

DOI: 10.19666/j.rlfed.202309151

焊接热循环峰值温度对 1 000 MPa 级超 高强钢热影响区组织性能的影响

孙 琦, 李太江, 李 巍, 李生文, 余 阳, 李聚涛, 娄正计,
许博炜, 程晔锋

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 为研究 1 000 MPa 级超高强钢焊接热影响区 (HAZ) 不同区域的组织性能, 采用焊接热模拟技术制备了试验钢在不同热循环峰值温度下的试样, 通过夏比冲击试验研究了 HAZ 不同区域的冲击韧性。结果表明: 在亚临界区 (SCHAZ)、临界区 (ICHAZ) 和细晶区 (FGHAZ), 样品冲击吸收能量、裂纹扩展能量和动态冲击韧度较大, 断口上形成较大面积脚跟形纤维区和剪切唇, 微观可看到大小不一的韧窝, 样品冲击韧性较好; 在粗晶区 (CGHAZ), 样品各项冲击数据均急剧下降, 断口呈宏观脆性断裂, 几乎全为放射区, 微观下显示准解理断裂特征, 表明裂纹扩展时受到的阻力减小, 裂纹萌生后稳定扩展的时间减少, 失稳扩展较快, 样品的冲击韧性恶化, CGHAZ 为 HAZ 中的韧性谷区; 组织分析表明, 粗大的晶粒和粗大的马氏体板条是导致 CGHAZ 脆化的主要原因。该结论为探究 1 000 MPa 级超高强钢在水电工程中的优选研制及工程应用奠定了理论基础。

[关 键 词] 超高强钢; 焊接热模拟; 焊接热影响区; 冲击吸收能量; 断裂韧度

[引用本文格式] 孙琦, 李太江, 李巍, 等. 焊接热循环峰值温度对 1 000 MPa 级超高强钢热影响区组织性能的影响[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 165-173. SUN Qi, LI Taijiang, LI Wei, et al. Effect of peak temperature of welding thermal cycle on microstructure property of heat affected zone of 1 000 MPa grade ultra-high strength steel[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 165-173.

Effect of peak temperature of welding thermal cycle on microstructure property of heat affected zone of 1 000 MPa grade ultra-high strength steel

SUN Qi, LI Taijiang, LI Wei, LI Shengwen, YU Yang, LI Jutao, LOU Zhengji,
XU Bowei, CHENG Yefeng

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the microstructure properties of different regions of welding heat affected zone (HAZ) of 1 000 MPa grade ultra-high strength steel, the samples of test steel at different peak temperatures of thermal cycle were prepared by welding thermal simulation technique, and the impact toughness of different regions of HAZ was studied through Charpy impact tests. The results showed that, in the subcritical region of HAZ (SCHAZ), the intercritical region of HAZ (ICHAZ) and the fine-grained region of HAZ (FGHAZ), the samples had relatively high impact absorption energy, crack propagation energy and dynamic impact toughness, and a large area of fiber region and shear lip formed on the fracture surface. Toughness dimples of different sizes can be seen at the microscopic level. The samples had good impact toughness. In the coarse-grained region of HAZ (CGHAZ), all impact data of the samples sharply decreased, and the fracture showed a macroscopic brittle fracture, almost all of which are radiological regions. At the microscopic level, it showed quasi cleavage fracture characteristics, indicating that the resistance to crack propagation decreased, and the time for stable propagation

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 西安热工研究院研究开发基金 (TQ-23-TYK13)

Supported by: Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TQ-23-TYK13)

第一作者简介: 孙琦 (1991), 男, 工程师, 主要研究方向为材料加工, sunqi@tpri.com.cn.

通信作者简介: 李太江 (1973), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为先进焊接与表面工程, litaijiang@tpri.com.cn.

decreased after crack initiation, and the instability propagation was fast. The impact toughness of the samples deteriorated, and the CGHAZ region was a ductile valley region in HAZ. The results showed that the coarse grains and the coarse M-A island were the main causes of embrittlement in the CGHAZ region. The conclusion lays a theoretical foundation for the selection, development and engineering application of 1 000 MPa grade ultra-high strength steel in hydropower projects.

Key words: ultra-high strength steel; welding thermal cycle simulation; welding heat affected zone; impact absorption energy; fracture toughness

近年来,随着材料工程技术的发展,传统工业用钢强度等级不断提高,以水电工程为代表,结构及设备用钢强度向 1 000 MPa 等级发展。水电站压力钢管具有强度等级高、防渗性能好、现场施工方便等优势,大量应用在大中型水电站和抽水蓄能电站建设中^[1]。焊接作为水电站压力管道等重要结构件制造安装的关键工艺,其工艺可靠性是关系安全生产的重要条件^[2-3]。超高强钢焊接主要存在开裂倾向大、热影响区(HAZ)局部脆化和软化、焊接接头强韧性匹配难度大等问题^[4-8]。以欧洲和日本为代表,国外在 21 世纪初期,已经开发出水电用 1 000 MPa 等级超高强钢并针对其焊接技术进行了深入研究^[9-12]。近年来,我国在水电用 800 MPa 等级高强钢焊接性、焊材开发、焊接工艺和焊接接头组织性能等方面开展了较为深入的研究^[13-18]。以白鹤滩水电站为代表,800 MPa 等级高强钢已得到工程化应用。但是,目前我国水电工程 1 000 MPa 等级超高强钢焊接仍存在一些问題,亟待开展进一步技术研究。

焊接接头的组织性能是焊接构件安全可靠运行的关键,焊缝区可以通过化学成分调整、强度等级匹配和焊接工艺选择等来满足其性能要求,而焊接 HAZ 与之不同,其性能主要受焊接热循环的影响引起组织的改变所致,不可能通过成分上的调整来进行优化^[19]。因此,研究 HAZ 组织性能随热循环的改变规律,是进行焊接工艺设计及焊接接头强韧化调节的重要手段。

