

Q370q 桥梁用钢焊接热影响区组织性能的研究

陈延清^{1,2} 杜则裕² 张飞虎¹ 董现春¹ 张永强¹

(1. 首钢技术研究院; 2. 天津大学材料学院)

摘要 采用 Gleeble2000 热模拟实验机测定出首钢研制开发的 Q370q 桥梁用钢焊接连续冷却转变曲线 (SH-CCT 图), 获得焊接工艺特征参数 $t_{8/5}$ 从 3.5s 到 2500s 范围内的组织变化规律。利用热模拟技术还进行了 Q370q 桥梁用钢热影响区组织、性能的模拟研究, 结果表明, 粗晶热影响区存在着脆化现象, 随着焊接热输入的增加, 奥氏体晶粒粗化, 脆化加剧。

关键词 焊接连续冷却转变曲线 热模拟 粗晶热影响区 桥梁结构用钢

Study on Microstructure and Properties in HAZ of the Q370q High Strength Bridge Steel

Chen Yanqing^{1,2} Du Zeyu² Zhang Feihu¹ Dong Xianchun¹ Zhang Yongqiang¹

(1. Shougang Research Institute of Technology; 2. School of Material Science & Engineering in Tianjin University)

Abstract The welding continuous cooling transforming (SH-CCT) curve of Q370q Bridge Steel was measured by Gleeble 2000 thermal simulated machine. It was obtained that the regular pattern of the microstructures transforming with $t_{8/5}$ from 3.5 second to 2500 second. The microstructures and properties in heat affect zone of Q370q Bridge Steel was studied by thermal simulated technique. The result shows that coarse grain heat affect zone (CGHAZ) becomes brittle. With the welding heat input increasing, the austenite grain coarsening and the brittle of CGHAZ are being aggravated.

Key words welding continuous cooling transforming curve, thermal simulated, coarse grain heat affect zone, bridge steel

1 引言

钢桥所用钢的种类有碳素钢、低合金高强钢和低合金超高强钢。根据钢材的形状分工字钢、角钢、槽钢和钢板, 现代钢桥用材最多的是钢板。我国常用桥梁钢和国外一样, 为 240~420MPa 的碳素钢和低合金高强钢, 更高强度钢在动载荷较大的钢桥中使用受到限制, 日本研究较多, 我国和英、美、德在钢桥中很少使用。我国桥梁钢的标准要求与国外是一样的, 但实物质量水平尚不及国外。为了满足钢桥制造和使用的需要, 对桥梁用钢的化学成分和力学性能都有严格的规定, GB714—2000 将桥梁用钢分为 Q235q、Q345q、Q370q、Q420q 四个强度级别, 除 Q235q 分为 C、D 两个质量等级外, 其他三个强度级别均分为 C、D、E 三个质量等级。

桥梁在使用时不仅要求在载荷作用下不能破坏, 而且不允许产生过大的变形, 这就要求桥梁钢不仅要有足够的抗拉强度, 而且还要具有足够的弹性极限和屈服强度, 屈服强度越高表明钢对变形的抵抗能力越大, 在不发生塑性变形的条件下能承受的应力越大。在选用钢材时关注强度指标同时, 更要重视钢的韧性, 因为韧性会影响钢桥的抗疲劳性和抗脆断性, 抵抗疲劳破坏性和抵抗脆性断裂性能对桥梁是十分重要的, 这关系到桥梁的安全使用问题。另外, 钢桥所用钢材必须可焊性好, 因此 GB714—2000 要求 Q345q、Q370q、Q420q 的 C_{eq} 分别不大于 0.43%、0.44%、0.45%。

为了掌握首钢研制开发的 Q370q 级桥梁用钢的焊接性能, 测定了 Q370q 级桥梁用钢的焊接连续冷却转

变曲线，利用 Gleeble2000 热模拟试验机研究了 Q370q 级桥梁用钢焊接热影响区的组织和性能。

2 试验钢板

首钢生产的 Q370q 桥梁用钢采用的是 Nb、Ti 微合金化和 TMCP 技术。加入 Nb、Ti 等强氮化物形成元素，其作用之一是在控轧过程中阻止奥氏体晶粒长大，另一作用是在轧制钢板时延迟 γ 的再结晶。Nb 具有显著的晶粒细化作用和中等的沉淀强化作用，在增加强度的同时还降低韧脆转变温度。钢中加 Ti 可以在焊接峰值温度下能通过生成稳定的氮化物，从而有效控制晶粒长大。试验钢板的化学成分和力学性能分别列于表 1、表 2，钢板的厚度规格为 20mm。

