

引用格式: 张书畅, 王红鸿, 成志超, 等. 超低温用高锰奥氏体钢的物理性能和力学性能[J]. 中国材料进展, 2024, 43(12): 1138–1144.
ZHANG S C, WANG H H, CHENG Z C, *et al.* Physical and Mechanical Properties of Cryogenic High Manganese Austenitic Steel[J]. Materials China, 2024, 43(12): 1138–1144.

超低温用高锰奥氏体钢的物理性能和力学性能

张书畅^{1,2}, 王红鸿¹, 成志超¹, 彭思远³, 张富伟⁴, 李晓晨⁴

(1. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 湖北 武汉 430081)

(2. 武汉科技大学理学院, 湖北 武汉 430081)

(3. 武汉科技大学 高性能钢铁材料及其应用省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430081)

(4. 招商局金陵鼎衡船舶(扬州)有限公司, 江苏 扬州 225217)

摘 要: 超低温用高锰奥氏体钢以其优异的低温和室温综合力学性能, 将成为新型能源液化天然气(LNG)和液化氢气(LH₂)的储运装备用钢。该材料在冶炼、轧制、焊接、冷加工及热加工过程中, 需要完备的物理和力学性能参数作为制定各项工艺的理论基础, 但目前文献中缺乏相关报道。测定了牌号为 HMA400 的高锰奥氏体低温钢及配套 JMn25 焊丝的密度、电阻系数、热膨胀系数、热导率、熔距、比热容、泊松比、杨氏模量、屈服强度、抗拉强度、冲击吸收功等物理性能和力学性能参数, 以期的高锰奥氏体低温钢的制造和应用提供可靠的物理和力学参量。

关键词: 超低温用高锰奥氏体钢; 物理性能; 力学性能; 储运装备用钢; 热膨胀系数

中图分类号: TG142.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)12-1138-07

Physical and Mechanical Properties of Cryogenic High Manganese Austenitic Steel

ZHANG Shuchang^{1,2}, WANG Honghong¹, CHENG Zhichao¹, PENG Siyuan³,
ZHANG Fuwei⁴, LI Xiaochen⁴

(1. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

(2. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

(3. State Key Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

(4. China Merchants Jinling Shipyard (Yangzhou) Dingheng Co., Ltd., Yangzhou 225217, China)

Abstract: Cryogenic high manganese austenitic steel with the excellent mechanical properties at low temperature and room temperature, will become the storage and transportation equipment materials for liquefied natural gas (LNG) and liquefied hydrogen (LH₂). In the process of smelting, rolling, welding, cold working and hot working, physical and mechanical properties are needed as the theoretical basis for formulating process parameters, but there is a lack of relevant reports in the current literature. In this paper, we measured the density, resistivity, coefficient of thermal expansion, coefficient of thermal conductivity, melting range, specific heat capacity, Poisson ratio, Young's modulus, yield strength, tensile strength, absorbed energy of HMA400 cryogenic high manganese austenitic steel and supporting JMn25 welding wires, in order to provide reliable physical and mechanical parameters for the manufacture and application of cryogenic high manganese austenitic steel.

Key words: cryogenic high manganese austenitic steel; physical properties; mechanical properties; steel for storage and transportation equipment; coefficient of thermal expansion

收稿日期: 2023-02-19

基金项目: 湖北省重点研发计划资助项目(2021BID003)

第一作者: 张书畅, 男, 1994 年生, 硕士研究生

通讯作者: 王红鸿, 女, 1967 年生, 教授, 博士生导师,

Email: wanghonghong@wust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202302012

1 前言

随着世界能源格局演变, 为了实现可持续发展, 新型的清洁能源(如天然气和氢气)取代传统能源成为大势所趋。经济的稳定发展以及“双碳”目标的实施, 未来几

年乃至几十年内,我国将迎来新型清洁能源的快速发展^[1-4]。实践和研究表明,液化是输送和储存天然气和氢气的高效方法^[5]。液化天然气(liquefied natural gas, LNG)的环境温度为 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液化氢气(liquefied hydrogen, LH_2)的环境温度为 $-256\text{ }^{\circ}\text{C}$,这种超低温服役环境是目前世界上钢铁材料面临的最低的服役温度,同时也对用于 LNG、 LH_2 储运装备建造的钢铁材料提出了挑战。

