

应用 JMatPro 软件对重载齿轮用钢 17CrNiMo6 的分析

Analysis of 17CrNiMo6 Steel for Overloaded Gear Using JMatPro Software

供稿|李超群¹, 赵千水¹, 张凯伦² / LI Chaoqun¹, ZHAO Qianshui¹, ZHANG Kailun²

内容导读

利用金属材料相图与性能计算软件 JMatPro 对重载齿轮用钢 17CrNiMo6 进行分析。对比淬透性指数, 计算值与检测值比较接近, 有很高的参考价值。用软件计算得到合金室温下的平衡相组成、过冷奥氏体等温转变曲线 (TTT 曲线)、过冷奥氏体连续转变曲线 (CCT 曲线) 以及奥氏体化加热过程中描述时间、温度和奥氏体化程度的 TTA 图。计算结果显示该成分 17CrNiMo6 钢液相线温度为 1509.5 °C, 当温度低于该温度时高温铁素体开始析出, 当温度低于 1492.7 °C 时, 开始析出奥氏体, 当温度降至固相线温度 1470.9 °C 后, 合金完全转变为奥氏体, 当温度降至 796.7 °C 后奥氏体减少, 铁素体开始析出。当温度降至 700.3 °C 时奥氏体全部传化为铁素体。

重载齿轮是指用在传递更大动力和承受更大负荷的齿轮, 一般用于运输、起重、机车牵引以及风力发电等重要场合。材料一般采用低碳合金钢并经渗碳处理, 高温淬火+低温回火等热处理, 使得表层具有较高的硬度、耐磨性的同时, 心部具有较高的塑性和韧性^[1]。17CrNiMo6 钢是德国牌号, 此钢种因其高韧性、高强度及高淬透性等特点而得到广泛应用, 但许多基本性能资料缺乏^[2]。本文使用 JMatPro 软件结合生产检测对 17CrNiMo6 钢的基本性能进行研究探讨。

JMatPro 软件是英国 Thermotech 公司设计开发的金属材料计算分析模拟软件, 可用来计算合金材

料的平衡相组成, 并以此为基础预测材料的各项性能。JMatPro 具备快速、准确的计算能力, 采用功能强大而精确的热力学数据和热力学模型作为核心技术和计算基础, 所采用的物理模型都得到了大量验证, 确保材料性能计算的准确性^[3]。JMatPro 软件将繁琐深奥的热力学分析程序化, 近年来 JMatPro 软件在国内金属材料研究方面的应用逐渐增多^[4-6], 软件的预测精度得到广泛认可^[7-9]。

研究对象及方法

试验研究的钢种生产工艺为电炉 (LF) 冶炼→炉外 (VD) 精炼→3.16 t 钢锭→加热→轧制→缓

冷→退火→超声波探伤→检验。选用的 17CrNiMo6 钢材主要成分组成如表 1 所示。

试验按照 GB/T 6394—2017 标准检验奥氏体晶粒度级别为 7 级。按照 GB/T 225—2006 标准检测末端淬透性指数为 J43-5, J39-11, J34-25, J30-40,

热处理工艺为 880 °C 正火, 870 °C 淬火。

应用 JMatPro 软件首先计算该 17CrNiMo6 钢的末端淬透性曲线, 从而判断 JMatPro 软件在 17CrNiMo6 钢材上的适用性情况。得到确认后再应用软件计算 17CrNiMo6 钢材的其他性能。

表 1 17CrNiMo6 钢的化学成分 (质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Alt	V	Ti	W
0.165	0.26	0.47	0.008	0.003	1.46	1.42	0.29	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01