HAZ 的宽度通常只有几毫米,在极小的范围内包括多个组织和性能不同的特定区域,即粗晶区(CGHAZ)、细晶区(FGHAZ)、临界区(ICHAZ)和亚临界区(SCHAZ),具体如图 1 所示^[19-21]。实际焊接接头通常为多层多道焊,多次焊接热循环过程导致 HAZ 区域的组织结构更为复杂。因此,采用焊接热模拟技术,区分实际焊接过程中的单次热循环,可以得到与实际 HAZ 不同区域组织状态相似的系列试样,成为深入研究不同焊接参数对超高强钢 HAZ 不同区域组织影响的重要手段。

在实际焊接过程中有峰值温度和冷却速度 2 个重要的关键参数,其中峰值温度直接影响奥氏体的形成和晶粒尺寸,以及第二相的溶解、析出和合金元素的扩散过程^[22],且一次热循环形成的粗晶区组织为二次热循环下所形成的临界粗晶区原始组织,影响着后续多道次循环中临界粗晶区的组织形态^[23]。因此,研究一次焊接热循环下钢 HAZ 不同区域的组织性能,对于优化焊接工艺具有重要意义。

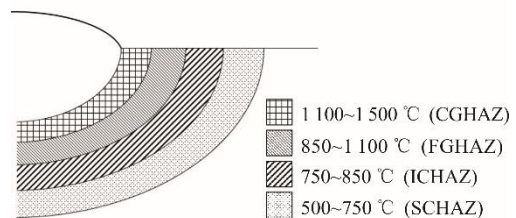


图 1 HAZ 示意

Fig.1 Schematic diagram of heat affected zone

目前,关于 800 MPa 级和 1 000 MPa 级高强钢的焊接 HAZ 组织的报道,大多是在热输入 20 kJ 以上的情况下的结果。丁庆丰^[24]研究了 800 MPa 级水电钢 HAZ 不同区域的组织性能,研究表明,热输入为 25 kJ/cm 时,粗晶区主要为粗大的板条贝氏体和粒状贝氏体,没有出现马氏体组织,韧性较好。吴昌忠等^[1]研究了 1 000 MPa 级 SMI SUMITEN 950 钢焊接 HAZ 的组织性能,研究表明,热输入超过 50 kJ/cm 时,粗晶区变为低碳板条马氏体和贝氏体的混合组织,钢适合进行大热输入焊接。邱福祥等^[25]研究了 800 MPa 级 XG800CF 水电用高强钢 15 kJ/cm 以上的焊接性能。任希乐等^[4]研究了 B950CF 在大于 25 kJ/cm 的焊接性能。康丹丹等^[8]研究了 1 000 MPa 级水电工程用高强钢 B950CF 在大于 15 kJ/cm 的焊接接头组织性能。廖琪^[14]研究了 800 MPa 高强钢在大于 25 kJ/cm 的焊接性能。朱腾辉等^[26]研究了 800 MPa 级水电钢在大于 28.7 kJ/cm 的焊缝组织。

本文选取 10 kJ/cm 作为热输入参数,采用焊接热模拟技术制备了试验钢在不同热循环峰值温度下的试样组织,通过夏比冲击试验研究了 HAZ 不

同区域的冲击韧性,对该钢在小热输入下的HAZ组织进行了详细的分区研究,以期为其他研究者进行1000 MPa级高强钢或者其他钢种小热输入研究提供参考,并为探究1000 MPa级超高强钢在水电工程中的优选研制及工程应用奠定理论基础。

1 试验材料与方法

试验钢成分见表1,热处理状态为900℃淬火+560℃回火,组织为回火索氏体,平均晶粒尺寸为14.2 μm,试验钢的显微组织如图2所示。采用软件计算得到,试验钢的相变温度 A_1 点为713℃, A_3 点为814℃。

试验钢板厚50 mm,热模拟试样从板厚中部沿

板材横向取样,试样长度方向垂直于钢板轧向,热模拟试样尺寸为11 mm×11 mm×55 mm,热模拟试验在Gleeble-540热模拟试验机上进行。根据高强钢HAZ示意图,粗晶区的温度范围在1100℃到固相线之间,1100℃为粗晶区的初始转变温度;细晶区的温度范围为加热转变临界点 A_{c3} ~1100℃;临界区的温度范围为加热转变临界点 A_{c1} ~ A_{c3} ;亚临界区为低于加热转变临界点 A_{c1} 的温度(500℃~ A_{c1})。选用表2所列的热模拟参数,分别采用650、850、950℃为表征亚临界区、临界区和细晶区的热模拟参数,选择1100、1300℃为表征粗晶区的热模拟参数,热输入 E 为10 kJ/cm,冷却速度 $t_{8/5}$ 均为5 s。热模拟曲线如图3所示。

表1 试验高强钢的化学成分

单位:w/%

Tab.1 Chemical composition of the experimental ultra-high strength steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	B	Nb	Ti	V	Fe
质量分数实测值	0.215	0.222	1.245	0.011	0.004	0.460	0.533	0.607	0.035	0.002	0.019	0.015	<0.005	其余

