

304 不锈钢热轧板的热物理和高温力学性能

董 方 郝俊懋 邓浩华

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘 要 采用 Gleeble-1500D 热模拟机、DIL402C 热膨胀仪和 STA449F3 综合热分析仪, 测试分析了 304 不锈钢 (/%: 0.040C, 0.45Si, 1.18Mn, 0.030P, 0.003S, 17.24Cr, 8.11Ni) 40 mm × 1 500 mm 热轧板的线膨胀系数、差热 (DSC) 及定压热容 (Cp) 曲线和高温力学性能。结果表明, 304 不锈钢的第 I 脆性区为 1 300 °C 到熔点, 第 III 脆性区为 950 ~ 1 050 °C, 在 1 050 ~ 1 250 °C, 断面收缩率 ≥ 60%, 塑性较好。钢的膨胀及收缩系数分别为 $20.97 \times 10^{-6} \sim 21.56 \times 10^{-6}$ 与 $21.25 \times 10^{-6} \sim 21.84 \times 10^{-6}$, 属裂纹敏感性钢种。1 000 ~ 1 400 °C 升温过程中, Cp 曲线波动大, 存在晶型转变, 易产生缺陷。304 钢在 1 450 ~ 1 200 °C 降温过程中, DSC 曲线不平滑, 有相变发生, 易产生裂纹。

关键词 304 奥氏体不锈钢 热轧板 热物理性能 力学性能 高温

Thermophysical and Mechanical Property of Austenite Stainless Steel 304 Hot-Rolled Plates at High Temperature

Dong Fang, Qie Junmao and Deng Haohua

(College of Metallurgy and Materials Science, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract Linear expansion coefficient, differential scanning calorimetric (DSC) and heat capacity at constant pressure (Cp) curves, and high temperature mechanical properties of austenite stainless steel 304 (/%: 0.040C, 0.45Si, 1.18Mn, 0.030P, 0.003S, 17.24Cr, 8.11Ni) 40 mm × 1 500 mm hot-rolled plate are tested and analyzed by using Gleeble-1500D thermal simulation testing machine, DIL402C thermal dilatometer and STA449F3 comprehensive thermal analyzer. Results show that I-est brittleness zone of steel 304 is 1 300 °C to melting point, 3-rd brittleness zone is 950 ~ 1 050 °C, the reduction of area at 1 050 ~ 1 250 °C is ≥ 60%, it has better hot ductility; the linear expansion and contraction coefficient of steel are respectively $20.97 \times 10^{-6} \sim 21.56 \times 10^{-6}$ and $21.25 \times 10^{-6} \sim 21.84 \times 10^{-6}$, so it belongs to crack sensitive steel grade; during heating process from 1 000 °C to 1 400 °C the fluctuation of Cp curve is larger, it indicates there is crystallographic transformation to easily form defects in steel; during cooling of steel 304 from 1 450 °C to 1 200 °C the curve of DSC is unsmooth, it indicates there is phase transformation in steel easily to produce cracks in steel.

Material Index Austenite Stainless Steel 304, Hot-Rolled Plate, Thermology Properties, Mechanical Property, High Temperature

1 实验方法

钢厂在 304 奥氏体不锈钢连铸生产过程中, 中间包温度为 1 480 ~ 1 510 °C, 拉坯速度根据铸坯宽度控制在 1.0 ~ 1.3 m/min, 水口插入深度为 160 mm 左右。选取所生产的规格 (mm) 为 40 × 1 500 × 6 000 的 304 不锈钢热轧钢板 (/%: 0.040C, 0.45Si, 1.18Mn, 0.030P, 0.003S, 17.24Cr, 8.11Ni) 进行高温特性测试。

采用 Gleeble-1500D 热模拟机对 304 奥氏体不锈钢进行高温拉伸试验 (图 1)。测试温度 700 ~

1 400 °C。以 10 °C/s 将试样加热到测试温度 20 °C 以下, 再以 5 °C/s 将试样加热到峰值温度点 (比测试温度高 30 °C), 最后将试样在保温 30 s 后以 2 °C/s 降到测试温度, 继续保温 30 s 后以 $5 \times 10^{-3}/s^{-1}$ 的应变速率将试样拉断。

试验采用 NETZSCH DIL 402C 热膨胀仪与 NETZSCH STA 449F3 综合热分析仪, 测试 304 不锈钢的膨胀与收缩系数, 差示扫描量、热法 DSC (Differential Scanning Calorimetry) 及定压热容 Cp (heat capacity at constant pressure) 曲线。

