

中国船级社

船体结构钢检验须知

版本号:XMPM01-1.0-2001

生效日期:2001.06.01

目 录

1. 船体结构钢概述
2. 炼铁
3. 炼钢
4. 炉外精炼
5. 铸造技术
6. 钢材轧制
7. 影响船体结构钢综合性能的主要非金属夹杂物及气体
8. 钢铁生产计算机集成系统与人工智能控制简介
9. 认可试验及试验大纲
10. 参考文献

CCS 工业产品部

1. 船体结构钢概述

1.1 船体结构钢的基本发展过程

船体钢作为结构钢的一个小分支，真正的发展源于 20 世纪 50 年代。它的源动力是船舶建造向大型化、高速化、减轻自重、降低造船及运输成本方向发展。逐渐由西方几个发达船级社在五十年代末提出，并在伦敦会议上把船体结构钢从结构钢中分出，形成现在的一般强度级和高强度级船体结构钢的雏型。并根据强度与韧性确定不同等级。在过去的几十年中，最典型的就是在 235 与 315MPa 之间，还有一个 275MPa 级。八十年代后，随着现代冶金、轧制理论的发展及冶金设备、过程控制手段的不断创新，船体结构钢也同其它系列钢种一样，有了新发展。表现在强度及韧性级别的提高（如 F40 级，NK 规范已列入 KE46 级）和供货状态由早期的热轧、正火到控制轧制、温度—形变控制轧制状态及调质处理。此外，采油平台问世，平台用钢也由船用钢和压力容器用钢移植出海洋平台钢，Z 向性能已是平台用钢的重要指标。随着人类进入 21 世纪和科技水平的不断提高，必将有更多的新材料应用于船舶建造及海洋构筑物。

1.2 船体结构钢的基本属性

规范对每一钢级的船体结构钢都进行了成份与性能的描述，但不等于满足规范所描述的化学成份、机械性能的钢材就是某一级别船体结构钢。船体钢除了满足规范的必要条件外，还应有强度、韧性储备；合适的屈强比；强度、韧性和塑性的适宜性；焊接的适应性和优异的工艺性能等属性。要保证船体钢的这种属性，从钢铁冶金来说是一个系统工程，是基于成分设计、生产工艺及所期望的组织结构的总体描述，其结果是满足用户明确与隐含的要求。

2. 炼铁

2.1 炼铁基本理论与任务

人类历史从铁器时代开始，钢铁就是制作兵器及生产工具的重要材料。这是由于地壳中铁的资源丰富，约占地壳总资源的 5%；铁矿石中铁主要以氧化物及碳酸化合物形式存在，因铁与氧亲和力不很强，较容易被还原制取，使高炉炼铁成为可能。传统的高炉炼铁三大任务就是(1) 排除氧化铁中的氧即还原。就是把氧化铁中的氧分离出来即把铁“解放”的化学反应。高炉中

的还原有“间接还原”和“直接还原”两种方式。在高炉上部，用气体的一氧化碳和氢（由含水的空气在风口燃烧焦炭生成）与氧化铁中的氧化合成二氧化碳而与铁分开，这叫作“间接还原”。其余的氧化铁到达高炉下部高温区，氧化铁中的氧与焦炭中的碳直接化合成一氧化碳而与铁脱离，这叫作“直接还原”。直接还原时吸收大量热量，所以高炉炼铁时尽量发展间接还原以减少直接还原的比例。(2) 把铁与杂石分开即造渣。矿石中的杂质叫作脉石。脉石通常是以二氧化硅为主要成分，这种脉石是酸性的。有些脉石则主要由石灰组成，这种脉石是碱性的。为了去除脉石就需要加入一些促进脉石熔化的材料叫作熔剂或助熔剂。这些物质与脉石化合成为易熔化的中性炉渣。炉渣比铁水轻又互相不溶解，熔化后就可以分开。酸性脉石需要加入碱性熔剂，而碱性脉石需要加入酸性熔剂。高炉主要用石灰石作熔剂而且大部分都在烧结矿粉（炼铁的前道工序，即烧结——就是将通过选矿选出的粉矿与燃料及溶剂按一定比例混合，用其中燃料燃烧产生的热量使原料局部生成液相物，利用生成的熔融体，使散料颗粒粘结成烧结块状）时已经配好预先加入。高炉装料一般只加少量补充或调整配矿料的石灰石熔剂。(3) 铁吸收碳素即渗碳。经过除氧和去掉脉石的铁（称海绵铁）吸收焦炭中的碳素就变成熔点低而含碳高的生铁。至此，炼铁工序结束。

2.2 新型的炼铁工艺前沿技术

随着传统炼铁焦煤资源匮乏及严重的工业有害气体（ CO_2 、 CO 、 NO_x 、 SO_2 ）造成全球变暖，海洋扩大的“温室效应”。人们致力于开发用烟煤或天然气作还原剂，不用焦炭和高炉，将铁矿石在固态条件下还原成海绵铁，这种炼铁方法称为直接还原，所得产品称为直接还原铁 DRI（Direct Reduction Iron）。直接还原是在固态温度下进行，渣铁不能分离，DRI 中含有脉石（ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量 5%~8%），直接用于电炉使渣量增大，电耗增加。迫使人们进一步探索用铁矿石和普通烟煤作原料，经流化床直接生产铁水，使铁与渣分离，称为熔融还原（Smelting Reduction）炼铁。目前，世界各国均根据本国资源（优质铁矿、天然气、烟煤）采用直接还原生产海绵铁。1995 年全世界直接还原生产海绵铁达 3100 万吨。推动直接还原生产海绵铁的另一个原因是电炉炼钢比例超过 30%，优质废钢资源不足，使得电炉炼钢须掺入 30%~50% 的 DRI 海绵铁满足电炉炼钢的要求。

2.3 铁前系统条件确认思路

对于传统生产工艺流程（矿石—炼铁—炼钢—轧钢）的钢铁企业，要生产质量稳定的钢材，没有良好的铁前系统作保障，很难生产高品质铁水。铁前系统又以料场、混匀、烧结为主。钢铁企业均设有原料场，早年的料场规模较小，仅作为一定数量原料贮存场地。随着钢铁工业规模的不断增大，高炉及烧结设备的大型化，原料用量增加，矿石来源及品种不断增多，以及对原料的各种要求（成分、粒度……）日趋严格，因此，发达国家现代化的原料准备技术应运而生。日本钢厂主副原料场岸线长分别为 2000 米和 1000 米左右。宝钢原料场面积占全厂总面积的 8%，原料场地的大小是保证大批量贮存和混匀原料的必要条件。相比之下，有些钢厂原料场地很小，不可能满足卸料设施、一次料场、整粒设施、混匀料场等系统设备的集中或现代化原料场的要求。原料中和混匀质量好坏，直接影响烧结矿成分稳定性。没有成分稳定的烧结原料，就没有成分稳定的烧结矿，高炉也就没有稳定炉况。烧结矿碱度波动降低 0.01%，对炼铁成本和生产低硅生铁的影响都是巨大的，这是铁前系统条件确认的思路。此外，现场了解企业高炉主要技术指标，如

① 高炉利用系数（每立方米高炉有效容积一昼夜生产生铁的数量）。目前国内先进水平在 2.3 以上。

② 焦比（每炼一吨生铁所需要的焦炭量），目前最好水平只需 300 公斤。

③ 燃料比（高炉采用喷吹煤气、重油或天然气之后，折合每吨生铁消耗的燃料总量），目前最好水平在 500kg/吨铁。

④ 休风率（休风率就是休风时间占全部日历时间的百分数），国内外大高炉休风率低于 2%。

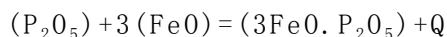
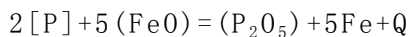
⑤ 生铁合格率等。通过这些主要指标，可综合评价企业高炉生产技术水平与状况。

3. 炼钢

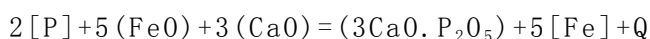
3.1 炼钢基本原理与要求

生铁中除了含有较高的碳外，还含有一定量的 Si、Mn、P、S 等杂质。炼钢就是用氧化（炼铁是还原）的方法去除生铁中的这些杂质，再根据钢种的要求加入适量的合金元素，使之成为钢。钢中还含有 N、H、O 和非金属夹杂物，它们是在冶炼过程中随原材料及炉气而进入钢液的，或是冶炼过程中残留在钢中的化学反应产物。这些物质对钢的性能都有重大影响，必须尽量降低其含量。因此，炼钢的任务就是脱碳、脱 P、S、脱氧、去气体和非金属夹杂物、升温 and 合金化。由于船体结构钢 P、S 含量多少对钢材性能影响较大，为此，对炼钢过程的脱 P、S 基本原理作适当介绍。

在液体铁中，磷以元素 P 的形式，也能以磷化物 Fe_3P 和 Fe_2P 的形式存在。由于磷化物中的磷仍具有单质的化学性质，而且不论是在 Fe_3P 或 Fe_2P 的分子中，都只有一个磷原子。所以其特性对于分析脱磷过程没有实质的影响，通常以 $[\text{P}]$ 或 P 表示液体中溶解的磷的浓度。



生成的磷酸铁在高温下很不稳定，它可重新分解出 P_2O_5 ，所以仅靠生成 P_2O_5 是不能把 P 去除。但 P_2O_5 是酸性氧化物，若用碱性氧化物与其结合成稳定的化合物则可去除。所以炼钢时造碱性渣（对渣有碱度要求）。使 P_2O_5 与 CaO 形成稳定的 $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 或 $4\text{Ca} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 存在于渣中而脱 P。这就是为什么炼钢需加石灰脱 P 的原理。则脱磷总反应式为：



硫在铁液中有无限的溶解度，但其溶解度随温度的降低而减少。硫总是以单原子参加反应。在碱性渣中硫的存在形式为 CaS 、 FeS 、 MnS 等硫化物。但最稳定的是 CaS 。加石灰脱硫的总反应式： $[\text{FeS}] + (\text{CaO}) = \text{FeO} + (\text{CaS}) - \text{Q}$

硫在固态铁中的溶解度很低，故在钢液的凝固过程中，由于选分结晶的作用。硫将逐渐浓聚于液相中，最后冷却时析出 FeS ，其熔点仅 1190°C 。 FeS 将与铁形成熔点更低 (988°C) 的共晶体，最后将析集凝固在原生晶界上，形成连续的或不连续的网状组织。它们破坏了金属基体的完整性。在随后的热加工过程中，只要温度 $>1100^\circ\text{C}$ 时，晶界处的低熔点硫化物将使晶界变成脆性或熔融状态，而出现“热脆”。

3.2 转炉炼钢的计算机控制

转炉炼钢在此泛指氧气顶吹/顶底复吹转炉炼钢，其基本冶炼工艺为装料、吹炼、造渣、脱氧与合金化。转炉炼钢的冶炼过程是十分复杂的，需要控制和调节的参数很多。随着计算机技术的发展，计算机过程自动控制转炉炼钢已成现实。其发展过程也是由静态控制到动态控制。所谓静态控制是以转炉冶炼过程中物料平衡和热平衡为基础建立一定的数学模型，按照已知的原材料条件和吹炼终点温度及碳含量的要求计算铁水、废钢和造渣材料的加入量，根据计算结果装料和吹炼。静态控制有三种数学模型，即理论模型、统计模型和增量模型。理论模型是应用氧气顶吹转炉炼钢过程的热化学原理，根据物料平衡、热平衡的理论，并对过程作一些假设而建立起来的模型。

统计模型则是从炼钢过程中总体的统计规律出发，采用数理统计和多元回归的方法而建立的。而增量模型一般是在统计模型的基础上，把氧气转炉整个炉役看作是一个连续的过程，相邻炉次的原料条件、炉衬变化、操作状况等因素还是比较近似的，因而运用前一炉数据对本炉次进行修正而建立的模型。由于这种静态控制是建立在许多假设条件或统计归纳上的，不能完全正确地反映复杂的实际冶炼情况，误差较大。动态控制则是在吹炼前与静态控制一样先作装料计算。在吹炼过程中借检测仪器测出钢液温度和含碳量，造渣情况等连续变化的信息，对终点进行预测和判断，从而调整和控制吹炼参数，使之达到规定的目标。与静态控制相比，动态控制具有更大的适应性和准确性，可以实现最佳控制。动态控制的关键在于吹炼过程中快速、正确、连续地获得熔池的各项参数，尤其是熔池的温度和碳含量这两个参数为重要。一般来说，动态控制分为两种，即吹炼条件控制和终点控制。吹炼条件控制方法的基本原理是在吹炼全过程中，根据炼钢过程反应机理所确定的反应动力学方程或反应物特征调整吹炼条件，使吹炼全过程保持平衡，达到所要求的目的。这是因为氧气顶吹转炉吹炼过程中，钢液温升速度和脱碳速度有着密切的关系。温度模型以脱碳模型为基础，分析吹炼三个阶段温度和含碳量的关系而确定。而终点控制是吹炼末期，对熔池的成分和温度迅速进行直接检测，提供信息、修正静态模型中碳和温度的轨迹，使二者同时命中。要实现动态控制，目前国内外大型转炉均采用副枪在吹炼过程中测温定碳来实现。如宝钢 300 吨和武钢三炼钢厂 250 吨氧气顶吹转炉均采用副枪检测并通过三级计算机实现动态终点控制。一般来说，副枪的功能是，测定钢液温度、含碳量、含氧量及熔池液面高度，并且可以取样，分析其它化学成分。对于象 300 吨这样的大型转炉，熔池中的成分和温度总是不均匀的。采用普通副枪测量也难免影响动态控制的精确度。国外已采用了可以同时测定上下两点温度的副枪和同时能在上、中、下三点取样的副枪。

3.3 电弧炉炼钢基本要求

电弧炉炼钢的主要原材料是废钢铁，返回钢、铁合金、造渣材料、氧化剂和增碳剂等。在装完炉料后，则进行熔化。熔化期的主要任务是将固态炉料迅速熔化为钢液，并将钢液迅速加热到所需温度，尽早造好熔渣以去除钢液中的磷，并减少和防止钢液吸气和金属挥发。熔化期过后进入氧化期，氧化期的任务则是根据化清钢液的情况和还原期的要求，要进一步降低钢液

的磷含量。考虑到冶炼后期可能回磷，应使其低于成品规格。要控制钢中的碳含量，并考虑还原期中脱氧和电极增碳。利用降碳过程中的强烈沸腾，充分去除钢中的气体和夹杂，同时升高和均匀钢液温度。氧化期过后是还原期，有还原期是电弧炉炼钢的重要特点之一。在进入还原期前钢液温度已经高于出钢温度，碳和磷都已进入或低于成品要求。但是，由于进行了长时间的氧化过程，钢液中的氧含量很高。另外，在氧化性气氛下，由于渣中(FeO)含量较高，钢液中大部分的硫尚未去除，因此，还原期的主要任务是使钢液脱氧和去除氧化物夹杂、充分脱硫、调整钢液的化学成份和温度。当钢液的化学成分全部达到出钢要求，脱氧良好，温度合乎要求且熔渣流动性良好时，即可出钢。