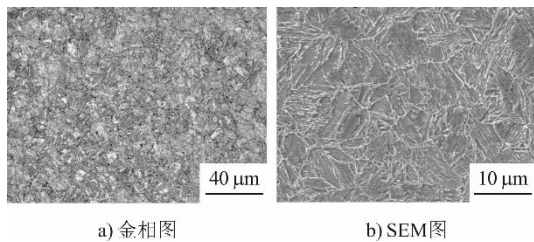


图2 试验钢的显微组织
Fig.2 Microstructure of the experimental steel

表2 焊接热模拟试验参数
Tab.2 Welding thermal simulation test parameters

$E/(kJ \cdot cm^{-1})$	预热温度/℃	加热速度/(℃·s ⁻¹)	峰值保温时间/s
10	200	130	1

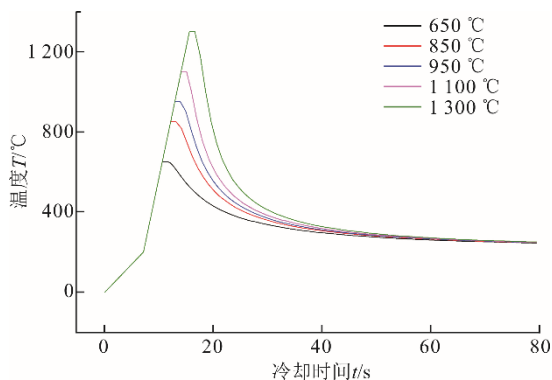


图3 热影响区不同部位的热模拟曲线
Fig.3 Thermal simulation curves of different parts of the heat affected zone

热模拟试验结束后,再按标准将热模拟试样加工成10 mm×10 mm×55 mm的标准V型缺口夏比冲击试样,缺口开在试样中心的均温区并沿板厚方向。冲击试验按照国标GB/T 229—2007在NI500C冲击试验机上进行,冲击试验机的标准打击能量为300 J(±10 J),打击瞬间摆锤的冲击速度为5.0~5.5 m/s。试验温度为-40℃,采用高低温试验箱对样品进行降温,试样从试验箱移出后在5 s内被冲断。

冲击试验结束后,分别采用KEYENCE VHX-600E超景深三维显微镜、Axio Vert.A1金相显微镜和JSM-6390A扫描电镜对断口及组织进行观察。

2 试验结果

2.1 冲击性能

经历不同峰值温度热循环后试验钢在-40℃的示波冲击数据如图4、图5和表3所示。由图4、图5和表3可以看出,几个平行样品的冲击数据波动不大。因此,在每组样品中选取其中一个进行动态载荷-位移的对比(图6)。冲击试验结束后,所有样品均发生断裂,对应图中载荷的突降。

结合图4和图6可以看出:热循环峰值温度为650℃时,试样载荷达到最大值约23.5 kN后裂纹萌生,曲线平滑下降,对应裂纹稳定扩展,样品上产生纤维区;随后载荷发生突降,载荷突降意味着

冲击裂纹迅速扩展, 耗散能量较少, 通常对应着解理断裂^[27-28], 样品上产生放射区; 峰值温度为850 °C和950 °C时, 载荷最大值增大至约33.64 kN和33.86 kN, 峰值附近曲线平滑, 裂纹稳定扩展阶段收窄; 随着峰值温度继续上升, 1 100 °C和1 300 °C时, 载荷最大值降低, 且达到最大载荷后立即发生突降, 表明裂纹萌生后迅速失稳扩展。

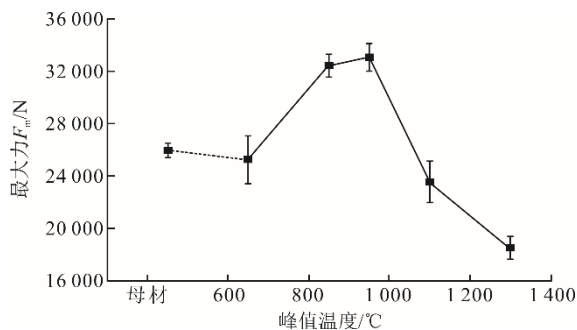


图4 试验钢在-40 °C的最大力 F_m 值
Fig.4 The value of the maximum force F_m of the experimental steel at -40 °C

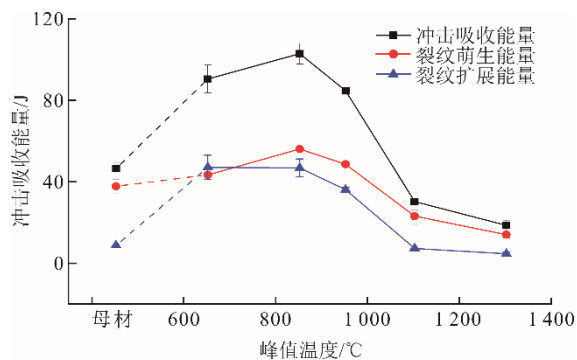


图5 不同热循环峰值温度下试验钢在-40 °C时的冲击吸收能量

Fig.5 Impact absorption energy of the experimental steel at -40 °C with different peak temperatures of thermal cycle

表3 试验钢的示波冲击结果
Tab.3 Instrumental impact test results of the experimental steel

样品热循环状态	裂纹萌生能量 W_i /J	裂纹扩展能量 W_p /J	冲击吸收能量 A_K /J	动态断裂韧度 J_{Id} /(kJ·m ⁻²)
母材	40.9	8.0	48.9	628.6
	34.3	9.4	43.7	527.1
650 °C	42.3	41.0	83.3	650.1
	44.1	52.8	96.9	677.8
850 °C	55.2	42.2	97.4	848.3
	56.5	51.0	107.5	868.3
950 °C	49.7	34.7	84.4	763.8
	47.1	37.1	84.2	723.9
1 100 °C	27.1	7.3	34.4	416.5
	18.8	7.1	25.9	288.9
1 300 °C	15.5	5.5	21.0	238.2
	12.3	3.6	15.9	189.0

