

实验室模拟控制轧制和调质处理对桥梁钢 Q690q 组织和性能的影响

熊文娟¹ 余驰斌¹ 叶传龙¹ 薛刚¹ 肖爱达² 杨晖²

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 湖南涟源钢铁(集团)公司技术中心, 娄底 417009)

摘要 研究了 920 ℃ 精轧, 830 ℃ 终轧以 12 ℃/s 冷至 590 ℃, 空冷的 TMCP 控制轧制工艺和 TMCP + 940 ℃ 淬火 - 630 ℃ 回火两工艺的桥梁钢 Q690q (C: 0.05%, Si: 0.30%, Mn: 1.40%, Cu: 1.10%, Cr: 0.50%, Ni: 0.80%, V: 0.07%, Mo: 0.55%, 焊接冷裂纹敏感指数 $P_{cm} \leq 0.267$) 15 mm 板组织和力学性能。结果表明, TMCP 工艺生产的桥梁钢 Q690q 组织主要由粒状贝氏体和少量铁素体组成, TMCP + 调质处理后的组织为多边形铁素体和少量渗碳体, 其屈服强度 $R_{p0.2}$ 为 845 ~ 870 MPa, 抗拉强度 R_m 895 ~ 900 MPa, -20 ℃ 冲击功 153 ~ 186 J, -40 ℃ 为 141 ~ 155 J。调质处理减小了钢材的 M/A 岛尺寸和位错密度, 使 Q690q 钢保持高强度的同时也具有较好的冲击韧性。

关键词 Q690q 桥梁钢 钢板 TMCP 调质 组织 性能

Effect of Simulation Control Rolling in Laboratory and Quenching-Tempering Treatment on Structure and Properties of Bridge Steel Q690q

Xiong Wenjuan¹, Yu Chibin¹, Ye Chuanlong¹, Xue Gang¹, Xiao Aida² and Yang Hui²
(1 Institute of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;
2 Technological Center, Hunan Lianyuan Iron and Steel (Group) Co, Loudi 417009)

Abstract The structure and mechanical properties of 15 mm plate of bridge steel Q690q (C: 0.05%, Si: 0.30%, Mn: 1.40%, Cu: 1.10%, Cr: 0.50%, Ni: 0.80%, V: 0.07%, Mo: 0.55%, weld cold-cracking sensitivity index $P_{cm} \leq 0.267$) processed by both technology i. e. the thermal-mechanical control rolling process (TMCP) - finishing rolling at 920 ℃, cooling at finishing temperature 830 ℃ with 12 ℃/s to 590 ℃, air cooling, and the process of TMCP + quenching at 940 ℃, tempering at 630 ℃ have been studied. Results show that the main structure of bridge steel Q690q produced by TMCP process consists of granular bainite and minor ferrite, and the structure of steel Q690q produced by TMCP + quenching-tempering treatment is polygonal ferrite and minor cement with yield strength $R_{p0.2}$ - 845 ~ 870 MPa, tensile strength R_m - 895 ~ 900 MPa, impact energy at -20 ℃ 153 ~ 186 J, at -40 ℃ 141 ~ 155 J. Due to quenching and tempering treatment the M/A island size and the dislocation density in structure of steel products decrease thereby to get higher strength and better impact toughness of steel Q690q.

Material Index Bridge Steel Q690q, Plate, TMCP, Quenching-Tempering, Structure, Mechanical Properties

对桥梁板的性能需求主要针对桥梁钢的韧性、抗震性、耐腐蚀性等。

目前高强度的钢板生产大部分采用调质处理或 TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 回火工艺生产, 其组织和性能均能较好的满足产品要求。其中, 低碳或超低碳的成分设计, 以及结合 TMCP 技术成为了高强度钢生产的新趋势。

1 钢的化学成分和模拟轧制工艺

实验室模拟冶炼在 250 kg 真空感应炉上进行, 使用高纯工业纯铁和纯金属为原料, 熔炼出直径为 170 mm 的试验用 Q690q 钢锭, 然后加热轧制、热处理并进行力学性能分析。

实验室冶炼桥梁钢 Q690q 实际控制成分为

(%) : 0.05C、0.30Si、1.40Mn、0.010P、0.005S、1.10Cu、0.50Cr、0.80Ni、0.07V、0.55Mo、 $\leq 0.008N$ 、0.030Al。

