



LBNL-62806

REV.2

ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

主要工业部门能耗指标的国际最佳实践

**Ernst Worrell, Lynn Price, Maarten Neelis,
Christina Galitsky, Zhou Nan**

2008年2月

本报告是通过美国能源部，在能源基金会的中国可持续能源项目支持下完成，合同号为 DE-AC02-05CH11231。

免责声明：美国政府，加州大学和其任何的人员都未做任何的授权、明确的或暗示的表示，包括适用于特定用途的授权，或对本报告任何公开发表信息的准确性、完整性或有用性承担任何的法律责任或义务。

劳伦斯伯克利国家实验室
环境能源技术处在美国发表
美国 加利福尼亚州 94720 伯克利
One Cyclotron 路, MS 90R4000

摘 要

本报告提供了钢铁、铝、水泥、造纸、合成氨和乙烯等主要高耗能产品的“国际最佳实践”的能耗指标。这些“国际最佳实践”至少在世界上某个地方已商业化运行，并且代表着最高效的工艺水平。报告中给出了重点工业部门的主要耗能工艺的能耗强度值，便于在工艺水平方面进行对比。本报告提供了主要产品的终端能耗值和一次能源能耗值。

需要说明的是，本报告中的“最佳实践”能源消耗数据仅具有参考性。

关键词：能耗强度，工业，钢铁，铝，水泥，造纸，合成氨，乙烯

目 录

1 概况.....	5
2 国际最佳实践能耗值	10
2.1 钢铁.....	10
2.1.1 高炉——转炉生产流程.....	11
2.1.2 熔融还原—转炉.....	14
2.1.3 直接还原—电炉.....	18
2.1.4 电炉.....	21
2.1.5 连铸.....	23
2.1.6 热轧和成材.....	23
2.2. 铝.....	25
2.2.1 铝生产.....	26
2.2.2 阳极生产.....	26
2.2.3 铝熔炼 (电解法).....	27
2.2.4 铝锭铸造.....	28
2.2.5 再生铝生产.....	28
2.3 水泥.....	29
2.3.1 生料和燃料的制备.....	29
2.3.2 熟料生产.....	Error! Bookmark not defined.
2.3.3 添加剂的制备.....	30
2.3.4 终粉磨.....	37
2.3.5 其他生产用能.....	37
2.4. 造纸.....	39
2.4.1 非木纸浆.....	40
2.4.2 牛皮纸浆 (硫酸盐纸浆)	44
2.4.3 亚硫酸盐制浆.....	44
2.4.4 机械制浆.....	44
2.4.5 废纸回收.....	45
2.4.6. 造纸.....	45
2.4.7 综合造纸厂.....	45
2.5 合成氨.....	48
2.5.1 天然气汽化重整.....	48
2.5.2 以煤为原料的合成氨.....	49
2.6 乙烯.....	50
2.6.1 石脑油和乙烷.....	50
2.6.2 其他原料与新技术.....	53
3. 总结和下一步计划	54
4. 致谢.....	54

1 概况

本报告提供了钢铁、铝、水泥、造纸、合成氨和乙烯能耗值的国际最佳实践的相关信息。“国际最佳实践”至少在世界上某个地方已商业化运行，并且代表着最高效的工艺水平。¹

这些最佳实践值的表现形式为生产每物理单位的物品所消耗的能源量，物理单位通常为公吨（t）。能源量的表示既有使用国际标准下的焦耳（joules）也有使用中国常用的单位，即千克标准煤（kgce）²。

终端能耗值是指生产设备所消耗的能源，一次能源消耗值是指生产设备所消耗的能源以及生产设备发电所需的能源，一次能源消耗值中也包括了将燃料转换成电力的损失和输配电的损失。据估计这些损失所占的比例大概为 67%。本报告所涉及的能耗值仅为终端能耗值；一次能源能耗值只是在表中列出。

表 1.1 给出了工业部门终端能耗国际最佳实践的汇总。表 1.2 给出了一次能源消耗值国际最佳实践的汇总。有关能耗值计算和参考值来源的详细情况在后面的章节有所描述。

¹ 虽然本报告描述的是主要工艺能效最佳实践，但是整合这些单个技术对于获得这些技术的全部益处是很重要的。比如，热电联产可以提高所述工艺的蒸汽供应效率，副产品能流也会因为采用了更有效的技术而效率得到提高（例如：回收高炉煤气利用 TRT 发电而不是利用锅炉生产蒸汽发电）。

² 2006 年 4 月，中国中央政府开始实施千家企业节能项目（千家企业项目），目的是通过针对中国 1000 家能耗最大的企业，提高中国的工业能效。这些企业目前大约占中国总工业能耗的 50%，和中国总能耗的 30%。在 2006 年夏季，所有参与千家企业项目的企业都签订了含有 2010 年能效目标的节能协议。这些企业来自钢铁、石油石化、化工、有色金属、建筑材料、造纸、电力生产、采煤和纺织行业。中国政府官员表示希望通过这个项目了解中国工业企业与国际最佳实践之间的差距。

表 1.1. 主要工业部门终端能耗国际最佳实践汇总

		单位	GJ/t	kgce/t
钢铁				
	高炉 - 转炉 - 薄坯连铸技术	吨钢	14.8	504.5
	熔融还原 - 转炉 - 薄坯连铸技术	吨钢	17.8	606.4
	直接还原铁 - 电弧炉 - 薄坯连铸技术	吨钢	16.9	576.2
	废钢 - 电弧炉 - 薄坯连铸技术	吨钢	2.6	87.5
铝				
	铝	吨铝	70.6	2411
	再生铝	吨铝	2.5	85
水泥				
	普通硅酸盐水泥	吨水泥	2.9	100
	粉煤灰水泥	吨水泥	2.0	70
	高炉矿渣水泥	吨水泥	1.7	57
纸浆				
	非木商品浆	吨（风干）	7.7	264
	牛皮纸木浆	吨（风干）	11.1	380
	亚硫酸盐木浆	吨（风干）	18.5	632
	预热机械木浆	吨（风干）	6.6	224
	废纸浆	吨（风干）	1.5	51
纸张				
	未涂布纸	吨（风干）	9.0	307
	涂布纸	吨（风干）	10.4	355
	新闻纸	吨（风干）	7.2	244
	纸板	吨（风干）	9.6	327
	牛皮纸板	吨（风干）	7.8	267
	棉纸	吨（风干）	10.5	358
造纸				
	漂白的未涂布纸	吨（风干）	18.3	625
	牛皮纸板（未漂白）/包装纸	吨（风干）	17.6	601
	漂白的涂布纸	吨（风干）	22.4	765
	漂白的未涂布纸	吨（风干）	22.3	762
	新闻用纸	吨（风干）	6.6	226
	杂志印刷纸	吨（风干）	7.3	248
	纸板	吨（风干）	11.8	402
	回收纸板	吨（风干）	11.2	384
	回收新闻用纸	吨（风干）	7.6	259
	回收棉纸	吨（风干）	11.3	386

		单位	GJ/t	kgce/t
合成氨				
	以天然气为原料（蒸汽转化法）	吨氨	28	956
	以煤为原料	吨氨	34.8	1188
乙烯				
	乙烷裂解	吨乙烯	12.5	427
	石脑油裂解	吨乙烯	11	409

表 1.2. 主要工业部门一次能源消耗国际最佳实践的汇总

		单位	GJ/t	kgce/t
钢铁				
	高炉 – 转炉 – 薄坯连铸技术	吨钢	16.3	555.1
	熔融还原 – 转炉 – 薄坯连铸技术	吨钢	19.2	656.8
	直接还原铁 – 电弧炉 – 薄坯连铸技术	吨钢	18.6	635.8
	废钢 – 电弧炉 – 薄坯连铸技术	吨钢	6.0	205.1
铝				
	铝	吨铝	174	5940
	再生铝	吨铝	7.6	259
水泥				
	普通硅酸盐水泥	吨水泥	3.4	115
	粉煤灰水泥	吨水泥	2.5	84
	高炉矿渣水泥	吨水泥	2.1	73
纸浆				
	非木商品浆	吨（风干）	10.7	364
	牛皮纸木浆	吨（风干）	11.0	377
	亚硫酸盐木浆	吨（风干）	23.6	807
	预机械木浆	吨（风干）	22.6	770
	回收废纸浆	吨（风干）	3.9	133
纸张				
	未涂布纸	吨（风干）	13.7	467
	涂布纸	吨（风干）	16.3	558
	新闻用纸	吨（风干）	11.3	386
	纸板	吨（风干）	15.4	527
	牛皮纸板	吨（风干）	11.7	401
	棉纸	吨（风干）	17.8	608
造纸				
	漂白的未涂布纸	吨（风干）	27.1	925
	牛皮板（未漂白）/包装纸	吨（风干）	24.9	850
	漂白的涂布纸	吨（风干）	24.9	850
	漂白的未涂布纸	吨（风干）	33.4	1139
	新闻纸	吨（风干）	31.1	1061
	杂志印刷纸	吨（风干）	22.7	775
	纸板	吨（风干）	22.6	772
	回收纸板	吨（风干）	28.6	976
	回收新闻用纸	吨（风干）	17.8	608
	回收棉纸	吨（风干）	14.9	509

		单位	GJ/t	kgce/t
合成氨				
	以天然气为原料（蒸汽转化法）	吨氨	28	956
	以煤为原料	吨氨	34.8	1188
乙烯				
	乙烷裂解	吨乙烯	14.5	496
	石脑油裂解	吨乙烯	13	478

注：一次能源消耗包括 67%的发电和输配电的损失。

2 国际最佳实践能耗值

下面是对钢铁、铝、水泥、造纸、合成氨和乙烯国际最佳实践能耗值的详细描述。

2.1 钢铁

基于以下四种工艺流程，本部分提供了钢铁生产的国际最佳实践能耗值，包括：

- 高炉—转炉
- 熔融还原—转炉
- 直接还原—电炉
- 废钢—电炉

四种工艺流程的国际最佳实践能耗值包括了采用连铸法的热轧、冷轧和钢材的能耗值。此外，国际最佳实践也提供了薄坯连铸（近终型）数据。表 2.1.1 和 2.2.2 以及下文中详述了国际最佳实践工艺的终端和一次能源消耗值。

表 2.1.1. 钢铁行业终端用能的国际最佳实践（吨钢能耗）

		高炉—转炉		熔融还原-转炉		直接还原铁—电炉		废钢-电炉	
		GJ/t	kgce/t	GJ/t	kgce/t	GJ/t	kgce/t	GJ/t	kgce/t
原料制备	烧结	1.9	65.2			1.9	65.2		
	球团			0.6	19.0	0.6	19.0		
	炼焦	0.8	28.6						
炼铁	高炉	12.2	414.9						
	熔融还原			17.3	591.6				
	直接还原					11.7	399.6		
炼钢	转炉	-0.4	-15.4	-0.4	-15.4				
	电炉					2.5	85.6	2.4	80.6
	精炼	0.1	4.3	0.1	4.3				
铸轧	连铸	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0
	热轧	1.8	62.5	1.8	62.5	1.8	62.5	1.8	62.5
小计		16.5	562.2	19.5	664.0	18.6	633.9	4.3	145.1
冷轧与加工	冷轧	0.4	13.7	0.4	13.7				
	加工	1.1	38.1	1.1	38.1				
总计		18.0	613.9	21.0	715.8	18.6	633.9	4.3	145.1
铸轧可选技术:	用薄坯连铸技术代替连铸连轧	0.2	6.9	0.2	6.9	0.2	6.9	0.2	6.9
采用可选技术时的总能耗		14.8	504.5	17.8	606.4	16.9	576.2	2.6	87.5

技术工艺总能耗与生产产品所用的原料和原材料流有关，不同工厂之间有着差别；因此不能进行单个工厂工艺之间的能耗比较。热轧能耗值主要是生产热轧钢筋时用的能源，见下表热轧钢条和钢丝的数据。