3.4 电炉炼钢的前沿技术

在冶金行业，普通功率电炉基本淘汰。高功率和超高功率电炉将成为电炉炼钢的主体。国外电炉钢厂基本上全是超高功率电炉，国内也有多台。就电弧炉炼钢而言，它分为直流电弧炉和三相交流电弧炉。在近百年电弧炉发展历史中，三相交流电弧炉占压倒优势。本世纪 60 年代后，超高功率电弧炉广为应用，超高功率电弧炉与炉外精炼匹配，使电弧炉生产率大幅度提高，电耗显著降低，电炉钢成本甚至低于转炉钢。(电炉短流程电炉炼钢配轧钢通常称为钢铁生产短流程)年人均产钢是传统的采矿→烧结→炼钢→轧钢工艺流程的三倍以上。但随电炉功率加大，达到 UHP 水平，也带来一系列弊端，即大功率交流电弧稳定性差，对电网冲击大，产生强烈的电压闪烁，对环境造成噪音污染。为克服对电网的冲击，设置动态补偿装置，势必加大投资。直流电弧炉基于自身特性，具有克服上述弊端的能力。特别是大功率可控硅整流装置技术的日趋完善，使得直流电弧炉必将有更快发展。交流电弧炉可能成为历史。因此，据有关最新资料报导直流电弧炉已成为电炉炼钢的前沿技术，近几年国外发展很快。

3.5 炼钢过程控制确认要点

3.5.1 炼钢设备资源确认。包括炉型（转炉、电炉），同样是转炉，还有容积大小，吹炼方式、控制手段等多种差别。电炉有高功率，超高功率电弧炉和直流电弧炉。冶炼过程控制手段有人工经验控制，计算机辅助，全程计算机自动控制。

3.5.2 炼钢原材料质量控制。

铁水（有从炼铁高炉热送并经混铁炉均混后的铁水，有脱硫或三脱铁水）质量直接影响转炉炼钢。一般来说，对铁水的质量要求主要是有稳定的化学成分。对冶炼船用钢材而言，铁水中五大元素（C、Si、Mn、P 和 S）中的前三种是炼钢过程中的必要元素。铁水中没有它，转炉吹炼无法进行。这是因为，碳（铁水中碳的含量是饱和的，一般在 4.3%左右）的氧化不仅为转炉炼钢提供大量的化学反应热量，而且碳氧化产生的 CO 气体搅拌溶池对转炉炼钢工艺非常重要。硅、锰也是转炉炼钢中重要的发热元素。铁水中 Si、Mn 含量高，热量来源就多，这样可以提高废钢比（废钢占整个炼钢金属料的比例）。此外，Si 被氧化生成 SiO₂ 酸性渣能促进碱性石灰的熔化，有利于脱磷、脱硫。Mn 高有利改善炉渣流动性而利于脱硫。但 Si、Mn 过高有它不利的一面。因此，对转炉铁水而言，Si 含量在 0.30%~0.80%之间，Mn/Si 比值为 0.8~1.0 时对转炉冶炼操作控制有利。P、S 是铁水中的有害元素，炼钢总希望铁水中含硫、磷愈低愈好。氧气顶吹转炉一般脱磷效率为 85-95%。当铁水中含磷量小于 0.50%时，转炉吹炼不太困难，若铁水中含磷量大于 1.50%，必须采取特殊的操作工艺。如增加渣料用量，双渣法操作等。转炉的脱硫能力不是很高，一般脱硫效率为 30-40%，最高可达 50%。知道铁水中硫含量的水平，便可推算出成品钢硫含量的情况。鉴于转炉脱硫效率因素，因此，冶炼高等级船用钢材对铁水要进行脱硫处理。

废钢对转炉炼钢来说是冷却剂，对电炉炼钢则是主要金属料。对废钢的质量（清洁度、块度、有色金属等）控制十分重要，对电炉炼钢厂应是验船师检查的重点。

造渣材料（石灰、萤石、白云石、合成造渣材料等）质量好坏，是造好反应性能良好、数量适中的炉渣、以达到去除钢中 S、P 等有害夹杂的关键。石灰是炼钢的主要造渣材料，风化后的石灰加入到炉内，不仅影响化渣而且对钢的质量也产生不利的影响。因此，石灰贮存要保持干燥，一般仓内贮存时间不得超过三天。最好的石灰应是活性石灰（即软烧石灰）。国外及宝钢、武钢等大都使用活性石灰。它成渣速度快，被熔化的能力极强。因此，为冶炼快速成渣，前期脱磷等都有良好效果。白云石质量也和石灰质量同等重要，炼钢使用的白云石有生白云石和轻烧白云石两种。生白云石的主要化学成分是 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_2$ 。轻烧白云石在 900-1200℃

温度下烧成的，由于轻烧白云石 MgO 和 CaO 的含量要比生白云石提高近一倍。生白云石加入炉内，烧损约占 45% 左右，而轻烧白云石烧损量小于 3%。因此，白云石和石灰质量对炼钢造渣同等重要。萤石的化学成分主要是 CaF_2 。对萤石的要求是 CaF_2 含量要高（一般应大于 80%）， SiO_2 、S、P 低，块度为 10-40mm，干燥、清洁。合成造渣材料的基本原理是将石灰和熔剂，预先在炉外制备成低熔点的造渣材料，由于合成造渣材料在冶炼过程中能加速成渣、脱磷和脱硫，提高金属收得率，降低渣料消耗和延长炉龄等优点已被不少钢厂采用。

铁合金对炼钢来说是必须的。当炼钢到达冶炼终点时，为了去除钢中多余的氧，必须向钢中加入脱氧剂。为了生产不同性能的钢材，也需要向钢中加入一定数量的合金元素。因此，向钢中加入脱氧剂和合金元素是以铁合金（由专门的冶炼厂生产的冶金炉料产品）形式加入，从而达到炼钢脱氧合金化的目的。常用的铁合金有硅铁（ $Si75$ 和 $Si45$ ）；中碳和高碳锰铁（ $C \leq 1.0\% \sim 10.0\%$ ， $Mn \geq 78\% \sim 70\%$ ）；硅钙/硅锰合金、铌铁、钛铁、硼铁、钒铁、铬铁、稀土合金、铝铁、金属镍（ $Ni \geq 99\%$ ）等。铁合金必按其成份仔细分类，并加工成一定块度。铁合金必须进行烘烤（验船师应了解烘烤方式、温度及贮存条件）以减少带入钢中的气体。对于熔点较低和易氧化的合金（如钒铁、钛铁、铌铁、硼铁、硅钙、铝和稀土金属等）一般烘烤温度在 $100-150^\circ C$ 。对于熔点高和不易氧化的合金（如硅铁、铬铁、铝铁等）一般在 $\geq 800^\circ C$ 高温下烘烤。为了提高合金元素的回收率，要注意合金元素加入钢液中的时间、地点和加入方法。一般来说，铁合金是在出钢前加入炉内，出钢时加入盛钢桶内和炉外精炼时加入。

其它原材料通常指炼钢过程中常用的冷却剂、增碳剂和氧化剂。炼钢过程中，元素的氧化放热，使熔池的热量有所富余，因此必须加入一些冷却剂，以调整熔池温度，使之达到所炼钢种的出钢温度。常用的冷却剂有废钢、生铁块、铁矿石等，对它们的块度大小、矿石成分又有害杂质都有要求。对于一些炼钢工艺比较落后，不能保证冶炼过程碳温协调的钢厂。为了调整冶炼终点的含碳量，常加入一些增碳剂。增碳剂的种类很多，如无烟煤粉、木炭粉、沥青焦等。对增碳剂的要求是固定碳含量越高越好、灰分、挥发分及硫等有害杂质含量越低越好，以免污染钢水。氧化剂对氧气转炉炼钢来说就是工业纯氧。氧气纯度对钢的质量有较大的影响，尤其

对冶炼优质钢来说，氧气的纯度更为重要。一般来说供氧纯度应大于 98%，冶炼含氮量要求很低的钢种时，氧气的纯度应在 99.5%以上，国内外先进水平的炼钢厂氧气纯度在 99.95 以上，并且应该脱去氧气中的水分。氧气的压力要稳定，高压高速的氧流才能穿透很厚的渣层进入金属熔池。氧气压力一般根据炉子的吨位大小为 0.6-1.2MPa。

3.5.3 冶炼过程碳温协调控制。由于碳温协调是衡量冶炼工艺及冶炼控制手段、水平的试金石，因此，冶炼过程的一切操作都是以碳温协调为主线进行控制的。现代化炼钢厂由于采用了计算机配合多种控制手段，实现冶炼动态控制，保证冶炼过程碳温协调。对比较先进的钢厂，通过计算机设计的冶炼静态模型配合标准化操作及各种原、辅材料的控制，也能实现一次终点命中（C、温），至少一次命中率很高。也有钢厂通过相关措施和手段，进行模拟副枪操作，一次倒炉（测温定 C）就能命中。当然，条件差的钢厂由于原材料品质波动大，过程控制缺乏手段，冶炼过程很难达到碳温协调条件下的一次命中，出现几次点吹。

3.5.4 钢厂认可检验时，一般可提如下问题了解钢厂条件。即① 炼钢炉容积、出钢量、最高炉龄、炉钢冶炼周期、O₂ 纯度、压力、复吹气体、铁水成分范围、造渣材料、熔剂材料及其它原材料质量。② 冶炼过程属经验控制、计算机辅助静态模型控制，模拟副枪操作控制，多级计算机与副枪操作动态模型控制。一次命中率，钢种命中率。③ P、S、O、N、H 总量，钢渣硷度。对电炉厂还应了解废钢来源及质量，是否冶炼过程加兑铁水（加兑铁水有利降低废钢残余元素含量）；是否全程泡沫渣操作，埋弧加热（这种操作能减少电炉吸氮）。

4. 炉外精炼

4.1 炉外精炼出现和发展的原因

炉外精炼是近几十年发展起来的一项炼钢新技术，转炉和电炉都可以配合各种各样的炉外精炼方法。所谓炉外精炼，就是按传统工艺，将在常规炼钢炉中完成的精炼任务，如去除杂质（包括不需要的元素、气体和夹杂）、成分和温度的调整和均匀化等任务，部分或全部地移到钢包或其它容器中进行。因此，**炉外精炼也称为二次精炼或钢包冶金**。

炉外精炼作为一项新技术的出现并得到迅速发展，必然有其技术上和经济上的原因。从技术上看，对钢材质量日益苛刻的要求主要表现在纯净度

高、各向异性小、合金成分范围窄等方面。现在对钢纯洁度的要求已是 $[S]<5\text{ppm}$, $[P]<14\text{ppm}$, $T[O]<5\text{ppm}$, $[N]<14\text{ppm}$, $[H]<1\text{ppm}$ 。如此低的杂质含量, 无论如何仔细地操作, 传统炼钢方法产品的杂质含量仍将比上述水平高出几倍, 甚至几十倍, 由于传统炼钢方法合金的收得率波动很大, 所以钢产品的成分范围较宽, 同钢种的不同炉号性能差别较大, 不利于钢材加工(轧制和机械加工)工艺的自动化, 也不利于使钢材达到最佳性能的配合。杂质含量高, 加之在钢中存在形式无法控制, 必然导致钢材的机械性能在不同方向上存在较大的差异。

传统的炼钢方法中, 电炉炼钢法采用电弧作为热源, 所以在温度、炉内气氛和炉渣性质的控制上, 有相当大的灵活性。因此被公认为是具有较强精炼能力的一种炼钢方法, 即使如此, 这种方法的工艺本身就存在着矛盾和不合理。例如, 碱性电弧炉中所造的还原渣有着较强的脱硫能力, 但是由于炉内渣钢接触界面太小, 脱硫不能充分进行, 即还原渣的脱硫能力不能被充分利用。又如, 对于防止钢中白点缺陷, 要求把钢中的氢降低到 $2.5\text{--}3\text{ppm}$ 以下。这在电弧炉冶炼的氧化期, 如果经过激烈而均匀的碳氧化沸腾是完全可以达到的。但是, 紧接着的还原期, 却又使钢中的氢回升到 $5\text{--}7\text{ppm}$, 而出钢、浇注后则几乎回复到熔清时的含氢水平。此外, 在对钢清洁度影响最大的氧含量上, 情况也很相似。

炉外精炼技术出现和迅速发展的技术原因, 除传统的炼钢工艺无法满足用户对钢材质量日益严格的要求外, 传统工艺还难以适应炼钢领域所出现的一系列新技术。例如, 超高功率电弧炉技术的出现, 显著地提高了废钢的熔化速率, 从而提高了电炉的生产率, 但是按照老的电炉炼钢工艺, 在电炉内还要经过相当长时间的氧化和还原才能出钢, 这样超高功率缩短熔化期的效果就被冲淡, 并且还使大功率的变压器长时间的低负荷运行, 降低了超高功率电炉的功率利用率, 显然这是不合理的。为了充分发挥超高功率技术的优越性, 只有改革电炉炼钢工艺, 使大部分精炼任务不在炉内完成, 尽量提高熔化时间占整个冶炼时间的比例。又如连铸技术的出现, 连铸机要求炼钢设备能定时、定量地提供一定温度的优质钢液, 靠传统炼钢工艺很难, 若在炼钢设备与连铸机之间设置一种具备保持和调温的缓冲设备, 则必然可显著地改善炼钢设备和连铸机的配合, 所以, 相当数量的炉外精炼方法可以起到这种缓冲的作用。

4.2 炉外精炼的任务及方法

钢液炉外精炼的任务包括：脱碳、脱磷、脱硫、脱氧、脱气，成分和温度均匀化、成分调整、温度调整、脱除非金属夹杂物或改变其形态等。为了实现这些精炼任务，至今已出现了几十种炉外精炼方法，形成了多种组合，但按精炼方法分类可分为以下几种：

(1) 渣洗。渣洗是最早的炉外精炼方法，常用的渣洗工艺流程是在专门的渣炉中冶炼合成渣，渣系为 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 。先将已熔炼好的合成渣按工艺要求的渣量倒入钢包中，依靠出钢钢流的冲击，合成渣在钢液中乳化，渣和钢充分混合，接着镇静，乳化的渣滴上浮，该流程总共十分钟，从而完成脱硫、脱氧、吸附、去除非金属夹杂等精炼任务。

(2) 吹氩。吹氩通常在浇注钢包底部砌有一块(或数块)透气砖，出钢后通过透气砖吹入氩气，依靠在钢液中上浮的氩气泡粘附乳化的渣滴及造成钢包中钢液的搅动，促进渣滴的碰撞合并而加速上浮。吹氩搅拌的精炼方法有三种。

① 钢包吹氩。

② SAB 法(Scald Argon Bubbling)，又称 CAS 法(Composition Adjustment by Scalded Argon Bubbling)。

③ CAB 法(Capped Argon Bubbling)。其中 CAS 和 CAB 法，其特点是除底部吹氩外，通过专门的加料口，可添加合成渣料和微调钢液成分用的合金。

