

· 组织性能 ·

## 新型奥氏体耐热不锈钢 305B 的高温力学性能和组织特征

王明涛 白晋钢

(太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

**摘要** 试验 305B 钢( /% :0.048C, 3.32Si, 1.34Mn, 19.46Cr, 13.32Ni, 0.46Nb), 304 钢( /% :0.050C, 0.30Si, 0.90Mn, 18.05Cr, 9.23Ni) 和 310S 钢( /% :0.051C, 0.44Si, 1.17Mn, 25.36Cr, 21.32Ni) 由 200 kg 真空感应炉熔炼。通过 Gleeble-3800 热模拟试验机、光学显微镜和透射电子显微镜研究了试验钢的 500 ~ 1 000 °C 的高温力学性能和水冷后的组织, 以及利用 Thermo-calc 软件得出 305B 钢在 15% ~ 25% Cr 内的平衡相图。结果表明, 在 500 ~ 1 000 °C 305B 钢屈服强度( 500 °C - 261 MPa, 1 000 °C - 45 MPa) 高于 304 钢和 310S 钢, 305B 钢抗拉强度( 500 °C - 536 MPa, 1 000 °C - 76 MPa) 接近 310S 钢, 但远高于 304 钢, 305B 钢 NbC 析出相使该钢具有高的的高温强度; 305B 钢的高温断面收缩率高于 310S 钢, 低于 304 钢。

**关键词** 耐热奥氏体不锈钢 305B 高温力学性能 组织 相图

## High-Temperature Mechanical Properties and Structure Feature of a New Heat-Resistance Austenite Stainless Steel 305B

Wang Mingtao and Bai Jingang

(Technology Center, Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The test steel 305B ( /% : 0.048C, 3.32Si, 1.34Mn, 19.46Cr, 13.32Ni, 0.46Nb), steel 304 ( /% : 0.050C, 0.30Si, 0.90Mn, 18.05Cr, 9.23Ni) and steel 310S ( /% : 0.051C, 0.44Si, 1.17Mn, 25.36Cr, 21.32Ni) are melted by a 200 kg vacuum induction furnace. The high-temperature mechanical properties at 500 ~ 1 000 °C of test steels, and quenched structure of steel 305B are studied by using Gleeble-3800 thermo-simulation machine, optical microscope and transmission electron microscope, and the equilibrium phase diagram with 15% ~ 25% Cr for steel 305B is obtained by using Thermo-calc software. Results show that at 500 ~ 1 000 °C the yield strength of steel 305B (261 MPa at 500 °C, 45 MPa at 1 000 °C) is high than that of steel 304 and steel 310S, and the tensile strength of steel 305B (536 MPa at 500 °C, 76 MPa at 1 000 °C) is close to that of steel 310S and far more higher than that of steel 304, the NbC precipitate phase in steel 305B leads to it has higher strength at elevated temperature; the reduction of area of steel 305B at elevated temperature is higher than that of steel 310S and lower than that of steel 304.

**Material Index** Heat-Resistance Austenite Stainless Steel 305B, High-Temperature Mechanical Properties, Structure, Phase Diagram

新型耐热奥氏体不锈钢 305B, 与传统耐热奥氏体不锈钢相比, 该合金具有耐热性能优异, 镍含量低, 成本优势明显等特点。该合金可应用于高炉烟气的回收或降温设备; 火力发电锅炉后部过热器、预热器; 化工燃烧炉、焚烧炉的燃气预热器等领域。

### 1 实验材料和方法

实验研究用的 305B 奥氏体不锈钢, 与对比材料的 310S 和 304 奥氏体不锈钢的化学成分见表 1。

实验用钢采用容量为 200 kg 的真空感应炉熔

炼, 熔炼后钢锭尺寸为  $\Phi 200$  mm  $\times$  900 mm, 钢锭切成两部分, 其中一部分经过锻造成 (mm) 90  $\times$  90  $\times$  400 方坯, 并从锻造坯上纵向取样加工成  $\Phi 10$  mm  $\times$  120 mm 的标准热拉伸试样。

试样位于真空条件下在 500 ~ 1 000 °C 内, 以 10 °C/s 加热至目标温度 (升温法), 保温 2 min 后, 以  $1 \times 10^{-3}$  /s 的变形速率在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上对试样进行拉伸。拉断试样后向试样喷水, 将其快速冷却, 并对 305B 钢拉断的试样利用光学显微镜和透射电镜进行纵切面组织观察。

