

温度对 SA508-III 钢焊缝金属断裂韧度的影响

李相清, 丁振宇, 包士毅, 高增梁
(浙江工业大学 过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 杭州 310014)

摘 要: 为了获得温度对 SA508-III 钢焊缝金属断裂韧度的影响, 采用本构曲线法 (CCM, constitutive curve method)、ASTM 和 ISO 标准对焊缝金属在典型温度下的试验数据进行了处理. 结果表明, 采用 CCM 获得的断裂韧度随温度的升高而降低. 当温度从 20 °C 升高到 100 °C, 从 100 °C 升至 320 °C 时, 断裂韧度分别降低了 11.1% 和 5.4%. 采用扫描电镜观测试样断口形貌发现 SA508-III 钢焊缝金属在典型温度下均呈韧性断裂, 当温度达到 100 和 320 °C 时, 韧窝变浅变小, 因此韧性出现了一定的下降. 研究还发现, 采用 CCM 获得 20 和 100 °C 时的断裂韧度与 ASTM 一致; 获得 320 °C 时的断裂韧度介于 ASTM 和 ISO 之间.

关键词: 钝化线方程; SA508-III 钢; 焊接接头; 断裂韧度

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400179

0 序 言

断裂韧性是评价和保证核电设备结构完整性能力最为关键的参数之一^[1-2]. 金属材料如 SA508-III 钢是核电设备中压力容器的典型用钢^[3]. 由于核压力容器不仅结构复杂而且尺寸较大, 一般采用锻焊结构. 随着大型核电设备及材料国产化的推进, 国产核电材料 SA508-III 钢特别是焊缝金属的断裂韧度指标尤为重要^[3].

目前主要有 ASTM E1820^[4] 和 ISO 12135^[5] 两类标准常被用来进行金属材料的断裂韧度数据处理. Landes^[6]、Arora^[7]、关鹏涛和李相清等人^[8-9] 研究发现这两类标准在钝化线方程、阻力曲线方程和数据有效区间的规定等方面存在较大差异, 从而导致获得的断裂韧度有较大的不同. 课题组^[8-9] 曾采用 Q345R 和 SA508-III 钢母材详细研究了两种标准处理断裂韧度数据带来的差异性, 随后又进行了不同温度下金属材料的断裂韧度测试, 提出了根据材料在测试温度下的单轴拉伸工程应力-应变曲线的特征来选取合适的钝化线方程, 并详细定义了本构曲线法 (constitutive curve method, CCM)^[9]. 杜兵等人^[3] 详细研究了试样尺寸对 SA508-III 钢焊缝金属断裂韧度的影响, 但是对于不同温度下对获得焊

缝金属断裂韧度和温度对其断裂机理的影响研究较少.

文中进行了 20, 100 和 320 °C 条件下的 SA508-III 钢焊缝金属断裂韧度试验, 采用 CCM 对焊缝金属断裂韧度进行了处理, 最后采用 SEM 对焊缝金属紧凑拉伸 (compact tension, CT) 试样的断口形貌进行了观测. 此外, 还采用 ASTM 和 ISO 标准对焊缝金属在不同温度下的断裂韧度数据进行了处理, 对比分析了数据处理方法对焊缝金属断裂韧度的影响.

1 试验方法

试验焊缝金属是选用国内某厂家生产的 150 mm 厚的 SA508-III 钢环形锻件, 其采用窄间隙埋弧焊 (submerged arc welding, SAW) 焊接而成. 焊缝金属最窄处的宽度为 28 mm, 焊接件的总高度为 300 mm, 总长度约为 1 000 mm. 母材和焊丝的化学成分见表 1 和表 2 所示 (其余为 Fe).

采用 ASTM E1820^[4] 标准推荐的 1 吋开侧槽的紧凑拉伸 (compact tension, CT) 试样 (1T-CT). 试样结构及主要设计参数如图 1 所示. 试验采用焊接件的焊缝金属尺寸约为 1 000 mm × 150 mm × 28 mm, 所有试验试样均取自焊缝金属.