表 1 Q370q 桥梁用钢化学成分 (%)

Tab. 1 Chemical composition of some Q370q bridge steel

C	Si	Mn	P	S	Nb+Ti	Al _i	Ceq	Pcm
0.15	0.36	1.37	0.015	0.005	0.069	0.0467	0.396	0.231

注：C_{eq}=C+Mn/6+ (Ni+Cu) /15+(Cr+Mo+V)/5，P_{cm}=C+(Mn+Cu+Cr)/20+Si/30+Ni/60+Mo/15+V/10+5B。

表 2 Q370q 桥梁用钢的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of some Q370q bridge steel

板厚/mm	拉伸试验 (纵/横)			冲击吸收功 (纵/横)				
	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
20	440/465	565/570	29/26	241/165	234/167	224/150	214/126	197/63

3 焊接连续冷却转变曲线 (SH-CCT 图) 的测定

焊接是一个不均匀的加热和冷却过程，焊接条件下的组织转变特点不仅与等温转变不同，也与热处理条件下连续冷却转变不同，可以说是一个特殊的热处理过程，因此不能机械地利用热处理条件下的相变理论来解决焊接条件下的组织转变问题，必须根据焊接热循环的特点建立焊接条件下组织转变的理论，也即建立焊接条件下的连续冷却转变曲线即 SH-CCT 图。建立焊接条件下 SH-CCT 图，一方面可以预测焊接热影响区的组织和性能，评定钢材的淬硬倾向，另一方面可作为选择焊接线能量、预热温度和制定焊接工艺的科学依据。

焊接接头是由焊缝区和焊接热影响区（焊缝两侧母材发生组织和性能变化的区域，又称为 HAZ）两部分组成。HAZ 是一个区域，距焊接热源距离不同的 HAZ 中的各点所经受得热循环是不同的，其组织和性能变化也是不一样的，按所受焊接热循环的最高温度划分，HAZ 可分为熔合区、粗晶区、相变重结晶区、不完全重结晶区四个区域。其中熔合线附近的粗晶区是整个焊接接头的最薄弱地带，所以建立 SH-CCT 都是以此区为主要研究对象。

Q370q 桥梁用钢 SH-CCT 图的建立就是以此区为对象开展一系列研究工作。所用的试验设备为 Gleeble 2000 热模拟机，采用电阻加热方式，测得 Q370q 桥梁用钢的 SH-CCT 图见图 1，焊接特征参数 $t_{8/5}$ (800℃到 500℃冷却时间)与 HAZ 组织组成关系见图 2，焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与 HAZ 硬度关系见图 3。

由图 1 可以看到，Q370q 高强度桥梁用钢，在焊接规范 $t_{8/5} \leq 12.5s$ 时，CGHAZ 中主要是马氏体组织， $12.5s \leq t_{8/5} < 40s$ 时，CGHAZ 中是马氏体和贝氏体的混合组织， $40s < t_{8/5} \leq 130s$ 时，CGHAZ 中主要是贝氏体组织， $t_{8/5} = 130s$ 时，出现先共析铁素体， $t_{8/5} = 550s$ 时，出现块状铁素体， $t_{8/5} = 300s$ 时，出现珠光体组织。因此，在常用的焊接规范 $t_{8/5} = 10 \sim 100s$ 条件下，CGHAZ 中主要是贝氏体组织和少量马氏体组织。硬度测试结果显示，在急速冷却的极限条件下时，即 $t_{8/5} < 9s$ 时，CGHAZ 中全部是马氏体组织， $HV_{10} > 350$ ，硬度较高，应尽量避免采用极限焊接工艺，在常用的焊接规范 $t_{8/5} = 10 \sim 100s$ 条件下，CGHAZ 中主要是贝氏体组织和极少量马氏体组织， $HV_{10} < 350$ 。

