# 试验测定和软件模拟绘制 22A 的 TTT 曲线

程 剑<sup>1</sup>, 余驰斌<sup>1</sup>, 叶传龙<sup>1</sup>, 夏朝开<sup>1</sup>, 张东升<sup>1</sup>, 丁 贝<sup>2</sup>, 杨 林<sup>2</sup>, 余 冲<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学 材料与冶金学院,湖北 武汉 430081;2. 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司 技术中心,贵州 六盘水 553028)

摘 要:用磁性法、金相法及JMatPro模拟方法对SWRCH22A 冷镦钢的的等温转变曲线(TTT)进行测定。分析结果 表明:TTT 的 C 型鼻尖温度为 550℃;铁素体的转变温度为 827.6℃;珠光体的转变温度为 712.3℃;贝氏体的转变温度 为 626.2℃;马氏体转变起始温度为 426.4℃。这验证了JMatPro模拟计算预测的准确性,可运用JMatPro快速模拟 TTT 曲线,为制定热处理制度及生产工艺提供理论依据。

关键词:磁性法;金相法;JMatPro;TTT曲线

中图分类号:TG111.92 文献标识码:A 文章编号:1001-3814(2013)02-0060-03

Experimental Determination and Software Simulation on TTT Curve for 22A CHENG Jian<sup>1</sup>, YU Chibin<sup>1</sup>, YE Chuanlong<sup>1</sup>, XIA Chaokai<sup>1</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>1</sup>, DING Bei<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>, YU Chong<sup>2</sup>

(1. Institute of Material and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Technology Center, Shuicheng Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Liupanshui 553028, China)

Abstract: By using magnetic method, metallography and JMatPro software simulation, the isothermal transformation curve (TTT) of SWRCH22A cold heading steel was measured. The results show that the C shaped nasal tip temperature of TTT is 550 °C; the transformation starting temperature of ferrite is 827.6 °C; the transformation starting temperature of bainite is 626.2 °C; the transformation starting temperature of bainite is 626.2 °C; the transformation starting temperature of martensite is 426.4 °C. Meanwhile, the prediction of JMatPro simulation is proved to be accurate, so JMatPro can be used to simulate TTT curve rapidly and accurately, which can provide theoretical basis for improving heat treatment process.

Key words: magnetic method; metallographic method; JmatPro; TTT curve

在室温条件下利用金属塑性成型工艺生产互 换性较高的标准件用钢被称为冷镦钢。SWRCH22A 钢是冷镦钢的一种,与 ML20 钢大致相当。为在热轧 控冷后获得稳定的组织和性能,为制订此钢的轧制 和热处理工艺提供依据,亟需研究此钢的 TTT 图。 目前为止,只有与此钢相近钢种的 TTT 图<sup>[1-2]</sup>。为此 本文测定了该钢的等温转变曲线(TTT),并观测了不 同等温温度时转变产物的显微组织,同时用软件模 拟了 TTT 曲线,此 TTT 曲线可反映出该钢的组织转 变过程,可为制定热处理制度、生产工艺提供依据。

1 实验材料与方法

钢化学成分见表 1。

该钢种的热物性参数见表 2。

收稿日期:2012-07-05

作者简介:程剑(1986-),男,湖北黄石人,硕士研究生,主要研究方向为 热连轧带钢有限元分析;电话:15997446096; E-mail:499904219@qq.com

表 1 SWRCH22A 钢化学成分(质量分数,%) Tab.1 Chemical composition of SWRCH22A (wt%)									
С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Cu	AI	
									_

0.18~0.23 0.	10 0.70~1.0	$0 \leq 0.03 \leq 0.$	035 -	-	-	≥0.02
表 2 SWRCH22A 热物性参数 Tab.2 Thermal physical parameters of SWRCH22A						
热物理参数	密度 /(kg⋅m³)	焓 /(kJ·kg₁)	比热容 /(kJ·kg⁻¹・	: K⁻¹)	导热 /(W・n	<u></u> 热性 ∩⁻¹・K⁻¹)
<b>200</b> °C	7.85	135.38	0.51		32	.89
<b>400</b> °C	7.77	245.1	0.59		31	.71
<b>600</b> °C	7.69	374.35	0.71		31	.02
<b>800°</b> C	7.61	541.73	0.76		31	.07
<b>900</b> °C	7.57	606.63	0.70		31	.42
<b>1000°</b> ℃	7.53	675.85	0.69		31	.99
<b>1200°</b> ℃	7.44	813.13	0.69		33	.76

