DOI: 10.11858/gywlxb.20230813

热腐蚀和热冲击下炭化釜 Q245R 钢本构关系的研究

刘志远[1,2,3], 陈文飞[4,5,6], 谢作然[1,2], 蒋昊成[1,2,3], 李 进[1,2,3], 朱 珏[1,2,3]

(1. 宁波大学压力容器与管道安全浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315211;
2. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;
3. 宁大 • 宏日 UHPC 力学联合研究院, 浙江 宁波 315211;
4. 宁波市特种设备检验研究院, 浙江 宁波 315211;
5. 宁波市特种设备智能检验与监测重点实验室, 浙江 宁波 315211;
6. 浙江省市场监管特种设备智能检验与监测重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采取电化学加速腐蚀试验对 Q245R 钢试样进行处理, 以模拟炭化釜的实际腐蚀工况, 通过电化学腐蚀拉伸试验, 发现腐蚀不仅改变试样的几何尺寸, 而且导致材料力学性能退化。对 Q245R 钢材料进行不同温度、腐蚀率、应变率 (10^{-3}～1 s^{-1} 低应变率、10～10^2 s^{-1} 中应变率、10^3 s^{-1} 高应变率) 的拉伸试验, 并运用 MATLAB 在 Johnson-Cook 本构方程的基础上进行拟合, 增加特征强度与热处理温度、腐蚀率的关系, 从而确定了材料的本构关系。结果显示, 本构曲线与真实拉伸试验数据吻合较好, 拟合效果良好。

关键词: 炭化釜; Q245R 钢; 腐蚀; Johnson-Cook 本构方程

中图分类号: O347; TG142 **文献标志码:** A

在传统化石能源利用过程中, 大量氮氧化物、二氧化碳、硫氧化物、粉尘等有害物质被释放到大气, 加剧了环境恶化。国家发展和改革委员会在 2016～2030 年能源生产和消费革命战略中指出, 应全面布局能源结构改革工作, 降低煤炭等一次能源的消费, 推动能源清洁化的发展[1]。在此背景下, 既能满足人们对能源的大量需求, 又不对环境造成污染, 且运行成本相对较低的生物质燃烧锅炉应运而生, 在能源行业中所占的比重越来越大。然而, 生物质燃烧锅炉中存在化合物沉积量大、冲刷腐蚀严重、局部温度较高等问题[2−4], 易导致爆管甚至伤人事故。因此, 研究生物质燃烧锅炉在实际工况下的腐蚀和失效机理十分重要[5−6]。

由于生物质燃烧锅炉中盘管的内外温度较高, 生物质中含有较多钾、钠碱性盐, 且生物质中的成分在气流的带动下不断冲刷管壁, 因此, 其力学性能退化主要受温度、化学腐蚀、冲刷 3 大因素影响。另外, 盘管形状以及盘管在生物质燃烧锅炉中的位置和方向不同, 导致其工作温度和受力不同, 即破损程度不尽相同。生物质燃烧锅炉的安全性研究应重点考虑热腐蚀(高温+腐蚀)与热冲刷(高温+高应变率)的耦合作用。目前, 已有报道大多集中在常用材料 20G[7]、15CrMoG[8−9] 和 12Cr1MoVG钢[10−11] 的热腐蚀特性研究以及有关钢材的动态力学性能研究。例如: 于文静等[12] 通过增设与应变率、塑性应变相关的项来替代 Q345 钢的 Johnson-Cook(J-C)动态模型中的温度项; 林莉等[13] 通过试验和数值模拟, 标定了 Q235 钢的 J-C 强度模型和断裂准则参数; 刘禹昕等[14] 基于 2×10^{-4}～5×10^2 s^{-1} 应变率下的拉伸试验, 对 SUS304 不锈钢的 J-C 本构模型进行了修正。然而, 目前尚缺乏高温高应变率下的本构关系和失

* **收稿日期:** 2023-12-14; **修回日期:** 2024-01-12
基金项目: 国家自然科学基金(11972203, 11572162); 宁波市自然科学基金(202003N4152)
作者简介: 刘志远(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属腐蚀性能研究. E-mail: 1956039335@qq.com
通信作者: 朱 珏(1979—), 女, 博士, 教授, 主要从事金属腐蚀性能研究. E-mail: zhujue@nbu.edu.cn

效准则研究。

本研究将对 Q245R 钢试样进行电化学腐蚀试验，进而开展不同温度、腐蚀率、应变率下的拉伸试验，由此对 J-C 本构关系进行改进，以确定材料在真实工况下的本构关系。

1　电化学加速腐蚀试验

采用 Q245R 钢板开展力学性能测试。本研究的腐蚀试验是在其他单阴极电化学腐蚀试验的基础上进行改进，形成双阴极设计方案，弥补了单阴极方案中腐蚀不均匀的缺陷[15]。设置 2 个与拉伸试样形状一致的阴极，确保 2 个阴极与待腐蚀拉伸试样的距离相同，并在待腐蚀试样左右两端同时接上导线，最大程度地保证试样左右两边腐蚀的一致性。试验装置如图 1 所示。