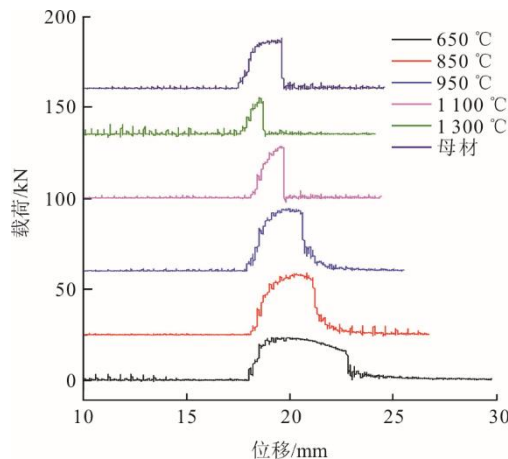


图6 试验钢在-40 °C的动态载荷-位移曲线
Fig.6 Dynamic load-displace curves of the experimental steel at -40 °C

进一步对比不同峰值温度下的冲击吸收能量。由表3和图5可知, 试验钢母材在-40 °C的冲击吸收能量平均值为46.3 J。焊接HAZ在峰值温度为650、850、950 °C时, 分别处于亚临界区、临界区和细晶区, 冲击吸收能量远高于母材; 而在粗晶区, 即峰值温度为1 100 °C和1 300 °C时, 冲击吸收能量低于母材, 且随峰值温度的升高, 冲击韧性进一步恶化。因此, 在试验钢HAZ中, 峰值温度低于950 °C时, 材料仍可保持较好的韧性, 而在峰值温度超过1 100 °C的区域, 材料韧性明显受损, 为HAZ的韧性谷区, 即为局部脆化区。裂纹萌生能量和裂纹扩展能量与冲击吸收能量的变化趋势相同。

2.2 动态断裂韧度

采用式(1)可以计算不同峰值温度下的试样钢的动态断裂韧度, 计算结果见表3和图7。

$$J_{Id} = \frac{\eta E_i}{B(W - a_0)} \quad (1)$$

式中: J_{Id} 为动态断裂韧度; η 为试样几何尺寸常数, 对应 $a/W=0.2$ 的浅裂纹试样, 取1.46^[29-31]; B 为试样厚度; W 为试样宽度; a_0 为缺口与预制裂纹长度之和; E_i 为启裂点对应的冲击吸收能量, 约为 $0.8W_i$ ^[32]。

由图7可见, 随着峰值的变化, 整条曲线可分为3个区域: I区包含细晶区、临界区和亚临界区3个区域, 动态断裂韧度较高, 对应于上平台区, 结合断口的韧窝特征可知, 主要为经过大量塑性变形及裂纹稳定扩展后失稳断裂^[33]; III区位于粗晶区, 动态断裂韧度急剧降低, 对应于下平台区, 为裂纹萌生后以解理方式扩展, 属于脆性断裂区; II区为韧-脆转变的过渡区, 过渡特征可作为确定其在焊接热循环下的脆性

转变温度及制定焊接工艺的定量依据。

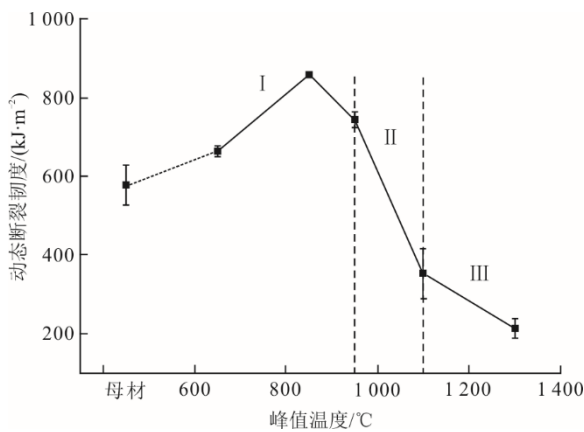


图 7 试验钢在 -40 °C 的动态断裂韧度
Fig.7 Dynamic fracture toughness of the experimental steel at -40 °C

2.3 断口形貌

图 8 为断口的宏观形貌，其中，F 为纤维区，R 为放射区，S 为剪切唇。由图 8 可以看出：峰值温度 650、850、950 °C 时，断口有塑性变形特征，宏观呈韧性断裂；峰值温度 1 300 °C 时断口平齐，宏观呈脆性断裂特征；峰值温度 1 100 °C 时和母材有少量变形。观察断口断面可知，断口由脚跟形纤维区、放射区和剪切唇 3 个特征区组成。纤维区和剪切唇总面积按照样品热循环状态为 950 °C、850 °C、650 °C、母材、1 100 °C、1 300 °C 的顺序依次减小，峰值温度 1 300 °C 时几乎只有放射区。纤维区和剪切唇总面积越大，表明材料韧性越好，这与不同温度下试验钢的冲击韧性数值保持一致。

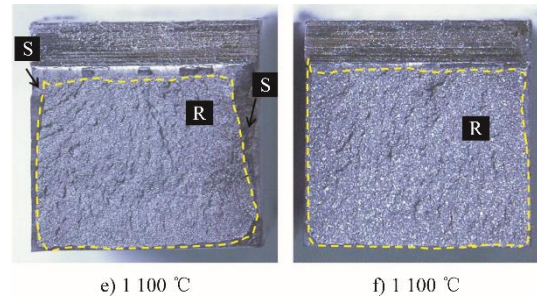
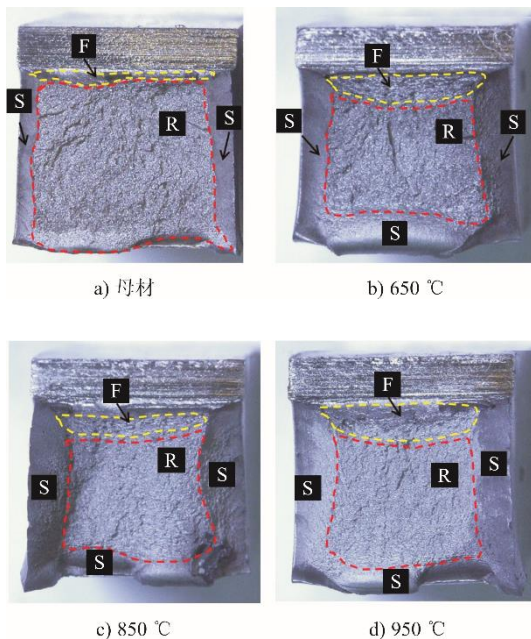


