

# 大厚度 Q690 钢板冲击功波动原因分析

李智丽, 刘洪霞, 靳燕, 白雅琼, 寇沙沙

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 文章针对 80 mm 大厚度规格 Q690 钢板冲击功波动情况进行了分析, 在实验室开展了钢板厚度不同位置试样的低温冲击试验, 并利用扫描电镜和金相显微镜对钢板厚度不同位置冲击试验的断口及显微组织进行了对比分析。钢板厚度不同位置的冲击功差异较大, 从心部的 14.9 J, 到四分之一部位的 27.2 J 再到近表面的 95.4 J, 对应的显微组织心部为粗大的回火贝氏体加少量具有马氏体位向的回火索氏体组织, 四分之一部位为具有马氏体位向的回火索氏体加回火贝氏体组织, 近表面部位为细小的具有马氏体位向的回火索氏体组织。分析结果表明, 冲击功波动的主要原因是显微组织和晶粒度的差异, 试验表明显微组织中的贝氏体比例越高、晶粒越大则对应的冲击功越低。结合 Q690 钢的 CCT 曲线, 分析判断由于 Q690 钢板厚度规格较大, 在淬火过程中的冷却不充分导致钢板的四分之一部位至心部的冷却速度不够, 淬火后不能获得全部的马氏体组织, 板厚度方向的显微组织不均匀, 特别是在板厚的四分之一部位和心部出现不同比例的贝氏体组织, 因此导致冲击功波动。通过优化现场的调质工艺, 大厚度规格 Q690 钢板的显微组织均匀性得到改善, 使冲击功及其稳定性得到了提高。

**关键词:** Q690 钢板; 冲击功; 显微组织; CCT 曲线

中图分类号: TG142.1; TG335

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)04-0085-04

## Cause Analysis on Fluctuation of Impact Energy for Q690 Steel Plate with Large Thickness

Li Zhi-li, Liu Hong-xia, Jin Yan, Bai Ya-qiong, Kou Sha-sha

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this paper, the fluctuation of impact energy for Q690 steel plate with large thickness of 80 mm are analyzed. The low temperature impact tests of samples taken from different positions of plate thickness are carried out as well as their fracture and microstructure are compared and analyzed with scanning electron microscopy and metallographic microscope. The differences of impact energy at different positions of plate thickness are great, which are 14.9 J in the center, 27.2 J at the quarter part and 95.4 J near the surface. The corresponding microstructures are coarse tempered bainite and a small amount of tempered sorbite structure with orientation of martensite in the center, tempered sorbite and bainite structures with orientation of martensite at the quarter part as well as fine tempered sorbite structure with orientation of martensite near the surface. The analysis results showed that the main cause for fluctuation of impact energy was the differences of microstructure and grain size. The experiment showed that the higher the proportion of bainite in microstructure, the larger the grain size and the lower the corresponding impact energy. Based on the CCT (continuous cooling transformation) curves of Q690 steel, it is analyzed and judged that insufficient cooling during quenching process causes insufficient cooling speed

收稿日期: 2024-06-01

作者简介: 李智丽 (1971-), 女, 辽宁省盘锦市人, 硕士, 正高级工程师, 现从事金属材料热处理及失效分析工作。

from the quarter part to the center of steel plate due to the larger thickness specification of Q690 steel plate so that the whole martensitic structure could not be obtained after quenching, microstructure in the direction of plate thickness is uneven, especially different proportions of bainite structure appear at the quarter part and in the center of plate thickness, which cause the fluctuation of impact energy. The uniformity of microstructure for Q690 steel plate with large thickness specification is improved so that the impact energy and its stability are improved by optimizing on-site quenching and tempering process.