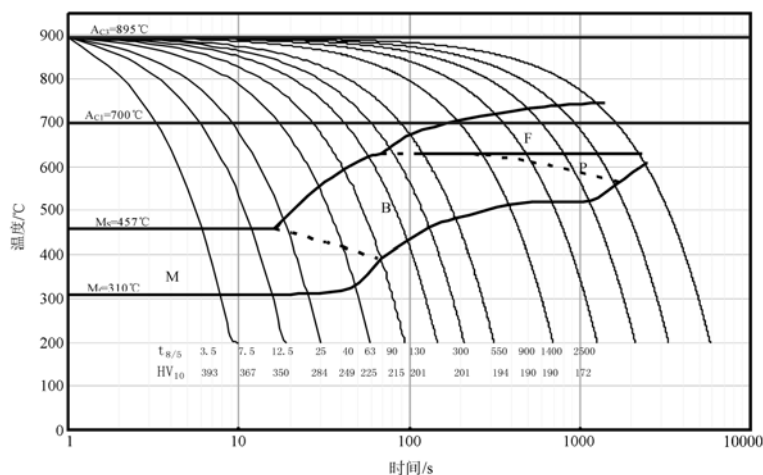
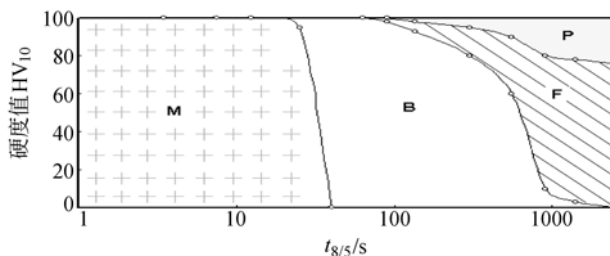
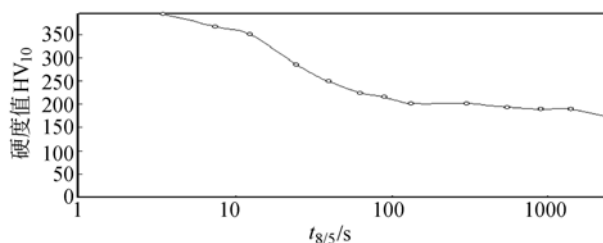


图1 Q370q 桥梁用钢的焊接连续冷却转变曲线

Fig.1 SH-CCT curve of Q370q bridge steel related to the number in Tab. 1

图2 焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与 HAZ 组织组成关系Fig.2 Relation of microstructures in simulated HAZ with $t_{8/5}$ 图3 焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与 HAZ 硬度关系Fig.3 Relation of hardness in simulated HAZ with $t_{8/5}$

4 Q370q 桥梁用钢焊接热影响区的组织、性能

4.1 不同焊接热输入对 Q370q 桥梁用钢焊接热影响区粗晶区组织性能的影响

桥梁用钢在工程实际中一般采用埋弧自动焊在工厂内预制, 然后采用熔化及气体保护焊在现场进行安装, 在不能实现气体保护焊的场合采用手工电弧焊, 因此主要进行了常用焊接方法的热模拟试验, 手工电弧焊的焊接热输入一般为 15~30kJ/cm, 熔化极气体保护焊焊接热输入范围为 16~35kJ/cm, 埋弧自动焊的常用能量输入为 30~50kJ/cm。

随着科学技术的进步和高效焊接方法的诞生, 为了提高焊接效率, 工程应用中多采用较大焊接热输入和高效的焊接方法, 为了适应工程技术的发展趋势和考查首钢研制的 Q370q 钢的焊接性, 也进行了较大焊接热输入的热模拟试验。选用的模拟焊接热输入分别为 20kJ/cm、30kJ/cm、40kJ/cm、50kJ/cm、60kJ/cm、100kJ/cm, 对应的焊接特征参数 $t_{8/5}$ 分别为 10s、25s、45s、70s、105s、340s。

不同焊接热输入下一次热循环的模拟焊接热影响区粗晶区的冲击功如图 4 所示。不同焊接热输入

一次热循环的模拟焊接热影响区粗晶区的硬度变化如图 5 所示, 各焊接热输入下一次热循环模拟试样的金相组织如图 6 所示。从图 4 中可以看出, 经过 20~100kJ/cm 的一次焊接热循环后, Q370q 钢模拟焊接热影响区粗晶区的冲击功与基体的冲击功相比均有不同程度的下降, 在常规焊接方法常用的焊接热输入 20~50kJ/cm 范围内, 室温冲击功下降幅度不大, 保持在 100J 以上, 低温冲击功下降较大, 说明 Q370q 钢模拟焊接热影响区粗晶区低温冲击功对焊接热输入较敏感。随着焊接热输入增大到 60kJ/cm, 粗晶区的冲击功急剧下降, 与基体相比降低了近 3/4, 焊接热输入进一步增加到 100kJ/cm, 冲击功下降至 27J, 这与不同焊接热输入下所得到的金相组织和晶粒长大有关。从图 6 中可看出, 在焊接热输入为 20kJ/cm 时, 一次热循环后得到是马氏体和贝氏体, 在焊接热输入为 30~60kJ/cm 时, 一次热循环下均得到贝氏体, 只是随着焊接热输入增大, 晶粒逐渐粗化, 在焊接热输入达到 100kJ/cm 时, 不仅晶粒粗化严重, 而且在晶界出现了粗大、块状的先共析铁素体, 这种组织恶化了材料的冲击韧性。从图 5 中可以看出, 在任何焊接热输入下, 模拟粗晶区的维氏硬度 HV_{10} 都远低于 300, 说明 Q370q 钢的淬硬和冷裂倾向较小。

