

转炉炼钢 生产技术

王社斌 宋秀安 等编著



化学工业出版社

转炉炼钢 生产技术

王社斌 宋秀安 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书结合作者二十多年的生产实践与科研经验,详细介绍了转炉炼钢的基本原理和专业技能,对转炉原料、转炉炼钢原理、转炉工艺设备、连铸工艺设备、钢种质量、除尘环保与二次能源利用等内容进行了系统描述。

本书注重企业生产实际,尤其是对转炉炼钢的专业技术、典型工艺生产操作方法、生产设备、产品质量的影响因素等内容的介绍十分详尽。非常适合钢铁企业的生产操作人员、技术人员与管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

转炉炼钢生产技术/王社斌,宋秀安等编著. —北京:
化学工业出版社, 2007. 11
ISBN 978-7-122-01448-1

I. 转… II. ①王…②宋… III. 转炉炼钢 IV. TF71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 165497 号

责任编辑: 丁尚林
责任校对: 吴 静

文字编辑: 张绪瑞
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 化学工业出版社印刷厂
850mm×1168mm 1/32 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 301 千字
2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究



前 言

转炉炼钢是当今世界上最主要的炼钢方法,目前全世界有 60%、我国有 80% 的钢是由转炉冶炼的。尤其是近十年中,转炉炼钢规模迅速扩大,产量不断增长,技术不断更新,以转炉为中心的高炉-铁水预处理-氧气转炉-炉外精炼-连铸连轧工艺,经过优化组合、结构调整,已经成为现代大型钢铁厂普遍采用的、具有钢铁产品制造、能源转换、社会部分大宗废弃物的处理、消纳功能的模式。钢铁工业技术的快速发展给广大冶金工作者、专业技术人员、科研人员提出了更高要求。不仅企业需要更多的冶金专业高层次人才,而且越来越多的人被钢铁业的强势发展所吸引,企业家们把更多的目光投向钢铁行业,他们都迫切希望了解和掌握转炉炼钢的理论知识 and 专业技能,希望有更多介绍转炉炼钢技术方面的图书出版,供他们阅读、参考和使用。

但目前转炉炼钢方面的教材和图书不仅种类不多,而且大部分内容都停留在 20 世纪 50~80 年代水平,反映近年来转炉炼钢现状和发展趋势有一定的局限性。因此编写一本转炉炼钢、连铸技术,并满足不同层次人员学习需要的图书就显得非常必要,这也是广大冶金工作者和爱好者的迫切愿望。受化学工业出版社委托,作者根据二十多年的生产实践、科研与教学工作经验,以基本理论、专业技术、典型工艺生产操作方法、产品质量的影响因素为主线,对转炉原料、转炉炼钢原理、转炉工艺设备、连铸工艺设备、钢种质量、除尘环保与二次能源利用等内容进行了较为系统的描述。本书出版后,如果能为从事基层生产的作业人员、钢铁企业中不同层次的管理与技术人员、求知欲强的冶金专业学生、冶金领域的科研人员提供一点帮助的话,我们将感到非常欣慰!

本书由太原理工大学冶金工程系王社斌（第5章，第6章，第7章的第1、9、10节）、宋秀安（第1~4章）、史学红（第7章的第2~8节）等共同完成，并由林万明校核，王社斌整理定稿。

本书在编写过程中，得到了“新材料界面科学与工程”省部共建教育部重点实验室、冶金工程系的许并社、陈津、韩培德、李健、梁建、张金玲、伊小定、张均远、晏红、王帅等人的大力协助。借出版之际，谨向鼓励、关心和支持本书出版的全体同仁和工作人员表示衷心的感谢。

由于作者知识有限，加之该领域发展很快，本书难免存在不妥之处，恳请读者不吝赐教。

王社斌

太原理工大学

2008年1月于太原

目 录

第1章 转炉炼钢发展概况

1

1.1 世界转炉炼钢发展历史	1
1.2 中国转炉炼钢的发展	6
1.3 转炉炼钢的种类与特征	11
1.3.1 顶吹法	11
1.3.2 底吹法	13
1.3.3 复合吹炼法	14
1.3.4 一些复合吹炼法工艺	16
1.4 转炉炼钢工艺流程及发展	17
1.4.1 现代转炉炼钢工艺流程	17
1.4.2 转炉炼钢新技术	18
参考文献	25