高锰奥氏体钢是指 Mn 含量为 22.5%~25.5% (质量分数,下同)的新型钢铁材料,通过高 C (0.35%~0.55%) 以及其它合金元素,如 Cr, Cu, Al 等的共同作用,在 $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温到 -163 , $-256\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温范围内,保持稳定的奥氏体组织^[6,7];同时可以通过调控合金元素含量使层错能在 $18\sim 30\text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$,使材料在形变过程中变形机制以产生大量孪晶为主(TWIP 效应)^[8-11],从而获得优异的综合力学性能,如室温屈服强度 $\geq 400\text{ MPa}$, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温冲击韧性 $\geq 27\text{ J}$,超低温延伸率 $\geq 22\%$ ^[12]。由于 Mn 元素的价格远低于昂贵的 Ni 元素和 Cr 元素,相比于现今常用的 9Ni 钢和 304L 不锈钢,高锰奥氏体钢有着显著的经济性,这使它成为极具竞争力的超低温钢铁材料。

对高锰奥氏体钢板制定冶炼、轧制、冷热成型加工、焊接材料加工制备、焊接工艺,以及分析和研究其强韧化机理时,均需要该钢铁材料的固液相温度、密度、热导率、线膨胀系数等物理性能参量。而现有文献中鲜有该钢铁材料完整物理性能的测试和分析报道。

本工作对新型高锰奥氏体钢及相匹配的焊丝进行系列物理和力学性能测试,为该钢的批量生产、焊接材料的研制和生产,及 LNG 和 LH_2 储运装备建造过程的加工和焊接技术研究提供数据支撑。

2 实验

实验用新型高锰奥氏体钢(简称高锰钢)母材为由热轧工艺制备成的 14 mm 厚板。主要化学成分为 0.35%~0.55% C、22.5%~25.5% Mn、0.10%~0.50% Si、3.0%~4.0% Cr、0.30%~0.70% Cu。金相实验表明,实验用高锰钢为全奥氏体组织,如图 1 所示。试验用高锰钢焊丝成分体系与钢板匹配,微观组织也为全奥氏体组织。

2.1 密度

密度是对特定体积内的质量的度量,国际单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。在室温下进行超低温高锰奥氏体钢的真密度测定。在母材芯部取试样 5 件,试样尺寸均为 $9\text{ mm}\times 9\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 。

采用全自动气体置换法真密度仪美国麦克 AccuPyc II 1340 测试样品密度,依据 GB/T 40401—2021 进行。为确保气体完全去除以及样品与分析气体达到适当的热平衡,

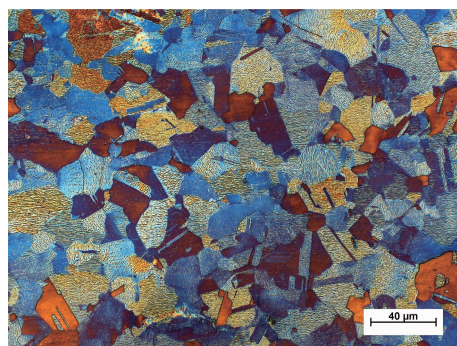


图 1 高锰奥氏体钢金相照片

Fig. 1 Metallographic image of high manganese austenitic steel

进行体积测量时,重复测量样品骨架体积 5 次。用渗透性最强的惰性气体氦气作为置换气体,在分析天平上测质量,依据密度公式 $\rho = m/V$ 计算得出真密度值。其中, ρ 是待测样品密度, m 是待测样品质量, V 是待测样品骨架体积。

2.2 电阻系数

电阻系数(电阻率)是描述材料导电性能的物理量,在数值上等于单位长度、单位横截面物质的电阻,国际单位为 $\Omega\cdot\text{m}$ 。在室温下进行高锰钢母材与焊丝的电阻系数测定试验。沿母材轧制方向取试样 3 件,尺寸均为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,焊丝取样 1 件,尺寸为 $\Phi 3.2\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 。

采用中国北京柯瑞 CTA-3 热电材料测试系统测试,依据国标 GB/T 351—2019 进行,恒定电压为 10 V 。

2.3 热膨胀系数

热膨胀系数是量度固体材料热膨胀程度的物理量。即单位长度、单位体积的物体,温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其长度或体积的相对变化量。热膨胀系数是评价材料热稳定性好坏的一个重要指标,国际单位为 K^{-1} 。在 $-130\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测定高锰钢样品的热膨胀系数。从母材芯部取试样 1 件,试样长度方向平行于板材轧向,尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。