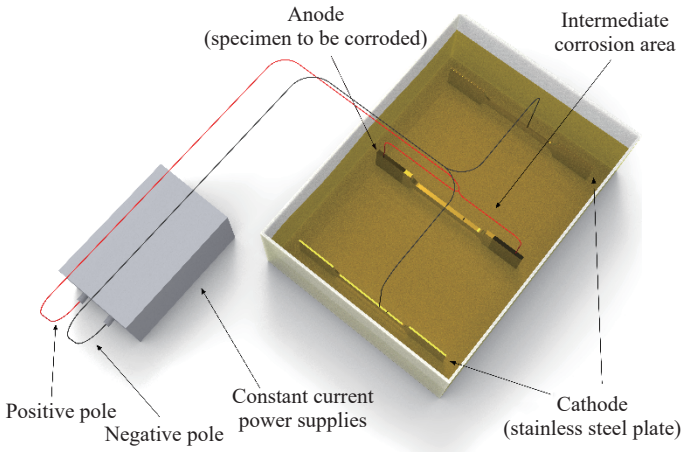


图 1　电化学腐蚀示意图

Fig. 1　Schematic diagram of electrochemical corrosion

选用试件标距长度内的截面面积损失率(简称腐蚀率)φ表征试样的腐蚀程度，计算公式为

$$\varphi = 1 - \frac{d_c \omega_c}{d_0 \omega_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中：d_0、ω_0 分别为原始试件厚度和宽度的实测值(mm)，d_c、ω_c 分别为腐蚀后试件厚度和宽度的实测值(mm)。

设置不同的腐蚀时间，通过电化学腐蚀试验得到腐蚀率分别为 10.7%、20.8%、34.4% 的试样。将腐蚀后的试样放置在 810 型 MTS 试验机上，以 10^{-3} s^{-1} 的应变率进行单轴拉伸试验，得到真实应力-应变曲线、特征强度及断裂应变与腐蚀率的关系，如图 2 和图 3 所示。

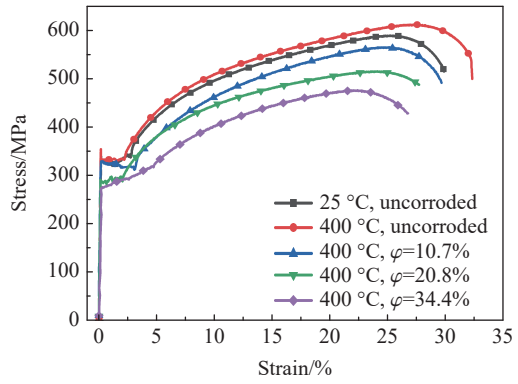


图 2　未腐蚀和腐蚀试样的真实应力-应变曲线

Fig. 2　True stress-strain curves of uncorroded and corroded specimens

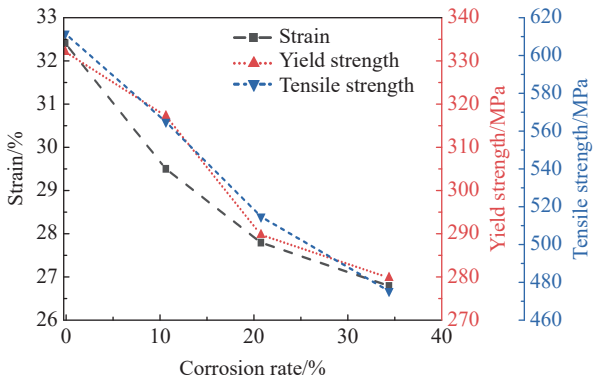


图 3　特征强度及断裂应变与腐蚀率的关系

Fig. 3　Characteristic strength and fracture strain as a function of corrosion rate

从图 2 和图 3 中的数据可以看出，随着腐蚀率的增大，试样的屈服强度、抗拉强度、断裂应变均逐渐减小。对比未腐蚀试样，腐蚀率为 34.4% 的试样的屈服强度降低了 12.8%，抗拉强度降低了 19.2%，断裂应变降低了 10.4%。由此可见，腐蚀不仅削减了试样的几何尺寸，而且造成了材料内在力学性能的退化[16–17]。

2　拉伸试验

由于 Q245R 钢材料在模拟工况下的拐点温度为 400 ℃，因此，以 25、400、500 ℃ 作为温度节点，开展 Q245R 钢的热处理试验。采用双阴极电化学加速腐蚀方法，控制不同的电化学腐蚀时间和通过电流，得到腐蚀率约为 30% 的试样，进而开展拉伸试验。

将未腐蚀与腐蚀率约 30% 的试样分别进行不同温度的热处理，运用 810 型 MTS 试验机开展不同低应变率（10^{-3}、10^{-2}、10^{-1}、1 s^{-1}）下的拉伸试验，绘制真实应力-应变曲线，如图 4 和图 5 所示。可以看出，随着热处理温度的升高，试样的屈服强度和抗拉强度均有所下降，且抗拉强度的下降幅度大于屈服强度的下降幅度[18]。

