,随着终轧温度的升高,试样中 M/A 岛的体积分数略有降低,但降幅不大.

从 M/A 岛形状上看:当终轧温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样中 M/A 岛以带尖角的多边形块状为主;当终轧温度为 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样中 M/A 岛以点状为主.从 M/A 岛大小上看:终轧温度为 $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样中 M/A 岛晶粒尺寸为 $0.22\sim 1.22\text{ }\mu\text{m}$;高温终轧温度范围内,终轧温度为 $900\sim 940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样中 M/A 岛晶粒尺寸分别为 $0.24\sim 1.80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.40\sim 1.87\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.40\sim 2.23\text{ }\mu\text{m}$.结合图 7 可以看出,随着终轧温度的升高,试样中 M/A 岛有变大的趋势,当终轧温度为 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 M/A 岛的尺寸分布比较均匀.

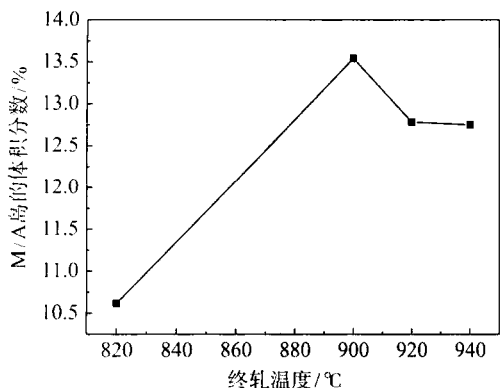


图 6 终轧温度对 M/A 岛的体积分数的影响

Fig.6 Influence of finish rolling temperature on the volume fraction of M/A islands

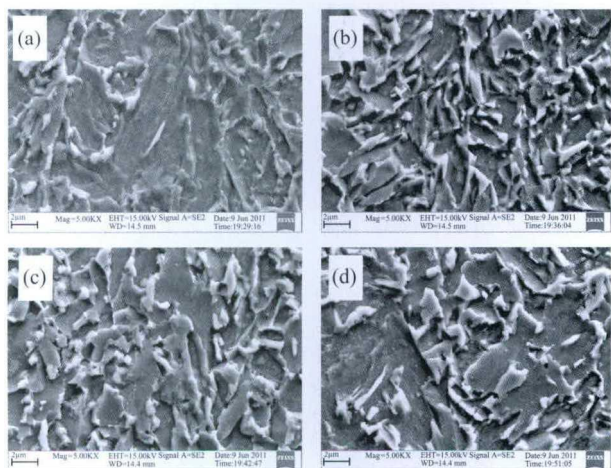


图 7 不同终轧温度下试样的扫描电镜照片. (a) 820 °C; (b) 900 °C; (c) 920 °C; (d) 940 °C

Fig.7 SEM images of samples at different finish rolling temperatures: (a) 820 °C; (b) 900 °C; (c) 920 °C; (d) 940 °C

3 讨论

3.1 冷却速率

在 $40\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内, 随着冷却速率的增大, 试样中铁素体晶粒尺寸减小, 但变化不大. 其原因是形核驱动力与过冷度成正比, 即过冷度越大, 形核驱动力越大, 形核率越高, 晶粒越细. 驱动力随过冷度的增大而增加, 而相变中冷却速度的增大会引起过冷度的增大, 从而影响形核驱动力并导致形核速率的变化. 但是, 冷却速率对细化晶粒的作用有限, 冷却速率过大反而会影响铁素体相变.

