

白皮书06 · Cameroon Steel · 中文摘要版

喀麦隆低碳钢铁： 碳强度有望降至全球平均的 三分之一左右

据我们估算，接入喀麦隆以水电为主电网的电弧炉钢厂，范围一和范围二（直接排放和外购电力）约为每吨钢0.3吨二氧化碳，计入进口含铁原料后约为0.6吨。这一估算优势一经计量和核查，碳边境调节机制（CBAM）可将其转化为相对矿石基钢材的竞争优势，而中部非洲的铁矿和水电资源则为长期发展绿色铁提供了选项。

文件信息

编号	CS-WP-06
版本日期	2026年10月10日
状态	第一版（摘要版）
密级	公开
编制单位	Cameroon Steel
系列	Cameroon Steel公开白皮书系列，第06份（共10份）
范围	碳核算、电网电力、示意性碳足迹、碳边境调节机制、绿色铁、气候适应、循环利用、融资与标准，以及位于克里比港综合工业区姆博罗（Mboro）的电弧炉钢厂的脱碳路径
项目数据	Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算，2026年10月10日版）：分期建设的电弧炉长材钢厂，设计产能100万吨/年；一期炼钢车间生产钢坯，用于线材、钢筋或商品销售（名义产能30万吨/年，预期持续产量每年27万至30万吨）
证据截止日期	2026年10月10日
版本说明	中文摘要版：完整翻译执行摘要，其余各章为摘要
资料来源	[S01]等来源标记指全文版附录C所列资料
数据	每张图表背后的数据以JSON文件形式随网页版发布，并列于全文版附录D
语言	英文（全文）、法文（全文）、中文（摘要）
利益声明	本文由Cameroon Steel发布，该公司正在克里比筹建一座钢铁厂。本文旨在为公共讨论提供参考；其分析独立于任何商业要约，所有数据均注明来源或标明其状态。

阅读说明。 每个数字均注明单位、年份和来源标记（如[S01]）。图表带有性质标签：来源（取自己发布资料）、推算（基于注明来源的数据或假设的计算，见全文版附录A）、假设（注明区间的规划值）或示意（表示数量级或机制，并非预测）。碳强度单位为吨二氧化碳/吨；除另有说明外，RC-1数值按每吨成品计。生成图像均标注为“示意图”，并非项目照片。

本文不是什么。 本文提供证据和示意性计算。项目数字为Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）中的规划值，属于估算，并非实测结果、保证或承诺。碳价、规则和标准以2026年10月10日或之前公布的内容为准，今后将有变化。

全文版本。 本中文摘要版完整翻译了执行摘要，并概述其余各章的结论、关键数字和主要图表；完整内容见英文版和法文版。

目录

执行摘要：低碳起点，唯有计量才能转化为优势	4
第1章·钢铁与气候：工艺路线决定一切	9
第2章·钢铁碳核算：每次都要说明核算边界	10
第3章·电网排放因子：喀麦隆水电是电弧炉钢厂最大的优势	11
第4章·示意性碳足迹：范围一和范围二约0.3吨，计入进口含铁原料约0.6吨	12
第5章·碳边境调节措施：经核查的低碳强度成为相对矿石基钢材的价格优势	13
第6章·绿色铁：中部非洲的长期选项，取决于矿石、电力和天然气	14
第7章·气候风险与适应：高地厂址、湿热升温的气候与受侵蚀的港口海岸	15
第8章·循环利用：废钢是最清洁的原料，钢渣和粉尘是资源	16
第9章·融资与标准：贷款方、买方和认证机构都会要求提供证据	17
第10章·脱碳路径：已知措施可降低约40%，绿色铁可进一步降低	18
第11章·证据缺口：尚属未知的内容及其解决方式	19
附录A·术语表	20

执行摘要：低碳起点， 唯有计量才能转化为优势

位于姆博罗（Mboro）、由喀麦隆以水电为主的电网供电的电弧炉钢厂，生产钢坯、线材和钢筋的碳强度有望降至全球平均水平的三分之一左右。我们对参考配置（RC-1）一期的示意性估算为：范围一和范围二（厂内直接排放和外购电力）约为每吨产品0.32吨二氧化碳，计入进口直接还原铁（DRI）的排放后约为0.58吨，而2024年全球平均水平为1.92吨。这些是估算值，而非实测值。这一优势真实存在，但有前提条件：它取决于稳定可靠的低碳电力、电弧炉所熔炼含铁原料的碳含量，以及足以接受核查的计量水平。以欧盟机制为首的碳边境调节措施（欧盟机制自2026年1月1日起进入正式实施阶段）正将经核查的低碳强度转化为相对矿石基钢材的价格优势；中部非洲的铁矿和水电资源则为喀麦隆提供了长期自行生产低碳铁的选项。

0.32 吨/吨

RC-1一期每吨产品范围一+二排放（推算，示意）

0.58 吨/吨

计入进口直接还原铁/热压块铁上游排放（推算，示意）

1.92 吨/吨

全球平均，所有工艺，2024年数据（世界钢铁协会）

226 克/千瓦时

喀麦隆电网平均值，2024年（Ember）

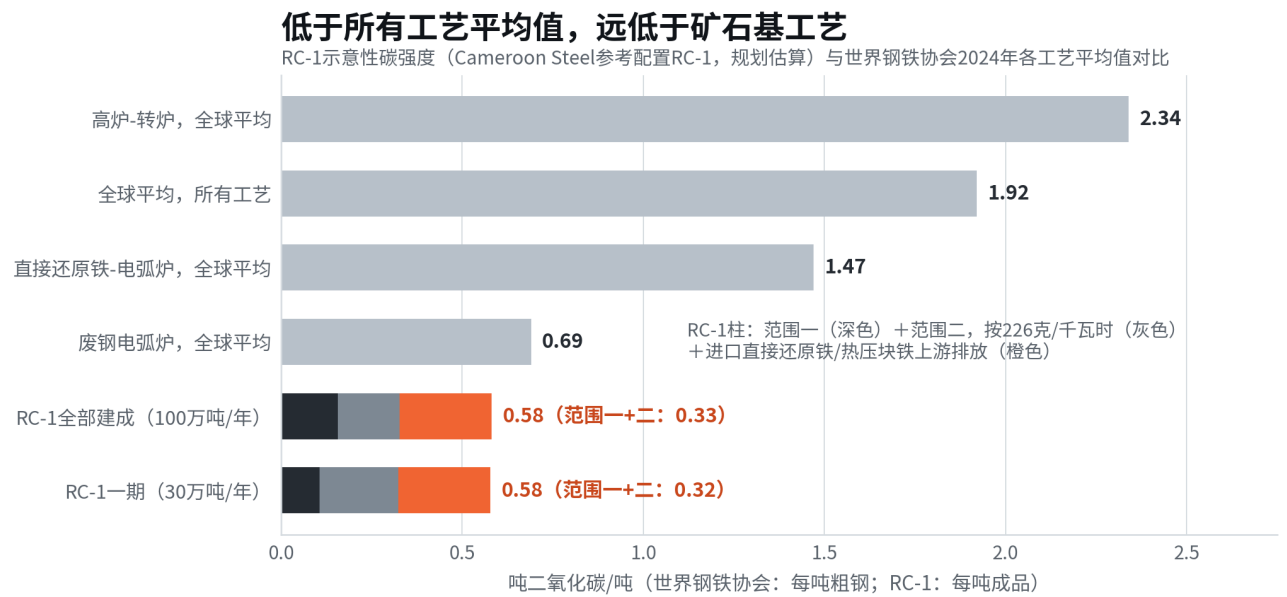
82 欧元/吨CO₂

欧盟碳边境调节机制证书价格，2026年第三季度（82.32欧元）

十二项主要结论

- 01** 决定钢铁碳强度的是工艺路线，而非边际上的努力。钢铁约占全球温室气体排放的7%至8%[S02]。根据世界钢铁协会2024年数据，高炉-转炉工艺每吨粗钢排放2.34吨二氧化碳，气基直接还原加电弧炉为1.47吨，废钢电弧炉为0.69吨，全球平均为1.92吨[S01]。非洲89%的粗钢已由电弧炉生产[S03]。
- 02** 喀麦隆电网的碳强度约为全球平均的一半。2024年喀麦隆电力平均碳强度约为226克二氧化碳当量/千瓦时，全球为471克，南非为717克[S48]。按Ember数据，2024年水电约占发电量的72%；按监管机构数据，420兆瓦的纳赫蒂加尔（Nachtigal）水电站全面投运后，2025年这一比例约为90%[S49][S50]，两套数据的覆盖范围不同。将2024年化石发电排放率应用于2025年电源结构，平均值约为74至96克/千瓦时（推算，指示性）。因此，226克/千瓦时相对于平均值是保守的，但相对于边际排放因子并不保守：在纳赫蒂加尔送出线路和南部电网完成加强之前，克里比的新增负荷可能由约770克/千瓦时的燃气或燃油电厂在边际上供电，在火电处于边际的时段每吨最多可增加约0.5吨（推算）。
- 03** 一期示意性碳足迹为范围一和范围二每年约9.7万吨二氧化碳。按30万吨/年名义产能计，RC-1一期厂内直接排放（范围一）约3.19万吨，外购电网电力在电厂产生的排放（范围二）约6.53万吨。模型未计入的少量排放源（移动设备柴油、液化石油气和开关设备六氟化硫）将另增约0.3万至0.7万吨（假设）。进口直接还原铁或热压块铁（HBI）另带来约7.62万吨上游排放。按预期持续产量每年27万至30万吨计，年排放总量最多低10%，碳强度不变。按100万吨/年设计产能计，范围一+二约为32.8万吨，计入上游含铁原料后约为58.2万吨；碳强度基本

