

# 硼对奥氏体耐热钢 TP347H 热加工性、组织和力学性能的影响

徐刚<sup>1</sup> 李钧<sup>1</sup> 肖学山<sup>1</sup> 倪建森<sup>1</sup> 朱长春<sup>2</sup> 赵钧良<sup>2</sup> 郑卫<sup>2</sup> 王治政<sup>2</sup>

(1 上海大学材料研究所, 上海 200072; 2 宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司, 上海 201900)

**摘要** 试验钢以超临界锅炉用奥氏体耐热钢 TP347H (0.07C, 17.98Cr, 10.78Ni, 0.70Nb, 0.0267N) 为炉料, 用 25 kg 真空感应炉在氩气保护下熔炼, 并加入 0~0.16% B。结果表明, 当加 B 量  $\geq 0.02\%$  时, 试验钢奥氏体晶粒明显粗化, 1200~950 °C 锻造时锻坯开裂。当加 B 量约 0.01% 时, 奥氏体耐热钢 TP347H 具有最佳的综合性性能: 钢的室温抗拉强度为 615 MPa; 750 °C, 120 MPa 钢的持久寿命为 230 h, 伸长率为 42%。

**关键词** 奥氏体耐热钢 TP347H 加硼 组织 性能

## Effect of Boron on Hot Workability, Structure and Mechanical Properties of Austenite Heat Resistant Steel TP347H

Xu Gang<sup>1</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Xiao Xueshan<sup>1</sup>, Ni Jiansen<sup>1</sup>, Zhu Changchun<sup>2</sup>, Zhao Junliang<sup>2</sup>, Zheng Wei<sup>2</sup> and Wang Zhizheng<sup>2</sup>

(1 Institute of Materials, Shanghai University, Shanghai 200072;

2 Special Steel Branch, Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900)

**Abstract** Test steels were melted by a 25 kg vacuum induction furnace in argon protective atmosphere with charging of austenite heat resistant steel TP347H (0.07C, 17.98Cr, 10.78Ni, 0.70Nb, 0.0267N) for super critical pressure boiler and adding 0~0.16% B. Results showed that as added  $\geq 0.02\%$  B the austenite grain of test steel obviously coarsened and forging billet of steel cracked as forging at 1200~950 °C; as added about 0.01% B the austenite heat resistance steel has optimum comprehensive properties i. e. tensile strength of steel at ambient was 615 MPa, the stress-rupture life and elongation of steel with 120 MPa at 750 °C were respectively 230 h and 42%.

**Material Index** Austenite Heat Resistant Steel TP347H, Adding Boron, Structure, Properties

TP347H 奥氏体耐热钢具有较高的蠕变强度、抗蒸汽氧化、耐烟气腐蚀性能; 同时具有较好的可加工性和可焊接性, 能较好地应用于超临界锅炉机组<sup>[1]</sup>。Type-347H 奥氏体不锈钢中加入 0.069% B 和 0.016% Ce, 可提高 Type-347H 奥氏体不锈钢的高温持久性能<sup>[2,3]</sup>。

### 1 试验材料

以 TP347H 钢(表 1)作为母材, 用 25 kg 真空感应炉在氩气保护下进行冶炼并加入 0~0.16% 的 B, 锭重 10 kg, 去氧化皮, 锻造成  $\Phi 30$  mm 的棒材, 总变形量约 700%。锻造加热温度为 1200 °C, 终锻温度

表 1 试验钢 TP347H 的化学成分和加 B 量  
Table 1 Chemical composition of test steel TP347H and B addition level

TP347H 钢的成分/%										B(加入量)/%
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	N	Cu	
0.07	1.18	0.32	0.025	0.004	17.98	10.78	0.70	0.0267	0.24	0~0.16

900~950 °C。锻造试样进行 1160 °C 20 min 固溶处理, 水淬; 在 750 °C、120 MPa 条件下按照 GB/T2039-1997 进行高温持久测试。

### 2 结果与分析

#### 2.1 热锻性

加  $\leq 0.01\%$  B 试样按照大变形量热锻一次就可锻成。加 0.02% B 试样按照大变形量有部分开裂, 加 0.04% B 试样按照大变形量进行锻造时完全开裂报废。加 0.08% B 和 0.16% B 试样按照小变形

