



18CrNiMo7-6 钢静态 CCT 曲线测定与组织分析

路峰¹, 张佩¹, 李琦², 邱国兴²

(1 山东钢铁股份有限公司技术中心, 济南 271104; 2 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

摘要: 利用 Gleeble-3800 热模拟机对 0.1~30 °C/s 冷却速度下 18CrNiMo7-6 风电钢连续冷却膨胀曲线进行测试。结合金相-硬度法绘制了 18CrNiMo7-6 风电钢静态连续冷却转变曲线(CCT 曲线), 分析了不同冷却速率条件下 18CrNiMo7-6 风电钢组织转变规律。实验结果表明, 18CrNiMo7-6 风电钢奥氏体相变点 A_{c1} 相变温度为 765 °C, A_{c3} 相变温度 843 °C。当冷却速度小于 0.5 °C/s 时, 试验钢组织为铁素体和珠光体, 发生高温相变; 冷却速度 0.5~1 °C/s 时, 试验钢中铁素体逐渐减少, 开始出现板条状马氏体组织; 冷速大于 2 °C/s 时, 试验钢组织主要为贝氏体及马氏体, 同时发生中温相变和低温相变; 随冷速增加钢中贝氏体组织含量减少, 马氏体组织含量增多; 冷速大于 20 °C/s, 组织全部为马氏体, 只发生低温相变; 冷速由 0.1 °C/s 增加至 30 °C/s 过程中, 风电钢试样硬度逐渐增加。

关键词: 18CrNiMo7-6; 连续冷却转变曲线; 组织; 硬度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00212 **中图分类号:** TG156. 1

Static CCT Curve Measurement and Microstructure Analysis of 18CrNiMo7-6 Steel

Lu Feng¹, Zhang Pei¹, Li Qi², Qiu Guoxing²

(1 Technology Center, Shandong Iron And Steel Company Ltd., Ji'nan 271104, China; 2 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The continuous cooling expansion curve of 18CrNiMo7-6 wind power steel was tested by using a Gleeble-3800 thermal simulator at a cooling rate of 0.1-30 °C/s. The static continuous cooling transformation curve (CCT curve) of 18CrNiMo7-6 wind power steel was plotted by using metallographic hardness method. The microstructure transformation law of 18CrNiMo7-6 wind power steel under different cooling rate conditions was analyzed. The experimental results show that the A_{c1} phase transition temperature of 18CrNiMo7-6 wind power steel is 765 °C, and the A_{c3} phase transition temperature is 843 °C. When the cooling rate is less than 0.5 °C/s, the microstructure of the experimental steel is ferrite and pearlite, and high-temperature phase transformation occurs; At a cooling rate of 0.5-1 °C/s, ferrite disappears and plate-like martensite is initially formed; Starting from 2 °C/s, the microstructure is mainly bainite and martensite, with both medium temperature and low temperature phase transformations occurring simultaneously; After 10 °C/s, the bainite content decreases and the martensite content increases with the increase of cooling rate; When the cooling rate is greater than 20 °C/s, the microstructure is entirely martensitic with only low-temperature phase transformation occurring; During the process of increasing the cooling rate from 0.1 °C/s to 30 °C/s, the hardness of the wind power steel shows an upward trend.

Key Words: 18CrNiMo7-6; Continuous Cooling Transformation Curve; Microstructure; Hardness

全球气温变暖和能源枯竭问题的日益严峻, 促使世界各国进一步加快了对于新能源的开发和利用。具有可再生、零污染和大储量等优点的风能作为优质的清洁能源, 为传统能源提供了重要补充^[1-3]。当前, 风能最主要的利用方式是进行风力发电, 而优良的风电设备是风力发电正常运行的重要保障。18CrNiMo7-6 合金钢因其具有强度高、韧性好和淬透性好等优良的综合性能, 使其对不同工况具有很好的适应能力, 在风电设备领域被广泛使用^[4-8]。

