

*D*irect Reduction of Cold-bonded Pellets

冷固结球团 直接还原

邱冠周 姜涛 徐经沧 蔡汝卓 著



中南大学出版社
Central South University Press

76.2128

2737

Direct Reduction of Cold-bonded Pellets

冷固结球团直接还原

邱冠周 姜 涛 著
徐经沧 蔡汝真

中南大学出版社

2001·长沙

图书在版编目 (CIP) 数据

冷固结球团直接还原/邱冠周等著. —长沙: 中南大学出版社, 2001. 4

ISBN 7-81061-418-5

I. 冷… II. 邱… III. 冷凝固球团矿—还原铁—研究 IV. TF591

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 070229 号

冷固结球团直接还原

邱冠周 姜涛 著
徐经沧 蔡汝卓

-
- 责任编辑 肖梓高
 出版发行 中南大学出版社
社址: 长沙市麓山南路 邮编: 410083
发行科电话: 0731-8876770 传真: 0731-8829482
电子邮件: csucbs @ public.cs.hn.cn
- 经 销 湖南省新华书店
 印 装 湖南省地质测绘印刷厂
-

- 开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 224 千字
 版次 2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷
 印数 0001 1500
 书号 ISBN 7-81061-418-5/TD·003
 定价 30.00 元
-

图书出现印装问题, 请与经销商调换

序

邱冠周、姜涛、徐经沧、蔡汝卓合著的《冷固结球团直接还原》一书，是作者们长期辛勤工作的成果。这是一部在理论上形成了系统观点，在实践中广泛总结已有经验形成了完整的技术工艺流程，对各项工艺参数进行了深入研究并经过工业生产验证取得成功的学术专著。书中反映了一系列创新性的研究成果，理论与实践紧密结合并且针对我国资源特点，符合实际需要。

废旧钢材的回收利用，已经是钢铁工业的重要组成部分，在整个钢产量中所占的比例越来越大。通常采用电炉炼废旧钢时，需要加入适量的直接还原铁，因此直接还原铁的生产及工艺随之受到重视。铁精矿球团-直接还原是生产直接还原铁的重要工艺，同时也可以提高铁矿山的附加值和经济效益。这在我国的具体情况下，也具有重要意义和价值。这部书的出版，丰富了铁矿直接还原和铁矿造块的学科知识，并将对发展相关的工程技术产生重要的推进作用。

书中有不少的创新性内容，主要包括以下几点：

球团粘结剂的分子设计与制备，创造性地将选矿冶金药剂分子设计的研究成果，应用于粘结剂分子设计，指导实用药剂的开发，并取得了成功。这可能是我们见到的关于矿粉造块、球团粘结剂的比较系统、全面的研究成果。

在粘结剂与铁矿表面作用机理、球团强度的界面能模型以及成球运动学研究上，运用并结合实际扩展了DLVO理论的内容，深入讨论颗粒间各种力的作用和影响，从而指导造球过程。这既是冷固结球团直接还原的技术关键之一，也是重要的基础理论知

识，具有科学和工程技术价值与意义。

关于铁矿球团冷固结的研究，包括造球工艺参数对强度的影响等，在此基础上确定了工艺方案、粘结剂的反应行为，球团冷态强度机理，都是系统的研究结果，揭示出了许多过去不大清楚的现象和过程。

冷固结球团的直接还原过程研究，包括系统的热力学、动力学实验测试结果与理论分析，特别是窑内还原速度和还原过程中球团强度的变化，是这一工艺的核心技术与关键的基础理论支撑，科学地阐明了新工艺的理论与实践依据，并指导了还原工艺制度的建立。

关于冷固结球团直接还原技术对不同矿物的适应性，书中介绍了该工艺应用于鲁中铁矿、钒钛磁铁矿、含锡锌砷铁矿、氧化铝厂赤泥及贫铁矿等原料的研究与工业实践结果，具有重要的参考价值。

本书还介绍了直接还原铁的电炉炼钢效果以及回转窑废气治理与余热利用，内容涉及工业生产工艺技术的各个部分。

综上所述，这是一部包括多项重要创新性成果、理论系统、实验研究和生产实践内容丰富的学术专著，反映了这一领域的最新成就与水平，是目前见到的这一领域更为系统、深入和内容先进的专著。此书的出版对铁矿球团与直接还原的进一步研究开发和生产实践将是一个推动和贡献。