采用德国耐驰 DIL402C 热膨胀仪测定高锰钢试样热膨胀系数。测定时以 $2\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率升温,使样品处在一定的温度程序控制且负载力可忽略不计的情况下,测量样品在测试方向上的长度随温度或时间的变化。

2.4 热导率

热导率(导热系数)是物质导热能力的量度。指在稳态传热条件下,两侧表面温差为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 1 m 厚材料,在一定时间内,通过 1 mm^2 传递的热量,国际单位为 $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。在 24 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下分别测定高锰钢样品的热导率。从母材芯部取试样 3 件,试样厚度方向垂直于板材轧向,尺寸均为 $\Phi 12.7\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。

采用德国耐驰 LFA427 激光导热系数测量仪测定高

锰钢试样热导率, 依据标准 ASTM E1461 Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method 进行。激光导热直接测试的是材料的热扩散系数, 其基本原理是控制炉体在一定温度下, 由激光源发射光脉冲均匀照射样品下表面, 使试样均匀加热, 通过红外检测器测量样品上表面相应温升过程, 得到温度升高和时间的关系曲线, 使用合适的模型拟合, 得到热扩散系数, 最终由公式 $\lambda = \alpha \rho C_p$ 计算可得热导率数据。其中, λ 是待测样品热导率, α 是待测样品热扩散系数, ρ 是待测样品密度, C_p 是待测样品比热容。比热容与密度取本文其它部分测得的值。试验设置激光电压为 480 V, 脉冲宽度为 0.5 ms。

2.5 熔距

熔距(熔程)是指一种物质初熔至终熔时的温度范围, 国际单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。在 0~1450 $^{\circ}\text{C}$ 范围下测定高锰钢母材的熔距。沿母材轧制方向取试样 1 件, 尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

试验使用热重分析(thermogravimetric analysis, TG), 这是一种在程序控制温度下, 测量样品质量和温度关系的技术, 采用德国耐驰 STA449F35 同步热分析仪测试, 依据国标 GB/T 1425—2021 进行, 升温速率为 10 K $\cdot\text{min}^{-1}$ 。测量物质与温度关系的技术。同时使用差式扫描量热法(differential scanning calorimeter, DSC)即在程序控制温度下, 测量给予参比物和给予样品的能量之差(ΔQ)随温度(T)的变化。在整个测试过程中, 样品和参比物温差控制在极小的范围内。当样品发生物理或者化学变化时, 控温装置将输入一定功率能量, 以保持温度平衡。对样品升温过程的 TG 曲线质量下降区间与 DSC 曲线吸收峰出现的温度范围进行分析, 得出高锰钢样品的熔距。

2.6 比热容

比热容(比热容量)是单位质量物质的热容量, 即单位质量物体改变单位温度时吸收或放出的热量, 国际单位为 J $\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$ 。在室温下测定高锰钢母材的比热容。沿母材轧制方向取试样 1 件, 尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

采用间接法测定比热容, 实验仪器为德国耐驰 STA449F35 同步热分析仪, 依据国标 GB/T 1425—2021 进行, 升温速率为 10 K $\cdot\text{min}^{-1}$ 。测量标准蓝宝石样和高锰钢试样的 DSC 曲线, 通过式(1)换算得到高锰钢试样比热容:

$$C_2 = \frac{(Y_2 - Y_0) \cdot M_1}{(Y_1 - Y_0) \cdot M_2} \cdot C_1 \quad (1)$$

其中, M_1 : 蓝宝石质量; M_2 : 待测样品质量; Y_0 : 待测温度下基线的 DSC 数值; Y_1 : 待测温度下蓝宝石的 DSC 数值; Y_2 : 待测温度下待测样品的 DSC 数值; C_1 : 蓝宝石的比热容; C_2 : 待测样品的比热容。

具体操作步骤是: 在一定的升温速率和气氛下, 不放置样品, 测量一条曲线, 即为基线; 然后将质量为

M_1 、比热容为 C_1 的标准蓝宝石样放置在样品室; 最后将蓝宝石样换成质量为 M_2 、比热容未知的高锰钢试样, 最终得出 3 条曲线。通过式(1)计算得到高锰钢试样的比热容。使用间接法测比热容一般升温速率选择 10 或 20 K $\cdot\text{min}^{-1}$, 较慢的升温速率有利于试验结果的准确性, 故本次试验中采用 10 K $\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率。