第2章 转炉炼钢基本原理

27

2.1 炼钢的基本任务	27
2.1.1 钢与铁的区别	27
2.1.2 炼钢的基本任务	28
2.2 气体射流与熔池的相互作用	29
2.2.1 转炉炉膛内氧气射流的特征	30
2.2.2 氧气射流对熔池的作用	32
2.2.3 复合吹炼时底吹气体对熔池的作用	36
2.3 炼钢过程化学反应	37
2.3.1 炼钢炉渣	38
2.3.2 吹炼过程基本规律	45
2.3.3 炼钢熔池中元素氧化的一般规律	46
2.3.4 吹炼过程脱碳	49
2.3.5 硅、锰的氧化反应	57
2.3.6 吹炼过程的脱磷反应	59
2.3.7 吹炼过程脱硫	63
2.3.8 钢液的脱氧	65

参考文献	74
------------	----

◎ 第3章 转炉炼钢原辅材料及其处理	76
---------------------------	-----------

3.1 炼钢用铁水及其预处理	76
3.1.1 铁水的温度	76
3.1.2 铁水的化学成分	77
3.1.3 铁水供应	80
3.1.4 铁水预处理	83
3.2 炼钢用废钢及其要求	93
3.2.1 废钢	93
3.2.2 对废钢的要求	94
3.2.3 废钢的供应	95
3.3 炼钢用辅助原料	97
3.3.1 散状材料供应	97
3.3.2 炼钢用石灰及其对石灰的质量要求	101
3.3.3 其他造渣材料	104
3.3.4 冷却剂	106
3.3.5 其他材料	107
3.4 炼钢用铁合金及其对铁合金的质量要求	108
3.4.1 炼钢常用铁合金及其要求	108
3.4.2 铁合金供应	109
3.5 炼钢用耐火材料及其要求	110
3.5.1 转炉用耐火材料的演变	110
3.5.2 转炉炉衬耐火材料	110
3.5.3 转炉内衬用砖	111
3.5.4 转炉出钢口用砖	113
3.5.5 转炉炉衬的修补	113
3.6 炼钢用氧及其对氧气的要求	117
3.6.1 炼钢用氧的要求及制备原理	117
3.6.2 供氧系统	118
参考文献	119

◎ 第4章 转炉炼钢工艺与设备	121
------------------------	------------

4.1 冶炼一炉钢的操作过程	121
----------------------	-----

4.2 转炉炼钢工艺制度	123
4.2.1 装入制度	123
4.2.2 供氧制度	128
4.2.3 造渣制度	139
4.2.4 温度制度	143
4.2.5 脱氧合金化	149
4.2.6 终点控制	153
4.2.7 出钢制度	161
4.2.8 转炉炼钢过程的控制	165
4.3 钢水的精炼制度	170
4.3.1 钢水精炼概述	170
4.3.2 真空循环脱气法 (RH 法)	176
4.3.3 CAS-OB 法	180
4.3.4 IR-UT 法	182
4.3.5 LF 法	183
4.3.6 喂丝法	185
4.4 转炉炼钢车间及设备	186
4.4.1 转炉炼钢车间组成	186
4.4.2 转炉设备	189
4.4.3 氧枪及其附属设备	204
参考文献	219

第5章 连铸工艺与设备 220

5.1 连铸工艺的发展与现状	220
5.1.1 国外连铸技术发展现状	220
5.1.2 国内连铸技术发展现状	222
5.2 方坯连铸机的工艺设备	226
5.2.1 钢包回转台	228
5.2.2 中间包	228
5.2.3 结晶器	231
5.2.4 结晶器振动装置的脱模原理及全板簧振动装置	233
5.2.5 铸坯二次冷却系统	237
5.2.6 拉矫机	239
5.2.7 铸坯剪切装置	241

5.2.8	方坯连铸工艺参数及其含义	242
5.3	板坯连铸机的工艺设备	243
5.3.1	钢包回转台	243
5.3.2	中间包	244
5.3.3	结晶器	244
5.3.4	振动装置	245
5.3.5	二冷装置与拉矫设备	246
5.3.6	铸坯切割设备	249
5.4	薄板坯连铸机的工艺设备	250
5.5	连铸生产工艺技术与钢坯质量	253
5.5.1	连铸工艺参数	253
5.5.2	连铸的保护浇铸技术	257
5.5.3	连铸生产操作	260
5.5.4	连铸坯质量缺陷及防止措施	266
	参考文献	272