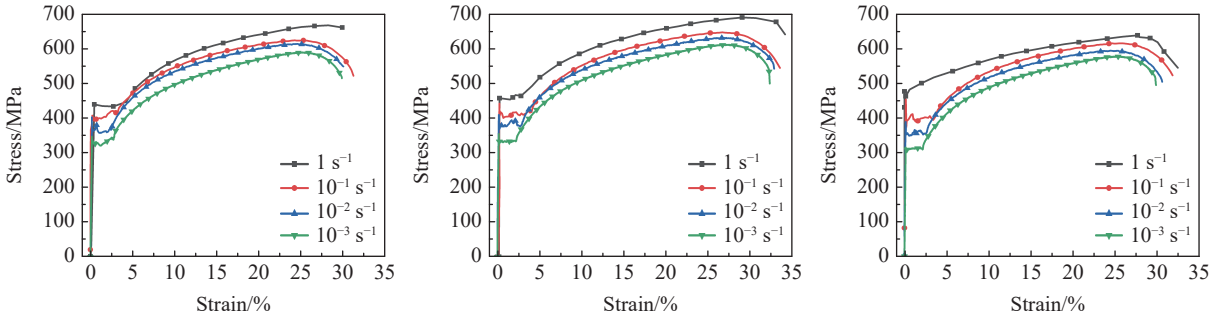


图 4　低应变率不同处理温度下未腐蚀试样的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of uncorroded specimens at different treatment temperatures and low strain rates

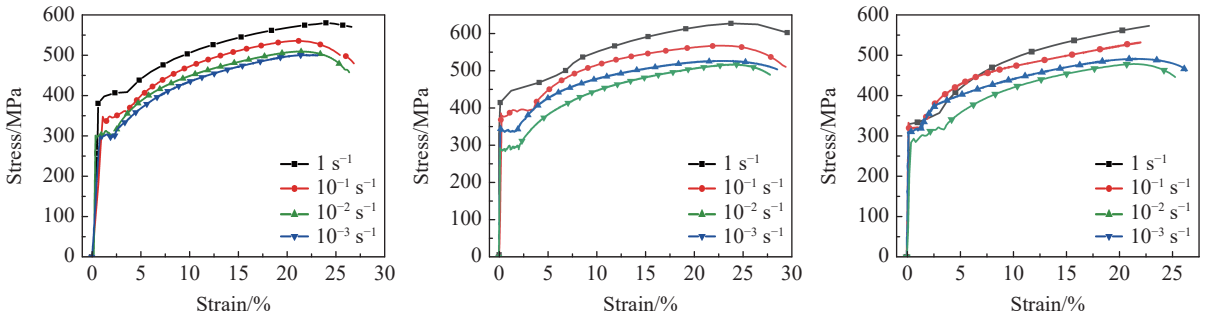


图 5　低应变率不同处理温度下腐蚀试样的应力-应变曲线

Fig. 5　Stress-strain curves of corroded specimens at different treatment temperatures and low strain rates

不同热处理温度和腐蚀工况下试样的屈服强度和抗拉强度随应变率的变化曲线如图 6 和图 7 所示。随着应变率的升高，试样的屈服强度和抗拉强度增大，且屈服强度的增大幅度远大于抗拉强度的增大幅度，说明材料在较高的应变速率下出现了一定程度的应力强化效应[19–20]。

运用 5020 型拉伸试验机开展不同温度、不同应变率和腐蚀状态下试样的中应变率（10、10^2 s^{-1}）拉伸试验，得到真实应力-应变曲线，如图 8 和图 9 所示。由中应变率拉伸试验数据可以看出，随着应变率的升高，屈服强度和抗拉强度均增大。由于腐蚀使试样形成了更多的初始缺陷，因此，腐蚀试样的拉伸曲线更为波折。在不同的温度下，腐蚀试样的抗拉强度相对未腐蚀试样的抗拉强度出现不同程度的降低。