18CrNiMo7-6 合金钢优良的性能依赖于其制备过程中精确的组织调控。齿轮钢棒材生产工艺包括冶炼→加热→轧制三个步骤; 在制备齿轮过程中还要经过下料→锻造→热处理→车削→铣齿等复杂工序, 其中热处理是各工序中最重要的一环, 其关系着最终零件质量的稳定性^[9-11]。连续冷却过程中的相变规律和连续冷却转变曲线(CCT)对钢的组织调控及热处理工艺制定具有重要指导意义^[12-14]。以山东钢铁莱芜分公司特钢事业部开发 18CrNiMo7-6 钢为研究对象, 通过不同冷却速度下

的热模拟实验并结合金相组织观察结果,绘制 18CrNiMo7-6 钢静态 CCT 曲线,分析不同冷速对合金钢显微组织和性能的影响,以期为 18CrNiMo7-6 钢的生产工艺参数设定提供参考。

1 试验材料及方法

风电钢 18CrNiMo7-6 钢生产工艺为:120 t 转炉冶炼→120 t LF 精炼→120 t RH 真空脱气→大圆坯连铸(断面直径 500 mm)→入坑缓冷/热送→步进炉加热→BD 轧机轧制→精轧轧制。该钢的化学成分见表 1。

表 1 18CrNiMo7-6 钢的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti
0.18	0.20	0.63	0.014	0.01	1.70	1.46	0.30	0.114	0.003 7

试样取自轧材,测试试样为 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱型钢样,测试前采用丙酮除去试样表面的油渍以降低实验误差。利用 Gleeble-3800 热模拟机对 18CrNiMo7-6 钢升温过程膨胀量随温度变化进行测试,结合金相-硬度法确定试样相变温度。

根据 YB/T5128-2018,将试验钢以 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 加热速度由室温持续加热,由于热膨胀原理试样膨胀量持续上升,直至 A_{c_1} 时膨胀量突然下降,此时,奥氏体化开始;下降趋势在到达 A_{c_3} 时停止,膨胀量再次发生突变,说明奥氏体相变已完全结束。一般试样加热温度确定在 A_{c_3} 温度以上 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右^[15],故确定试验钢的加热温度为 $A_{c_3} + 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

风电钢试样静态 CCT 曲线测试工艺如下:试样首先以 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度加热到 $A_{c_3} + 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 后保温 5 min,分别以 0.1、0.2、0.5、1、2、10、15、20、30 $^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度冷却至室温。实验过程中记录并汇总试样膨胀量随温度的变化,其中相变起始点与结束点确定方法为切线法。具体实验工艺如图 1 所示。

将试样沿纵向轴线切开(线切割),利用硝酸酒精溶液(体积分数为 4%)浸蚀冷却后经过机械磨制和抛光的试验钢。对腐蚀后的试验钢进行观察并分析 18CrNiMo7-6 钢在不同冷却速度下转变后的显微组织,使用设备为光学显微镜(型号:德国蔡司 Imager. M2 m)。使用维氏硬度计测量显微硬度。根据得到的膨胀曲线和相变组织,对 18CrNiMo7-6 钢静态 CCT 曲线进行绘制。

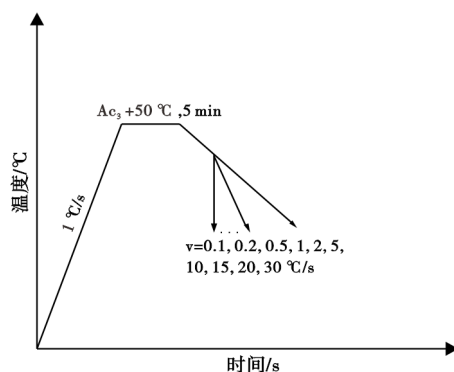


图 1 试验钢静态 CCT 曲线测试工艺图

Fig. 1 Static CCT curve test process diagram of test steel

2 试验结果与分析

2.1 静态 CCT 曲线测定

2.1.1 试验钢奥氏体相变

试样奥氏体化过程温度-膨胀量曲线如图 2 所示。试样由室温以 $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 加热速度加热,试验钢在热模拟机上连续膨胀,膨胀量呈线性上升,直至 A_{c_1} 点,膨胀量出现突变,此时,已开始奥氏体化;利用切线法,获得 A_{c_1} 点温度为 $765 \text{ }^\circ\text{C}$ 。继续加热至 A_{c_3} 点,试样膨胀量再次发生突变,此时,奥氏体相变已经结束;利用切线法,获得 A_{c_3} 点温度为 $843 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随后试样膨胀量继续呈线性上升趋势,不再有拐点出现,试样进入完全奥氏体化状态。