碳当量 (CEV) 由熔炼成分来计算, 公式计算:

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

当钢的碳含量 $\leq 0.12\%$ 时, 采用焊接裂纹敏感型指数 (P_{cm}) 代替碳当量评估钢材的可焊性, 要求 Q690q 钢 $P_{cm} \leq 0.267$, 由以下公式计算:

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

轧制采用 TMCP 工艺, 第一阶段再结晶轧制区加热温度为 1 200 ℃, 开轧温度为 1 180 ℃。第二阶

段未再结晶区轧制开轧温度为 920 °C,终轧温度为 830 °C。轧后立即进入层流冷却进行快冷,冷却速度约为 12 °C/s,终冷目标温度为 590 °C。成品厚度为 15 mm,其变形示意图如图 1 所示。

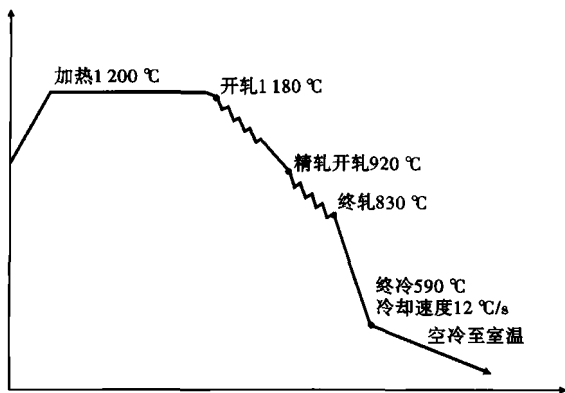


图 1 桥梁钢 Q690q 模拟轧制工艺示意图

Fig. 1 Scheme of simulation rolling process of bridge steel Q690q

通过对奥氏体再结晶区和未再结晶区两个阶段的控制轧制,可以充分细化奥氏体晶粒,为控冷后中温贝氏体转变提供细小的组织。同时产生了高密度的位错和大量的变形带,为相变后贝氏体微合金元素的析出提供有利的场所。实验方案 No1 通过控

制轧制和冷却方式生产;实验方案 No2 在控制轧制和冷却的基础上进行热处理。热处理工艺为 940 °C 淬火 + 630 °C 30 min 回火。

2 试验结果和分析

2.1 力学性能

将实验室轧制后 15 mm 厚轧件加工成拉伸试样,试样厚度为 15 mm,标距 60 mm(图 2)。Q690q 桥梁钢板的力学性能如表 2 所示。

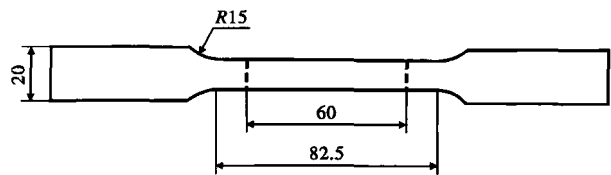


图 2 桥梁钢 Q690q 15 mm 板拉伸试样尺寸

Fig. 2 Size of tensile test specimen of 15 mm plate of bridge steel Q690q

取标准夏比 V 型冲击试样 10 mm × 10 mm × 55 mm,测定低温冲击功。取纵向拉伸试样进行 5% 的拉伸变形,将试样加工成 V 型缺口冲击试样,在 -20、-40、-60 °C 进行时效冲击试验(表 2)。

对比表 2 可知,在经过 630 °C 回火热处理后,实

表 2 TMCP(No1) 和 TMCP + 调质处理(No2) 桥梁钢 Q690q 15 mm 板的横、纵向力学性能

Table 2 Longitudinal and transverse mechanical properties of 15 mm plate of bridge steel Q690q processed by TMCP (No1) and TMCP + quenching-tempering treatment (No2)