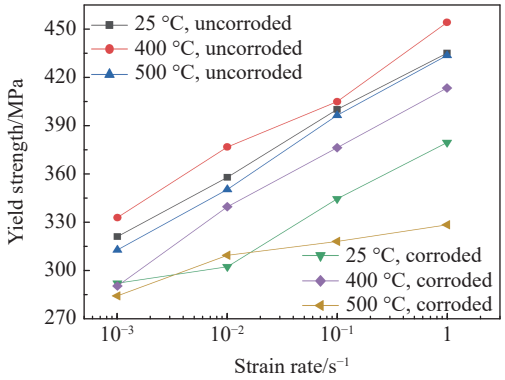


图 6　屈服强度随应变率的变化

Fig. 6　Variation of yield strength with strain rate

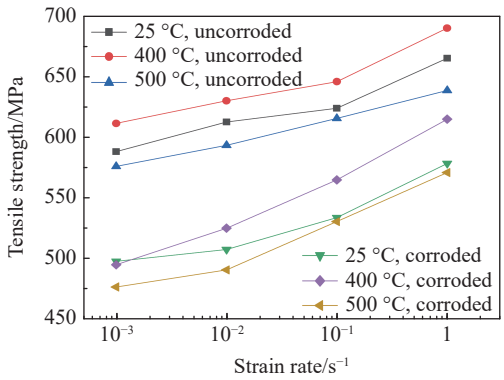


图 7　抗拉强度随应变率的变化

Fig. 7　Variation of tensile strength with strain rate

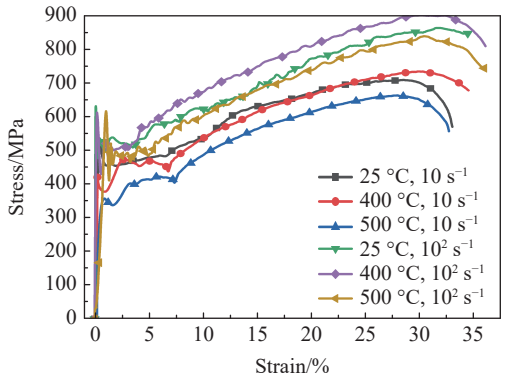


图 8　中应变率不同温度下未腐蚀试样的应力-应变曲线

Fig. 8　Stress-strain curves of uncorroded specimens at different treatment temperatures and medium strain rates

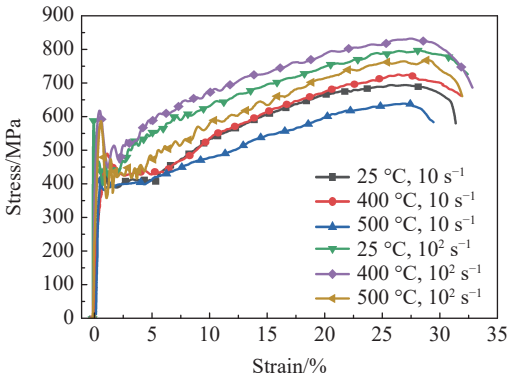


图 9　中应变率不同温度下腐蚀试样的应力-应变曲线

Fig. 9　Stress-strain curves of corroded specimens at different treatment temperatures and medium strain rates

运用传统 Hopkinson 拉杆装置以及改装后的高温一体控制 Hopkinson 拉杆装置，分别开展了 10^3 s^{-1} 高应变率下的拉伸试验。对于薄片试样，基于传统 Hopkinson 拉杆装置的试验方法是在拉杆端部开孔，试样两端开孔，将试样与拉杆的开孔对齐，并用螺栓连接固定。这种方法需要对试样和部分杆端进行加热，致使杆的温度呈梯度分布。改装后的高温一体控制 Hopkinson 拉杆装置可以消除温度梯度对杆弹性模量和屈服强度的影响。采用试样与加载杆脱离的方法，将试样加热至一定的温度后，通过同步机构推动试样与杆件快速钩接，同时完成加载。该方法所获试验数据的可靠性主要依赖于冷接触时间的控制，为此，主要进行以下改进。

(1) 在两杆的端部开槽，将厚度为 0.9 mm 的试样嵌入 2 个小圆柱块的凹槽中，并用螺栓固定。小圆柱块与拉杆的材质相同，以减小波阻抗的影响。试样与两杆的接触面通过高温陶瓷隔绝，以减缓热传导。

(2) 在入射杆上安装传感器，与试样的高温同步控制装置相连接，如图 10 所示。通过同步控制装置，推动试样与杆件快速钩接，同时完成加载，以缩短冷接触时间。

调整气压表为 0.55 MPa，待红外测温枪测得的温度达到指定温度时，由电磁阀控制触发（保证触发时间足够短），通过编程控制触发到应力波到达试样的间隔时间为 20～50 ms。读取粘贴在入射杆和透射杆上的应变片的应变信号，得到真实应力-应变曲线，如图 11 和图 12 所示。由此得到，在 10^3 s^{-1} 的高应变率下，当温度为 400 和 500 ℃ 时，试样的拉伸特征强度分别为 898.3 和 802.7 MPa。

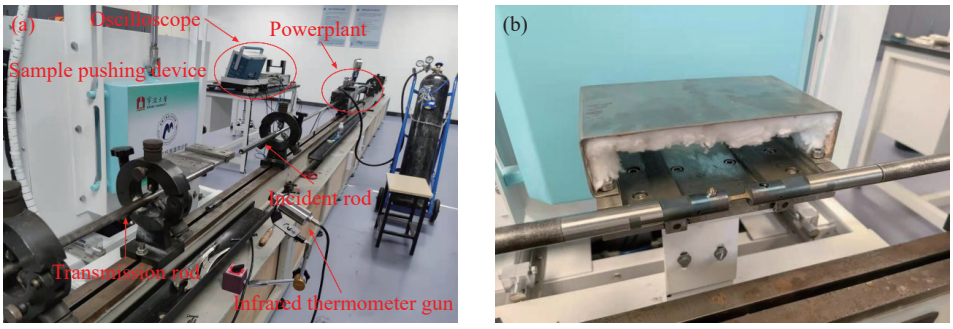


图 10　高温一体控制 Hopkinson 拉杆装置

Fig. 10　High temperature integrated control Hopkinson tensile bar device

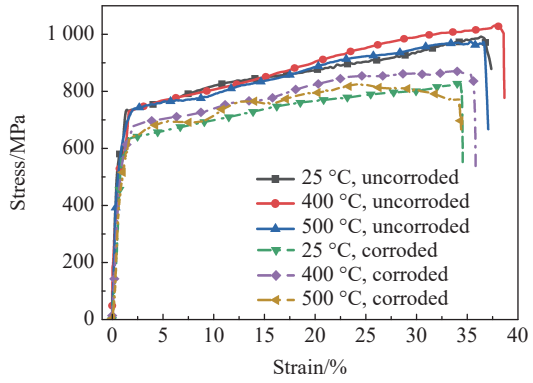


图 11　不同温度和腐蚀工况下试样的应力-应变曲线

Fig. 11　Stress-strain curves of specimens at different treatment temperatures and corrosion conditions