热膨胀性能: 升温和降温速度相同, 取 10 °C/min。由室温升至 1 100 °C 左右, 保温 1 min 后降温。试样的尺寸为 $\Phi 4$ mm × 25 mm。

综合热分析: Cp- 以 20 °C/min 升至 1 400 °C, 再以 10 °C/min 降至 500 °C。DSC- 以 20 °C/min 升至 1 500 °C, 再以 10 °C/min 降至 500 °C。Cp 与 DSC 测试试样尺寸分别为 $\Phi 5$ mm × 2 mm 与 $\Phi 3$ mm × 1.5

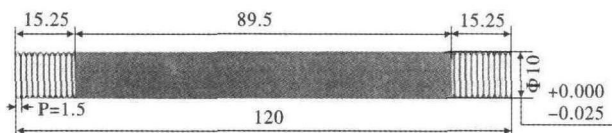


图 1 304 奥氏体不锈钢高温拉伸试样的示意图

Fig. 1 Schematics of specimen of austenite stainless steel 304 for high temperature tensile

mm。试验过程采取氩气保护。

2 结果与分析

2.1 高温力学性能测试结果与分析

2.1.1 304 不锈钢的高温强度

连铸过程,铸坯某点所受应力大于屈服强度时,即发生塑性变形;当应力超过抗拉强度时,即有裂纹产生。

如图2(a)所示,304 不锈钢在 700~850 °C,屈服强度下降较快,在 1 000 °C 左右,屈服强度达到第 1 个低值,约为 50 MPa。温度大于 1 200 °C,屈服强度均小于 20 MPa,降低趋势平缓,表明铸坯在 1 200 °C 之后抵抗外力能力变差,易发生塑性变形。

750~900 °C 抗拉强度下降趋势较快;温度大于 1 200 °C 之后,抗拉强度均小于 25 MPa。

2.1.2 304 不锈钢的高温热塑性

由图 2(b)可知,在 950~1 050 °C 试样出现第 III 脆性区,1 000 °C 时断面收缩率达到最小,为 52% 左右。铸坯裂纹的产生与第 III 脆性区的出现有非常重要的关系^[1-2]。

在 1 050~1 250 °C,断面收缩率均大于 60%,塑性较好,为高温塑性区域。研究发现,当断面收缩率大于 60% 时,材料的塑性较好,出现裂纹的机率较少,而当小于 60% 时则相反,裂纹敏感性增加^[3-4]。在 1 300 °C 到液相线温度的整个区间,断面收缩率迅速降低到 55% 以下,出现第 I 脆性区。研究表明^[5],第 I 脆性区的出现在连铸生产过程中是不可

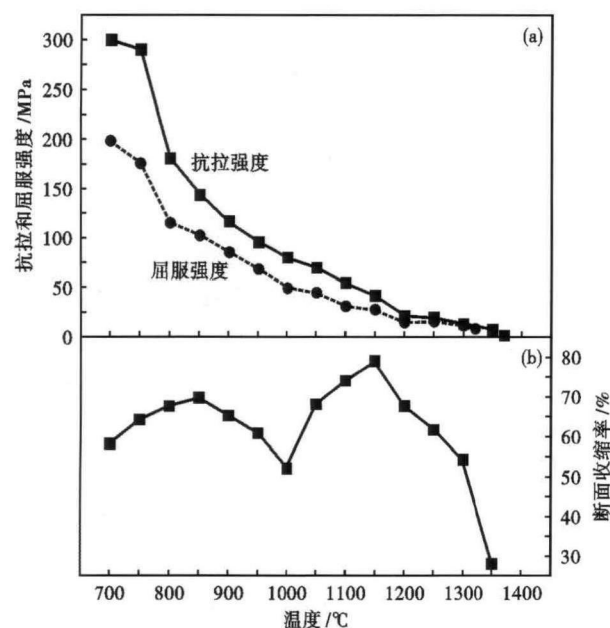


图2 温度对304 不锈钢抗拉强度、屈服强度(a)和断面收缩率(b)的影响

Fig. 2 Effect of temperature on tensile and yield strength (a) and area of reduction (b) of austenite stainless steel 304