分析与讨论

末端淬透性对比分析

试样淬火前经 880 °C 保温 1500 s 后正火, 通过 JMatPro 软件确定晶粒度应为 ASTM 标准的 8.4 级。将晶粒度 8.4 级、淬火温度 870 °C 及表 1 中成分输入 JMatPro 软件计算出末端淬火试样硬度、抗拉强度、屈服强度随淬火端距离的变化趋势, 结果如图 1 所示。其中计算的末端淬透性指数为 J43.24-5, J39.77-11, J35.76-25, J34.17-40。与检验结果相比, 距离淬火端面 40 mm 处的硬度值相差 HRC 4.17, 其余 3 处最大相差 HRC 1.76, 计算值与检测值比较接近, 具有较强的对应性。

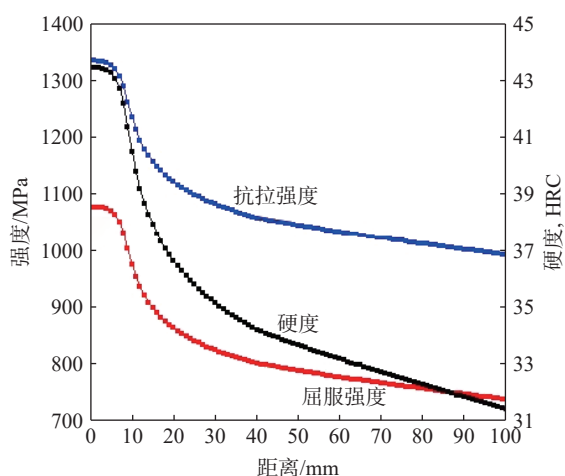


图 1 不同淬火端距离的力学性能

平衡态相组成分析

将表 1 中成分输入 JMatPro 软件计算出平衡态主要相组成随温度变化情况如图 2 所示。

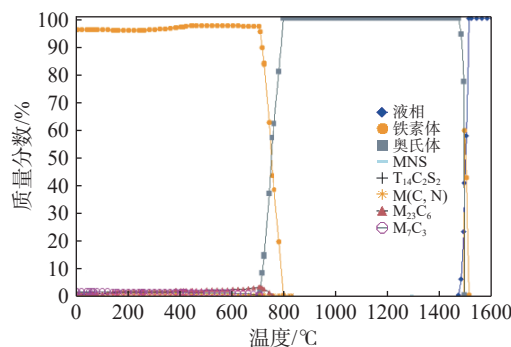


图 2 17CrNiMo6 钢不同温度下的平衡相组成

计算结果显示该 17CrNiMo6 钢液相线温度为 1509.5 °C, 当温度低于该温度时, 高温铁素体开始析出; 当温度低于 1492.7 °C 时, 开始析出奥氏体; 当温度降至固相线温度 1470.9 °C 后, 合金完全转变为奥氏体; 当温度降至 796.7 °C 后, 奥氏体减少, 铁素体开始析出; 当温度降至 700.3 °C 时, 奥氏体全部转化为铁素体; 室温 (25 °C) 时的平衡相组成主要为 95.54% F (铁素体) + 1.26% $M_{23}C_6$ (复杂立方点阵结构碳化物) + 1.06% M_7C_3 (复杂六方点阵结构碳化物) 等。各平衡相的元素组成如表 2 所示。

合金的 TTT 曲线及 CCT

检测该炉 17CrNiMo6 钢晶粒度为 7 级, 将晶粒

表 2 各平衡相的元素组成 (质量分数)

平衡相	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
F	99.88	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.088	<0.01
$M_{23}C_6$	27.36	5.01		2.46			40.04	5.1	20.03
M_7C_3	0.94	9.0		0.24			89.81	<0.01	<0.01

度 7.0 级及表 1 中成分输入 JMatPro 软件计算出材料 TTT 曲线如图 3 所示。计算结果表明, 合金经奥氏体化后冷却过程中铁素体、珠光体和贝氏体可析出最高温度依次是 796.6、730.4 和 561.8 °C。其中珠光体“鼻尖”温度为 600 °C, 过冷奥氏体在 600 °C 下保温 562.9 s 开始析出珠光体, 贝氏体“鼻尖”温度为 480 °C, 过冷奥氏体在 480 °C 下保温 3.2 s 开始析出贝氏体, 马氏体开始析出温度为 390.7 °C, 奥氏体温度为 846.63 °C。