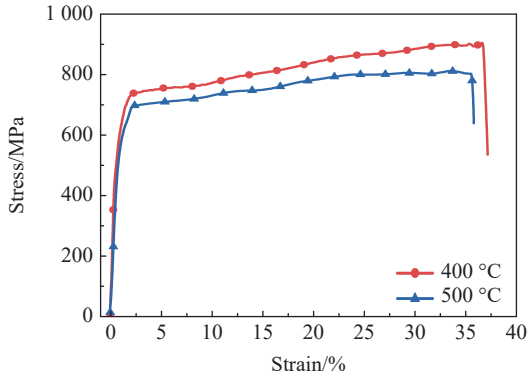


图 12　高温高应变率下未腐蚀试样的应力-应变曲线

Fig. 12　Stress-strain curves of uncorroded specimen at high temperature and high strain rate

3　考虑腐蚀率的本构关系

未腐蚀和腐蚀拉伸试样在不同温度和应变率(10^{-3}～10^{3} s^{-1})下的特征强度数据列于表 1，其中：$\dot{\varepsilon}$为应变率。

表 1　未腐蚀和腐蚀试样的特征强度

Table 1　Characteristic strength of uncorroded and corroded specimens

Specimen	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	Characteristic strength/MPa			Specimen	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	Characteristic strength/MPa		
		25 ℃	400 ℃	500 ℃			25 ℃	400 ℃	500 ℃
Uncorroded	10^{-3}	588.9	611.4	576.0	Corroded	10^{-3}	497.6	594.7	476.4
	10^{-2}	612.6	630.1	593.3		10^{-2}	507.4	524.9	490.5
	10^{-1}	623.9	645.9	615.5		10^{-1}	533.6	564.8	530.4
	1	665.2	690.1	638.6		1	578.4	614.9	570.9
	10	716.5	742.9	662.0		10	682.8	712.9	625.8
	10^{2}	861.7	898.9	837.3		10^{2}	792.8	829.7	762.8
	10^{3}	980.1	1025.7	963.8		10^{3}	826.5	867.4	775.9

J-C 本构方程将塑性应变项、应变率项和温度项进行解耦，在描述材料的高温动态特性中被广泛应用。传统 J-C 本构方程为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n})\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^{m}\right] \tag{2}$$

式中：σ为应力，A 为环境温度下的屈服强度，B、n、C 和 m 分别为应变硬化参数、应变硬化指数、应变率硬化参数和材料热软化指数，$\dot{\varepsilon}_0$、T、T_r 和 T_m 分别为参考应变率、当前温度、参考温度和熔化温度。

由生物质燃烧锅炉盘管力学性能的演变规律可知，热处理和腐蚀主要影响材料的屈服强度和抗拉强度。因此，在 J-C 本构模型的基础上进行拟合，增加特征强度与热处理温度、腐蚀率的关系，从而确定材料的本构关系。经不同温度的热处理后，通过不同应变率拉伸试验得到试样的应力-应变曲线，从而确定 J-C 本构模型[21−22] 中的各项参数，即将应变硬化效应、应变率强化效应、温度软化效应解耦，采用三步法进行参数求解[23]。对于 Q245R 钢材，400 ℃ 为其性能的拐点温度。结合上述拉伸试验的数据，分两部分对本构进行拟合。

3.1　传统 J-C 本构方程拟合

首先，根据传统 J-C 本构方程，单纯考虑塑性应变，当温度为室温、应变率为参考应变率时，J-C 本构方程可简化为

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \tag{3}$$

通过准静态应变率（10^{-3} s^{-1}）下未腐蚀试样的常温拉伸试验数据（见图 1），解耦拟合得到 A、B、n。

准静态屈服强度 A 由试验数据直接得出

$$A = \sigma_{eq} = 320.9\ \text{MPa} \tag{4}$$

式中：σ_{eq}为等效应力。

对式 (3) 进行转换，得到

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n\ln\varepsilon \tag{5}$$

通过最小二乘法进行拟合，得到 n=655，B=0.6。拟合效果良好，方差为 0.964，拟合数据与真实数据的对比如图 13 所示。

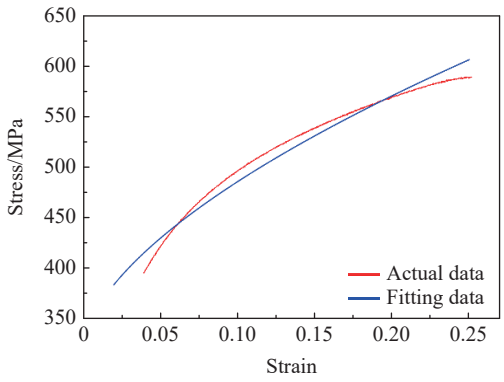


图 13　25 ℃ 下应力-应变曲线拟合的对比

Fig. 13　Comparison of stress-strain curves fitting at 25 °C

确定应变硬化项后，选取应变为 0.25，参考应变率为 10^{-3} s^{-1}，温度为室温 25 ℃，得到变换公式

$$\sigma/(320.9 + 655\times 0.25^{0.6}) = 1 + C\ln\left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}}\right) \tag{6}$$