(3) 真空脱气。为了减少钢中的有害气体，特别是氢气，产生了多种脱气方法，现在普遍采用的有：

① 真空浇注。又称 VC 法(Vacuum Casting)，将钢锭模置于真空室中，使钢流先通过真空再流入钢锭模而进行钢液的真空脱气，通过真空浇注可使钢中氢含量降低到低于 2ppm，氧含量为 20ppm 左右。

② 提升脱气法或虹吸法。又称 DH 法，由 Dortmund 和 Horder 两公司联合研制。该法是用一梨形的、下接一垂直管的真空容器，将被处理的钢液分批经垂直管吸入真空容器中进行脱气。经 DH 脱气后，氢含量一般可去除 50%-70%，平均含量为 1.7ppm，当 $[\text{N}] > 100\text{ppm}$ 时，一般可去氮 20%-30%，氧含量可降到 20-40ppm，还可以脱碳、调整成分。

③ 真空循环脱气法。又称 RH 法，由 Ruhrstahl 和 Heratus 联合研制，在 RH 装置中，钢液的真空脱气在一座特殊的真空室中进行。这个真空室内

有两个用耐火材料制成的并可插入钢液中的管子，当向其中一根管中通入驱动气体，就能促使钢包中的钢液，经真空而循环。这种循环做到了用一个较小的真空设备，分批处理大量钢液。与同属分批处理的 DH 法一样，这种方法较多地用于处理氧气转炉所炼钢液。由于 RH 法脱气效果好，处理过程中降温少、处理容量的适应性强，所以发展较快。

④ 脉动搅拌法。又称 PM 法(Pulsating Mixing Process)，这是日本川崎公司研制开发的钢包精炼新技术。PM 法脱氧和钢的纯洁度与 RH 法相同，补加铝和碳的回收率几乎可达百分之百。由于渣钢界面的搅动比 RH、钢包吹氩要弱，所以回磷现象大为减轻。

(4) 带有加热装置的炉外精炼方法

除 DH 和 RH 可安装附加热源之外，其它方法都不附设热源。为了解决精炼过程中钢液降温的问题，出现了一批带加热装置的炉外精炼方法。当前应用比较普遍的是三相交流电弧加热，如 LF(Ladle Furnace)，精炼炉带有真空手段则称为 LFV；气体精炼电弧炉 GRAF(Gas Refining Arc Furnace)；VAD 炉(Vacuum Arc Degassing)，ASEA-SKF 法(瑞典两家研制公司名缩写)属于化学热加热装置的炉外精炼。LF 法就是在 ASEA-SKF 和 VAD 等方法基础上的改进设备，它具有在还原气氛下埋弧加热，用透气砖吹氩搅拌，真空脱气和高碱度渣精炼的特点，在投资和操作费用、产品质量上都有很大竞争力。CAS-OB(Composition Adjustment by Scalded Argon Bubbling Oxygen Blowing)法。CAS-OB 装置是在原有的 CAS 基础上，在插入罩的上方添设了一支垂直安放的水冷氧枪，操作时，通过加合金的溜槽，加入为提温所必需数量的铝块，铝块很快在罩内的钢液面上熔化，同时顶吹氧，借助于钢包底部的吹氩搅拌，铝的氧化放热加热整个钢包内的钢液。

(5) 低碳钢液的精炼方法

具备搅拌、真空、加热三种精炼手段的各种炉外精炼装置，精炼功能就比较齐全，它可以完成除熔化废钢以外的绝大部分精炼任务。但对一类低碳钢种，特别是低碳的高铬钢或铬镍钢，还需特别的精炼方法，如低碳高铬钢液的精炼，主要矛盾是降碳保铬。在常规电弧炉中冶炼这类钢时，常采用返回吹氧法，以提高冶炼温度从而保证碳优先于铬氧化。过高的冶炼温度使炉衬的工作条件急剧恶化，为限制过高的冶炼温度，只有降低炉料中的配铬量，即增大脱碳后微碳铬铁或金属铬的用量，这样就提高了成品钢的成本。

同时，铬的总回收率也无法提高。为了更经济合理地解决降碳保铬问题，只有采用降低一氧化碳分压力的办法，在此认识的基础上，出现了如 VOD(Vacuum Oxygen Decarburization)，它的特点是用深入真空室内的氧枪吹氧精炼钢液，脱碳效率高而铬损失小。SS-VOD(Strong Stirring Vacuum Oxygen Decarburization)；RH-OB(RH-Oxygen Blowing)，AOD(Argon Oxygen Decarburization)，又称氩氧炼钢法。它的炉型与侧吹转炉相似，在接近炉底的侧壁上安置氩氧枪，分阶段通氧气、氩-氧混合气、氩气。对钢液实行精炼脱碳，精炼还原和精炼调整钢液成分。

(6) 固体料的添加方法

为了完成某种冶金任务，往往需要加入一些固态反应剂。要求所加入的反应剂的利用率尽可能高，因而在反应剂加入时，总是设法使反应剂直接加入反应区，并与反应物有尽可能大的接触界面，同时尽量减少反应剂在参与反应前的损失。为达上述要求，目前主要有两种方法，一种是将块状的反应剂变成粉剂，用气体载流喷入液态熔池中；另一种是将具有较大反应界面的反应剂用机械的方法，使其迅速地穿过渣层而进入液态熔池中。固体料的这些加入方法，单独地或与其他精炼手段组合成一系列新的炉外精炼方法。如 IRSID 法（法国研制的一种喷粉方法），TN 法（德国公司研制），ABS 法（Aluminum Ball Shoot）和 WF 法(Wire Feeding)等。喷吹或喂线的冶金功能取决于精炼剂或喂线的种类。它可以完成脱碳、脱硫、脱氧、合金化、控制夹杂形态等精炼任务。

4.3 炉外精炼技术的发展趋势

国际钢铁工业技术进步的方向，已集中了对传统的钢铁生产工艺流程进行合理组合、系统优化、以及对以薄板坯连铸—连轧技术为核心的新流程进一步优化开发。在这两方面，炉外处理技术都是不可缺少的重要组成部分，炉外处理技术主要发展趋势如下：

(1) 铁水、钢液全部进行处理。炉外处理设备全部在线运行。

(2) 向组合多功能精炼站的方向发展，并已形成了一些较常用的多功能处理模式：

① 以钢包吹氩为核心，加上与喂线、喷粉、化学加热、合金成分微调等一种或多种技术相结合的精炼站，用于转炉—连铸生产衔接。

② 以真空处理装置为核心，并与上述技术中一种或几种复合的精炼

站，也主要与转炉—连铸生产相衔接。

③ 以钢包炉(LF)为核心，与上述技术及真空处理等一种或几种技术相复合的精炼，主要用于电弧炉—连铸生产衔接。

④ 鱼雷罐车或铁水包等铁水运载容器逐渐向转炉型的预炼炉方向发展的铁水预处理(脱硫或三脱—脱硅、脱磷、脱硫)技术。

⑤ 以 AOD 为主体，包括 VOD、转炉顶底复吹在内的不锈钢精炼技术。

(3) 根据产品、工艺和市场要求，不同类型的工厂对炉外处理的选择也初步形成了一些模式：

① 生产板带类钢材的大型联合企业，一般有两种类型的精炼站，即以 CAS—OB 吹氩精炼为核心的复合精炼，或以真空处理为核心的组合精炼。同时也应该配有铁水预处理站。

② 生产棒线材为主的 30t 及以下的中小转炉厂，通常配有钢包吹氩、喂线、合金成分微调综合精炼站，并注意钢液温度补偿。

③ 电炉钢厂根据产品选择的炉外处理模式有：

——生产不锈钢板、带、棒线，通常采用 AOD 炉，有的还设有 LF 炉或 VOD 炉。

——非不锈钢类的合金钢厂，一般设 LFV 多功能复合精炼装置。

——普碳钢和低合金钢生产厂，多数设 LF 炉为核心的多功能精炼装置，或吹氩喂线装置。

5. 铸造技术

5.1 铸造与连铸

铸造已为大众所熟悉。对钢铁工业而言，连铸技术的开发和应用显著地提高了钢铁生产的效率与效益。连铸是一项把钢水直接铸成钢坯的工艺。各种炼钢方法所得到的规定成分和温度的钢水，被连续不断地浇注在一个或一组实行强制水冷并带有“活底”的铜模内，待钢水凝固成一定厚度的凝壳后，钢水便与“活底”粘结在一起，用拉辊咬住与“活底”相连接的装置，这样铸坯就会连续从铜模下口被拉出来，这就是连续铸钢。连续铸钢的最初设想，是由英国转炉炼钢的发明者贝塞麦于 1856 年提出来的。但直到 1930 年才将连铸用于有色金属的生产。1946 年在美国建成了第一台试验性的连续铸钢装置。50 年代中期连续铸钢技术从试验阶段进入了工业性生产阶段。连续铸钢的普遍应用是在进入 60 年代后，由于弧形连铸机的出现和发展，

才使连铸技术在世界范围内大量被采用。连铸机技术的不断发展，使连铸工艺日臻善完，并在大型化、机械化和自动化方面有了较大的突破。此外，拉坯速度的进一步提高，无缺陷铸坯生产的成功，已为连铸坯的热装和连铸与轧钢的直接连接新工艺提供了必要条件。目前连铸所能浇注的钢种已近 130 种，钢号达 500 余个品种。连铸所能浇注的断面，方坯从 $50 \times 50 \text{mm}^2$ 到 $500 \times 700 \text{mm}^2$ ；板坯从 $50 \times 108 \text{mm}^2$ 到 $320 \times 2700 \text{mm}^2$ 。此外还可以浇注工字形、八角形、中空圆坯等多种异形断面的铸坯。为了完善浇注工艺，更新设备，以提高生产能力，扩大品种和改进质量，世界上在连铸技术领域里发展了多种新技术，如钢水预处理、保护浇注、电磁搅拌、旋转离心浇注、压力浇注、超薄板坯连铸、连铸坯分条技术(板坯纵切、劈轧工艺)、铸坯在线检查精整、铸坯热送、连铸连轧等等。

5.2 连铸机型

5.2.1 立弯式连铸机

立弯式连铸机。是在解决早期立式连铸机厂房太高等不利因素基础上发展起来的。铸坯上部为直线段，铸坯下部用顶弯装置将铸坯弯曲，然后在水平位置矫直、切断、出坯。立弯式连铸机的主要优点是：有利夹杂物上浮，减少夹杂物含量，并使残留夹杂也能较均匀地分布在铸坯内部，有利于改进铸坯内部质量；水平方向出坯使铸坯定尺长度不受限制，同时便于与轧机相连，为铸坯热送和热连轧创造条件。其缺点是：铸坯在立弯式铸机上，经过先顶弯后矫直两次变形过程，容易产生裂纹。但是现在国内外新建的主弯式连铸机，(如安阳钢厂)，由于采用高精度的结晶器液压振动系统，可实现拉坯过程中振动频率及振幅随拉速调整。连续弯曲已经解决了容易产生裂纹的倾向。

5.2.2 弧形连铸机

弧形连铸机的结晶器分为直形结晶器和弧形结晶器两类。直形结晶器加工简单，但由于结晶器下面直线段很短，钢液易在弧直切点处溢漏，或在铸坯外弧部位产生裂纹，而且直弧形过渡段设备调整也很复杂。弧形结晶器连铸机由于结晶器和二冷区均布置在半径相同的弧形线上，铸坯在水平切线位置矫直，水平出坯。弧形连铸机主要优点是：钢水静压力低，有利于提高铸坯内部质量；弧形结晶器有利于控制铸坯内部的变形；铸机设备高度降低，从而也降低了建筑构造价，便于钢水和铸坯的运送，同时操作与维修也方

便；弧形铸机随着弧形半径加大，二冷区冷却长度却不受限制，铸坯可以在完全凝固后进入拉矫机，也可采用多辊拉矫、带液芯矫直、以及切割机灵活选择等优点。

弧形连铸机的缺点是：非金属夹杂上浮较困难，残留夹杂有偏内弧面聚集倾向(如；图 1 所示)；铸坯内、外弧的低倍结构是不对称的，这对铸坯质量带来一定影响；铸坯矫直时容易产生内部裂纹。由于弧形连铸机的优点显著，而它的缺点在现代连铸技术中已基本得到解决，所以近年来国内外新建的连铸机也大量采用弧形连铸机(如武钢三炼钢厂)。

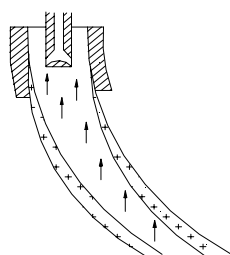


图 1 弧形连铸坯中夹杂物上浮示意图

5.2.3 超低头连铸机

近年来，由于钢水精炼技术的发展与多点矫直技术的应用，使得超低头连铸机在国内外得到了发展。一般超低头连铸机半径和铸坯最大厚度之比 $R/D < 25$ 。目前最小的铸机半径与铸坯厚度之比 $R/D = 12$ 。开发超低头连铸机的主要目的是：减少钢水静压头，以改善方、板坯内部质量；降低连铸机高度与厂房高度，简化设备结构，便于维修及调整设备。但是超低头连铸机必须避免由于铸机半径减小而加剧大型夹杂物在内弧侧富集的倾向；也必须避免随半径的减小使总矫直变形率增加而造成内部裂纹及拉速降低的问题。近年来，纯净钢水生产技术的完善，为小半径连铸机生产无大型夹杂物内弧富集的铸坯创造了有利条件；由于多点矫直技术的开发，使过去必须进行全凝固矫直的裂纹敏感钢种，可以无缺陷地带液芯矫直，因此连铸机半径已不是限制拉速的因素。

5.2.4 水平连铸机

水平连铸是国际上 70 年代后期发展起来的新技术，它与常规的立式和弧形连铸相比有许多优点：水平连铸机的设备比弧形连铸机轻、高度低，可

在旧有厂房内安装，从而大量节约工程造价，特别适合于小钢铁厂的技术改造；由于水平连铸的结晶器成水平布置，钢水在结晶器内的静压力低，避免了铸坯鼓肚；水平连铸的中间罐和结晶器之间是密封连接的，有效地防止了钢流二次氧化，铸坯清洁度高，其夹杂含量一般仅为弧形坯的 $1/8 \sim 1/16$ ，故铸坯质量好，利于浇含易氧化元素的钢种和小断面优质钢坯，铸坯不需矫直，故可浇注弧形连铸机不能浇注的裂纹敏感的钢种，水平连铸机几乎可以连铸所有的特殊钢、高合金钢和非铁基合金。目前发展水平连铸机的三大关键技术，即分离环、结晶器和拉坯机构已得到解决。影响水平连铸坯质量的拉程冷隔缺陷，夹杂物聚集在表面附近的问题，密度偏析，中心疏松、中心偏析等，这些缺陷与立式、弧形机相比并不严重，现有的技术措施已能减轻这些缺陷对水平铸坯的危害。为此，水平连铸机很早就受到了国内有关方面的重视。衡阳钢管厂炼钢分厂就是用水平连铸机生产圆管坯。水平连铸机继立式、立弯式和弧形连铸机之后，即将成为第四代连铸机而广泛发展起来。因此有资料称它是“连铸机的未来”。

