

2024年 第60卷 4

Q690D 高强度钢的动态连续冷却转变曲线

鹿超超,孙雪娇,方金林

(山东钢铁股份有限公司,济南 271104)

摘 要:在热模拟试验机上对 Q690D 高强度钢进行不同冷却速率的热模拟试验,绘制动态连续 冷却转变曲线,用光学显微镜观察该钢的显微组织,用维氏硬度计测试其维氏硬度。结果表明:当 冷却速率小于 0.1 ℃/s 时,Q690D 高强度钢的组织基本为珠光体、铁素体和少量贝氏体;当冷却速 率为 0.5 ℃/s 时,珠光体消失,组织全部为贝氏体;当冷却速率为 3 ℃/s 时,组织中出现马氏体;当 冷却速率增大至 8 ℃/s 时,贝氏体几乎全部消失,基体组织基本为马氏体;当冷却速率大于 10 ℃/s 时,组织全部为马氏体,得到马氏体临界转变冷却速率为 10 ℃/s。

关键词:Q690D 高强度钢;连续冷却转变曲线;热模拟;显微组织 中图分类号:TG142.1;TB31 文献标志码:A 文章编号:1001-4012(2024)04-0012-05

Dynamic continuous cooling transformation curve of Q690D high strength steel

LU Chaochao, SUN Xuejiao, FANG Jinlin

(Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Ji'nan 271104, China)

Abstract: The thermal simulation test of Q690D high strength steel with different cooling rates was carried out on the thermal simulation testing machine, and the dynamic continuous cooling transformation curve was drawn. The microstructure of the steel was observed by microscope, and the Vickers hardness was tested by Vickers hardness tester. The results show that when the cooling rate was less than 0.1 C/s, the microstructure of Q690D high strength steel was basically pearlite, ferrite and a small amount of bainite. When the cooling rate was 0.5 C/s, the pearlite disappeared and the microstructure was all bainite. When the cooling rate was 3 C/s, martensite appeared in the microstructure. When the cooling rate increased to 8 C/s, the bainite almost disappeared, and the matrix structure was basically martensite. When the cooling rate was greater than 10 C/s, the microstructure was all martensite, and the critical transformation cooling rate of martensite was 10 C/s.

Keywords: Q690D high strength steel; continuous cooling transition curve; thermal simulation; microstructure

低合金高强度钢的综合性能优于传统碳锰钢, 近年来已成为钢铁领域的研究热点之一。在实际生 产中,690 MPa级高强度钢的工艺控制难度较大, 特别较难控制其低温韧性的稳定性,影响该性能最 重要的因素是材料的显微组织。为了控制成本,根 据该钢种的规格、客户要求等采取热机械控制工艺 (TMCP)、在线淬火+回火、离线淬火+回火等不同 工艺,对其连续冷却转变(CCT)规律进行研究,以确 保产品性能稳定,CCT 曲线是进行该研究的重要依 据^[1]。对各类金属材料 CCT 曲线研究已有大量的 报道,如:刘莹等^[2]研究了 45 钢的热模拟试验;周光 理等^[3]分析了 42CrMo 合金钢棒材的硬度及显微组 织;王瑞敏等^[4]研究了 R350HT 钢轨钢的 CCT 曲 线;李凯等^[5]分析了 42CrMo 钢的 CCT 曲线;陈明 毅等^[6]研究了一种高强无碳贝氏体非调质钢的过冷 奥氏体动态 CCT 曲线;葛琛等^[7]分析了 900 MPa 级高强钢的连续冷却转变及组织调控;周文浩^[8]对 Q690 钢的 3 种奥氏体状态下的连续冷却转变行为 进行了比较研究;李敬等^[9]研究了厚规格 690 高强 钢板的连续冷却转变行为。笔者利用热模拟试验 机、维氏硬度计、光学显微镜等对 Q690D 高强度钢