图 8 -40 °C 时母材及 HAZ 不同区域冲击断口宏观形貌
Fig.8 Macro-morphologies of the impact fracture of base metal and different regions in HAZ at -40 °C

进一步采用 SEM 对断口进行观察，具体如图 9 所示。峰值温度 650、850、950 °C 时试样断口特征均为韧窝型，由大小不等的韧窝组成。3 种温度下，韧窝坑深和坑径相差不大，韧窝周围的塑性坑相似，韧窝形态与冲击韧性相对应。热循环状态为母材、1 100 °C 和 1 300 °C 的断口宏观呈脆性断裂特征，微观呈准解理断裂，可见明显的“类解理”小平面、微孔及撕裂棱，小刻面上可见清晰的河流花样。小刻面面积越大，样品冲击韧性越差。小刻面面积按照热循环状态为 1 300 °C、1 100 °C、母材的顺序依次减小，这与 3 种条件下钢的冲击韧性数值对应。

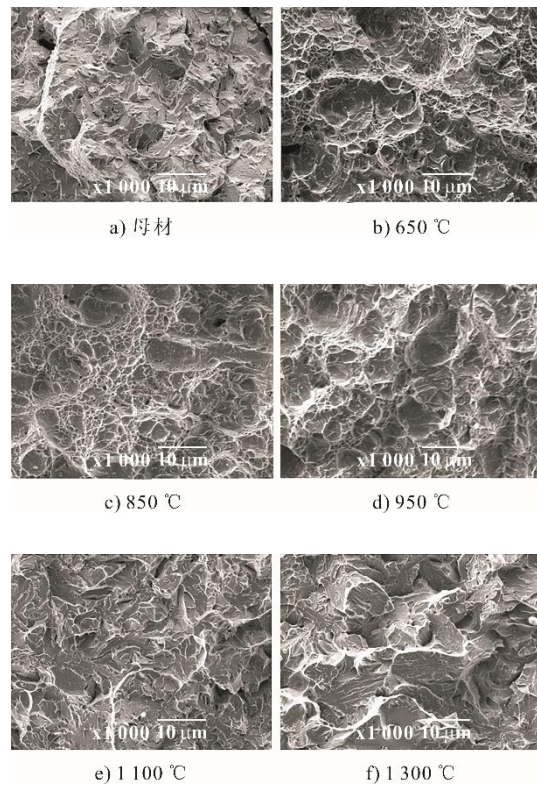


图 9 -40 °C 时母材及 HAZ 不同区域冲击断口微观形貌
Fig.9 Microstructure of the impact fracture of base metal and different regions in HAZ at -40 °C

2.4 不同峰值温度下的组织特征

焊接 HAZ 中不同峰值温度的差异,使 HAZ 中不同区域形成的组织各异。不同热循环峰值温度下试验钢的显微组织如图 10 所示。采用 Image J 对晶粒尺寸进行统计,具体如图 11 所示。由图 10 及图 11 可知:峰值温度超过 1 100 °C 时,对应于粗晶区,可见粗大的晶粒,原奥氏体晶粒的晶界清晰,晶粒内部形成具有一定交角的针状铁素体和粗大的马氏体板条组织,板条和板条间的 M-A 组元粗大;峰值温度 950 °C 时,钢为准多边形铁素体体和粒状贝氏体混合组织,组织均匀,晶粒尺寸细小;当峰值温度在 850 °C 时,对应于 ICHAZ,晶粒较细小;当峰值温度为 650 °C 时,形成 SCHAZ,同样具有细小的晶粒。

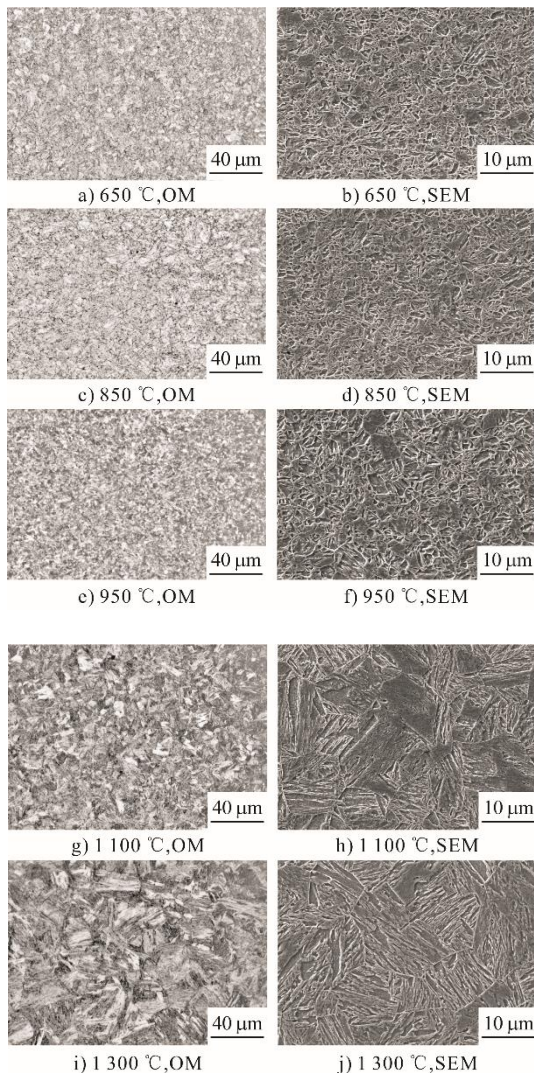


图 10 不同热循环峰值温度下试验钢的显微组织
Fig.10 SEM images of the experimental steel at different peak temperatures of thermal cycle