2.7 泊松比

泊松比(横向变形系数)是反映材料横向变形的弹性常数, 为材料受单轴拉伸或压缩的轴向应力所产生的横向应变与相应轴向应变的负比值。在室温下测定高锰钢母材的泊松比。从母材芯部取试样 1 件, 试样长度方向垂直于试板轧向, 尺寸为 3 mm \times 10 mm \times 45 mm。

采用中国深圳三思 UTM5305H 电子万能试验机测试, 依据 GB/T 22315—2008 进行。泊松比测试过程中较慢的应变速率有助于采集数据, 试验选择 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率。测得横向变形和相应轴向变形, 得到横向与相应轴向的应变, 两者的比值即为泊松比。

2.8 杨氏模量

杨氏模量是描述固体材料抵抗形变的能力的物理量, 为轴向拉应力与轴向应变成线性比例关系范围内的轴向拉应力与轴向应变的比值, 国际单位为 MPa。在室温下测定高锰钢母材的杨氏模量。从母材芯部取试样 1 件, 为 $\Phi 5 \text{ mm}$ 的棒状样, 如图 2 所示, 试样长度方向垂直于板材轧向。

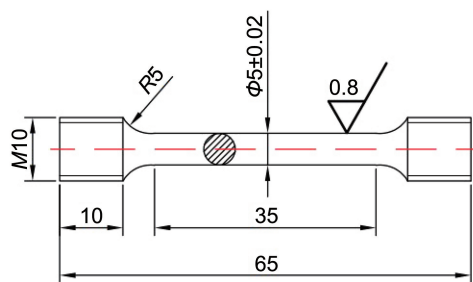


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen size

采用中国深圳三思 UTM5305H 电子万能试验机测试, 依据 GB/T 22315—2008 进行。试验应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 试样原始标距为 35 mm, 因使用了引伸计, 试验标距采用引伸计标距, 为 25 mm。

2.9 强度

屈服强度和抗拉强度统称为材料的强度指标, 屈服强度是当金属材料呈现屈服现象时的屈服极限。对于无明显屈服现象出现的金属材料, 规定以产生 0.2% 残余变形的应力值作为其屈服极限, 国际单位为 MPa。抗拉强度是金属由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临

界值,也是金属在静拉伸条件下的最大承载能力。国际单位为 MPa。在室温下测定高锰钢母材的屈服强度与抗拉强度。从母材芯部取试样 1 件,试样长度方向垂直于板材轧向,拉伸试样尺寸同 2.8 节中试验试样相同。

采用中国深圳三思 UTM5305H 电子万能试验机测试,依据 GB/T 228—2002 进行。屈服强度试验条件同 2.8 节所述试验条件。抗拉强度测试试验未加引伸计,应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,原始标距为 35 mm。

2.10 -196 °C 冲击吸收功

冲击吸收功是指在冲击载荷作用下,金属材料抵抗破坏的能力,为采用摆锤冲击试验机使试样发生断裂需要的能量,国际单位为 J。

在-196 °C 下测定高锰钢母材的冲击吸收功,沿母材轧制方向取试样 1 件,尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm,开 V 型缺口,角度为 45°,缺口根部半径为 0.25 mm,缺口深度为 2 mm。采用中国北京 NI300 金属摆锤冲击试验机测试,依据国标 GB/T 229—2020 进行。

3 结果与讨论

3.1 密度

如表 1 所示,重复测试 5 次,测得试样体积平均值为 0.6605 cm^3 ;质量平均值为 5.2323 g,真密度平均值为 $7.9217 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。铁的密度为 $7.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,普通碳素钢的密度为 $7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。Cr-Ni 奥氏体不锈钢的密度为 $7.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。相比于上述常用铁基钢铁材料,高锰钢的密度是最高的。有研究表明,焊接时的传热过程与材料的密度、热导率、比热容相关。材料的密度越大,在焊接过程中所吸收的热量和通过材料散失的热量也就越多,越难以达到焊接温度^[13, 14]。

表 1 高锰钢密度

Table 1 Density of high manganese steel

No.	$T/^\circ\text{C}$	V/cm^3	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	27.67	0.6601	7.9268
2	27.76	0.6603	7.9243
3	27.77	0.6603	7.9242
4	27.78	0.6605	7.9214
5	27.85	0.6613	7.9121
Average	27.77	0.6605	7.9217