在 $40\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内, 随着冷却速率的增大, 试样中 M/A 岛的体积分数呈现出先增大后减小的趋势, M/A 岛晶粒尺寸变化相反. 冷却速率对 M/A 岛的形成有两方面的作用: 一方面, 结合相变动力学和热力学, 冷却速率越大, 形核激活能越大, 形核速率也越大, 其相变后的晶粒越细小均

匀, 故在 $40\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冷速范围内, M/A 岛的体积分数随着冷速的增加而增大, 且 M/A 岛形状随着冷速的增大向细小的点状转变; 另一方面, 在 $120\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冷速范围内, 随着冷速的增大, 铁素体晶粒尺寸变小, 且冷速过大影响了碳原子的扩散, 铁素体/奥氏体相界面附近奥氏体中碳含量不高, 使得残余奥氏体不能稳定存在, 难以在低温时转变成 M/A 岛^[5], 故 M/A 岛的体积分数随着冷速的增大反而略有降低, 且 M/A 岛大小和分布不均匀.

另外, M/A 岛的体积分数和形状分布对管线钢的力学性能均有影响. 廖波等^[6] 研究发现, 带有尖角的 M/A 组元, 由于位错塞积所引起的应力集中, 在尖角处产生裂纹, 可能降低材料的韧性和塑性. 仝珂等^[7] 研究表明: 随着高钢级管线钢组织中 M/A 岛体积分数的增加或尺寸的减小, 管线钢强度提高, 屈服比增大; 另外, M/A 岛以细小点状或交错分布条状存在时可以改善管线钢的冲击韧性. 刘莉等^[8] 研究发现, 落锤性能不合格并出现断口分离的试样, 其中心处 M/A 岛的数量明显增多, 而且尺寸较大, 大部分在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$, 基本上以块状出现. 综上所述, 冷却速率在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $140\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内 (在热模拟实验条件下), 冷却速率为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时试样中 M/A 岛的体积分数和形貌分布对力学性能的改善最有利.

3.2 终轧温度

随着终轧温度的升高, 试样中准多边形铁素体增多且尺寸增大. 其原因是: 终轧温度升高时, 多边形铁素体的形成由于形核驱动力的降低而受到限制; 而准多边形铁素体的转变属于块状转变, 新相和母相的成分相同, 不需要长程扩散, 只要新相原子越过界面即可生长, 且新相与母相的界面都是非共格大角度晶界, 转变速度快^[9], 终轧温度升高时, 变形奥氏体内部的缺陷密度降低, 奥氏体的稳定性有所增加, 只要过冷至新相和母相自由能相同的温度, 就能发生转变, 因此当终轧温度升高时准多边形铁素体数量明显增多.

另外随着终轧温度的升高, 试样中铁素体晶粒尺寸增大, 但相差不大. 有下述几个方面的原因: 首先终轧温度越高, 变形奥氏体的回复和再结晶速率越快, 会导致其内部的形变储存能和位错密度降低, 铁素体的形核驱动力和形核率越低; 其次终轧温度越高, Ti、Mo、Nb 等微合金元素的溶解度越高, 析出物的数量越少, 随后的相变形核点越少^[10]; 再次, 经过蔡庆伍等^[11] 研究发现, 随着轧制温度的升高,

奥氏体再结晶分数升高,得到更多细化的奥氏体晶粒,在一定程度上能细化铁素体晶粒.

在高温终轧温度范围内,随着终轧温度的升高,试样中 M/A 岛的体积分数略有降低.在高温终轧温度范围内,变形奥氏体发生一定的回复和再结晶,其位错密度比低温终轧要低,变形奥氏体更稳定,经过随后的快速冷却过程更容易转变成马氏体或残余奥氏体形成 M/A 岛.

参考 3.1 节中 M/A 岛的体积分数和形状分布对管线钢力学性能的影响,在热模拟实验条件下,高温终轧温度范围内 (900~940 °C) 终轧温度为 920 °C 时对力学性能的改善最有利.

4 结论

(1) 在 40~140 °C ·s⁻¹ 的范围内,随着冷却速率的增大,试样中的铁素体晶粒尺寸变小,但相差最大不超过 1 μm,且 M/A 岛的体积分数呈现出先增大后减小的趋势,M/A 岛晶粒尺寸变化相反,在冷却速率为 120 °C ·s⁻¹ 时试样中的 M/A 岛的体积分数最大,晶粒尺寸最小.热模拟条件下,冷却速率为 120 °C ·s⁻¹ 时对试样力学性能的改善最有利.

