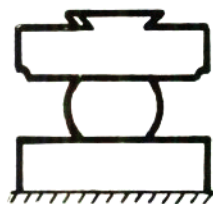
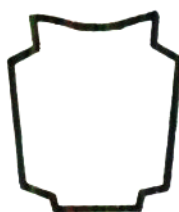
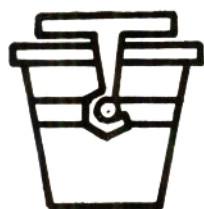


# 大型铸锻件文集

DA XING ZHU DUAN JIAN WEN JI

-7-



机械委郑州机械研究所  
大型铸锻件行业技术室

1987

# 前 言

这本文集是我室1986年成立以来编译的第一本文集。这些文章都是从近二年国外杂志中挑选出来的。考虑到炼钢技术在我国当前大型铸锻件生产中具有非常重要的地位,故在选题时侧重于炼钢技术方面,另外也选用了一些其他方面的文章。

我们希望这本文集对从事大型铸锻件生产和研究的同行们有所帮助。

本文集的出版是译、校、审各方面工作人员共同努力的结果。但由于译校者水平有限,文中定有错误或不妥之处,敬请读者不吝指正。

洛阳矿山机器厂华镜明、谭清月、李鹿其、孙日升同志和上海材料研究所胡世孚同志对本文集提出了一些宝贵意见,在此向他们表示衷心的感谢。

除译校者之外,参加本文集审稿工作的有吴季恂、冉启方、孙家骧、王一珠等同志。向永久同志做了大量的描图工作,并设计了封面。

本文集责任编辑是郭世久和许健同志。

郑州机械所

大型铸锻件行业技术室

1987年5月

# 目 录

## 前言

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 1、炼钢技术—优质汽轮机转子锻件的关键.....                 | 1  |
| 2、NK—AP钢包精炼的发展.....                      | 9  |
| 3、大型汽轮机转子的计算机自动化检测及寿命分析.....             | 10 |
| 4、高质量汽轮机铸件的制造和发展.....                    | 25 |
| 5、采用钢包处理炉和气体搅拌技术改善生产和质量.....             | 35 |
| 6、钢包精炼的渣和熔剂.....                         | 39 |
| 7、单电极直流电弧炉.....                          | 53 |
| 8、用计算机控制电弧炉的操作.....                      | 59 |
| 9、锭模内粉料对底注钢锭质量的影响.....                   | 66 |
| 10、煤气公司推出新型热处理工艺.....                    | 73 |
| 11、杂质和合金微量添加剂对Cr-Mo-V钢组织和性能的影响.....      | 82 |
| 12、转子淬火裂纹危险性的分析与评价.....                  | 85 |
| 13、杂质对耐热Cr-Mo-V钢回火脆性倾向的影响.....           | 88 |
| 14、大型转子淬火时应力状态的研究.....                   | 91 |
| 15、边界元法用于二维及三维的包含有相变凝固问题在内的非稳态热传导问题..... | 95 |

# 炼 钢 技 术

## ——优质汽轮机转子锻件的关键

V.P.Swaminathan等



一个大型汽轮机转子锻件，成品锻件重约27吨。

(照片由Arbed Saarstahl提供)

以矿物燃料为动力的发电厂所使用的大型汽轮发电机通常以3600转/分的转速运行。大部分汽轮机转子和发电机转子都有轴向中心孔。由于转子锻件具有很大的质量，在其周围又装有叶片，因此，运行时中心孔要承受很大的应力。所以，为保证转子有较长的运行寿命，应有良好的心部质量和均匀的机械性能。

50年代制造的转子锻件存在许多问题，这些问题与锻件内部的化学成分偏析、气孔、非金属夹杂及含氢量有关。所有这些因素都能影响转子的机械性能及其可靠性。钢中的氢能引起白点；大量的象磷和锡这样的残留元素能引起转子锻件的脆化或使其韧性下

降；硫能产生偏析和夹杂，在1974年发生灾难性破坏的TVA Gallatin 2号转子的裂纹源处就发现了类似的这种夹杂。

本文集中论述50年代以来应用于转子锻件的炼钢技术的进展，电力研究所(Electric Power Research Institute—EPRI)和西屋电力公司(Westinghouse Power Generation Divisions—WPGD)的合作项目所取得的成果生动地显示出了这些进展。在这些合作项目中，他们应用了低硫硅脱氧、真空碳脱氧和电渣重熔等炼钢工艺制造转子锻件，并衡量了这些工艺对转子锻件的质量所产生的有益的结果。

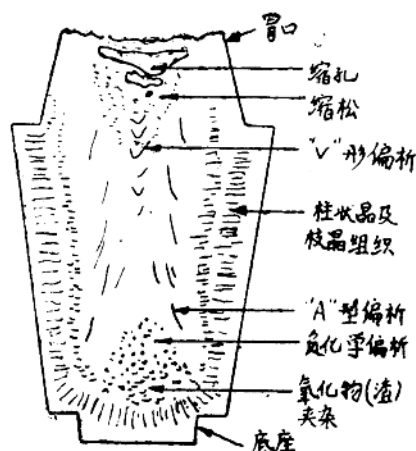


图1 大型钢锭内部典型质量状况示意图

## 炼钢引起的转子锻件的 质量问题

生产一个重约27吨的汽轮机转子所需钢锭的重量为90吨。重约225吨的大型发电机转子则需要455吨重的钢锭。

许多转子锻件的质量问题可追溯到铸锭阶段，有些问题是大钢锭所固有的，并会随着钢锭尺寸的增加而更为严重。

大钢锭中可能见到的情况（如图1所示）包括顶端缩孔、疏松、局部金属偏析（“V”形偏析）、柱状晶、“A”形偏析、负的化学成分偏析，以及氧化物夹杂或夹渣。不正常的组织一般位于钢锭顶部或底部，中心线附近的金属也较容易产生质量问题。

大型钢锭可能需要两天时间才能完全凝固。“A”形偏析和“V”形偏析就是在这期间形成的。硫也可能产生偏析并形成硫化锰夹杂。因为大部分钢锭的顶部和底部都要切除掉，所以并不是所有的缺陷都会留在成品锻件中，成品锻件中的缺陷主要是偏析、疏松和夹杂。

