

## Φ160 mm 0Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢半连续轧制工艺实践

赵德忠

(本溪钢铁(集团)公司特殊钢厂,本溪 117001)

**摘 要** 本钢特钢厂采用 3 t 电渣锭-800 初轧机开 190 mm × 190 mm 方坯-4 架 650 连轧工艺,生产 Φ160 mm 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢棒材以替代原先 3 t 电渣锭锻造生产工艺。实践表明,轧制工艺生产效率、成材率和钢材表面质量均优于锻制工艺;轧制工艺所生产的 Φ160 mm 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢  $\sigma_{0.2}$  ( $R_{p0.2}$ ) 890 ~ 955 MPa,  $\sigma_b$  ( $R_m$ ) 960 ~ 1 020 MPa,  $\delta_5$  (A) 16% ~ 18%,  $\Psi$  (Z) 61% ~ 65%,  $\delta$ -Fe ≤ 5% 均满足 GB8732 II 的要求。

**关键词** Φ160 mm 棒材 0Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢 半连续轧制  $\delta$ -铁素体

## Practice for Semi-Continuous Rolling Process of Φ160 mm 0Cr17Ni4Cu4Nb Precipitation-Hardening Stainless Steel Bar

Zhao Dezhong

(Special Steel Works, Benxi Iron and Steel (Group) Co Ltd, Benxi 117001)

**Abstract** Φ160 mm 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel bar products are produced at Special Steel Works, Benxi Steel by 3t ESR ingot - 800 primary mill blooming 190 mm × 190 mm billet - four stand 650 tandem mill rolling process to replace original 3t ESR ingot - forging process. Practice indicated that production efficiency, yield and surface quality of products produced by rolling process were better than that by forging process, the  $\sigma_{0.2}$  ( $R_{p0.2}$ ) of Φ160 mm 0Cr17Ni4Cu4Nb stainless steel rolled bar was 890 ~ 955 MPa,  $\sigma_b$  ( $R_m$ ) 960 ~ 1 020 MPa,  $\delta_5$  (A) 16% ~ 18%,  $\Psi$  (Z) 61% ~ 65%,  $\delta$ -Fe ≤ 5% all to meet the requirement of standard GB8732 II.

**Material Index** Φ160 mm Bar, 0Cr17Ni4Cu4Nb Precipitation-Hardening Stainless Steel, Semi-Continuous Rolling,  $\delta$ -Ferrite

0Cr17Ni4Cu4Nb (17-4PH) 属于马氏体型沉淀硬化型不锈钢<sup>[1]</sup>,用于制造汽轮机的动叶片,属于超高强度钢,其强度是通过马氏体相变和时效处理的沉淀硬化来达到的<sup>[2]</sup>。经固溶处理后,其强度可 ≥ 1 310 MPa,其加热和轧制对裂纹的敏感性较强,导热性能较差,变形抗力大,宽展较大,并且有可塑性温度范围较窄的特点,因此在加热及轧制时应严格控制温度。

### 1 工艺流程和操作要点

工艺流程:3 t 电渣锭→均热炉加热→Φ800 初轧机→4 × 650 连轧机→保温→退火→检验→精整→入库。试生产 3 t 电渣锭尺寸见表 1。

根据初轧坯实物质量可进行一次轧制成形和热返工艺 2 种方案:

(1) 连轧开轧温度 ≥ 1 150 °C,无角裂缺陷产生,可一次轧制成品 ≥ Φ160 mm;

(2) 如果不具备进连轧条件和连轧开轧温度的钢坯可作为热返电渣坯,返炉坯 350 mm × 430 mm 方可轧成 300 mm 方左右,走热返炉工艺路线,1 170 °C 保温适当时间后,翻钢,保证钢坯温度均匀一致。