第6章 钢种、质量与冶炼技术 273

6.1	目前转炉冶炼的钢种	273
6.2	普通碳素钢的冶炼技术	274
6.2.1	普通碳素钢的基本质量要求	274
6.2.2	转炉普碳钢的冶炼工艺技术要点	275
6.2.3	典型的转炉冶炼工艺	276
6.3	优质碳素钢(硬线用钢)的冶炼技术	277
6.3.1	硬线钢的基本质量要求	278
6.3.2	硬线钢的基本生产工艺	278
6.3.3	典型的硬线钢生产工艺技术要点	282
6.4	轴承钢的冶炼技术	284
6.4.1	轴承钢的生产质量	284
6.4.2	转炉冶炼轴承钢的生产工艺技术	286
6.4.3	转炉冶炼轴承钢的炉外精炼技术	287
6.4.4	轴承钢连铸工艺	288
6.4.5	典型的转炉轴承钢生产工艺过程	291
6.5	齿轮钢的冶炼技术	293
6.5.1	齿轮钢的技术标准、质量要求和控制措施	294

6.5.2	齿轮钢的生产工艺技术	299
6.5.3	典型的齿轮钢冶炼工艺	301
6.6	弹簧钢的冶炼技术	302
6.6.1	弹簧钢的质量要求	303
6.6.2	洁净化冶炼技术	304
6.6.3	典型的弹簧钢生产工艺技术	305
6.7	不锈钢的冶炼技术	307
6.7.1	不锈钢脱碳	307
6.7.2	不锈钢脱硫	309
6.7.3	不锈钢控氮	310
6.7.4	不锈钢两步冶炼工艺	310
6.7.5	典型的两步法生产不锈钢工艺	311
6.8	超低碳钢的冶炼技术	312
6.8.1	典型 IF 钢的化学成分与力学性能及其影响	312
6.8.2	IF 钢的生产工艺特点	313
6.8.3	典型的 IF 钢冶炼技术	315
6.9	石油管线的冶炼技术	318
6.9.1	石油管线钢的质量要求	318
6.9.2	石油管线钢的化学成分要求	319
6.9.3	转炉冶炼石油管线钢的生产工艺特点	320
6.9.4	典型转炉冶炼石油管线钢的生产工艺	322
	参考文献	324

7 第 7 章 转炉炼钢中的环保与资源、能源二次利用 325

7.1	转炉炼钢中的清洁生产环保技术标准	326
7.2	烟气、烟尘的性质	328
7.2.1	烟气的特征	329
7.2.2	烟尘的特征	330
7.3	转炉烟气净化系统主要设备	330
7.3.1	未燃全湿净化系统的主要设备	331
7.3.2	静电除尘系统主要设备	339
7.3.3	煤气回收系统的主要设备	341
7.4	风机与放散烟囱	343
7.4.1	风机	343

7.4.2 放散烟囱	343
7.5 烟气及烟尘的综合利用	344
7.5.1 回收煤气的再利用	344
7.5.2 烟尘的综合利用	346
7.5.3 回收蒸汽再利用	346
7.6 烟气净化回收的防爆与防毒	346
7.6.1 防爆	346
7.6.2 防毒	347
7.7 烟气净化回收系统简介	348
7.7.1 OG 净化回收系统	348
7.7.2 静电除尘干式净化系统	349
7.8 二次除尘系统及厂房除尘	350
7.8.1 二次除尘系统	350
7.8.2 厂房除尘	352
7.9 钢渣及含尘污水处理系统	353
7.9.1 钢渣处理系统	353
7.9.2 含尘污水处理系统	354
7.10 未来转炉炼钢厂的能源输入、输出图	356
参考文献	357

第 1 章

转炉炼钢发展概况

钢是应用最广泛的一种金属材料。工业、农业、交通运输业、建筑业和国防等部门，都离不开钢。钢的生产对国民经济各部门的发展都有极其重要的作用。古代炼钢技术的出现可上溯到两千多年前，而近代工业化炼钢则只有一百多年的历史。