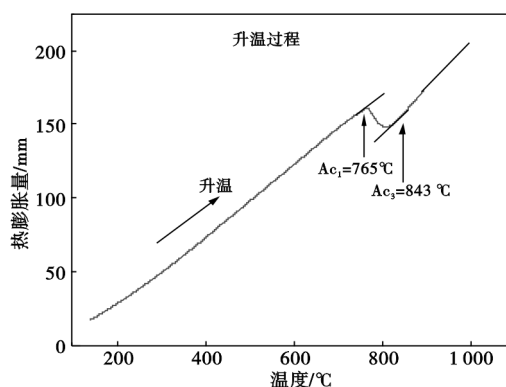


图 2 18CrNiMo7-6 钢奥氏体化过程

Fig. 2 Austenitizing process of 18CrNiMo7-6 steel

2.1.2 不同冷速下显微组织

18CrNiMo7-6 钢样在图 1 工艺下的显微组织结构如图 3 所示,试验钢的加热温度为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冷速为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,试验钢显微组织包括铁素体、珠光体和少量贝氏体,如图 3(a)所示;当风电钢冷却速度增加到 $0.2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,试验钢组织中铁素体含量有所下

降,如图3(b)所示;当风电钢冷速为0.5 °C/s时珠光体含量减少,马氏体开始出现,如图3(c)所示。风电钢冷速到达1 °C/s后,随着试验钢冷速的不断增大,试样中珠光体和铁素体含量显著下降,组织以贝氏体和马氏体为主,如图3(d)所示。较小冷却速度下,试验钢发生多种相变^[16]。当风电钢冷速增加到2 °C/s时,试验钢中铁素体消失,贝氏体逐渐减少,组织仍然以贝氏体和马氏体为主,如图3(e)所示。当风电钢冷速为10 °C/s时,组织中贝氏体含量下降明显,贝氏体组织多存在于马氏体板条之间,如图3(f)所示。当试验钢冷速为15 °C/s时,贝氏体含量进一步减少,如图3(g)所示。试验钢中马氏体含量随着风电钢冷速的增加持续增多,当冷却速度达到20 °C/s后,风电钢组织全为马氏体,如图3(h)所示。综合分析表明,获得贝氏体显微组织的临界冷却速率是20 °C/s。

2.1.3 试验钢连续膨胀曲线

试验钢冷却阶段的膨胀曲线如图4所示。当风电钢冷速为0.1 °C/s和0.2 °C/s时,试验钢共经历三个相变,第一个相变温度在720 °C左右,为铁素体+珠光体相变开始温度,第二个相变温度为640 °C附近,为铁素体与珠光体相变结束温度,该相变为高温区相变;第三个相变温度为470 °C左右,为贝氏体相变开始温度;第四个相变温度约为290 °C,结合显微组织确定为贝氏体相变结束温度,该相变为中温区相变。当冷却速度为0.5 °C/s,铁素体+珠光体在715 °C时开始生成,而贝氏体+马氏体相变开始温度