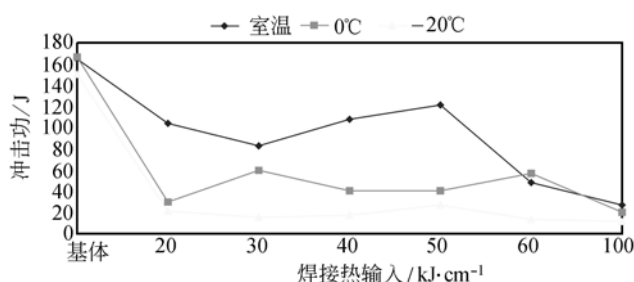


图 4 Q370q 钢不同焊接热输入一次热循环模拟热影响区粗晶区的冲击韧性

Fig.4 Toughness in simulated single pass CGHAZ with different heat input

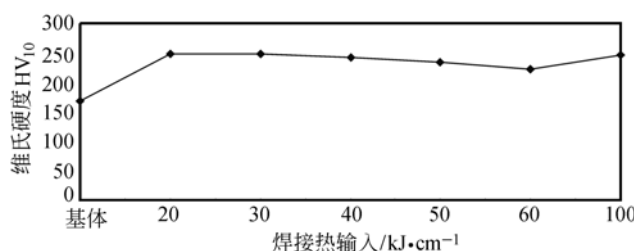


图 5 Q370q 钢不同焊接热输入一次热循环模拟焊接热影响区粗晶区的硬度变化

Fig.5 Hardness in simulated single pass CGHAZ with different heat input

4.2 Q370q 钢焊接热影响区不同区域的组织和性能

试验参数设计主要是模拟焊接热影响区粗晶区、细晶区、不完全重结晶区以上各区的交界处, 模拟的试验参数为: 焊接热输入为 40kJ/cm ($t_{8/5}$ 为 45s), 峰值温度分别为 1300℃、1200℃、1100℃、1000℃、900℃、800℃和 650℃。

焊接热输入为 40kJ/cm 时, Q370q 钢的焊接热影响区一次热循环的热模拟试样的冲击功如图 7 所示, 硬度随峰值温度变化如图 8 所示, 不同区域模拟试样的金相组织如图 9。由图 7 中可知粗晶区的冲击功最低, 细晶区的冲击功最高。随着峰值温度的降低, 冲击功逐渐提高, 当峰值温度为 900℃时冲击功达到最高值, 甚至高于母材的冲击功, 峰值温度继续降低, 冲击功与峰值温度 900℃时相比变化不大, 均高于母材的冲击功。得到这一结果与相应温度循环下所获得的金相组织是密切相关的, 由图 9 可看到在峰值温度为 1100℃、1000℃、900℃时, 模拟一次热循环得到的是晶粒细小而均匀的铁素体+珠光体组织, 在峰值温度为 800℃、650℃时, 模拟一次热循环只发生了局部组织转变, 而在峰值温度为 1300℃、1200℃时, 模拟一次热循环得到的是晶粒粗大的贝氏体, 这是此区韧性低于其他区域的主要原因。由图 8 可知, 硬度随峰值温度的升高而