一个理想的转子锻件应具有如下特性：化学成分均匀、残留元素（如硫、磷）

的含量低、无正（负）偏析、无疏松、气体含量低（尤其是氢）、无夹渣、无锻造裂纹或皱皮、无热处理缺陷（由变形或热应力引起的开裂），并具有均匀的机械性能。

进展 50年代后期，炼钢技术发生了两个重要的新变化：由酸性平炉改为碱性电炉以及采用真空除气技术。

使用碱性耐火炉衬意味着能够使用更好的精炼渣，其结果是：钢中磷和硫的一般含量大约减少了三分之二。真空除气技术则减少了钢液中气体的含量。

随着转子锻件炼钢技术的发展，铸模设计和耐火材料得到了改进，使用了更好的补缩方法和新的精炼工艺（其中几种方法将在以后讨论）。

用超声波探伤技术检查整个转子锻件也非常重要。目前，着手研究和改进熔炼及锻压技术，以改进锻件内部质量，使锻件的最后检验变得容易。

值得注意的是，转子锻件的中心孔提供了一个接近中心线的可进行内部探伤的表面。由于该处是铸锭中最后凝固的部分，所以比其它部分更容易产生非金属夹杂和疏松。

## 电力研究所—西屋公司 合作研究的三种工艺

电力研究所—西屋公司合作项目的意图是提供先进的熔炼与制锭方法，以制造用于高温汽轮机的大型 1Cr-1Mo-0.25V（ASTM A470, Class 8）锻钢转子，然后，将其冶金与机械性能同普通转子锻件相比，并最后安装在装机容量为510兆瓦的发电设备中。

工艺的选择 开始所考虑的新工艺有低硫硅脱氧、真空碳脱氧（VCD）、电渣重熔（ESR）、中心区域重熔（CZR）和电渣加热冒口（ESHT）。前两种

工艺(低硫硅脱氧和 VCD)是由普通工艺改进而来的。这两种工艺都是在钢包精炼炉中用还原性炉渣处理钢水以降低含硫量。在 VCD 工艺中,真空处理时由碳代替硅进行脱氧。其它三种是电渣重熔工艺。钢水重熔的数量随工艺而异:名义上说来,ESR 为 100%, CZR 为 10—15%, ESHT 为 8—5%。

合作项目选定的工艺为低硫硅脱氧、VCD 和 ESR。

西屋公司选择了大约重 27 吨的、经过加工的转子(即锻件重 36 到 45 吨)做试验。试棒材料取自位于每个锻件的顶部和底部的、直径 1070 毫米、长 915 毫米的大的延伸部分,将这些试料头连附在转子锻件本体上,使之承受同样的热加工和热处理。三个钢锭的重量大致相等,各重 82 到 86 吨。

**低硫硅脱氧钢锭** 日本铸锻公司(JCFC), Kitakyushu 制造了一个 103 吨的低硫硅脱氧钢锭。先用电炉化钢,覆盖在钢液顶部的一种特殊渣与钢反应,除去一些如磷、硫这样的有害元素。然后,钢水经浇包转入钢包精炼炉中。在精炼炉中加入有关材料形成脱硫渣。把精炼炉定位在一个电弧加热站上,温度保持在  $1580^{\circ}\text{C}$ 。用氩气通过钢液,以促进搅拌和加快脱硫速度。最终硫含量低于 0.001%。

经精炼的钢水在真空中浇入锭模时进行真空除气,真空度约为 0.5 托(65 帕)。

在钢锭顶部覆盖上绝热材料以保持温度,因而也就控制了凝固。

低硫硅脱氧工艺比常规熔炼技术优越之处在于:

- 1、把含硫量降到 0.001% 以下,而在普通精炼过程中一般约为 0.01%。
- 2、减少了硫的偏析和硫化物夹杂。
- 3、改进了钢锭的心部质量。

**VCD 钢锭** Muroran 的日本制钢厂(JSW)生产了一个 104 吨的低硫 VCD 钢

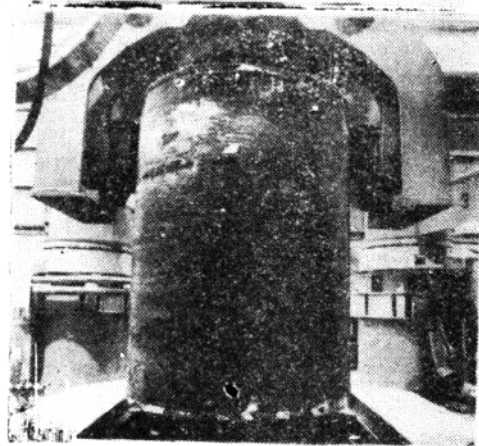
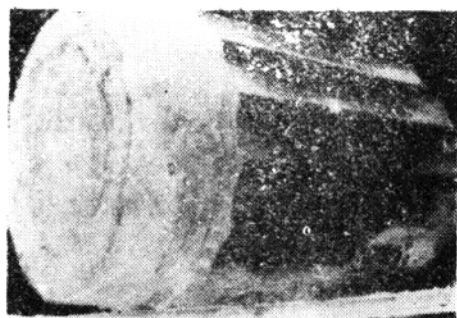


图 2 上图是一个典型的真空浇注的低硫硅脱氧钢锭。下图是 ESR 钢锭。注意没有常用的冒口

锭。这种工艺除了可使钢锭中硅的含量非常低(为 0.05%)以外,同低硫硅脱氧工艺类似(低硫硅脱氧钢锭含 Si 0.23%)。

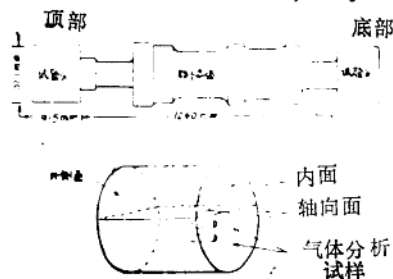


图 3 转子件简图及试料头的位置。转子长约 7.3 米

用 VCD 工艺,钢锭的含硫量约减少到

0.001%。在约0.4托(5.3帕)的真空度下进行真空除气。脱氧过程部分发生在精炼阶段,部分发生在真空浇铸阶段。钢锭浇注后,在其热的顶部覆盖保温材料(稻壳)。

用低硫硅脱氧和VCD法生产的钢锭在表面上相似,其冒口顶部(即保温冒口)都有凹陷的浅坑。图2表示一种典型的真空浇铸钢锭。

**ESR钢锭** 西德Arbed Saerstahl Voelklingen-Saar(ASVS)厂使用直径为2300毫米的铸模制造了一个84吨的ESR(即电渣重熔钢锭)。过程是首先将钢料在电弧炉中熔化,然后在真空中把钢液铸成直径为510毫米的长电极。四个合金电极在ESR炉中同时重熔。在装置的水冷铜模中装有专门的脱硫渣,由电流通过电极和熔渣来实现加热。重熔钢的液滴从电极端部落下,经过熔渣并与之反应,从而降低了含硫量。用特制的保护罩在熔渣上方保持干燥的空气气氛,以免钢水吸氢。接着,钢水逐渐地凝固,形成的铸锭连续地从模底拉出。图2中示出了一个ESR铸锭。