- 保持在每吨0.33吨和0.58吨左右。若电弧炉电耗取含30%直接还原铁炉料的规划上限值约490千瓦时/吨而非450千瓦时/吨，各项碳强度约增加0.01吨（据RC-1参考配置推算）。
- 04 电弧炉所熔炼的含铁原料比任何其他单项选择都更重要。**将炉料中进口直接还原铁的比例从30%提高到50%，每吨约增加0.18吨；降至20%则约减少0.09吨。该直接还原铁的上游强度（每吨直接还原铁0.5至0.9吨）使结果上下变动约0.07吨，电网排放因子（200至300克/千瓦时）的影响为-0.03至+0.07吨。逐项考察时，一期碳强度保持在每吨约0.49至0.75吨之间；各项同时取极值时，区间约为0.42至0.95吨（推算）。
- 05 优势既来自电弧炉，也来自电网。**同一炼钢车间若接入全球平均电网，计入上游含铁原料后每吨约排放0.81吨，接入南非电网则约为1.05吨。按此全口径碳足迹，当电网排放因子约为340克/千瓦时，它将失去相对于废钢电弧炉平均水平的领先优势（推算）。因此，签约获得稳定的低碳电力既是能源决策，也是碳决策。
- 06 同一工厂可以如实报告七个不同的数字。**根据核算边界不同，同一吨一期产品的碳强度约为0.11吨（仅范围一）、0.11吨（范围一+二，按市场法计入水电供电合同）、0.20吨（范围一+二，按2025年校核值96克/千瓦时）、0.32吨（范围一+二，按2024年电网平均值）、0.36吨（欧盟碳边境调节机制口径，对钢铁计入直接排放和前体排放，但不计外购电力）、0.54吨（按ISO 14404和世界钢铁协会口径，每吨粗钢）或0.58吨（同一口径，每吨成品）。可信度取决于每次都说明核算边界，并接受第三方核查。



推算 图ES.1 RC-1钢厂示意性碳强度与世界钢铁协会各工艺平均值对比。RC-1数值按每吨成品计，比基准值所用的每吨粗钢口径高约6%，因此该比较是保守的。RC-1柱分为范围一（深色）、按226克/千瓦时计的范围二（灰色）以及进口直接还原铁/热压块铁的上游排放（橙色）。

资料来源：世界钢铁协会，Sustainability Indicators 2025（2024年数据）[S01]；Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算），2026年10月10日版[S90]；WP06模型（全文版附录A）。

- 07 碳边境调节措施使经核查的低碳强度相对矿石基钢材成为竞争资产，其计价对象是RC-1的进口铁，而非其电网。**欧盟碳边境调节机制（CBAM）覆盖铁矿球团、直接还原铁、钢坯、钢筋和线材[S27]。对钢铁而言，该机制计入直接排放以及直接还原铁等前体所含的直接排放，但不计外购电力，因此喀麦隆的低碳电网在该机制下不带来任何抵扣[S27]。2026年第三季度其证书价格为每吨二氧化碳82.32欧元[S26]；保护欧盟生产商的免费配额将从2026年基准值的97.5%降至2034年的零[S28]。举例而言，按2026年价格不变计，并以热轧卷基准值作为长材的近似，一吨销往欧盟的RC-1一期产品（按该机制口径为0.36吨，其中约70%来自进口直接还原铁）2026年约承担24欧元，2034年升至30欧元；到2034年，气基直接还原铁-电弧炉钢材约承担82至121欧元，高

炉钢材约99至193欧元。全废钢电弧炉的费用低于RC-1，约为3至9欧元，因为废钢不含前体排放。缺乏经核查数据的出口商将适用默认值，并在2026年、2027年和2028年起分别加成10%、20%和30%[S31]。

08 绿色铁是中部非洲的长期选项，而非近期产品。按Midrex工厂统计，2025年撒哈拉以南非洲生产直接还原铁9万吨，全球总量为1.51亿吨，该地区的气基工厂均处于停产状态[S13]；世界钢铁协会的数据包含对该统计未覆盖工厂的估算，其对乌干达、肯尼亚和坦桑尼亚产量的估计约为270万吨[S03]。适合直接还原的矿石十分稀缺（据IEEFA 2022年评估，海运贸易中铁品位超过66%的仅约3%[S75]），而姆巴拉姆（Mbalam）公布的直运矿品位略高于62%[S72]，属于高炉级。国内直接还原模块需要选矿和球团、天然气供应合同，若使用氢气，还需要相当于一座大型水电站规模的电力：仅满足RC-1自身含铁原料需求每年约需0.9至1.0太瓦时，100万吨/年的模块需2.4至2.8太瓦时，而纳赫蒂加尔水电站十二个月的供电量为3.6太瓦时（推算）[S52]。

09 厂区平台不受海洋影响，港口接口和排水系统则不然。厂址地面海拔约40至100米（取整值，待测量确认）[S106]，距海岸约3至4公里（白皮书07表D.1）。设计重点包括极端降雨（克里比站百年一遇日降雨量为264毫米[S60]，按每升温1°C增加约7%[S59]计将升至约280至300毫米）、炼钢车间工人面临的高温高湿，以及2015年至2020年平均每年后退约2米的海岸线[S62]。

10 循环利用始于废钢，而喀麦隆废钢不足。RC-1一期满负荷时每年需要约25.4万吨废钢；唯一公开的国内废钢产生量估算为每年5.3万至6.2万吨（2006年数据）[S88]，现有钢厂已大量进口原料[S89]。因此，RC-1按每年约3万吨国内废钢规划（区间0至6万吨，假设），其余进口，一期港口金属料和辅料到港量约为每年35.1万吨（推算）。钢厂每年还将产生约4.5万吨钢渣（经检测后可用于道路），以及约4800吨危险电弧炉粉尘，其中每年含锌约1000至1400吨（推算），欧洲的做法几乎将其全部回收[S69]。

11 贷款机构将从一期起适用最严格的气候规则。按226克/千瓦时计，一期工艺排放和外购电力排放约为每年9.7万吨；计入柴油、液化石油气和六氟化硫后约为10万至10.4万吨。因此，一期范围一+二处于赤道原则10万吨阈值的水平或其附近，后续各期则明显超过[S22]。因此，Cameroon Steel应从一期起安排气候变化风险评估、替代方案分析和年度公开报告。按ResponsibleSteel的浮动标准，RC-1示意性碳强度远优于第1级进展水平，但距国际能源署的近零排放阈值仍很远[S37][S06]。

12 已知措施可使碳足迹降低约40%，绿色铁可进一步降低。提高能效、降低直接排放、电网降至约100克/千瓦、提高炉料中的废钢比例（国内或进口）和使用经认证的低碳直接还原铁，可使100万吨/年钢厂的碳强度从约0.58吨降至约0.35吨；采用氢基含铁原料可降至约0.26吨（示意）。我们提出十项建议，首要的是签订稳定的低碳电力合同、为每批含铁原料制定碳规格、从第一炉起进行经核查的报告，以及尽早开展直接还原级精矿研究。

如何阅读这些数字

每张图表都带有性质标签。**来源**数值取自所引用的文件。**推算**数值按全文版附录A所示方法，由注明来源的数据或假设计算得出。**假设**数值是注明区间的规划值。**示意**数值表示数量级或机制，并非预测。碳强度单位为吨二氧化碳/吨；除另有说明外，RC-1数值按每吨成品计。

本文是什么，不是什么

本文是Cameroon Steel十份公开白皮书中的第六份，旨在阐明其位于克里比港综合工业区姆博罗项目背后的证据。本文的主题是碳：喀麦隆一座现代化电弧炉长材钢厂会排放多少，应如何计量和报告，碳边境调节措施对其意味着什么，应如何管理其面对气候变化的风险，以及钢厂如何在二十年内逐步迈向极低碳钢铁。

本文中的项目数字来自Cameroon Steel参考配置RC-1，这是为公众讨论和监管沟通而编制的规划估算。RC-1描述的是一座分期建设、设计产能100万吨/年的钢厂（已于2025年1月公开报道[S73]）：首先建设电弧炉炼钢车间、钢包精炼炉和钢坯连铸机（一期，名义产能30万吨/年，预期持续产量每年27万至30万吨），随后建设型材轧机和新增熔炼能力，并为将来可加工喀麦隆矿石的直接还原模块预留用地。目标进度为2029年第一季度开工、2030年下半年首炉出钢、2031年爬坡。一期炼钢车间生产钢坯，其产出可在轧材（线材和钢筋）与供应现有轧钢企业的商品钢坯之间灵活调配，这些轧钢企业目前大量进口原料[S89]。一期产量的目标是替代进口钢坯和线材并出口至中部非洲经济与货币共同体（CEMAC），而非国内钢筋市场，后者的产能已超过需求（白皮书04）。碳足迹按全部轧制产出计算，即将RC-1的产量乘以已公布或假设的消耗基准和排放因子，并逐项给出区间；以钢坯形式销售的每吨产品排放更低（第4章）。这是前端工程设计之前的估算，而非实测值或保证。