选择奥氏体化温度 850 °C、晶粒度 7.0 级及表 1 中成分计算出材料 CCT 曲线如图 4 所示。计算结果显示合金 A_3 温度 (加热时铁素体转变为奥氏体的终了线或冷却时奥氏体转变为铁素体的开始线) 为 796.6 °C, A_1 温度 (共析转变温度) 为 730.4 °C。随冷却速度提高, 析出的铁素体、珠光体逐渐降低, 析出的贝氏体、马氏体逐渐增加, 当冷却速度为 1 °C/s 是室温下组织中马氏体质量分数达为 1.91%, 当冷却速度达到 30 °C/s 时室温下组织中马氏体质量分数达到 99.44%, 接近全马氏体组织。各冷却速度下钢材的相组成和力学性能计算结果如表 3 所示。

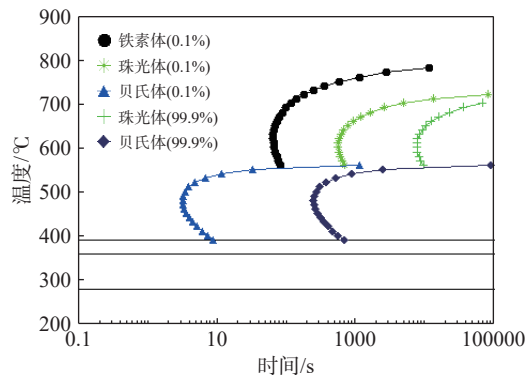


图 3 17CrNiMo6 钢的 TTT 曲线

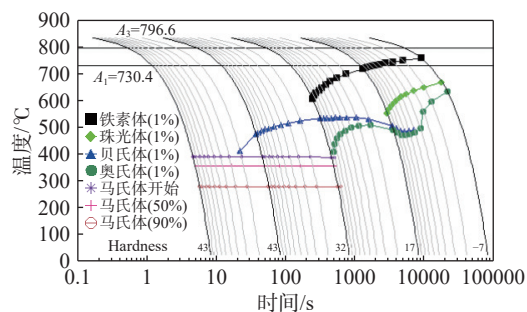


图 4 17CrNiMo6 钢的 CCT 曲线

表 3 各冷却速度下钢材的相组成和力学性能

冷却速度/(°C/s)	合金相组成 (质量分数) /%					硬度, HRC	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
	A	F	P	B	M			
0.01		64.77	35.23				297.0	464.8
0.10		56.86	1.80	41.34			501.9	726.5
1.00		2.89		95.19	1.91	31.6	741.8	996.3
10.00	0.050	0.04		6.77	93.14	42.8	1053.1	1310.8
30.00	0.053			0.50	99.44	43.4	1075.9	1332.8

注: A为奥氏体, F为铁素体, P为珠光体, B为贝氏体, M为马氏体。

TTA 图

TTA 图对于合金加热过程中的参数设计具有重要的指导意义^[10]。输入表 1 中合金成分, 选择细晶粒度计算出合金 TTA 图如图 5 所示。随着加热速度的提升, 钢材的 A_1 温度、 A_3 温度及奥氏体均匀化温度均升高。当加热速度低于 40 °C/s 时 A_3 温度为 796 °C, 当加热速度低于 10 °C/s 时 A_1 温度为 730 °C。部分加热速度下的 A_1 温度、 A_3 温度、奥氏体均匀化温度及奥氏体均匀后所需时间如表 4 所示。