5.3 连铸技术发展的前沿技术

5.3.1 气水雾化冷却

铸坯的表面缺陷，往往是在二次冷却区内由于冷却不当造成的热应力引起的。由于通常的喷水冷却方式可能造成坯壳内产生过大的热应力，这是导致铸坯表面纵、横裂纹、网状裂纹的原因。为了避免由于冷却不相适应而产生的表面缺陷，近年来开始运用一种气水雾化冷却的技术。采用喷水冷却，实际得出的铸坯在二冷区的表面温度曲线与设计要求的曲线相差很大。突出表现在喷出的水还未汽化就流掉了。而且铸坯表面温度反复下降，回升变化很大。而气水雾化冷

却时，铸坯表面温度的变化很平滑，使整个表面都能保证均匀冷却。目前气—水喷嘴分为外混型和内混型两大类。用于连铸二次冷却区的一般为内混型，一是外混型雾化效果不如内混型的好；二是内混型喷嘴外形尺寸小，特别适用于二次冷却导辊间距很小的板坯连铸机。该喷嘴的结构特点是：冷却水经过一个直径最小为 $\Phi 3\text{mm}$ 的小孔加速后，进入一段大直径的管内，与压缩空气相遇混合，气水混合物撞到冲击板后，从 3mm 宽的一条开口带喷射出去。喷射角根据喷水量不同可改变。

5.3.2 压缩浇注

铸坯在带液芯弯曲、矫直时，在凝固界面处产生变形。

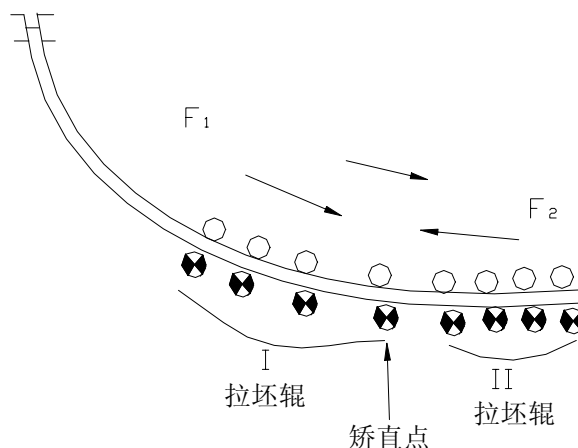


图 2 压缩浇注原理图

为了把弯曲或矫直时产生的应力变形控制在铸坯发生裂纹的最小应力变形以下，出现了所谓“压缩浇注”的技术。新日铁把压缩浇注技术应用在带液相矫直的高速弧形连铸机上。使多辊传动的弧形机矫直点前后辊的驱动力分别进行加速和减速控制，以便对在矫直点的铸坯施加压缩应力。从而抵消矫直变形产生的拉伸应力。其压缩浇注的原理见图 2。

5.3.3 近终形连铸

近年来，各发达工业国家致力于开发近终形连铸（Near Net Shape Continuous Casting），这是使连铸与高效率炼钢—炉外精炼与高速薄板连轧相匹配。控制薄板坯连铸凝固，将保证质量的变形量限制于最小范围。它不仅省去了开坯工序，还省去热轧粗轧工序，甚至直接冷轧。它不仅设备投资省，能耗大幅度下降，生产效率提高，还由于快速凝固，改善了金属组织，提高了产品内在质量，将对钢铁工业带来深刻的影响，使工业流程更紧凑，速度趋向临界值，导致产品专业化、系列化、优化及高附加值。目前美国的 CSP（Compact Strip Production）连铸连轧短流程生产线年产量已达百万吨。全世界已投产近终形薄板坯连铸连轧生产线 25 条，其中 CSP 共 16 条（1997 年统计数）。这是由于 CSP 具有热效率高，热损失少。连铸坯以 5.5 米/分速度生产，到达辊底或均热炉平均温度为 1080℃。而板坯出均热炉温度为 1100℃，仅差 20℃，在炉中仅需停留 20min，而常规板坯加热炉为 60~80min，

因此板坯只形成一层很薄的氧化皮，只需喷高压水即可清除，无需机械除鳞。在 CSP 生产线上有一套 4 机架或 5 机架热精轧机，采用先进的轧制技术，如自动厚度调控，液压弯辊，CVC 板形控制等，可轧制高质量热带钢。

5.4 连铸过程的质量控制

5.4.1 连铸过程的质量控制除了连铸设备系统的硬件需要进行核查外，对影响连铸坯质量的其它因素主要是钢水温度和钢水的纯净度。钢水温度是决定连铸机能否正常生产的决定性因素。过低的钢水温度是结晶器液面产生浮游凝壳的原因，恶化夹杂物上浮条件，造成夹渣的局部集聚，导致盛钢桶或中间包水口孔被钢液冻结。使注流发散偏转甚至完全堵塞而停浇；过高的钢水温度，会使耐火材料侵蚀加快，特别是塞棒、轴砖和塞头砖的侵蚀严重，最后导致塞棒控制失灵，造成漏钢或结晶器溢钢事故。过高的钢水温度还会使钢水的二次氧化加剧，增加钢水的污染，加剧连铸坯柱状晶的发展，增加铸坯出现裂纹的危险性。以上所说钢水温度是指中间包钢水的温度，对中间包温度的测量与控制至关重要，较为理想的中间包钢水波动范围约为 10℃ 左右（不包括浇铸的开始和结束）。

5.4.2 连铸钢水纯净度控制。纯净度一般指钢水中硫、磷、气体和非金属夹杂物的含量要低。要使钢水纯净，主要是严格控制原材料的质量，冶炼操作的标准化，钢水炉外精炼处理以及钢水保护浇铸，又称无氧化浇铸。保护浇铸是在连铸操作过程中，由盛钢桶到中间包和由中间包到结晶器的注流，以及中间包和结晶器的钢液面都会裸露在空气之中，导致钢水的再氧化。钢水的二次氧化是造成钢中大型非金属夹杂物的主要来源。为了防止连铸过程中的钢水氧化，一般对注流采用长水口及氩气密封，中间包加盖并使用覆盖剂；中包到结晶器的注流用浸入式水口保护等措施。验船师通过熔炼分析和成品分析、夹杂物、硫印片检查就可判断钢水的纯净度。通过现场从出钢可见钢水裸露后至铸坯出机才能见红（钢坯），说明钢水保护好。相反若在浇注过程中很多环节都能见到钢水与大气接触，则说明钢水二次氧化保护不好。

5.4.3 从浇注工艺来说，除了铸温、铸速和钢水纯净度之外，选样合理的二次冷却制度，控制合理的冷却温度和温度梯度对铸坯的结晶组织有着重要的影响。

5.5 连铸坯的质量检验

5.5.1 连铸钢水所受的冷却强度大，浇注初期散热量很高，这就决定了连铸坯具有很高的凝固速度。因此，连铸坯中各结晶层的分布情况具有结构上的不均匀性，如果柱状晶层贯穿铸坯坯心，形成所谓“穿晶”现象。降低连铸坯内部质量，产生内部裂缝。因此，连铸过程中要尽量限制铸坯内柱状晶层的发展。检验铸坯结构上的不均匀性，可作全断面低倍组织检查确认柱状晶层及整个断面组织结构的分布。

5.5.2 连铸坯的化学成分的不均匀性包括沿铸坯长度方向上的不均匀性和横断面由表及里方向上的不均匀性。长度方向的不均匀性是由于连铸的时间比模铸时间长。特别是多炉钢水连浇，盛钢桶中的炉渣与钢水之间仍会进行反应，使钢水中的元素含量发生变化。最常见的是连铸坯中的磷随着浇注时间的延长而增加，这是因为出钢过程中带入盛钢桶内的炉渣和钢水的脱氧剂以及桶衬作用，使炉渣中的硅、铝、锰的氧化物增加。同时使渣中的磷酸钙破坏，使磷还原，从而增加了钢水中的含磷量。铸坯化学成分由表及里方向上的不均匀性。由于连铸坯是在比模铸锭冷却强度大得多的情况下凝固而成的。选分结晶现象比较严重，柱状晶层越向坯心推进，残余钢液的偏析度越高，夹杂也越容易在坯心偏集，加重连铸坯中心偏析和夹杂物集聚。这些铸坯缺陷都将影响成品钢板的力学性能。检验铸坯的成分均匀性可采用头尾坯进行成分对比和同断面多点成分分析及硫印和低倍组织检查。

6. 钢材轧制

6.1 中厚板轧制设备及现况

轧制设备作为钢材成型过程的设备资源，它包括板坯加热炉、轧机、轧后冷却系统、热处理炉及精整设备。由于船体结构钢材中的绝大部分是中厚钢板，因此对于要进行钢厂认可或检验的验船师，了解国内外设备现况十分必要。国内各中厚板厂加热炉设备大多为推钢连续式加热炉，部分加热炉应用了微机加热控制技术及节能新技术，使板坯加热质量，加热能力以及能源消耗方面有一定进步，而发达国家中厚板厂全部拥有步进式加热炉，国内大型步进式加热炉数量极少。加热能力，国内大多在 60T/h，国外在 450T/h。轧机作为轧制设备的主体，虽然国内改造或新建的四辊轧机上应用了一些先进技术，但装备液压 AGC 及实现计算机自动轧制的轧机套数很少，与国外发达国家相比，还有很大差距。如轧制力，国内先进水平为 60000KN、一般水平为 30000KN。国际先进水平：日本为 98000KN，德国 89000KN。主电机容

量：国内先进水平 $5750 \times 2\text{KW}$ ，一般水平 4250KW ，国际先进水平：日本 $8000 \times 2\text{KW}$ ，德国 $9600 \times 2\text{KW}$ 。除鳞水压力，国内先进水平 15MPa ，国际为 19.6MPa 。自动厚度控制国内只几台轧机有，国外基本上全有。液压弯辊、纵向窜辊装置，国外厚板轧机基本上都有。生产能力国内最大为 100 万吨/年，一般为 30-50 万吨/年，国外达 240 万吨/年。国内中厚板行业主力轧机是 $2000 \sim 3000\text{mm}$ 四辊轧机与日本、德国为 $4000 \sim 5000\text{mm}$ 双机架四辊轧机形成鲜明反差。热处理炉是生产高技术含量、高附加值产品所需要的重要设备，国外先进厚板厂均设有热处理设备。并且，为了使钢板温度均匀和防止钢板下表面出现缺陷，有的工厂建有更为先进的双步进梁式热处理炉和无氧化热处理炉，国内具有较先进热处理设备的厂家并不多，甚至有 60% 的厂家根本没有热处理能力。目前，达到世界先进水平的只有武钢 97 年投入使用的全套引进的辐射加热无氧化辊式热处理炉及连续辊式淬火机。就轧后精整设备，国内剪切基本为圆盘剪或铡刀式剪，具有世界先进水平滚切剪切技术及剪切设备也只有几家，其它如在线自动连续探伤，钢板厚度长度宽度检查的自动化连续化，自动贴标签，自动火焰切割，板型控制，剖分剪以至于精整全过程计算机控制与管理系统在我国中厚板轧钢厂尚属空白。

6.2 轧制新工艺在中厚板生产中的应用介绍

改善中厚钢板质量，提高钢板综合力学性能、简化生产工艺、提高成材率、降低成本、节约能耗以及开发新品种，无论在理论上或生产实践上都具有重大意义。随着中厚钢板热变形过程中钢的组织变化系统研究，形成了新的中厚钢板控制轧制与控制冷却新工艺。控制轧制可归纳为：在调整钢的化学成分的基础上，通过控制加热温度、轧制温度、变形制度等工艺参数，控制奥氏体状态和相变产物的组织状态，从而达到控制钢材组织性能的目的。为了提高低碳钢、低合金钢、微合金化钢的强度和韧性，特别是低温韧性。经过控制轧制细化奥氏体晶粒或增多变形奥氏体晶粒内部的滑移带，即增加有效晶界面积，为相变时铁素体形核提供更多、更分散的形核位置，得到细小的铁素体和珠光体组织。因为细化铁素体晶粒不仅能提高钢的强度，而且改善钢的韧性，降低脆性转变温度。

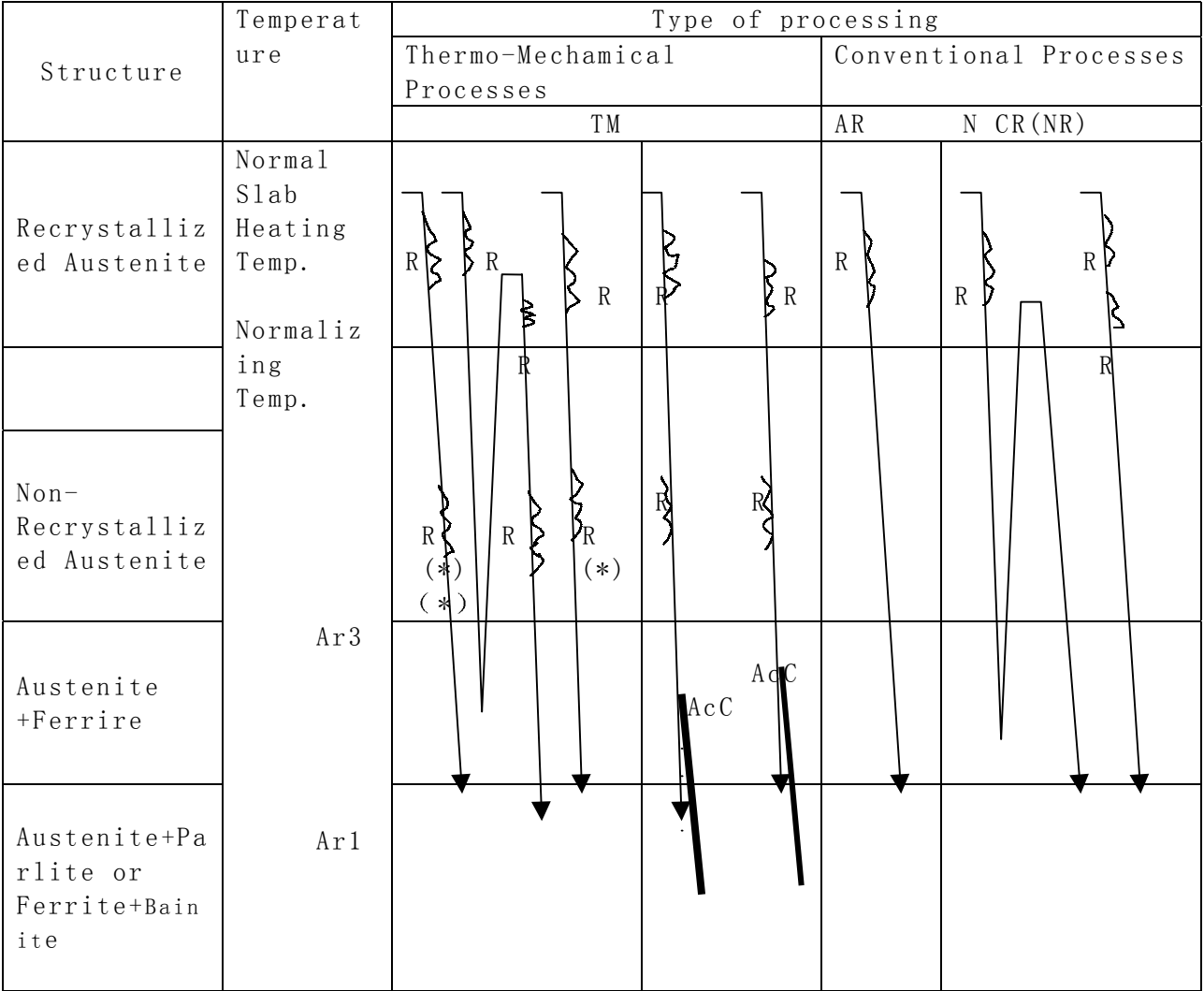
控制冷却作为钢的强化方法众所周知，利用相变强化可以提高钢板的强度。通过轧后控制冷却能够在不降低韧性的前提下进一步提高钢的强度。控制冷却对钢的强韧性取决于控制轧制工艺参数、奥氏体状态、晶粒大小、