**Key words:** Q690 steel plate; impact energy; microstructure; CCT curve

随着国内大型工程的蓬勃发展, Q690 高强钢在工程机械、矿山开采、起重矿车、海洋平台等方面得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。由于工程机械用钢是在露天作业、载重、往复循环式变形、低温等等复杂环境下使用, 尤其还要服役于极寒环境下, 因此要求所使用的钢材原料除具备一般要求的力学性能指标外, 还需具备良好的低温韧性, 即  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度下的冲击功不小于  $47\text{ J}$ <sup>[2]</sup>。通常钢板厚度小于  $40\text{ mm}$  的高强钢采用 TMCP 工艺生产, 厚度大于  $40\text{ mm}$  的则采用 TMCP + 回火工艺或者调质工艺生产<sup>[3]</sup>。由于厚度大、强度高, 压缩比又受到限制, 通过 TMCP 工艺来调节组织、性能受到一定限制, 即使是调质状态交货的大厚度规格的高强钢也容易出现低温冲击韧性不合的现象。某钢厂生产的调质态  $80\text{ mm}$  大厚度规格 Q690 钢板, 按照用户使用要求在钢板厚度的四分之一部位取样做纵向冲击试验时, 出现了冲击功波动较大, 有不合格的情况, 本文针对该情况开展了

试验研究及检测分析。

## 1 试验材料与方法

试验材料选取某厂生产的厚度为  $80\text{ mm}$  的 Q690 调质钢板, 其化学成分如表 1 所示, 符合 GB/T 16270—2009《高强度结构用调质钢板》。试验钢的生产工艺流程为: 铁水预处理→ $210\text{ t}$  顶底复吹转炉冶炼→LF 炉精炼→RH 真空脱气→板坯连铸→下线缓冷→板坯再加热→高压水除鳞→粗轧→精轧→ACC 冷却→矫直→空冷→调质→探伤→入库。

在  $80\text{ mm}$  厚 Q690 钢板厚度的不同位置取纵向冲击试样, 见图 1。将冲击试样加工成  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ , 开 V 形缺口, 并在 NI750 冲击试验机上进行  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冲击试验, 采用 SIGMA 500 型扫描电镜对冲击断口进行观察。取不同冲击试样以及全厚度的试样制成金相检测样, 在光学显微镜下观察全厚度方向不同位置的显微组织。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb + V + Ti	Al <sub>1</sub>	B
试验钢	0.13	0.43	1.65	0.013	0.008	0.29	0.28	0.26	0.13	0.26	0.002
GB/T 16270—2009	≤0.20	≤0.80	≤1.80	≤0.025	≤0.015	≤1.50	≤2.00	≤0.70	0.015~0.23	0.018~0.035	≤0.005

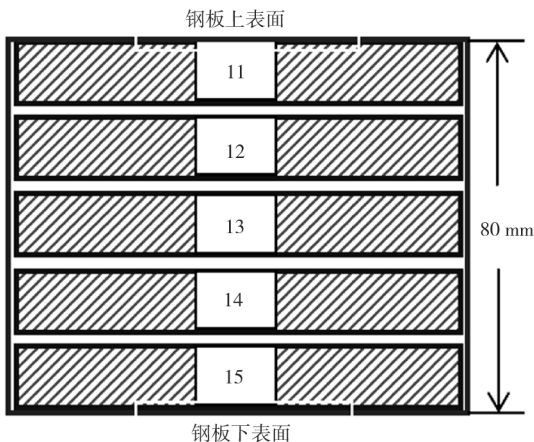


图 1 冲击试样取样位置示意图

## 2 试验结果及分析

### 2.1 厚度不同位置的冲击试验

如图 1 所示在  $80\text{ mm}$  厚 Q690 钢板厚度的不同位置取纵向冲击试样, 并在 NI750 冲击试验机上进行  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冲击试验, 冲击功见表 2。冲击功在不同取样位置的变化情况见图 2。试验钢在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冲击试验后心部的平均冲击功最低, 为  $16.8\text{ J}$ ; 上下四分之一位置的平均值分别为  $49.5\text{ J}$  和  $58.1\text{ J}$ , 虽然平均值大于  $47\text{ J}$ , 但是单个值都有不合格情况, 且波动较大。从常理来看, 调质后的试验钢其外表面部位的冲击功应该较高, 但试验结果异常, 特别是上表面的平均冲击功为  $28.6\text{ J}$ , 同样上、下表面部位的冲击功波动也较大。

表2 不同位置 -20 ℃ 纵向冲击试验结果

编号	冲击功/J			平均值
	1	2	3	
11	48.4	18.9	18.5	28.6
12	57.8	54.6	36.0	49.5
13	19.9	14.9	15.6	16.8
14	86.0	45.6	42.8	58.1
15	95.4	57.3	52.9	68.5