表 2.1.2. 钢铁行业一次能源消耗的国际最佳实践（吨钢能耗）

		高炉-转炉		熔融还原-转炉		直接还原铁-电炉		废钢-电炉	
		GJ/t	kgce/t	GJ/t	kgce/t	GJ/t	kgce/t	GJ/t	kgce/t
原料制备	烧结	2.2	74.3			2.2	74.3		
	球团			0.8	25.7	0.8	25.7		
	炼焦	1.1	36.3						
炼铁	高炉	12.4	423.7						
	熔融还原			17.9	610.2				
	直接还原					9.2	315.6		
炼钢	转炉	-0.3	-9.5	-0.3	-9.5				
	电炉					5.9	202.9	5.5	187.7
	精炼	0.4	13.0	0.4	13.0				
铸轧	连铸	0.1	3.9	0.1	3.9	0.1	3.9	0.1	3.9
	热轧	2.4	80.4	2.4	80.4	2.4	80.4	2.4	80.4
小计		18.2	622.0	21.2	723.7	20.6	702.7	8.0	272.0
冷轧与加工	冷轧	0.9	32.1	0.9	32.1				
	成品	1.4	48.4	1.4	48.4				
总计		20.6	702.5	23.6	804.2	20.6	702.7	8.0	272.0
铸轧可选技术:	用薄坯连铸技术代替连铸连轧	0.5	17.3	0.5	17.3	0.5	17.3	0.5	17.3
采用可选技术时的总能耗		16.3	555.1	19.2	656.8	18.6	635.8	6.0	205.1

技术工艺总能耗与生产产品所用的原料和原材料流有关，不同工厂之间有着差别；因此不能进行单个工厂工艺之间的能耗比较。热轧能耗值主要是生产热轧钢筋时用的能源，见下表热轧钢条和钢丝的数据。

注：一次能源消耗包括 67%的发电和输配电的损失。

2.1.1 高炉——转炉生产流程

表2.1.3中给出了高炉—转炉生产流程的国际最佳实践按燃料分的能耗值。除了转炉能耗是国际钢铁协会AllTech工厂的数据以外，其他能耗数据均来自国际钢铁协会EcoTech工厂，而EcoTech工厂的技术定义为“被证实是节能并且经济上可行的技术”，AllTech工厂的技术定义为“经济上可行的节能技术，但没有考虑其财务可行性的情况³”。

对于炼钢生产流程来说，国际最佳实践的计算基于以下的假设：生产一吨热轧钢需要1.389吨烧结矿，其中90%生铁和10%废钢；生产一吨热轧钢需要0.9923吨生铁；生产一吨热轧钢需要1.05吨粗钢。

³ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

国际最佳实践炼焦厂采用了现代化标准技术，包括抽风机、利用高压氨水喷雾进行焦炉内煤气的吸附和变速电机和风机。利用干熄焦工艺可以多节约1.44 GJ/t(49 kgce/t)的焦炭（超出了Ecotech的值）。最佳实践没有包括巨型炼焦反应器或无回收炼焦炉。最佳实践的烧结厂采用了最新型工艺，使用料层厚度500 mm的活动炉排，以焦粉为燃料，煤气为点火燃料。回收烧结冷却装置的余热，并且装置的漏风也得到了控制。

在炼铁过程中，烧结矿或球团矿在高炉中经焦炭同时喷煤或油还原成生铁⁴，加入的石灰石作为助熔剂。铁矿石的还原是炼钢生产过程中耗能最多的工艺。最佳实践高炉是现代化大容量的高炉，高炉喷煤量与世界其他现代化工厂相当（相当于大约125 千克燃料/吨铁水，少量的富氧喷煤以及加压运行（4bar），以保证采用TRT发电技术回收能量（湿法）。此外，每个高炉配有3~4个交替运行的热效率为85%的热风炉。燃烧空气是预热的，热风炉燃料为焦炉煤气和高炉煤气的混合气，且不需要喷吹富氧。

转炉工艺通过喷吹氧气，氧化铁水中的碳。通过采用炉外精炼工艺来提高钢的质量。一些配置的安置取决于喷吹氧气的方式。钢厂中使用炉外精炼工艺可以进一步提高钢的质量。在转炉炼钢生产流程中，废钢投入量的比重占的很少，一般为10%-25%。此工艺不需要能量的净投入，甚至可以以转炉煤气和蒸汽的形式输出能量。在最佳实践案例中，由于回收了转炉煤气和显热，因此转炉工序能耗为负值。

⁴ 最佳实践能量消耗也取决于所用铁矿石的含量和品质。由于铁矿石在国际范围内进行交易（包括进口到中国），因此假设世界上所有的钢铁厂都使用相似品质的原材料。

表2.1.3. 高炉—转炉炼钢生产流程的一次能源和终端能耗的国际最佳实践（吨钢能耗）

高炉—转炉生产流程			kgce/t	GJ/t
原料制备	烧结	燃料	67.8	2.0
		蒸汽	-7.6	-0.2
		电	5.1	0.2
		终端能耗	65.2	1.9
		一次能源能耗	74.3	2.2
	炼焦	燃料	21.5	0.6
		蒸汽	3.5	0.1
		电	3.5	0.1
		终端能耗	28.6	0.8
		一次能源能耗	36.3	1.1
炼铁	高炉	燃料	390.5	11.4
		蒸汽	13.6	0.4
		电	3.1	0.1
		氧气	7.7	0.2
		终端能耗	414.9	12.2
		一次能源能耗	423.7	12.4
炼钢	转炉	燃料	-25.4	-0.7
		蒸汽	-5.4	-0.2
		电	3.4	0.1
		氧气	12.1	0.4
		终端能耗	-15.4	-0.4
		一次能源能耗	-9.5	-0.3
	精炼	电	4.3	0.1
		终端能耗	4.3	0.1
铸造	连铸	燃料	1.0	0.0
		电	0.9	0.0
		终端能耗	2.0	0.1
		一次能源能耗	3.9	0.1
热轧	热轧—钢带	燃料	44.8	1.3
		蒸汽	0.7	0.0
		电	10.2	0.3
		终端能源	55.7	1.6
		一次能源能耗	76.5	2.2
	热轧—钢条	燃料	53.8	1.6
		电	8.8	0.3
		终端能耗	62.5	1.8
		一次能源能耗	80.4	2.4
	热轧—钢丝	燃料	57.3	1.7
		电	13.5	0.4
		终端能耗	70.9	2.1
		一次能源能耗	98.4	2.9
小计 (基于热轧钢条)		燃料	509.1	14.9
		蒸汽	4.2	0.1
		电	29.1	0.9
		氧气	19.8	0.6
		终端能耗	562.2	16.5
		一次能源能耗	622.0	18.2

注：一次能耗包括发电、传输和配送过程中 67% 的损失。

表2.1.3. (续表) 高炉—转炉炼钢生产流程一次能源和终端能耗的国际最佳实践
(吨钢能耗)

高炉—转炉生产流程			kgce/t	GJ/t
冷轧	冷轧	燃料	1.8	0.1
		蒸汽	3.0	0.1
		电	8.8	0.3
		终端能耗	13.7	0.4
		一次能源能耗	32.1	0.9
钢材	钢材	燃料	24.9	0.7
		蒸汽	8.9	0.3
		电	4.3	0.1
		终端能耗	38.1	1.1
		一次能源能耗	48.4	1.4
总计 (主要为热轧钢条)		燃料	535.8	15.7
		蒸汽	16.0	0.5
		电	42.3	1.2
		氧气	19.8	0.6
		终端能耗	613.9	18.0
		一次能源能耗	702.5	20.6
可供选择方案:				
铸轧	用薄坯连铸技术代替连铸、热轧、冷轧和成材。	燃料	1.7	0.1
		电	5.2	0.2
		终端能耗	6.9	0.2
		一次能源能耗	17.3	0.5
总计		燃料	456.0	13.4
		蒸汽	4.2	0.1
		电	24.5	0.7
		氧气	19.8	0.6
		终端能耗	504.5	14.8
		一次能源能耗	555.1	16.3

注：一次能源能耗包括67%的发电和传配电的损失。

2.1.2 熔融还原—转炉

表2.1.4中是熔融还原—转炉生产流程的最佳实践按燃料分的能耗数据。这些数据都是来自于国际钢铁协会EcoTech工厂能耗数据，其定义为“被证实是节能技术，且在经济上具有可行性⁵”。

⁵ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

熔融还原是生铁生产过程中最新发展起来的工艺，将煤炭气化与铁矿还原联合起来，省去了焦炭生产的过程⁶。焦炭生产过程的省去和铁矿制备过程的简化减少了耗能量。CCF, DIOS, AISI, 和 HISmelt技术工艺正处于开发过程中。最近只有COREX技术工艺（奥地利Voest-Alpine）在南非、韩国、印度进行商业运行，中国宝钢正在进行建设（2007年启动）。COREX工艺采用熔池产生的气体对烧结铁矿进行预还原，预还原后的铁矿在熔池中熔化。该工艺过程产生的多余气体可以用来发电，还可用于直接还原生产或作为燃料气体使用。FINEX技术使用的是矿粉，但是第一个商业化运行的工厂正处于建设中，所以没有包括在最佳实践中。同样，第一家商业化应用HISmelt工艺的工厂在澳大利亚也处于建设中。

目前，从采用COREX工艺的情况来看，其能耗水平与高炉工艺相当。煤炭消耗率比高炉要高，但是产生的大量废气余热可以作为传统的蒸汽循环发电的燃料。废气余热还可以用来生产直接还原铁（南非的Saldanha钢厂就是这样利用余热），但是它不作为最佳实践。

采用COREX工艺工厂的最佳实践能耗值主要是依据位于韩国POSCO浦项的商业化运行的工厂数据⁷。该工厂的煤炭消耗量约为29.4 GJ/thm (100 kgce/t)，每吨铁水耗电75 kWh/t (9.2 kgce/t)，每吨铁水耗氧526 Nm³/t。每吨铁水产生余能13.4 GJ/t (457 kgce/t)⁸。

转炉工艺通过喷吹氧气，氧化铁水中的碳。通过采用炉外精炼工艺来提高钢的质量。一些配置的安置取决于喷吹氧气的方式。钢厂中使用炉外精炼工艺可以进一步提高钢的质量。通过采用炉外精炼工艺来提高钢的质量。在转炉炼钢生产过程中，废钢投入量的比重占的很少，一般为10%-25%。此工艺不需要能量的净投入，甚至可以以转炉煤气和蒸汽的形式输出能量。

⁶ 最佳实践的能源利用取决于所用铁矿的含量和品质；假设所有的工厂都使用相似品质的原材料。

⁷ Voest Alpine Industrieanlagenbau, 1996. *COREX*, 炼铁革命, Linz Austria:VAI.;de Beer, J., Worrell, E., Blok, K., 1998. 钢铁节能新技术, 能源环境年度回顾, 23: 123-205。

⁸ 国际钢铁协会, 1998. 钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

表2.1.4. 熔融还原—转炉炼钢工艺一次能源和终端能耗的国际最佳实践（吨钢能耗）

熔融还原—转炉			kgce/t	GJ/t
原料制备	球团	燃料	15.6	0.5
		电	3.3	0.1
		终端能耗	19.0	0.6
		一次能源能耗	25.7	0.8
炼铁	熔融还原	燃料	541.8	15.9
		电	9.1	0.3
		氧气	40.6	1.2
		终端能耗	591.6	17.3
		一次能源能耗	610.2	17.9
炼钢	转炉	燃料	-25.4	-0.7
		蒸汽	-5.4	-0.2
		电	3.4	0.1
		氧气	12.1	0.4
		终端能耗	-15.4	-0.4
		一次能源能耗	-9.5	-0.3
	成材	电	4.3	0.1
		终端能耗	4.3	0.1
铸造	连铸	燃料	1.0	0.0
		电	0.9	0.0
		终端能耗	2.0	0.1
		一次能源能耗	3.9	0.1
热轧	热轧—钢带	燃料	44.8	1.3
		蒸汽	0.7	0.0
		电	10.2	0.3
		终端能耗	55.7	1.6
		一次能源能耗	76.5	2.2
	热轧—钢条	燃料	53.8	1.6
		电	8.8	0.3
		终端能耗	62.5	1.8
		一次能源能耗	80.4	2.4
	热轧—钢丝	燃料	57.3	1.7
		电	13.5	0.4
		终端能耗	70.9	2.1
小计 (主要为热轧钢条)		燃料	586.8	17.2
		蒸汽	-5.4	-0.2
		电	29.8	0.9
		氧气	52.8	1.5
		终端能耗	664.0	19.5
一次能源能耗	723.7	21.2		

注：一次能源能耗包括67%的发电和输配电损失。

续表 2.1.4. (续表) 熔融还原—转炉炼钢工艺一次能源和终端能耗的国际最佳实践
(吨钢能耗)