# 2 实验方法测定 TTT 曲线

#### 2.1 磁性法测定 TTT 曲线

金属及合金的磁性与金属的相组成和组织有着 紧密联系,其中磁化率和矫顽力对组织敏感,而饱和 磁化强度和居里点只和合金的相组成有关,因此通 常可根据合金的磁化率和矫顽力分析组织的变化, 而根据饱和磁化强度和居里点对合金进行相分析, 研究组织转变的动力学。热磁仪是用于材料磁性能 分析的常用仪器,它是通过测量饱和磁化了的棒状 试样在均匀的磁场中所受力矩来确定材料的饱和磁 化强度的仪器。

钢中的奥氏体在任何温度均为顺磁性的或非铁 磁性,当从高温冷却下来而转变为铁素体、珠光体、 贝氏体、马氏体等产物时便出现铁磁性。因此,过冷 奥氏体在 A<sub>2</sub>(α 相铁磁性转变温度即居里点)以下的 温度等温或降温时,经过一段孕育期,随着转变开始 及等温时间的延长,转变产物的增加,直到转变终 止,将不断引起试样由顺磁性转到铁磁性的变化。 根据这些铁磁性相析出多少和析出速度,便可判定 珠光体或贝氏体的析出量和析出速度。

实验时,采用实验室的磁性示差仪测量过冷奥氏 体在350~700℃(50℃为间隔)的等温转变过程,绘 出这一温度区间的 TTT 曲线。将 8 个尺寸为 φ2mm ×50mm 的试样分别以 10℃/s加热速度加热到 910℃, 保温 2~2.5min 使奥氏体均匀化;对应每个加热温 度,将试样分别以快速冷却到 350、400、450、500、 550、600、650、700℃进行等温处理,根据膨胀量--时 间曲线确定转变开始时间和转变结束时间<sup>[1]</sup>。

2.2 实验结果与分析

据磁性视差仪显示的试样铁磁性变化曲线,测 得各个等温温度下的转变开始时间和转变结束时 间,如表3所示。

> 表 3 磁性法在 300~700 ℃测得的过冷奥氏体 等温转变参数

Tab.3 Supercooled austenite isothermal transformation parameters measured at 300-700 °C by magnetic method

等温温度 /℃	F转变开始 时间 /s	P转变开始 时间 /s	P转变量 50% 时间/s	P转变终了 时间 /s	总时间 /s
350	2	2	6	10	100
400	3.5	3.5	8	23	100
450	4.5	4.5	8.5	20	100
500	2.5	2.5	5	25	100
550	1.2	3	15	35	100
600	4	10	30	100	500
650	18	50	200	1000	3000
700	100	550	1000	10000	10000

根据表 3 用软件画出的 TTT 曲线如图 1 所示。 等温转变后的组织特征如表 4 所示。由图 1 所示,在



Fig.1 TTT curves of SWRCH22A by Magnetic measuring method

表 4 过冷奥氏体等温转变后组织形态 Tab.4 Tissue morphology after supercooled austenite isothermal transformation

等温温度 /℃	组织状态
350	下贝氏体
450	下贝氏体
500	上贝氏体
550	珠光体+铁素体+少量贝氏体
600	珠光体+铁素体(微量 <2%)
650	珠光体+铁素体(微量 <4%)
700	珠光体+铁素体(微量 <5%)

300~700℃进行过冷奥氏体等温转变时,随着等温 温度的降低,转变孕育时间和转变时间都是先减小后 逐渐增加。在等温温度为 400、450、500、550℃时转变 时间几乎相同且为最短。根据图可以确定最短孕育 时间和最短转变时间出现在等温温度为 550℃处。 等温温度在 550℃以上时,自由能差起主导作用,随 着等温温度的降低,过冷度增大,自由能差增大,过冷 奥氏体转变速度逐浙加快。等温温度在 550℃以下 时,原子扩散系数起主导作用,随着等温温度的降低, 原子扩散系数逐浙减小,过冷奥氏体转变速度减慢<sup>1</sup>。