本文的结构

表 ES.1 各章回答的问题

章	问题	主要图表
1 钢铁与气候	为什么工艺路线比其他任何因素都重要？	各工艺碳强度；工艺占比；国际能源署排放构成
2 钢铁碳核算	应计入什么，依据哪项标准？	标准矩阵；同一工厂，七个数字
3 电网排放因子	优势有多少来自喀麦隆电力系统？	电源结构；各国电网强度；敏感性曲线
4 示意性碳足迹	RC-1各期排放多少，什么因素影响结果？	分期碳足迹；瀑布图；龙卷风图；热力图
5 碳边境调节措施	欧盟和英国的边境收费实际意味着什么？	逐步实施；总额与净额
6 绿色铁	中部非洲能否生产低碳铁，条件是什么？	直接还原铁产量；工艺阶梯；氢气用电需求；逐步路径
7 气候风险与适应	气候变化对沿海钢厂意味着什么？	降雨；极端值；海平面与岸线
8 循环利用	废钢、钢渣和粉尘如何处理？	残余物；废钢需求；废钢比例
9 融资与标准	贷款方、买方和认证机构会要求什么？	贷款机构阈值；浮动标准
10 路径与建议	应做什么，由谁做，何时做？	路径瀑布图；轨迹；十项建议
11 证据缺口	哪些尚属未知，如何解决？	缺口清单

资料来源：Cameroon Steel，本文。

低碳不是工厂自选的标签，而是工厂年复一年计量、核查并公布的数字。

Cameroon Steel，白皮书06

Cameroon Steel打算如何落实这些结论

上述结论指向少数几项将在数十年内决定钢厂碳绩效的决策，这些决策最好在订购设备之前作出。第一是电力：电弧炉钢厂的清洁程度取决于其所用电量，因此，以明确的低碳电源为支撑的稳定供电合同，加上能在旱季保持电弧炉使用水电的电网接入，是继工艺路线选择之后最有价值的碳决策。第二是含铁原料：每批直接还原铁或热压块铁都应附有经核查的碳数据和合同规定的强度上限，因为在碳边境调节机制下，决定销往欧盟产品大部分费用的是直接还原铁而非电力；炉料中的废钢比例应随国内回收和进口合同条件的改善而提高。第三是计量：钢厂应从一开始就配备计量

仪表，并按温室气体核算体系（GHG Protocol）、ISO 14404和欧盟碳边境调节机制的口径设计排放清单，由经认可的第三方核查，使买方能够使用实际值而非默认值。第四是保留选择权：应为将来的直接还原模块保留土地、公用设施和许可，同时尽早研究关键未知因素，即喀麦隆矿石能否经济地提质为直接还原级球团。

这一切并不能使喀麦隆钢铁在今天就成为“绿色”钢铁，但能使一座新钢厂从第一炉钢起就站在碳分界线的正确一侧，并随着电力、含铁原料和融资条件的改善，拥有一条可信、可计量的进一步减排路径。第10章详细阐述各项建议，第11章列出在本文中的示意性数字成为实测数字之前必须填补的证据缺口。本系列其他白皮书分别论述电力系统（白皮书05）、工艺路线选择（白皮书03）以及一期产品的市场，包括克里比生产钢坯与进口钢坯的成本比较（白皮书04第8章）。

利益声明。本文由Cameroon Steel发布，该公司正在克里比筹建一座钢铁厂。本文旨在为公共讨论提供参考；其分析独立于任何商业要约，所有数据均注明来源或标明其状态。

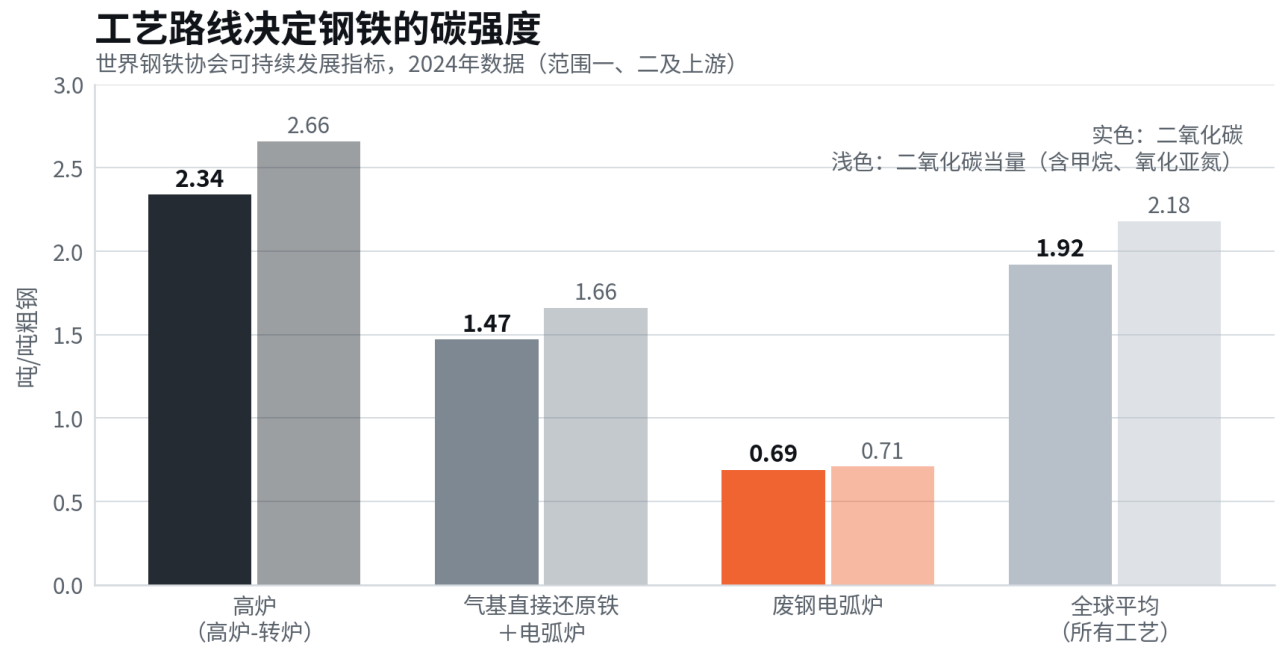
第1章

钢铁与气候：工艺路线决定一切

本章结论：钢铁是最大的工业二氧化碳排放源之一，而一吨钢的碳足迹大部分在选定生产工艺时就已决定。选择电弧炉路线并接入低碳电网的新钢厂，从一开始就站在碳分界线的正确一侧。

2025年全球粗钢产量为18.494亿吨，比2024年下降2.0%[S04]。世界钢铁协会估计，2024年行业平均温室气体强度为每吨2.18吨二氧化碳当量，钢铁约占全球人为温室气体排放的7%至8%[S01][S02]。按2024年数据，高炉-转炉工艺每吨粗钢排放2.34吨二氧化碳，气基直接还原铁加电弧炉为1.47吨，废钢电弧炉为0.69吨，全球平均为1.92吨[S01]。

电弧炉路线把碳问题转移到上游：国际能源署估计，废钢电弧炉的直接排放仅约每吨0.04吨，而按538克/千瓦时的全球平均电网计，总排放约为0.3吨[S05]，几乎全部来自电力，因此电网和外购含铁原料决定了电弧炉钢厂的碳绩效。2025年电弧炉钢占全球粗钢的30.3%，而非洲已达89%[S03]；全球在建项目中71%采用电弧炉[S14]。废钢是最清洁的原料，每吨可避免约1.5吨二氧化碳[S02]，但喀麦隆废钢有限，长期问题不仅是如何清洁地熔炼，而是如何清洁地炼铁。



来源 图1.1 三种主要炼钢工艺及全球平均的碳强度，2024年数据。实色为二氧化碳，浅色为二氧化碳当量。

资料来源：世界钢铁协会，Sustainability Indicators 2025 report，2026年2月新增工艺表[S01]。

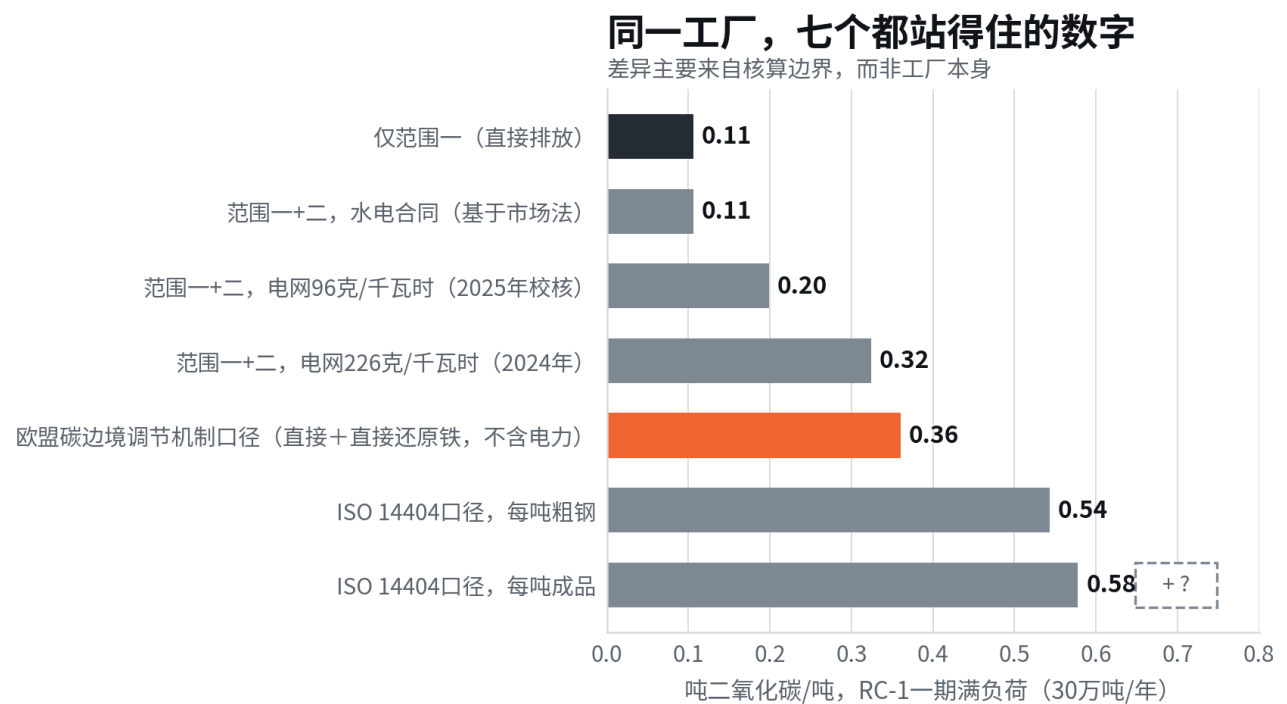
第2章

钢铁碳核算：每次都要说明核算边界

本章结论：一吨钢的碳强度不是工厂的固有属性，而是对工厂应用某种计量规则的结果。同一吨RC-1一期产品可以如实报告为七种不同数值，约0.11至0.58吨二氧化碳，取决于计入哪些排放以及按什么单位计算。