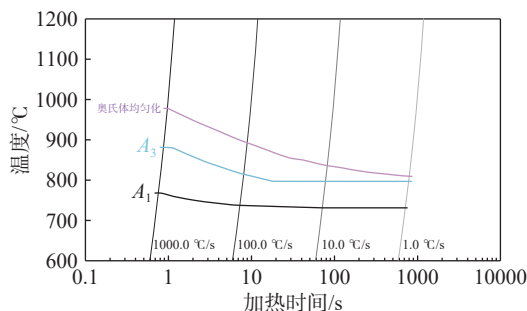


图 5 17CrNiMo6 钢的 TTA 图

表 4 不同加热速度下的奥氏体化参数

加热速度/(°C/s)	$A_1/^\circ\text{C}$	$A_3/^\circ\text{C}$	奥氏体均匀化温度/ $^\circ\text{C}$	奥氏体均匀化时间/s
1	730	796	809	789.00
10	730	796	835	81.50
30	732	796	856	27.87
50	734	801	869	16.98

结论

1) JMatPro 软件计算出的末端淬透性指数结果同 17CrNiMo6 钢生产检测结果比较接近, 有很高的参考价值。

2) 设计的 17CrNiMo6 钢室温 (25 °C) 时的平衡相组成主要为 95.54% F+1.26% M_{23}C_6 +1.06% M_7C_3 等。

3) 设计的 17CrNiMo6 钢存在两个“鼻尖”温度, 珠光体“鼻尖”温度为 600 °C, 过冷奥氏体在该温度下保温 562.9 s 开始析出珠光体, 贝氏体“鼻尖”温度为 480 °C, 过冷奥氏体在该温度下保温 3.2 s 开始析出贝氏体, 马氏体开始析出温度为 390.7 °C, 当冷却速度达到 30 °C/s 时室温下组织中马氏体质量分数达到 99.44%, 几乎为全马氏体组织。

4) 设计的 17CrNiMo6 钢随着加热速度的增加, 合金的 A_1 温度、 A_3 温度、奥氏体均匀化温度均升高。当加热速度低于 40 °C/s 时 A_3 温度为 796 °C, 当加热速度低于 10 °C/s 时 A_1 温度为 730 °C。

参考文献

- [1] 刘园园, 黄兴无. 大模数齿轮用钢及热处理. 机械, 2004, 37(S1): 147
- [2] 王爱香, 高金柱, 顾敏. 新型高合金齿轮渗碳钢 17CrNiMo6 的热处理. 金属热处理, 2010, 35(10): 82
- [3] 中仿科技. 金属材料相图及物理性能计算软件 JMatPro V6.1 简介. CAD/CAM 与制造业信息化, 2012(10): 35
- [4] 蔺虹宾, 吴代建, 彭显平. 利用 JMatPro 软件对低合金耐磨钢热处理参数的计算. 热加工工艺, 2015, 44(4): 7
- [5] 李明, 侯勇, 张玉红. JMatPro 辅助的 25Cr2Ni2MoV 钢焊接性分析试验. 热加工工艺, 2016, 45(15): 229
- [6] 盛伟, 陈天运, 李志, 等. 基于 JMatPro 软件的超高强度钢强度设计. 金属热处理, 2017, 42(6): 157
- [7] 宋雯雯, 闵永安, 吴晓春. H13 钢中的碳化物分析及其演变规律研究. 材料热处理学报, 2009, 30(5): 122
- [8] 程剑, 余驰斌, 叶传龙, 等. 试验测定和软件模拟绘制 22A 的 TTT 曲线. 热加工工艺, 2013, 42(2): 60
- [9] 乔梁. 经验模型和 JMatPro 软件计算马氏体开始转变温度的研究. 热加工工艺, 2017, 46(8): 94
- [10] 王学前, 陈治娟. TTA 图对淬火加热工艺的指导作用. 机械工艺师, 1983(9): 37

作者简介: 李超群 (1991—), 2013 年毕业于长安大学材料成型及控制工程专业。现在本钢板材股份有限公司产品研发院特殊钢研究所从事汽车用钢产品质量及产品研发工作, 工程师, 研究员。通信地址: 辽宁省本溪市明山区环山路 36 号; E-mail: 15041419178@163.com。