量进行锻造, 所得棒材也有部分开裂。加 B 较多, B 在晶界偏聚形成了低熔点的硼化物, 导致热锻开裂<sup>[4]</sup>。

#### 2.2 XRD 分析

图 1 为添加不同 B 含量的 TP347H 钢在固溶态的 XRD 衍射谱。从图 1 中可以看出, 没有加 B 的 0<sup>#</sup> 试样中有少量铁素体出现。根据  $\delta$  铁素体形成温度 (即  $T_{\delta}$ ) 公式<sup>[5]</sup>, TP347H 钢的  $T_{\delta}$  约为 1080 °C, 而实际固溶处理的温度为 1160 °C, 高于  $\delta$  铁素体的形成

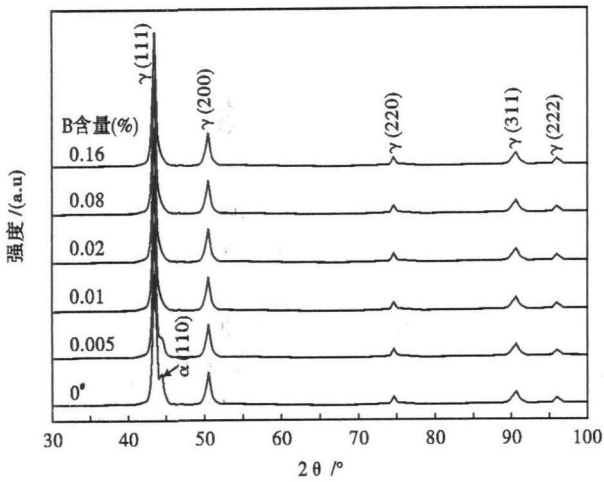


图 1 不同加 B 量的 TP347H 钢 1160 °C 20 min 固溶后的 XRD 衍射谱

Fig. 1 X-ray diffraction spectrum of steel TP347H with different B addition, solution-treated at 1160 °C for 20 min

温度,从而导致 δ 铁素体析出。而加入 0.005% 的 B 后,铁素体峰变小;B 的加入量超过 0.01% 后,铁素体峰消失,其衍射峰全部为奥氏体峰。这表明 B 作为间隙原子固溶于奥氏体中,能提高奥氏体的稳定性,降低 δ 铁素体的析出趋势。

### 2.3 金相组织

根据固溶积计算<sup>[6-8]</sup>,该钢固溶处理取 1160 °C 20 min 水淬。从图 2 可以看出,在基体中分布有较多未溶解的第 2 相颗粒,经 EDS 分析为 NbC。从图 2 也可以看出,随 B 加入量的增加,奥氏体晶粒有粗化的趋势,尤其当加 B ≥ 0.02% 时,奥氏体晶粒粗化严重(如图 2c、d 所示),这与文献[9]报道的固溶 B 有使奥氏体晶粒粗化的倾向是一致的。

### 2.4 室温拉伸性能

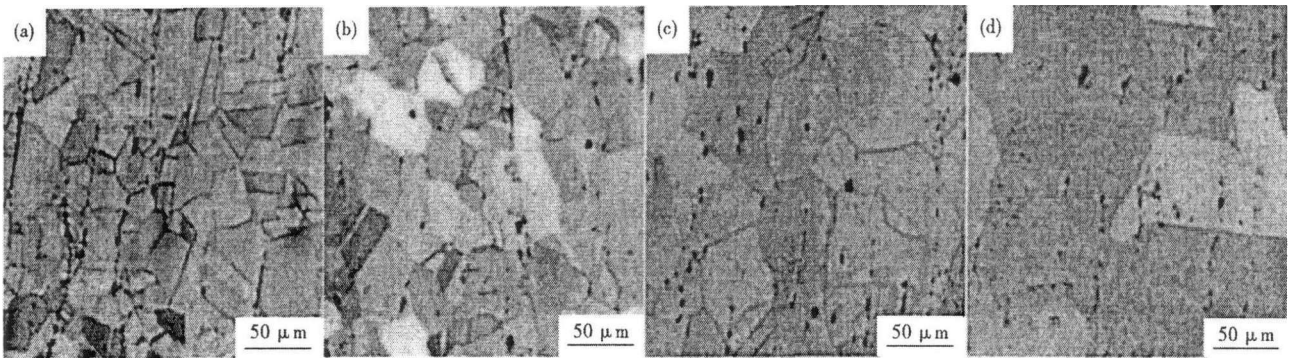


图 2 TP347H 钢的显微组织,加 B 量/% : (a) 0; (b) 0.02; (c) 0.08; (d) 0.16

Fig. 2 Structure of steel TP347H added B 0 (a); 0.02 (b); 0.08 (c); 0.16 (d)