温室气体核算体系将排放分为范围一（自有源直接排放）、范围二（外购电力等）和范围三（价值链其他排放），并要求范围二同时报告基于位置和基于市场的两个数字[S45]。外购直接还原铁会把炼铁排放移出买方的范围一，因此ISO 14404和世界钢铁协会方法将外购中间品的上游排放加回，按每吨粗钢计算[S41][S43]。欧盟碳边境调节机制对钢铁只计直接排放和前体排放，不对外购电力排放收费[S27]，因此全废钢电弧炉在该机制下的费用低于RC-1；赤道原则以范围一+二合计10万吨为阈值[S22]；产品环境声明按每吨产品计算[S47]。

以粗钢计和以成品计相差约6%（RC-1连铸至成品收得率约0.94）。Cameroon Steel的做法是：以基于位置的范围二为主要数字，只有在有明确电站合同和计量交付支持时才报告基于市场的数字；从第一炉起按上述四种口径从同一计量数据集出具报告，并由第三方核查。



推算 图2.2 七种核算边界应用于同一吨RC-1一期产品（满负荷）。虚线框表示尚未量化的投入（在别处生产的铁合金、电极、石灰、耐火材料及运入运输）。

资料来源：WP06模型，基于Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）[S90]；电网排放因子来自Ember，经Our World in Data[S48]及ARSEL[S50]；碳边境调节机制边界依据欧盟第2023/956号条例[S27]。

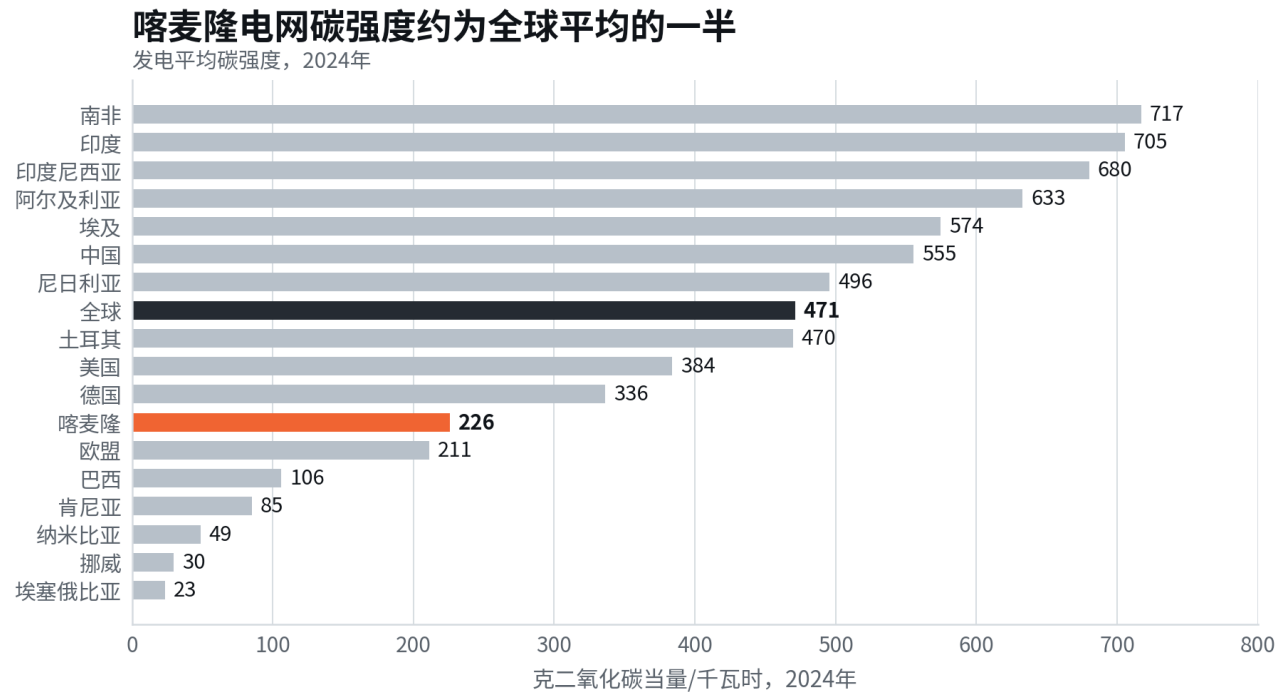
第3章

电网排放因子：喀麦隆水电是电弧炉钢厂最大的优势

本章结论：喀麦隆电力以水电为主，碳强度在非洲处于较低水平。按2024年平均值约226克二氧化碳当量/千瓦时计，电网用电使RC-1一期每吨产品增加约0.22吨二氧化碳；同一电弧炉和轧机若接入全球平均电网约为0.45吨，接入南非电网约为0.69吨。

RC-1一期满负荷年用电约2.89亿千瓦时，即每吨成品约960千瓦时，约占喀麦隆2025年发电量（81.2亿千瓦时）的3.6%；全部建成后约为7.53亿千瓦时[S90][S50]。2024年水电占发电量约72%；420兆瓦的纳赫蒂加尔水电站于2025年3月全面投运后，2025年水电占比约90%[S49][S50]。据此推算的2025年电网平均值约为74至96克/千瓦时（指示性），因此226克/千瓦时的规划值相对平均值偏保守，但相对边际排放因子并不保守。电弧炉电耗规划值为450千瓦时/吨钢水，含30%直接还原铁炉料时约490千瓦时/吨为规划上限值，此时一期年用电约3.02亿千瓦时，碳强度约增加0.01吨（推算）；电弧炉可按系统高峰调整熔炼时间，属于可调度负荷而非可中断负荷，熔炼时段需要稳定供电（白皮书05第2章和第3章详述电力系统）。

电网排放因子每变化100克/千瓦时，一期每吨产品排放约变化0.096吨；当电网排放因子约为343克/千瓦时，RC-1总强度即与全球废钢电弧炉平均值0.69吨持平。但平均值并非全部：旱季或输电受限时，边际电源可能是克里比燃气电厂，其排放率约为770克/千瓦时，在此类时段一期每吨约多排放0.5吨（推算）。因此，签订有明确低碳电源、旱季稳定供电的合同，是继工艺路线之后最有价值的碳决策。



来源 图3.2 部分国家和地区发电平均碳强度，2024年。喀麦隆（橙色）接近欧盟，约为全球平均（深色）的一半。

资料来源：Ember，经Our World in Data，发电碳强度，2026年10月10日访问[S48]。

第4章

示意性碳足迹：范围一和范围二约0.3吨，计入进口含铁原料约0.6吨

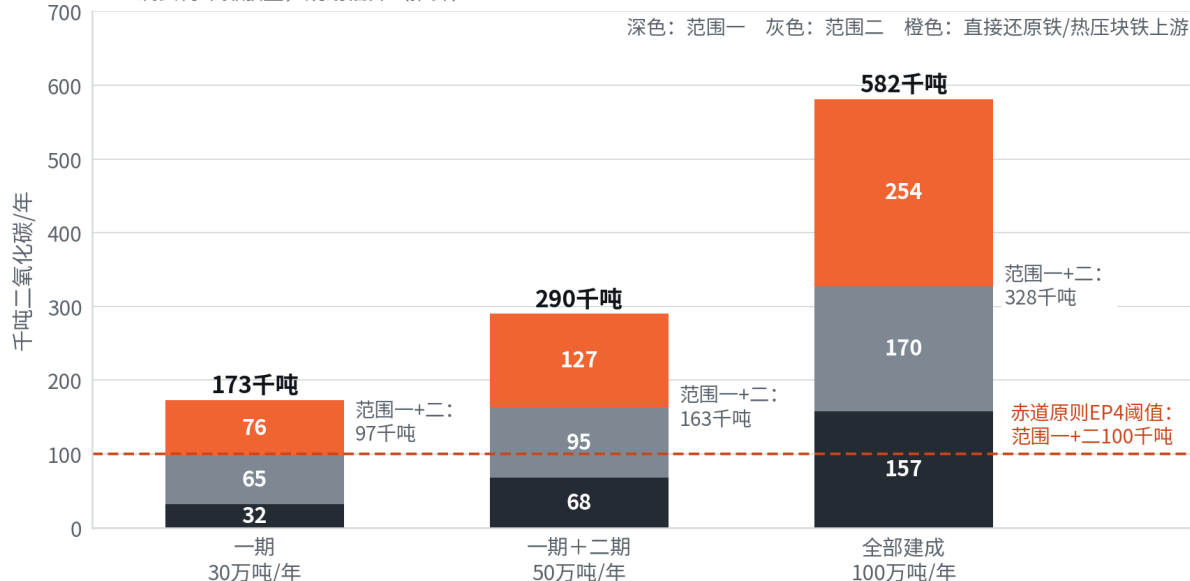
本章结论：按RC-1规划基础，姆博罗钢厂一期满负荷时范围一和范围二（厂内直接排放和外购电力）年排放约9.7万吨二氧化碳，即每吨轧材约0.32吨；模型未计入的少量燃料和六氟化硫另增约0.3万至0.7万吨；进口直接还原铁或热压块铁另带来约7.6万吨上游排放，合计每吨约0.58吨。产能增至100万吨/年时年排放总量约增至三倍，而碳强度几乎不变。