碳化物析出状态，这些都将直接影响相变后的组织结构和形态。而控制冷却条件（开始控冷温度、冷却速度、控冷停止温度）对变形后、相变前的组织也有影响，对相变机制、析出行为、相变产物更有直接影响。因此，控制冷却工艺参数对获得理想的钢板组织和性能是极其重要的。它是通过控制热轧后冷却条件来控制奥氏体组织状态、控制相变条件、控制碳化物析出行为、控制相变后钢的组织 and 性能。而控制冷却主要指轧后两阶段冷却，第一阶段（一次冷却）是指从终轧温度开始到奥氏体向铁素体开始转变温度 Ar_3 或二次碳化物开始析出温度 Ar_{cm} 范围内的冷却，控制其开始快冷温度、冷却速度和快冷终止温度。一次冷却的目的是控制热变形后的奥氏体状态，阻止奥氏体晶粗长大或碳化物析出，固定由于变形而引起的位错，加大过冷度，降低相变温度，为相变做组织上的准备。相变前的组织状态直接影响相变机制和相变产物的形态和性能。一次冷却的开始快冷温度越接近终轧温度，细化奥氏体和增大有效晶界面积的效果越明显。第二阶段（二次冷却）是热轧钢材经过一次冷却后，立即进入由奥氏体向铁素体或碳化物析出的相变阶段，在相变过程中控制相变冷却开始温度，冷却速度（快冷、慢冷、等温相变等）和停止控冷温度。控制这些参数，就能控制相变过程，从而达到控制相变产物形态、结构的目的。参数的改变能得到不同相变产物，不同的钢材性能。

目前，船用钢板供货状态除传统的热轧、正火外，还有控轧与温度—形变控制轧制（TMCP）状态。

其原理见 IACS 统一要求 W11。

Schematic diagrams of thermo-mechanical and conventional processes



Note:

TM(TMCP):Thermo-MechanicalRolling (Thermo-Mechanical Controlled Process)

AcC: Accelerated Cooling

AR: As Rolled

(*): Sometimes rolling in the dual-phase temperature region of austenite and ferrite

N: Normalising

CR(NR):Controlled rolling (Normalising Rolling)

R: Reduction

6.3 TMCP 工艺计算机控制系统

目前 TMCP 工艺尽管在局部生产设备上不同钢厂有不同的特点或者绝招，但其基本的计算机控制系统却是多层计算机管理来实现，基本匡图见图 3。

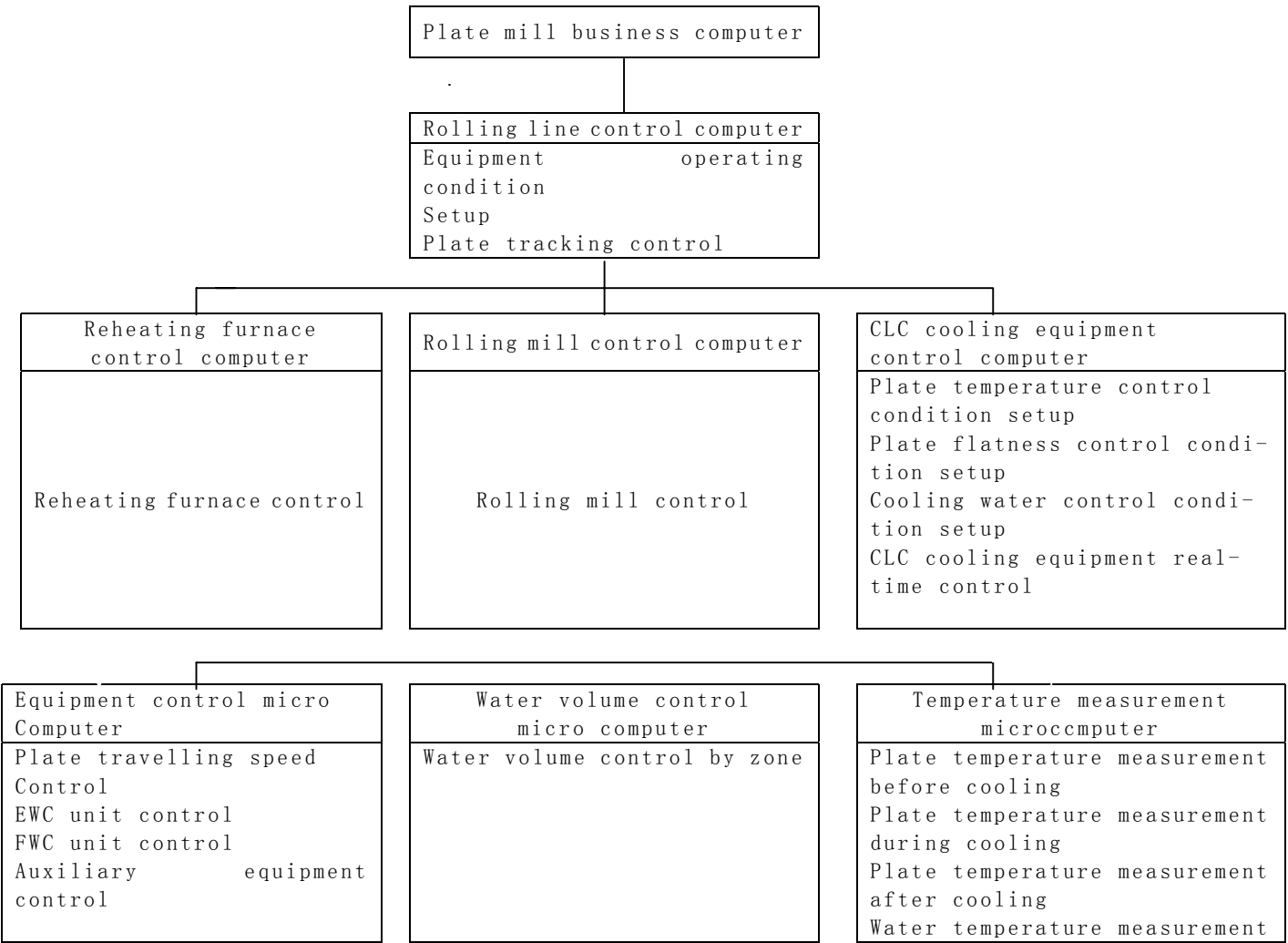


图 3 TMCP 工艺计算机控制系统匡图

6.4. 型钢轧制特点及现状

6.4.1 型钢轧制特点

型钢由于具有截面模数大、重量轻、节省金属等优点，广泛用于船体结构。就型钢轧制而言，除了轧制过程热变形与组织变化理论与板材一样外，还有一些特点。① 型钢轧机按轧辊名义直径命名，如 Φ800mm 型钢轧机，(板材轧机按轧辊长度命名，如 4200mm 厚板轧机)。② 轧制方法，除了与板材类似上下两个工作辊的轧法外，还有多辊轧法、热弯轧法、热轧一纵剖轧法等。③ 轧机的布置方式除了与板材轧机类似的顺列式（或纵列式）外，还有横列式、棋盘式，半连续式或连续式（这与热连轧带钢轧机类似）。④ 产品断面除了扁钢与钢板同为矩形断面类似外。其它所有品种断面比较复杂，

大多都是异型断面。

6.4.2 国内外型钢轧制现状比较

钢坯加热。国内大小型钢厂几乎全是推钢式加热炉，因而热效率低，加热质量差，因滑道生产“水印”，钢坯温度不均匀，型钢纵向断面尺寸波动大。国外型钢厂基本上都是步进式加热炉，并在检测手段完备的基础上实现程序控制加热过程。优化加热工艺，温度控制精度高，加热温度均匀。

轧制设备。国内大多数型钢厂仍使用开口式二辊或三辊轧机。用一台交流电机同时传动几架3辊式水平轧机，在同一架轧机上进行多道次穿梭轧制。由于每架排孔数目较多，辊身较长，L/D值可达3左右。整个轧机刚性差，弹跳大，轧机调整困难，影响产品精度。国外大都使用万能轧机或全连续式型。

钢轧机，轧机刚度高，弹跳小，尺寸控制精度高，并在线装备了高压水除磷装置。型钢表面质量好。

型钢精整。国内大多采用拉钢式冷床，热锯定尺，等辊距集体传动辊式矫直机，定尺或短尺矫直盲区大，效果差。国外大多采用步进式冷床，单独传动变辊距辊式矫直机。采取复合矫直，拉伸矫直，液压双向矫直，通长矫直。矫直盲区小和冷锯定尺，精度高。在线检测技术。目前先进的在线检测是型钢热态连续测量和探伤。尺寸测量主要有接触式和照射式两种，连续无损热探伤大多采用贯穿式涡流探伤。此外，型钢连轧也引起了精整工序的一系列改革，现代化的型钢车间实现了连续精整以及根据产品类别按不同台架自动打捆包装、自动称重、登记后装入自动存、取货的立体仓库的全过程计算机管理。

6.5 热连轧带钢/横切板生产

由于可控硅供电电气传动及计算机控制新技术、液压传动、加速轧制、层流冷却等新设备的发展与采用，热连轧机近几十年来发展迅速。带钢厚度达25mm以上，宽度达到2300mm，由带钢生产的横切板已广泛用于船体结构。因此，对热连轧带钢生产工艺过程及特点了解是必需的。

(1) 坯料。热连轧带钢所用的原料主要是连铸板坯和初轧板坯。板坯厚度一般为150mm~250mm，最厚达300mm~350mm。近代连轧机完全取消了展宽工序，以便加大板坯长度，采用全纵轧法轧制，故板坯宽度约比成品宽度大50mm。而长度则主要取决于加热炉的宽度和所需坯重以及卷取机所能容

许的板卷最大外径。

(2) 加热。板坯加热基本上与中厚板相类似。但由于板坯较长，故炉子宽度一般比中厚板者要大得多。目前国内外热连轧厂加热炉基本上是八段(或九段)步进式并列型或人字型连续加热炉。这些加热炉一般有如下特点。① 炉子容量大，热负荷高，小时产量可达 250~300 吨。② 采用自动燃料流量控制和自动温度控制，使加热炉的工作与轧机作业保持协调，合理地使用燃料与准确地控制板坯的出炉温度。③ 板坯在炉内相互间保持一定的间隔，形成四面加热状态，以板坯在固定梁与步进梁不断交替运行，保证板坯温度均匀。为了减少梁对板坯加热温度不均(即黑印)的影响，有的炉子已采用人字型步进梁。④ 步进梁采用液压传动，使板坯在炉内运行平稳、可靠、不跑偏。⑤ 抽出机式出钢。

(3) 粗轧。热带钢连轧机的轧制和中厚板轧制一样，也可分为除鳞、粗轧和精轧几个阶段，各阶段的主要任务也基本相似，只是在粗轧阶段的宽度控制不但不用展宽，反而是采用立辊对宽度方向压缩的方法控制宽度和便于高压水除鳞。板坯除鳞后，接着进入二辊轧机轧制(此时板坯厚度大、温度高、塑性好、抗力小、故二辊轧机就可满足工艺要求)。随着板坯厚度的减薄和温度的下降，变形抗力增大，而板型及厚度精度要求也逐渐提高，故须采用强大的四辊轧机进行压下，才能保证足够的压下量和较好的板型。为了使钢板的侧边平整和宽度控制精确，在以后的每架四辊粗轧机前面，一般皆设置有小立辊进行轧边。粗轧机组各机架都采用万能式，水平辊机架和立辊机架的压下规程或轧辊开口度，由计算机通过数学模型进行设定，速度规程也按一定程序进行控制。在粗轧机组最后一个机架后面，设有测厚仪，测宽仪及测温装置，利用此处较好的测量环境和条件，测得必要的精确数据，以便作为计算机对精轧机组进行前馈控制和对粗轧机组与加热炉进行反馈控制的依据。

(4) 精轧。由粗轧机组轧出的带钢坯，经几十米长的中间辊道输送到精轧机组进行精轧。精轧机组大都是由 6~8 架组成，其轧机布置比较简单。带坯在进入精轧机之前，首先要进行测温、测厚并用飞剪切去头部和尾部。切头的目的是为了除去温度过低的头部以免损伤辊面，并防止“舌头”、“鱼尾”卡在机架间的导卫装置或辊道缝隙和卷取机缝隙中。随着电气控制技术的进步，精轧机组均采取低速穿带后与卷取机同步升速进行高速轧制方法，

以大幅度提高轧制速度。升速轧制不仅可提高轧制速度（末架的轧制速度一般在 25 米/秒，有的已达到 30 米/秒），而且可使终轧温度控制得更加精确。在精轧机组各机架之间设有活套支持器。其作用，一是缓冲金属流量的变化，给控制调整以时间，并防止成叠进钢，造成事故；二是调节各架的轧制速度以保持连轧常数，当各种工艺参数产生波动时发出信号和命令，以便快速进行调整；三是带钢能在一定范围内保持恒定的小张力，防止因张力过大引起带钢拉缩，造成宽度不均甚至拉断。为了灵活控制辊型和板型，现代热带连轧机上皆设有液压弯辊和纵向窜辊装置。为测量带钢宽度和厚度，精轧后设有测宽仪和射线测厚仪。测厚仪和精轧机架上的测压仪、活套支持器、速度调节器及厚度计或厚度自动调节装置组成厚度自动控制系统，用以控制带钢的厚度精度。

(5) 轧后冷却及卷取。精轧机以高速轧出的带钢经过输出辊道，要在 5 ~ 15 秒之内急冷到 600℃ 左右的卷取温度。满足这种冷却速度目前采用的是高冷却效率的层流冷却，即低压大水量（流量达 300 米³/分）的高效率冷却系统。经过冷却后的带钢即送往 2 ~ 3 台地下卷取机卷成板卷，然后再根据不同用途（如：造船用的是横切板）进行精整加工或供冷轧厂等做原料钢卷。

6.6 热连轧系统计算机管理

现代热连轧计算机管理系统大多是三级或四级计算机管理。

(1) 生产管理级（MS），它完成生产的订货处理，生产计划编制（包括合同化学成分要求，出钢代码/记号、板坯要求、主要控制温度设定、工程记录、取样要求）与管理板坯库、钢卷库（半、成品）的管理等。