按照 GB/T 228.1—2010^[10] 和 GB/T 4338—2006^[11] 推荐的方法进行焊缝金属在 20, 100 和 320 °C 条件

表 1 SA508-III 钢材料成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of SA508-III steel

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
0.24	0.08	1.35	0.82	0.16	0.51	0.008	≤ 0.001

表 2 SAW 焊丝材料成分 (质量分数, %)
Table 2 Chemical compositions of SAW wire

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
0.08	0.36	1.59	0.02	0.02	0.02	0.007	0.003

表 3 SA508-III 钢焊缝金属力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of SA508-III weld metal

温度 $T/^\circ\text{C}$	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	有效屈服强度 σ_Y/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
20	550	640	595	23.0	73
100	525	605	565	18.5	68
320	500	620	560	19.0	69

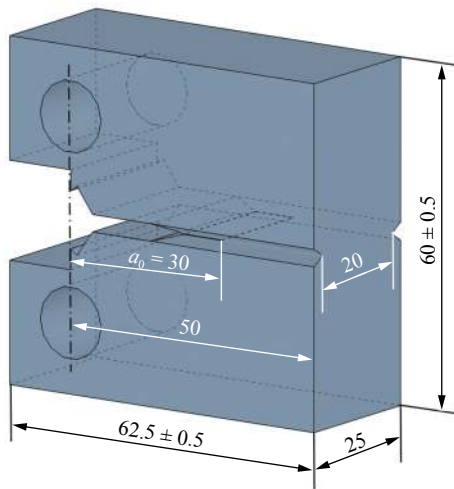


图 1 1T-CT 试样主要参数 (mm)

Fig. 1 Main parameters of 1T-CT specimen

下的单轴拉伸试验. 获得了不同温度下的工程应力-应变曲线 (图 2) 及相关材料参数 (表 3), 为焊缝金属断裂韧度的处理提供依据.

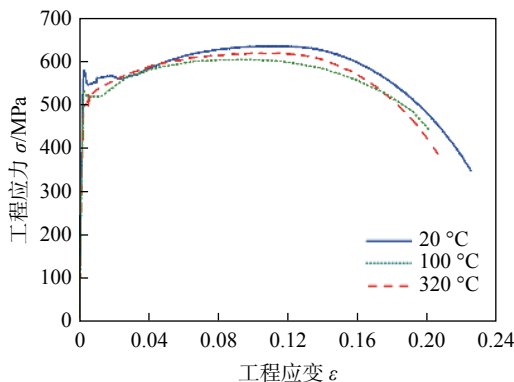


图 2 不同温度下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves at different temperatures

在室温下, 按照 ASTM E1820-17^[4] 标准将所有 CT 试样预制疲劳裂纹到 30 mm, 预制疲劳裂纹的载荷小于 1000 N, 疲劳裂纹扩展长度设置为 3 mm. 为了减小试验产生的偶然误差, 在每个温度点均成功进行了 3 个试样的断裂韧度测试. 100 和 320 °C

条件下的断裂韧度测试在高温炉中进行, 分别在 CT 试样的上表面、中面和下表面固定有 1 个 K 型热电偶来监测试样的试验温度.

20, 100 和 320 °C 条件下的断裂韧度试验均采用 CT 试样裂纹张开位移 (load line displacement, LLD) 控制, 20 °C 的 LLD 由室温引伸计测量, 100 和 320 °C 的 LLD 由高温引伸计测量, LLD 增量均设为 0.20 mm, 加/卸载速率均设为 1.00 mm/min. 最后对获得的试验数据分别采用 ASTM E1820^[6]、ISO 12135^[7] 及 CCM^[9] 获得 J-R 阻力曲线和断裂韧度.