熔融还原—转炉		kgce/t	GJ/t	
冷轧	冷轧	燃料	1.8	0.1
		蒸汽	3.0	0.1
		电	8.8	0.3
		终端能耗	13.7	0.4
		一次能源能耗	32.1	0.9
成材	成材	燃料	24.9	0.7
		蒸汽	8.9	0.3
		电	4.3	0.1
		终端能耗	38.1	1.1
		一次能源能耗	48.4	1.4
总计 (主要为热轧钢条)		燃料	613.5	18.0
		蒸汽	6.5	0.2
		电	43.0	1.3
		氧气	52.8	1.5
		终端能耗	715.8	21.0
		一次能源能耗	804.2	23.6
可供选择方案:				
铸轧	用薄坯连铸技术代替连铸、热轧、冷轧和加工。	燃料	1.7	0.1
		电	5.2	0.2
		终端能耗	6.9	0.2
		一次能源能耗	17.3	0.5
总计		燃料	533.8	15.6
		蒸汽	-5.4	-0.2
		电	25.3	0.7
		氧气	52.8	1.5
		终端能耗	606.4	17.8
		一次能源能耗	656.8	19.2

注：一次能源能耗包括67%的发电和输配损失。

2.1.3 直接还原—电炉

表2.1.5中给出了直接还原—电炉工艺流程的国际最佳实践按燃料分的能耗数据。直接还原铁、热压铁、渗碳铁都是炼铁工艺中的可供选择的技术⁹。直接还原铁也被称作海绵铁，是由小规模工厂(<100万吨/年)在低于熔点的条件下直接还原铁矿生产出来的，与铁水有不同的性质。直接还原铁在炉外精炼过程中可作为废钢的高质量替代物。

采用直接还原铁工艺的工厂使用天然气或煤作为还原剂。就全球范围来讲，天然气普遍为首选还原剂（先进的Midrex and HyL-III工艺就利用天然气）。在中国以煤炭为基础的工艺比天然气更适合（因为天然气仅在少数几个地区可以获得）。SL/RN工艺是唯一商业化运作并以煤为助剂的直接还原铁工艺，目前在印度、南非和中国运行。新的Circofer/Circored工艺在特立尼达和多巴哥共和国进行示范，而其他的技术也在积极测试中。在最佳实践中包括了SL/RN工艺。每吨直接还原铁SL/RN工艺消耗煤炭19.5 GJ、电100 kWh。回收的工艺余热可以采用传统蒸汽循环方式发电，相当于每吨直接还原铁发电609 kWh，净发电量估计为每吨直接还原铁509 kWh电（62.5 kgce/t直接还原铁）¹⁰。

电炉炼钢工艺采用强电流熔化和精炼废钢的方式，省略了焦炭、生铁和钢生产过程，其结果是使能耗进一步降低。电炉也可以冶炼从直接还原铁工艺生产的铁，但每吨钢水的电耗要增加40-120 kWh，具体的电量取决于所加入直接还原铁的数量和品质。如果高品质废钢缺乏或价格昂贵的时候，直接还原铁可用来提高钢的品质。直接还原铁用于提高钢的质量，或在高质量的废铁稀少或昂贵时使用。工艺的不确定性会随着采用直流电或交流电不同而变化着，可以采用燃料喷吹方式降低电量的使用。

最佳实践电炉工厂使用的是最新型技术，包括电炉偏心底出钢、超高压变压器、吹氧和喷碳技术。使用60%的直接还原铁和40%高品质废钢混合炼钢。高比例的直接还原炉料限制了燃料喷入的可行性。尽管废钢预热工艺在大型电炉中普遍应用，但最佳实践案例中没有包括。在上述电炉装料的情况下，使用废钢预热炉每吨钢水可节电40 kWh。

最佳实践的直接还原-电炉钢厂是具有偏心炉底出钢、超高电力变压器、吹氧和喷碳技术的工厂。电炉60%的直接还原铁和40%高品质废钢混合炼钢。直接还

⁹ McAloon, T.P., 1994. “最新备选炼铁技术”，钢铁制造厂 21(2): 37-39 + 55.

¹⁰ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

原铁的高热装比限制着燃料喷吹的可行性。虽然大量用于炉中，但是最佳实践不包括废钢预热。对以上的热装比，废钢预热可以实现每吨钢水节电40 kWh。

最佳实践的直接还原—废钢为炉料—电炉使用60%的直接还原铁和40%高品质废钢混合炼钢。电炉每吨钢水消耗电530 kWh（65 kgce），炉气净化和炉外精炼每吨钢水消耗电65 kWh（8kgce）以及8 kg碳。在电弧炉工艺流程中使用废钢预热炉可将吨钢水耗电量减少40 kWh(4.9 kgce)，每吨钢水的总耗电量减少到555 kWh（68.2 kgce）。

表 2.1.5. 直接还原-电炉工艺一次能源和终端能耗的国际最佳实践（吨钢能耗）

直接还原-电炉工艺			Kgce/t	GJ/t
原料制备	烧结	燃料	67.8	2.0
		蒸汽	-7.6	-0.2
		电	5.1	0.2
		终端能耗	65.2	1.9
		一次能源能耗	74.3	2.2
	球团	燃料	15.6	0.5
		电	3.3	0.1
		终端能耗	19.0	0.6
一次能源能耗		25.7	0.8	
炼铁	直接还原	燃料	440.9	12.9
		电	-41.4	-1.2
		终端能耗	399.6	11.7
		一次能源能耗	315.6	9.2
炼钢	电炉	燃料	19.2	0.6
		电	57.8	1.7
		氧气	8.6	0.3
		终端能耗	85.6	2.5
		一次能源能耗	202.9	5.9
铸造	连铸	燃料	1.0	0.03
		电	0.9	0.03
		终端能耗	2.0	0.1
		一次能源能耗	3.9	0.1
热轧	热轧 - 带钢	燃料	44.8	1.3
		蒸汽	0.7	0.02
		电	10.2	0.3
		终端能耗	55.7	1.6
		一次能源能耗	76.5	2.2
	热轧 - 钢条	燃料	53.8	1.6
		电	8.8	0.3
		终端能耗	62.5	1.8
		一次能源能耗	80.4	2.4
	热轧 - 线材	燃料	57.3	1.7
		电	13.5	0.4
		终端能耗	70.9	2.1
一次能源能耗		98.4	2.9	
总计 (主要为热轧钢条)		燃料	598.3	17.5
		蒸汽	-7.6	-0.2
		电	34.6	1.0
		氧气	8.6	0.3
		终端能耗	633.9	18.6
		一次能源能耗	702.7	20.6

注：一次能耗包括67%的发电和输配电的损失。

表 2.1.5. (续表) 直接还原-电炉工艺一次能源和终端能耗的国际最佳实践 (吨钢能耗)

直接还原-电炉工艺		kgce/t	GJ/t	
可供选择方案:				
铸轧	用薄坯连铸技术代替连铸、热轧、冷轧和加工。	燃料	1.7	0.1
		电	5.2	0.2
		终端能耗	6.9	0.2
		一次能源能耗	17.3	0.5
总计		燃料	545.2	16.0
		蒸汽	-7.6	-0.2
		电	30.0	0.9
		氧气	8.6	0.3
		终端能耗	576.2	16.9
		一次能源能耗	635.8	18.6

注：一次能耗包括67%的发电和输配损失。

2.1.4 电炉

电炉炼钢工艺采用强电流熔化和精炼废钢的方式，省略了焦炭、生铁和钢生产过程，其结果是使能耗进一步降低。工艺的不确定性会随着采用直流电或交流电不同而变化着，可以采用燃料喷吹方式降低电量的使用。

表2.1.6 给出了电炉工艺最佳实践按燃料分的能耗数据。最佳实践电炉工厂最新型设备使用100%高品质废钢。电炉工艺有偏心底出钢、超高压变压器、吹氧、全泡沫渣运行、氧燃烧嘴和喷碳技术。尽管废钢预热经济上具有吸引力，特别是针对于大型的炉子来讲，但本报告没有采用。废钢预热可使每吨钢水降低电耗70 kWh。

以直接还原-废钢作为炉料的电炉的最佳实践使用100%废钢，每吨电炉钢水耗电409 kWh (50.3 kgce)，炉气净化和炉外精炼是每吨钢耗电65kWh (8kgce)、天然气0.15GJ (5.1kgce) 和8公斤碳。在电炉生产流程中使用废钢预热炉可以将每吨钢水耗电减少70 kWh (8.6 kgce)，每吨钢水的总耗电量减少到404kWh (49.6 kgce)。

表 2.1.6. 电炉工艺流程一次能源和终端能耗的国际最佳实践（吨钢能耗）

电炉工艺			kgce/t	GJ/t
炼钢	电炉	燃料	19.2	0.6
		蒸汽	52.8	1.5
		电	8.6	0.3
		终端能耗	80.6	2.4
		一次能源能耗	187.7	5.5
铸造	连铸	燃料	1.0	0.03
		电	0.9	0.03
		终端能耗	2.0	0.1
		一次能源能耗	3.9	0.1
热轧	热轧 – 带钢	燃料	44.8	1.3
		蒸汽	0.7	0.02
		电	10.2	0.3
		终端能耗	55.7	1.6
		一次能源能耗	76.5	2.2
	热轧 – 钢条	燃料	53.8	1.6
		电	8.8	0.3
		终端能耗	62.5	1.8
		一次能源能耗	80.4	2.4
	热轧 – 线材	燃料	57.3	1.7
		电	13.5	0.4
		终端能耗	70.9	2.1
		一次能源能耗	98.4	2.9
总计 (主要为热轧钢条)		燃料	74.0	2.2
		电	62.5	1.8
		氧气	8.6	0.3
		终端能耗	145.1	4.3
		一次能源能耗	272.0	8.0
可供选择方案:				
铸轧	用薄坯连铸技术代替连铸、热轧、冷轧和加工。	燃料	1.7	0.1
		电	5.2	0.2
		终端能耗	6.9	0.2
		一次能源能耗	17.3	0.5
总计		燃料	20.9	0.6
		电	57.9	1.7
		氧气	8.6	0.3
		终端能耗	87.5	2.6
		一次能源能耗	205.1	6.0

注：一次能耗包括67%的发电和输配电损失。

2.1.5 连铸

连铸数据基于国际钢铁协会EcoTech工厂能耗值，包括了“被证实节能并经济上可行的技术”¹¹，薄板坯/近终型连铸技术的能耗值基于Worrell等（2004）工厂的数据¹²。铸造可以是连铸也可以是薄板坯/近终型连铸。最佳实践连铸工艺生产的每吨钢终端能耗为0.06 GJ（2.0 kgce）¹³。消耗的能源只是用来烘干和预热钢包，加热中间包和驱动铸造设备的电机。薄板坯连铸是一种更先进的铸造技术，减少了部分的热轧工序，这是因为铸造通过连铸机的快速加热炉之后，直接进行轧制，使产品接近于其最终的形状，从而减少多次加热和热轧工序。薄板坯连铸连轧技术的终端用能为吨钢0.20 GJ（6.9 kgce）。

2.1.6 热轧和成材

热轧

热轧工序是采用热轧机轧制铸钢。铸钢经过加热后再经过重型热轧机轧制成热轧钢板。热轧带钢、钢条（棒材）、线材最佳实践的吨钢终端能耗分别为1.55 GJ (53.0 kgce)，1.75 GJ (59.6 kgce)，1.98 GJ(67.5 kgce)¹⁴。最佳实践热轧带钢机的电耗是基于荷兰艾默伊登Corus公司的数值¹⁵。最佳实践采用的是100%冷坯装炉，使用的是带有控制器、节能燃烧嘴的步进式炉以及高效电机。热装和高效电机的采用可以进一步降低热轧机的能耗。

冷轧

热轧钢板可通过冷轧进一步降低钢板的厚度。带钢卷首先在酸洗机上处理，然后再经过连续冷轧机的轧制。冷轧最佳实践的吨冷轧钢板终端能耗分别为蒸汽0.09 GJ (3.0 kgce)、燃料0.053 GJ (1.8 kgce)、电耗87 kWh(10.7 kgce)¹⁶，相当于吨冷轧钢板的能耗为0.47 GJ(13.7 kgce)。

成材

钢成材是炼钢工序的最后生产流程，包括退火和平整等不同工艺。分批退火最佳实践能耗值分别为蒸汽0.173 GJ/t，燃料0.9 GJ/t、电耗35 kWh/t，相当于1.2

¹¹ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源应利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

¹² Worrell, E., Price, L., and Galitsky, C., 2004. “工业上新兴的节能技术：选择技术的案例研究”，技术附件第3章：国家能源政策委员会的能源政策报告*打破能源僵局：迎接美国能源挑战之两党战略* (<http://www.energycommission.org/>)。

¹³ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

¹⁴ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

¹⁵ 提高工业能源和原料利用的潜力，博士论文，Utrecht 大学，1994年6月。

¹⁶ 国际钢铁协会，1998。钢铁工业的能源利用。布鲁塞尔国际钢铁协会。

GJ/t (41.0 kgce/t)能源消耗。连续退火最佳实践能耗假定值分别为燃料0.73 GJ/t，蒸汽0.26 GJ/t、电耗35 kWh/t，相当于1.1 GJ/t (or 38.1 kgce/t) 能源消耗。连续退火是最新型技术，所以被作为最佳实践技术。