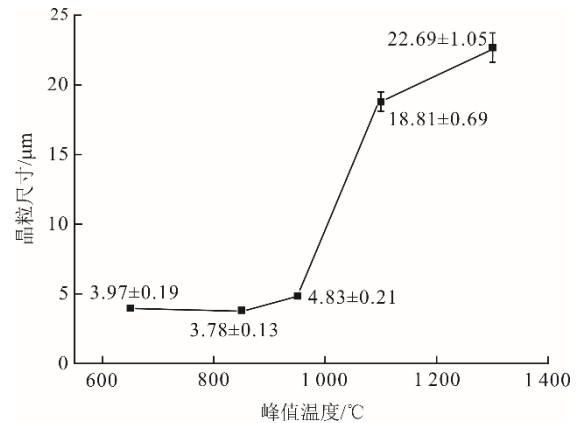


图 11 不同热循环峰值温度下试验钢的晶粒尺寸
Fig.11 Grain sizes of the experimental steel at different peak temperatures of thermal cycle

3 讨 论

冲击试验中的最大力 F_m 与抗拉强度相关。本试验中,临界区和细晶区 F_m 最大,说明裂纹形成所需的应力大于其他几个区域,表明此时钢的抗拉强度最大,粗晶区对应的强度最小,亚临界区基本与母材的强度持平。

冲击试样在打击过程中的冲击吸收能量 A_K 是由缺口处弹性变形能量、塑性变形能量、裂纹稳定扩展能量、裂纹不稳定扩展能量构成的,其中缺口处弹性变形能量和塑性变形能量构成裂纹萌生能量,裂纹稳定扩展能量和裂纹不稳定扩展能量构成裂纹扩展能量。冲击试验中,载荷达到最大力 F_m 时,裂纹在冲击试样缺口处萌生, F_m 之前所消耗的能量为裂纹萌生能量 W_i , F_m 之后所消耗的能量为裂纹扩展能量 W_p ^[31]。

对于韧性好的材料,试样冲击吸收能量高,摆锤打击试样时,试样先发生弹性变形,当弹性变形达到弹性极限时,试样产生沿无约束宽度方向的塑性变形,载荷达到最大值时裂纹萌生^[34]。随后裂纹经过稳定扩展,达到临界长度后失稳扩展,试样以解理或准解理方式断裂。对于韧性较差的材料,裂纹萌生后很快断裂,几乎不经过稳定扩展阶段,裂纹扩展能量明显小于韧性较好的材料^[35]。因此,由实验结果可知,在亚临界区、临界区和细晶区,样品冲击吸收能量和裂纹扩展能量较高,冲击韧性较好;在粗晶区,裂纹扩展时受到的阻力减小,裂纹萌生后稳定扩展的时间减少,失稳扩展较快,样品的冲击韧性降低^[36]。

钢的冲击性能受显微组织的影响,而显微组织受热循环峰值温度的影响。当峰值温度超过 1 100 °C

时, 由于钢在热循环高温阶段停留时间较长, 出现粗大的晶粒和粗大的马氏体板条^[5], 对应于CGHAZ。由于碳原子固溶强化以及位错密度大, 其硬度值相应偏高; 加之晶粒粗大, 钢冲击韧性较差。因而, CGHAZ 区域韧性损失最大。

当峰值温度在 950 °C 时, 高温停留时间减少, 奥氏体晶粒来不及长大, 在加热和冷却过程中发生了相变重结晶, 晶粒非常细小, 奥氏体的成分充分均匀化, 对应于FGHAZ, 组织均匀, 塑性韧性较好。

当峰值温度在 850 °C 时, 温度降低加之高温停留时间进一步减少, 发生了部分重结晶, 组织中出现细小等轴晶, 但同时仍可以看到与母材相似的组织, 对应于ICHAZ, 材料韧性较好; 当峰值温度为 650 °C 时, 材料经历了一个短时回火过程, 形成SCHAZ, 与母材相比, 组织基本没有发生变化, 材料韧性较好。

对比 HAZ 不同区域的组织可知, 粗晶区相对于其他区域, 出现粗大的晶粒和粗大的马氏体板条^[5]。这种粗大的晶粒和粗大的马氏体板条是导致CGHAZ 脆化的主要原因。

4 结 论

本文通过对不同峰值温度下热模拟试样进行示波冲击试验及组织分析, 得出如下结论:

1) 热循环峰值温度显著影响钢的显微组织。当峰值温度超过 1 100 °C 时, 形成粗晶区, 具有粗大的晶粒和粗大的马氏体板条。峰值温度为 950、850、650 °C 时, 形成细晶区、临界区和亚临界区, 晶粒尺寸与粗晶区相比明显减小。

2) 在细晶区、临界区和亚临界区, 钢的裂纹萌生能量、裂纹扩展能量、动态断裂韧度及冲击吸收能量均显著高于粗晶区, 断口呈现韧性断裂特征, 冲击韧性较好。热循环峰值温度位于粗晶区时, 钢的冲击韧性急剧降低, 呈现脆性断裂特征。

3) 粗晶区是热影响区的韧性谷区, 粗大的晶粒以及热循环产生的粗大马氏体是导致该区域脆化的主要原因。

[参 考 文 献]