ESR工艺的优点是:

- 1、在任何时候都只有很小部分的钢是液体,也就是保持了一个接近单向凝固的前沿,并实现了对凝固过程的控制。这同普通钢锭相比有了显著的改进。

- 2、金属偏析(包括正的和负的)都减少了,并减少了非金属夹杂。不存在形成“A”形偏析的条件,因此,显著地改善了心部质量。

- 3、钢锭收得率约80%,而普通钢锭为50%。

- 4、ESR锻件的化学成分和机械性能比普通锻件更均匀。

**工艺** 三个转子的锻造和热处理参数尽可能保持一致。低硫硅脱氧钢锭和VCD钢锭采用一次锻粗;ESR钢锭不经锻粗而直接锻成。文首的照片为锻造过程中一个典型的中间工序。这三个钢锭全都在950℃奥氏体

化、然后强迫风冷并在680℃回火。转子锻件的大致形状和试料头的尺寸及位置如图3所示。

**性能检查** 热处理后的锻件要检查其冶金特性,包括化学成分的均匀性、硫的分布、偏析的分布以及用超声波检验与中心孔磁粉探测其内部材料的致密性。还必须接受机械性能检查:抗拉强度、夏氏冲击、断裂韧性、低周和高周疲劳强度、蠕变破坏试验等。这些测试是在试样上进行的。试样取自锻件顶部与底部的试料头及沿转子长度方向的中心部位。

这三个转子的冶金和机械性能同1971至1977年间用普通炼钢技术生产的29个西屋转子锻件的平均性能相比都有了改善。

## 标志“冶金质量完善” 的三个转子

表1列出了这三个转子的化学成分和29个西屋转子的平均化学成分。

同时测定了钢锭锭身和冒口处碳和硫的轴向偏析。ESR钢锭中没有硫的轴向偏析,仅在顶部保温帽处出现约0.03%的增碳。低硫硅脱氧钢锭和VCD钢锭中的碳在底部为典型的负偏析,在顶部为正偏析,同钢锭主体部分的差值约为0.12%,但在冒口处增加的更多。在这两种钢锭中,从底部到顶端实际上没有硫的偏析。

同普通工艺相比,精炼技术和钢锭生产工艺的改进能够大大减少潜在有害元素,如硫和磷。例如,典型的含硫量在50年代为0.020%,到70年代末降到了0.010%。现在,借助于这些先进的技术,能将含硫量限制在0.001%到0.002%之间(依不同工艺而定)。对含磷量的作用也是相当明显的:从50年代的0.025%降到70年代的0.010%,再降到今天的0.004—0.009%(也是依不同工艺而定)。

这三个锻件中气体的含量也低得多,如氢就保持在2ppm以下。

表1 新式转子锻件和普通转子锻件的化学成分<sup>(1)</sup>

| 元素 | 低硫硅脱氧  | VCD<br>低硫硅脱氧 | ESR <sup>(a)</sup> | 普通工艺 <sup>(s)</sup> | ASTM A470<br>Class8 |
|----|--------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| C  | 0.31   | 0.28         | 0.31               | 0.32                | 0.25—0.35           |
| Mn | 0.78   | 0.76         | 0.78               | 0.83                | 1.0max              |
| P  | 0.007  | 0.004        | 0.009              | 0.009               | 0.015max            |
| S  | <0.001 | 0.001        | 0.002              | 0.009               | 0.018max            |
| Si | 0.23   | 0.05         | 0.19               | 0.27                | 0.15—0.35           |
| Ni | 0.33   | 0.40         | 0.27               | 0.23                | 0.75max             |
| Cr | 1.13   | 1.18         | 1.18               | 1.07                | 0.9—1.5             |
| Mo | 1.15   | 1.21         | 1.18               | 1.17                | 1.0—1.5             |
| V  | 0.23   | 0.26         | 0.26               | 0.25                | 0.2—0.3             |
| Sn | 0.002  | 0.010        | 0.003              | 0.008               | —                   |
| Sb | 0.0012 | 0.0015       | 0.001              | 0.001               | —                   |
| Cu | 0.04   | 0.04         | 0.04               | 0.09                | —                   |
| Al | 0.004  | 0.005        | 0.009              | 0.003               | —                   |
| As | 0.003  | 0.006        | 0.011              | 0.010               | —                   |
| N  | 84     | 96           | 105                | —                   | —                   |
| H  | 1.5    | 0.37         | 1.6                | —                   | —                   |
| O  | 16     | 38           | 33                 | —                   | —                   |

注：1、气体单位用ppm，其它元素用Wt%；2、转子顶部和底部的平均值；3、29个普通转子（1971—77年制造）的平均值；4、气体含量从冒口处测得。

“洁净”的锻件 在锻件顶部和底部试料头以及中心孔套料的轴向和径向截面上进行了硫印试验。低硫硅脱氧钢锭的硫印基本“洁净”，只有少量与偏析带有关的模糊的痕迹。在VCD锻件的相似位置上却显出与偏析带有关的轻度的然而清晰的条纹。从ESR锻件得到的硫印也非常洁净，仅有一些模糊的均匀分布的痕迹。当含硫量约0.002%

时，钢锭中的硫化物夹杂实际上就消除了。

偏析带 宏观浸蚀用10%的过硫酸铵和热盐酸。低硫硅脱氧和VCD钢锭顶部的试料头和顶部中心套料的宏观浸蚀截面所呈现的“A”偏析花纹与钢锭顶部有关。中心套料的其余部分和下部试料头呈现的细晶带可能同枝晶间凝固有关。