图 2 为 SWRCH22A 钢丝在 350、500、550、700 ℃ 各等温温度下的金相照片。从组织图上可看出,在等 温温度 550℃时,珠光体细化,开始形成少量贝氏 体,此时组织已经有索氏体组织,该组织具有很好的 强度、硬度和韧性的配合。索氏体具有良好的力学性 能,一般认为是由于其片层间距较小,使滑移可沿最 短途进行。同时,由于渗碳体片很薄,在强烈塑性变 形时,能够弹性弯曲,故而塑性变形能力也很强。索 氏体由于塑性变形而使强度增高,主要是由于塑性 变形使得亚晶粒细化和位错密度增大,形成许多位 错网组成的位错壁,而且这种位错壁彼此之间的距



图 2 SWRCH22A 300~700℃部分等温温度下的金相照片 Fig.2 Micrographies of some isothermal temperature at 300-700℃ on SWRCH22A

离将随变形量的增大而减小。

### **3 JMatPro**软件模拟 TTT 曲线

#### 3.1 JMatPro软件介绍及特点

JMatPro 是英国 Thermotech 公司开发的专门用 于金属材料相图计算与金属材料性能模拟的软件, 足一套功能强大的金属材料相图计算与材料性能模 拟软件,可以用来计算金属材料多相平衡与多种性 能。它是一个基于材料类型的软件,不同的材料类碰 有不同的模块。JMatPro目前可提供镍基超合金、钢 铁(如不锈钢,高强低合金钢,铸铁)、铝合金、镁合金 和钛含金等模块。简单而直觉觉式的图形用户界面 设计,任何工程师或者科研人员都易使用。当然它可 被使用在任何其他铸造软件上、补足其他软件在这 方面功能不足之处。JMatPro 是以强大而稳定的热 力学为核心技术的计算基础。所有物理模型的建立 都经过了广泛的验证,以确保材料性能计算的准确 性。JMatPro 的主要特点: 广泛且经验证的模拟计 算,确保性能的准确预测;快速和正确的计算能力; 通过强大数据管理界面计算材料的性质<sup>[34]</sup>。

3.2 软件模拟结果与分析

SWRCH22A 钢 TTT 曲线分析过冷奥氏体等温 转变曲线(TTT 曲线)可综合反映过冷奥氏体在不同 过冷度下的等温转变过程:转变开始和转变终了时 间、转变产物的类型以及转变量与时间、温度之间的 关系等。利用 JMatPro 软件所获取的 SWRCH 22A 钢 TTT 曲线分析如图 3 所示。可知,在 SWRCH 22A 钢的过冷奥氏体在不同过冷度下的等温转变过程: 转变开始和转变终了时间、转变产物的类型以及转变 量与时间、温度之间的关系等。在奥氏体化后的冷却 过程中,最早析出铁素体的转变温度为 827.6℃,其



图 3 JMatPro 模拟测得的 SWRCH22A 的 TTT 曲线 Fig.3 TTT curves of SWRCH22A measured by JMatPro simulation

含量为 0.1%:珠光体的转变温度为 712.3℃。转变量 根据不同的过冷度又相差较大:贝氏体的转变温度 为 626.2℃,与珠光体相似。转变量根据不同的过冷 度又相差较大:马氏体转变起始温度为 426.4℃。

#### 4 试验与软件模拟结果综合分析

为综合分析磁性法与 JMatPro 软件模拟的 TTT 图的相似点与不同点,所以将两种方法测得模拟数 据进行绘制,如图 4 所示。可看出,相似点;用磁性法



simulation (下转第65页)



Fig.2 Effect of Mn content on corrosion resistance of 00Cr22Ni5Mo3Mnx duplex stainless steel

量的增加,00Cr22Ni5Mo3Mnx 双相不锈钢试样的耐 点蚀性呈现先减小后增加的趋势。Mn 含量为 0.6% ~0.9%时,耐点蚀性能变化不大;Mn 含量为 1.2%时, 耐蚀性最佳,为 5.7g/(m<sup>2</sup>·h);Mn 含量增加到 1.5%时, 其耐蚀性能又迅速减弱。