为496 °C,相变结束点为275 °C,同时发生中温区相变和低温区相变。当冷却速度为1 °C/s时,相变情况与0.5 °C/s冷速下相同。在小冷却速度下,珠光体+铁素体和马氏体相变的温度相差并不是十分明显,而贝氏体相变开始温度有所提高,由470 °C左右上升到540 °C。随着风电钢冷速的持续增加,珠光体+铁素体相变区几乎消失,相变开始以贝氏体相变为主。冷却速度为2 °C/s时,相变曲线上没有出现铁素体相变温度拐点,此时铁素体组织已经非常少。结合显微组织,判断521 °C为贝氏体相变开始点,同时也是马氏体相变开始点。该种相变模式持续到冷却速度为10 °C/s时,显微组织中存在少量贝氏体组织。此时相变区仍由贝氏体相变开始,马氏体相变结束。当冷却速度大于15 °C/s,结合显微组织分析,贝氏体相变和马氏体相变同时发生但仅存在极少量贝氏体。风电钢冷速变为20 °C/s时,冷却曲线显示相变开始温度始终维持在415 °C左右,相变结束温度在300 °C左右,试验钢只发生了马氏体相变,得到马氏体组织。具体相变曲线如图4(a)~(h)所示。

对不同冷却速度下风电钢18CrNiMo7-6膨胀曲线进行分析(方法为切线法),得到18CrNiMo钢连续冷却过程相变温度见表2。随着试验钢冷却速度的不断增加,珠光体+铁素体相变不再发生,网状铁素体逐渐消失,铁素体含量发生了明显的下降;当冷却速度增加至5 °C/s,钢中上贝氏体和下贝氏体组织均不再生成;当风电钢冷速变为10 °C/s后,试样只发生马氏体相变,得到马氏体组织。

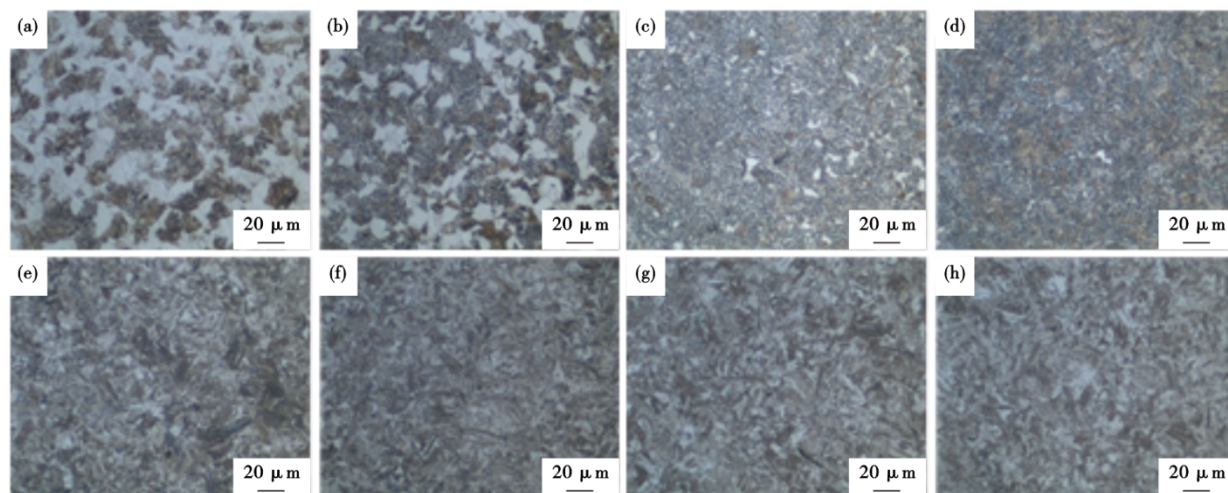


图3 18CrNiMo7-6钢静态不同冷却速度下的金相组织:(a) 0.1 °C/s, (b) 0.2 °C/s, (c) 0.5 °C/s, (d) 1 °C/s, (e) 2 °C/s, (f) 10 °C/s, (g) 15 °C/s, (h) 20 °C/s

Fig. 3 Microstructure of the 18CrNiMo7-6 steel under different static cooling rates : (a) 0.1 °C/s, (b) 0.2 °C/s, (c) 0.5 °C/s, (d) 1 °C/s, (e) 2 °C/s, (f) 10 °C/s, (g) 15 °C/s, (h) 20 °C/s