### 2 实验结果以及分析

#### 2.1 热力学 Thermo-calc 软件对合金组织的预测

为了初步预测高温下 305B 钢的组织组成, 并判断是否有危害合金力学性能的脆性相析出, 首次利用热力学软件 Thermo-calc<sup>[1,2]</sup> 及其 TCFE6 数据库

表 1 实验钢的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of Test steels /%

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb
305B	0.048	3.32	1.34	0.019	0.002	19.46	13.32	0.46
304	0.050	0.30	0.90	0.020	0.001	18.05	9.23	-
310S	0.051	0.44	1.17	0.019	0.002	25.36	21.32	-

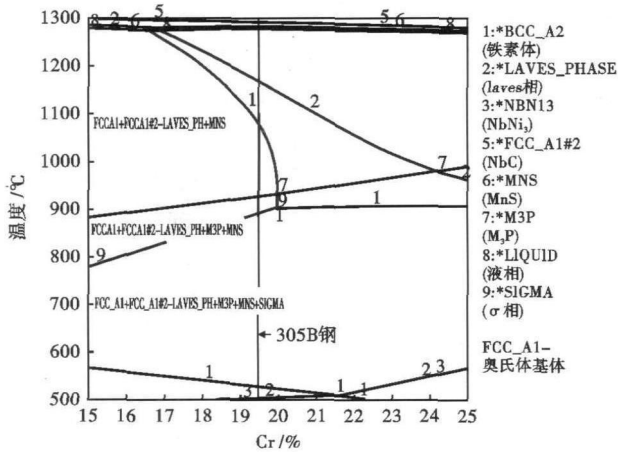


图 1 305B 钢的 Fe-Cr 平衡相图  
Fig. 1 Fe-Cr equilibrium phase diagram for steel 305B

计算出了 Cr 含量在 15% ~ 25% 内的 305B 钢的 Fe-Cr 平衡组织相图,如图 1 所示。

根据 305B 钢的相图可知,在 Cr 含量为 19.46% 时的各温度下组织中的相组成。在 500 ~ 520 °C 内,合金平衡组织主要为奥氏体基体、NbC、(Cr, Fe)<sub>3</sub>P、MnS、σ 相和 NbNi<sub>3</sub>, 温度升至 520 ~ 870 °C 时, NbNi<sub>3</sub> 溶解同时析出 Laves 相,随着温度升高到 870 ~ 920 °C σ 相会溶解,继续升温至 920 ~ 1 000 °C (Cr, Fe)<sub>3</sub>P 相会溶解到基体中。同时利用 Thermo-calc 软件对 500 ~ 1 000 °C 各析出相平衡含量进行计算,如表 2 所示。

由表 2 可知,305B 钢的应用温度在 500 ~ 1 000 °C 内,由于对 S、P 等有害元素的控制, MnS、(Cr, Fe)<sub>3</sub>P、仅有少量析出;同时还伴有 NbNi<sub>3</sub>、Laves 相以及 σ 相析出;由于 Nb 为强碳化物形成元素,致使 C 优先与 Nb 形成 NbC,抑制了 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 M<sub>6</sub>C 型碳化

表 2 305B 钢不同温度下平衡组织中各析出相含量/%  
Table 2 Precipitated phase content in equilibrium structure of steel 305B at different temperature / %

温度/°C	NbC	Laves 相	MnS	(Cr, Fe) <sub>3</sub> P	σ 相	NbNi <sub>3</sub>
500	0.46	-	0.005 4	0.12	3.91	0.125
600	0.46	0.08	0.005 4	0.12	3.54	-
700	0.46	0.08	0.005 4	0.10	2.55	-
800	0.44	0.09	0.005 4	0.01	1.22	-
900	0.42	0.11	0.005 4	0.001 7	-	-
1 000	0.39	0.11	0.005 4	-	-	-

物的形成。

由此可以预测 305B 钢的组织中除了基体奥氏体组织外,主要有一定含量的 NbC 析出,920 °C 以下还会有一定量的 σ 相,这从后面的金相以及透射电镜分析结果可以得到证实。其中 NbC 是强化相,可以提高钢的高温强度<sup>[3,4]</sup>,也是钢的主要强化手段。