2 试验结果与分析

不同温度下 SA508-III 钢焊缝金属的工程应力-应变曲线如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 焊缝金属在 20 和 100 °C 条件下有明显的屈服平台, 在 320 °C 时没有明显的屈服平台. 按 CCM^[9] 的钝化线方程选用原则可知: 焊缝金属在 20 和 100 °C 条件下更适合选用 ASTM 钝化线方程来处理断裂韧度数据 (与 ASTM 方法一致), 而在 320 °C 下更适合选用 ISO 钝化线方程来处理断裂韧度数据.

为了研究处理方法对断裂韧度数据处理结果带来的差异, 文中对 20, 100 和 320 °C 的焊缝金属断裂韧度试验数据分别采用 CCM^[9], ASTM^[4] 及 ISO^[5] 标准进行处理. 不同温度下归一化的 J-R 阻力曲线如图 3 所示.

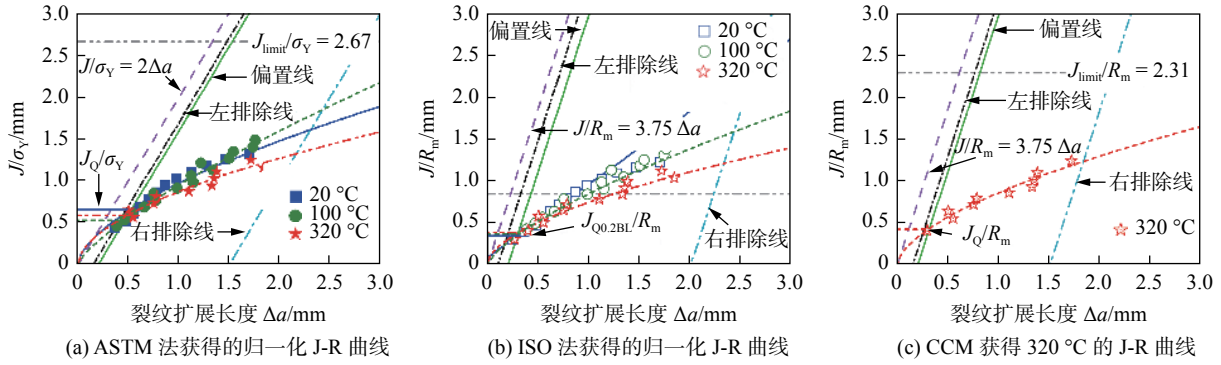


图 3 不同方法获得不同温度下的归一化 J-R 曲线

Fig. 3 Unified J-R curves obtained from various processing methods at different temperatures

综合对比图 3a, 3b 可知, ASTM^[4] 和 ISO^[5] 二者在钝化线方程、有效数据区间和 J-R 阻力曲线有较大的不同, 故二者获得的断裂韧度有很大的不同。

对比图 3b, 3c 可知, 在 320 °C 时采用 CCM 能获得更多的有效数据点参与 J-R 阻力曲线拟合, 能获得更接近焊缝金属在 320 °C 条件下真实的断裂韧度。

不同温度下不同数据处理方法获得的 SA508-III 钢焊缝金属的断裂韧度汇总见表 4。

由表 4 可知, 当温度从 20 °C 升高至 100 °C 时, 选用 CCM^[9] 获得的断裂韧度出现明显下降, 降低 11.1%。进一步升高温度至 320 °C 时, 获得的断

裂韧度比 100 °C 时的值降低 5.4%。

通过对比表 4 中在不同温度下分别采用 CCM, ASTM 和 ISO 三种方法获得的断裂韧度发现: 20 和 100 °C 时, 采用 CCM 获得的断裂韧度与 ASTM 处理得到的结果一致且均大于 ISO 获得的值; 在 320 °C 时, 采用 CCM 获得的断裂韧度介于 ASTM 和 ISO 之间。上述结果表明数据处理方法对获得 SA508-III 钢焊缝金属的断裂韧度会产生显著差异。