2.2. 铝

铝的生产过程包括以下五个步骤：铝土矿提炼、氧化铝生产、阳极制造、铝电解和铝锭铸造。本估算没有将铝土矿的提取炼考虑在内，因为铝土矿提炼的能耗主要取决于矿藏的特性。再生铝的生产基于废铝的熔化和成型。表 2.2.1 中数据是有关铝和再生铝工艺水平最佳实践的终端能耗值。表 2.2.2 中数据是有关这两种铝生产工艺的一次能源消耗。

表 2.2.1. 铝生产终端能耗的国际最佳实践（吨铝能耗）

		铝		再生铝	
		kgce/t	GJ/t	kgce/t	GJ/t
氧化铝生产 (拜耳法)	溶出 (燃料)	414	12.1		
	煅烧炉(燃料)	223	6.5		
	电	48	1.4		
阳极制造 (碳)	燃料	35	1.0		
	电	7	0.21		
铝电解	电	1671	49.0		
铝锭铸造	电	12	0.35		
总计		2411	70.6	85	2.5

表 2.2.2. 铝生产一次能源消耗的国际最佳实践（吨铝能耗）

		铝		再生铝	
		kgce/t	GJ/t	kgce/t	GJ/t
氧化铝生产 (拜耳法)	溶出 (燃料)	414	12.1		
	煅烧炉(燃料)	223	6.5		
	电	145	4.3		
阳极制造 (碳)	燃料	35	1.0		
	电	22	0.64		
铝电解	电	5064	148.4		
铝锭铸造	电	36	1.06		
总计		5940	174.0	259	7.6

注：一次能耗包括67%的发电和输配电损失。

2.2.1 铝生产

铝土矿¹⁷可通过拜耳法（即粉碎铝土矿，并在热氢氧化钠溶液中将其溶解）转化为氧化铝。氧化铁和其他氧化物因为是不能溶解的“红泥”而被除去。沉淀热氢氧化钠溶液再煅烧从而生产出无水氧化铝。拜耳法工艺能耗较高，尤其是在溶出和煅烧工艺中。可以回转或固定炉中进行煅烧，得到的氧化铝在回轮的或附属的冷却器，或在流化床冷却器中冷却。

拜耳法生产工艺中，电和燃料消耗分别大约占总能耗的 13% 和 85%。通常约 2 吨氧化铝生产 1 吨铝(这里假定按 1.925 吨氧化铝生产 1 吨铝)，吨氧化铝电耗的最佳实践估计为 203 kWh (24.9 kgce)，或吨铝 391 kWh (48 kgce)。吨氧化铝的溶出能耗在 6.3 GJ~12.6 GJ(215~430 kgce)之间，或吨铝能耗在 12.1GJ~24.3 GJ(414~828 kgce)之间，而煅烧窑燃料的消耗为吨氧化铝 3.4 GJ~4.2 GJ(116~143 kgce)之间，或吨铝能耗在 6.5 GJ~8.1 GJ(223~276 kgce)之间¹⁸。

拜耳法工艺最佳实践的吨氧化铝燃料总能耗为 9.7 GJ (331 kgce)，吨铝能耗为 18.7 GJ(637 kgce)；吨氧化铝电耗为 203 kWh。因此，假定吨氧化铝的总能耗为 10.4 GJ(356 kgce)，吨铝能耗为 20.1 GJ(685 kgce)。

2.2.2 阳极生产

在电解铝生产中，预焙阳极的能效水平最高。目前，惰性阳极（包含硼化钛，TiB₂）处在研发阶段，还没有商业化应用。因此，本报告假定预焙阳极是最佳实践。

在天然气加热的阳极炉中，通过加热和在高温中压缩沥青或精炼中的焦炭，生产阳极。阳极的生产可以在工厂的冶炼厂中进行，也可以专门为多种工业应用生产碳阳极的工厂中进行。

阳极炉可以使用各种不同的燃料，大多数国家采用天然气做燃料。阳极生产的燃料单耗估计为 2.45 GJ（84 kgce），耗电为 140 kWh^{19, 20}。能效最高的熔炉

¹⁷ 能源使用量的最佳实践值也由矿的浓度和品质所决定的；假设所有的工厂都可以采用相似品质的原材料。

¹⁸ Worrell, E. and de Beer, J., 1991.有关防止或重新利用废气的能源需求。报告：荷兰 Utrecht: Novem.

¹⁹ 国际铝业学会(2003)。铝的生命周期评估：国际原生铝业库存量数据。

²⁰ Worrell, E. and de Beer, J., 1991.有关防止或重新利用废气的能量需求。报告：荷兰 Utrecht: Novem.

吨铝消耗 400~440 千克阳极²¹。假设生产吨铝需要 0.42 吨阳极，则吨铝的燃料消耗为 1.0 GJ (35 kgce)，电耗为 0.21 GJ(7 kgce)，吨铝阳极生产的总能耗为 1.2 GJ(42 kgce)。

2.2.3 铝电解

商用铝电解的基础是 Hall-Heroult 工艺。目前，铝电解采用两种技术，即预焙阳极电解槽和自焙阳极电解槽。近几年有五种铝电解技术得到了普遍应用：

自焙阳极电解槽：

- 垂直分布自焙阳极电解槽
- 水平分布自焙阳极电解槽

预焙阳极电解槽：

- 点饲料预焙法
- 中心饲料预焙法
- 侧预焙法

采用自焙阳极电解槽的铝厂比预焙电解槽能耗更高，带来的环境问题更多，不作为最佳实践的考虑。最佳实践的技术是中心饲料预焙法电解槽。目前中心饲料预焙法使用 300-315 kA 电流(电流密度为 0.8 – 0.85 A/cm²)，吨铝消耗 400-440 kg 的阳极²²。

吨电解铝的理论最低能耗为 6,360 kWh^{23,24}。但目前还没有电解槽的电流设计接近于热力学的最小值。现行的霍尔赫劳尔特电解槽(300-315kA)的最佳实践能耗估计值为吨铝 12900~13000 kWh。由于整流器、辅助系统、污染控制系统造成的损失，吨铝需要额外多耗电 700 ~ 1000 kWh。因此，最佳实践铝电解的总能耗估计为吨铝 13600 kWh 或 49 GJ (1671kgce)，其中包括了所有的设备。

²¹ 欧盟委员会 污染综合防治和控制：有色金属行业最佳可行技术的参考文献 布鲁塞尔 / 塞维利亚，2001 年 12 月。

²² 欧盟委员会 污染综合防治和控制：有色金属行业最佳可行技术的参考文献 布鲁塞尔 / 塞维利亚，2001 年 12 月。

²³ Choate, W.T., Green, J.A.S., 2003. 美国 铝生产过程中的能源需求：历史展望、理论限制和新机遇。华盛顿：BCS, Inc.

²⁴ Beck, T.R., 2001. “电解铝生产”，电化学百科全书，电化学技术公司。

(<http://electrochem.cwru.edu/ed/encycl/art-a01-al-prod.htm>)

2.2.4 铝锭铸造

熔融态铝通常被铸造成铝锭。铝锭也经常与其他金属铸成具有特殊用途的合金铝。铝锭可以有多种不同的外形（比如，板、卷、棒、坯）。在完成铸造后，铝锭经冷却并运到终端用户。终端用户用铸轧的方式将铝锭加工成最终产品（比如塑板、铸件）。

合金铸造的过程在炉内完成，铸造炉可由燃料或电加热。假定铝是热装热送到铝合金炉中直接铸造，最佳实践的吨铝电耗估计为 0.35 GJ^{25} (12kgce)。但在实际生产中，能耗将取决于铝的温度、保温时间和铸造顺序。

2.2.5 再生铝生产

由于废铝熔炼的温度相对较低，一般在 $700\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，因此利用废铝熔炼再生铝的能耗只需要原生铝生产能耗的 5% 。因废铝可能含有多种元素，一些元素很难去除，再生铝产品的纯度很难掌握，所以再生铝产品不能广泛地应用。

可采用不同的技术回收废铝，如反射炉和感应电炉。回转电弧炉和等离子炉等一些新技术正在涌现。最佳适合技术的选择取决于所使用的废铝质量。

铝熔炼的理论能耗值为 1.1 GJ (38 kgce)。但目前没有熔炉能够接近这个水平。最佳实践是假设采用燃天然气的反射炉，反射炉的燃料消耗为 $3 \text{ GJ/t} \sim 9 \text{ GJ/t}$ ($102 \sim 307 \text{ kgce/t}$)。对于最佳实践来说，使用带有换热式烧嘴和最新型电脑控制的大型反射炉，吨铝需要消耗天然气 2.5 GJ (85 kgce)²⁶。

²⁵ 国际铝业学会(2003)。铝生命周期评估：国际原生铝业库存量数据。

²⁶ Flannagan, J.M., 1993. 金属工业加热工艺。Sittard, The Netherlands: IEA-Caddet.

2.3 水泥

水泥制造工艺包括了生料制备（石灰石和燃料）、熟料制备（燃料和电）、助剂干燥、终粉磨和其它耗能生产工艺，包括采选矿石、辅助设备、输送机和产品包装。表 2.3.1~表 2.3.3 中给出了水泥制造各个工艺流程的最佳实践的终端能耗值，表 2.3.4 和表 2.3.5 中给出了一次能源能耗值。其他非生产能耗（照明、办公设备等）的计算基于生产量和 Warshawsky（1996）的研究²⁷。

熟料制备能耗约占水泥生产总能耗 90%，因此在熟料中掺入添加剂以降低最终水泥与熟料配比率，能大幅度降低水泥生产能耗。添加剂使用的最佳实践值基于以下的欧洲 ENV 197-2 标准：普通（硅酸盐）水泥：35%为粉煤灰和 65%熟料混合；高炉矿渣水泥：65%高炉渣和 35%熟料²⁸。表 2.3.1~表 2.3.6 中给出了三种水泥的终端能耗和一次能源消耗（普通水泥、粉煤灰水泥和高炉矿渣水泥）。

2.3.1 生料和燃料的制备

生料制备过程中的能耗包括生料破碎、粉磨和烘干（如果需要）生料(主要是成分是石灰石)。入窑的固体燃料也必须经过破碎、碾磨和烘干。生料制备的最佳实践基于每吨生料用电 0.38 kWh 的旋回破碎机²⁹；装有桥式刮板取料机的纵向预混合存储器，或者斗轮取料机，或者装有桥式刮板取料机的循环预混合存储器进行预混合（预均化和预配料），每吨生料用电 0.5 kWh³⁰；粉磨工艺使用的有四个辊磨和一个高效选粉机的综合立式辊磨系统，每吨生料用电 11.45 kWh³¹；均化工艺中使用的重力（多出口筒仓）干燥系统，每吨生料用电 0.10 kWh³²。因此，生料制备的总最佳实践值为每吨生料用电 12.05 kWh。理想状态下，此电耗数据应考虑原材料的水分含量和石灰石的硬度因素。高水分含量的原材料需要消耗更多的能源进行烘干，硬的石灰石也需要更多能源来破碎、粉磨。如果必须进行烘干，最佳实践则需要安装烘干原料的预热器，这就降低了烧窑的效率。在本分析中，假设预热器烘干湿原料忽略不计，同时也没有降低烧窑的效率。

²⁷ Warshawsky, J. of CMP. 1996. 科技注解：水泥生产中的电耗。原料生产 EPRI 中心。Carnegie Mellon 研究中心, Pittsburgh, PA.

²⁸ CEM 是普通水泥，≤5%添加剂，95%熟料。

²⁹ 硅酸盐水泥协会，2004。硅酸盐水泥制造中的技术革新。Skokie, 伊力诺依州：硅酸盐水泥协会。

³⁰ 欧洲水泥统计局，1997。水泥行业最佳可获得的技术，布鲁塞尔：欧洲水泥统计局。

³¹ Schneider, U., Bosenberg 水泥厂第一台 Quadropol 辊磨：从订购到使用。ZKG International, No.8, 1999: 460-466.