(2) 生产控制级（FLS）和过程控制级（PCC）

有的工厂也称为监督控制级或过程管理级。

它完成热轧过程物流（加热、粗轧、精轧、卷取）的实时跟踪，控制参数的设定计算以及其他数据处理的功能。具体控制范围是：

① 材料跟踪—根据带钢厂设置的各种检测器的信号，通过跟踪程序，对生产过程中的轧件（板坯、带钢）进行实时追踪，确定轧件在生产过程中的实际位置，并对数据区进行管理。

② 粗轧设定计算—根据来料板坯的条件以及精轧机的要求，通过数学模型计算轧机的压下位置和速度、立辊的开口度、侧导板的开口度，除鳞方

式等所属设备的初始设定值。

③ 精轧设定计算—根据粗轧出口轧件的厚度、温度以及对带钢成品的要求，通过数学模型计算出精轧机压下位置和速度，侧导板的开口度，除鳞方式和机架间喷水方式，宽度计算和厚度计的设定值及确定精轧区域所属设备的初始设定值。

④ 卷取设定计算—根据对带钢的要求，通过数学模型的计算，确定卷取机夹送辊、助卷辊和侧导板的开口度，卷筒的张力转矩和弯曲转矩这些初始设定值。

⑤ 自适应和自学习—根据生产过程中的各种实测数据，对数学模型的有关参数进行在线自适应修正，以便提高数学模型的计算精度。

⑥ 人机对话和 CRT (Cathode-ray tube) 显示处理—使生产操作人员能够在各个操作室的终端上进行人机对话，及时获取生产过程信息，计算机系统运行信息，并且可以通过 CRT 键盘输入或修改有关数据，以达到所期望的工况。

⑦ 制表处理—编辑每块钢在生产过程中的有关数据，制作各种报表，如工程记录、生产报告、质量统计报告和换辊记录等等。

(3) 直接控制级（基础自动化或设备和质量控制级）BA—它是由很多微机组成的微机群。完成设备的顺序控制、位置控制、轧机和辊道的速度控制、完成产品质量控制（如成品钢板的厚度、宽度、温度、板形等）。

6.7 轧钢厂能力与条件确认思路

6.7.1 加热、轧制设备资源。前面已经谈过，加热炉的类型、加热方式、温度控制的先进与否直接影响所加热钢坯的质量（同板坯/方坯长度方向、上下、前后、里外、表面各部位的温度差，烧嘴区、间隔区、水管支承部位的温度差，一次氧化铁皮厚薄等）。加热控制系统有人工经验控制，仪表控制和计算机系统控制燃烧。人工经验控制是根据钢种的烧钢规程，钢在炉各段温度要求，通过炉内热电偶所测温度值，由人工根据要求增减燃料流量，以满足烧钢规程。这种烧钢方式在现代轧钢系统中明显落后。仪表控制燃烧系统，是由计算机控制仪表，再由仪表控制燃烧系统的流量、压力等参数来控制炉温。因仪表动作的滞后性，使得控制温度曲线不可能与设定温度曲线完全吻合，但烧钢的温度控制比人工经验控制前进了一大步。目前最先进的是计算机燃烧系统，它是由计算机直接加热温度模型（曲线）准确地控

制加热的燃料、压力，使加热温度精确地接近设定温度模型曲线。通过确认加热炉类型、加热方式和温度控制及加热质量、便可判定企业加热设备状况。轧制设备系统主要是坯板坯高压水除磷方式确认，高压水压力，是否装有水压仪表显示以适应坯料不同厚度，为清除轧制过程中生产的二次氧化铁皮，轧机是否配有二次除磷装置，轧机的能力（牌坊刚度、轧制力、主电机功率、支承辊直径、喷嘴高度是否可调整，轧辊长度/直径，最大开口尺寸）。在轧制工艺参数的监测方面，轧机上是否安装测压装置，进行压力信号反馈和压力显示。是否安装高精度的辊缝仪，用于工作辊开口度数字显示，以对道次压下率和不同轧程累计压下率进行控制。轧机前后是否设有测温仪表，操作室能否有数显仪表显示开轧温度、终轧温度，以便对工艺进行控制。终轧温度和开轧温度是否有仪表及计算机进行记录，保证工艺的可追溯性。在钢板的出口厚度控制上，轧机压下系统是否采用电动压下自动位置控制 APC 或电动压力位置控制 APC+液压压下厚度自动控制 AGC 的控制手段，实现厚度控制。要说明的是，电动压下 APC 用于空载高速预置辊缝，保证轧制速度要求；液压压下 AGC 用于负载时厚度自动控制，它的目的是减少钢板的同板差（一般应控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内）保证高精度轧制。钢板轧后冷却系统确认十分重要，因为它直接影响钢板金相组织和力学性能。确认工厂轧后冷却系统方式，冷却效果以及热矫设备，矫直压力，矫直机型式以及冷床面积，剪切方式等都直接影响钢板的外在质量。

6.7.2 热处理设备资源主要指热处理炉的先进程度，一是确认加热方式，温度控制的均匀性和精度，以及是否具有无氧化加热气体保护。因为这是影响钢板内在质量及表面质量的重要因素。

6.7.3 对于热连轧带钢厂还应从板坯的在炉时间及加热目标温度，目标温度以出炉温度还是粗轧出口温度为依据，每块板坯的目标温度是否有质量记录保存。轧制过程保证钢板表面质量的手段有那些，对表面质量异常信息如何传递到精整工序。轧制线各质量检测仪表的有效工作周期多长，每次仪表校核是否留下记录。在生产过程中产品的宽度、厚度、凸度、板形、终轧温度及卷取温度等质量记录如何保存，对于这些质量指标出现异常，如何向精整工序传递异常信息，并进行闭环控制等方面进行询问与确认。

7. 影响船体结构钢综合性能的主要非金属夹杂物及气体

7.1 钢中夹杂物

在冶炼或浇注过程中产生或者混入钢液中,而在其后的热加工过程中分散在钢中的非金属相称为非金属夹杂物。钢中非金属夹杂物主要是氧化物夹杂,如 SiO_2 、 Al_2O_3 及复杂氧化物(一般化学代表式为 $\text{MeO} \cdot \text{R}_2\text{O}_3$); 硫化物夹杂,如 FeS 、 MnS 及复合型夹杂物; 氮化物,如 AlN 、 TiN 等。众所周知,钢的性能主要取决于钢的化学成分和组织。钢中存在的非金属夹杂物都呈独立相存在,它们的存在破坏了钢的基体的连续性,造成组织上的不均匀,从而降低钢的塑性、韧性和疲劳性能。这是因为均匀材质在承受单向拉伸时,在与拉伸方向相垂直的横截面上,应力的分布是均匀的。如果在钢材中有非金属夹杂物,则应力分布不再是均匀的。会出现应力集中现象,即在与夹杂物相毗邻的金属基体上,应力急剧升高,使非金属夹杂物破碎而生成空隙。所以,夹杂物常被视为显微裂纹的发源地。而从钢材屈服到断裂的过程则可看作是显微裂纹的长大扩展过程。此外,钢材受力时,其内部发生的塑性变形和断裂这两个基本过程决定着钢材的多种机械性能。虽然夹杂物对于钢材抵抗塑性变形能力的一系列强度指标,如 σ_b 、 σ_s 等不产生很大影响,但是由于热加工时夹杂物要发生形变(如成为条带),使钢材的横向和纵向机械性能发生明显的差异,即增大了钢材机械性能的各向异性。由于船体结构钢质量等级是以低温韧性加以规定的,因此,夹杂物对钢材的韧性影响是验船师关注的重点。大家知道,冲击韧性代表钢材抵抗冲击破坏的能力。所谓破坏就是断裂,断裂又分为脆性断裂和韧性断裂。脆性断裂过程是裂纹的生产和发展过程,而非金属夹杂物往往作为显微裂纹的起源而起重要作用。即首先形成微裂纹或者以原有的微裂纹、空洞或夹杂物作为破坏源,在应力的作用下,裂纹或破坏源缓慢地扩大到某一临界尺寸——临界裂纹尺寸,瞬时发生脆性断裂。韧性断裂也是显微裂纹或空洞的形成和长大过程。如在拉伸断裂中,在发生大量塑性变形之后,首先在脆性夹杂物上或者夹杂物与其体基界面上形成显微空洞,其次是显微空洞的长大和聚合,直至断裂。夹杂物对韧性断裂的影响表现为对冲击值的影响,而对脆性断裂的影响则表现为对脆性转折温度(在系列温度冲击试验时,试样断面上出现 50%纤维状或结晶状断口的温度)的影响。这是由于大多数夹杂物与基体金属的弹性和塑性有相当大的差别,所以,在金属的变形过程中,夹杂物不能随基体相应地发生变形,于是在其周围产生越来越大的应力集中,使夹杂物破碎或使夹杂物因基体的联结遭到破坏,二者脱离而产生微裂纹。变形不断进行,微裂纹不断

发展,并发展为空洞。空洞不断扩大并相互联通,终于导致断裂。

7.2 钢中气体

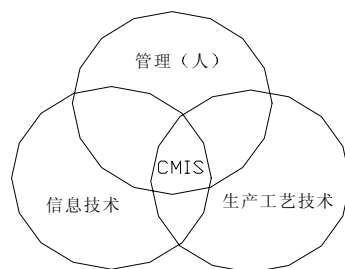
在炼钢、浇注过程中,由于金属与气体(空气、炉气、溶解在熔渣中的气体等)直接接触,所以,成品钢中总是残存着一部分气体。在一般情况下,谈钢中气体主要是讲钢中的氢和氮。钢中的氢对钢的性能有害无利。但要完全去掉钢中的氢几乎是不可能的,只能想办法尽量减少,其途径不外乎严格限制原材料中的水份,冶炼过程加强沸腾脱气,在条件许可时(根据不同等级要求的船体结构钢)应采用真空技术和炉外精炼等先进措施,以使钢中氢的含量降低到不致于危害钢质量的程度。那么,钢中氢究竟有哪些危害,归纳起来是:① 对钢的塑韧性影响。这就是众所周知的氢对钢的机械性能影响有一个专门的术语---氢脆。钢含氢变脆属于应变时效型脆性,也称为滞后破坏。表现为在应力作用下,经过一段时间,钢突然发生脆断,断口特点平滑,在多数情况下是沿晶界断裂。② 在钢中形成白点。所谓“白点”是指在钢材试样的横向酸蚀面上呈放射状的细裂纹,在纵向断口上呈圆形银亮色的斑点。白点在结构钢中容易出现,而且是不允许的缺陷。③ 在钢中形成石板断口。这是因为在钢的结晶过程中,由于氢气分布不均匀,在含氢量高的地方出现气泡。在气泡周围出现某些表面活性元素如 C、S、P 等和夹杂物偏析。在这些区域里的杂质和气泡在钢材热加工时被拉长,但不能焊合,于是在轧材径向(或横向)试样上出现石板断口。④ 钢的氢腐蚀。所谓氢腐蚀是钢在高压氢作用下产生的裂纹通常是网络状或者氢与钢中的碳形成甲烷(CH_4)。甲烷通常在晶界聚集,生成网络状裂纹,可造成钢材开裂鼓泡。钢中的氮不同于氢。它对钢材性能的影响有利有弊,这是因为在一般的碳钢中加入少量铝、钛等元素,并使钢中的氮与其生成氮化钛、氮化铝等在钢中均匀分布,则不仅能显著提高钢的强度,而且能保证具有良好的韧性。在焊接过程中,弥散的氮化钛和氮化铝等质点能阻止 HAZ 的晶粒长大,对改善钢的焊接性能也起良好的作用。此外,氮还可以作为合金元素代替贵重而稀缺的元素,用渗氮的方法来改善钢的表面性能以及氮还可以提高钢的抗晶间腐蚀和点腐蚀的性能。但是,对于大多数结构钢来说,高的氮含量对钢的各种性能有不利的影响,因此,人们通常把氮看作是钢中的一种有害杂质。其主要危害是,在低碳钢中,氮能引起钢的时效硬化现象,表现为钢的强度指标(HRB 、 σ_b 、 σ_s)随时间的推移而增大,而塑性指标(δ 、 ψ 、 a_k)则有所下

降。当钢中的磷含量高时，由氮所导致的脆性倾向更为加剧。只有当钢中的氮含量低于 60PPM 时，才能免除时效硬化的可能。

8. 钢铁生产计算机集成系统与人工智能控制简介

8.1 基本概况

钢铁工业发展趋势是高效化、连续化及自动化。要实现“三化”必须依靠微电子技术。以电子学为基础的自动控制及信息网络渗入冶金领域，推动钢铁工业的重大革新。采用电子技术即可以对生产全过程进行监测、控制



与调节，又可以对非生产部门的信息、市场、计划、经营进行系统管理。计算机是自动控制的基础，人工智能即利用计算机模拟人类智能活动。80 年代以来，国际上先进钢铁企业在原料堆放及储存、高炉炼铁、转炉炼钢及连铸等生产工序，设备故障诊断及生产计划管理等环节，开始应用人工智能专家系统。专家系统是在过程计算机系统的基础上，外添一台进行推理的计算机。其软件包括实时数据收集与处理子系统、推理子系统、数据输入与推理结果显示子系统等。其知识库由静态推理即开炉前有关吹炼计划的识别、副枪测定前后的推理及吹炼中的有关修正的知识，终点成分估计及终点判定的知识三部分组成。应用转炉吹炼专家系统，转炉吹炼终点碳的命中率提高，使吹炼操作更灵活方便，不再凭高级工人经验操作。连铸的人工智能专家系统包括结晶器钢水液位控制实时专家系统、漏钢预报专家系统、浇铸工况监视与浇铸控制多功能专家系统及在线实时设备诊断模糊专家系统等，已成功地应用于生产。目前，计算机一体化制造系统（CIMS[Computer Integrated Manufacturing System]）也称计算机集成系统，将企业中的各种过程控制计算机系统技术与管理计算机紧密结合为一体。把企业生产、经营各个环节有机关联，促使产品质量改善，生产效率提高，科学管理，灵活经营，是一种多功能智能系统。它包括：(1) 功能与应用结合；(2) 智能化与自动化结合；(3) 层次分散系统；(4) 专家系统；该技术的支持环境是数据库、网络、系统

技术。在钢厂生产中 CIMS

图 4 CIMS 概念的边缘科学特征

可促使劳动生产率几十倍地提高，在销售经营方面，采用 CIMS 可在世界范围建立销售网络，按客户需要安排生产，按期交货。80 年代初，国外的 CIMS 系统已是世界钢材市场竞争的重要手段，而 90 年代 CIMS 是信息技术、钢铁工业技术与管理相互渗透的系统，集钢铁企业生产经营与过程计算机控制于一体。它是信息技术、钢铁工业技术与管理科学三者相互渗透，相互结合的产物、属于边缘科学。示意图见图 4，目前，国外正在大力发展，国内宝钢、武钢、天津大无缝正在建立 CIMS 综合管理系统。