1.1 世界转炉炼钢发展历史

世界近代炼钢工业首先诞生于欧洲。机器的大量发明和广泛使用，使钢铁成为最基本的工业材料，对钢铁的数量和质量的需求越来越高。过去已有的炼钢方法已经不能满足工业和技术发展的需求，因此人们开始寻找新的炼钢法。19 世纪 40 年代末威廉·凯利（1811~1888 年）在肯特郡自己开办的工厂里发现，精炼生铁时，少加一些木炭，多往炉内鼓进空气，能使炉温升高。此法不仅节约了木炭，而且可以把铁炼成钢。1851 年凯利建成了新的炼钢炉，即向炉内吹入空气使生铁脱碳成钢，并在实际生产中应用。但他严格保密相关技术，不向外公布。

凯利发明空气吹炼法炼钢技术可能与中国有关。有资料表明，当时凯利的炼钢厂中雇有 4 个中国工匠，这些人可能把中国的鼓风技术带到美国，因为中国当时对钢的生产过程已有深入的了解，凯利很可能从中国工匠那里得到一些重要的启发。这一问题有待进一步研究。

首先公布转炉炼钢法的是英国发明家亨利·贝塞麦（Henry

Bessemer)。贝塞麦 1813 年 1 月 19 日出生于英国查尔顿。1853 年,贝塞麦对新式大炮炮膛很容易破裂的缺点进行了深入研究,结果发现其原因是铸铁制成的炮膛无法承受火药的爆炸力。制造新式大炮最理想的材料是钢,但是过去的炼钢方法很复杂,钢的价格极为昂贵,要用它制造大炮,必须找到一种新的炼钢方法,提高钢的产量。因此可以说直接导致他寻找新炼钢法的契机是军备和战争的需要。于是,贝塞麦全身心地投入炼钢新技术的研究工作中去。首先他在实验中发现粘在坩埚边上的铁片具有钢的特性,经过研究证实,该处的铁片在高温熔融状态得到了鼓风箱吹进的足够的空气,使其内的碳被氧化,降低了含碳量,由此变成了钢。

根据这一原理,贝塞麦于 1855 年 7 月设计制造了一种从炉底吹氧的新式炼钢炉。炉子采用酸性耐火材料,造酸性炉渣,并用一根陶土制成的管往转炉铁水里吹空气,不需要任何燃料,经过约 30min 就可以炼出一炉钢。在此期间,吹入炉内的空气首先将铁水中的锰和硅氧化,形成褐色烟雾逸出,铁水中的碳也被氧化成二氧化碳。炉温从倒入铁水时的 1350°C 上升到大约 1600°C ,反应非常剧烈,像火山爆发一样。

1856 年,贝塞麦在英国科学协会发表演讲,宣告他发明了底吹酸性空气转炉炼钢法,1857 年他取得了这项发明的专利。以后他又将炼钢炉从固定式结构改为可向一侧倾倒,以使炼好的钢水易于倒出。贝塞麦把这种可以回轮的梨形炼钢炉命名为“转炉”,即贝塞麦转炉(图 1-1)。这种转炉只需花 10min 就可把 10~15t 铁水炼成钢。若是用搅拌法需几天时间才能完成。所以,这是一种生产率高、成本低的炼钢方法,成为冶金史上的一大创举,从此开创了大规模炼钢的新时代。

贝塞麦发明底吹酸性空气转炉炼钢法后,各国相继采用此法炼钢。但是很快出现了问题,不少国家的钢铁企业用此法炼出的钢太脆,一击就碎,实际上无法使用,原因是矿石中含磷较高,而贝塞麦转炉采用酸性炉衬和酸性渣操作,吹炼过程中不能去除