³² 硅酸盐水泥协会，2004。硅酸盐水泥制造中的技术革新。Skokie, 伊力诺依州：硅酸盐水泥协会。

固体燃料的制备取决于燃料的含水量。假设只有煤炭需要烘干碾磨，烘干或破碎其他原料的能耗可以忽略不计。最佳实践是利用窑系统的余热，比如烘干煤炭的熟料冷却器（如果有的话）³³。使用 MPS 立式辊磨的最佳实践值为：每吨无烟煤用电 10-36 kWh，每吨烟煤用电 6-12 kWh，每吨褐煤用电 8-19 kWh，每吨石油焦用电 7-17 kWh³⁴，如使用球磨，每吨产品电耗 10-18 kWh³⁵。因此，可以假定固体燃料制备的最佳实践值为每吨产品电耗 10 kWh。

2.3.2 熟料生产

熟料生产能耗包括设备运行耗电和烘干、煅烧和烧成熟料的电耗；设备运行电耗包括驱动鼓风机、水泥窑、冷却机和将生料传送到预热塔顶端的能耗。熟料生产最佳实践的能耗估计为吨熟料 22.5 kWh³⁶，燃料消耗为吨熟料 2.85 GJ (97.3 kgce)³⁷。

2.3.3 添加剂的制备

除了熟料以外，一些工厂在最终水泥制造中使用添加剂。虽然添加剂能够减少高耗能的熟料生产，还能减少碳化反应过程，但反应过程会产生额外的 CO₂，而混合和粉磨添加剂需要额外的耗电量，同时也需要额外的燃料烘干高炉煤渣和其他炉渣的添加剂。

³³ Worrell, E. and Galitsky, C., 2004. 提高水泥生产能效的机遇：能源和工厂经理的“能源之星”指南。加州：劳伦斯伯克利实验室 ([LBNL-54036](#)).

³⁴ Kraft, B. and Reichardt, Y., 2005. 使用 MPS 立式辊磨粉磨固体燃料。 *ZKG International* 58:11 (pp 36-47).

³⁵ 硅酸盐水泥协会，2004。硅酸盐水泥制造中的技术革新。Skokie, 伊力诺依州：硅酸盐水泥协会。

³⁶ COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. 水泥行业的能源技术, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April.

³⁷ Park, H. 1998. 韩国生产部门节能潜力评价的战略。1998 韩国生产部门用能大会论文集：节能与 CO₂ 减排政策分析。19-20 May, POSCO Center, Seoul, Republic of Korea.

表 2.3.1. 含 5% 添加剂的普通（硅酸盐）水泥终端能耗的国际最佳实践

		产品单位	kWh/t 产品	kgce/t 产品	GJ/t 产品	kWh/t 熟料	kgce/t 熟料	GJ/t 熟料	kWh/t 水泥	kgce/t 水泥	GJ/t 水泥
生料制备	电	吨原料	12.05	1.5	0.04	21.3	2.62	0.08	20.3	2.49	0.07
固体燃料制备	电	吨煤	10	1.2	0.04	0.97	0.12		0.92	0.11	
熟料制备	燃料	吨熟料					97	2.85		92	2.71
	电	吨熟料				22.5	2.76	0.08	21.4	2.63	0.08
添加剂制备	燃料	吨添加剂									
	电	吨添加剂									
粉磨、水泥制造											
325 号水泥	电	吨水泥							16	2.0	0.06
425 号水泥	电	吨水泥							17.3	2.1	0.06
525 号水泥	电	吨水泥							19.2	2.4	0.07
625 号水泥	电	吨水泥							19.8	2.4	0.07
总计											
325 号水泥		吨水泥							59	99.6	2.92
425 号水泥		吨水泥							60	99.8	2.92
525 号水泥		吨水泥							62	100.0	2.93
625 号水泥		吨水泥							62	100.1	2.93

注：所有数据都是终端能耗。假定每吨熟料的生料比是 1.77 吨，普通水泥的煤和熟料比是 0.097；添加剂和普通水泥中水泥比是 0.05；熟料和普通水泥中水泥比是 0.95。粉磨和混合添加剂的耗电（除了混合碾磨和形成最终产品的耗电外）因生料破碎程度不同而不同。文章中有更详细的描述。

表 2.3.2. 粉煤灰水泥终端能耗的国际最佳实践

		产品单位	kWh/t 产品	kgce/t 产品	GJ/t 产品	kWh/t 熟料	kgce/t 熟料	GJ/t 熟料	kWh/t 水泥	kgce/t 水泥	GJ/t 水泥
生料制备	电	吨原料	12.05	1.5	0.04	21.3	2.62	0.08	13.9	1.70	0.05
固体燃料制备	电	吨煤	10	1.2	0.04	0.97	0.12		0.63	0.08	
熟料制备	燃料	吨熟料					97	2.85		63	1.9
	电	吨熟料				22.5	2.8	0.08	14.6	1.80	0.05
添加剂制备	燃料	吨添加剂									
	电	吨添加剂							7	0.86	0.03
粉磨、水泥制造											
325 号水泥	电	吨水泥							23	2.8	0.08
425 号水泥	电	吨水泥							25	3.1	0.09
525 号水泥	电	吨水泥							28	3.4	0.10
625 号水泥	电	吨水泥							28	3.5	0.10
总计											
325 号水泥		吨水泥							52	69.6	2.04
425 号水泥		吨水泥							54	69.9	2.05
525 号水泥		吨水泥							57	70.2	2.06
625 号水泥		吨水泥							na	na	na

注：所有数值都是终端能耗。假定每吨熟料的生料比是 1.77 吨，粉煤灰水泥的煤炭和熟料的比是 0.097；粉煤灰水泥的泥添加剂和水泥比是 0.35（5%的石膏和无水石膏，30%的粉煤灰）；粉煤灰水泥的熟料和水泥比是 0.65。混合和碾磨添加剂的电耗（除了混合碾磨和形成最终产品耗电外）因原料破碎程度不同而不同。文章中有更详细的描述。

表 2.3.3. 高炉矿渣水泥终端能耗的国际最佳实践

		产品单位	kWh/t 产品	kgce/t 产 品	GJ/t 产 品	kWh/t 熟料	kgce/t 熟料	GJ/t 熟料	kWh/t 水泥	kgce/t 水 泥	GJ/t 水 泥
生料制备	电	吨原料	12.05	1.5	0.04	21.33	2.62	0.08	7.5	0.92	0.03
固体燃料制备	电	吨煤	10	1.2	0.04	0.97	0.12		0.34	0.04	
熟料制备	燃料	吨熟料					97.3	2.85		34.0	1.00
	电	吨熟料				22.5	2.8	0.08	7.9	1.0	0.03
外加剂制备	燃料	吨添加剂		25.6						15.4	0.45
	电	吨添加剂							25	3.07	0.09
粉磨、水泥制造											
325 号水泥	电	吨水泥							41	5.0	0.15
425 号水泥	电	吨水泥							44	5.4	0.16
525 号水泥	电	吨水泥							49	6.0	0.18
625 号水泥	电	吨水泥							51	6.2	0.18
总计											
325 号水泥		吨水泥							57	56.4	1.65
425 号水泥		吨水泥							60	56.8	1.66
525 号水泥		吨水泥							65	57.4	1.68
625 号水泥		吨水泥							na	na	na

注：所有数值都是终端能耗。假定吨熟料的生料比为 1.77 吨，高炉矿渣水泥的煤和熟料比是 0.097；高炉渣水泥添加剂和水泥比是 0.65（5%的石膏和无水石膏，60%的矿渣）；高炉渣水泥的熟料和水泥比是 0.35。混合和碾磨添加剂耗电（除了混合碾磨和形成最终产品耗电外）因原料破碎程度的不同而不同。文章中有更详细的描述。

表 2.3.4. 含 5% 添加剂的普通水泥一次能源消耗的国际最佳实践

		产品单位	kWh/t 产品	kgce/t 产 品	GJ/t 产 品	kWh/t 熟料	kgce/t 熟料	GJ/t 熟料	kWh/t 水泥	kgce/t 水 泥	GJ/t 水 泥
生料制备	电	吨原料	37	4.5	0.13	64.6	7.94	0.23	61.4	7.54	0.22
固体燃料制备	电	吨煤	30	3.7	0.11	2.95	0.36	0.01	2.80	0.34	0.01
熟料制备	燃料	吨熟料					97	2.85		92	2.71
	电	吨熟料				68.2	8.4	0.25	64.8	7.96	0.23
添加剂制备	燃料	吨添加剂									
	电	吨添加剂									
粉磨、水泥制造											
325 号水泥	电	吨水泥							48	6.0	0.17
425 号水泥	电	吨水泥							52	6.4	0.19
525 号水泥	电	吨水泥							58	7.1	0.21
625 号水泥	电	吨水泥							60	7.4	0.22
总计											
325 号水泥		吨水泥							177	114.2	3.35
425 号水泥		吨水泥							181	114.7	3.36
525 号水泥		吨水泥							187	115.4	3.38
625 号水泥		吨水泥							189	115.6	3.39

注：所有数值都是一次能源能耗。一次能源能耗包括67%的发电和输配电的损失。假定吨熟料生料比是1.77吨，普通水泥的煤炭和熟料比是0.097；普通水泥的添加剂和水泥比0.05；普通水泥的熟料和水泥比是0.95。混合和碾磨添加剂的耗电（除了混合碾磨和形成最终水泥产品耗电外）因原料破碎程度的不同而不同。文章中有更详细的描述。

表 2.3.5. 粉煤灰水泥一次能耗国际最佳实践

		产品单位	kWh/t 产品	kgce/t 产 品	GJ/t 产 品	kWh/t 熟料	kgce/t 熟料	GJ/t 熟料	kWh/t 水泥	kgce/t 水 泥	GJ/t 水 泥
生料制备	电	吨原料	37	4.5	0.13	64.6	7.94	0.2	42.0	5.16	0.15
固体燃料制备	电	吨煤	30	3.7	0.11	2.95	0.36	0.01	1.92	0.24	0.01
熟料制备	燃料	吨熟料					97	2.85		63	1.9
	电	吨熟料				68.2	8.4	0.25	44.3	5.44	0.16
添加剂制备	燃料	吨添加剂									
	电	吨添加剂							21.2	2.61	0.08
粉磨、水泥制造											
325 号水泥	电	吨水泥							70	8.6	0.25
425 号水泥	电	吨水泥							75	9.3	0.27
525 号水泥	电	吨水泥							84	10.3	0.30
625 号水泥	电	吨水泥							86	10.6	0.31
总计											
325 号水泥		吨水泥							158	82.6	2.42
425 号水泥		吨水泥							164	83.3	2.44
525 号水泥		吨水泥							172	84.3	2.47
625 号水泥		吨水泥							na	na	na

注：所有数值都是一次能源能耗。一次能耗包括67%的发电和输配电损失。假定吨熟料生料比1.77吨，粉煤灰水泥煤炭和熟料比是0.097；粉煤灰水泥添加剂和水泥比是0.35（5%的石膏和无水石膏，30%的粉煤灰）；粉煤灰水泥的熟料和水泥比是0.65。混合和碾磨添加剂耗电（除了混合和碾磨形成最终产品耗电外）因原料研程度的不同而不同。文章中有更详细的描述。

表 2.3.6. 高炉矿渣水泥一次能耗国际最佳实践

		产品单位	kWh/t 产品	kgce/t 产 品	GJ/t 产 品	kWh/t 熟料	kgce/t 熟料	GJ/t 熟料	kWh/t 水泥	kgce/t 水 泥	GJ/t 水 泥
生料制备	电	吨原料	37	4.5	0.13	64.6	7.94	0.23	61.4	7.54	0.22
固体燃料的制备	电	吨煤	30	3.7	0.11	2.95	0.36	0.01	1.03	0.13	0.00
熟料的制备	燃料	吨熟料					97.3	2.85		34.0	1.00
	电	吨熟料				68.2	8.4	0.25	23.9	2.93	0.09
添加剂的制备	燃料	吨添加剂								15.36	0.45
	电	吨添加剂							75.8	9.31	0.27
粉磨、水泥制造											
325 号水泥	电	吨水泥							91	11.2	0.33
425 号水泥	电	吨水泥							98	12.1	0.35
525 号水泥	电	吨水泥							109	13.4	0.39
625 号水泥	电	吨水泥							113	13.8	0.41
总计											
325 号水泥		吨水泥							177	71.2	2.09
425 号水泥		吨水泥							185	72.1	2.11
525 号水泥		吨水泥							195	73.4	2.15
625 号水泥		吨水泥							na	na	na

注：所有数值都是一次能耗。一次能耗包括发电、传输和配送过程中 67% 的损失。假定吨熟料与原料比为 1.77 吨，高炉渣水泥的煤炭和熟料比是 0.097；高炉渣水泥添加剂和水泥比是 0.65（5% 的石膏和无水石膏，60% 的矿渣）；高炉渣水泥的熟料和水泥比是 0.35。混合和碾磨添加剂耗电（除了混合碾磨和形成最终产品耗电量外）因原料研磨程度的不同而不同。文章中有更详细的描述。