3 结论

(1) 随着 Mn 含量的增加,奥氏体含量逐渐增 多,当Mn 含量为 1.5%时,00Cr22Ni5Mo3Mnx 双相 不锈钢试样中的两相比例接近 1:1。

(2) 随着 Mn 含量的增加,抗拉强度有逐渐增加的趋势,屈服强度变化不明显,伸长率先减小后增加,冲击功有变小的趋势,当 Mn 含量在 1.2%~ 1.5%时,00Cr22Ni5Mo3Mnx 双相不锈钢的综合力学性能最好。

(上接第 62 页) 与 JMatPro 软件模拟测定的 TTT 曲 线的 C 型鼻尖都在 550℃; TTT 曲线可综合反映过 冷奥氏体在不同过冷度下的等温转变过程:转变开始 和转变终了时间、转变产物的类型以及转变量与时间、 温度之间的关系等。不同点; TTT 曲线与实验条件有 关,本文采用磁性法绘制 TTT 图,受实验设备等条 件的影响,曲线的测定只能做到等温温度 700℃,通 过磁性法不能很好做出各相转变的开始温度。

# 5 结论

(1) 在运用磁性示差仪进行 SWRCH22A 冷镦 钢过冷奥氏体各温度转变参数的测定和 TTT 曲线 的绘制后发现,随着等温温度的降低,过冷奥氏体的 等温转变孕育时间和转变时间总体上都呈现出先减 小后增加的趋势。根据 TTT 曲线图可确定最短孕育 时间和最短转变时间在等温温度为 550℃。 (3) 随着 Mn 含量的增加,00Cr22Ni5Mo3Mnx 抗点蚀性能先增加后减小,在 Mn 含量为 1.2%时, 耐点蚀性能最佳。

(4) 综合两相比例、力学性能、耐点蚀性能考虑, 当 Mn 含量在 1.2%~1.5%时,00Cr22Ni5Mo3Mn<sup>a</sup> 性 能最佳。

参考文献:

- [1] 高娃,罗建民,杨建君.双相不锈钢的研究进展及其应用[J].兵器材料科学与工程,2005,28(3):61-63.
- [2] 李志军,陈湘茹,孙卿卿,等.双相不锈钢的研究与发展[J].铸造技术,2011,32(9):1320-1323.
- [3] 李新跃,罗宏,喻兰英.GX2CrNiMoN22-5-3不锈钢的固溶处
  理工艺研究[J]. 热加工工艺,2011,40(14):171-172.
- [4] Henrik Sieurin, Rolf Sandstrom. Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205 [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 444:271-276.
- [5] Ihsan U H, Park J H, Hyuk S K. Development of high Mn-N duplex stainless steel for automobile structural components[J]. Corrosion Science, 2008, 50: 404-410.
- [6] Wang J, Uggowitzer P J, Magdowski R, et al. Nickel-free duplex stainless steels [J]. Scripta Materialia, 1998, 40:123-129.
- [7] 梁成浩,张继德. 磷、硅、锰和铜对高纯 18Cr-14Ni 不锈钢在氯 化物介质中抗孔蚀性能的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995,(10):336-340.
- [8] 赵祥娟,李钧,马正欢,等. 高锰氮 Cr25 超级双相不锈钢热加 工工艺研究[J]. 上海金属,2011,33(6):28-31.

(2) 在用 JMatPro 软件模拟 TTT 曲线中可知在 奥氏体化后的冷却过程中,最早析出铁素体的转变 温度为 827.6℃,其含量为 0.1%。珠光体的转变温度 为 712.3℃,转变量根据不同的过冷度又相差较大; 贝氏体的转变温度为 626.2℃,与珠光体相似,转变 量根据不同的过冷度又相差较大;马氏体转变起始 温度为 426.4℃。

(3) 将试验与 JMatPro 软件模拟测定的 TTT 曲 线进行了综合分析,验证了 JMatPro 模拟计算预测 的准确性,可运用 JMatPro 准确模拟 TTT 曲线,为 制定热处理制度及生产工艺提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张拓燕,杨军,邓瑞刚.贝氏体非调质钢的研究现状与应用
  [J]. 热加工工艺,2011,40(8):50-53.
- [2] 张建国,敬雄刚. U75V 钢轨 TTT 曲线、CCT 曲线及感应热处 理的显微组织分析[J]. 热加工工艺,2010,39(8):96-99. 🖸