控制初轧机横臂冷却水流,轧辊两端部增加防水设施,以保持轧制温度正常;选择适合的孔型,使轧件有一定的圆角半径,防止角部温度的剧降而产生角裂。

在轧制过程中,注意温度变化,温度低时,及时返炉,返炉后,保温一定时间出炉轧制,尽量避免多次返炉重复加热,以免高温停留时间过长。

均热坑中的操作应避免长时间在高温区加热,以避免  $\delta$ -铁素体 ( $\delta$ -Fe) 检验不合格,加热过程的均热曲线如图 1。

### 2 轧制压下规程

3 t 电渣锭-初轧平压 8 道次-立压 6 道次成 350 mm × 430 mm 方坯返炉加热-轧制 30 道次成 190 mm × 190 mm 方坯-进 4 架 650 连轧 Φ160 mm。

轧制时,变形量 30 mm 左右,后 16 道次根据实际情况确定压下量,但应采用小变形多道次轧制。

表 1 3 t 电渣锭结晶器尺寸/mm  
Table 1 Size of 3 t ESR ingot mold /mm

| 上口直径 | 下口直径 | 平均直径 | 长度    |
|------|------|------|-------|
| 500  | 560  | 540  | 1 800 |

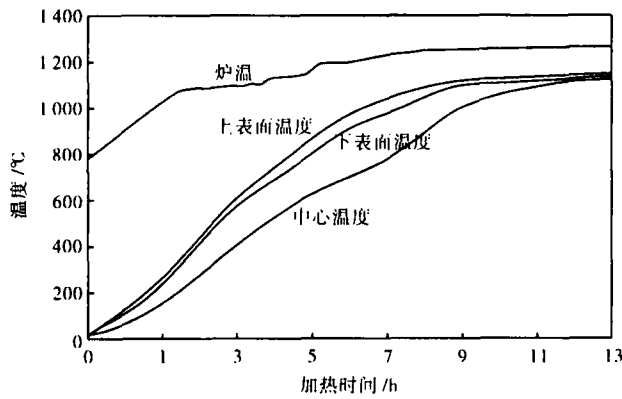


图1 17-4PH 钢轧制加热曲线

Fig. 1 Heating curves of 17-4PH steel for rolling

终轧温度  $\geq 1050$  °C, 终轧规格材  $\geq \Phi 160$  mm, 钢材冷却温度  $\geq 750$  °C。 $\Phi 160$  mm 钢材、方坯起保温坑后及时进行退火。

表2 试验生产的 0Cr17Ni4Cu4Nb (17-4PH) 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of pilot-produced 0Cr17Ni4Cu4Nb (17-4PH) steel / %

| 项目           | C             | Si          | Mn          | P             | S             | Cr            | Ni          | Cu          | Al            | Ti           | N            | Nb + Ta     |
|--------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| GB8732-88 II | $\leq 0.055$  | $\leq 1.00$ | $\leq 0.50$ | $\leq 0.035$  | $\leq 0.030$  | 15.00 ~ 16.00 | 3.80 ~ 4.50 | 3.00 ~ 3.70 | $\leq 0.050$  | $\leq 0.050$ | $\leq 0.050$ | 0.15 ~ 0.35 |
| 分析值          | 0.040 ~ 0.053 | 0.31 ~ 0.45 | 0.32 ~ 0.41 | 0.017 ~ 0.023 | 0.003 ~ 0.006 | 15.32 ~ 15.50 | 4.18 ~ 4.30 | 3.20 ~ 3.44 | 0.030 ~ 0.037 | 0.01 ~ 0.02  | 0.01 ~ 0.02  | 0.24 ~ 0.29 |