王治佐 2001年3月

于北京有色金属研究总院

前 言

直接还原铁 (DRI) 成分稳定而纯净, 是电炉冶炼优质钢、特殊钢的理想原料和不可缺少的稀释剂。随着以电炉炼钢为中心的钢铁生产短流程的蓬勃兴起, 以及废钢资源的日益短缺, 世界直接还原铁生产的发展极为迅速, 已成为当今钢铁工业发展的热点之一。

目前, 我国直接还原铁生产的发展与世界水平相比仍有很大差距。就其实际产量而言, 尚不足国内电炉炼钢原料总需求量的 1%。如按国际电炉钢生产所用直接还原铁的平均水平估算, 每年缺口就高达数百万吨。随着我国电炉钢生产的发展和产品结构的优化, 以及对钢材质量要求的提高, 供求矛盾还将更为突出。因此, 大力研究开发符合我国国情和资源特点的直接还原新工艺、新技术、新设备, 以加速直接还原铁生产的发展, 具有十分重要的战略意义。

“铁精矿冷固结球团煤基回转窑直接还原新工艺”是作者及其所在集体, 近年来与鲁中冶金矿山公司等单位合作共同研究开发的一项重要科技成果。它取消了传统的“二步法”工艺中的球团高温氧化焙烧作业, 只经一步高温还原即得直接还原铁, 具有流程短、投资省、能耗小、成本低等特点, 是回转窑直接还原工艺技术的重大突破, 国内外尚无先例。该工艺从实验室小型试验、扩大试验、中间试验、工业试验直至鲁中冶金矿山公司年产五万吨直接还原铁厂建成投产, 前后历时八年, 其间每一项创新、每一步进展都是集体智慧和共同劳动的结晶。

本书在多年科学研究和生产实践的基础之上, 较全面、系统

地总结和介绍了新工艺的理论研究成果、工艺特点、技术关键、流程布局、操作要领及其推广应用进展。作者的初衷是希望将此书写成一本有深度、具新意、理论与实践相结合的专著，以便对我国直接还原铁生产的发展起一点添砖加瓦的作用。

全书共七章，分别论述了国内外直接还原铁生产的历史、现状与前景；新工艺的技术概况、原料准备、球团制备、还原机理、工业应用状况、窑尾废气治理与余热利用，及其在复杂的、难处理铁矿资源综合利用领域的应用研究成果；并且针对新工艺的特点和技术关键，还着重对复合粘结剂的性能和成球特性、润磨工艺的作用机制，冷固结球团的固结机理、还原行为及其适宜的回转窑热工制度等问题，进行了较深入的理论探讨。

中国科学院和中国工程院院士、中国工程院副院长王淀佐教授，百忙抽暇审阅本书并为之作序。朱德庆、黄柱成、范晓慧副教授，在本书的写作过程中，协助作者做了多方面的、大量的卓有成效的工作。傅守澄、张国祥、庄剑鸣、傅菊英等教授，参加了书稿的初审，提出了不少有益的建议。我校烧结球团研究所的老师们为本书的写作出版给予了大力支持和帮助。作者在此表示诚挚的谢意。

鉴于作者的水平和时间所限，书中错误和不妥之处，在所难免，恳请读者指正。

作 者

2001年4月于长沙

目 录

1 概 述	(1)
1.1 世界钢铁工业发展现状与前景.....	(1)
1.2 世界铁矿直接还原技术现状与发展趋势.....	(3)
1.3 我国直接还原技术发展现状与前景 ^[5,27~30]	(11)
参考文献	(19)
2 冷固结球团回转窑直接还原新工艺	(22)
2.1 新工艺现状及前景.....	(22)
2.2 新工艺流程及设备.....	(24)
2.3 新工艺的特点.....	(24)
2.4 新工艺与其他同类工艺的比较.....	(31)
参考文献	(32)
3 原料准备	(34)
3.1 直接还原对原料的技术要求.....	(34)
3.2 高品位铁精矿的分选与脱水.....	(42)
3.3 粘结剂的性能与制备.....	(49)
3.4 还原煤的选择与准备.....	(63)
3.5 脱硫剂的选择 ^[11]	(65)
参考文献	(66)
4 冷固结球团制备	(68)
4.1 配料.....	(68)