一期炼钢车间生产钢坯，产出可在线材、钢筋与供应现有轧钢企业的商品钢坯之间调配，目标是替代进口钢坯和线材并出口至中部非洲经济与货币共同体（白皮书04）；名义产能30万吨/年，单座电弧炉的预期持续产量为每年27万至30万吨。以钢坯形式销售时，每吨粗钢范围一+二约0.22吨，计入上游约0.46吨，按碳边境调节机制口径约0.34吨（推算）。计算方法为产量乘以基准值，并逐项给出区间：电弧炉电耗规划值450千瓦时/吨钢水（国际金融公司指南区间为347至500[S20]；含30%直接还原铁炉料时上限规划值约490），辅助设施70千瓦时，轧制110千瓦时/吨成品，一期感应加热300千瓦时/吨；电弧炉直接排放因子0.10吨/吨钢水；炉料约70%为废钢、30%为进口直接还原铁，后者上游强度为0.70吨/吨。一期范围一约3.19万吨，范围二约6.53万吨；一期加二期范围一+二约16.3万吨，全部建成后约32.8万吨，计入上游后约58.2万吨。

敏感性分析表明，最大的不确定性不在电网，而在含铁原料：直接还原铁比例在20%至50%之间变化，总强度约为0.49至0.75吨；上游强度在0.5至0.9吨之间变化，影响约±0.07吨；三项关键参数同时取极值时，区间约为0.42至0.95吨。因此，直接还原铁和热压块铁的采购碳规格是继电力合同之后最重要的气候工具。

排放总量随产能增至三倍，碳强度基本不变

RC-1满负荷年排放量，规划估算（推算）



推算

图4.2 满负荷时各期年度碳足迹。一期范围一和范围二（深色和灰色）的工艺排放和外购电力排放约9.7万吨，计入少量燃料和六氟化硫后处于赤道原则10万吨阈值的水平或其附近，后续各期明显超过；上游直接还原铁/热压块铁（橙色）在各期都是最大的单项。

资料来源：WP06模型，基于Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）[S90]；赤道原则EP4[S22]。

第5章

碳边境调节措施：经核查的低碳强度成为相对矿石基钢材的价格优势

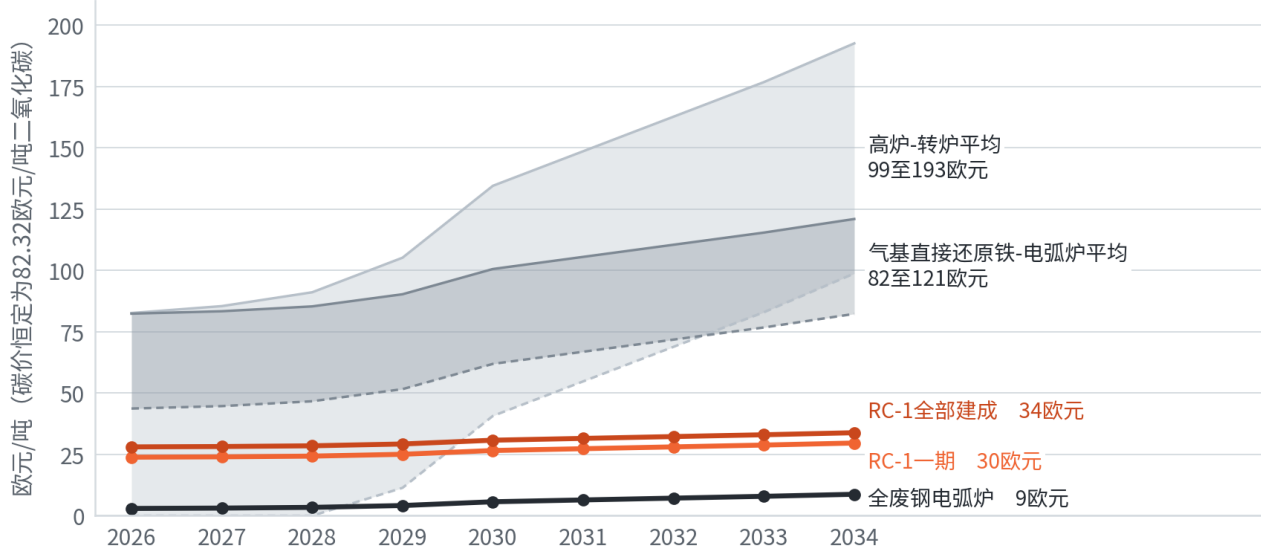
本章结论：欧盟碳边境调节机制（CBAM）自2026年1月1日起对进口钢材的隐含碳收费，英国的类似机制将于2027年1月1日实施。两者覆盖喀麦隆电弧炉钢厂可能出口的所有产品：铁矿球团、直接还原铁和热压块铁、钢坯、钢筋、线材和型材[S27][S34]。

2026年第三季度证书价格为每吨二氧化碳82.32欧元[S26]。对钢铁而言，机制只计直接排放和前体（如直接还原铁）所含的直接排放，不计外购电力[S27]，因此喀麦隆的低碳电网在边境不带来任何抵扣。欧盟生产商享有的免费配额保护以“碳边境调节系数”逐步取消：2026年为97.5%，2030年为51.5%，2034年降至零[S28]。基准值方面，第2025/2620号实施条例规定了长材的数值，但本文未予摘录，以热轧卷公布的数值作近似：高炉-转炉1.370吨、直接还原铁-电弧炉0.481吨、废钢电弧炉0.072吨[S31][S104]；RC-1炉料约70%为废钢，将归入废钢电弧炉类别。

按该机制口径，一吨RC-1一期产品隐含约0.36吨二氧化碳（0.11吨直接排放加0.25吨直接还原铁前体排放），2026年净费用约24欧元，2034年约30欧元；全废钢电弧炉仅约0.11吨，费用约3至9欧元，低于RC-1。矿石基工艺的口径值介于国际能源署直接排放估算与世界钢铁协会全口径平均值之间：到2034年，气基直接还原铁-电弧炉约82至121欧元，高炉约99至193欧元，比RC-1高约50至90欧元和70至160欧元。RC-1在该机制下的杠杆是直接还原铁的碳含量：以0.5吨/吨代替0.7吨/吨的直接还原铁，每吨产品约节省6欧元。这一优势只属于能证明其数据的出口商：缺乏经核查数据时须使用默认值，2028年起加成30%[S31]。因此，按该机制规则从第一炉起开展监测本身就是一项资产。

随着免费配额退出，与矿石基钢材的差距扩大

每吨碳边境调节机制净费用示意，按该机制口径，2026年第三季度不变价；以热轧卷基准值作近似



示意 图5.3 2026年至2034年每吨碳边境调节机制净费用示意，按该机制口径和82.32欧元/吨二氧化碳不变价格计算，各系列适用其工艺基准值（以热轧卷数值近似）和当年系数。矿石基工艺以区间表示，价格将会变化。

资料来源：欧盟委员会，碳边境调节机制证书价格[S26]；欧盟第2023/956号条例附件二[S27]；热轧卷基准值[S31]；碳边境调节系数[S28]；国际能源署[S05]；世界钢铁协会[S01]；WP06模型[S90]。

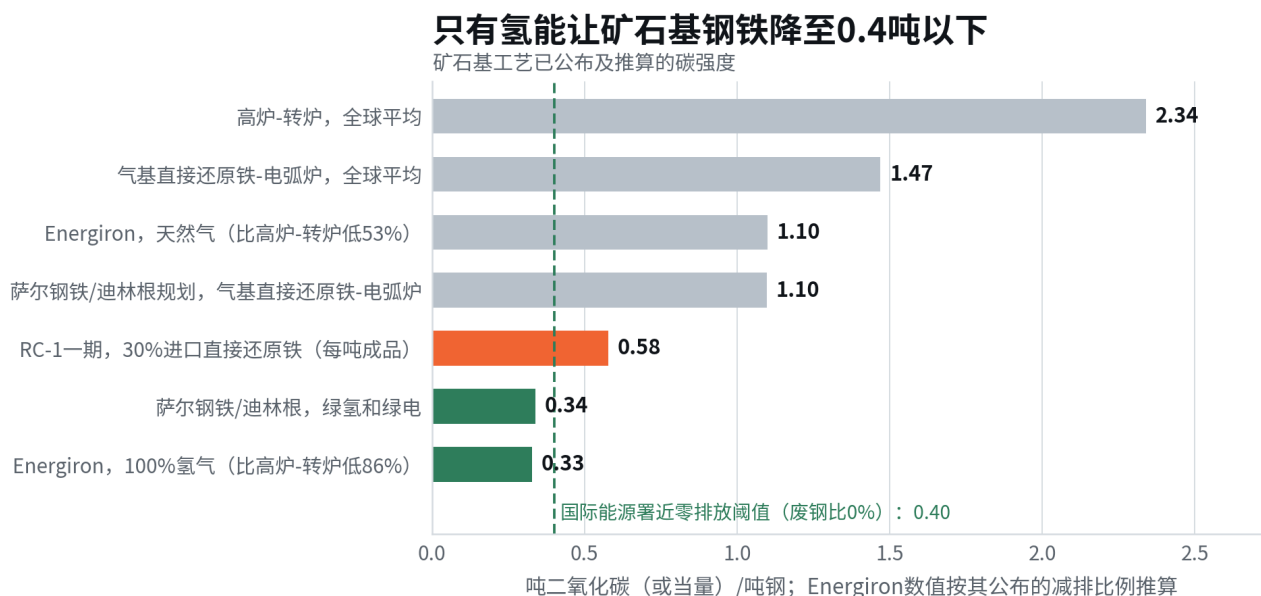
第6章

绿色铁：中部非洲的长期选项，取决于矿石、电力和天然气

本章结论：钢铁减排最深的部分来自不用煤炼铁：先在直接还原竖炉中使用天然气，再逐步提高低碳电力制氢的比例。中部非洲拥有铁矿和大量未开发的水电，但尚不具备绿色铁所需的直接还原级精矿、已签约的天然气和低成本稳定电力。对RC-1而言，绿色铁是需要逐步争取的预留选项，而非近期产品。