3.2 电阻系数

铁的室温电阻系数为 $0.1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$,镍铬合金的室温电阻系数为 $1.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。如表 2 所示,高锰钢母材室温电阻系数平均值为 $1.089 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$,焊丝室温电阻系数平均值为 $0.808 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$,高于铁,与镍铬合金相

当。金属材料的热传导主要是自由电子迁移所致,因而与其电阻率有直接的关系^[15]。高锰钢较高的电阻率在焊接过程中可能导致产热高、散热困难的问题。

表 2 母材室温电阻系数

Table 2 Room temperature resistivity of base metal

No.	$T/^\circ\text{C}$	$\rho/(\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m})$	R/Ω
1	21.313	1.096	0.307
2	21.651	1.077	0.302
3	22.016	1.080	0.302
4	22.343	1.103	0.309
Average	21.831	1.089	0.305

表 3 焊丝室温电阻系数

Table 3 Room temperature resistivity of wire

No.	$T/^\circ\text{C}$	$\rho/(\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m})$	R/Ω
1	20.204	0.809	0.563
2	20.208	0.805	0.560
3	20.258	0.810	0.564
Average	20.223	0.808	0.562

3.3 热膨胀系数

如图 3 所示,高锰钢热膨胀系数在-130~-112 °C 温度区间内线性增大至 $1.09 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,在-111~-90 °C 温度区间内缓慢减小至 $0.97 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 并稳定,升温至-12 °C 后,热膨胀系数再次开始减小,到 17 °C 时减小至 $0.77 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,随后平均热膨胀系数开始增大,到 30 °C 时增大至 $1.13 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。试样变形量在整个试验的温度区间一直增加,并且随着温度的升高,变形速率也逐渐

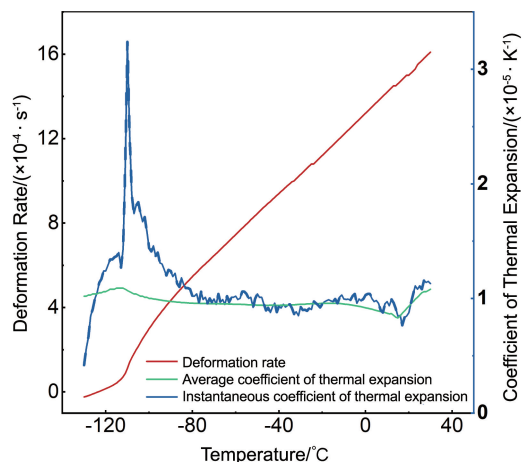


图 3 -130~30 °C 高锰钢热膨胀系数

Fig. 3 Coefficient of thermal expansion of high manganese steel from -130 to 30 °C

增大。瞬时膨胀系数在试验温度区间内,先增大后减小并趋于稳定,15℃左右时再次减小,在试验后期又增大,在-110℃取得最大值 $3.240 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,在17℃取得最小值 $0.988 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。室温24℃时热膨胀系数为 $1.01 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。铁与普通碳钢的常温热膨胀系数约为 $1.01 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,奥氏体不锈钢约为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。高锰钢的热膨胀系数与碳钢相当,小于奥氏体不锈钢。在奥氏体不锈钢的焊接过程中,因其较大的热膨胀系数和较小的热导率需要较小的热输入。在高锰钢焊接中同样如此,热输入量过大可能会导致严重的热变形和焊接残余应力,形成较宽的热影响区,使得焊缝的强度和质量下降^[16]。

3.4 热导率

如表4和表5所示,分别列出了高锰钢母材在24和100℃下的热扩散系数和热导率。试验中所需密度和比热容在给定温度下为定值,采用本文中试验测得的值,不在表中列出。测得高锰钢母材密度为 $7.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;24℃比热容为 $0.45 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$,100℃比热容为 $0.48 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$ 。可得高锰钢在24和100℃下的平均热导率为15.50和 $8.87 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。高锰钢的热导率随温度升高而降低。不锈钢在20℃时热导率为 $15.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,高锰钢在此温度下的热导率与不锈钢相当。热导率在焊接升温过程中变化范围较大,对焊接残余应力影响显著,同时较小的热导率有利于焊接过程的稳定性^[14, 17]。