4.2	混匀与润磨	(75)
4.3	造球	(88)
4.4	球团冷固结	(139)
	参考文献	(172)
5	冷固结球团直接还原	(176)
5.1	直接还原热力学	(176)
5.2	直接还原动力学	(184)
5.3	冷固结球团直接还原行为	(193)
5.4	直接还原的影响因素	(203)
5.5	生产型回转窑热工制度	(211)
	参考文献	(217)
6	冷固结球团直接还原新工艺的应用	(219)
6.1	铁精矿直接还原	(219)
6.2	钒钛磁铁精矿直接还原	(232)
6.3	高锡锌砷铁精矿直接还原	(243)
6.4	氧化铝厂赤泥直接还原	(245)
6.5	低品位褐铁矿直接还原	(249)
7	回转窑废气治理及余热利用	(251)
7.1	回转窑废气系统	(251)
7.2	窑尾废气除尘与净化	(253)
7.3	余热利用与节能	(275)
	参考文献	(280)

1 概 述

1.1 世界钢铁工业发展现状与前景

在今后相当长的时期内，钢铁工业仍然是整个社会赖以生存和发展的重要物质基础之一^[1]。目前，钢铁工业规模在不断扩大，钢铁生产技术处于不断发展和完善之中，钢铁生产工艺流程也在不断向紧凑化、高效化、连续化、高洁净化及对环境友好的方向发展。

现代钢铁工业的发展历经三个阶段，在此期间钢铁生产技术产生了三次革命性的飞跃（见表 1-1）。尤其在 20 世纪和 21 世纪之交，钢铁工业发展方向更加明朗，钢产量仍在继续增加。1970～1990 年的 20 年内，全世界粗钢产量由 5.95 亿吨增加到 7.7 亿吨，在新增的钢产量中，电炉钢占 75%；到 20 世纪 80 年代，西方国家转炉钢产量下降，而电炉钢却增长了 31.9%。据国际 Dastur 公司预测^[2]，2002 年世界粗钢产量将为 7.98 亿吨（与 1997 年基本相同），2005 年粗钢产量将为 8.39 亿吨，2010 年粗钢产量为 8.32 亿吨；电炉钢产量 1997 年占 33%，2002 年占 38%，2005 年占 40%，2010 年占 43%。电炉短流程与传统的高炉-转炉长流程相比，具有投资省、能耗低、运输量少、劳动生产率高以及有利于环境保护等特点，集中体现在生产成本大大低于钢铁联合企业。以典型的生产线材的美国电炉钢厂与高炉联合企业相比，前者生产成本大约比后者低 28%，这就充分说明了电炉短流程具有强大

的生命力和市场竞争力,是 21 世纪世界钢铁工业实现结构优化的主要发展方向^[3~6]。在西方将电炉钢厂称之为经济钢厂 (market mill)。

表 1-1 世界钢铁工业技术发展一览表

发展阶段	时 间	工 艺	代 表 国 家
起步阶段	1865 年前后	空气侧吹转炉炼钢法 (1865 年英国贝塞麦) 平炉炼钢法 (1863 年英国西门子、法国马丁)	英国 中国: 公元前 2 世纪用类似侧吹转炉炼钢 公元 5 世纪用类似西门子炉炼钢
第一次革命	19 世纪末至 20 世纪 50 年代	焦炉、烧结机→高炉→平炉→铸锭→初轧开坯→成品轧机	德国 (最早)、美国、前苏联 (稍后)
第二次革命	20 世纪 50 年代至 70 年代 * 奥地利发明纯氧顶吹转炉炼钢法 平炉: 8~10h 一炉钢 氧气转炉: 40min 一炉钢 * 与此同时,前苏联、瑞士发明了连续铸钢法	大焦炉、烧结机→大高炉→大转炉→连铸机→连轧机	日本、西德、西欧未及时抓住这一机遇的国家是美国、前苏联、中国
第三次革命 (电炉短流程)	20 世纪 80 年代至 21 世纪	(废钢+DRI)→电炉→连铸→连轧	美国: 电炉钢比 1997 年为 46.4%, 2000 年预计为 50% 欧洲: 电炉钢比 1997 年为 42.3%, 2010 年预计为 50% 其他: 1997 年世界电炉钢比 33.7%、预计 21 世纪初可达 40% 以上