方案		屈服强度 ($R_{p0.2}$)/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	断后伸长率 ($A_{80\text{mm}}$)/%	断面收缩率 (Z)/%	冲击功/J		
						-20 °C	-40 °C	-60 °C
TMCP (No1)	横向	545 ~ 575	835 ~ 855	17	56 ~ 59	56 ~ 58	51 ~ 56	26 ~ 32
	纵向	530 ~ 550	815 ~ 840	19	67 ~ 68	87 ~ 179	32 ~ 62	41 ~ 48
TMCP + 调质(No2)	横向	830 ~ 885	890 ~ 945	16 ~ 19	60 ~ 64	62 ~ 72	37 ~ 57	33 ~ 40
	纵向	845 ~ 870	895 ~ 900	17	65 ~ 67	153 ~ 186	141 ~ 155	42 ~ 146
GB/T714-2008		690	770	14	-	≥47	≥47	-

验方案 No2 桥梁板的纵向屈服强度比方案 No1 的 550 MPa 左右提高到了 850 MPa 左右。抗拉强度有所提高,但是变化不是很明显。同时,在实验方案 No2 下的纵向冲击吸收功有明显上升,特别是 -40 °C、-60 °C 变化比较明显,成 2 ~ 3 倍趋势增长。

2.2 组织

No1 样通过控轧控冷的方式生产,其金相组织如图 3(a₁, b₁) 所示,其组织主要为粒状贝氏体(GB)以及多边形铁素体(PF),通过观察图片,该组织中存在一些黑色珠状组织,结合图 3(c₁, d₁) SEM 组织形貌进行分析,该组织为 M/A 组元。M/A 的形

成是由于在较慢的连续冷却条件下,由粒状贝氏体团之间残留的较大块的奥氏体发展而来的,其数量、大小与控冷制度有关。冷却速度快,组织细小,M/A 越细小弥散,低冷却速度条件下的贝氏体粗大,M/A 为大块状。大块的 M/A 对钢的低温冲击性能是有害的^[1]。从图 3(d₁) 可以看出,该组织中的 M/A 组元的尺寸为 5 ~ 8 μm,大多数分布在铁素体板条内部,多成片状、尖角形状。在进行冲击试验时,这些形状的 M/A 极易形成裂纹的萌生源和裂纹的扩散通道。因此,No1 样的低温冲击吸收功较低。