使用添加剂带来的额外能耗取决于生产普通水泥（5%添加剂）还是其他类型水泥（可达65%添加剂）的混合粉磨程度。普通水泥的熟料粉磨耗电约55 kWh/t，粉煤灰水泥（25%的粉煤灰）为60 kWh/t，高炉煤渣水泥（65%高炉渣）为80 kWh/t³⁸。假设只有添加粉煤灰、高炉煤渣、其他炉渣和天然火山灰才需要消耗额外能源。基于上述数据，吨粉煤灰多耗电20 kWh，吨高炉煤渣多耗电38 kWh。假定天然火山灰的能消与粉煤灰相同。这些数据用于计算水泥粉磨的能耗。烘干添加剂最佳实践的吨添加剂能耗为0.75 GJ(26 kgce)³⁹。一般来讲，只有高炉煤渣和其他煤渣才需要烘干。

2.3.4 终粉磨

终粉磨最佳实践取决于水泥种类，用细微粒度或布莱因(cm^2/g)度量。1997年，有报告指出，筒辊磨粉磨每吨水泥（3200 布莱因）需耗电25 kWh，粉磨4000 布莱因的水泥，每吨需耗电30 kWh⁴⁰。假定：中国325号水泥=小于或等于3200 布莱因，425号水泥=约3500 布莱因，525号水泥=约4000 布莱因，625号水泥=约4200 布莱因。最近对筒辊磨能耗的估算大约为每吨电耗16-19 kWh⁴¹。最佳实践值用于筒辊磨粉磨的3200和4000 布莱恩的水泥，并根据假定的3500和4200 布莱恩水泥的线性分布进行插值和外推。估算得出，最低品质的水泥每吨水泥耗电16 kWh，3500 布莱恩水泥要比3200 布莱恩水泥多耗电8%（每吨水泥耗电17.3 kWh），4000 布莱恩水泥要比3200 布莱恩水泥多耗电20%（每吨水泥耗电19.8 kWh）。然后利用这些数值，根据添加剂所需粉磨的程度，估算其他种类的水泥的能耗。

2.3.5 其他生产用能

一些水泥企业拥有采石场，一般都使用卡车和输送机运输原料。如果石料直接供给生产设备生产水泥，采石能耗估计约占设备总电耗的1%⁴²。

³⁸ Van Heijningen, R.J.J., J.F.M de Castro and E. Worrell (ed.). 1992. *Energiekentallen in relatie tot preventie en hergebruik van afvalstromen, Rapport in opdracht van Nationaal Onderzoeks Programma Hergebruik van Afvalstoffen*, Utrecht/Bilthoven, February.

³⁹ E. Worrell, R.J.J. van Heijningen, J.F.M. de Castro, J.H.O. Hazewinkel, J.G. de Beer, A.P.C. Faaij and K. Vringer, "New Gross Energy-Requirement Figures for Materials Production", *Energy, the International Journal* 6 19 pp.627-640 (1994).

⁴⁰ Buzzi, S. 1997. Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung, ZKG International 3 50: 127-138.

⁴¹ Hendricks, C.A., Worrell, E., de Jager, D., Blok, K., and Riemer, P., 2004. 水泥行业的温室气体减排。控制温室气体技术会议论文。 <http://www.wbcsd.org/web/projects/cement/tf1/prghgt42.pdf>

⁴² Warshawsky, J. of CMP. 1996. 科技注解：水泥生产的电耗。原料生产 EPRI 中心。卡内基梅隆研究所，Pittsburgh, PA.

其他生产用能包括辅助设施、输送机和包装设备。水泥企业辅助设施的总能耗估计约为吨熟料 10 kWh，包装和输送机的能耗估计约为总电耗的 5%，其中输送机耗电估计为吨水泥约 1~2 kWh⁴³。

⁴³ Worrell, E. and Galitsky, C., 2004. 提高水泥生产能效的机遇：能源和工厂经理“能源之星”指南。加州：劳伦斯伯克利实验室 ([LBNL-54036](#)).

2.4. 造纸

造纸业是利用纤维质的原料生产出纸浆、纸和纸板。造纸的工序包括原料制备、制浆（化学、半化学、机械或废纸）、漂白、碱回收、纸浆干燥和造纸。造纸中能耗最高的工艺是制浆和干燥。从全球范围来讲，木材是造纸业中的主要纤维来源，并且大多数造纸厂的规模相当大。典型造纸厂的年产量一般为 30 万吨。

国际最佳实践案例的能源消耗主要是木质纤维纸浆和造纸技术⁴⁴。因此，本报告确定的最佳实践技术也许不适用于非木纤维的纸浆厂。大部分的造纸技术是在欧洲(Metso and Voith) 和日本 (Mitsubishi) 开发和制造的，而生产特殊产品的技术来自北美（如毛毯）。除了中国和印度，其他国家对于非木纤维造纸的经验很有限，由于环境限制更为严格，欧洲最后的几个工厂(匈牙利的 Dunavarosc (1980s)、丹麦的 Fredericia(1991)、西班牙的 SAICA(1999))相继关闭。虽然国际上对于非木纤维的应用兴趣很高，但可获得的最佳实践技术却寥寥无几。除了在中国以外，只确认了一个“非木浆”最佳实践制造工艺。目前还没有对其他的现代化的清洁非木浆制造工艺进行商业化示范。虽然非木纤维的使用可能不会影响纸浆的特性（比如流动性和保水性），但很难评价预测其对造纸机能耗的影响。造纸机的能耗一般依赖于纸浆的质量和所生产纸的等级，因此造纸机最佳实践能耗值没有考虑纸浆的来源(给定一个特定的质量)。值得注意的是，纸浆的特性和纸张的等级相差很大，因此将会影响最佳实践能耗值。

表 2.4.1 和表 2.4.2 中数据分别为独立的制浆厂的最佳实践一次能源和终端能耗值。表 2.4.3 和表 2.4.4 中数据分别为独立的造纸厂最佳实践一次能源和终端能耗值。这里需要强调的是，最佳实践能耗值仅具有参考性，因为能源的消耗取决于原料和产品的特殊性能。虽然考虑了影响最佳实践能耗值的主要因素，这些数据仍需要仔细解读。此外，虽然下文分别讨论了制浆和造纸工艺，浆、纸综合工厂能够节约能源，因为这样可以减少纸浆烘干过程，以及获得更好的综合利用热的机会。在下文中讨论了主要工艺的最佳实践能耗值和影响能量使用与能耗的因素。只有石灰回转窑中的牛皮纸回收工艺使用燃料。其他的所有工艺都使用蒸汽

⁴⁴ 中国造纸业很特殊，是最大的非木纤维使用者。中国木纤维的使用份额从九十年代开始下降，占造纸生产的 7%，回收纸占 36%，剩余 57% 是进口废纸和非木纤维 (<http://faostat.fao.org/>)。在九十年代后期，中国有 5,000 个以上的纸浆和造纸厂，其中超过 70% 为非木纤维，主要是草纤维。大部分非木纤维造纸厂的规模都很小。1998 年只有 43 个非木纤维造纸厂，生产能力超过每年 30,000 t，多半工厂年产量少于 10,000 t 甚至 5,000 t。(Ren, X., 1998. 中国造纸业清洁生产。清洁生产杂志 6 pp.349-355)。从 2000 开始，中国政府开始关闭污染严重效率低的小造纸厂。最近几年，现代化大规模的造纸厂开始在中国兴建（比如河北诺斯克龙腾纸业年生产能力 300000 t，大港的造纸机年生产能力 110,000 t）。预计非木纤维有望继续在中国将来的造纸业中发挥着重要的作用。

和电。下面的能源消耗数据是以蒸汽(GJ/t)和电(kWh/t)表示⁴⁵。最佳实践假设使用的电和蒸汽是通过热电联产产生的。

2.4.1 非木纸浆

现行的国际最佳实践主要是基于芬兰 Chempolis 工艺。此工艺可以以清洁的方式回收化学物⁴⁶。第一个示范工厂已经在中国设计建设，年加工能力为 65,000 吨（风干），但建设已经延迟。这种纸浆与硬木纸浆的特性相似，与造纸机的特性（比如流动性和保水性）也相近（见下文）。

本设计假定每吨风干纸浆消耗蒸汽 5~6 吨，相当于大约吨风干纸浆消耗 10.5~12.6 GJ 能源（吨风干纸浆 358~430kgce）。这些能耗数据主要取决于工艺流程布局。上述能耗值假定用的是传统水处理技术，并且不包括烘干纸浆的能耗（商品浆的备制）。电耗估计为每吨风干纸浆 400 kWh。考虑到工艺并不直接使用燃料，所以不需要煨烧窑（牛皮纸浆）⁴⁷。

木质素在适合的蒸汽压和注入水温度条件下产生蒸汽，每吨风干纸浆产蒸汽 7~9 吨，具体数值主要取决于木质素的产量。所以工厂可以有额外的蒸汽产出，每吨风干纸浆 2~3 t 蒸汽，相当于每吨风干纸浆约为 4.2~6.3 GJ（143~215kgce），因此造纸机可以利用产出的蒸汽⁴⁸。

⁴⁵ 造纸业的能耗为每吨风干原料耗能。(ADt)

⁴⁶ Anttila, J.R., P.P. Rousu, P. Rousu, K.J.E. Hytonen and J.P. Tanskanen. 2006. 设计环境友好的非木浆工厂。Chempolis.

⁴⁷ Rousu, P. 2006. Personal communication from Pasi Rousu, Chempolis, Finland. August 16th, 2006.

⁴⁸ Rousu, P., P. Rousu and J. Anttila. 2002. 农业废物的可持续制浆生产。资源节约与回收。35 pp.85-103.

表 2.4.1. 纸浆厂终端能耗的国际最佳实践（吨风干能耗）^{49, 50}

原料	产品	工艺	蒸汽用燃料		输出蒸汽		用电量	发电量	总计	
			GJ/Adt	kgce/Adt	GJ/Adt	kgce/Adt	kWh/Adt	kWh/Adt	GJ/Adt	kgce/Adt
非木质	商品浆	制浆	10.5	358	-4.2	-143	400		7.7	264
木质	商品浆	牛皮纸	11.2	382			640	-655	11.1	380
		亚硫酸	16	546			700		18.5	632
		热磨机械			-1.3	-45	2190		6.6	224
纸	回收浆		0.3	10			330		1.5	51

表 2.4.2. 纸浆厂一次能源终端能耗的国际最佳实践（吨风干能耗）^{51, 52}

原料	产品	工艺	蒸汽用燃料		输出蒸汽		用电量	发电量	总计	
			GJ/Adt	kgce/Adt	GJ/Adt	kgce/Adt	kWh/Adt	kWh/Adt	GJ/Adt	kgce/Adt
非木质	商品浆	制浆	10.5	358	-4.2	-143	1212		10.7	364
木质	商品浆	牛皮纸	11.2	382			1939	-1985	11.0	377
		亚硫酸	16	546			2121		23.6	807
		热磨机械			-1.3	-45	6636		22.6	770
纸	回收浆		0.3	10			1000		3.9	133

注：一次能耗包括 67%的发电和输配电的损失。

⁴⁹ IPCC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。污染防治与控制一体化。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

⁵⁰ Francis, D.W., M.T. Towers, T.C. Browne. 2002. 造纸业能耗下降：能源对标前景。渥太华：NRCan.

⁵¹ IPCC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。污染防治与控制一体化。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

⁵² Francis, D.W., M.T. Towers, T.C. Browne. 2002. 造纸业能耗下降：能源对标前景。渥太华：NRCan.

表 2.4.3. 造纸厂终端能耗的国际最佳实践（吨风干能耗）^{53, 54, 55}

原料	产品	工艺	蒸汽用燃料		输出蒸汽	总计	
			GJ/ADt	kgce/ADt	kWh/ADt	GJ/ADt	kgce/ADt
纸浆	未涂布的（不含木质）	造纸机	6.7	229	640	9.0	307
	精细涂布的（不含木质）	造纸机	7.5	256	810	10.4	355
	新闻纸	造纸机	5.1	174	570	7.2	244
	纸板	造纸机	6.7	229	800	9.6	327
	牛皮板	造纸机	5.9	201	535	7.8	267
	绵纸	造纸机	6.9	235	1000	10.5	358

⁵³ IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。污染防治与控制一体化。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

⁵⁴ Karlsson, M., 2005. 荷兰创新转换、小/大规模纸/纸板机器概念和自动操作。发表于荷兰皇家造纸业协会会议，Beekbergen, The Netherlands, February 23rd, 2005.

⁵⁵ Francis, D.W., M.T. Towers, T.C. Browne. 2002. 造纸业能耗下降：能源对标前景。渥太华：NRCan.