ESR钢锭的顶部试料头显示出轻微的、但又明显的偏析条纹和树枝状晶体花纹。在

横截面上可见偏析带，其中短而细的蠕虫状条纹各取辐射方向排列成圆形。在顶部试料头的纵截面上有轻微的过渡区花纹。

在用这三种工艺制造的铸锭中未发现“V”形金属偏析。

**超声波探伤** 按照ASTM A418—77的规定，在打中心孔及未打中心孔的条件下进行超声波探伤。探伤时使用频率为2.5兆赫、直径为25毫米的陶瓷探头。低硫硅脱氧和ESR钢锭没有回声信号。VCD铸锭有

三个小的信号——是在钢锭顶部中心线附近，估计尺寸介于 $\varnothing 1.2$ 和 $\varnothing 2$ 毫米之间。钻孔套料后这种信号可以去掉。在打过中心孔的转子上就没有这种信号。

**磁粉探伤** 转子中心孔用磁粉进行探伤。电流通过中心导体在转子中心孔表面诱发了一个环形磁场。所用电流值是4、8和20安/毫米（中孔直径）。每次测试都要重复。中心套料也要进行探伤，即用通过电流而产生磁感应的方法探伤。

表2 优质转子锻件和普通转子锻件的抗拉强度及冲击性能

| 拉伸性能           | 边 缘 |           |      |            | 套料棒  |           |      |            |
|----------------|-----|-----------|------|------------|------|-----------|------|------------|
|                | 低 硫 | VCD<br>低硫 | ESR  | 普 通<br>转 子 | 低 硫  | VCD<br>低硫 | ESR  | 普 通<br>转 子 |
| $\sigma_{0.2}$ | 620 | 636       | 664  | 625        | 627  | 644       | 662  | 620        |
| $\sigma_b$     | 779 | 783       | 815  | 785        | 786  | 785       | 814  | 779        |
| $\delta$       | 21  | 23.6      | 20.5 | 19.3       | 20.5 | 22.6      | 20.7 | 20.6       |
| $\psi$         | 62  | 68.5      | 60.7 | 54.4       | 62   | 68.6      | 60   | 59.6       |
| <b>夏氏冲击性能</b>  |     |           |      |            |      |           |      |            |
| -18℃时的冲击功（焦）   | 7.9 | 9.2       | 12.2 | 8          | 4.7  | 9.2       | 9.5  | 6.8        |
| 24℃时的冲击功（焦）    | 14  | 23.8      | 23.3 | 14.3       | 10.8 | 12.2      | 16.7 | 11.2       |
| 上平台冲击功（焦）      | 154 | 158       | 136  | 102        | 134  | 136       | 109  | 94         |
| FATT, C        | 77  | 52        | 82   | 86         | 99   | 64        | 95   | 102        |

注：1、29个西屋老式转子（1971—77年生产）的平均值；2、四个位置处的平均值，兆帕 $\times 0.145 = 10^3$ 磅/吋<sup>2</sup>；3、两个位置处的平均值，焦 $\times 0.738 =$ 呎·磅， $^{\circ}\text{F} = 1.8^{\circ}\text{C} + 32$

磁粉探伤时，在ESR转子中心孔孔壁处没出现信号。中孔套料上出现了两个小的信号，是由Ca、Al、Si的氧化夹杂并含有少

量MnS产生的。

低硫硅脱氧转子在测试电流小的情况下，磁粉探伤没有什么信号。但在20安/毫米

(中孔直径)时,在顶部1820毫米的中心孔处有微弱而清晰的信号。这些信号是弥散的,是由与中心孔表面相交的“A”偏析条纹引起的,并引起了磁场的局部异常。中孔套料试件的测试结果证实了这种花纹的存在。

VCD锻件在小电流情况下也没出现什么信号,但在20安/毫米时,在上端轴颈处显示了四个小的信号(0.2~2.5毫米)。

总之,可下这样的结论:当在原始钢锭中不存在轴向中心疏松或二次缩管时,三个锻件的冶金质量是优异的。

硫印结果表明,低硫和VCD锻件的上部的“A”形偏析带的洁净程度甚至比用普通工艺制造的平均含硫量约为0.01%的钢锭要好。由于聚集在偏析带内的硫和硫化物有许多潜在的有害作用,所以对于大型转子锻件轴向中心线附近的质量来讲,这个发现是很重要的。ESR中不存在这样的偏析带,相对于常规工艺这是一个改进。

主要合金元素铬、钼、钒的金属偏析出现在低硫硅脱氧锻件的“A”形偏析带内,也出现在ESR锻件的细小的晶间偏析条纹内。通常,低硫和VCD锻件材料中的偏析稍多一些。微区探针分析时,其浓度比一般背景成分高15~90%。曾有报道<sup>[5]</sup>,枝晶间区内溶质元素富集的结果甚至在ESR钢锭中也存在显微偏析。但是,这种少量的偏析仍属正常。

## 优于普通转子的各种性能

抗拉和冲击试验结果表明,用新技术制造的转子沿着长度方向以及从边缘到中心都有较好的均匀性。这些结果综合列于表2。边缘试样取径向,作拉力试验的中心孔套料试样是沿轴向切下的。夏氏冲击试样在两处都是沿径向切下的。

新式转子的抗拉强度和抗冲击性能均相当于或优于29个普通转子的平均性能。普通转子的塑性具有轻微的各向异性(径向/轴

向),而新转子的塑性在两个方向上都是极好的。高达565℃的高温抗拉强度试验结果表明,此性能与普通转子锻件相近,但塑性稍好一些。

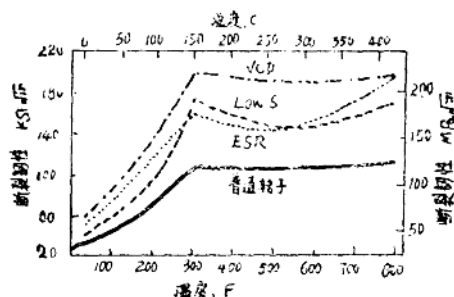


图4 表明新式转子锻件断裂韧性的改善。这种改善主要归因于钢锭中含硫量低和与此相关的纯净度高

**冲击试验数据** 转子表面的冲击能量比中心孔处(套料试棒)的要稍高一些,而断口形貌转变温度(FATT)值则是套料棒的较高,其差别的原因可能是热处理时表面和心部的温度和冷却速度不同。

同普通转子锻件相比,用新工艺制造的转子锻件的夏氏冲击能量值的上平台值大约增加40%,而且具有较低的FATT值。这可能是由于其含硫量非常低,随之非金属夹杂特别是MnS大量减少的缘故。经过阶段冷却和在540℃保温2000小时的等温脆化处理,没有发现回火脆性。