式中：σ和$\dot{\varepsilon}$的单位分别为 MPa 和 s^{-1}。

根据上述拉伸试验，得到温度为 25 ℃，应变为 0.25，应变率分别为 10^{-3}、10^{-2}、10^{-1}、1、10、10^2、10^3 s^{-1} 时，试样的应力分别为 587.1、612.7、623.1、662.3、701.5、824.9、902.7 MPa。利用 MATLAB，采用最小二乘法拟合得到参数 C=6.286×10^{-2}。

确定应变硬化项和应变率强化项后，选取应变为 0.3，应变率为 10^3 s^{-1}，变换式 (2) 可得

$$\ln\sigma = \ln(A + B\varepsilon^{n}) + \ln\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + \ln\left[1 - \left(\frac{T - T_{\mathrm{r}}}{T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{r}}}\right)^{m}\right] \tag{7}$$

式中：T 的单位为 ℃，材料的熔化温度 T_{m} 为 1493 ℃，室温 T_{r} 为 25 ℃。

通过高温高应变率下的拉伸试验数据，对 J-C 本构方程中的参数 m 进行拟合，通过最小二乘法拟合，得到 m=1.585。

因此，拟合得到的传统 J-C 本构方程为

$$\sigma = (320 + 655\varepsilon^{0.6})\left(1 + 6.286\times10^{-2}\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}}\right)\left[1 - \left(\frac{T - 25}{1493 - 25}\right)^{1.585}\right] \tag{8}$$

式中：σ、$\dot{\varepsilon}$和T的单位分别为 MPa、s^{-1} 和 ℃。

3.2　J-C 本构方程改进

首先，对屈服强度与热处理温度的关系进行拟合。为了更好地描述力学性能随温度的变化趋势，并体现其拐点温度特征，采用 Logistic 函数作为转折的基本函数。Logistic 函数是一种常见的 S 形函数，可以模拟一些突变曲线[24]，其基本表达式为

$$P(t) = \frac{KP_0\mathrm{e}^{rt}}{K + P_0(\mathrm{e}^{rt} - 1)} \tag{9}$$

式中：P_0、r、K 分别为初始值、增长率、容量上限。对热处理温度进行无量纲化处理，设 T^*为无量纲温度

$$T^* = \frac{T - T_{\mathrm{r}}}{T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{r}}} \tag{10}$$

得到热处理温度为 25、300、400、500、600 ℃ 时的无量纲温度分别为 0、0.1873、0.2554、0.3236、0.3917。

将无量纲温度 0.2554 作为转折点，采用 Logistic 函数，拟合得到屈服强度（A_{eq}）随无量纲温度的变化曲线，如图 14 所示。可见，拟合效果良好，方差为 0.993，拟合公式为

$$A_{\mathrm{eq}} = (T^* - 0.2554)\left[\frac{360.6}{1 + 2^{100(T^* - 0.2554)}} - 314.6\right] + 332.4 \tag{11}$$

式中：A_{eq}的单位为 MPa。

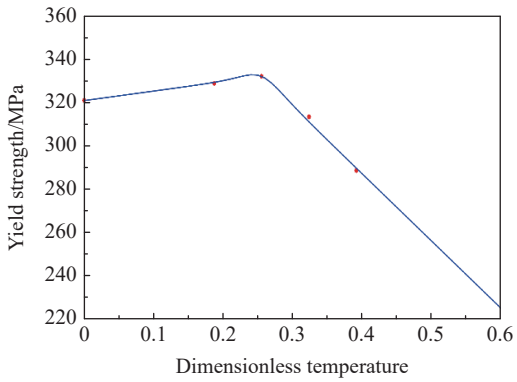


图 14　屈服强度-无量纲温度曲线

Fig. 14　Yield strength-dimensionless temperature curve

然后，对抗拉强度与热处理温度的关系进行拟合。由拉伸试验数据可知，试样经过不同温度的热处理后，力学性能发生不同程度的变化，因此，基于拐点温度及 Logistic 函数，单纯考虑塑性应变，当温度为室温、应变率为参考应变率时，在传统 J-C 本构方程的基础上增加一项与应变相关的参数项，即

$$\sigma = A_{\mathrm{eq}}(T^*) + K(T^*)\varepsilon + B\varepsilon^{n} \tag{12}$$