表 2.4.4. 造纸厂终端能耗的国际最佳实践（吨风干能耗）^{56, 57, 58}

原料	产品	工艺	蒸汽用燃料		输出蒸汽	总计	
			GJ/ADt	kgce/ADt	kWh/ADt	GJ/ADt	kgce/ADt
纸浆	未涂布的（不含木质）	造纸机	6.7	229	1939	13.7	467
	精细涂布的（不含木质）	造纸机	7.5	256	2455	16.3	558
	新闻纸	造纸机	5.1	174	1727	11.3	386
	纸板	造纸机	6.7	229	2424	15.4	527
	牛皮板	造纸机	5.9	201	1621	11.7	401
	绵纸	造纸机	6.9	235	3030	17.8	608

注：一次能耗包括 67%的发电和输配电的损失。

⁵⁶ IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。污染防治与控制一体化。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

⁵⁷ Karlsson, M., 2005. 荷兰创新转换、小/大规模纸/纸板机器概念和自动操作。发表于荷兰皇家造纸业协会会议，Beekbergen, The Netherlands, February 23rd, 2005.

⁵⁸ Francis, D.W., M.T. Towers, T.C. Browne. 2002. 造纸业能耗下降：能源对标前景。渥太华：NRCan.

2.4.2. 牛皮纸浆（硫酸盐纸浆）

最佳实践硫酸盐纸浆厂可产生多余的电能，电能的输出是由于纸浆工艺消耗的能源和从黑液中回收的能源之间的平衡差（木质素燃烧）。这个工艺本身的能耗为每吨风干纸浆 10~12.2 GJ (341~416 kgce)，电耗约为每吨风干纸浆 610 kWh (75 kgce)。石灰窑吨风干纸浆消耗 1.2 GJ 燃料和耗电 30 kWh⁵⁹，总能耗为吨风干纸浆消耗燃料 11.2 GJ(382 kgce)，耗电 640 kWh。

然而，回收工艺可以使吨风干纸浆净产生 15.8 GJ 蒸汽。假设蒸汽可以用背压式汽轮机发电(大约 655 kWh/吨风干纸浆)，吨风干纸浆可净产生电 15~20 kWh。由此，总能耗为 11.1 GJ/吨风干纸浆(380 kgce)。

黑液气化的研发现在还没有广泛的商业化运作，所以这项技术没有包含在最佳实践能耗数据中。但是，一旦该技术达到可广泛应用，就可大大地节约能源，因为工艺可以产生大量多余电能。

2.4.3 亚硫酸盐制浆

亚硫酸盐法制浆的使用没有象硫酸盐法制浆那么普遍，主要用于一些特殊纸的生产，而且大部分的亚硫酸盐纸浆要经过漂白。木片用二氧化硫和碱性混合溶液蒸煮，该工艺可以生产出许多特殊产品，同时消耗大量能源。当然，也可以采用回收黑液相似的工艺，从“绿液”中回收余热，吨风干纸浆可大约得到余热 15 GJ (512 kgce)。假设最佳实践是最优化电力的使用、采用最先进控制技术和高效回收绿液，由于生产不同种类的纸浆，估计吨风干纸浆的蒸汽消耗为 16~18 GJ (546 to 614 kgce)，电耗为 700 kWh⁶⁰。

2.4.4 机械制浆

机械法制浆的能耗取决于所选木材的种类和纸浆的溶解性，溶解性是评价纤维质量和纸浆保水性的指标，因此根据所需某种木材的纸浆质量，能耗差别很大。

机械法制浆包括了以下的工艺：磨木浆、预热机械浆和化学预热机械浆。最佳实践采用的是预热机械浆工艺。实际上，预热机械浆工艺可以以热水和蒸汽的

⁵⁹ Francis, D.W., M.T. Towers and T.C. Browne. 2002. 造纸业能源成本下降：能源对标前景。NRCan, Ottawa, ON, Canada.

⁶⁰ IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。污染综合防治与控制。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

方式回收工艺热，因此只消耗少量的能源来分离木纤维。预热机械浆工艺可回收 60%~65% 的工艺热（45% 为蒸汽，20% 为热水）。然而，采用预热机械浆工艺要比采用磨木浆工艺消耗的能源多。最佳实践的综合新闻纸制造厂采用加压预热机械浆工艺，吨风干纸浆耗电大约为 2190 kWh，产出 1.33 GJ 的热量。对于制浆厂来讲，吨风干纸浆的电耗估计约为 2420 kWh，同时产生 5.5 GJ 的蒸汽^{61, 62}。

2.4.5 废纸回收

废纸回收是降低制浆能耗的重要选择。中国也从其他国家和地区（主要是美国和欧洲）进口纸张从而满足其废纸需求。循环利用的废纸已经成为一个全球市场，中国是重要的消费国之一。利用废纸造纸之前，首先要制成纸浆并经过脱墨处理（可选）。基于瑞典工厂的运行情况来看，最佳实践的吨风干纸浆蒸汽消耗为 0.3 GJ，电耗为 330 kWh⁶³。

2.4.6. 造纸

造纸机的能耗取决于所生产纸的等级和纸浆纤维的质量（比如保水性）。此外，并非所有的能效技术都适用于所有等级的纸张。最佳实践的能耗假设条件是：采用高效控制系统、使用长压区压榨（或靴压）（不适合于棉纸制造厂）、高效电机、冷凝水回收、封闭式气罩回收热量以及综合蒸汽和热水循环。小型造纸厂的蒸汽消耗量比表 2.4.1. 的数据高 10%~25%，耗电量高 5-20%⁶⁴。

2.4.7 综合造纸厂

浆、纸综合造纸厂比单一制浆或单一造纸的能效水平更高，通过减少烘干制浆所需的能量，降低了制浆厂的能耗。而且，综合不同工艺会优化蒸汽的使用。最后，单一制浆厂所产生的多余蒸汽可能不会完全被利用（因为回收黑液或绿液或预热机械浆工艺的热回收），综合造纸厂可将多余的热量作为补充造纸机的用能。表 2.4.5 和表 2.4.6 分别汇总了不同的综合造纸厂的终端和一次能源能耗的最佳实践。

⁶¹ Francis, D.W., M.T. Towers and T.C. Browne. 2002. 造纸业能耗下降：能源对标前景。NRCan, Ottawa, ON, Canada.

⁶² IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。综合污染防治与控制。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

⁶³ Francis, D.W., M.T. Towers and T.C. Browne. 2002. 造纸业能源成本下降：能源对标前景。NRCan, Ottawa, ON, Canada.

⁶⁴ IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。综合污染防治与控制。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

表 2.4.5. 浆纸造纸综合厂终端能耗的国际最佳实践（吨风干能耗）^{65, 66}

原料	产品	工艺	蒸汽用燃料		用电量	总计	
			GJ/ADt	kgce/ADt		kWh/ADt	GJ/ADt
木质	漂白精致未涂布纸	硫酸盐法	14	478	1200	18.3	625
	牛皮纸(未漂白的) 和 包装纸	硫酸盐法	14	478	1000	17.6	601
	漂白精致涂布纸	亚硫酸盐法	17	580	1500	22.4	765
	漂白精致未涂布纸	亚硫酸盐法	18	614	1200	22.3	762
	新闻用纸	预热机械浆	-1.3	-44	2200	6.6	226
	杂志印刷纸	预热机械浆	-0.3	-10	2100	7.3	248
	纸板	50%预热机械浆	3.5	119	2300	11.8	402
回收纸	纸板 (无需脱墨)		8	273	900	11.2	384
	新闻用纸 (脱墨)		4	137	1000	7.6	259
	棉纸(脱墨)		7	239	1200	11.3	386

⁶⁵ IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。综合污染防治与控制。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001。

⁶⁶ Francis, D.W., M.T. Towers and T.C. Browne. 2002. 造纸业能源成本下降：能源对标前景。NRCan, Ottawa, ON, Canada.

表 2.4.6. 浆纸一体化企业终端能耗国际最佳实践（吨风干能耗）^{67, 68}

原料	产品	工艺	蒸汽用燃料		用电量	总计	
			GJ/ADt	kgce/ADt	kWh/ADt	GJ/ADt	kgce/ADt
木质	漂白精致未涂布纸	硫酸盐法	14	478	3636	27.1	925
	牛皮纸(未漂白的)和包装纸	硫酸盐法	14	478	3030	24.9	850
	漂白精致涂布纸	亚硫酸盐	14	478	3030	24.9	850
	漂白精致未涂布纸	亚硫酸盐	17	580	4545	33.4	1139
	新闻用纸	预热机械浆	18	614	3636	31.1	1061
	杂志印刷纸	预热机械浆	-1.3	-44	6667	22.7	775
	纸板	50%预热机械浆	-0.3	-10	6364	22.6	772
回收纸	纸板 (无需脱墨)		3.5	119	6970	28.6	976
	新闻用纸 (脱墨)		8	273	2727	17.8	608
	棉纸(脱墨)		4	137	3030	14.9	509

注：一次能耗包括 67%的发电和输配电损失。

⁶⁷ IPPC, 2001. 造纸业最佳可行技术参考文献。综合污染防治与控制。欧洲委员会，布鲁塞尔/塞维利亚，2001

⁶⁸ Francis, D.W., M.T. Towers and T.C. Browne. 2002. 造纸业能源成本下降：能源对标前景。NRCan, Ottawa, ON, Canada.

2.5 合成氨

合成氨的制造是氮肥生产过程中能耗最高的环节。合成氨是通过哈伯-博施法工艺将氮气与氢气结合在一起。氢通常是由合成气产出，而合成气又以天然气、石油（残渣）、煤或碳氢化合物为原料而产生。由于天然气的氢含量高，为首选生产合成氨的原料。目前，世界上超过 80% 的合成氨生产能力是以天然气为原料生产合成氨。但是，中国作为世界上最大的合成氨生产国，2004 年，70.3% 以煤炭为原料，22.7% 以天然气为原料，7% 以石油为原料⁶⁹。

无水氨生产的能耗取决于原料、工艺和技术。天然气是能效最高的生产原料，其次是重油和煤；以重油为原料生产每吨产品平均比天然气多投入 30% 的能源，以煤炭为原料每吨产品则需要比天然气平均多投入 70% 的能源⁷⁰。对于每一种原料来说，最常见的生产工艺分别是天然气汽化重整、重油的部分氧化、煤炭的气化和电解。

合成氨理论能耗最小值取决于天然气原料的成分，吨氨最小值可达到 19.2 GJ 或吨氨为 23.3 GJ（两者都为低热值）⁷¹。目前，最佳实践能耗从很大程度上依赖于生产合成氨的原料。以天然气和煤炭为原料生产合成氨的最佳实践在下表中给出。表 2.5.1 汇总了生产合成氨工艺的最佳实践能耗数据。鉴于合成氨生产过程中耗电量很少可以忽略，因此假定一次能源能耗值与终端能耗值相同。

表 2.5.1. 合成氨终端能耗的国际最佳实践（吨氨和吨氮能耗）

原料	能源强度			
	GJ/吨氨	GJ/吨氮	kgce/吨氨	kgce/吨氮
天然气汽化重整	28	34	956	1160
煤炭 ⁷²	34.8	42.3	1188	1444

2.5.1 天然气汽化重整

1998 年，以天然气为原料的合成氨能耗为 28 GJ/吨氨(1160 kgce/t)或 34 GJ/吨氮(956 kgce/t)（当年最高能效值）。假定氨回路压缩机使用汽轮机，利用内部生产的蒸汽，购进一定的电力是必需的。

⁶⁹ 中国化工技术工业协会, 2006

⁷⁰ 欧洲肥料生产协会, 1997. 合成氨生产：生产工艺介绍, 布鲁塞尔, 比利时。

⁷¹ Ramirez, C.A., Worrell, E., 2006. “用化石燃料供给土壤：能源分析与化肥工业技术启示”，资源节约与循环 46 (2006): 75-93.