增加, 所有区域的硬度值都高于母材, 但 HV_{10} 都低于 300, 说明 Q370q 钢模拟焊接热影响区的各个区域淬硬和冷裂倾向都较小, 不存在软化区。

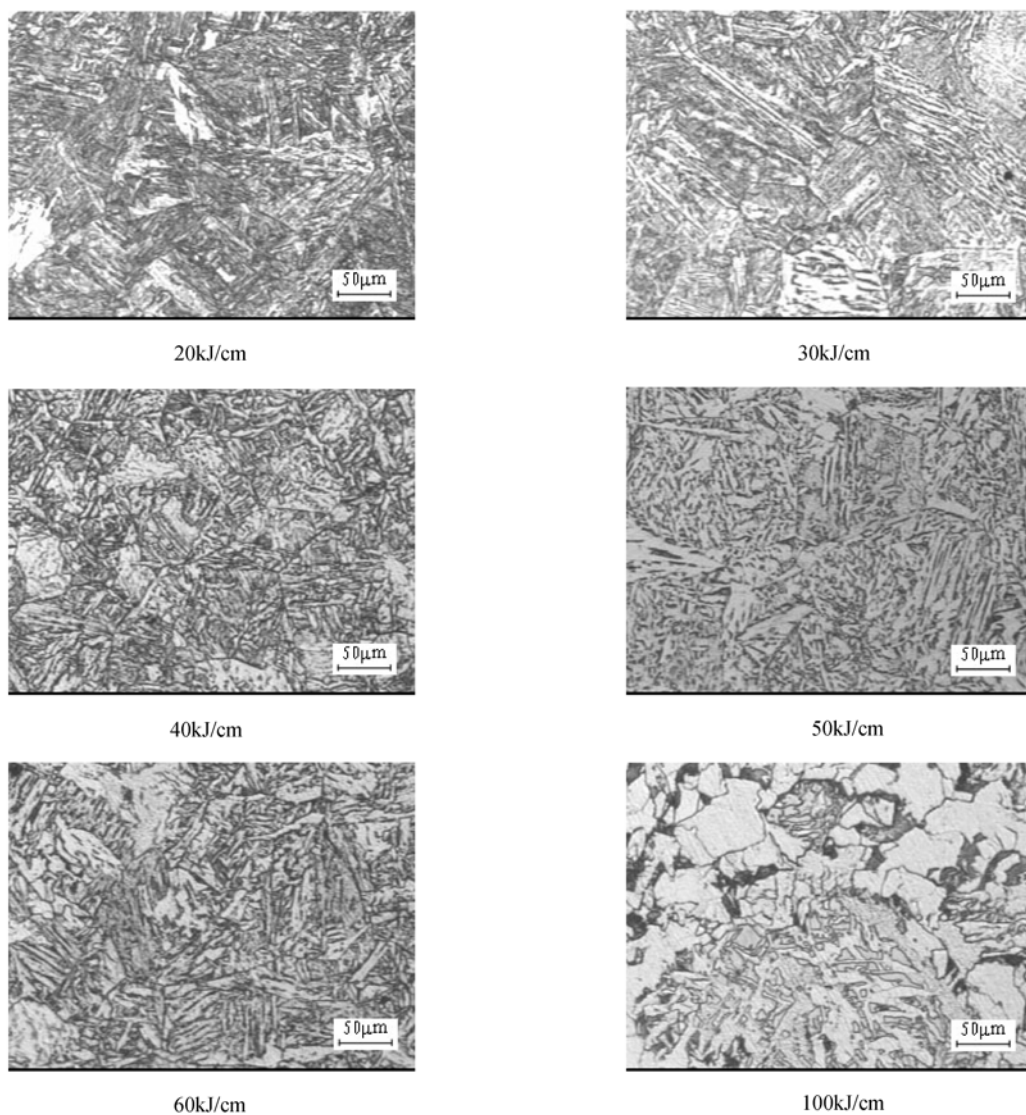


图6 Q370q 钢不同焊接热输入一次热循环模拟焊接热影响区粗晶区的金相组织

Fig.6 Microstructures in simulated single pass CGHAZ with different heat input

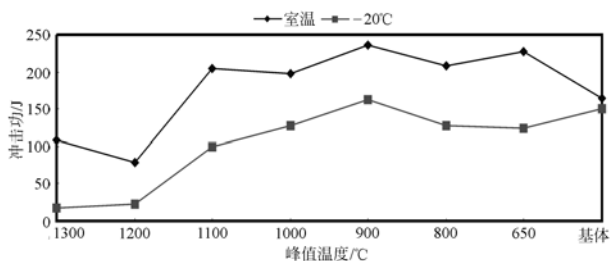


图7 Q370q 钢热影响区一次热循环冲击韧性 with 峰值温度之间的关系

Fig.7 Relation of toughness with the T_{max} simulated single pass HAZ

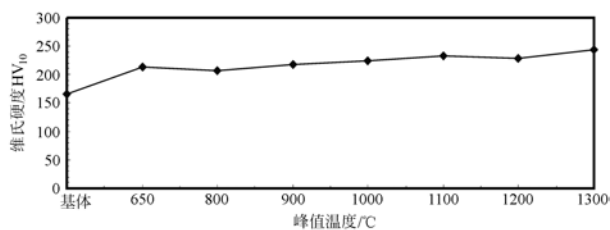