据Energiron数据，其天然气工艺比高炉-转炉低约53%，100%氢气工艺低约86%，按世界钢铁协会高炉平均值折算约为每吨1.10吨和0.33吨（推算）[S15]。直接还原级矿石稀缺：2022年海运贸易中铁品位超过66%的仅约3%[S75]；姆巴拉姆公布的直运矿品位为62.3%以上（2015年按JORC规范公布的储量品位为62.2%，见白皮书03），适合高炉而非直接还原[S72]。2025年非洲直接还原铁约1600万吨，大部分产自北非；按Midrex工厂统计，撒哈拉以南非洲仅9万吨，气基工厂均处于停产状态[S13]，世界钢铁协会对乌干达、肯尼亚和坦桑尼亚的估算约为270万吨[S03]。

全氢还原每吨直接还原铁约需54千克氢气[S17]，满足RC-1全部建成后约36万吨直接还原铁的需求，每年约需0.9至1.0太瓦时电力，100万吨/年模块需2.4至2.8太瓦时，而纳赫蒂加尔十二个月供电3.6太瓦时[S52]。氢基铁需要低于约每兆瓦时35至40美元的电价才具竞争力[S05][S09]。因此，绿色铁须通过三道关口：直接还原级精矿、以经审计储量为支撑的长期天然气合同，以及成本合适的稳定低碳电力。



推算 图6.1 矿石基炼钢工艺已公布及推算的碳强度。只有氢基工艺接近国际能源署原生钢近零排放阈值（每吨0.40吨二氧化碳当量）。

资料来源：世界钢铁协会[S01]；欧盟委员会工业转型创新中心，Energiron及POWER4STEEL页面[S15][S18]；国际能源署近零阈值[S06]；WP06模型[S90]。

第7章

气候风险与适应：高地厂址、湿热升温的气候与受侵蚀的港口海岸

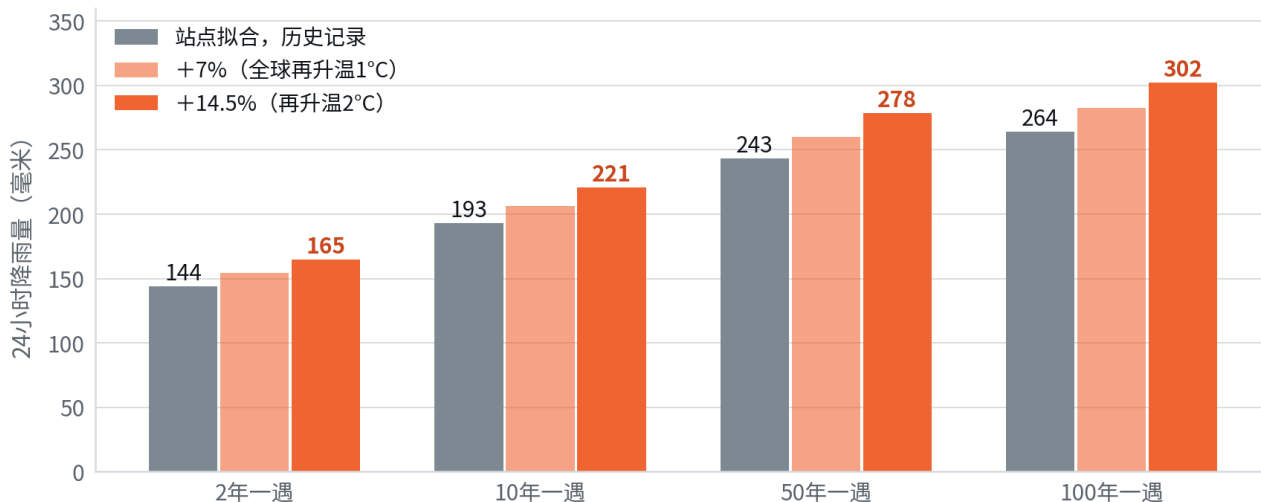
本章结论：约2030年建成的钢厂将运行到2070年代，所面对的气候比工程设计通常依据的历史记录更热，克里比的极端降雨也更强。姆博罗厂址位于海拔约40至100米（取整值，待测量确认）、距海岸约3至4公里的台地，不受沿海洪水影响；其实质性风险在于大面积硬化地面上的极端降雨、电弧炉前工人的高温高湿、雷电、枯水年水电供应的可靠性，以及海岸线持续后退的港口接口。

克里比站1937年至1976年年均降雨量约2836毫米，9月和10月各约500毫米[S60]。站点记录的日降雨量2年一遇约144毫米，100年一遇约264毫米[S60]；政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告认为每升温1°C极端日降水增强约7%[S59]，百年一遇值将升至约283毫米（升温1°C）和302毫米（升温2°C）。到2100年全球海平面预计上升0.44至0.76米（SSP2-4.5）或0.63至1.01米（SSP5-8.5）[S59]；克里比海岸2015年至2020年平均每年后退约2米[S62]。

应对之策在设计阶段成本最低：按百年一遇降雨加升温余量设计排水与滞留设施，使水远离钢水区域；依据ISO 7243湿球黑球温度制定热应激管理计划；为直接还原铁和热压块铁设置有顶棚的储存设施；签订稳定供电合同；施工开始即在厂区设立气象站。

排水系统应按比历史记录更湿润的气候设计

克里比各重现期日降雨量，以及每升温1°C约增加7%的示意性上调



示意 图7.2 克里比各重现期日降雨量（站点记录），以及按每增加1°C全球升温约7%计的示意性上调。上调为设计余量，并非区域预测。

资料来源：克里比站皮尔逊III型拟合[S60]；IPCC AR6第一工作组，极端日降水随升温的变化[S59]。上调由Cameroon Steel计算。

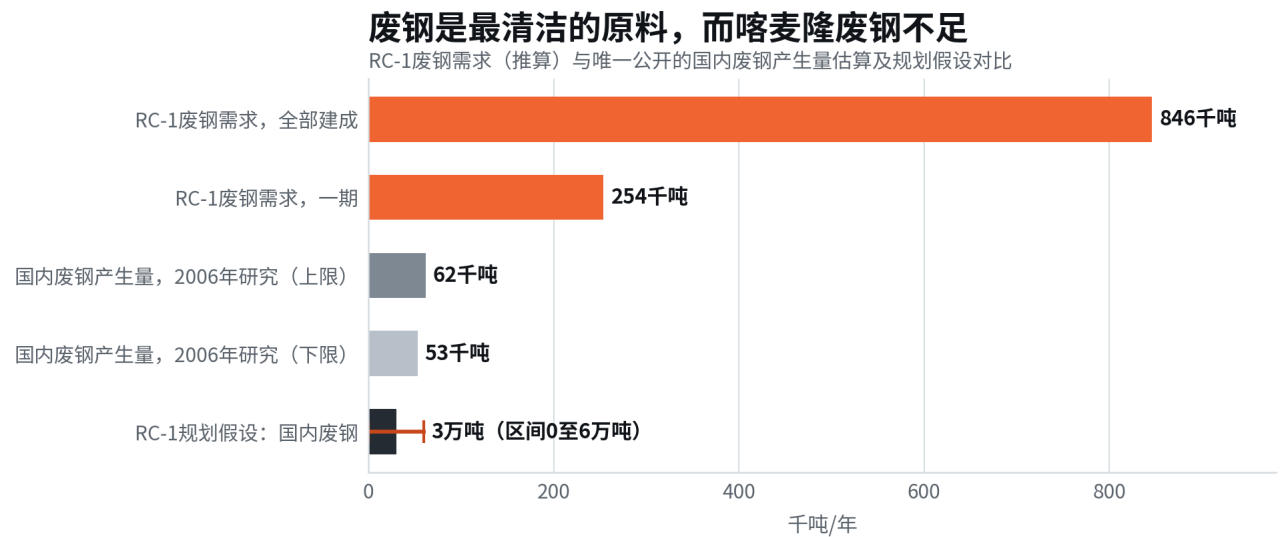
第8章

循环利用：废钢是最清洁的原料，钢渣和粉尘是资源

本章结论：循环利用是钢厂的主要碳杠杆之一。每用一吨废钢替代矿石基铁可避免约1.5吨二氧化碳[S02]；对RC-1而言，炉料中废钢比例每提高10个百分点，每吨产品约减少0.09吨二氧化碳。但喀麦隆废钢产生量很少。