8.2 CIMS 的生产模式概念与 PDCA 管理循环

CIMS 的生产管理包括合同订货、组织生产、直至产品发运等，以热连轧横切板生产为例，其 CIMS 生产模式概念见图 5。

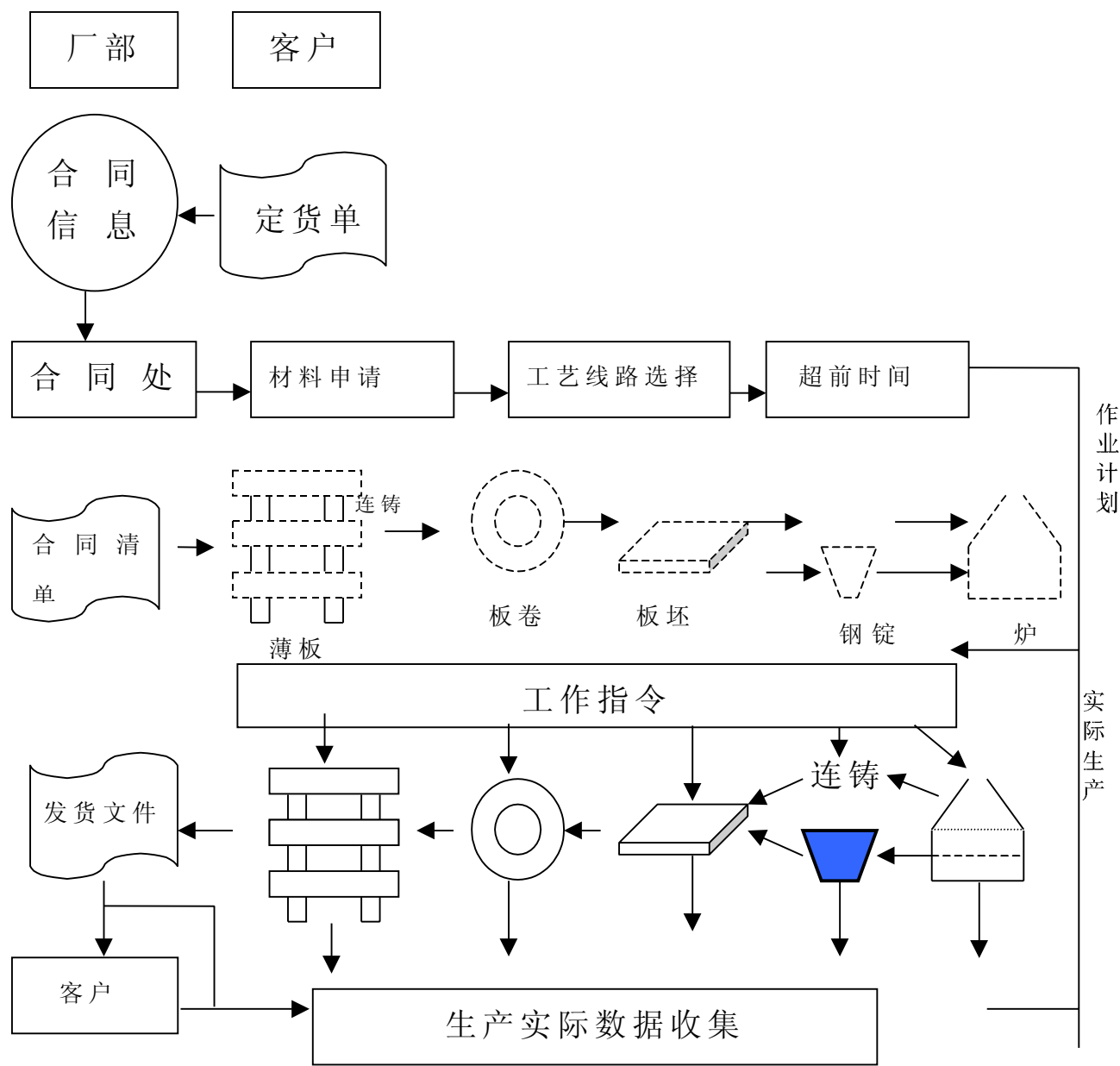


图 5 CIMS 生产模式概念

对于质量控制，CIMS 在质量管理中运用 PDCA 质量管理循环。其管理匡图见图 6。

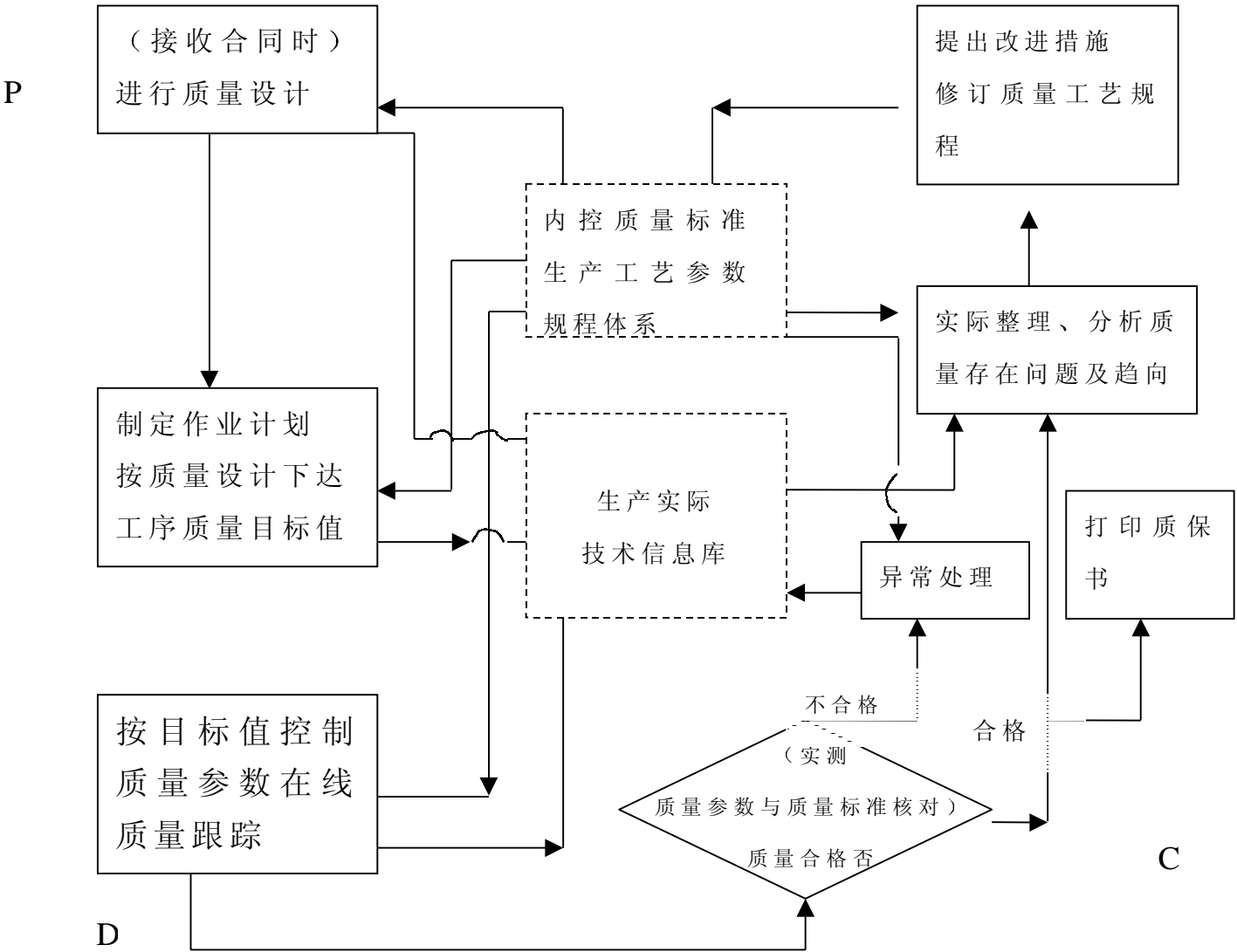


图 6 质量管理的 PDCA

8.3 人工智能

人工智能（Artificial Intelligence）是计算机科学一个重要分支，它主要研究用各种自动机或智能机来模仿人脑所从事的认识、学习、推理、思考、规划等一系列思维活动。它用来模仿、延伸和扩展人的智能，实现某些机器思维及脑力劳动自动化。所谓“专家系统”，主要是指特定领域内，具有相当于人类专家的知识 and 经验，以及解决专门问题能力的计算机程序系统。神经网络（Neural Networks）也称为人工神经网络（Artificial Neural Networks）。专家系统与神经网络同样都是人工智能的处理技术的主分支。神经网络是受生物大脑的启发，参照神经系统构造自适应非线性动态信息处理系统。它是由大量像生物神经元高度并联、互联而成，具有智能功能的系统。它是采用物理可实现的系统来模仿人脑神经细胞的结构和功能。在冶金

领域，人工智能神经网络已开始应用于高炉数据模式识别、连铸机漏钢预报，转炉静态控制模型、带钢轧机板形控制及电弧炉控制等工艺。目前在冶金行业应用最完善的当推美国神经网络控制应用工程公司 (Neural Applications Corporation) 所设计的电弧炉神经网络控制系统。

8.4 人工智能神经网络对电弧炉的控制

长期以来，电弧炉依靠每根电极的阻抗来进行控制。由美国科威尔 (Coralville) 神经网络应用工程公司设计的电弧炉智能控制器，能优化电弧炉的功率输入，淘汰沿用电极定位的简化设定。电弧炉智能控制系统以“神经网络的人工智能”为基础进行控制，能像人脑功能那样做出决定。与人类似地进行学习，一旦获得操作经验，掌握电弧炉控制，就能准确有效地控制电弧炉。电弧炉智能控制器使用象生物的神经网络一样进行工作的计算机。控制系统包括控制电弧炉的通用程序、学习分析电弧炉条件和做出决策的软件神经原 (software neurons) 网络，以及帮助网络识别、判断各种输入信息重要的算法。控制系统有三个神经网络模式：电炉仿真模式 (FE—Furnace Emulator)，用于预报操作；调节器仿真模式 (RE—Regulator Emulator)，用于复制传统控制器的各种响应；神经电炉控制模式 (NFC—Neural Furnace Controller)，用于综合两个仿真模式的输出，优化电炉操作。神经电弧炉控制器的原理图见图 7。

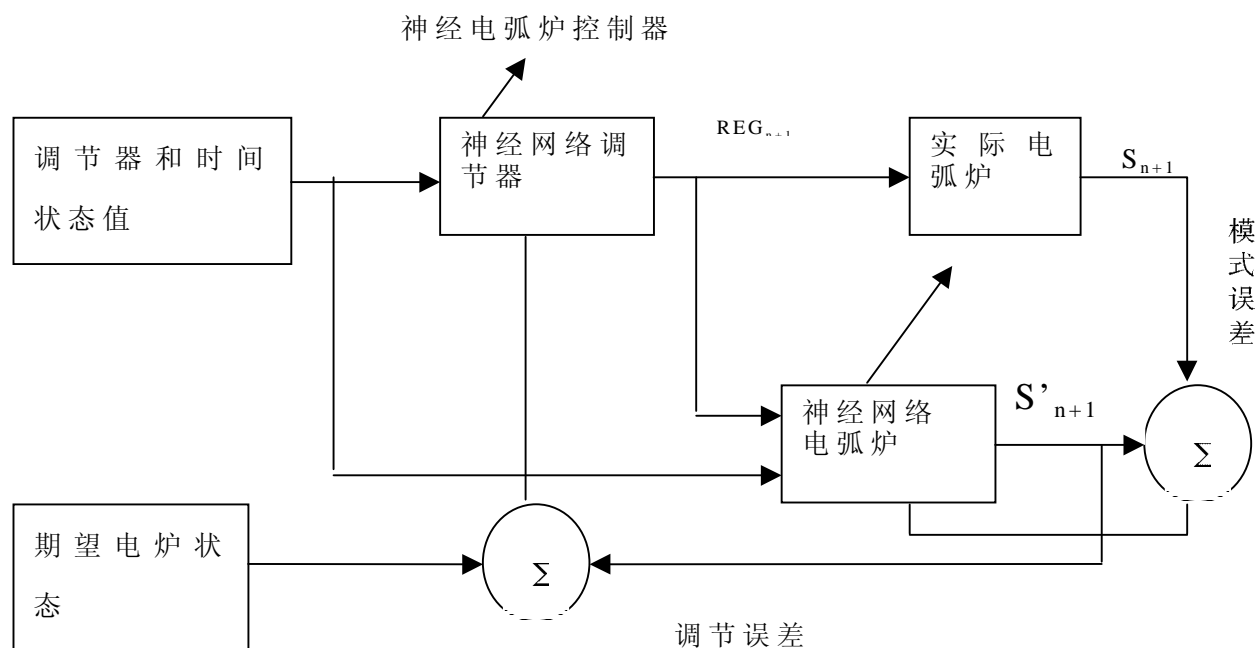


图 7 装有智能电弧炉控制器的电炉系统原理图

8.5 LAF™ 技术

由美国依阿华 (Iowa) 州的北极星 (North Star) 钢厂与米尔切克 (Milltech) 公司合作研究用神经网络 (Neural Network) 技术, 以改善电弧炉电极控制。1991 年 9 月, 在第一台 80t 电弧炉上实现了闭环控制, 称之为 LAF™ (The Intelligent Arc Furnace)。该系统经过约 30min 的学习训练, 找到解决电弧炉工作过程多因素影响的问题, 这使电弧炉电极调节技术有了质变, 从人所设计的模型时代, 进入计算机设计的模型进行控制的新时代。LAF™ 使用 3 个神经网络模拟, 即炉子模拟、调节器模拟和神经控制模拟。由 200 多个相互联结的神经元组成, 全部使用扩展的 Δ -Bar- Δ 自适应算法。将炉子模拟网络和调节器模拟网络接入炉子的神经控制模拟网络, 所构成的复合网络有能力学会如何去调节电极位置, 使电极电流和炉子功率因素在设定点处于对电网闪烁干扰最小的状态。网络的权衡每 15s 重新设定一次, 并允许不断进行预报。能够自动适应操作条件的变化, 如废钢装入量、线电压、电极长度、系统阻抗等条件的变化。

8.6 人工智能电弧炉技术的优越性

LAF™ 技术中神经网络的应用目标仅在于改善电弧炉工作点的设定, 因而其控制特征主要表现在对电弧炉的电气特征的识别和控制方面, 有许多特征是传统控制所不具备的重要优点:

(1) 适应电弧炉负荷特性的变化。电弧以数十兆瓦功率输入电炉, 准确设定电极位置是基本操作。电弧炉电参数设定要考虑各种因素相匹配, 由于电弧放电及电弧炉工作条件是一个复杂系统, 按照传统方法模拟很困难。另外电弧炉负载特性又是动态变化的, 如冷废钢中有许多车屑与薄料, 在电特性上表现为较高电抗。随着废钢的熔化, 载荷中电抗逐渐减小到几乎完全消失, 电弧炉阻抗特性的变化将影响合理的工作点选择, 传统控制技术难以识别。其次各篮废钢都有所不同, 因此实际工作过程, 不存在一般性的最佳工作点。神经网络具有学习功能, 识别并适应冶炼过程炉子负荷特性的变化及各篮炉料之间差异, 调整炉子工作点设定, 使炉子始终在合理的范围运行, 比传统控制更精细, 得到更为优越的技术经济指标。