1.2 世界铁矿直接还原技术现状与发展趋势

1.2.1 世界直接还原铁生产能力的发展

电炉炼钢短流程以废钢或直接还原铁 (DRI) 为炉料。由于连铸连轧技术的推广以及废钢中有害元素的日益积累, 废钢数量和质量已满足不了电炉炼钢的要求。直接还原铁因质地纯净、成分稳定, 是一种替代废钢、冶炼优质钢和特殊钢的理想炉料。因此, 自 20 世纪 50 年代以来, 直接还原铁生产发展迅速, 产量稳步上升 (见图 1-1), 由 1970 年的 79 万吨增加到 1998 年的 3709 万吨。

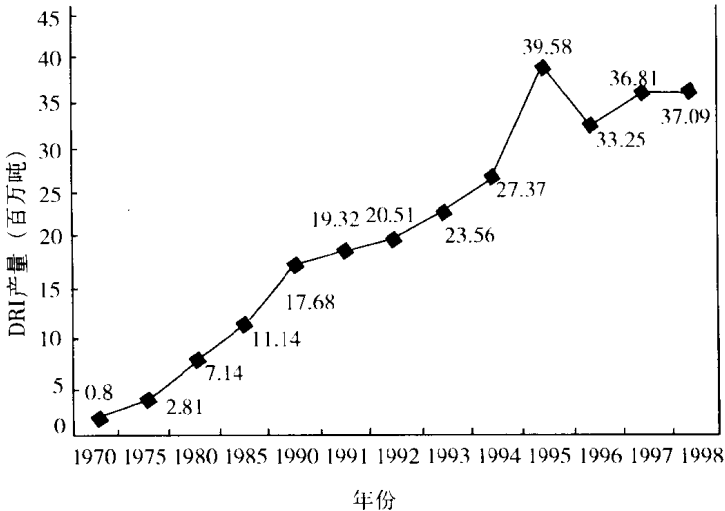


图 1-1 世界直接还原铁产量 (英国: 金属通报)

21 世纪直接还原铁生产仍将是世界钢铁工业发展的热点之一。据日本神户制钢预测, 到 2005 年和 2010 年, 直接还原铁产

量将分别达 7700 万吨和 10700 万吨。而据国际 Dastur 公司预测^[2], DRI/HBI 产量将从 2002 年的 6200 万吨增加到 2015 年的 1.02 亿吨, 前景甚为可观。1997 年全世界 DRI/HBI 生产能力为 4600 万吨, 预计将会从 2002 年的 5800 万吨增加到 2005 年的 6200 万吨, 而 DRI 短缺将从 2002 年的 400 万吨增加到 2005 年的 2000 万吨, 2010 年缺口数量为 4000 万吨。

目前, 世界直接还原铁产量超过 100 万吨的国家有 14 个(见表 1-2)。以气基竖炉法为主, 主要集中在墨西哥、委内瑞拉、伊朗等天然气资源丰富的国家。而作为中国的近邻, 印度年产直接还原铁达 524 万吨, 且以煤基回转窑法为主生产, 很值得我国借鉴。

表 1-2 1998 年直接还原铁主要生产国产量一览表

国家	墨西哥	印度	委内瑞拉	伊朗	沙特	美国	印尼	埃及
产量 (百万吨)	5.68	5.24	5.06	3.69	2.27	1.74	1.64	1.61
国家	俄国	阿根廷	加拿大	特立尼达和多巴哥		南非	利比亚	
产量 (百万吨)	1.55	1.54	1.24	1.14		1.05	1.01	

1.2.2 世界直接还原技术现状及发展前景^[7~26]

1.2.2.1 直接还原技术发展历程

最早获得工业应用的直接还原工艺为 Hoggans 法。它是 20 世纪最早在工业上成功地进行直接还原的工艺。Hoggans 法用固体炭在隧道窑内进行还原, 由于成本太高, 国外已不再将此法用于铁矿还原, 仅用于生产粉末冶金铁粉。美国 Madaras 研究了气体还原剂在罐式反应器中的还原, 1957 年墨西哥 HYL 公司将此法用于工业生产 (HYL-1)。