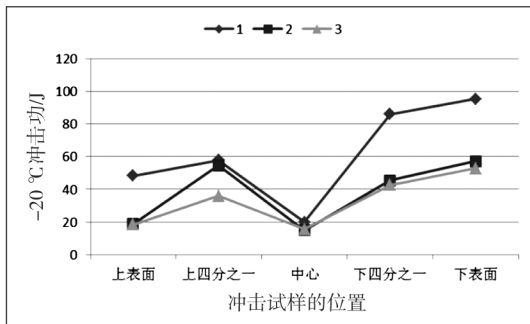


图2 板厚不同位置试样的冲击功

## 2.2 冲击断口的扫描电镜观察

对板厚不同位置试样的冲击断口进行了扫描电镜观察,在 500 倍下的断口形貌见图 3。其中图 3(a)为上表面试样的冲击断口,冲击功为 18.9 J,其断口形貌为粗大且平直的解理形貌并伴有二次裂纹;图 3(b)为上板厚四分之一部位试样的冲击断口,冲击功为 54.6 J,其断口形貌为稍弯曲的准解理形貌;图 3(c)为板心部试样的冲击断口,冲击功为 14.9 J,其断口形貌为较粗大的解理形貌;图 3(d)为下板厚四分之一试样的冲击断口,冲击功为 45.6 J,其断口形貌为准解理形貌;图 3(e)为下表面试样的冲击断口,冲击功为 57.3 J,其断口形貌为稍弯曲的准解理形貌。从断口对比来看,冲击功接近的图 3(a)和(b)断口上的解理片都具有粗大的特征,但形貌略有差异;图 3(b)、(e)的冲击功也接近,断口形貌相似;图 3(d)断口的解理片略大于图 3(b)、(e),相比较也较平直。

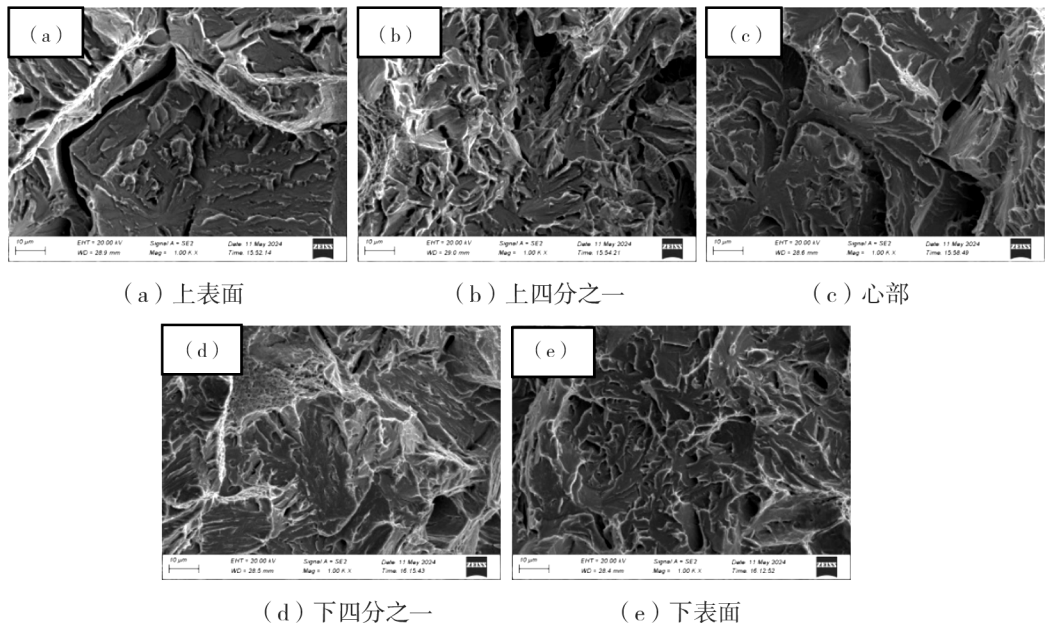


图3 板厚不同位置试样的冲击断口形貌

## 2.3 金相组织检测

为进一步分析冲击功波动的原因,分别将不同冲击功的断口试样以及板全厚度的试样制成金相样品,抛光后用 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀后在显微镜下进行金相组织分析,板厚不同位置 500 倍的显微组织见图 4。观察到板上、下半部的显微组织近似对称,大致可分为以下几个组织区域,从表面到心部依次为:从表面向内约 2 mm 厚度范围为细小的回