⁷² 中石化(2004) “2004 参数与数据,” 北京：中石化, p.5-51; 中国大部分的合成氨生产原料为重油和煤炭，比天然气为原料的能耗高。

有许多厂商可以提供达到上述能效水平的工艺设计。这些工艺的最大特点是高度整合的一段重整和二段重整（比如 **KBR** 提供的换热系统）、利用物理吸收工艺除 CO_2 （比如聚乙二醇二甲醚法）、低压氨合成回路、高效催化剂、甲烷在膜反应器中反应（甲烷转化器中）和氢回收。

2.5.2 以煤为原料的合成氨

合成氨（煤头）工厂的最佳实践采用煤气化炉将煤炭转化为合成气。中国大部分的合成氨工厂都使用煤气化炉生产合成氨。

最近，中国工厂开始采用壳牌或雪佛龙-德士古气化技术，比如中国技术进出口公司南京化工公司的合成氨厂（2003 年运行），吉林浩良河(2004)，中石化湖北安庆和洞庭的工厂(2006)。该技术包括现代化的气流床气化炉，聚乙二醇二甲醚气体的脱除和低压合成氨回路，使用部分二氧化碳生产尿素。

根据美国堪萨斯州的 **Coffeyville** 用石油焦作原料生产合成氨工厂运行情况来看，最佳实践的吨氨能耗估计约为 34.8 GJ(1188 kgce/t)。

2.6 乙烯

乙烯生产是以不同碳氢化合物为原料，采用蒸汽裂解工艺。在生产乙烯的同时，还伴随着产出象环丙烷、丁二烯和芳香族等高价值化合物。从绝对意义上讲，蒸汽裂解是石油化工行业能耗最高的工艺，国际能耗值（不包括原料）估计约为 2.8 EJ⁷³。石脑油是世界范围内乙烯生产最主要的原料（55%），其次是乙烷（30%），液化石油气（10%），最后是轻柴油（5%）⁷⁴。乙烯生产技术的地区差异很大，美国的主导技术是乙烷裂解，而石脑油裂解则是世界其他地区包括中国在内的主导技术⁷⁵。

2.6.1 石脑油和乙烷

表 2.6.1 和表 2.6.2 中数据分别为石脑油和乙烷裂解最佳实践的终端和一次能源能耗值，而石脑油和乙烷则是乙烯常规生产应用最为广范的原料。乙烯的工序能耗都被算到了乙烯最终产品中（高价值化工产品 HVC），使采用不同技术之间能够公平对比。Solomon 公司就是采用此方法开展了石油化工行业的国际对标⁷⁶。将所有的工序能耗算到乙烯产品中可能会产生一些混乱，因为乙烯生产中每个工序差异很大⁷⁷。欧洲蒸汽裂解调查结果表明，采用石脑油裂解工艺的实际能耗为 14 GJ~22 GJ/吨 HVCs(478~751 kgce/t)，乙烷裂解的实际能耗为 12.5~21.0 GJ/吨 HVCs（427~717 kgce/t）⁷⁸。

⁷³ Neelis, M.L., Patel, M.K., Bach, P.W. and Haije, W.G., 2005. 化工炼化行业能量使用分析和碳损失。Report ECN-I-05-008, 荷兰能源研究中心, Petten。

⁷⁴ Ren, T., Patel, M., and Blok, K., 2006. “Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes,” *Energy* 31 (2006), pp. 425-451.

⁷⁵ 国际能源数据（国际能源署，2005。非 OECD 国家能源平衡表，法国巴黎：IEA），我们推断在中国只有石脑油裂解有应用，因为 2003 年大约 90% 的化工行业石油给料都是石脑油。

⁷⁶ Worrell, E., Phylipsen, D., Einstein, D. and Martin, N., 2000. 美国化工行业能量使用和能耗。Berkeley, California: 劳伦斯伯克利国际实验室, LBNL-44314.

⁷⁷ Phylipsen, G.J.M., 2000. “石油化工行业国际能效比较方法论” Chapter 3 in: 国际比较与国家承诺，博士论文，Utrecht University, Utrecht, the Netherlands.

⁷⁸ 技术展望研究研究所，2003。大型有机化工行业最佳可行技术参考文 Seville, Spain: 欧洲联盟，联合研究中心, IPTS.

表 2.6.1 乙烷和石脑油裂化终端能耗的国际最佳实践（吨高价值化工产品）

工序	乙烷						石脑油					
	GJ/t HVC	kWh/t HVC	Total GJ/t HVC	kgce/t HVC	kWh/t HVC	Total kgce/t HVC	GJ/t HVC	kWh/t HVC	Total GJ/t HVC	kgce/t HVC	kWh/t HVC	Total kgce/t HVC
裂化	4.9	278	5.9	184	278	219	6.5		6.5	244		244
其中：反应热	2.6			90			2.0		2.0	75		75
蒸汽、热和损失	2.8			94			4.5		4.5	169		169
萃取和形变	2.8		2.8	86		86	1.5		1.5	56		56
分离	3.9		3.9	122		122	2.0		2.0	75		75
总计	11.5		12.5	392		427	10.0	278	11.0	375	278	409

表 2.6.2 乙烷和石脑油裂化一次能源能耗的国际最佳实践（吨高价值化工产品）

工序	乙烷						石脑油					
	GJ/t HVC	kWh/t HVC	Total GJ/t HVC	kgce/t HVC	kWh/t HVC	Total kgce/t HVC	GJ/t HVC	kWh/t HVC	Total GJ/t HVC	kgce/t HVC	kWh/t HVC	Total kgce/t HVC
裂化	4.9	842	7.9	184	842	288	6.5		6.5	244		244
其中：反应热	2.6			90			2.0		2.0	75		75
蒸汽、热和损失	2.8			94			4.5		4.5	169		169
萃取和形变	2.8		2.8	86		86	1.5		1.5	56		56
分离	3.9		3.9	122		122	2.0		2.0	75		75
总计	11.5		14.5	392		496	10.0	842	13.0	375	842	478

注：一次能耗包括 67%的发电和输配电的损失。

虽然将蒸汽裂解的综合能耗分解很困难，但仍可以将总能耗粗略分解到裂解的不同工序中⁷⁹。对于大多数化工行业的工艺来讲，蒸汽裂解可认为是反应部分和分离部分的结合，反应部分中原料转化成需要的产品，分离部分中从不同产品中分离出可供销售的化学商品。在裂解过程中，石脑油和乙烷在 750-900 °C 的高温下裂解，然后淬火到低温，以结束反应。在淬火过程中，产生的高压蒸汽用来驱动压缩机等。在分离部分，首先浓缩重馏份（高温分解线路，仅对石脑油和轻柴油裂解），然后压缩气体。在冷分离过程中，不同的轻组分（乙烯、丙烯和丁二烯）通过低温蒸馏的方法分离。工艺的具体布局取决于原料工艺的采用。表 2.6.3 给出了不同产品的产量。

裂解转化是吸热过程，反应只需要最少量的热，就可以将原料转化成产品（标准条件：1 bar，25 °C），约相当于消耗 20-25% 的工艺能。分离过程消耗 20-30% 的能源，剩余能源则用于裂解（如，裂解炉烟道气中的隐含热）和压缩部分。

表 2.6.3 乙烷和石脑油裂化的产量 (%) ⁸⁰

产品	乙烷	石脑油
乙烯-HVC	80-84	29-34 (30% 是典型)
丙烯-HVC	1-1.6	13-16
丁二烯-HVC	1-1.4	4-5
芳香烃和 C4+ -HVC	2-3	10-16
HVC 的总产量	82 (典型)	55 (典型)
甲烷产量	4.2	13-14
氢的产量	4.3	1
炼油厂的回流量	0	9-10
损失	1-2	1-2

根据技术供应商和设备许可证发放者提供的有关不同类型的炉的信息和分离特点，一份最新报告给出了最新石脑油裂解技术的情况⁸¹。表2.6.4提供了有关乙烯生产和单位能耗的数据。

⁷⁹ 数据是从使用不同系统界限和条件的不同来源获得的，所以仅具指示意义。

⁸⁰ Ren, T., Patel, M., and Blok, K., 2006. "Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes," *Energy* 31 (2006), pp. 425-451.

⁸¹ Ren, T., Patel, M., and Blok, K., 2006. "Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes," *Energy* 31 (2006), pp. 425-451.

如果将1.83 吨HVCs/吨乙烯的产出因子能够应用到表2.6.4的能耗值中，则持设备生产许可证生产商提供的现行石脑油裂解最佳实践单位能耗值为11到14 GJ/t(375到478 kgce/t)。石脑油裂解炉的最佳实践主要靠优化热处理炉来提高热量转化效率，保证焦化量最小，使石蜡的产出量最大。在分离过程，脱甲烷前沿技术可以减少冷却部分的能耗。汽轮机技术在表2.6.4中作为一种可供选择技术，汽轮机与蒸汽裂解整合，用于产生蒸汽和发电。从气轮机废气中回收的余可以预热的原料。采用此种方法吨乙烯可节能3 GJ(102 kgce)，但迄今为止，还没有得到广泛应用。目前还没有找到乙烷裂解最佳实践可比数据。因此从文献中找到的最低数值(12.5 GJ/t HVCs 或 427 kgce/t HVCs)就作为乙烷裂解技术最佳实践的数值。

表 2.6.4 每专利设备的石脑油终端能耗的最新数据⁸²

	Technip -Coflexip	ABB Lummus	Linde AG	Stone & Webster	Kellog Brown & Root
乙烯产量 wt. %	35%	34.4%	35%	没有找到 数据	38%
能量消耗 GJ/t 乙烯	最好: 18.8 – 20 典型: 21.6 -25.2	最好: 18 (w/ 气轮机) 典型: 21	最好: 21	20 - 25	没有找到数据

2.6.2 其他原料与新兴技术

除了石脑油和乙烷，其他的原料比如液化石油气（丙烷和丁烷的混合物）和轻柴油也可以应用于蒸汽裂解工艺。总体上来讲，轻柴油裂解比石脑油裂解的单位能耗高（18 到 23 GJ/t HVCs 或 614 到 785 kgce/t HVCs）⁸³。液化石油气工艺特点介于乙烷和石脑油裂解之间。

两个最新的文献提供了有关生产乙烯和丙烯的可能技术的详细概述，这些技术都是传统的或大型原料（包括先进的石脑油裂解技术）以及以天然气为原料的^{84, 85}。他们所有从天然气到甲醇生产的技术是传统的蒸汽裂解能耗的两倍。传统的蒸汽裂解工艺过程中，一些工艺的单耗很低（8 到 10 GJ/t HVCs，或 273 到 341 kgce/t HVCs），

⁸² Ren, T., Patel, M., and Blok, K., 2006. "Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes," *Energy* 31 (2006), pp. 425-451.

⁸³ 技术展望研究研究所，2003.大型有机化工行业最佳可行技术参考文 Seville, Spain: 欧洲联盟，联合研究中心，IPTS.

⁸⁴ Ren, T., Patel M., and Blok, K., 2005. 蒸汽裂解和天然气转化为石蜡：能源使用和 CO₂ 排放比较与经济。2005 美国化工协会春季全国会议，Atlanta, USA.

⁸⁵ Ren, T., Patel, M., and Blok, K., 2006. "Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes," *Energy* 31 (2006), pp. 425-451.

而这些技术（如冲击波反应器）仅处于实验阶段。石脑油的催化裂化和水热分解的单位能耗值低（10 到 13 GJ/t 或 341 到 444 kgce/t），但这些工艺或者没有商业化运行（催化裂化还处于试验工厂阶段），或者没有授予生产许可证。

3. 总结和下一步计划

本报告提供了钢铁、铝、水泥、造纸、合成氨和乙烯生产的“国际最佳实践”的能耗值。这些“国际最佳实践”至少在世界上某个地方已商业化运行，并且代表着最高效的工艺水平。这些产品的能耗强度是以每物理单位产出量所消耗的能源来表示，单位通常是吨。报告中给出了每个工业部门的主要耗能工艺的能耗强度值，以便于在工艺水平上进行对比。终端能耗值是指生产设备所消耗的能源，一次能源能耗值是指生产设备所消耗的能源，以及生产设备发电所需的能源。

本报告中的“最佳实践”能源消耗数据仅具有参考性，因为数据与生产原料的使用有着很大的联系。例如，钢铁、水泥和造纸与一次原料（铁矿石、木/草）和再生原料（废钢、废纸）的数量有很大关系。这些数值随着时间的变化而变化，取决于可用性、成本、特性和质量，还有产品的种类和质量。对于存在着变化的部分，应该设立“对标”工具来计算单个工厂不同设备、不同原料和产品的最佳实践能耗值。使用这个工具时，使用者应该输入生产的特性数据来计算单个工厂“最佳实践”的能耗值和生产的变量。而且，此工具可以帮助工厂确认出提高能效的关键区域。

4. 致谢

这项工作是通过美国能源部，在能源基金会资助下完成的，合同号为 DE-AC02-05CH11231。此报告并不代表能源基金会的观点。我们感谢国际能源署的 Dolf Gielen 和 Klaas Jan Kramer，感谢他们对初稿的评审。我们还要感谢 Pasi Rousu 提供 Chempolis 工艺的相关信息，LBNL 的 David Fridley 对于乙烯生产部分提供的帮助，以及 Nathaniel Aden 对初稿的帮助。如有任何错误只与原作者们有关。