Wiberg-Soderfors 工艺采用煤为还原剂, 在竖式炉内发生煤

气，在另一座竖炉内还原铁矿石，该工艺为逆流竖炉还原工艺的先导。

Krupp-Renn 回转窑法早在 20 世纪 30 年代用于处理低品位硅质铁矿，还原产品磁选分离，该工艺是现代回转窑法的前身。

为了直接利用铁矿粉和精矿进行还原，取消造块工艺，扩大工艺的适应性，早在 20 世纪 50 年代就进行了流化床法直接还原的试验研究。1971 年美国钢铁公司在 Venezuela FIOR 建成了年产 100 万吨 HBI（热压块铁）的流化床法工厂。

20 世纪 60 年代在美国进行了环转炉还原焙烧半工业试验，现已完成单台设备年产 45 万吨 DRI 的初步设计。

从直接还原的发展看，无论是直接还原的实际产量还是生产能力，气基直接还原法一直占主导地位，约 90%；煤基直接还原法占 10% 左右。气基直接还原法主要有：Midrex 法、HYL 法、FIOR 法；煤基直接还原法主要有：回转窑法（包括 SL/RN 法、Krupp 法、CODIR 法、DRC 法、ACCAR 法）、竖炉法。上述各种方法都已进入技术成熟、稳步发展的阶段。还有正在开发的煤基 Inmetco 法、Fastmet 法和 Comet 法，气基 Finmet 法和碳化铁工艺也已进入了工业试验阶段。

（1）气基竖炉法

SIDOR 公司提出 AREX™ 工艺，以热态 DRI 做催化剂，在竖炉内进行天然气和循环炉顶气的自重整（autoreforming）以制备所需的还原气。重整反应为吸热反应，所需热量由预热空气、富氧空气氧化还原气中的过量 CH_4 来提供，现已投入工业应用，简化了 Midrex 法工艺流程，将还原竖炉和重整炉合二为一，节省了大量投资；循环三分之一炉顶气且脱除其中 CO_2 ，明显降低能耗，并能生产高碳直接还原铁（含 C 5.5%），金属化率大于 90%，其中 90% 的碳以 Fe_3C 形式存在，适于电炉炼钢、节省燃料，提高氧

气利用率。在电价相对低廉的地区，采用等离子加热器加热还原气很有吸引力。

(2) 气基反应罐法

HYL-Ⅲ工艺中直接还原铁含碳 1.2%~2.4%，为了使其含碳达 2.4%~4.0%，开发出了 Hytemp 工艺。直接还原铁的碳化反应在还原段和冷却段的反应罐内发生，直接还原铁中的碳来自 CH_4 、 CO 或 $\text{CH}_4 + \text{CO}$ ，以 Fe_3C 形态存在。在还原气进入反应罐前增加了一个燃烧室，天然气部分燃烧，提供附加能量，改善气体的渗碳效果。采用氧气助燃以克服还原气中惰性气体的累积。

高碳直接还原铁具有足够的抗氧化能力，与生产 HBI 相比，生产成本有所下降，可供出口；电炉炼钢时，可提高电炉生产率，降低电耗。与采用 HMS1[®] 废钢为原料相比，使用 60% 的 Hytemp 直接还原铁（含碳 4%）配加 40% 废钢炼钢，每吨钢水节电 115 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，增产 22%。

(3) 流化床法

①气基流化床法。FIOR 直接还原厂的气基竖炉法已有 20 多年的生产经验，但存在能耗高、难操作等缺点，工艺改进工作始于 1992 年 11 月。委内瑞拉 FIOR 公司与奥地利林茨的奥钢联合合作，开发新型气基流化床法（Finmet 法），以天然气还原铁矿粉，然后生产 HBI，工艺改进内容如下：

⑴ 新 FIOR 厂采用最后一个反应器的顶部废气的显热预热矿石，不再燃烧天然气预热，降低能耗，减少投资。

⑵ 重整气和循环气中 CO_2 的脱除，使还原气中 CO 含量升高，改善工艺过程热平衡，HBI 中含碳升高 3%，生产高碳 HBI。

⑶ 奥钢联设计的旋流沉降器堵塞程度比老 FIOR 厂轻，带入旋流沉降器的粉尘减少 80% 左右，粉尘损失少，可循环利用返料，生产容易操作，产量升高，矿石单耗下降。