[1] 吴昌忠, 陈怀宁, 范闽宁, 等. 1 000 MPa 级高强度钢焊接热影响区组织和韧性[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 97-100.
WU Changzhong, CHEN Huaining, FAN Minning, et al. Microstructure and toughness of HAZ in 1 000 MPa grade high strength steel joint[J]. Transactions of the

China Welding Institution, 2011, 32(5): 97-100.
[2] 康丹丹, 万天明, 王高见, 等. 水电用 1 000 MPa 级超高强钢焊接的研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 11-13.
KANG Dandan, WAN Tianming, WANG Gaojian, et al. Research progress of 1 000 MPa ultra-high strength steel for hydropower[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(15): 11-13.
[3] 张建中, 陈爱国, 李丽丽, 等. 水电站用 1 000 MPa 级高强度钢焊接性技术应用研究[J]. 焊接技术, 2015, 44(9): 41-47.
ZHANG Jianzhong, CHEN Aiguo, LI Lili, et al. Research on weldability technology application of 1000MPa high strength steel for hydropower station[J]. Welding Technology, 2015, 44(9): 41-47.
[4] 任希乐, 万天明, 康丹丹. 1 000 MPa 水电用高强度钢埋弧焊材试验研究[J]. 电焊机, 2021, 51(4): 62-66.
REN Xile, WAN Tianming, KANG Dandan. SAW experimental study on 1 000 MPa high strength for hydropower[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(4): 62-66.
[5] 蒋庆梅. 1 000 MPa 级高强度钢焊接性及焊接工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010: 15-105.
JIANG Qingmei. Study on the weld ability and welding technology of 1 000 MPa grade high strength steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010: 15-105.
[6] 雷清华. SUMITEN 950-TMCP 高强度钢焊接接头断裂韧度试验研究[J]. 华电技术, 2012, 34(4): 13-17.
LEI Qinghua. Study on fracture toughness test of SUMITEN 950-TMCP high strength steel welded joint[J]. Huadian Technology, 2012, 34(4): 13-17.
[7] 雷清华. 多次热循环对 SUMITEN 950-TMCP 高强度钢韧性的影响[J]. 华电技术, 2013, 35(2): 18-20.
LEI Qinghua. Influence of repeatedly thermal cycling on toughness of SUMITEN 950-TMCP high strength steel[J]. Huadian Technology, 2013, 35(2): 18-20.
[8] 康丹丹, 万天明, 王高见, 等. 不同热输入对 1 000 MPa 级水电工程用高强度钢 B950CF 焊接接头组织及力学性能的影响研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 221-224.
KANG Dandan, WAN Tianming, WANG Gaojian, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of welded joint of 1 000 MPa high-strength steel B950CF for hydropower engineering[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(17): 221-224.
[9] NISHIWAKI Y, MAEJIMA T, KUBOTA K. Study for the application of high tensile steel (HT-100) to penstock[J]. Proceedings of JSCE, 2010, 672: 37-56.
[10] HORIKAWA K, WATANABE N. Application of extra-high tensile strength steel for hydropower plants in Japan[C]. Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants, 2008: 3.1-3.8.
[11] KITANO H, OKANO S, MOCHIZUKI M, et al. Evaluation of the effect of strength mismatch in under-matched joints on the static tensile strength of welded joints by considering microstructure mechanical discussion on 950 MPa class steel plate welded joint[J]. Welding International, 2014, 28(10/12): 766-774.
[12] YAMAMOTO K, ARAKAWA T, AKAZAWA N, et al. Tensile properties of under-matched weld joints for 950 MPa steel[J]. Journal of High Temperature Society, 2012, 37(3): 133-136.
[13] 曹佳丽, 柴可馨, 付晓月, 等. 800 MPa 级高强度水电钢焊接工艺研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(3): 40-46.