### 2.2 钢组织特点

利用光学显微镜和透射电镜对 305B 奥氏体不锈钢的高温组织进行分析,发现在 500 ~ 1 000 °C 内,有少量 MnS、(Cr, Fe)<sub>3</sub>P 析出,以及一定量的 NbNi<sub>3</sub>、Laves 相、NbC 以及 σ 相析出,这与 Thermo-calc 计算结果完全一致。除此之外,还在组织中发现少量铁素体于奥氏体晶界处形成,这是钢在凝固过程中,由高温非平衡冷却至室温,部分高温下形成的铁素体相并未完全转化成奥氏体相,而是以铁素体的形式存在于组织中。适量的铁素体相有益于改善初加工热塑性,避免焊接开裂<sup>[3]</sup>。钢的组织如图 2 所示。

研究发现, NbC 尺寸多集中在 100 nm 范围内,主要成圆形并且较均匀地分布在基体中(图 3),这种形态以及尺寸有利于阻碍位错滑移,钉扎晶界,从而提高钢的力学性能。

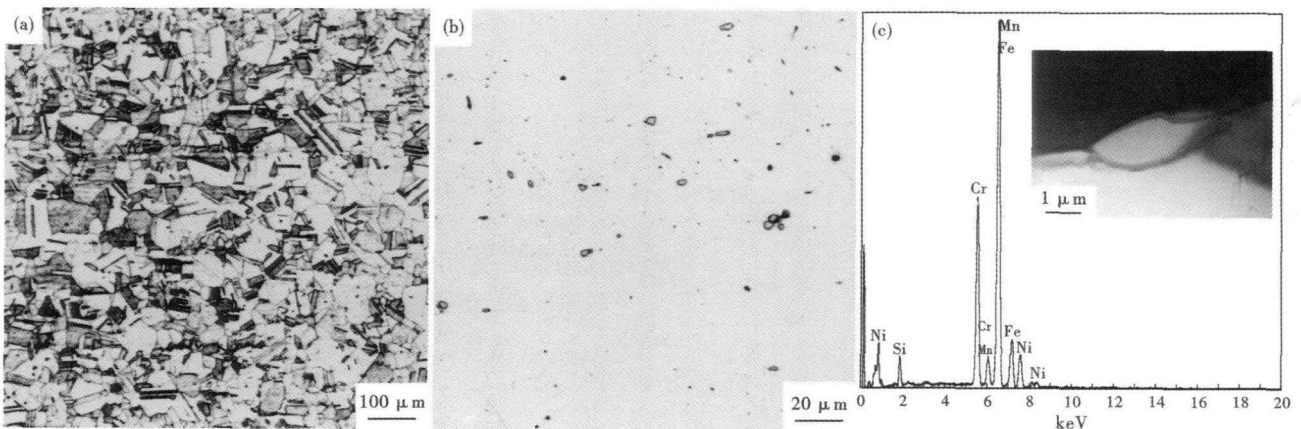


图 2 305B 钢 900 °C 金相组织形貌:(a) 奥氏体晶粒;(b) 铁素体;(c) 铁素体, X-射线能谱图  
Fig. 2 Morphology of structure in steel 305B at 900 °C : (a) grain of austenite; (b) ferrite; (c) ferrite, energy dispersive X-ray spectrum

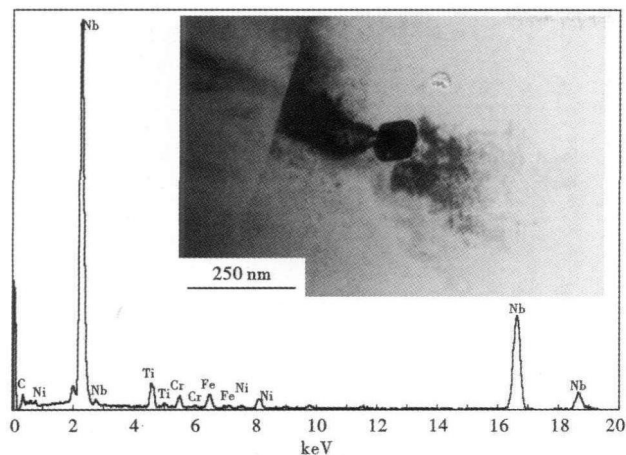


图3 305B钢900℃ NbC析出相形态以及X-射线能谱图  
Fig.3 Morphology of NbC precipitates phase in steel 305B at 900 °C and energy dispersive X-ray spectrum