(2) 超前预报。基于电弧炉工作条件的分析, 超前 100~300ms 预报误差值, 然后送出控制信号, 以实现超前补偿, 此功能能使电弧炉极平衡地工作。

(3) 掌握“三相意识”。了解三根电极之间的复杂关系，弄清获得信号对三根电极的影响，选择能满足所需条件的输出信号，从而清除了存在于传统调节器设定点附近的“骚扰(hunting)”现象。

(4) 降低闪烁干扰，电弧炉负荷突然断路，然后突然接通，会造成强烈的电冲击，交流电通过零点处正弦波会产生畸变。这些干扰使变压器输出功率降低，电耗增大，并对电网造成闪烁干扰。LAF™神经网络的数据采集系统配有 5000 个/s 样本的高速读数装置对闪烁进行预报和修正，从而对电网的干扰有所减轻。

(5) 三相平衡的调节。若炉子 A 相电极过短会出现 B 相及 C 相电流较大，而 A 相电流较小。用传统的三相各自独立调节技术，只有努力使 A 相提高，而不会通过改变 B 相和 C 相的电流来调节 A 相电流，炉子运行状态无法改善，然而 LAF™神经网络具有三相意识，知道如何调节 B 相和 C 相电流使 A 相电流逐渐增大，虽每相并没有处于设定电流工作点上，但炉子处于三相较平衡状态下运行。

9. 认可试验及试验大纲

9.1 认可试验及试验大纲在指南中已给出了明确定义。验船师如何理解其定义，正确评价申请方的生产能力和条件十分重要。最少的试验项目和试验成本如何控制，需要验船师根据本须知前面所述内容，确认申请方的生产能力和管理水平(硬件和软件)。对申请认可品种进行质量评价，也就是本社认可程序中的初审报告的实质性内容。因为钢铁企业有大、有小、有先进、更有落后，只有把握企业脉搏，才能拟定合理的试验大纲。

9.2 拟定试验大纲应考虑的因素

9.2.1 申请方的生产条件是发达工业国家还是发展中国家，是国际领先水平，还是一般水平。对先进生产力条件下的企业，由于其生产条件决定了企业产品的质量等级，也就是说，它的最普通产品的质量水平也是那些相对落后企业精雕细刻难已达到的。为此，对于这样的企业，不加分析地按落后企业的生产力水平和质量控制模式拟定试验大纲，不仅不能体现 CCS 的严，反而只能说明 CCS 的质量控制水平差。对相对落后的企业，特别是那些乡办、村办的小型钢材生产、加工企业，仅仅以生产的产品能够满足 CCS 规范标准的最低条件或稍有富裕为依据，忽视企业生产过程中多重的原材料控制、生产过程的质量控制、人为因素控制以及生产设备固有的不足等造成的

不稳定质量结果。不加分析的受理申请，并一味以最少的试验项目和试验成本拟定试验大纲，则会严重影响 CCS 的工作质量，影响 CCS 在冶金行业中的形象。在国内冶金行业实施结构性调整中，更应注意生产企业的条件和能力。

9.2.2 认可钢级的覆盖性。对于中型钢铁企业，申请认可的钢级不会很多，一般二至三个。而对大型钢铁企业，申请认可的钢级可能是规范所列全部，是否对每一钢级进行试验。验船师则需要依本须知所述对企业评价思路决定。如果不需要对全部钢级进行试验，这就有一个认可试验钢级的覆盖性问题。一般来说，有两种模式，一种是以高质量等级的产品进行认可试验，验证企业对生产高质量等级产品的能力及质量水平，来确认企业生产其它低级别的条件和能力；另一种是以低等级的产品进行认可试验，并以超出规范的试验项目和技术指标，验证企业船用钢材质量起点水平，即“门槛控制”。通过申请认可多个钢级中的几个有代表性钢级的认可试验，结合企业生产条件及过程控制实绩，就可判断企业对所申请认可钢级的能力及水平。

9.2.3 认可厚度覆盖性。一般来说选择有代表性的试板厚度，是考核企业的设备能力及产品质量的覆盖性，也就是常说的边界条件。选择最大厚度的目的主要是考核设备能力及产品力学性能，选择最小厚度主要是考核轧机的控制精度及板形，各有各的侧重点。两者的目的还是验证企业对不同厚度钢板成分设计、轧制工艺控制的精确水平。当然，在最大厚度问题上，有时也应适工厂生产合同的特殊情况，在没有申请认可范围的最大厚度钢板的情况下，选取接近最大厚度钢板，经向总部请示后可灵活掌握。

9.2.4 交货状态的覆盖性。严格地说，除热轧以外的其它交货状态（控制轧制、正火、TMCP、调质处理等）都是在原热轧状态的基础上改善钢材内部组织结构，以提高钢材的综合性能，特别是低温冲击韧性。因此，对于同一级别的钢材，在规范中允许多种交货状态。选择较低控制手段交货状态（如 A36 钢板有四种交货状态，选择热轧或控制轧制）进行认可试验，更能反映企业的生产质量水平，全面评价企业的生产能力与条件。

9.2.5 认可试验项目。评价一种钢铁产品，仅以规范标准为依据，显然是不够的。面对一种成熟的钢铁产品，按规范进行检验是合理的。因此，认可试验项目的选取，就是要以适当的试验项目，通过试验结果来评价试验对象的综合性能。在钢材检验指南中，不同的钢种及不同级别钢材都有对应的试验项目和试验要求，但这是相对的，并非一成不变，适具体情况加以考

虑。如化学成分分析，指南中没有砷（As）的分析要求，但对一些地区，因炼铁所用的铁矿石中含有砷，由于砷对钢材质量的危害性极大，所以，就需要分析砷的含量。

9.3.工厂认可试验及产品检验结果的确认思路

通过工厂资料审查、现场考查，按前述各部分的确认思路、方法，给申请认可企业做一个基本评价不会成为难题，也就是说该企业是居世界先进水平、国内先进水平、国内一般水平还是乡镇企业水平等。关于认可试验结果判定，应从两个方面来考虑，一是过程控制是否有效，二是试验结果是否理想。关于过程控制，一般从炼钢原料及主辅料开始，如铁水预处理情况（脱S等）、炉子的工况条件、冶炼过程主辅材料的质量等级、合金原料的烘烤工艺执行、冶炼过程中的碳—温协调控制以及相关成分命中、炉后处理等工艺的执行情况；在连铸过程中的全程保护、中包温度、拉速、保护渣、二冷水控制等影响铸坯质量的相关因素。这些都是钢质纯净度的重要保证，没有合格的化学成分和符合要求的冶炼、浇注工艺，就不可能生产出理想的钢质纯净的钢坯，也不可能轧出理想的钢板。有了合格的板坯，还有轧制过度中的相关工艺的控制，如加热温度、开轧温度、终轧温度、道次压下率、累积压下率以及轧后冷却等。关于认可试验，首先是熔炼与成品化学成分分析。对船体结构钢，主要是碳钢和低合金钢，对C含量的要求是在保证强度的前提下越低越好，因为C对焊接性能及韧性都不利。Mn是作为合金元素加入的，主要是为了弥补因C含量降低而导致的强度下降，同时低C高Mn可以改善钢的韧性，但Mn也不是无限制地加入，否则不仅会增加成本，而且会使焊接等性能恶化。Si是冶炼和脱氧过程中的重要元素，对强度有一定的贡献，由于船体结构钢是全镇静钢，所以都有一定Si含量。P、S在钢中是有害元素，当然越低越好，国内目前一般水平普通强度钢P在0.022%、S在0.018%左右，高强度钢P在0.018%、S在0.015%左右波动，先进水平应再低4~6个S。Al是作为脱氧剂和细化晶粒元素加入的，是船用钢中必不可少的成分，但由于各炼钢厂冶炼条件与工艺水平的差异，导致Al的收得率波动较大，加之Al的价格贵，企业往往在保证成分下限的情况下，尽可能少加，因此，在认可和检验过程中要关注Al含量，以便了解钢的水平，Als一般大于0.015%才有明显的细化晶粒作用，从经验来看，0.035%左右的Als较为理想，尽可能不超过0.055%，因为过高的Al含量会导致 Al_2O_3 类夹杂

增多，从而降低钢材的综合性能。Nb、V、Ti 等微合金化元素在高强度、高韧性的钢中得到广泛应用，由于价格昂贵，企业会尽量少加，所以一般不必担心超量。对于现代化的钢铁企业，特别是日本的钢厂，由于其资源的问题，他们都是从手段、工艺以及钢质纯净度上下功夫，即尽量减少影响性能的 P、S、O、N、H 及其它杂质元素的含量（注：N 控制在合理的范围），控制夹杂物形态和数量，利用先进的手段和工艺以尽可能低的合金元素含量达到较高的强韧性水平，如其高强度钢 E36 可以不加 Nb，只靠加 Al 细化晶粒，C 控制在 0.12% 左右。相反，国内一些企业由于冶炼、轧制等条件的限制，很难获得理想的钢质纯净度及组织、性能，很多情况下只能靠添加合金元素以及热处理来弥补。另外，由于焊接性能对于船体结构钢是至关重要的，因此应特别关注其 C_{eq} 及 P_{cm} ，一般认为 C_{eq} 小于 0.45%， P_{cm} 小于 0.25%，则钢具有较好的焊接适应性，我们认为最好将 C_{eq} 控制在 0.39% 或 0.40% 以下。关于力学性能指标，我们认可试验的目的是考核工厂是否具备生产满足规范及相关标准要求钢材的能力，同时，我们更关心的是工厂在日常大生产条件下能否持续保证其产品满足规范及相关标准要求。因此，必须首先对工厂的设备条件以及生产实绩进行充分考查，以便了解其对生产过程的控制程度如何，如果装备先进，自动化程度高，对钢材最终组织与性能的命中率也会相对较高，反之，则命中率较低，性能波动较大，这一点可以通过考查以往的实绩看出（这里所指的实绩不一定是船用钢，对其它钢种的控制也能反映钢厂的水平）。这样就可以知道，我们希望认可试验的结果有一定的富裕量（这一点根据钢厂的 control 水平而定），因为这可以保证即便大生产过程中性能有一定的波动（这是难以避免的）也无妨，如果认可试验的结果接近规范或相关标准的要求值，我们就应该谨慎处理，最多只能有条件地认可，即在认可后相当一段时间内要严加控制，包括扩大取样范围等措施，同时要督促工厂改进工艺、调整成分设计等，直至钢材最终性能能稳定满足规范要求为止。需要指出的是，日常检验只是在经认可的成熟的工艺条件下所进行的大生产过程中的出厂检验项目，它们并不代表钢材所需的所有性能；认可试验则是对钢材综合性能的全面考核，当然就包括了一些日常检验所不需要的试验项目，如冷弯试验是考核塑性及冶金质量，在现行规范中未被列入日常检验项目，但准确地讲是免做试验，即当我们认为工厂的工艺条件足以保证冷弯性能时，可以不将其列入日常检验项目，但国内很多厂家都会偶尔出现冷弯不

合，所以对装备水平不是很高的厂，建议至少将冷弯试验作为抽查项目；系列冲击试验目的是考核冲击韧性及韧脆转变温度，低温冲击性能是船用钢的重要特性，必须保证船用钢的使用温度高于其韧脆转变温度，以使其处于高韧性状态，所以不能单纯以冲击值达到多少就算合格，因为在接近韧脆转变温度时冲击值是很敏感的，变化幅度很大，只有处于曲线上平台才能保证稳定的冲击值；时效冲击试验是考核应变时效敏感性，因为船用钢在使用过程中被变形加工是不可避免的，而应变时效敏感性是与钢中气体（尤其是氮气）含量以及夹杂物水平是密切相关的，钢质纯净度高，一般应变时效敏感性就小，时效冲击值降低相对较少，反之则降低较多；其它还有许多试验，如落锤试验、焊接接头力学性能试验、最大硬度试验等等，这里不再一一叙述，总之要把握一个原则，即要保证在大生产条件下能稳定地生产出组织、强韧性、焊接性能等均符合要求的船用钢。

10、参考文献

- | | | | |
|----|---------------|----------------|---------|
| 1 | 黄希祐 | 钢铁冶金原理 | 冶金工业出版社 |
| 2 | 王廷溥 | 轧钢工艺学 | 冶金工业出版社 |
| 3 | 殷瑞钰 | 钢的质量现代进展 | 冶金工业出版社 |
| 4 | 徐文派 | 转炉炼钢学 | 冶金工业出版社 |
| 5 | 张承武 | 炼钢学 | 冶金工业出版社 |
| 6 | 王有铭 陈瑛 | 中厚钢板生产 | 冶金工业出版社 |
| 7 | 冶金报社 | 连续铸钢 500 问 | 冶金工业出版社 |
| 8 | 秦民生 | 非高炉炼铁 | 冶金工业出版社 |
| 9 | 丁永昌 徐曾启 | 特种熔炼 | 冶金工业出版社 |
| 10 | 陈 雷 | 连续铸钢 | 冶金工业出版社 |
| 11 | 王有铭 李曼云
韦光 | 钢材的控制轧制和控制冷却 | 冶金工业出版社 |
| 12 | 郭廷钢 | 连续铸钢 | 冶金工业出版社 |
| 13 | 徐曾启 | 炉外精炼 | 冶金工业出版社 |
| 14 | 谭家骏 | 金属材料及热处理专业知识解答 | 冶金工业出版社 |
| 15 | 王占学 | 控制轧制与控制冷却 | 冶金工业出版社 |
| 16 | 吴光治 | 热处理炉进展 | 国防工业出版社 |
| 17 | 知水 王平 | 特殊钢炉外精炼 | 原子能出版社 |
| 18 | 郑沛然 | 连续铸钢工艺及设备 | 冶金工业出版社 |
| 19 | 梁爱生 | 钢铁生产新技术 | 冶金工业出版社 |

20	朱应波 宋东亮等	直流电弧炉炼钢技术	冶金工业出版社
21	王祖滨 刘嘉禾	低合金高强钢生产工艺 技术发展述评	特殊钢 95 年学术年 会论文
22	康 复	传统流程炼钢厂的技术 动向-纯净钢技术的进展	中国金属学会
23	刘建功 沈开明	质量检查实用手册	武汉钢铁公司
24	冶金部特殊钢信息 网	国外特殊钢生产技术	冶金工业出版社
25	李正邦	电渣冶金原理及应用	冶金工业出版社
26	张 鉴	炉外精炼的理论与实践	冶金工业出版社
27	樊俊飞	第一届全国炉外处理学 术会议论文集	马鞍山
28	顾 炎	钢铁企业计算机集成制 造系统 CIMS	冶金工业出版社
29	李士琦	现代电弧炉炼钢	原子能出版社
30	石纯一等	人工智能原理	清华大学出版社
31	马如璋 徐祖雄	材料物理现代研究方法	冶金工业出版社