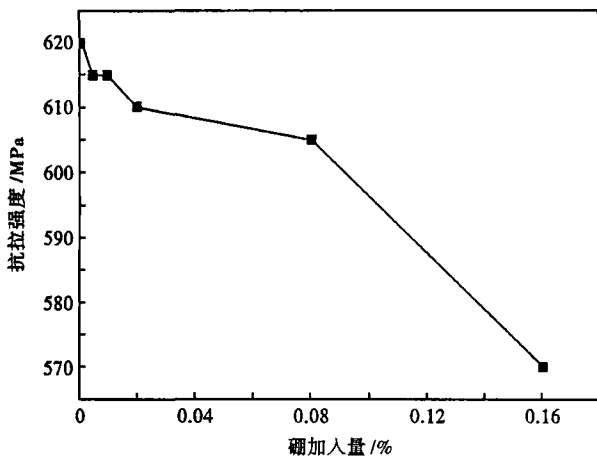


图 3 加 B 量对 TP347H 钢抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of B addition on tensile strength of steel TP347H

B 能较好的固溶在奥氏体中,起到稳定奥氏体的作用,但是会使奥氏体晶粒有粗化的倾向。另外,随着 B 加入量增加,B 在奥氏体晶界的偏聚就增加,形成的硼化物脆性相使得材料的强度和塑性下降<sup>[10]</sup>。图 3 为不同 B 加入量的 TP347H 钢室温拉

伸强度变化曲线,随着 B 含量的增加,TP347H 钢的室温抗拉强度逐渐下降。断口开始为韧性断口(如图 4 中 a、b 所示);当 B 加入量 ≥ 0.08% 时,断口则具有韧性和解理混合特征(如图 4 中 c、d 所示),这可能是奥氏体晶粒粗化和晶界有脆性硼化物析出所致。

### 2.5 高温短时持久性能

由于 TP347H 钢在超临界锅炉机组中的设计寿命一般为 10 万个小时以上,为了缩短试验周期,本试验采取提高温度和增加应力的方法,得出 B 对 TP347H 钢的高温持久性能影响的趋势。图 5(a)可以看出,没有加 B 时 TP347H 钢的高温短时持久寿命约 118 h,加 0.02% B 时高温短时持久寿命达到最大值,约 262 h,比没有加 B 时提高 1 倍以上,然后高温短时持久寿命随着 B 加入量的增加而下降。从图 5(b)可以看出,未加 B 时,TP347H 钢的断裂伸长率约为 27.5%,加入微量的 B 后断裂伸长率显著提高,加 0.005% ~ 0.01% B 时,断裂伸长率 ≥ 40% ;

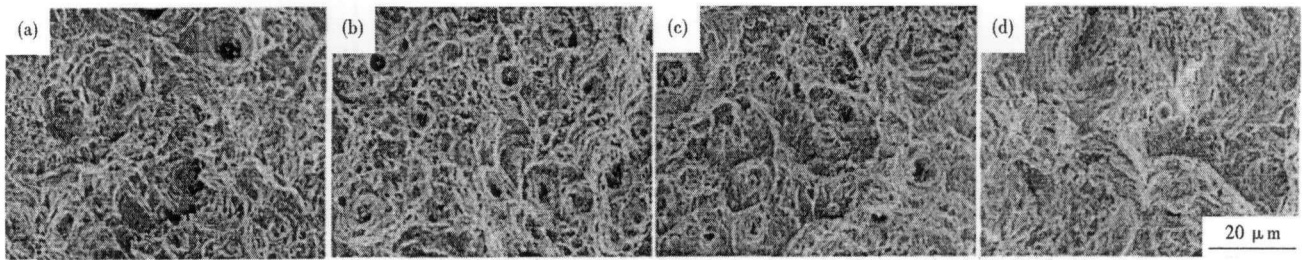


图4 TP347H 钢室温拉伸断口形貌,加 B 量%:(a) 0; (b) 0.02; (c) 0.08; (d) 0.16

Fig. 4 Morphology of ambient tensile rupture of steel TP347H added B 0 (a); 0.02 (b); 0.08 (c); 0.16 (d)