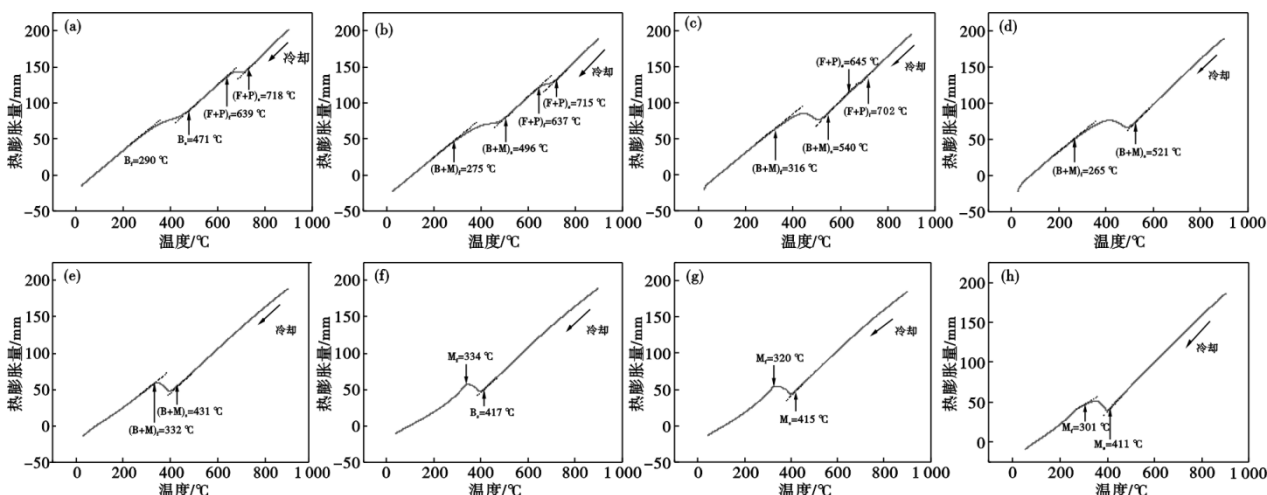


图4 18CrNiMo7-6钢静态不同冷却速度下的膨胀曲线:(a) 0.1 °C/s, (b) 0.5 °C/s, (c) 1 °C/s, (d) 2 °C/s, (e) 10 °C/s, (f) 15 °C/s, (g) 20 °C/s, (h) 30 °C/s

Fig. 4 Expansion curves of 18CrNiMo7-6 steel under different static cooling rates : (a) 0.1 °C/s, (b) 0.5 °C/s, (c) 1 °C/s, (d) 2 °C/s, (e) 10 °C/s, (f) 15 °C/s, (g) 20 °C/s, (h) 30 °C/s

表2 18CrNiMo7-6钢不同冷却速度下的相变温度
Table 2 Phase transformation temperature of 18CrNiMo7-6 steel under different cooling rates

冷却速率/ (°C·s ⁻¹)	相变温度 /°C							
	F _s	F _f	P _s	P _f	B _s	B _f	M _s	M _f
0.1	718	639	718	639	471	290	-	-
0.5	715	637	715	637	496	275	496	275
1	702	645	702	645	540	316	540	316
2	-	-	-	-	521	265	521	265
10	-	-	-	-	431	332	431	332
15	-	-	-	-	-	-	417	334
20	-	-	-	-	-	-	415	320
30	-	-	-	-	-	-	411	301

2.1.4 不同冷速下试验钢硬度

按 GB/T 17394.1—2014 标准检测硬度, 检验方法为在试样两端及中部圆周每隔 120°打一点, 共 9 点, 去掉最值后取平均值。试验钢在不同冷速下的显微硬度如图 5 所示。图 5 显示, 试验钢的显微硬度会随着风电钢冷速的不断增大总体呈增加趋势, 主要原因是试样中铁素体含量减少, 珠光体含量增加; 冷速在 0.1~2 °C/s 时, 硬度为 229~335HV, 曲线斜率变化不大; 冷速大于 2 °C/s 后, 变化曲线斜率再度增加, 硬度开始大幅增长, 这主要是马氏体组织出现导致的; 当冷速为 10 °C/s 时, 硬度变化曲线斜率突然发生变化, 产生突变的主要原因是组织中珠光体含量减少; 当冷速为 10~20 °C/s 时, 硬度为 423~438HV; 当冷速增加至 15 °C/s 时, 硬度上升幅度明显增加, 此阶段马氏体组织含量逐渐增多, 并成为主