为了探究温度对焊缝金属断裂行为的影响机理, 通过 SEM 观察了 CT 试样在 20, 100 和 320 °C 条件下断后的断口形貌, 结果分别如图 4a, 4b, 4c 所示。

由图 4 可知, 在 20, 100 和 320 °C 时 CT 试样断口均出现了明显的韧窝, 表明 SA508-III 钢焊缝金属在这些温度下均属于韧性断裂。通过进一步对比不同温度下的断口特征发现: 在 20 °C 时, 断口的韧窝大且深, 因此会表现出良好的韧性^[3]; 当温度升高至 100 和 320 °C 时, 韧窝变小变浅, 这会导致韧性出现一定的下降。

结合断裂韧度试验结果以及试样断口形貌特征可知, 采用 CCM 获得的断裂韧度与 CT 试样的

表 4 不同处理方法获得的断裂韧度

Table 4 Fracture toughness obtained from various processing methods

温度 <i>T/°C</i>	ASTM E1820 $J_{IC}/(kJ \cdot m^{-2})$	ISO 12135 $J_{0.2BL}/(kJ \cdot m^{-2})$	CCM $J_{IC}/(kJ \cdot m^{-2})$
20	333 ± 35	241 ± 6	333 ± 35
100	296 ± 16	230 ± 11	296 ± 16
320	330 ± 20	255 ± 9	280 ± 12

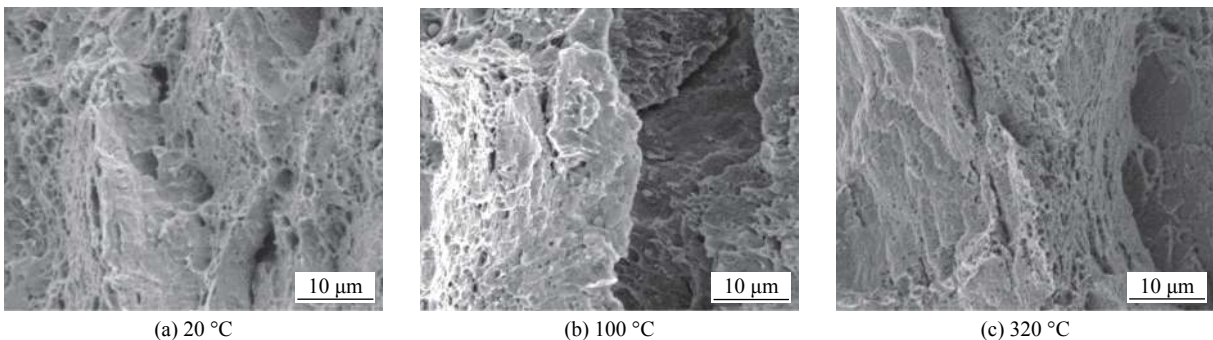


图 4 典型温度下的 CT 试样断口形貌

Fig. 4 SEM photographs of CT specimen at typical temperature

断口特征具有良好的一致性. 该研究结果表明, 选用 CCM^[9] 能够获得 SA508-III 钢焊缝金属在不同温度条件下合适的断裂韧度. 因此, CCM 也可以为焊缝金属断裂韧度数据的处理提供一个借鉴.

文中仅仅探讨了 SA508-III 钢焊缝金属在三个典型温度点 (20, 100 和 320 °C) 的材料特性. 对于 SA508-III 钢焊接接头的热影响区^[12-14] 或其它金属材料的焊缝金属在不同温度下的断裂韧度变化规律还需要做大量的试验进行探索和验证, 在以后的研究中可以重点考虑.

3 结 论

(1) SA508-III 钢焊缝金属在不同温度下的工程应力-应变曲线有明显差异. 其在 20 和 100 °C 时有明显的屈服平台, 更接近于理想弹塑性材料, 在 320 °C 时屈服平台消失, 更接近于幂率硬化材料.