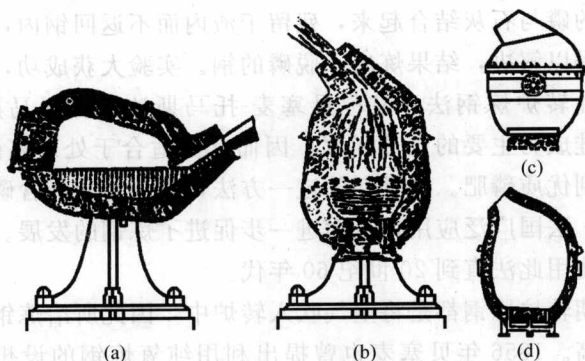


图 1-1 贝塞麦转炉

- (a) 横倒状态：横倒位置时转炉的断面正注入铁水；(b) 竖立状态：竖立位置的转炉的断面（由底部吹入空气）；(c) 外形（外观）；(d) 内部（断面图）

磷、硫，同时为了保证有足够的热量来源，要求铁水有较高的含硅量。贝塞麦之所以成功是因为他当时恰好使用的是低磷铁矿冶炼的低磷铁水，而没有预料到使用高磷铁水炼钢所遇到的麻烦，贝塞麦花了很大精力试图解决这一问题，但未能取得成效。因此他发明的贝塞麦转炉只限于吹炼含磷少的生铁，只适用于拥有大量低磷低硫铁矿石的瑞典和奥地利等国。贝塞麦曾任英国钢铁学会主席（1871~1873年），1879年当选为英国皇家学会会员，并被授予爵士称号。1898年贝塞麦以85岁的高龄去世。

1879年英国冶金学家西德尼·托马斯（Sidney Thomas）发明了碱性底吹空气转炉炼钢法。他认为生铁中磷被空气氧化后，又被硅质炉衬还原成磷，重新进入钢水。他发现石灰石能使铁水脱磷，但必须把贝塞麦转炉原先的酸性硅酸质炉衬改为碱性炉衬。他将白云石熟料与焦油混合烧成新的碱性耐火砖，并用这种耐火砖砌筑底吹转炉。1877年托马斯在南威尔炼钢厂进行了实验。在转炉冶炼过程中鼓风的同时添加石灰石使炉渣成为高碱性，并通过将液体金属中的碳氧化到小于0.06%的“后吹”操

作，集中化渣脱磷。这样便使整个反应在碱性高温条件下进行，被氧化的磷与石灰结合起来，残留于渣内而不返回钢内，脱磷问题因此得以解决，结果炼出了脱磷的钢。实验大获成功，从此创造了碱性转炉炼钢法，又称贝塞麦-托马斯法。在托马斯法中，磷取代硅成为主要的发热元素，因而此法适合于处理高磷铁水，并可得到优质磷肥。托马斯的这一方法，很快被盛产含磷铁矿石的德国、法国广泛应用，从而进一步促进了炼钢的发展。西欧各国一直使用此法直到 20 世纪 60 年代。

早期转炉炼钢都是将空气吹入转炉中，因此所冶炼钢的质量还不太高。1856 年贝塞麦也曾提出利用纯氧炼钢的设想，但由于当时工业制氧技术水平较低，成本太高，纯氧气炼钢未能实现。直到 1924~1925 年间，德国在空气转炉上开始进行富氧鼓风炼钢的试验。1930 年，德国南部马克西米利安 (Maxhutte) 厂在托马斯转炉里试验 30% 富氧炼钢，1938 年用于生产。试验证明，随着鼓入空气中 O_2 含量的增加，钢的质量有明显的改善，而且提高了生产率。当鼓入空气中富氧的含量超过 40% 时，炉底的风眼砖损坏严重，因此又开展了用 $CO_2 + O_2$ 或 $CO_2 + O_2 + H_2O$ (汽) 等混合气体的吹炼试验，但效果都不够理想，没能投入工业生产。

20 世纪 40 年代初，工业制氧机在美国问世，制氧技术得到迅速发展，给氧气炼钢提供了物质条件，使利用纯氧炼钢成为可能。1948 年德国人杜雷尔 (R. Durrer) 在瑞士采用水冷氧枪垂直插入炉内吹炼铁水获得成功。美国联合碳化物公司于 1947 年在实验室进行氧气顶吹转炉的实验并获成功，命名为 BOF。奥地利闻之即派有关专家前往参观学习，回国后于 1949 年在 2t 的转炉上进行半工业性实验并获成功。1952 年在林茨 (Linz) 城，1953 年在多纳维茨 (Donawltz) 城先后建成了 30t 氧气顶吹转炉车间并投入生产，称为 LD 法。因此一般认为氧气顶吹转炉是在奥地利首先取得技术突破。此法是把生铁水与废钢混合，倒入转炉中，然后吹氧，将碳与杂质迅速烧掉。

1967年12月原联邦德国与加拿大合作发明了氧气底吹转炉，称为OBM法，并在原联邦德国首先投入生产，使用双层套管喷嘴并通以气态碳氢化合物进行冷却。以后在欧洲其他国家以及美国和日本都得到了一定的发展。