要的显微组织; 此外试验钢组织会随着冷速的不断升高而不断细化, 也会在一定程度上增加试样的硬度。为保证风电钢硬度在 430~540HV^[17], 冷速应大于 15 °C/s。

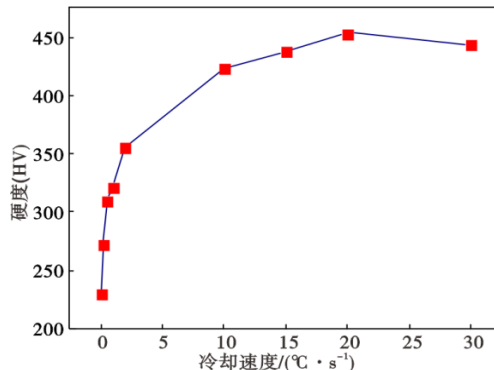


图5 18CrNiMo7-6钢不同冷却速度下的显微硬度
Fig. 5 Microhardness of 18CrNiMo7-6 steel under different cooling rates

2.2 静态 CCT 曲线的绘制与分析

在已经获得的过冷奥氏体不同冷速的连续冷却降温段膨胀曲线上, 对曲线拐点处使用切线法测出相转变的起始点或者终了点, 然后利用平滑的曲线连接物理意义相同的相变点, 再在图中将升温过程得到的 Ac₁、Ac₃ 以及在降温过程得到的 Ms、Mf 点标注出来就得到了完整的静态 CCT 曲线^[18]。风电钢 18CrNiMo7-6 静态 CCT 曲线如图 6 所示。该钢种静态 CCT 曲线最大的特点即每一种冷却速度下都没有体现贝氏体相变结束的温度曲线^[19-21]。高温相

变区域虽然持续到冷速大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的,但是也同时发生了贝氏体相变以及马氏体相变。从冷却速度 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 开始,高温相变消失,中温相变与低温相变都存在。随着冷却速度的提升,冷却速度到达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,中温相变区域基本消失,只存在低温相变区,生成马氏体组织。