表4 24℃时高锰钢热导率

Table 4 Coefficient of thermal conductivity of high manganese steel at 24℃

No.	$T/^\circ\text{C}$	$\alpha/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
1	23.6	4.37	15.56
2	23.9	4.32	15.39
3	24.1	4.36	15.54
Average	23.9	4.35	15.50

表5 100℃时高锰钢热导率

Table 5 Coefficient of thermal conductivity of high manganese steel at 100℃

No.	$T/^\circ\text{C}$	$\alpha/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
1	95.2	2.33	8.86
2	95.7	2.34	8.91
3	96.4	2.32	8.83
Average	95.7	2.33	8.87

3.5 熔距

如图4所示为高锰钢样品试验的TG-DSC曲线。TG曲线的变化表明母材在升温过程中的质量变化了1.1%,

DSC曲线在1397.6~1412.9℃范围内存在一个吸热峰。以上结果对应了样品在试验中的熔融过程,其温度变化反映了样品的熔距,可以得出高锰钢试样的熔距为15.3℃。

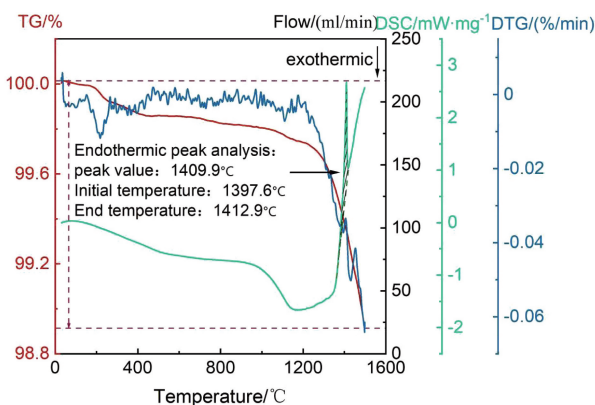


图4 TG-DSC曲线

Fig. 4 TG-DSC curves

3.6 比热容

母材比热容测定结果如图5所示,在20~80℃范围内,高锰钢试样的比热容先增加后减少,在60℃时达到最大值,为 $0.495 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$ 。在0~100℃下,铁的比热容约为 $0.46 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$,奥氏体不锈钢的比热容约为 $0.50 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$ 。高锰钢的比热容与二者相近。同密度一样,比热容对焊接过程的传热有影响,比热容越大,达到焊接温度越困难^[13, 14]。

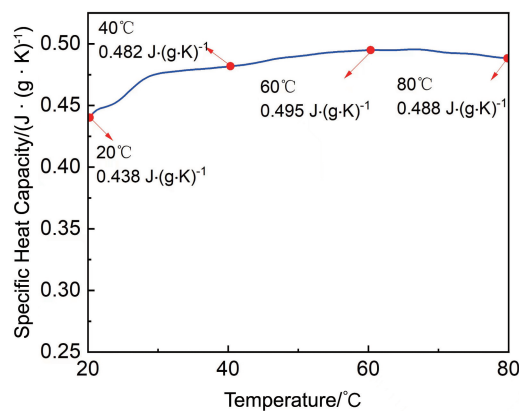


图5 20~80℃高锰钢比热容

Fig. 5 Specific heat capacity of high manganese steel at 20~80℃

3.7 泊松比

表6为8次试验测得的试验数据,通过计算得出高锰钢泊松比为0.270。低碳钢Q235的泊松比为0.24~0.28,低合金钢16Mn的泊松比为0.25~0.30,合金钢40CrNiMoA的泊松比为0.25~0.30。高锰钢泊松比与上述材料相当。

表 6 高锰钢泊松比

Table 6 Poisson ratio of high manganese steel

No.	$\Delta L/\text{mm}$	$\Delta d/\text{mm}$	Poisson ratio
1	0.355	0.096	0.271
2	0.359	0.097	0.270
3	0.360	0.098	0.271
4	0.362	0.098	0.271
5	0.362	0.098	0.270
6	0.363	0.098	0.270
7	0.365	0.099	0.270
8	0.367	0.099	0.270
Average	0.362	0.098	0.270

3.8 杨氏模量

根据所测实验数据绘制高锰钢室温拉伸工程应力-应变曲线, 如图 6 所示。试验所测得高锰钢杨氏模量为 175 GPa。低碳钢 08# 钢的杨氏模量为 203 GPa, 中碳钢 45# 的杨氏模量为 203 GPa, 低合金钢 1Cr13 的杨氏模量为 217 GPa, 合金钢 15CrMo 的杨氏模量为 212 GPa。在上述钢铁材料中, 高锰钢的杨氏模量值最小。