(2) 温度对 SA508-III 钢焊缝金属的断裂韧度具有很大影响. 采用 CCM 获得的断裂韧度随着温度从 20 °C 升高到 320 °C 时, 断裂韧度出现了明显降低. SEM 断口形貌观测结果与宏观断裂韧度试验结果具有较好的一致性.

(3) 不同处理方法获得的断裂韧度具有显著差异. 在 20 和 100 °C 时, 采用 CCM 获得的断裂韧度与 ASTM E1820 一致; 在 320 °C 采用 CCM 获得的断裂韧度介于 ASTM E1820 和 ISO 12135 之间.

参考文献:

- [1] Zhu X K, Joyce J A. Review of fracture toughness (G , K , J , CTOD, CTOA) testing and standardization[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 85: 1 – 46.
- [2] British Energy. Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 4[S]. Gloucester: British Energy Generation Limited, 2007.
- [3] 杜 兵, 孙凤莲, 李小宇, 等. 试样尺寸对 SA508-3 钢焊接接头断裂韧度的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 1 – 5.
Du Bing, Sun Fenglian, Li Xiaoyu, *et al.* Effect of sample size on fracture toughness of SA508-3 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(6): 1 – 5.
- [4] American Society of Testing and Material. Standard test method for measurement of fracture toughness: ASTM. E1820-15[S]. Philadelphia: ASTM, 2017.
- [5] International Organization for Standardization. Metallic materials—Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness: ISO 12135—2002[S]. Geneva: ISO, 2016.
- [6] Landes J D. Evaluation of the ISO J initiation procedure using the EURO fracture toughness data set[J]. International Journal of Fracture, 2007, 145(4): 285 – 297.
- [7] Arora K S, Viehrig H W. Evaluation of the ASTM and ISO J initiation procedures by applying the unloading compliance technique to reactor pressure vessel steels[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011, 36(6): 975 – 984.
- [8] 关鹏涛, 李相清, 郑三龙, 等. ASTM 和 ISO 标准断裂韧度测试方法比较研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 60 – 67.
Guan Pengtao, Li Xiangqing, Zheng Sanlong, *et al.* Study and comparison of test method for measured of fracture toughness between ASTM and ISO standards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 60 – 67.
- [9] 李相清, 丁振宇, 包士毅, 等. 金属材料在不同温度下断裂韧度数据处理方法研究 [J]. 压力容器, 2018, 35(9): 1 – 7.
Li Xiangqing, Ding Zhenyu, Bao Shiyi, *et al.* The processing method for determining the fracture toughness of metallic materials at different temperatures[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(9): 1 – 7.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1[S].北京: 中国标准出版社, 2010.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料 高温拉伸试验方法: GB/T T4338[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] 吕晓春, 何 鹏, 秦 建, 等. 焊接热循环对 SA508-3 钢临界粗晶区组织和性能的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 47 – 50.
Lü Xiaochun, He Peng, Qin Jian, *et al.* Effect of welding thermal cycle on microstructure and properties of intercritically reheated coarse grained heat affected zone in SA508-3 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(12): 47 – 50.
- [13] 吕晓春, 何 鹏, 秦 建, 等. 焊接热循环峰值温度及冷却速率对 SA508-3 钢粗晶区组织和性能的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 13 – 17.
Lü Xiaochun, He Peng, Qin Jian, *et al.* Effect of peak temperature and cooling rate in welding thermal cycle on microstructure and properties of CGHAZ in SA508-3 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 13 – 17.
- [14] 迟露鑫, 麻永林. 核电 SA508-3 钢大型筒体环焊残余应力分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 85 – 88.
Chi Luxin, Ma Yongli. Analysis of residual stresses on large-scale wall pipe circular weld of SA508-3 steel for nuclear power[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 85 – 88.

第一作者简介: 李相清, 男, 1989 年出生, 博士研究生. 主要从事反应堆压力容器结构完整性研究. 发表论文 7 篇. Email: lixiangqing0313@163.com
通信作者简介: 高增梁, 男, 教授. Email: zlgao@zjut.edu.cn