唯一公开的估算为每年5.3万至6.2万吨（2006年数据）[S88]，现有钢厂的本地废钢仅能满足约40%的需求[S89]，而RC-1一期每年需废钢约25.4万吨，全部建成后约84.6万吨。现有回收量大多已供应现有钢厂，因此RC-1按每年约3万吨国内废钢规划（区间0至6万吨，假设），其余进口，一期港口金属料和辅料到港量约为每年35.1万吨[S90]；废钢不属于碳边境调节机制覆盖商品，以废钢替代直接还原铁同时降低碳足迹和该机制费用。建立符合国际劳工与安全标准的国内回收体系，可同时降低碳足迹和进口费用。

在产出方面，一期每年产生约4.5万吨钢渣（全部建成后约14.9万吨），经破碎、回收金属和陈化稳定、并通过浸出试验后，可作为道路基层骨料；2024年欧盟钢渣利用率为82%[S67]。电弧炉粉尘每年约4800吨，属危险废物，含锌约1000至1400吨；欧洲约98%的电弧炉粉尘以威尔兹窑回收锌[S69]。中部非洲尚无此类设施，一期粉尘将依照《巴塞尔公约》出口至有资质的回收厂[S71]。水和热同样可以循环：RC-1计划采用闭路冷却，补充水约为每吨产品2.0立方米，低于世界钢铁协会2024年行业平均消耗量2.3立方米[S90][S01]，屋面雨水可用作冷却补充水。



推算 图8.2 RC-1年度废钢需求与喀麦隆国内废钢产生量唯一公开估算及规划假设的对比。2006年估算已较陈旧，当前产生量可能更高，但缺乏记录，且大多已被现有钢厂使用。

资料来源：WP06模型，基于Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）[S90]；Bidoung等（2007），2006年数据[S88]。

第9章

融资与标准：贷款方、买方和认证机构都会要求提供证据

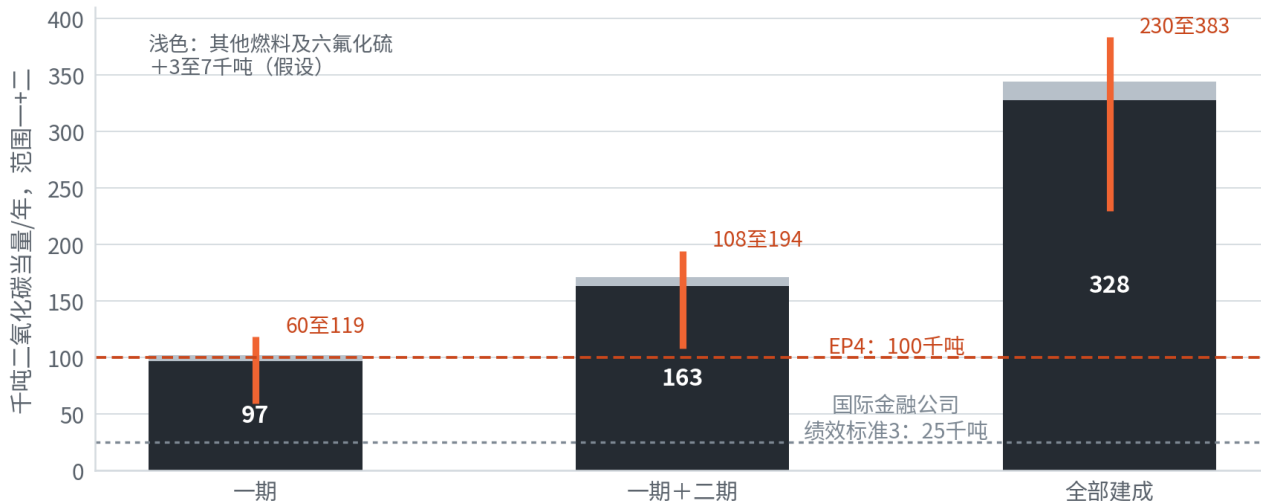
本章结论：国际贷款机构和钢材买方对新钢厂的期望已趋于一致：量化温室气体排放、评估气候风险、比较低碳替代方案、按年报告并接受核查。RC-1一期处于赤道原则10万吨阈值的水平或其附近，后续各期明显超过，因此最严格的要求实际上从一开始就适用。

国际金融公司绩效标准3要求年排放超过2.5万吨二氧化碳当量的项目每年量化排放[S21]；赤道原则（EP4）对范围一+二超过10万吨的项目要求开展气候变化风险评估（含替代方案分析）并公开年度报告[S22]。按226克/千瓦时计，一期工艺排放和外购电力排放约9.7万吨，计入柴油、液化石油气和六氟化硫后约10万至10.4万吨；仅按模型计，电网排放因子约236克/千瓦时即达到阈值，计入上述少量排放源后约为219克/千瓦时；一期加二期约16.3万吨，全部建成后约32.8万吨。因此，Cameroon Steel应从一期起执行上述要求。

在认证方面，国际能源署近零排放阈值随废钢比例浮动，从0%废钢时每吨粗钢0.40吨降至100%废钢时0.05吨[S06]；ResponsibleSteel第1级进展水平在20%废钢时约为2.34吨，80%时约为0.96吨[S37]。废钢比例约70%时，RC-1示意值为每吨粗钢0.54吨，远优于第1级（约1.19吨），但约为近零阈值（约0.155吨）的三倍半。

一期处于赤道原则阈值附近，后续各期明显超过

满负荷范围一+二；浅色：其他燃料及六氟化硫；橙色须线：电网96至300克/千瓦时（推算）



推算 图9.1 满负荷时RC-1各期范围一和范围二排放与国际金融机构及赤道原则阈值对比。浅色部分为少量燃料和六氟化硫（假设，中值）；橙色误差线表示电网排放因子在96至300克/千瓦时之间的区间。

资料来源：WP06模型，基于Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）[S90]；国际金融公司绩效标准3[S21]；赤道原则EP4[S22]。

第10章

脱碳路径：已知措施可降低约40%，绿色铁可进一步降低

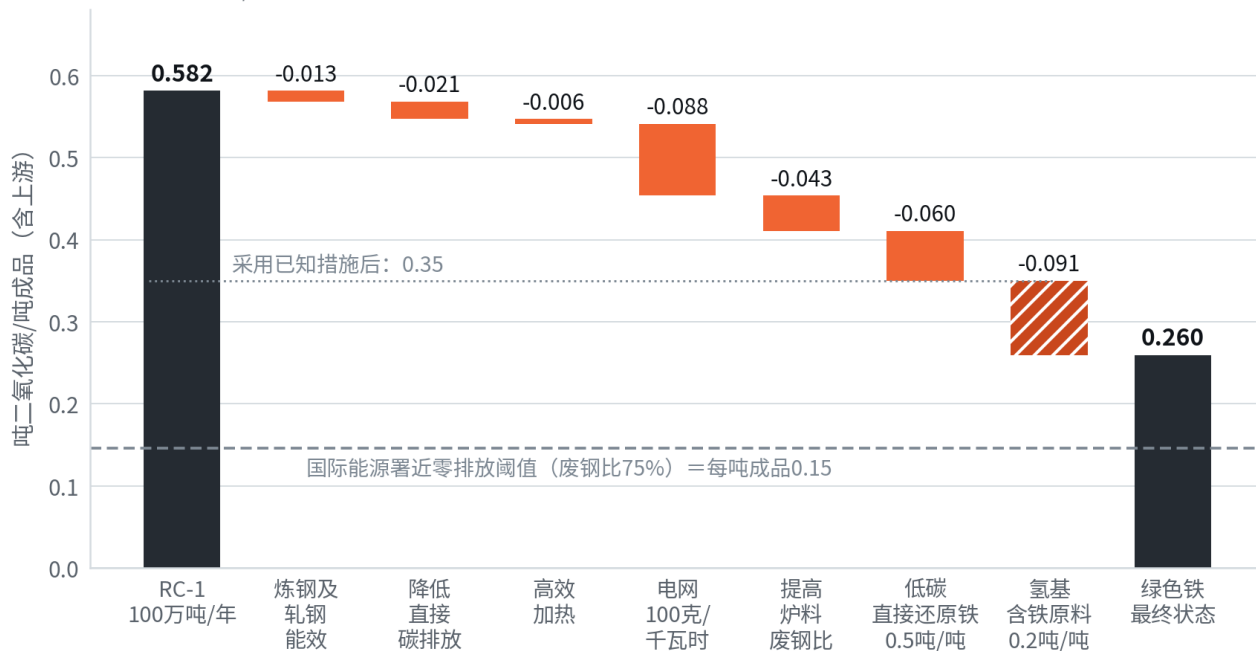
本章结论：从100万吨/年钢厂计入上游含铁原料后约每吨0.58吨二氧化碳的示意性碳足迹出发，已知措施可将其降至约0.35吨（一期2030年下半年首炉出钢，全部建成在2034年之后）；以氢基含铁原料替代气基直接还原铁可进一步降至约0.26吨。这些步骤都不会自动实现，其中影响最大的几项取决于电力系统、含铁原料供应商和氢能经济性。

各项措施依次叠加（图10.1）合计约-0.232吨，其中电网降至100克/千瓦时（约-0.088吨）和经认证的低碳直接还原铁（上游0.5吨/吨，约-0.060吨）影响最大；氢基含铁原料（0.2吨/吨）再减少约0.091吨。厂内运营措施合计仅约0.04吨，最重要的电网和含铁原料两项大多在厂外，取决于合同和供应商。