通过拟合可得

$$\sigma=\left\{(T^*-0.2554)\left[\frac{360.6}{1+2^{100(T^*-0.2554)}}-314.6\right]+332.4\right\}(1-0.2913\varepsilon)+655\varepsilon^{0.6} \tag{13}$$

式中：σ的单位为 MPa。

由腐蚀试样的拉伸试验数据（见图 2）可得材料屈服强度、抗拉强度、断裂应变的退化规律。因此，将力学性能特征强度与腐蚀率之间的关系简化为线性关系

$$\sigma=(1-k\varphi)\sigma_0 \tag{14}$$

式中：k为折减系数，σ_0为未腐蚀试样的应力。通过拟合可得 k=1.25，且腐蚀率应小于 80%。

最终得到

$$\sigma=(1-1.25\varphi)(A_{T^*}+655\varepsilon^{0.6})\left[1+6.286\times10^{-2}\ln\left(1+\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}}\right)\right]\left(1-T^{*1.585}\right) \tag{15}$$

$$A_{T^*}=\left\{(T^*-0.2554)\left[\frac{360.6}{1+2^{100(T^*-0.2554)}}-314.6\right]+332.4\right\}(1-0.2913\varepsilon) \tag{16}$$

式中：σ和ε的单位分别为 MPa 和 s^{-1}。

4　结　论

(1) 通过改进电化学腐蚀试验方案，形成对称的电场，最大程度地保证试样两侧腐蚀一致，从而精确、高效地制备出拉伸试验所需的腐蚀试样。

(2) 电化学腐蚀试样拉伸试验结果显示：腐蚀导致试样的力学性能退化；与未腐蚀试样相比，腐蚀率为 34.4% 的试样的屈服强度降低 12.8%，抗拉强度降低 19.2%，断裂应变降低 10.4%。

(3) 改进的 Hopkinson 高温拉杆同步控制装置实现了材料的高温高应变率加载。

(4) 在 J-C 本构方程的基础上，通过不同工况下的拉伸试验，拟合得到了考虑应变硬化效应、应变率强化效应、温度软化效应、热处理效应和腐蚀弱化效应等诸多因素的本构方程。

参考文献：

[1] 能源生产和消费革命战略 2016—2030 [J]. 电器工业, 2017(5): 39–47.
Energy production and consumption revolution strategy 2016–2030 [J]. China Electrical Equipment Industry, 2017(5): 39–47.

[2] 闫景凤. 生物质锅炉应用现状分析 [J]. 农机使用与维修, 2023(1): 56–58.
YAN J F. Application status of biomass boiler [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2023(1): 56–58.

[3] PRONOBIS M, WEJKOWSKI R, KALISZ S, et al. Conversion of a pulverized coal boiler into a torrefied biomass boiler [J]. Energy, 2023, 262: 125442.

[4] 孙广见. 生物质能产业遇瓶颈专家呼吁加强基础研究 [J]. 能源研究与利用, 2019(6): 11.
SUN G J. Biomass energy industry encounters bottlenecks, experts call for strengthening basic research [J]. Energy Research & Utilization, 2019(6): 11.

[5] 姜春光, 李定青, 王鹏, 等. 生物质 CFB 锅炉受热面沉积结构和空间分布特性研究 [J]. 山东电力技术, 2023, 50(3): 63–68.
JIANG C G, LI D Q, WANG P, et al. Study on deposition structure and spatial distribution characteristics on heating surface of biomass-fired CFB boiler [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(3): 63–68.

[6] WU W Y, WEI B, LI G H, et al. Study on ammonia gas high temperature corrosion coupled erosion wear characteristics of circulating fluidized bed boiler [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 132: 105896.

[7] 胡曼, 倪文啸, 薛俊峰, 等. 20G 钢锅炉烟道管开裂原因 [J]. 理化检验: 物理分册, 2022, 58(9): 35–38.
HU M, NI W X, XUE J F, et al. Cracking reasons of 20G steel boiler flue pipe [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2022, 58(9): 35–38.

[8] 邵青, 王宇翔, 李林聪. 电力锅炉四管材料发展及失效研究进展 [J]. 电站系统工程, 2023, 39(2): 85–88.
SHAO Q, WANG Y X, LI L C. Research progress on development and failure of four-tube materials for utility boilers [J].

Power System Engineering, 2023, 39(2): 85–88.

[9] 崔轩伟, 都兴红, 白岩, 等. 垃圾焚烧炉关键部件高温腐蚀研究现状 [J]. 辽宁化工, 2021, 50(12): 1846–1849.
CUI X W, DU X H, BAI Y, et al. Research status of high temperature corrosion of key components of waste incinerator [J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(12): 1846–1849.

[10] XU L G, HUANG Y J, WANG J, et al. Experimental investigation of high-temperature corrosion properties in simulated reducing-sulphidizing atmospheres of the waterwall fireside in the boiler [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2020, 98(4): 905–918.

[11] 张炜, 何建军. 垃圾焚烧炉热管用 12Cr1MoVG 钢在不同碱金属混合熔盐中的热腐蚀行为 [J]. 机械工程材料, 2019, 43(2): 13–17, 22.
ZHANG W, HE J J. Thermal corrosion behavior in mixed molten salt of different alkali metals of 12Cr1MoVG steel for heat pipe in waste incinerator [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(2): 13–17, 22.