**断裂韧性** 平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 是从转子锻件顶部和底部的试料头取50毫米、75毫米厚的两块紧凑拉伸试样,在25℃~70℃的温度范围内测定的。弹塑性断裂韧性 $J_{Ic}$ 是在150℃~425℃的温度范围内测定的。结果综合在图4中。

用新技术制造的锻件的韧性有了显著提高。在室温下,同普通转子相比,低硫硅脱氧转子、ESR转子和VCD转子的平均断裂韧性分别提高了25%、50%和80%。

同50年代生产的老式转子相比,三个新

式转子的 $J_{1c}$ 值为其三倍。同70年代早期生产的普通转子锻件相比, $J_{1c}$ 为其两倍。

新型转子锻件(由J—R曲线的斜率表示)的断裂模数也大得多。这意味着这些钢在裂纹萌生以后能较好地阻止亚临界裂纹的生长。

通过增加断裂韧性,钢的脆性破坏的可能性应该减少,并且能容许其内部有更多的缺陷。断裂性能的改进主要是由于钢中含硫量低,以及与此相关的较好的洁净度。VCD转子的韧性的改进,部分是由于奥氏体化后冷却速度较快。

**疲劳数据** 在室温下对光滑试样进行旋转变样高周次疲劳试验。试验结果同普通转子锻件接近。室温下的疲劳持久极限为415兆帕左右,约为抗拉强度的一半。

在控制应变条件下进行的低周试验是在24℃与540℃之间进行的。在各种情况下优质转子钢都有应变软化出现,并且随着温度的增加而增加。在常温下,应变寿命特性同普通钢类似。在较高温度下,尤其在425℃和545℃时,应变寿命特性有所改善。同老式转子在425℃时的数据相比,优质转子钢好得多。由于优质转子钢中不存在硫化锰夹杂,所以它的低周疲劳寿命得到改善。

**蠕变数据** 蠕变试验是在恒定载荷下,在光滑—缺口组合试棒上进行的。试验分别在510℃、540℃、565℃和595℃温度下进行。在不同的载荷下,这三个锻件的蠕变寿命在500到20000小时范围内。试验结果以应力与Larson—Miller参数的关系曲线表示出来。这三个优质转子的蠕变性能比29个普通西屋转子的平均性能要好。

新式转子优良的延性(80%的断面收缩

率和24%的延伸率)表现在短期蠕变的情况下。在长期蠕变情况下,低硫硅脱氧和ESR转子锻件的延性要降低(断面收缩率降到30%,延伸率降到11%)。然而VCD钢在全部断裂时间范围内都具有优良的蠕变延性(见图6)。

总之,三种新的钢的冶炼工艺——低硫硅脱氧、真空碳脱氧和电渣重熔——在生产三个优质转子锻件中取得了成功。这三种工艺都使钢中含硫量降到很低,结果得到了优良的心部质量和纯净度。无损检测的结果也是良好的,没有测到可见信号。其机械性能与普通转子相当或者更好。

新式转子的优点在易受含硫量影响的性能方面尤其明显:抗拉塑性、夏氏冲击能量、断裂韧性和蠕变断裂延性。转子上下部性能相差很小。

近六年来,用这些新工艺制造了很多转子,没有一个有质量问题,全都符合西屋电气公司所提出的质量要求。

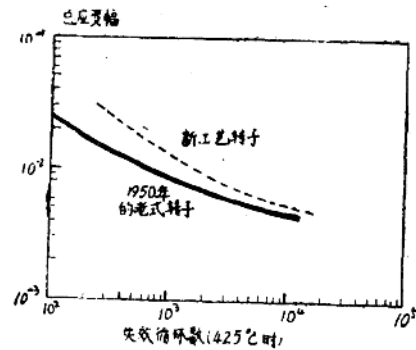


图5 新式转子中没有MnS夹杂,使其低周次疲劳寿命改善,超过老式转子

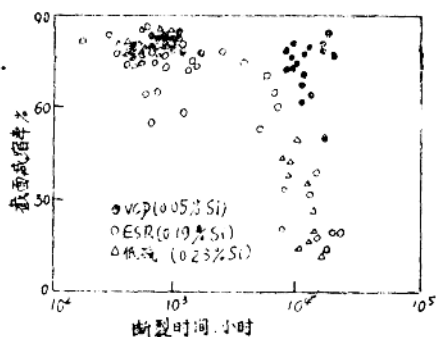


图6 VCD锻件在整个断裂时间范围内都具有良好的蠕变延性，而ESR和低硫硅脱氧锻件在较长一段时间内蠕变延性下降

(参考文献略)

(许健译自《Metal Progress》 December 1985 P52—59 谢斐娟校)

## NK—AP钢包精炼法的发展

R.Smailier等

日本福山厂采用新的电弧加热钢包精炼法，由于降低了氧气顶吹转炉出钢温度，提高了热效率，并能精确控制成分，从而降低了炼钢成本，改善了产品质量。现以工业规模生产含硫量低于0.001%，含磷量低于0.005%的钢。

近年来，优质钢的需要量大为增加，如对低温环境下干线管道用钢和钻井平台管接头用钢的大量需求。与此同时，还有对提高钢的纯净度的总的要求。几乎所有的提高钢质量的工艺，或者要求在初期冶炼设备中增加时间和材料，或者要求在钢包中进一步处理钢液，从而需要较高的出钢温度，以满足对温度的要求。同时强调了在连续铸锭中提高钢液温度精确度的重要性。因此，正在扩大应用电弧加热法来加热钢包中的钢液。

自本世纪五十年代后期以来，文献中已介绍了许多这一类方法。但在采用周期时间短的氧气顶吹转炉进行大吨位炼钢时，就要求开发出一种新的方法，因为在1700℃或更

高的温度下出钢，会导致氧气顶吹转炉操作成本的升高，并降低冶金质量，对于脱磷来说更是如此。为了解决这些问题，福山工厂2号转炉车间于1981年11月引入了日本钢管厂电弧加热装置(NK—AP)。当时，该车间用三台250吨顶吹加底吹转炉，每月生产45万吨钢。RH脱气装置和顶部气体喷吹脱硫装置，可用于生产超低硫钢以及降低氢含量。