避免的,主要由存在于树枝晶界面残余的液相薄膜导致晶界熔化产生的。

所以,在 304 不锈钢生产过程中,铸坯处于二冷及矫直区域时,可通过控制铸坯表面温度大于 1 050 °C,达到减少表面缺陷的目的。

2.2 高温热物理性能测试结果与分析

2.2.1 304 不锈钢热膨胀性能

从图 3 可见,升降温过程材料的膨胀与收缩系数均随温度呈线性变化。升温过程膨胀系数为 $20.97 \times 10^{-6} \sim 21.56 \times 10^{-6}$;降温过程收缩系数为 $21.25 \times 10^{-6} \sim 21.85 \times 10^{-6}$ 。与马氏体 2Cr13 不锈钢 ($\alpha = 12.08 \times 10^{-6}$) 及 20CrMo 合金结构钢 ($\alpha = 14.05 \times 10^{-6}$) 线膨胀系数相比,304 不锈钢的膨胀收缩系数较大^[6-7],在二冷区冷却凝固时,坯壳收缩量大,易使初生坯壳表面收缩不均匀,引发凹坑及裂纹等表面缺陷。

2.2.2 304 不锈钢定压热容

由图 4(a)可见,升温过程中,304 不锈钢的 C_p 曲线在常温到 500 °C 范围内,随着温度的增加有下降趋势,而在 600~900 °C C_p 曲线随着温度的增高而急剧增长。在 1 000~1 400 °C 时, C_p 曲线波动较大,在这一温度区间存在晶型转变与相变,脆性较高^[8-9]。这一温度区域铸坯热稳定性较差,易产生缺陷。

降温过程中 C_p 曲线趋势比较平缓,在 1 400~1 100 °C C_p 曲线随着温度的降低而降低,在 1 100~500 °C C_p 曲线随着温度降低而升高,1 100 °C 左右定压热容值最小,热稳性较好。整个降温过程中物质无太大变化,热稳定性良好。

2.2.3 304 不锈钢 DSC 曲线

由图 4(b)可知,在升温过程中,试样在 1 402.1 °C 时出现热量急剧变化的拐点,峰值位置的温度为

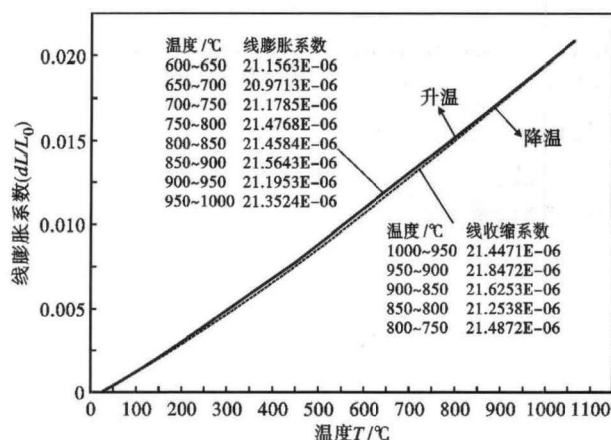


图3 温度对奥氏体不锈钢 304 线膨胀和收缩系数的影响

Fig. 3 Effect of temperature on linear expansion and contraction coefficient of austenite stainless steel 304

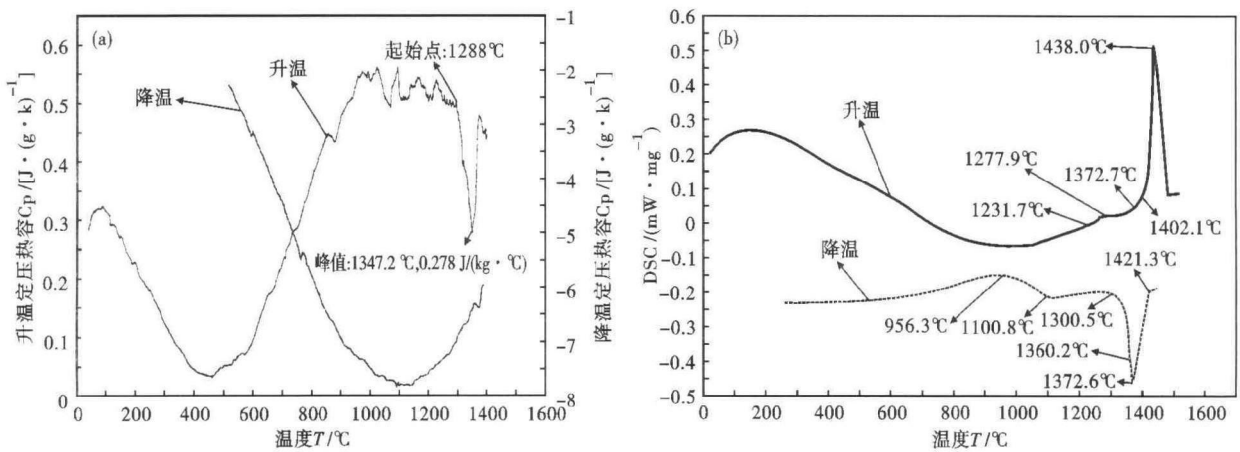


图 4 304 奥氏体不锈钢升降温过程定压热容 (C_p) 曲线 (a) 和差示扫描量热 (DSC) 曲线 (b)