火马氏体组织;近表层为非常粗大的回火马氏体组织,该区域位于距表面 2 ~ 8 mm 范围,观察到不同试样该区域的范围有差异,在冲击合格的钢板试样观察不到该区域;四分之一部位为过渡区,由细小的回火马氏体组织和向内逐渐增多变粗的回火贝氏体组织构成;心部则由较粗大的回火贝氏体组织和少量回火马氏体组织构成。对不同冲击功的断口试样进行观察,对比了取样部位在钢板近表面区域的冲

冲击功高和冲击功低的试样,冲击功高的试样显微镜下观察全部为细小的回火马氏体组织,如图 4(a)所示,而冲击功低的试样显微镜下观察约有一半面积为细小的回火马氏体组织,另一半为粗大的回火马氏体组织,如图 4(a)和(b)所示;对比了取样部位在板厚四分之一部位的冲击试样的断口显微组织,其显微组织为回火马氏体组织加回火贝氏体组织,

如图 4(c)和(d),观察到随着显微组织中回火贝氏体组织的增多,对应的冲击功降低;心部冲击试样的冲击功较低,其断口显微组织与图 4(e)相似,为粗大的贝氏体加少量回火马氏体组织。显微组织分析结果表明,冲击功与对应的显微组织以及晶粒大小密切相关,粗大的回火马氏体组织以及增多的回火贝氏体组织比例都使低温冲击功降低。

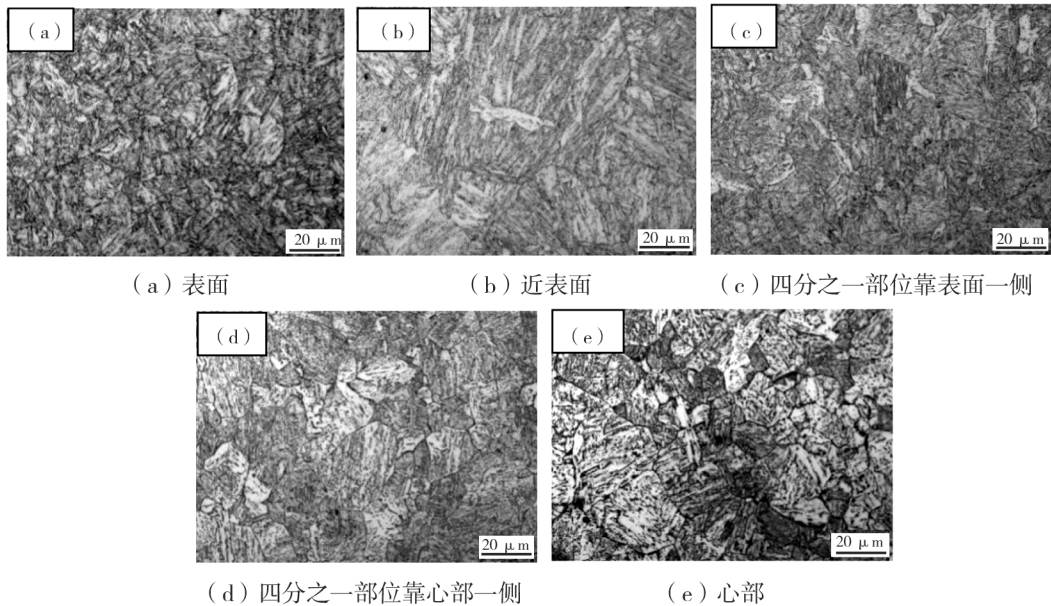


图 4 板厚不同位置试样的冲击断口形貌

## 2.4 冲击功波动原因分析

通过对 80 mm 大厚度规格钢板进行的冲击试验及显微组织分析,说明了冲击功的波动是显微组织状态引起的,而从该钢板的生产工艺分析,显微组织状态则是受到调质热处理的淬火工艺和回火工艺两方面的控制。首先分析钢板的淬火工艺,从钢板厚度四分之一位置的显微组织为回火马氏体 + 回火贝氏体组织来看,说明钢板在淬火时至少在钢板的四分之一部位没有完全淬透。调取该 Q690 钢的 CCT 曲线测试结果,  $A_{c1} = 686\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3} = 862\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $M_s = 453\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在冷速大于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时生成马氏体组织;冷速在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  到  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  之间,生成马氏体 + 少量贝氏体组织;冷速在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  到  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  范围内得到贝氏体组织 + 少量马氏体组织;冷速小于  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,组织中则会出现铁素体 + 珠光体组织<sup>[4]</sup>。该钢种的淬火温度应该在  $910\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,保证钢板加热能够完全奥氏体化<sup>[5-6]</sup>,同时现场生产时适当降低淬火辊速,增加钢板在淬火过程中的热交换能力,