表3 17-4PH 钢轧材、锻材的力学性能和  $\delta$ -Fe 含量Table 3 Mechanical properties of 17-4PH steel rolling and forging products and  $\delta$ -Fe content

| 项目                | $\sigma_{0.2}$ / MPa | $\sigma_b$ / MPa | $\delta_5$ / % | $\Psi$ / % | $\delta$ -Fe / % |           |
|-------------------|----------------------|------------------|----------------|------------|------------------|-----------|
|                   |                      |                  |                |            | 平均               | 严重        |
| GB8732-88 II (纵向) | 890 ~ 980            | 950 ~ 1 020      | $\geq 16$      | $\geq 55$  | $\leq 5$         | $\leq 10$ |
| 轧材                | 纵向                   | 890 ~ 955        | 16 ~ 18        | 61 ~ 65    | 3                | 5         |
|                   | 横向                   | 890 ~ 940        | 14 ~ 16        | 45 ~ 51    | -                | -         |
| 锻材                | 纵向                   | 890 ~ 925        | 17 ~ 20        | 60.5 ~ 65  | 2 ~ 3            | 4 ~ 5     |
|                   | 横向                   | 880 ~ 910        | 16 ~ 17.5      | 44 ~ 52    | -                | -         |

轧材与锻材检验结果对照也基本一致(但横向性能指标,特别是塑性指标无论是轧材还是锻材  $\Psi$ 、 $\delta_5$  普遍满足不了标准要求,有待今后进一步研究)。17-4PH  $\Phi 160$  mm 走以轧代锻工艺路线,不仅生产周期短、外观质量好、加工成本低,而且内在质量完全满足标准要求,且同锻材内在质量相当。所以,17-4PH  $\Phi 160$  mm 走以轧代锻工艺路线完全可行。

由于第一火开坯温度偏低、均温时间不够、个别道次变形量偏大和初轧操作缓慢使坯料温度下降,易导致钢坯角部出现裂纹。所以,采取措施保证开

### 3 检验结果与分析

0Cr17Ni4Cu4Nb (17-4PH) 钢按 GB8732-88 II 组织生产,结果全部达到标准要求(增检横向性能做为数据积累)。化学成分如表 2; 轧材和锻材力学性能和  $\delta$ -Fe 的含量如表 3。

钢中含 10%  $\delta$ -铁素体使室温横向性能下降 1/3, 韧性下降 2/3, 540 °C 的持久强度下降 1/3, 因而,成分设计和生产应考虑尽可能降低  $\delta$ -铁素体的含量。

均热时应注意到,1 150 °C 开始析出  $\delta$ -铁素体,1 180 °C 时增加较快,达到 1 220 °C  $\delta$ -铁素体急剧增加<sup>[3]</sup>。

标准 GB8732-88 II 规定  $\delta$ -铁素体平均含量  $\leq 5\%$ , 最严重视场  $\leq 10\%$ 。检验结果为  $\delta$ -铁素体平均含量  $\leq 3.5\%$ , 最严重视场  $\leq 5\%$ 。

坯表面质量是确保钢材表面质量的关键。

出钢温度控制适当,并确保出钢均温时间充足,小变形快节奏轧制,保证进入 4 架连轧机时钢坯的温度在 1 050 °C 或更高,是确保轧制质量的关键。生产过程防水,避免轧件温度骤降是防止产生角裂的有效措施。

### 4 结语

通过一定的加热和轧制工艺的过程控制,均热过程透烧,初轧机操作迅速,以保证进入 4 架连轧机的钢坯温度,完全可以实现  $\Phi 800$  初轧机和 4 架  $\Phi 650$  连轧机生产  $\geq \Phi 160$  mm 的钢材。

连轧产材较锻造产材可以节约成本,提高效率,并且获得较好的成材率和钢材表面质量。

### 参考文献

- 胡德林. 金属学及热处理. 西安: 西北工业大学出版社, 1994
- 陈世英, 张延凯, 康喜范, 等. 不锈钢. 北京: 原子能出版社, 1995
- 罗通伟, 陈晋阳, 洪泉富. EAF + VOD-ESR-825 mm 轧机流程试制 12% Cr 型叶片钢. 特殊钢, 2005, 26(2): 45

赵德忠(1972-), 男, 工程师, 1997 年辽宁工学院毕业, 从事加工工艺的研究与管理。

收稿日期: 2006-10-19