(2) 提高终轧温度,超快冷后多边形铁素体和针状铁素体的晶粒尺寸均略微增大,针状铁素体变短变宽,且准多边形铁素体量增加和晶粒尺寸增大;高温终轧使 M/A 岛的体积分数提高,且终轧温度在 900~940 °C 范围内,随着终轧温度的升高,M/A 岛的体积分数略减小,而 M/A 岛晶粒尺寸有长大的趋势.

参 考 文 献

- [1] Xu K D. The 20th century-ferrous metallurgy advanced towards engineering science from skill. *Shanghai Met*, 2001, 24(1): 1
(徐匡迪. 20 世纪——冶金从技艺走向工程科学. 上海金属, 2001, 24(1): 1)
- [2] Wang G D, Yao S J. Ultra-fast cooling technology and its industrialization practice. *Angang Technol*, 2009(6): 1
(王国栋, 姚圣杰. 超快速冷却工艺及其工业化实践. 鞍钢技术, 2009(6): 1)
- [3] Shanmugam S, Misra R D K, Hartmann J, et al. Microstructure of high strength niobium-containing pipeline steel. *Mater Sci Eng A*, 2006, 441(1/2): 215
- [4] Wang C M, Wu X F, Liu J, et al. Transmission electron microscopy of martensite/austenite islands in pipeline steel X70. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438/440: 267
- [5] Yang J H, Liu Q Y, Sun D B, et al. Effect of rolling processing on the microstructure and M/A islands in a X70 grade pipeline steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(2): 180
(杨景红, 刘清友, 孙冬柏, 等. 轧制工艺对微合金管线钢组织及 M/A 岛的影响. 北京科技大学学报, 2009, 31(2): 180)
- [6] Liao B, Xiao F R. Research on microstructure and strength-toughening mechanism of acicular ferrite pipeline steel. *Trans Mater Heat Treat*, 2009, 30(2): 57
(廖波, 肖福仁. 针状铁素体管线钢组织及强韧化机理研究. 材料热处理学报, 2009, 30(2): 57)
- [7] Tong K, Zhuang C J, Liu Q, et al. Microstructure characteristics of M/A islands in high grade pipeline steel and its effect on mechanical properties. *Mater Mech Eng*, 2011, 35(2): 4
(仝珂, 庄传晶, 刘强, 等. 高钢级管线钢中 M/A 岛的微观特征及其对力学性能的影响. 机械工程材料, 2011, 35(2): 4)
- [8] Liu L, Zhao Y J, Wang X F. Influence of MA island on property in the high strength micro-alloy pipeline steel. *Nansteel Sci Technol Manage*, 2008(1): 1
(刘莉, 赵亚娟, 王秀芳. 高强度微合金管线钢中的 MA 岛对性能的影响. 南钢科技与管理, 2008(1): 1)
- [9] Weng Y Q, Kong L H, Wang G D, et al. *Ultra-Fine Grained Steels: the Steel Organization Refinement Theory and Control Technology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003
(翁宇庆, 孔令航, 王国栋, 等. 超细晶钢: 钢的组织细化理论与控制技术. 北京: 冶金工业出版社, 2003)
- [10] Zheng X F, Kang Y L, Meng D L, et al. Effects of finish rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of X80 high deformability pipeline steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(5): 557
(郑晓飞, 康永林, 孟德亮, 等. 终轧温度对 X80 抗大变形管线钢组织性能的影响. 北京科技大学学报, 2011, 33(5): 557)
- [11] Cai Q W, Liu J S, Yu W. Study of the behavior of austenite recrystallization of Mn-Nb-Mo series X70 pipeline steel. *Steel Rolling*, 2005, 22(1): 7
(蔡庆伍, 刘晋珊, 余伟. Mn-Nb-Mo 系 X70 级管线钢奥氏体再结晶规律的研究. 轧钢, 2005, 22(1): 7)