通过对钢的组织进行预测并与试验结果进行对照,其预测结果与实验结果基本符合。

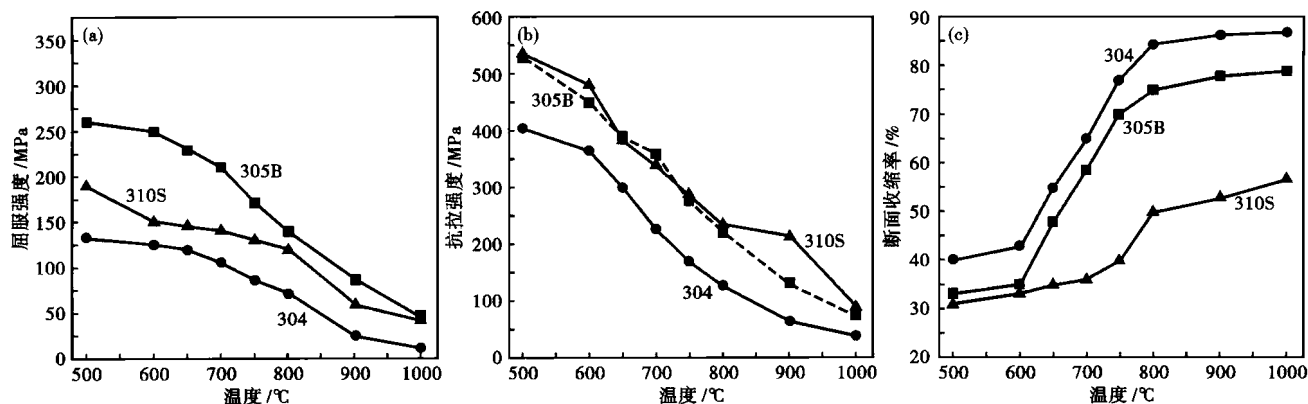


图4 305B钢、304钢和310S钢高温屈服强度(a)、抗拉强度(b)和断面收缩率(c)  
Fig.4 Yield strength (a), tensile strength (b) and reduction of area (c) of steel 305B, steel 304 and steel 310S at elevated temperature

综上所述,305B耐热不锈钢在500~1000℃力学性能优异,抗拉强度以及屈服强度均高于304钢,且屈服强度略高于310S钢,抗拉强度与310S钢相当。断面收缩率高于310S钢,而略低于304钢,完全可以在该温度范围内应用。

### 3 结论

(1)利用热力学软件 Thermo-calc 完成了对合金相图的计算,对钢的组织进行预测并与试验结果进行对照,其预测结果与实验结果基本符合。

(2)研究了305B钢的高温状态下的显微组织特点,并研究高温强化机理,发现高温强化相 NbC存在是钢具有高温强度的原因,同时发现在500~1000℃仍有部分铁素体相析出。

### 2.3 305B钢与304和310S钢的高温力学性能比较

由于305B钢的设计初衷是1000℃以下应用,本文又进一步研究了该钢的高温力学性能,在500~1000℃内进行拉伸试验,结果与典型奥氏体不锈钢304以及耐热不锈钢310S性能进行比较(图4)。

根据图4(a)和(b)发现,305B钢在500~1000℃屈服强度高于304钢以及310S钢,500℃时可以达到261 MPa,在1000℃时屈服强度为45 MPa。抗拉强度与310S钢接近,在500℃时可达536 MPa,在1000℃时抗拉强度为76 MPa,远高于304钢。这主要是由于在500~1000℃有NbC析出,在拉伸过程中对晶界以及位错的滑移起钉扎作用,从而提高了其高温强度。

由图4(c)可知,305B钢的断面收缩率高于310S钢,而略低于304钢,在500~1000℃随温度的升高而增大,500℃时为33%,1000℃时可达79%。

(3)305B钢在500~1000℃时的力学性能优异,其中抗拉强度以及屈服强度均高于304钢,且屈服强度略高于310S钢,抗拉强度与310S钢相当;断面收缩率高于310S钢,略低于304钢。

### 参考文献

- 1 张剑桥. 9Cr18Mo 马氏体不锈钢的平衡相热力学计算. 特殊钢, 2010, 31(6): 10
- 2 丰涵, 宋志刚, 郑文杰, 等. Inconel 690 镍基合金平衡相的热力学计算和实验分析. 特殊钢, 2008, 29(4): 13
- 3 孟繁茂, 付俊岩. 现代含铌不锈钢. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- 4 陆世英, 张廷凯, 康喜范, 等. 不锈钢. 北京: 原子能出版社, 1995

王明涛(1980-), 男, 博士, 东北大学毕业, 不锈钢工艺研究。

收稿日期: 2012-01-09