防止钢板返温区温度过高,有利于促进钢板四分之一部位的马氏体转变。从全断面的显微组织分析,高温回火后显微组织仍然是回火马氏体组织,碳化物析出不充分,正常的显微组织应该是具有马氏体位向的回火索氏体组织,因此适当提高回火温度或延长回火时间,并采取回火后快冷避开回火脆性区等措施能够进一步提高钢板的冲击韧性<sup>[7-8]</sup>。通过优化现场的调质工艺,大厚度规格 Q690 钢板的显微组织均匀性得到改善,使冲击功及其稳定性得到了提高。

## 3 结论

(1) 钢板的冲击功波动与对应的显微组织以及晶粒大小密切相关,粗大的回火马氏体组织以及增多的回火贝氏体组织是使低温冲击功降低的主要原因。

(2) 通过优化现场的调质工艺,80 mm 大厚度规格 Q690 钢板的显微组织均匀性得到了改善,冲击功及其稳定性得到了提高。

(下转第 98 页)

(5)为申报单位及科研管理部门提供授权范围内的需求填报情况、项目申报情况、项目立项情况与实施情况、结题验收情况的统计、查询功能。

(6)研究开发与ERP系统、财务系统、协同办公系统的接口,实现科研成果技术知识存档,科研项目存档;科研费用数据归集与录入,与ERP系统科研工时联动归集;科研费用与财务系统对接。

## 5 结束语

项目开发实施完成,改变了包钢(集团)公司科研管理的方式方法,由过去人工填报、统计以及大量纸质文件流转,转变为全流程线上进行。系统覆盖了项目的申报、审核、立项、实施、验收、评审、公示、存档、展示等,还包括了相关的政策法规指南,将有

效提高包钢(集团)公司科研管理水平,促进科技发展。

## 参 考 文 献

- [1] 金虹,冯琦瑶. 科研项目管理体系创新与实践[J]. 企业管理,2020(S2):402-403.
- [2] 孟梅. 科研管理系统的设计开发[J]. 制造业自动化,2010(6):90-94.
- [3] 杨怡晨,亢军贤,白博,等. 基于B/S架构的科研管理系统的设计与实现[J]. 现代信息技术,2022,6(18):40-43.
- [4] 田竞静. 关于加强企业科研项目管理的几点思考[J]. 科技创新与生产力,2012(1):50-55.

(上接第88页)

## 参 考 文 献

- [1] 田志强,刘建磊,赵燕青,等. 大厚度低碳当量690 MPa级高强钢组织性能的研究[J]. 宽厚板,2018,24(5):1-3.
- [2] 邢天庆,耿云飞. 不同轧制温度制度对Q690D组织性能的影响[J]. 山西冶金,2023,46(7):64-66.
- [3] 刘朝霞,刘俊,孟羽,等. 淬火温度对80 mm调质690 MPa级低碳贝氏体高强钢板组织性能的影响[J]. 特殊钢,2021,42(1):77-80.
- [4] 郑建平. 淬火工艺对大厚度Q690E高强度钢板显微组织和力学性能的影响[J]. 热处理,2022,37(5):25-28,33.
- [5] 季德静,杨维宇,白雅琼. 高强韧工程机械用钢Q690D的淬火工艺优化[J]. 金属热处理,2022,47(9):108-113.
- [6] 白雅琼,李智丽,赵莉萍. Q690钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线[J]. 包钢科技,2012,38(3):39-41.
- [7] 李文亚,杨维宇,刘泽田,等. 回火温度对60 mm厚Q690D钢组织和性能的影响[J]. 包钢科技,2016,42(3):31-34.
- [8] 郑建平. 回火温度对大厚度低碳高强度Q690D钢板组织和力学性能的影响[J]. 热处理,2020,35(3):1-4.