### 设 备

NK—AP设备安装在2号转炉车间从前的铸锭和脱模工段，位于RH脱气设备附近，以适应特种钢生产的需要。这个车间的每一台炉子都有自己的通往连续浇铸间的钢包运输轨道。需脱气和经NK—AP法处理的钢水，用桥式吊车将钢包由输送车上吊起，运往有关的装置。

NK—AP基本设备和有关功能的示意图示于图1。装置的俯视图示于图2。安装于

2号氧气转炉车间的设备的主要规格见表1。此设备的主要功能如下：

1、采用大容量变压器，以较高的热效率迅速加热钢液。

2、精确添加合金材料，并用惰性气体搅拌达到均匀。

3、通过水冷顶盖吹入惰性气体造成非氧化性气氛，在此气氛下添加合金。

4、通过加硅酸钠进行钢液脱磷。

5、安装除渣设备，以改善和稳定合金收得率并获得超低硫钢液。

6、深度喷吹脱硫材料，包括钙添加剂。

7、通过连续计算电弧长度来控制电弧功率，以最大限度提高钢包内衬寿命。

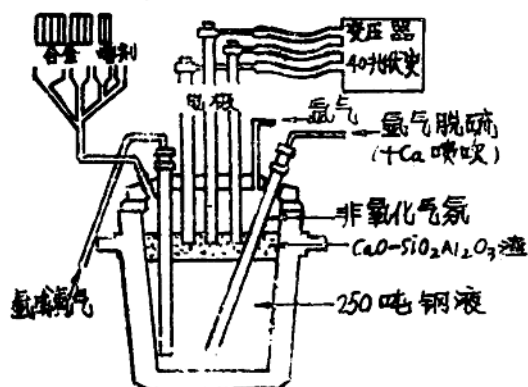
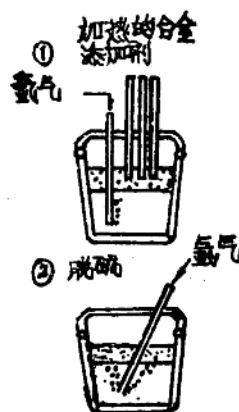


图1 NK-AP设备示意图



周期时间短的大吨位氧气转炉钢之所以能够可靠地进行生产，就是因为工艺设备简单且性能稳定。采用具有适当耐火内衬的标准钢包，以降低钢中的含氧量，并减少渣蚀以保护上部包衬。钢包的上部表面应不易积存要排除的钢渣。

氧气转炉排除的大部分炉渣都可以重新使用。渣量的控制可以很容易地通过倾斜钢包出渣或采用真空除渣设备来达到。

设备长期可靠运行的主要因素是NK-AP的半永久性水冷顶盖。这个有专利权的顶盖的设计特点是将维修停工时间降到最低限度，并保证钢包上部空间内有一个非氧化性气氛。顶盖上的一些开孔可用于：

- 1、电弧加热。
- 2、添加合金。
- 3、测温 and 取样。

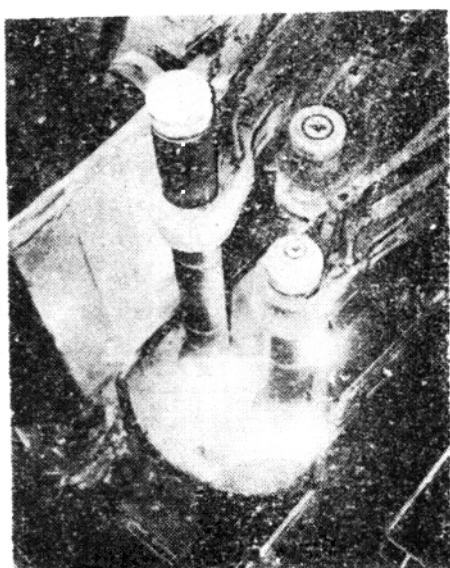


图2 NK-AP设备的俯视图

4、排除气体。

5、装粉末喷枪。

6、装顶部搅拌喷枪(可结合采用底部透气塞)。

电弧加热设备与普通电弧炉的不同之处,主要在于它安装有电极调节控制装置,以保持埋弧式加热。这样,在钢包侧壁附近也能采用较高的加热功率水平,而不会严重浸蚀包衬。

表1 福山厂NK-AP设备规范

|       |                              |
|-------|------------------------------|
| 一次容量  | 120~265吨                     |
| 生产率   | 10.4万吨/月                     |
| 加热设备  |                              |
| 方法    | 电弧                           |
| 变压器   | 4 万千伏安                       |
| 电压    | 335~535伏                     |
| 电极直径  | 18吋                          |
| 节园直径  | 1300毫米                       |
| 气体顶喷吹 |                              |
| 加热时   | 吹氩0.4~0.8标准米 <sup>3</sup> /分 |
| 脱硫时   | 吹氩2.0标准米 <sup>3</sup> /分     |
| 粉末喷吹  |                              |
| 种类    | Ca-Si                        |
| 气体流量  | 氩气2.0标准米 <sup>3</sup> /分     |
| 加合金   |                              |
| 合金料斗  | 6 个                          |
| 熔剂料斗  | 3 个                          |
| 钢包盖   | 具有非氧化气氛的水冷盖                  |
| 扒渣    | 真空除渣设备                       |

喷粉设备用于加速脱硫反应和(或)控制硫化物形状。NK-AP设备使用双喷枪系统在电弧加热时进行顶吹搅拌:一个喷枪用于电弧加热时搅拌,另一个在不加热时用于搅拌和(或)喷粉。

合金加入装置在脱氧后没有氧化性渣的情况下,往钢液中加入合金,以达到最大的经济效益。利用这个装置能够自动而精确地称量出按钢号化学成分要求的合金材料的数

量。

在整个工艺过程中广泛采用电子计算机来同时控制各分项操作。

处理过程中产生的烟气用一个整体的排烟罩收集起来。排烟罩布置在有电极穿过的电极孔周围,并安装在水冷顶盖的上面,通过带压力平衡风门的管道与集尘室相连,以保持对钢包上部空间中非氧化气氛的控制。

## 冶金功能

NK-AP法如同大多数钢包精炼法那样,具有很大的灵活性,能适应广泛的多种多样的冶金要求。因此,不能用一种标准的叙述来说明钢的生产工艺。在正常操作条件下,此设备仅用于生产特种钢。所以,整个处理周期变化,可能短到10~15分钟,长到50~60分钟。炼钢控制应考虑到,与生产普通钢所需时间较短相比,生产特殊钢有不同的时间要求。