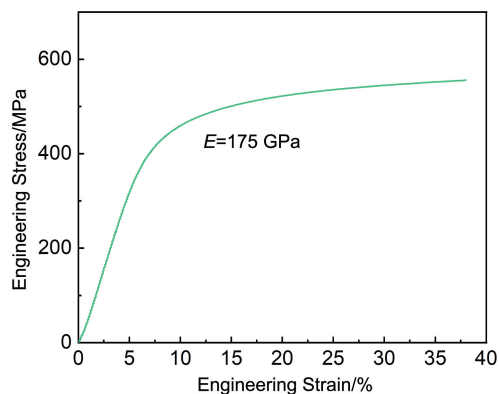


图 6 高锰钢室温应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of high manganese steel at room temperature

3.9 强度

如图 7 所示, 试验测得高锰钢母材的屈服强度和抗拉强度分别为 482 和 714 MPa。奥氏体 S30408 不锈钢的屈服强度和抗拉强度分别为 205 和 515 MPa。大部分奥氏体不锈钢的屈服强度都在 170~230 MPa。高锰钢的屈服强度和抗拉强度均高于奥氏体不锈钢。

3.10 -196 °C 冲击吸收功

试验测得高锰钢母材在 -196 °C 下的冲击吸收功为 144 J, 图 8 为试样冲击过程的示波冲击曲线。0~a 阶段, 载荷随位移线性增加, 此时冲击过程中组织发生弹性形变; a~b 阶段, 载荷随位移波动变化, 此时组织发生塑

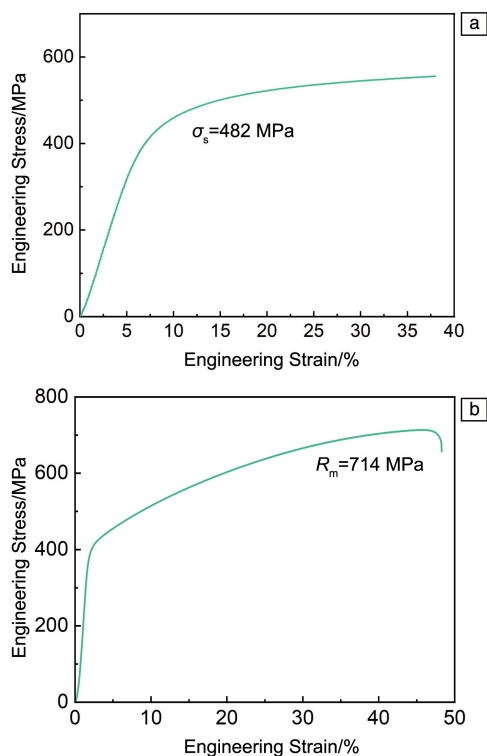


图 7 应力-应变曲线: (a) 添加引伸计, (b) 未添加引伸计

Fig. 7 Stress-strain curve: (a) with extensometer; (b) without extensometer

性变形, 裂纹开始萌生; b~c 阶段, 载荷随位移增加下降, 斜率保持稳定, 此时为裂纹稳定扩展阶段。图中 X_l 表示从起点到峰值力 F_m 的距离, X_p 则表示峰值力 F_m 到裂纹扩展结束的距离, 两者分别为 3.97 和 5.24 mm。 X_l 和 X_p 对应的裂纹萌生能量 (E_l) 和裂纹扩展能量 (E_p) 分别为 62 和 82 J。