图8 Q370q 钢热影响区一次热循环的硬度 with 峰值温度之间的关系

Fig.8 Relation of hardness with the T_{max} simulated single pass HAZ

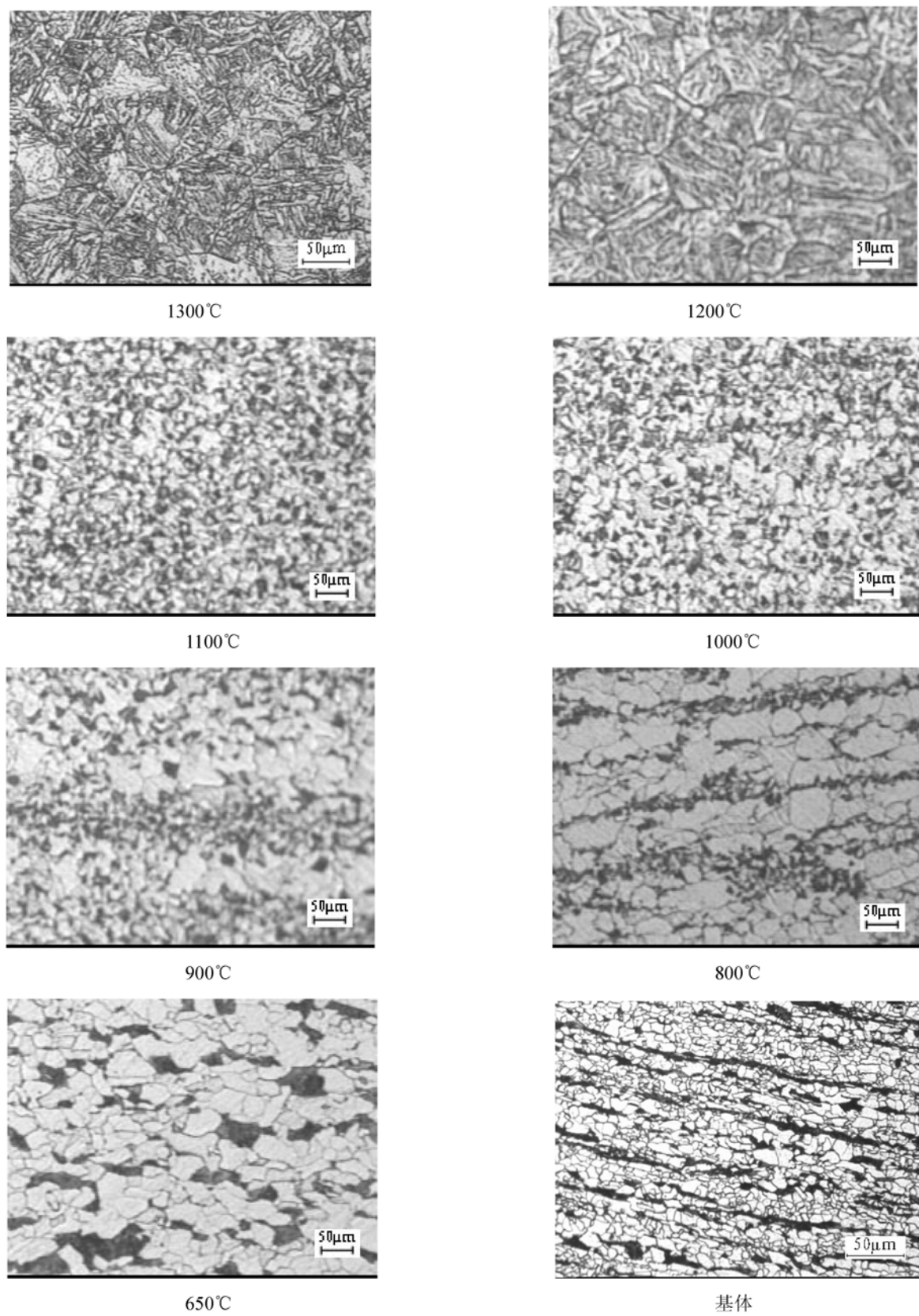


图9 Q370q 钢各峰值温度一次循环下所获得的金相组织

Fig.9 Microstructures in simulated single pass HAZ

4.3 Q370q 钢两次热循环后组织和性能的变化

两次热循环的试验参数为：焊接热输入 40kJ/cm，模拟试样先经过一次 1300℃的粗晶区的热循环，然后再经过一次峰值温度分别为 1300℃、1200℃、1100℃、1000℃、900℃、800℃和 650℃的热循环。通过模拟试验，对 Q370q 钢粗晶区经两次热循环后组织、性能变化规律进行了探讨。