收稿日期:2023-04-24

作者简介:鹿超超(1994一),女,硕士,主要从事钢铁产品研发、 组织观察和性能检测等工作,18363441101@163.com

▶ 理化检验-物理分册

的动态 CCT 曲线进行了研究^[10-11]。

1 试验材料及方法

试验用材料为 Q690D 钢板,其化学成分如表 1 所示。按照 CCT 要求制备试样,试样结构如图 1 所 示。在热模拟试验机上对试样进行动态 CCT 试验。 以 10 ℃/s 的升温速率将试样加热到 1 200 ℃,保温 3 min, 接着以 5 ℃/s 的冷却速率将试样冷却至 910 ℃,保温 30 s;然后以 6 s⁻¹ 的应变速率进行 20%的单道次压缩,最后分别在 0.01,0.02,0.05, 0.1,0.25,0.5,1,2,5,8,10,15,20,30,40 ℃/s 等冷 却速率下将试样冷却到室温[12-14]。在试验过程中, 检测并记录试验过程中试样的直径变化。试验结束 后,用 Origin 软件和切线法测定其相变点。在加热 过程中,用上述方法测得试样组织向奥氏体转变的 开始温度 A_d 为 780 ℃,奥氏体转变的终了温度 A. 为885 ℃^[15]。对热模拟试验后不同冷却速率下 的试样进行机械加工和镶嵌,对试样研磨抛光后,使 用4%(体积分数)的硝酸乙醇溶液对试样进行 腐蚀[16-17]。使用德国蔡司光学显微镜观察试样的 显微组织,结合德国全自动维氏硬度计测量硬度,绘制出材料的动态 CCT 曲线。

表 1 试验用 Q690D 钢板的化学成分							0⁄0
项目	质量分数						
	С	Si	Mn	Р	S	Cr+Mo	Nb+Ti
实测值	0.15	0.22	1.40	0.02	0.007	0.61	0.044
-		1 图	<u>15</u> 79 式验钢的	45°	<u>30</u> 试样结相		$\phi 10\pm0.02$

2 试验结果及分析

2.1 不同冷却速率下试样的显微组织

不同冷却速率下试样的显微组织形貌如图 2 所示。由图 2 可知:当冷却速率为 0.01 ℃/s 时,组织 基本为典型的珠光体+铁素体,但是仍有小部分区



图 2 不同冷却速率下试样的显微组织形貌

域存在珠光体和贝氏体的混合组织;随着冷却速率 的增大,珠光体含量越来越少,贝氏体含量越来越 多;当冷却速率为0.1℃/s时,仅存在少量珠光体; 当冷却速率达到0.5℃/s时,全部为贝氏体;当冷却 速率为3℃/s时,开始出现少量的马氏体,随着冷 却速率的进一步增大,马氏体含量逐渐增多;当冷却 速率达到8℃/s时,贝氏体几乎消失,整个基体组 织基本为马氏体;当冷却速率增大到10℃/s以上 时,组织全部为马氏体。

2.2 不同冷却速率下试样的维氏硬度

图 3 为不同冷却速率下试样的维氏硬度曲线。 由图 3 可知:当冷却速率小于 0.1 ℃/s 时,组织以珠 光体和铁素体为主,试样的维氏硬度较低,为 171~ 250 HV;当冷却速率为 3 ℃/s 时,维氏硬度为 290 HV,组织基本为贝氏体;当冷却速率为 8 ℃/s 时,马氏体使试样的维氏硬度升高至 378 HV;当冷 却速率大于 10 ℃/s 时,组织全部为马氏体,维氏硬 度均大于 396 HV。



图 3 不同冷却速率下试样的维氏硬度曲线

2.3 奥氏体化过程 CCT 曲线

将试样的温度以 10 ℃/s 的升温速率从室温加 热到 1 200 ℃,在此过程中,试样在经过 A_d 点 (780 ℃)并出现相变平台后开始奥氏体化,随后达 到 A_a 点(885 ℃),之后进入完全奥氏体化状态,至 此加热过程的相变点结束,试样的奥氏体化过程曲 线如图 4 所示。

试样经过降温以及形变后,再对其冷却速率进 行控制,得到不同冷却速率下的连续冷却转变曲线。 图 5 为试样在 0.01~20 ℃/s 冷却速率下的热膨胀 曲线。由图 5 可知:当冷却速率小于 0.1 ℃/s 时,在 出现明显高温相变拐点前,曲线出现弯曲部分,用切 线法取点,对显微组织进行综合判断,该相变温度应 为先共析铁素体的相变开始点;当冷却速率为 0.01,0.02 ℃/s 时,珠光体、铁素体相变开始点基本 为 770 ℃,随着冷却速率的逐步增大,相变点呈下降 14