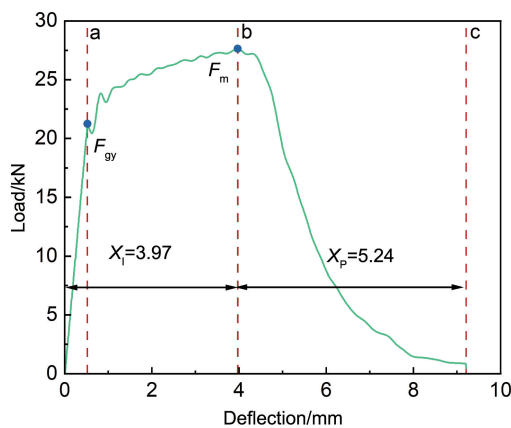


图 8 示波冲击曲线

Fig. 8 Oscillographic impact load-deflection curve

4 结 论

新型高锰奥氏体钢的物理性能及力学性能: 室温下

密度为 $7.9217 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 室温下母材电阻系数为 $1.089 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, 焊丝电阻系数为 $0.808 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; 室温 24°C 下热膨胀系数为 $1.01 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; 24°C 下热导率为 $15.50 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; 100°C 下热导率为 $8.87 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; 熔距为 15.3°C ; $20 \sim 80^\circ\text{C}$ 下比热容为 $0.438 \sim 0.495 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$; 室温下泊松比为 0.27, 杨氏模量为 175 GPa, 屈服强度为 482 MPa, 抗拉强度为 714 MPa; -196°C 冲击吸收功为 144 J。

参考文献 References

- [1] 宿成, 吴伟, 冯光宏, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(9): 3153–3162.
SU C, WU W, FENG G H, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(9): 3153–3162.
- [2] 黄晟, 王静宇, 郭沛, 等. 化工进展[J], 2022, 41(11): 5695–5708.
HUANG S, WANG J Y, GUO P, *et al.* Chemical Industry and Engineering Progress[J], 2022, 41(11): 5695–5708.
- [3] 孟亮, 王红鸿, 陈亚魁, 等. 电焊机[J], 2020, 50(11): 120–123+147.
MENG L, WANG H H, CHEN Y K, *et al.* Electric Welding Machine[J], 2020, 50(11): 120–123+147.
- [4] FAN X Y, LI Y T, QI Y C, *et al.* Materials Letters[J], 2021, 304: 130596.
- [5] 张云峰, 李腾飞, 滕振超. 当代化工[J], 2021, 50(7): 1662–1666.
ZHANG Y F, LI T F, TENG Z C. Contemporary Chemical Industry[J], 2021, 50(7): 1662–1666.
- [6] 陈欢, 孙新军, 王小江, 等. 材料科学与工艺[J], 2018, 26(5): 11–18.
CHEN H, SUN X J, WANG X J, *et al.* Materials Science and Technology[J], 2018, 26(5): 11–18.
- [7] WANG H H, MENG L, LUO Q, *et al.* Materials Science & Engineering: A[J], 2020, 788: 139573.
- [8] BOUAZIZ O, ALLAIN S, SCOTT C P, *et al.* Current Opinion in Solid State & Materials Science[J], 2011, 15(4): 141–168.
- [9] LUO Q, WANG H H, LI G Q, *et al.* Materials Science & Engineering: A[J], 2019, 753: 91–98.
- [10] 刘文金, 杨蔚涛, 杨旗, 等. 机械工程材料[J], 2020, 44(8): 10–16.
LIU W J, YANG W T, YANG Q, *et al.* Materials for Mechanical Engineering[J], 2020, 44(8): 10–16.
- [11] TANG J, HE S D, MO Y, *et al.* Materials Characterization[J], 2022, 190: 112024.
- [12] 孙淑侠. 武汉船舶职业技术学院学报[J], 2021, 20(4): 144–148+152.
SUN S X. Journal of Wuhan Institute of Shipbuilding Technology[J], 2021, 20(4): 144–148+152.
- [13] 胡礼木, 胡波. 机械工程学报[J], 2006(7): 235–238.
HU L M, HU B. Journal of Mechanical Engineering[J], 2006(7): 235–238.
- [14] 闫德俊, 刘雪松, 杨建国, 等. 焊接学报[J], 2012, 33(9): 24–28+114.
YAN D J, LIU X S, YANG J G, *et al.* Transactions of the China Welding Institution[J], 2012, 33(9): 24–28+114.
- [15] 张馨月, 陈志炜, 李文, 等. 中国材料进展[J], 2022, 41(12): 990–1004.
ZHANG X Y, CHEN Z W, LI W, *et al.* Materials China[J], 2022, 41(12): 990–1004.
- [16] 罗晔, 魏丽华. 金属加工(热加工)[J], 2021(11): 5–10.
LUO Y, WEI L H. Machinist Metal Forming[J], 2021(11): 5–10.
- [17] 王泰. 高热导率中厚钢板深熔 TIG 焊接机理及工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
WANG T. Study on the Mechanism and Technology of Deep Penetration TIG Welding of Medium-Thick Steel Plate with High Thermal Conductivity[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

(编辑 费蒙飞)