- CAO Jiali, CHAI Kexin, FU Xiaoyue, et al. Study on welding process of 800 MPa high strength hydroelectric steel[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2023, 9(3): 40-46.
- [14] 廖琪. 水电站 800 MPa 高强度结构钢焊接工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 1.
LIAO Qi. Study on welding process of 800 MPa high strength structural steel in hydropower station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 1.
- [15] 郭明星, 王志勇, 杜琼. 乌东德 800 MPa 级高强钢蜗壳焊接关键技术[J]. *人民黄河*, 2019, 41(增刊 2): 203-206.
GUO Mingxing, WANG Zhiyong, DU Qiong. Key technology of 800 MPa high strength steel volute welding in Wudongde Hydropower Station[J]. *Yellow River*, 2019, 41(Suppl.2): 203-206.
- [16] 马玉葵, 王献奇, 闫海桥. 乌东德水电站 800 MPa 级高强钢蜗壳焊接技术[J]. *云南水力发电*, 2020, 36(2): 126-129.
MA Yukui, WANG Xianqi, YAN Haiqiao. Welding technology of 800 MPa high strength steel volute in Wudongde Hydropower Station[J]. *Yunnan Water Power*, 2020, 36(2): 126-129.
- [17] 陈洁. 800 MPa 级水电网板调质工艺与组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 1.
CHEN Jie. Quenching and tempering process, microstructure and properties of 800 MPa grade steel plate for hydropower station[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015: 1.
- [18] 朱志勇. 脉冲激光对 B950CF 高强钢复合焊接头组织及性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2021: 20-67.
ZHU Zhiyong. Effect of pulsed laser on microstructure and properties of B950CF high strength steel hybrid welding joint[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021: 20-67.
- [19] 闫凯鹏, 郝世英, 张骁勇, 等. X80 管线钢焊接热影响区不同区域的组织性能[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(23): 147-149.
YAN Kaijuan, HAO Shiyong, ZHANG Xiaoyong, et al. Microstructure and mechanical properties in different welding heat affected zones of X80 pipe steel[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(23): 147-149.
- [20] 张骁勇, 高惠临, 毕宗岳, 等. 焊接热输入对 X80 焊管焊缝组织与性能的影响[J]. *材料工程*, 2010(9): 66-70.
ZHANG Xiaoyong, GAO Huilin, BI Zongyue, et al. Effects of welding heat input on microstructure and properties of welding seam in X80 grade welded pipe[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010(9): 66-70.
- [21] 张骁勇, 李青霞, 徐学利, 等. 焊接热输入对 X80 管线钢及其焊管内焊缝粗晶区韧性的影响[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(9): 1-4.
ZHANG Xiaoyong, LI Qingxia, XU Xueli, et al. Effect of welding heat input on toughness of coarse-grained zone of X80 pipeline steel and inside weld in welded pipe[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(9): 1-4.
- [22] 陈楷. X80 管线钢临界粗晶区组织与性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022: 23-24.
CHEN Kai. Study on microstructure and properties of inter-critically reheated coarse grained heat-affected zone of X80 pipeline steel[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2022: 23-24.
- [23] 张灵芝, 徐学利, 李光, 等. X100 管线钢埋弧焊缝焊接热影响区组织性能研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(17): 37-40.
ZHANG Lingzhi, XU Xueli, LI Guang, et al. Microstructure and properties of welding heat affected zone of X100 pipeline steel submerged arc weld[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(17): 37-40.
- [24] 丁庆丰. 800 MPa 级水电钢 TMCP 工艺及焊接热影响区组织与性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017: 56-77.
DING Qingfeng. TMCP processing of 800-MPa-grade steel used for hydropower penstocks and microstructure and properties of welding heat affected zone[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017: 56-77.
- [25] 邱福祥, 罗松云, 程浩轩, 等. 800 MPa 水电网用高强钢焊接性能研究[J]. *金属材料与冶金工程*, 2021, 49(2): 16-23.
QIU Fuxiang, LUO Yunsong, CHENG Haoxuan, et al. Study on welding performance of 800 MPa high strength steel for hydropower[J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2021, 49(2): 16-23.
- [26] 朱腾辉, 张敏敏, 李达, 等. 热输入对 800 MPa 级水电网焊缝组织性能的影响[J]. *电焊机*, 2017, 47(1): 68-73.
ZHU Tenghui, ZHANG Minmin, LI Da, et al. Effects of different heat input on microstructure and properties of welding seam in 800 MPa grade high strength steel for hydropower[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(1): 68-73.
- [27] DESANDRE D A, BENZERGA A A, TVERGAARD V, et al. Material inertia and size effects in the Charpy V-notch test[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2004, 23(3): 373-386.
- [28] 陈静华. 大厚度金属材料冲击试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 22-25.
CHEN Jinghua. Heavy section metallic materials impact test method research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 22-25.
- [29] KOBAYASHI T, KAZINO T, KAMIMURA M, et al. Basic principle of dynamic fracture toughness evaluation by computer aided instrumented impact testing (CAI) system[C]//Proceedings of The 7th International Conference on Fracture (ICF7). 1989: 651-658.
- [30] 莫华均, 伍晓勇, 李国云, 等. 反应堆压力容器材料动态断裂韧性测试方法研究[C]. 中国核学会 2009 年学术年会, 2009, 5: 75-79.
MO Huajun, WU Xiaoyong, LI Guoyun, et al. Methods of measuring dynamic fracture toughness on reactor pressure vessel material[C]. 2019 Academic Annual Meeting of China Nuclear Society, 2009, 5: 75-79.
- [31] 唐丽英, 李江, 詹英杰, 等. 试验温度及热老化对 Incoloy 800H 合金冲击性能的影响[J]. *热力发电*, 2021, 50(3): 49-55.
TANG Liying, LI Jiang, ZHAN Yingjie, et al. Effects of test temperature and thermal aging on impact performance of Incoloy 800H[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(3): 49-55.
- [32] YAMAMOTO I, KOBAYASHI T. Evaluation method of dynamic fracture toughness by the computer-aided instrumented Charpy impact testing system[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1993, 55(2): 295-312.
- [33] 于兆斌, 张庄. 921A 钢动态断裂韧性及韧-脆转变的分析[J]. *物理测试*, 2006(5): 5-7.
YU Zhaobin, ZHANG Zhuang. Dynamic fracture toughness and characteristic of ductile-brittle transition in steel 921A[J]. *Physics Examination and Testing*,

- 2006(5): 5-7.
- [34] 于秀娥, 代文科, 孙绍广, 等. 不同摆锤刀刃对管线钢夏比冲击试验的影响及分析[J]. 中国测试, 2011, 37(6): 21-23.
YU Xiue, DAI Wenke, SUN Shaoguang, et al. Effect of different pendulum striking edge on Charpy impact test results for pipeline steel[J]. China Measurement & Test, 2011, 37(6): 21-23.
- [35] 李小陶. 示波冲击曲线浅析[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(10): 18-21.
LI Xiaotao. Analysis of oscillographic impact curve[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2020, 56(10): 18-21.
- [36] 许天旱, 周翻身, 罗皓荣. 试样厚度对结构钢冲击韧性的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2022, 58(7): 18-22.
XU Tianhan, ZHOU Fanshen, LUO Haorong. The influence of sample thickness on the impact toughness of structural steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2022, 58(7): 18-22.

(责任编辑 邓玲惠)

广告目次

《热力发电》	封三
Endress+Hauser	后彩插 1
国核自仪系统工程有限公司	后彩插 2
南京常荣声学股份有限公司	后彩插 3
美尔森碳制品(上海)有限公司	后彩插 4
西安热工研究院有限公司	后彩插 5—31
隔而固(青岛)振动控制有限公司	后彩插 32