十项建议的要点为：签订明确低碳电源的稳定电力合同；为每批含铁原料规定碳规格和强度上限；国内回收与进口并举，提高废钢比例；在设计中消除直接排放和能源浪费；从第一炉起计量并按年核查和公布；为钢坯、线材和钢筋发布经核查的产品环境声明；从一期起适用最严格的贷款机构要求；在设计中落实气候适应；为钢渣和粉尘建立出路；以证据为基础保留绿色铁选项，自2027年起开展精矿与球团研究。

已知措施可减排约40%，绿色铁可进一步降至约0.26

RC-1在100万吨/年规模下的示意性路径，各项措施逐项叠加（参数均在RC-1规划区间内）



示意 图10.1 RC-1（100万吨/年）示意性脱碳路径，各项措施逐步叠加，单位为每吨产品吨二氧化碳（计入上游含铁原料）。点线为采用已知措施后的水平，虚线为废钢比约75%时国际能源署近零阈值（按每吨产品折算）。

资料来源：WP06模型，基于Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）[S90]；直接还原铁电耗增量[S15]；氢基铁强度由[S15]推算；国际能源署近零阈值[S06]。

第11章

证据缺口：尚属未知的内容及其解决方式

本章结论：本文中有关RC-1钢厂的每个数字都是在前端工程设计、供应合同和第一炉钢之前作出的估算，因此每个数字都标注了性质和区间。全文列出20项证据缺口，没有一项会推翻核心结论，即接入喀麦隆电网的电弧炉钢厂碳强度将远低于各工艺平均值，但其中几项可能使示意性碳强度变动0.1吨或更多。

影响碳足迹的缺口。最大的不确定性来自钢厂外购的投入，而非其运行的工艺：实际采购的直接还原铁/热压块铁的碳强度（假设为0.5至0.9吨/吨，影响约 ± 0.07 吨），可获得的废钢比例（每10个百分点约 ± 0.09 吨），2025年以后的电网排放因子及季节变化（每100克/千瓦时约 ± 0.1 吨），以及电弧炉直接排放、少量燃料和六氟化硫及能耗（后者决定一期处于赤道原则阈值的哪一侧）。解决方式：逐批取得经核查的供应商数据，开展废钢市场调查，取得技术供应商的保证消耗值，并在投产后实测碳平衡。

影响边境调节和认证的缺口。包括欧盟碳边境调节机制对长材的基准值及RC-1炉料的工艺归类、适用于喀麦隆产品的默认值、Steel Climate Standard和LESS的具体阈值，以及喀麦隆是否存在电力属性证书登记系统。

影响绿色铁选项的缺口。喀麦隆矿石能否经济地提质为直接还原级精矿和球团（拟自2027年起与姊妹矿业公司开展冶金试验和研究），天然气储量与供应条件，氢气所需低碳电力的成本与稳定性，以及港口散货装卸能力。

影响适应设计的缺口。克里比短历时降雨强度曲线、厂址热应激统计、雷电密度、克里比海平面预测、钢渣浸出性能和道路主管部门认可，以及有资质的电弧炉粉尘回收商和出口许可。

Cameroon Steel计划在前端工程设计完成后重新发布本文的示意性碳足迹，以供应商保证值和合同数据替换规划值，并在投产后的第一份年度气候报告中以经核查的实测数字取代估算。每次更新都将说明改动内容及原因。

资料来源：Cameroon Steel；敏感性数据来自WP06模型（全文第4章）。

关于本版本

本中文摘要版完整翻译了执行摘要，对第1章至第10章逐章作了摘要（每章给出结论、关键数字和一张主要图表），并概述了第11章的证据缺口。方法与假设、完整术语表、全部资料来源和图表数据表（全文版附录A至D）仅收录于全文。完整内容见英文版（WP06-en.pdf）和法文版（WP06-fr.pdf）。图表编号与全文一致，以便对照。

附录A

术语表

下表列出本文的关键术语及其英文、法文和中文对照，供在三个版本之间对照阅读。
术语按本文中的含义解释；如某项标准或法规对术语有正式定义，以正式文本为准。

英文	法文	中文	含义
Electric arc furnace (EAF)	four à arc électrique (FAE)	电弧炉	利用石墨电极与炉料之间的电弧熔化废钢、直接还原铁或生铁的炉子
Scrap-based EAF	FAE à ferraille	废钢电弧炉	炉料以废钢为主的电弧炉炼钢
Ladle furnace (LF)	four-poche	钢包精炼炉	浇铸前对钢水加热、合金化和精炼的二次冶金工位
Continuous casting	coulée continue	连铸	将钢水连续浇铸成钢坯的工艺
Billet	billette	钢坯	方形断面的连铸半成品，用于轧制棒材、线材或轻型型材
Wire rod	fil machine	线材	热轧线材，用于拉丝或建筑
Reinforcing bar (rebar)	rond à béton (armatures)	钢筋	混凝土结构用带肋钢筋
Sections	profilés	型材	角钢、槽钢、工字钢等热轧型材
Direct-reduced iron (DRI)	fer de réduction directe (DRI)	直接还原铁（DRI）	铁矿在固态下被还原所得的金属铁，通常在竖炉中以重整天然气或氢气还原
Hot-briquetted iron (HBI)	fer briqueté à chaud (HBI)	热压块铁（HBI）	趁热压制成致密块状的直接还原铁，便于运输和储存
BF-BOF	haut fourneau-convertisseur (HF-BOF)	高炉-转炉	以焦炭还原铁矿并用氧气将生铁转炼为钢的长流程
Iron units	unités de fer	含铁原料	钢厂熔炼的废钢、直接还原铁、热压块铁或生铁，其来源决定大部分上游排放
Scrap	ferraille	废钢	用于回炉熔炼的钢铁废料
Slag	laitier	钢渣	炉内钢水表面形成的氧化物层，冷却后可作骨料
EAF dust	poussières de FAE	电弧炉粉尘	电弧炉除尘系统捕集的细粉尘，因含锌、铅、镉而属危险废物
Mill scale	calamine	氧化铁皮	加热和轧制过程中钢材表面形成的氧化铁片
Scope 1, 2, 3	périmètres 1, 2 et 3	范围一、二、三	直接排放；外购电力、蒸汽或热力的排放；价值链其他排放
Upstream emissions	émissions amont	上游排放	外购投入品在到达工厂之前生产过程中产生的排放
Grid emission factor	facteur d'émission du réseau	电网排放因子	电网每供应1千瓦时电力所排放的二氧化碳量
Carbon intensity	intensité carbone	碳强度	每吨钢的二氧化碳排放量
CBAM	MACF (mécanisme d'ajustement carbone aux frontières)	碳边境调节机制（CBAM）	欧盟（2027年起英国）对进口商品隐含碳收费的机制
Embedded emissions	émissions intrinsèques	隐含排放	碳边境调节机制下生产某商品所释放的排放，包括相关前体的排放；钢铁只计直接排放（含直接还原铁等前体的直接排放），外购电力排放不计价
Free allocation	allocation gratuite	免费配额	欧盟碳排放交易体系向本地生产商免费发放的排放配额
Default value	valeur par défaut	默认值	未提供经核查实际排放时适用的排放值
EPD	déclaration environnementale de produit (DEP)	产品环境声明	经核查的产品全生命周期环境影响报告
ESIA	étude d'impact environnemental et social (EIES)	环境与社会影响评估	项目环境与社会影响的评估程序
ESMP	plan de gestion environnementale et sociale (PGES)	环境与社会管理计划	落实影响评估所提措施的管理计划
Green iron	fer vert	绿色铁	以极低排放生产的铁，通常采用低碳电力制氢直接还原
DR-grade ore	minerais de qualité DR	直接还原级矿石	适合直接还原的高铁、低硅铝矿石或球团
Pellets	boulettes	球团	由精矿造球焙烧而成，用于炼铁
Near-zero emission steel	acier à émissions quasi nulles	近零排放钢	碳强度低于国际能源署浮动阈值的钢

英文	法文	中文	含义
Equator Principles (EP4)	Principes de l'Équateur (EP4)	赤道原则（EP4）	银行用于项目融资的环境与社会风险管理框架
IFC Performance Standard 3	NP 3 de la SFI	国际金融公司绩效标准3	国际金融公司（世界银行集团成员）关于资源效率与污染防治的标准，年排放超过2.5万吨二氧化碳当量的项目须量化排放
RC-1	configuration de référence RC-1	参考配置RC-1	Cameroon Steel姆博罗钢厂的规划估算（分期、基准值和物料平衡）
Kribi industrial-port zone	Zone industrialo-portuaire de Kribi	克里比港综合工业区	项目所在的工业园区，由KPIZ S.A.开发和管理
KPIZ S.A.	KPIZ S.A.	克里比港工业区股份有限公司（KPIZ S.A.）	开发和管理克里比港综合工业区的公司
PAK	Port Autonome de Kribi (PAK)	克里比自治港（PAK）	管理克里比港的港口机构
CEMAC	CEMAC	中部非洲经济与货币共同体（CEMAC）	喀麦隆、中非、乍得、刚果（布）、赤道几内亚和加蓬组成的区域共同体

资料来源：Cameroon Steel，依据全文版附录B（术语表）及附录C所列标准和文件。

CAMEROON STEEL

从矿产资源到工业价值

Cameroon Steel正在克里比港综合工业区姆博罗（Mboro）分期筹建钢铁综合体，首期为生产钢坯的电弧炉炼钢车间，钢坯用于线材、钢筋和商品销售。本文仅供参考，不构成任何要约或承诺。