NK-AP法可广泛应用于各种场合。在日本,高生产率的供应扁钢轧材的钢厂大都采用真空除气法,因而常将NK-AP法与氧气顶吹转炉炼钢、真空除气和连续浇铸配套进行精炼,以改善整个炼钢车间的生产。然而在北美,真空除气通常不用于大吨位的扁钢轧材用钢的生产中。所以,在比较美国和日本的炼钢实践时,应考虑到真空除气的应用这一点。

处理时间随某一特定钢种的特殊需要而定。为提高温度和控制成分进行的处理只需15~30分钟,而深度脱硫到很低的水平(硫含量不超过10PPM)约需50分钟,只进行钢液脱硫则不超过15分钟。将各炉出钢顺序适当地排好,以克服断流,保证连续浇铸中钢水的连续流动。

**加热** NK-AP法的应用允许氧气顶吹转炉的出钢温度降低70~80℃,钢液用于随后进行的钢包精炼和RH除气。在福山厂,加热速度为3.5~4.5℃/分,使整个钢液处

理时间缩短。通常温度是在下列条件下提高的：氩气以0.4~0.6标准米<sup>3</sup>/分的速率向上搅拌，次级电压385~435伏，次级电流40~50千安。这些条件足以形成3000~10,000°K范围内的高温弧柱。对于整个效率和经济性来说，埋弧加热是用于保护钢包和喷枪的耐火材料，并改善整个热效率。

下述因素用来确定NK-AP的电效率。

$$\text{NK-AP电力消耗 (千瓦小时/吨)} = \frac{\text{NK-AP中温度的提高 (°C)}}{\text{加热效率} \times 4.13 [\text{°C}/(\text{千瓦小时/吨})]} \quad (1)$$

$$\text{总加热效率} \eta = \frac{\text{出钢温度下降值 (°C)}}{\text{NK-AP电力消耗 (千瓦小时/吨)} \times 4.13 [\text{°C}/(\text{千瓦小时/吨})]} \quad (2)$$

$$= \frac{\text{出钢温度下降值 (°C)}}{\text{NK-AP中温度的增高值} \times \text{加热效率}} \quad (3)$$

图3中表明，由于出钢温度较低，因而提高了效率，出钢温度可降低78°C（由大约1750降到1675°C）。钢液在经过RH除气到开始NK-AP法处理时的温差仅为58°C。NK-AP法处理以后，钢包的温度降低速率比常规方法低得多，这是因为钢包的加热均匀。由于福山厂采用NK-AP法，氧气顶吹转炉平均出钢温度下降了78°C，因而大量节约了氧气顶吹转炉的耐火材料，提高了生产率及铁合金的收得率，降低了含磷量。

**脱磷** 氧气顶吹转炉出钢温度低引起钢液最终含磷量显著降低，是因为低温下脱磷率较高。此外，用NK-AP方法时钢液可在钢包内用硅酸钠( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ )处理来脱

磷。为此，在钢包内可保持大量氧气顶吹转炉炉渣。通过出钢时用硅酸钠进行处理然后，NK-AP设备上进一步搅拌，渣中较高的氧化铁含量能造成有利于脱磷的条件。在实践中，5~15公斤/吨硅酸钠加入到20公斤/吨氧气顶吹转炉渣中，顶吹气体搅拌在NK-AP设备中要进行大约15分钟。然后，此渣必须清除，以防磷的返回。

这种处理方法保证脱磷>80%，可生产出含磷量<0.005%的超低磷钢。福山厂将低磷生铁与钢液脱磷结合起来，可生产出含磷量<0.002%的钢。

**脱硫** 相对于铁来说，还原性条件下（相当于渣的氧化铁含量<1.0% $\text{FeO}$ ）有利于脱硫。氧气顶吹转炉的生产率比平炉高，主要是由于强烈的搅拌作用提高了渣和金属反应的物质传递速度。既使用还原渣与钢液接触，脱硫所需的总的时间也取决于混合渣和金属所使用的搅拌能量。因此，所有发生于钢包中的高生产率冶金过程都需要钢包有足够的富裕高度，以便混合渣和金属而不发生过分的飞溅。NK-AP设备的主要优点是采用氩气顶吹喷枪以获得较高的搅拌能量。在强烈搅拌期间断开电源，电极升到金属

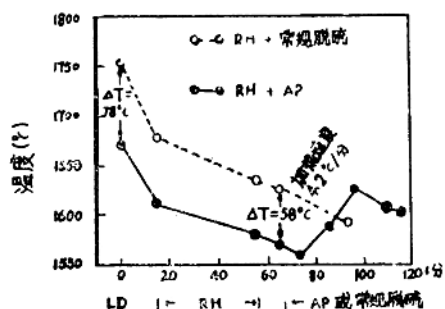


图3 温度变化速度

熔池的上方。

以1.8~2.9标准米<sup>3</sup>/分的流量吹氩气强烈搅拌15分钟(用2孔T形喷枪),以加速渣和金属的反应。这种强烈搅拌的目的在于达到75%的脱硫量,而电弧加热结合较平稳地搅拌的正常脱硫量为50~70%(图4)。利用NK-AP生产普通钢时,经过埋弧加热的再热阶段和其后的渣-金属混合过程,可脱硫约50%。

福山厂用NK-AP法已能大量生产含硫量<10PPM的超低硫钢。生产含硫量最大10PPM的钢已很平常,每月生产高强度钢15万吨以上(主要是干线管道用材)。

**成分控制** NK-AP法结合精确的加料系统和适当的炉渣控制实践,可精确地控制成分。由于NK-AP渣的氧化能力低,对大多数元素来说,铁合金收得率几乎接近100%。在处理过程的初期通常加入成本低廉的再生铝使炉渣脱氧。由于获得专利的炉顶设计防止了空气渗入钢包顶部空间,从而能够保持还原气氛,减少电极氧化,同时防止钢液吸收氧和氮。