Fig. 4 Curves of heat capacity at constant pressure C_p (a) and differential scanning calorimetric (DSC) (b) of austenite stainless steel 304 during heating and cooling process

1438.0 °C。根据热分析工作原理^[10], 试样液相线位置应位于拐点到峰值温度的1/3处, 约为1414 °C。

在降温过程中, 拐点位置的温度为1421.3 °C, 峰值的温度为1372.6 °C。由于结晶器上部冷却强度较大, 会对此处的热量变化产生一定影响, 通过分析峰值产生的原因, 确定试样在峰值温度即1372.6 °C左右发生相变, 结合试样在该温度段内可能发生的物理变化, 初步将此温度作为试样在实验室条件下的固相线温度。

峰值温度的出现与升降温过程中试样发生相变 (即晶型转变) 的速度达到最大时的温度点相对应。晶型转变的过程中, 急剧的热量变化会产生明显的吸热或放热焓, 导致 DSC 曲线上峰值温度的出现。降温过程中, DSC 曲线不平滑, 在1360.2、1300.5、1100.8 °C 这些温度点, 有相变产生, 引起铸坯体积的变化, 最终会使初始坯壳厚度不均匀^[11]。当铸坯处于这些温度点所属温度区间, 如结晶器中上部时,

铸坯表面易出现缺陷^[12]。

3 结论

(1) ≥ 1200 °C 时, 304 不锈钢热轧板抗拉强度 ≤ 25 MPa, 屈服强度 ≤ 20 MPa。

(2) 304 不锈钢的第 I 脆性区为1300 °C 到熔点, 第 III 脆性区为950 ~ 1050 °C。

(3) 304 不锈钢在升温及降温过程中的膨胀与收缩系数分别为 $20.97 \times 10^{-6} \sim 21.56 \times 10^{-6}$ 与 $21.25 \times 10^{-6} \sim 21.85 \times 10^{-6}$, 属裂纹敏感性钢种。

(4) C_p 曲线在1000 ~ 1400 °C 升温过程中, 波动幅度较大, 存在复杂晶型转变, 钢种热稳定性变差。在1288 °C 曲线突变, 材料发生相变。 C_p 曲线在降温过程中比较平缓, 在1100 °C 左右定压热容值最小, 热稳定性较好。

(5) 钢种的液相线温度约为1414 °C; 固相线温度约为1372.6 °C。降温过程中, DSC 曲线不平滑, 热稳定性较差。

参考文献

- [1] 朱立光, 路文刚. GCr15 轴承钢高温力学性能的研究[J]. 特殊钢, 2007, 28(4): 45-48.
- [2] 吴光亮, 孙彦辉, 周春泉, 等. CSP 板坯 (Q235B) 高温力学性能试验研究[J]. 钢铁, 2006, 41(5): 25-28.
- [3] Suzuki H G, Nishimura S, Yamaguchi S. Characteristics of Embrittlement in Steel Above 600 °C [J]. Tetsu-to-Hagane, 1979, 65(14): 2038-2046.
- [4] Suzuki H G, Nishimura S, Imamura J. Hot Ductility in the Temperature Range Between 900 and 600 °C [J]. Tetsu-to-Hagane, 1981, 67(8): 1180-1189.
- [5] 张明如. 连铸坯的组织与高温力学性能[J]. 马钢科技, 1996(2): 22-30.
- [6] 王文学, 刘彩玲, 王雨, 等. 2Cr13 不锈钢高温特性及对连铸保护渣的要求[J]. 钢铁钎钛, 2008, 29(1): 61-65.
- [7] 潘艳华, 陈登福, 董凌燕, 等. 20CrMo 连铸坯高温力学性能和热物理性能分析[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(9): 68-71.
- [8] 王培铭, 许乾慰. 材料研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 220.
- [9] 邓芬燕, 马跃新, 邹安全. 高锰钢脆性相变的研究[J]. 企业技术开发, 2007, 26(2): 19-21.
- [10] 刘彭. J4 不锈钢连铸保护渣的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [11] 吴鑫. 不锈钢高温力学性能及高温物理性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [12] 康丽, 王洋, 王恩刚, 等. 结晶器内连铸坯的热和应力状态数值模拟[J]. 中国冶金, 2007, 17(5): 30-34.

董方 (1964-), 男, 博士, 教授, 1987 年东北大学 (本科) 毕业, 钢铁冶金新工艺研究. E-mail: dongfang9407@sohu.com

收稿日期: 2014-03-17