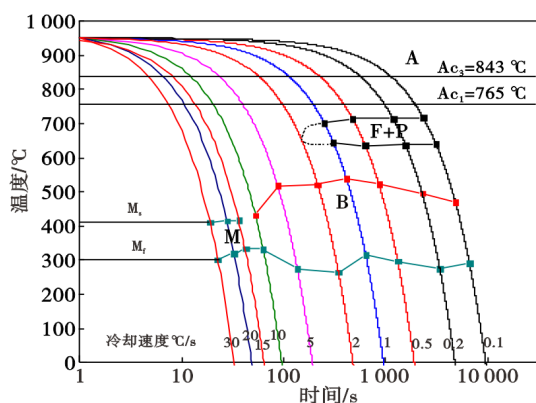


图6 18CrNiMo7-6钢的静态 CCT 曲线
Fig. 6 Static CCT curves of 18CrNiMo7-6 steel

参考文献

- [1] 付振坡, 赵晓萍, 李双江, 等. 风电钢焊后热影响区探伤不合格原因分析[J]. 炼钢, 2020, 36(6): 67-71.
- [2] 杨晓蔚. 风电产业、风电设备及风电轴承[J]. 轴承, 2009(12): 54-59.
- [3] 张宝荃. 国内风电用钢市场分析与技术开发[J]. 特钢技术, 2012, 18(1): 6-8.
- [4] 张银霞, 原少帅, 王子乐, 等. 18CrNiMo7-6钢高速外圆磨削残余应力和硬度的试验分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(1): 65-70.
- [5] 李 宁. 粗糙度对渗碳淬火 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [6] 郁 俐, 涂小龙. 18CrNiMo7-6 钢深层渗碳工艺对组织性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2019(5): 80-82.
- [7] 王之香, 南海, 张锦文. 高铁齿轮用钢 18CrNiMo7-6 电渣生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 29-33.
- [8] Kumar W, Sharma U K, Shome M. Mechanical properties of conventional structural steel and fire-resistant steel at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 181: 106615.
- [9] Palumbo D, De Finis R, Ancona F, et al. Damage monitoring in fracture mechanics by evaluation of the heat dissipated in the cyclic plastic zone ahead of the crack tip with thermal measurements [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 181: 65-76.
- [10] 姚纪坛, 孙 力, 安会龙, 等. 低屈服比高强耐候钢的 CCT 曲线及性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(6): 104-108.
- [11] 赵贤平, 邓 深, 余铁峰, 等. 钕微合金化 HRB400E 高强钢筋 CCT 曲线测定及应用[J]. 中国冶金, 2019, 29(8): 58-63.
- [12] 陈世杰, 孙 维, 汪开忠, 等. 18CrNiMo7-6 齿轮钢带状组织控制及其对力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(9): 76-80.
- [13] Dong J, Liu C X, Liu Y C, et al. Isochronal phase transformation of Nb - V - Ti microalloyed ultra-high strength steel upon cooling [J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 125: 423-430.
- [14] 徐 光. 金属材料 CCT 曲线测定及绘制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [15] 张 念, 陈章明, 赵红强, 等. 38MnSiVS5 非调质钢的 CCT 曲线测定与分析[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 82-85.
- [16] 陈 鑫, 徐 光, 姚籽杉, 等. NM400 马氏体耐磨钢静态 CCT 曲线[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 63-66.
- [17] Rajinikanth V, Soni M K, Mahato B, et al. Study of microstructural degradation of a failed pinion gear at a cement plant[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 117-126.
- [18] 冉贞德, 汤 静, 李 军, 等. 深冷处理对 17CrNiMo6 钢硬化层组织和力学性能的影响[J]. 中国金属通报, 2019(10): 119-120+122.
- [19] Liu G W, Mao C L, Ding R, et al. The kinetics of dynamic recrystallization and construction of constitutive modeling of RAFM steel in the hot deformation process[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 557: 153285.
- [20] 熊国源, 刘利华, 朱文涛. 奥氏体化温度对 40CrNiMo 钢组织和性能的影响[J]. 中国冶金, 2021, 31(7): 30-37.
- [21] 王宁涛, 王利军, 郭俊成, 等. 16MnCr5 高温热塑性及连续冷却转变曲线测定及应用[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 120-124.

3 结论

(1) 利用热膨胀法测得 18CrNiMo7-6 试验钢的膨胀曲线, 采用切线法得到试验钢 A_{c1} 温度为 $765\text{ }^{\circ}\text{C}$, A_{c3} 温度为 $843\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 当冷速小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 风电钢显微组织为珠光体+铁素体和少量贝氏体; 当冷速为 $0.5\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 试验钢中铁素体含量减少, 钢中开始有板条状贝氏体生成; 从冷速大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 开始, 试验钢中贝氏体含量先增后减, 钢中开始出现马氏体组织; 随冷速增加, 试验钢中马氏体含量逐渐增多; 当冷速大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 可全部得到马氏体组织。

(3) 随着试验钢冷速的不断增大, 钢中出现了贝氏体和马氏体, 试验钢显微硬度逐渐增加, 组织细化是造成硬度提高的另一重要原因。结合 18CrNiMo7-6 钢静态 CCT 曲线及试验钢硬度, 为保证最终产品硬度满足要求, 应使得 18CrNiMo7-6 钢中铁素体含量降低, 促进贝氏体和马氏体组织生成, 连续冷速应控制在 $15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。