〈4〉改进了反应器间固体物料的输送，这曾是老厂的一个难题。

〈5〉压团机采用液化石墨润滑，降低成本，减少损失，延长压模使用寿命。

新 FIOR 厂于 1994 年 5 月完成初步设计，年产 100 万吨 HBI。现已投入工业生产，可直接使用粉矿，无需造块，每吨 HBI 的生产成本仅 50 美元。

②煤基流化床法。由于受天然气资源限制，以非焦煤为还原剂的直接还原工艺备受欢迎，Lurgi 公司于 1992 年成功开发出循环流化床煤基直接还原工艺 (Circofer 法)。以矿粉为原料，煤粉为还原剂和发热剂，生产出低成本直接还原铁，采用过量碳及气化区和还原区分开的技术诀窍，攻克了物料粘结、结瘤和再氧化的难题。该方法的特点是：直接使用廉价粉矿和煤；无需造块设备；闭路能量循环，不会产生过剩能量，一次能耗低；单位容积产量高、投资低；产品质量高、废弃物（气）少；采用经生产检验的 Lurgi 专利技术和畅销设备。该方法对原料有一定的要求，矿石粒度为 1~0.3mm，对 -0.08mm 粒级的铁精矿还原正在研究之中；还原煤的软化温度应大于或等于 1050℃，粒度小于 10mm，其他指标基本与回转窑法要求相同。

产品质量达到以下指标：TFe 90.4%，MFe 83.2%， η_{Fe} 92.03%，C 2.0%，S 0.025%，脉石 4.4%。

Circofer 法生产的 HBI 是除气基还原法之外，惟一已投入工业生产的、且在全世界范围内进行贸易的直接还原铁。HBI 的生产成本为 80.8 美元/吨，现已完成年产 15 万吨 HBI 工厂的初步设计。

（4）煤基回转窑法

①印度 SL/RN 法。印度 Prakash 工业有限公司与 Lurgi 公司

签订合同,兴建了一年产 15 万吨直接还原铁的 SL/RN 直接还原厂, Lurgi 公司提供 SL/RN 法初步设计和部分施工设计,负责建厂和投产调试。总的工程建设期少于两年,1993 年 10 月 26 日热负荷试车,10 月 30 日投料入炉,三周即达额定生产能力,一个月后超过设计能力 10%。

该方法可适用一系列非焦煤,煤质要求: M_t 9%, V_{daf} 29.3%, A_d 19.7%, FC_{ad} 51%; 铁矿石成分: TFe 66.5%, S 0.01%, P 0.029%, SiO_2 1.04%, Al_2O_3 1.3%; 白云石成分: $CaCO_3$ 49.9%, $MgCO_3$ 41.2%, SiO_2 2.2%, 其他 6.7%。

露天矿场堆放铁矿、煤、白云石,煤粉堆在料棚内。铁矿筛分;煤两段破碎、筛分;粗粒煤与矿一并加入,细粒煤从窑头喷入。回转窑给料通过仓下配料皮带机定量给人。

回转窑规格 $\varnothing 4.8m \times 80m$, 倾斜度 2.5%, 4 个支撑台。沿窑长方向通过 8 台二次风机鼓风,每台风机单独可调,附加空气通过卸料端中央烧嘴补加,窑头喷煤由两种粒度组成,通过风力输送给人。也可从窑头喷入粉矿 (1~5mm), 窑内温度可用固定式和移动式热电偶测定。

热 DRI 在 $\varnothing 3.6m \times 50m$ 回转式冷却筒中间接冷却。筒式磁选机一次分选,然后再分级(粗、中、细),对细粒级进行两次连续磁选,以确保产品质量。

废气经二次燃烧去掉可燃物后,送入余热锅炉生产蒸气,进行发电(每台 7500kW),可供全厂生产和办公用电。

该厂自 1993 年 11 月 20 日至 1994 年 2 月 18 日的平均生产指标为:直接还原铁产量为 534t/d, η_{Fe} 91.6%, C/Fe 0.47, S < 0.024%, 作业率 97.6%, 磁性粉率 20%, 蒸气压力 4154325Pa (41atm), 温度 400°C, 产气量 40~44t/h, 发电量 8800kW。

同样规模的第二座回转窑投入生产后,全厂直接还原铁产量