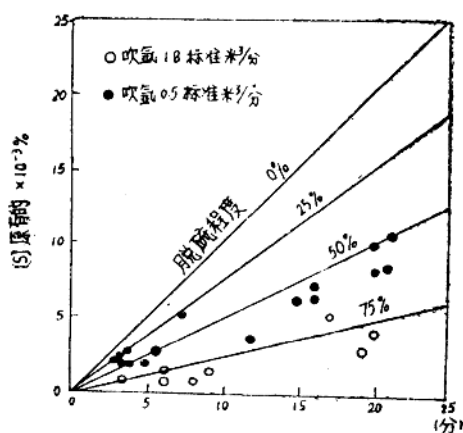


图4 NK-AP法处理过程中的脱硫

## 操作

**过程的灵活性** 除生产超低硫或超低磷钢要求附加的钢包高度外,可以使用普通钢

包。如同大多数钢包精炼法那样,耐火里衬必须是高质量的。由氧气顶吹转炉中无渣出钢是不必要的,根据所处理的钢种不同,相当大量的转炉渣可在NK-AP装置中重新使用,这是它在经济上的主要优点之一。氧化渣可重新使用的程度取决于氧化渣的特性及其含磷量。

要求除渣的程度取决于所处理的钢种。

日本钢管公司既具有倾斜除渣的经验,又具有使用新的真空除渣装置的经验。除渣的程度主要取决于含磷量的规范和所要求的最终含硫量。对于大多数普通轧制扁钢来说,按惯例可在钢包内保留约75毫米氧气顶吹转炉氧化渣。在NK-AP设备上外加炉渣是为了使渣层达到一定的厚度,对于冶炼某一特定钢种来说,这一厚度的渣层可以以最佳的热效率来利用电弧加热。能重新使用已熔化的含有大量热能的炉渣,有助于降低操作成本。

为了生产超低磷和(或)超低硫钢,必须在NK-AP装置中去除几乎100%的氧化渣,并形成新的还原渣。在大多数情况下,应用10~15公斤/吨的渣料将产生足够厚度的渣,可获得超低硫的最终产品。

**气体搅拌** 所用的气体搅拌法包括单一的顶部气体搅拌和底部透气塞与顶部气体搅拌的混合喷吹法。在福山厂以及京滨厂,只用顶部喷枪进行氩气搅拌的方法已采用多年。京滨厂也采用底部透气塞搅拌法。采用顶部搅拌或采用底部透气塞搅拌,取决于工厂的特殊操作要求。

顶部冒泡的喷枪设计是为了造成气体和金属的相互作用以及加热时的搅拌力,与渣和金属深度混合所要求的更为强烈的搅拌大不相同。基面上有4个孔的喷枪用于加热期间进行的氩气搅拌,这样的氩气搅拌足以将热能传递给液体金属。但要避免能够导致电弧不稳定和(或)电弧暴露的过分强烈搅拌。为了进行强烈搅拌,将冒泡喷枪

取出, 插入另一个高强度搅拌喷枪。这个喷枪的设计是为了使渣和金属的反应达到最大限度, 并降低脱硫和(或)合金混合以及使温度均匀所需的时间。在强烈搅拌期间, 电极被升起, 电源被切断。

**电弧加热** 钢包渣层厚度对加热效率的影响示于图5。加热效率约为 $4.0^{\circ}\text{C}/\text{千瓦小时}/\text{吨}$ (实际是 $4.13$ )时相当于电能利用率为 $100\%$ 。正如预料的那样, 薄渣层的热效率较低, 是由于弧柱的辐射热损失较大。然而, 渣层过厚会增加渣的热容量所需的热能量。因此, 电源电压按渣的厚度调节, 以取得最佳的NK-AP设备的热效率。通常渣厚度约为 $120$ 毫米时热效率将 $>75\%$ 。

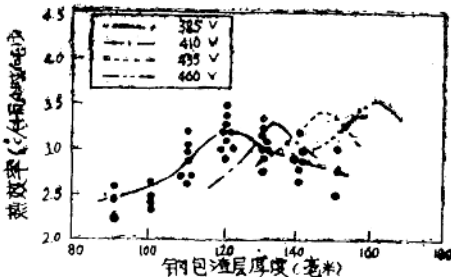


图5 钢包渣层厚度对热效率的影响

在还原气氛的钢包内, 钢液用电弧加热, 是广泛应用的钢包精炼的主要特点, 因此, 了解热效率和电效率是降低费用的基础。氧气顶吹转炉出钢温度的降低, 以及经济地利用电弧加热所需的热量, 可显著降低整个操作成本。氧气顶吹转炉出钢温度的降低和NK-AP设备电能消耗之间的关系示于图6。当转炉出钢温度降低较大时, NK-AP设备电能消耗的总效率得到改善。这主要是由于加热初期的传导热损失, 以及钢包耐火材料和钢液之间温度的平衡。

NK-AP法处理时的热平衡示于表2。升高钢液温度的热效率相当于输入电能的 $68.5\%$ 。钢包内衬在热损失中是一个重要因

素, 这表明当钢厂引入电弧加热系统时, 适当地设计钢包耐火内衬是至为重要的。

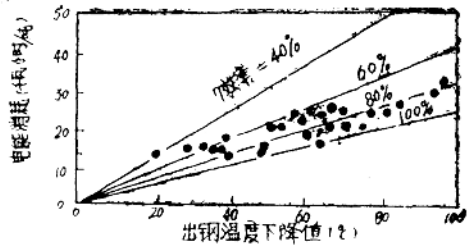


图6 氧气顶吹转炉出钢温度的降低值与NK-AP设备电能消耗之间的关系

**成分控制** 在钢包内保持非氧化气氛和还原性渣, 可使大多数铁合金的收得率达 $100\%$ 。福山厂采用NK-AP设备的铁合金总收得率比单纯采用RH脱气处理的为高(表3)。

**氮的控制** 为了满足低硫钢和更纯净钢的需要, 各种钢包处理工艺得到日益增多的应用, 又出现了由于含氮量增加所引起的冶金问题。在还原气氛下, 有电弧存在时, 氮很容易被钢液所吸收, 导致液体金属中氮含量显著增加。图7表明NK-AP设备氮吸收量的能力, 图中标出 $100$ 炉取样结果, 平均氮吸收量为 $6.3\text{PPM} \pm 4\text{PPM}$ 。

表2 NK-AP法处理时的热平衡

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 输入, $^{\circ}\text{C}/\text{千瓦小时}/\text{吨}$ | 4.13 |
| 输出, $^{\circ}\text{C}/\text{千瓦小时}/\text{吨}$ |      |
| 钢液                                          | 2.83 |
| 钢包中的渣                                       | 0.06 |
| 电阻损耗                                        | 0.41 |
| 冷却水热损失                                      | 0.09 |
| 废气热损失                                       | 0.11 |
| 通过钢包耐火材料的热损失                                | 0.63 |
| 合计                                          | 4.13 |