[12] 于文静, 史健勇, 赵金城. Q345 钢材动态力学性能研究 [J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 28–30, 63.
YU W J, SHI J Y, ZHAO J C. Research of dynamic mechanical behavior of Q345 steel [J]. Building Structure, 2011, 41(3): 28–30, 63.

[13] 林莉, 支旭东, 范锋, 等. Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(9): 153–158, 172.
LIN L, ZHI X D, FAN F, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9): 153–158, 172.

[14] 刘禹昕, 朱涛, 肖守讷, 等. 轨道车辆 SUS304 不锈钢材料动态力学性能与本构模型修正 [J]. 机械强度, 2022, 44(1): 74–80.
LIU Y X, ZHU T, XIAO S N, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive model modification of SUS304 stainless steel used in carbodies of trains [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(1): 74–80.

[15] 贾紫月, 杨飏, 马厚标. 均匀腐蚀海工结构钢拉伸试验研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(Suppl 1): 135–142.
JIA Z Y, YANG Y, MA H B. Experimental study on the tensile properties of uniform corroded marine structure steel [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(Suppl 1): 135–142.

[16] WANG J J, GUO W G, GAO X S, et al. The third-type of strain aging and the constitutive modeling of a Q235B steel over a wide range of temperatures and strain rates [J]. International Journal of Plasticity, 2015, 65: 85–107.

[17] LIU P J, QUAN Y M, DING G. Dynamic mechanical characteristics and constitutive modeling of rail steel over a wide range of temperatures and strain rates [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019: 6862391.

[18] 王金萍. 冷轧低碳马氏体钢不同速率和温度拉伸的性能与断裂机制 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
WANG J P. Tensile properties and fracture mechanism of cold rolled low carbon martensite steel at different strain rates and temperatures [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

[19] 梁明华, 魏娜, 李亮, 等. 拉伸速率对 X80M 管线钢拉伸性能的影响 [J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(6): 40–43.
LIANG M H, WEI N, LI L, et al. Influence of test rate on tensile property of X80M pipeline steel [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(6): 40–43.

[20] HORMOZI R, BIGLARI F, NIKBIN K. Experimental and numerical creep-fatigue study of type 316 stainless steel failure under high temperature LCF loading condition with different hold time [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 141: 19–43.

[21] 郭子涛, 舒开鸥, 高斌, 等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的失效准则 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1325–1332.
GUO Z T, SHU K O, GAO B, et al. J-C model based failure criterion and verification of Q235 steel [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6): 1325–1332.

[22] 林莉, 黄博, 肖新科, 等. Q355B 钢动态材料性能研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 231–237.
LIN L, HUANG B, XIAO X K, et al. Behavior of dynamic material Q355B steel based on the Johnson-Cook model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(18): 231–237.

[23] 董泽民, 陈伟, 刘璐璐, 等. 基于 J-C 模型的 GH907 高温合金动态本构关系及失效关系 [J]. 机械工程材料, 2021, 45(10): 43–49.
DONG Z M, CHEN W, LIU L L, et al. Dynamic constitutive relationship and failure relationship of GH907 superalloy based on J-C model [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(10): 43–49.

[24] JING B, QIAN Z, ZAREIPOUR H, et al. Wind turbine power curve modelling with logistic functions based on quantile regression [J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3048.

Constitutive Relationship of Q245R Steel of Carbonization Kettle under Thermal Corrosion and Thermal Shocking

LIU Zhiyuan[1,2,3], CHEN Wenfei[4,5,6], XIE Zuoran[1,2], JIANG Haocheng[1,2,3], LI Jin[1,2,3], ZHU Jue[1,2,3]

（1. *Zhejiang Provincial Engineering Research Center for the Safety of Pressure Vessel and Pipeline*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
2. *Key Laboratory of Impact and Safety Engineering*, *Ministry of Education*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
3. *Ningbo University · Hongri UHPC Mechanics Joint Research Institute*, *Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
4. *Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute*, *Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
5. *Ningbo Key Laboratory of Intelligent Inspection and Monitoring of Special Equipment*, *Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
6. *Key Laboratory of Intelligent Inspection and Monitoring of Special Equipment*, *Zhejiang Administration for Market Regulation*, *Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*）

Abstract: An electrochemical accelerated corrosion test was conducted on the Q245R steel sample to simulate the actual corrosion conditions of the carbonization kettle. It was found that corrosion not only causes changes in geometric dimensions, but also causes degradation of the material's mechanical properties. Tensile tests were conducted on Q235R steel materials at different temperatures, corrosion rates, and strain rates (low strain rate of 10^{-3}−1 s^{-1}, medium strain rate of 10−10^{2} s^{-1}, and high strain rate of 10^{3} s^{-1}). A fitting method was carried out based on the modified Johnson-Cook constitutive equation and MATLAB software, which provides the relationship between its characteristic strength, heat treatment temperature and corrosion rate. According to the results, it can be seen that the fitting curve is in good agreement with the experimental curve.

Keywords: carbonization kettle; Q245R steel; corrosion; Johnson-Cook constitutive equation