图 4 试样的奥氏体化过程曲线

趋势,当冷却速率达到 0.1 ℃/s 时,相变点下降到 711 ℃。由于 Mn、Cr 元素含量较高,该钢种的淬透 性升高,因此该冷却阶段仍然存在中温相变,即贝氏 体相变。由冷却速率为 0.01,0.02 ℃/s 时的曲线可 知,高温相变区的结束点与中温相变区的开始点相 对明显分离,而冷却速率为 0.05,0.1 ℃/s 时,上述 两个相变点分界线已经不明显,很难区分。随着冷 却速率的增大,贝氏体相变结束点逐步降低,由 0.01 ℃/s 时的 430 ℃下降到 0.1 ℃/s 时的 380 ℃。 当冷却速率增大到 0.5 ℃/s 时,高温相变拐点消失, 全部为中温相变,即全是贝氏体相变,此时贝氏体相 变开始温度为 615 ℃,终止温度为 415 ℃,相对较 高。当冷却速率增大到3℃/s时,贝氏体的开始相 变温度下降到 588 ℃,结束温度下降到 390 ℃,在该 冷却速率下,根据得到的显微组织综合判断,该相变 终了温度应为 M_f 点。从冷却速率为 8 ℃/s 开始, 全部为马氏体相变,相变开始温度约为450℃,结束 温度约为 307 ℃。

2.4 动态 CCT 曲线的绘制

结合显微组织以及不同冷却速率下的热膨胀曲 线,最终得出 Q690D 钢的动态 CCT 曲线,如图 6 所 示^[18]。由图 6 可知:冷却速率低于 0.1 ℃/s 时,发 生了先共析铁素体析出的相变现象,但是即使冷却 速率低到 0.01 ℃/s,该相变过程也是高温相变与中 温相变的复合,包含了先共析铁素体相变、珠光体相 变以及贝氏体相变 3 个过程,得到的组织为铁素体、 珠光体以及贝氏体;同时,在冷却速率为 0.02~ 0.25 ℃/s时,珠光体相变与贝氏体相变在膨胀曲线 中没有明显界线;在冷却速率为 0.25~2 ℃/s 时,发 生贝氏体中温转变,得到的是单一的贝氏体;在冷却 速率为 2 ℃/s 时,随着冷却速率的增大,开始发生 贝氏体中温转变与马氏体低温转变的复合相变,此 时得到的显微组织为贝氏体与马氏体的混合组织; 当冷却速率达到 8 ℃/s时,该现象消失,开始发生







俚化检验-物理分册

马氏体低温转变的单一现象,材料组织也只有单一 的马氏体。

3 结论

(1) 在冷却速率为 0.01~ 0.1 ℃/s 时,组织基本为珠光体、铁素体和贝氏体,其硬度较低。

(2) 当冷却速率为 0.5 ℃/s 时,珠光体消失,全 部为贝氏体。

(3) 当冷却速率为 3 ℃/s 时,组织中出现马氏

体,当冷却速率增大至8℃/s时,贝氏体几乎全部 消失,组织基本为马氏体,维氏硬度提高到 378 HV。

(4)当冷却速率大于10℃/s时,组织为单一马 氏体,马氏体临界转变冷却速率为10℃/s。

参考文献:

- [1] 李硕,方光锦,汪青芳,等. 23MnNiMoCr54 钢的热变 形行为[J].金属热处理,2021,46(5):127-132.
- [2] 刘莹,骆春民.45 钢控轧控冷工艺模拟试验[J].理化 检验(物理分册),2022,58(12):1-3.
- [3] 周光理,张小康,丁敬,等.42CrMo 合金钢棒材硬度
 及显微组织控制[J].理化检验(物理分册),2021,57
 (8):15-20.
- [4] 王瑞敏,刘曼,周剑华,等. R350HT 钢轨钢的连续冷 却转变曲线[J].金属热处理,2022,47(9):153-157.
- [5] 李凯,胡建文,石少坤.42CrMo钢连续冷却转变曲线 的测定与分析[J].金属热处理,2020,45(9):237-240.
- [6] 陈明毅,杨占兵,陈曦,等.一种高强无碳贝氏体非调 质钢的过冷奥氏体动态连续冷却转变曲线[J].金属 热处理,2018,43(11):11-15.
- [7] 葛琛,赵洪山,郑磊,等.900 MPa级高强钢的连续冷 却转变及组织调控分析[J].钢铁,2023,58(3):128-134.
- [8] 周文浩.高强度桥梁钢 Q690q 的连续冷却转变行为

(上接第 11 页)

3 结果与讨论

(1)表1数据显示3台千斤顶单独校准时,重 复性最大值为1.5%;表2数据显示回归值与校准值 之间误差的最大值为1.5%,但能满足A级千斤顶 2%的要求。

(2)考虑油缸与活塞间密封圈摩擦力的影响, 发现千斤顶校准结果的重复性与误差在小力值时受 到的影响较大,且其中有示值相对分辨力的作用。 表3中千斤顶并联回归值与并联校准值之间的误差 明显优于单独使用千斤顶时产生的回归值与校准值 之间的误差。

(3)通过对试验数据的分析,可以确定千斤顶 回归方程的回归值与校准值之间产生的误差只要控 制在符合规程要求等级的技术指标内,其并联负载 力必定会被控制在千斤顶准确度等级的技术指标 内,且使用效果会较千斤顶单独使用效果更佳,因多 [J]. 金属热处理,2022,47(9):202-208.

- [9] 李敬,刘辰,杨跃辉,等. 厚规格 Q690D 高强钢板的连 续冷却转变行为[J]. 金属热处理,2022,47(9):171-174.
- [10] 王培文,赵新华,王中学,等. 屈服强度 600 MPa 级及 以上热轧带肋钢筋国内外标准综述[J]. 轧钢,2019, 36(5):63-66.
- [11] 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.
- [12] 亓福川,黄治东. 低锰钛微合金化 Q355B 钢奥氏体连 续转变曲线测定研究[J]. 山东冶金,2021,43(3):46-48.
- [13] 刘观献,陈亮,葛亮,等. 屈服强度 500 MPa级高强度 高韧性耐候钢的研制[J]. 现代交通与冶金材料, 2021,1(6):70-75.
- [14] 李伟. 72A 静态 CCT 曲线的测定与分析[J]. 河北冶 金,2020(3):72-75.
- [15] 朱康峰,周一帆,尤学文,等. 三种热处理工艺对低合 金耐磨钢组织和磨损性能的影响[J]. 材料热处理学 报,2021,42(10):108-115.
- [16] 江畅,王子波,王杨,等. 冷作硬化非调质钢的连续冷却相变规律[J]. 钢铁,2022,57(3):91-96.
- [17] 罗永恒,何涛. X70级管线钢控轧控冷工艺开发与应 用实践[J]. 宽厚板,2022,28(3):23-25.
- [18] 王庆敏,刘应心,刘鑫.变形工艺对 Q345GJC 高建钢 连续冷却相变的影响[J].河北冶金,2020(4):22-26.

台千斤顶并联相当于一个液压缓冲器,不仅降低了 压强的波动性,还明显减弱了摩擦力对并联负载力 的影响。

(4) 需要注意在实际应用过程中,必须保证并 联千斤顶受力框架的强度和刚度满足 JJG 621— 2012 中第 7.1.2 节的要求。

参考文献:

- [1] 何玮山.并联千斤顶组锚杆抗拔试验方法研究及其应 用[J].广东土木与建筑,2018,25(5):40-42.
- [2] 倪守忠,李海根.多油缸超大力值叠加式力标准机的 设计方案[J].船舶工程,2012(增刊1):3.
- [3] 何金木. 一种高精度液压千斤顶检定装置的研究[J]. 科技资讯, 2014(35):1.
- [4] 乔红光,李国利. 液压千斤顶校准曲线的建立与检定 或校准结果的质量控制[J]. 中国计量,2021(10): 25.