No2 样是在 No1 样的基础上进行热处理实验,

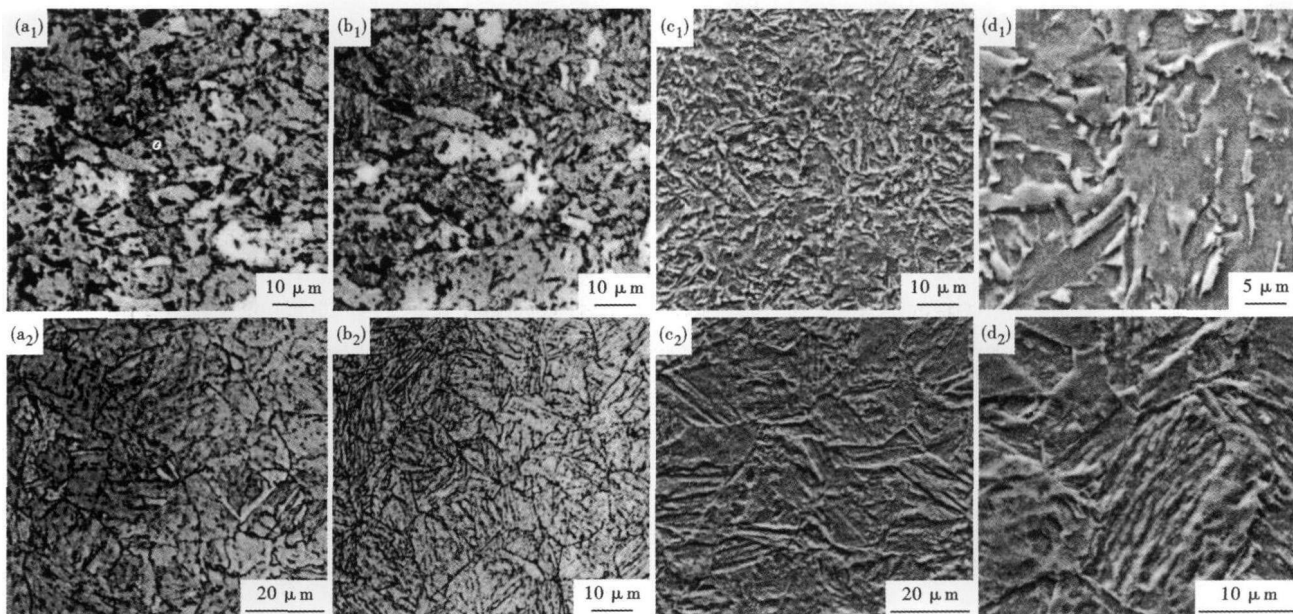


图 3 桥梁钢 Q690q 15 mm 板组织形貌: (a₁, b₁, c₁, d₁) TMCP (No1); (a₂, b₂, c₂, d₂) TMCP + 调质 (No2); 横向- (a₁, a₂) 光学; (c₁, c₂) SEM; 纵向- (b₁, b₂) 光学; (d₁, d₂) SEM

Fig. 3 Structure morphology of 15 mm plate of bridge steel Q690q: (a₁, b₁, c₁, d₁)- TMCP (No1); (a₂, b₂, c₂, d₂)- TMCP + quenching-tempering (No2); transverse- (a₁, a₂) optical; (c₁, c₂) SEM; longitudinal- (b₁, b₂) optical; (d₁, d₂) SEM

经过回火后, Q690q 桥梁钢的组织特征均发生了变化, 其组织主要为金相图片图 3(a₂, b₂) 以及 SEM 图 3(c₂, d₂) 所示的多边形铁素体和渗碳体的机械混合物。经过回火后, No2 样的屈服强度明显提高, 其原因是在回火的过程中, 由于粒状贝氏体、铁素体晶粒的尺寸在增大, 使过饱和的碳原子被排出来, 聚集到邻近的残余奥氏体中, 使奥氏体因含碳量的增加而强化, 从而提高了其力学性能。在高温回火后, M/A 组元尺寸变小, 数量变少, 减少了裂纹的萌生源和扩散通道, 因此 M/A 组元的回火演变对冲击性能的提高起到重要的作用^[2,3]。同时回火使得大量的位错消失, 回火后组织中的位错密度相对于回火前有所降低, 但仍然存在大量位错, 从而使得试样在保持高强度的同时提高了韧性。

由于在 Q690q 钢的化学成分中含有较高的 Cu, 其含量大约为 1.10%, 铜原子团共格强化也提高了材料的屈服强度和抗拉强度。力学性能变化与 Cu 的析出和组织结构有着密切的关系, 钢的强度变化是组织软化和 Cu 的析出强化的共同结果^[4]。

4 结论

(1) 采用两阶段控制轧制和调质处理工艺可以生产出具有良好综合力学性能的 Q690q 钢板。控制轧制工艺为: 加热温度 1 200 °C, 开轧温度 1 180

°C, 未再结晶开轧温度 920 °C, 终轧温度控制在 830 °C, 轧后冷却速度 12 °C/s, 终冷温度控制在 590 °C。调质工艺为: 940 °C 淬火, 630 °C 回火, 保温 30 min。

(2) 经过控制轧制工艺生产的桥梁钢组织主要为粒状贝氏体和少量铁素体, 组织中存在大量的片状、尖角状 M/A 组元, 该组织降低了 Q690q 钢的低温冲击性能。在经过热处理调质后, 钢的组织为准多边形铁素体和渗碳体的混合物, 回火后 M/A 组元变小以及回火后大量位错的消失, 使得实验钢的冲击性能和屈服强度明显提高。

参考文献

- 1 Pontremoli M. Metallurgical and Technological Challenges for the Development of High-performance X100-X120 Linepipe Steels. Proc. Second Inter. Conf. on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004; 39
- 2 尚成嘉, 杨善武, 王学敏, 等. 低碳贝氏体钢的组织类型及其对性能的影响. 钢铁, 2005, 40(4): 57
- 3 刘凯, 袁泽喜, 方剑, 等. 控轧控冷和回火工艺对超低碳贝氏体钢组织和性能的影响. 武汉科技大学学报, 2010, 33(4): 406
- 4 杨才福, 张永权. Cu 时效硬化钢中 Cu 的析出. 钢铁, 2005, 40(4): 62

熊文娟(1983-), 女, 硕士研究生, 冶金工艺和钢材新品种开发。

收稿日期: 2011-07-18