1975年法国研发了顶底复吹转炉，综合了LD和OBM的优点，1977年在世界年会上发表。

氧气转炉炼钢自20世纪50年代初问世以来，在世界各国得到了广泛的应用，技术不断进步，设备不断改进，工艺不断完善，从顶吹到底吹并发展到复合吹炼。在短短的几十年里，氧气转炉炼钢的飞速发展，使炼钢生产进入了一个崭新的阶段，钢的产量不断增加，钢的成本不断下降。虽然近年来电炉钢发展很快，但从世界主要产钢国家来看，氧气转炉炼钢法仍是目前国内外主要的炼钢方法，占据着主要份额。转炉还有铁源来自矿石、钢质纯净等优势，在生产汽车板等钢铁工业顶级产品方面尚不能为其他工艺所代替。图1-2所示为全世界不同产钢工艺粗钢产量所占的比例。可见目前世界上每年约有60%的钢是用转炉（碱性氧气转炉）生产的。

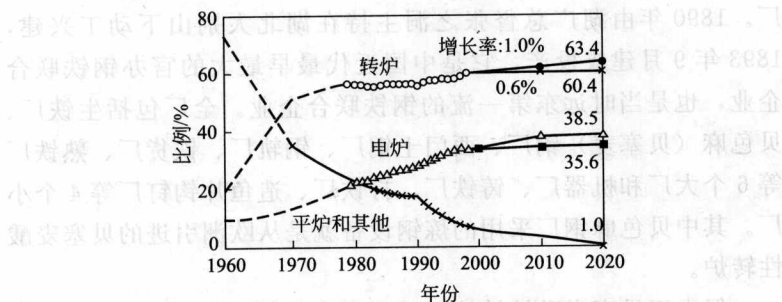


图 1-2 全世界不同产钢工艺粗钢产量所占的比例

回顾氧气转炉炼钢的发展，可分为下列三个时期。

① 转炉大型化时期（1950～1970年）。以转炉大型化技术为核心，逐步完善了转炉炼钢工艺与设备。先后开发出大型化转

炉设计制造技术、OG 法除尘与煤气回收技术、计算机静态与副枪动态控制技术、镁碳砖综合砌炉与喷补挂渣等护炉工艺技术。

② 转炉复合吹炼时期 (1970~1990 年)。这一时期, 由于连铸技术的迅速发展, 出现了全连铸的炼钢车间。对转炉炼钢的稳定性和终点控制的准确性提出了更高的要求。为了改善转炉吹炼后期钢-渣反应远离平衡, 实现平稳吹炼的目标, 综合顶吹、底吹转炉的优点, 研究开发出各种顶底复合吹炼工艺技术, 在世界上迅速推广。

③ 转炉综合优化时期 (1990 年以后)。这一时期, 社会对纯净钢的生产需求日益增加。迫切需要建立起一种全新的、能大规模廉价生产纯净钢的生产体制。围绕纯净钢生产, 研究开发出铁水“三脱”预处理、高效转炉生产、全自动吹炼控制与溅渣护炉等重大新工艺技术。降低了生产成本、大幅度提高了生产效率。

1.2 中国转炉炼钢的发展

中国转炉炼钢的出现归功于晚清张之洞创办的湖北汉阳铁厂。1890 年由湖广总督张之洞主持在湖北大别山下动工兴建, 1893 年 9 月建成投产, 它是中国近代最早最大的官办钢铁联合企业, 也是当时远东第一流的钢铁联合企业。全厂包括生铁厂、贝色麻 (贝塞麦) 钢厂、西门子钢厂、钢轨厂、铁货厂、熟铁厂等 6 个大厂和机器厂、铸铁厂、打铁厂、造鱼片钩钉厂等 4 个小厂。其中贝色麻钢厂采用的炼钢设备就是从欧洲引进的贝塞麦酸性转炉。

但由于贝塞麦酸性转炉不适于冶炼大冶铁矿提供的含磷较高的矿砂, 所炼钢材不符合铁路钢轨的要求, 钢铁生产陷入困境。1896 年 4 月该厂改为官督商办企业。为解决材料和设备问题, 1898 年开发江西萍乡煤矿, 用马丁炉改造了全厂冶炼设备, 以制造钢轨。由于此项改造耗资巨大, 1898 年向德国资本家求贷,