经两次热循环后 Q370q 钢的冲击功的变化规律如图 10 所示，两次热循环后硬度变化规律如图 11 所示，两次热循环后模拟试样的金相组织如图 12 所示。由图 10 可知 Q370q 钢经两次热循环试样-20℃的冲击功与只经过一次 1300℃粗晶区热循环试样的冲击功相比均有不同程度的改善，其中经过两次粗晶区热循环的试样（即 1300℃+（1100~1300℃））和经过一次粗晶区热循环后再经过一次两相区热循环（即 1300℃+（650℃）~800℃）试样的冲击功提高幅度不大，仍存在严重的脆化。经过一次粗晶区热循环后再经过一次细晶区热循环（即 1300℃+（900~1000℃））试样的冲击功有大幅提高，这是因为得到晶粒细小（晶粒度达 12 级）、组织均匀一致的铁素体和贝氏体的缘故，这在图 12 中可以清楚地看到。从图 11 可知，粗晶区经过不同温度的两次热循环后，各温度下两次热循环的模拟试样的维氏硬度均高于基体的硬度，但远低于 350，说明 Q370q 钢经两次循环后不会产生软化现象。

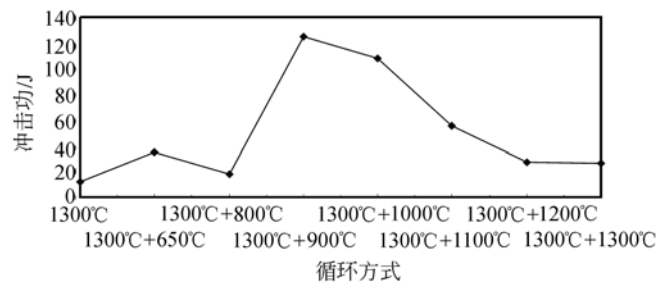


图 10 Q370q 钢粗晶区两次模拟热循环后的冲击韧性 (-20℃)

Fig.10 Toughness in simulated multiple pass HAZ

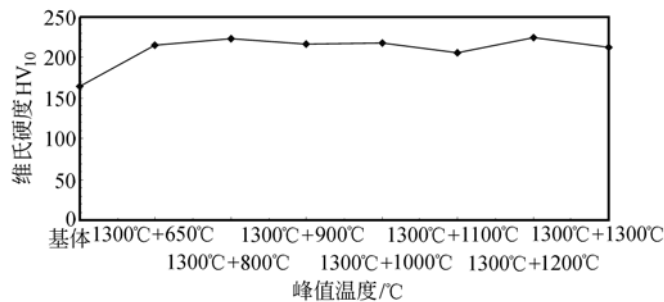
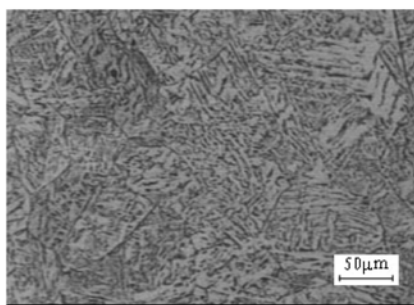
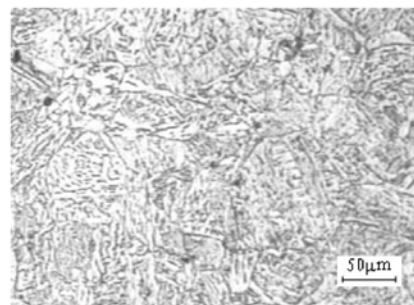