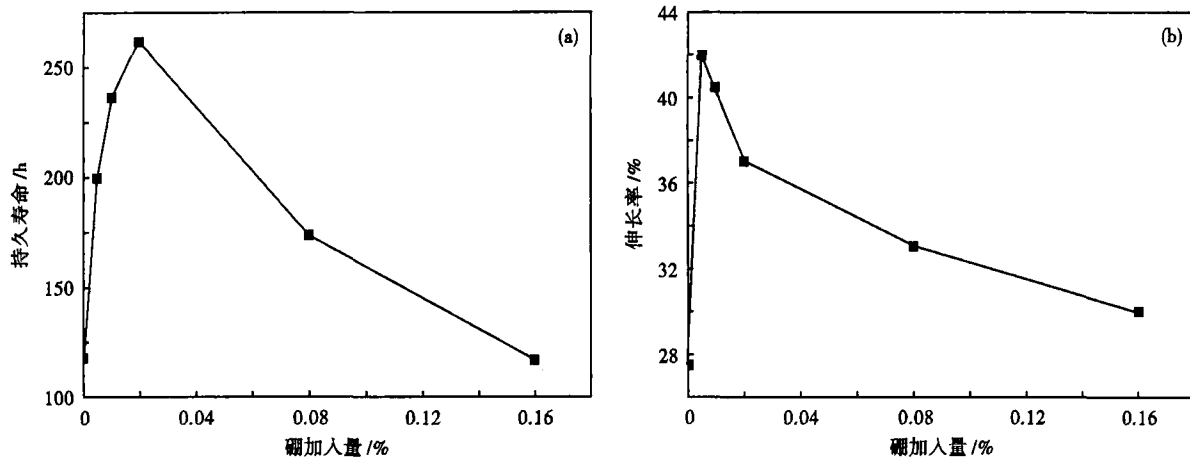


图5 加 B 量对 TP347H 钢 750 °C 120 MPa 持久寿命(a)和伸长率(b)的影响

Fig. 5 Effect of B addition on stress-rupture life (a) and elongation (b) of steel TP347H at 750 °C with stress 120 MPa

然后断裂伸长率随着加 B 量的增加而下降,当加 B 量为 0.16% 时,断裂伸长率约为 30%,仍比未加 B 时的断裂伸长率高。

### 3 结论

(1) B 加入能较好抑制 TP347H 钢在高温固溶处理时  $\delta$  铁素体的形成。加 B 量  $\leq 0.02\%$  时, TP347H 钢中奥氏体粗化不明显,热锻性较好,其室温机械性能略有下降;超过 0.02% 时, TP347H 钢中奥氏体粗化严重,其室温机械性能急剧下降。

(2) 随着加 B 量的增加, TP347H 钢的高温短时持久寿命先提高后下降,当加 B 量在 0.02% 左右时, TP347H 钢的高温短时持久寿命最长,比未加 B 时提高 1 倍以上。

(3) 加 B 量约 0.01% 时, TP347H 钢的综合性能最好。

上海市科委攻关基金资助项目(05DZ11003-2)

### 参考文献

- 张显. 超临界/超超临界锅炉炉选材用材. 发电设备, 2004(5): 307
- LaHa K, Kyono J, Kishimoto S, et al. Beneficial Effect of B Segregation on Creep Cavitation in a Type 347 Austenite Stainless Steel. Scripta Materialia, 2005(52): 675

- LaHa K, Kyono J, Sasaki T, et al. Improved Creep Strength and Creep Ductility of Type 347 Austenitic Stainless Steel Through the Self-healing Effect of Boron for Creep Cavitation. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(2): 399
- Zhu Yaoxiao, Zhang Shunnan, Zhang Tianxiang, et al. A New Way to Improve the Superalloys. Superalloys 1992 (eds. Antolovich S. D). Pennsylvania: TMS, 1992: 145
- 程晓农, 戴起勋. 奥氏体钢设计与控制. 北京: 国防工业出版社, 2005
- Mangonon P L, Heitmann W E. Subgrain and Precipitation-strengthening Effects in Hot-rolled, Columbium-bearing Steels. In "Microalloying '75", (New York, Union Carbide Corp, 1997): 59
- Hiroshi Kobayashi. Influence of Nb (Carbide Nitride) Precipitation in Austenite on the Mechanical Properties of High Strength Steels. J Jpn Inst Me, 1976, 40(2): 270
- Maruyama N, Uemori R, Sugiyama M. The Role of Niobium in the Retardation of the Early Stage of Austenite Recovery in Hot-deformed Steels. Materials Sci. and Eng., 1998, A250(2):
- Treppschuh H, Randak A, Domalski H H, et al. Influence of Boron on the Properties of Structural Steels and Tool Steel. Stahl und Eisen 87, 1967, 22: 1355
- 刘常升, 崔虹雯, 陈岁元, 等. 高硼钢的组织与性能. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 247

徐刚(1978-), 男, 硕士研究生, 2003 年河南科技大学毕业, 耐热不锈钢产品研发。

收稿日期: 2007-10-12