图 11 Q370q 钢粗晶区两次热循环后模拟试样的硬度变化规律

Fig.11 Hardness in simulated multiple pass HAZ



1300℃+1300℃



1300℃+1200℃

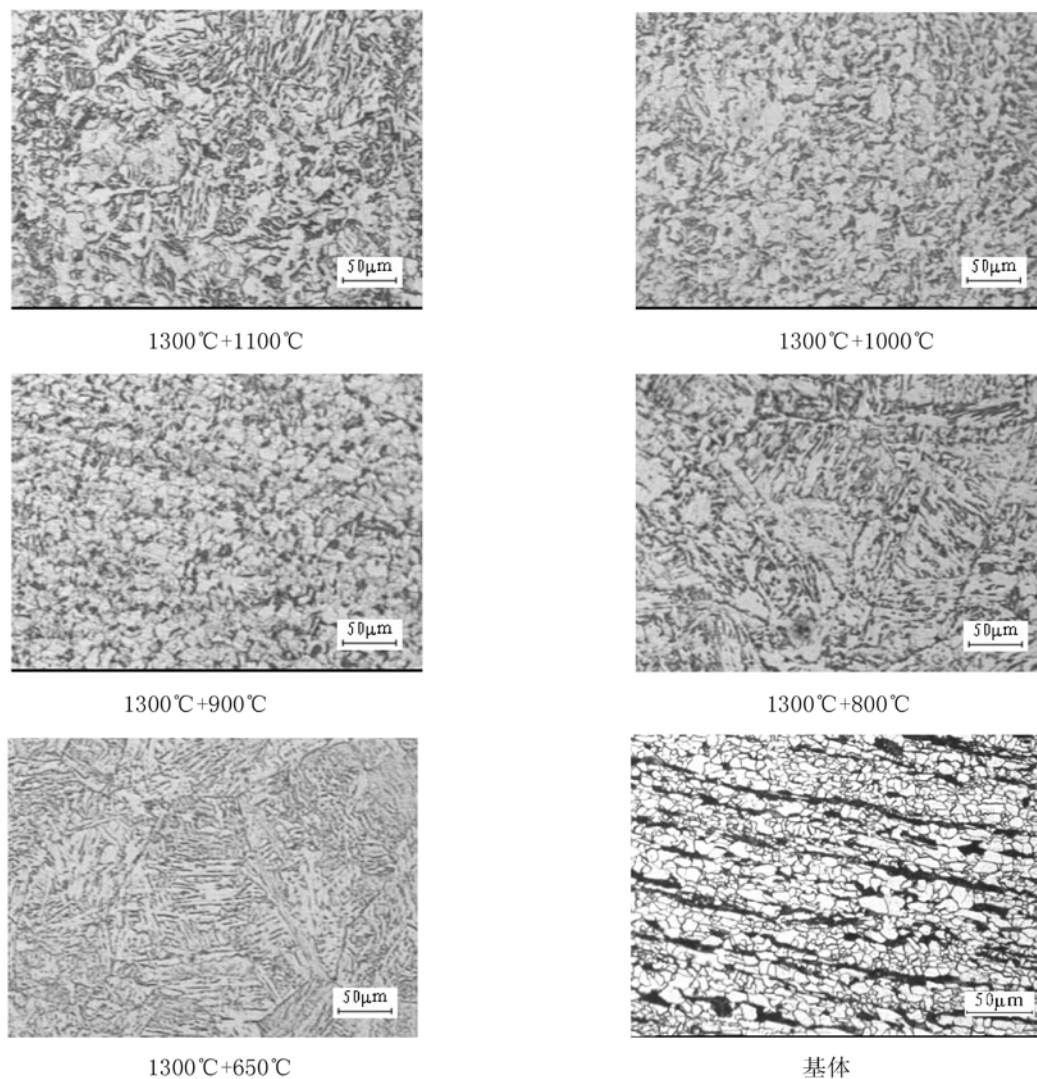


图 12 Q370q 钢粗晶区两次热循环后模拟试样的金相组织

Fig.12 Microstructures in simulated single pass HAZ

5 结论

(1) Q370q 桥梁用钢, 在焊接规范 $t_{8/5} \leq 12.5s$ 时, CGHAZ 中主要是马氏体组织, $12.5s \leq t_{8/5} < 40s$ 时, CGHAZ 中是马氏体和贝氏体的混合组织, $40s < t_{8/5} \leq 130s$ 时, CGHAZ 中主要是贝氏体组织, $t_{8/5} = 130s$ 时, 出现先共析铁素体, $t_{8/5} = 550s$ 时, 出现块状铁素体, $t_{8/5} = 300s$ 时, 出现珠光体组织。

(2) 在常用焊接方法的焊接热输入 $20 \sim 50kJ/cm$ 范围内, 一次焊接热循环后, Q370q 钢热影响区粗晶区韧性最差, 细晶区韧性最好, 热影响区粗晶区发生的主要是贝氏体的组织转变, 随着热输入增大到 $60kJ/cm$, 粗晶区的晶粒逐渐粗化, 在热输入达到 $100kJ/cm$ 时, 不仅晶粒粗化严重, 而且在晶界出现了粗大的块状铁素体, 这是导致粗晶区脆化的主要原因。

(3) Q370q 钢经一次焊接热循环后, 靠近熔合线的粗晶区发生了严重脆化; 两次焊接热循环后的冲击功较之经过一次粗晶区热循环的冲击功有所改善, 但粗晶区、两相区仍存在脆化现象; 无论是一次热循环, 还是两次热循环, 热影响区中均无软化区。

参 考 文 献

- 1 陈楚, 张月娥. 焊接热模拟技术. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 2 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性. 北京: 机械工业出版社, 1988