

再生铝

生产与应用

刘培英 编著



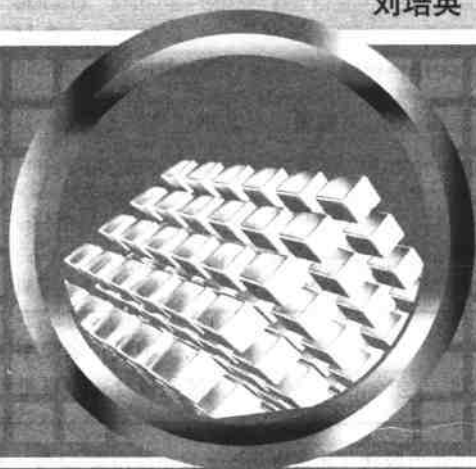
ZAISHENGLU SHENGCHAN YU YINGYONG



化学工业出版社

再生铝 生产与应用

刘培英 编著



ZAISHENGLU SHENGCHAN YU YINGYONG



化学工业出版社

· 北 京 ·

随着废旧铝和废旧铝合金数量不断增加和再生铝工业在资源、能源和环境等方面巨大优势的显现,再生铝工业发展非常迅速,已成为现代铝工业的重要组成部分。

本书针对再生铝的资源、生产加工、工艺装备和质量检测等方面的特殊性,着重阐述了相关的理论基础和工业技术,介绍了再生铝工业与再生铝合金的特点与发展前景。

本书适宜从事再生铝的生产、加工和应用的工程技术人员和管理人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

再生铝生产与应用/刘培英编著. —北京:化学工业出版社, 2007.3
ISBN 978-7-5025-9979-9

I. 再… II. 刘… III. 铝-再生-生产工艺 IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027624 号

责任编辑:邢 涛

文字编辑:余纪军

责任校对:宋 玮

装帧设计:尹琳琳

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9½ 字数258千字

2007年4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:22.00元

版权所有 违者必究

前 言

由生产和生活中产生的废旧铝和废旧铝合金，经过重熔精炼得到的金属铝叫做再生铝。由于再生铝的生产加工在资源、能源和环境保护等方面的巨大优势，其发展非常迅速，正在越来越多地取代原铝，成为现代铝工业的重要组成部分。随着我国经济建设的持续快速发展，铝工业在资源利用和产业结构方面将更加趋于合理，再生铝的生产、加工和应用正在步入高速增长期。据专家预测，在未来的十年里，我国的再生铝工业将比原铝工业的发展更快，再生铝的消费增长速度可望显著超过原铝。因此，与之相关的工艺技术、设备水平和产品质量都亟待提高。

本书从铝和铝合金材料的基础知识出发，介绍了再生铝工业与再生铝的特点和发展前景。书中针对再生铝的资源、生产加工、工艺装备和质量检测等方面的特殊性，着重阐述了相关的基础理论和工业技术，其中包括再生铝原料的特点及预处理、再生铝的熔炼与铸造技术、再生铝生产的设备、再生铝的质量检测等。本书还收集了国内外再生铝合金生产加工的一些实例，用以扩大读者对再生铝工业技术国内外发展现状的了解。同时，就再生铝合金的技术发展及应用前景进行了讨论。

本书为希望学习和了解再生铝技术的读者提供了一部专著，它可作为从事再生铝生产、加工和应用的工程技术人员、生产工人和相关领域的管理人员的技术指导用书，也可供希望了解再生铝工业的人员阅读。

作者在本书的编写过程中，参考了国内外许多专家学者的宝贵资料和著作，在此对他们表示真诚的谢意。限于作者的学识与经验，书中难免存在一些疏漏，恳请读者批评指正。

刘培英

2007. 1

目 录

第1章 概述	1
1.1 循环型经济与再生资源	1
1.2 铝资源与再生铝	4
1.2.1 铝的资源	4
1.2.2 铝的生态环境特征	5
1.2.3 铝的再生利用	6
1.2.4 再生铝的生产与应用	10
1.2.5 相关理论与技术发展	12
第2章 铝和铝合金基础	15
2.1 铝和铝合金的基本性质	15
2.1.1 铝的物理化学性质	16
2.1.2 铝的微观结构	18
2.1.3 铝中的杂质	21
2.2 铝的合金化	23
2.3 铝合金的组织、性能与分类	24
2.3.1 变形铝合金	25
2.3.2 铸造铝合金	39
2.3.3 新型铝合金	55
第3章 再生铝的生产与加工	59
3.1 再生铝工业	60
3.2 再生铝的资源	64
3.2.1 再生铝资源	64
3.2.2 再生铝资源的特点	68
3.3 再生铝的生产	71
3.3.1 原料的预处理	72
3.3.2 再生铝的熔炼	85

3.3.3	熔体处理与组织细化	129
3.3.4	再生铝的铸造	134
3.3.5	铝合金的热处理	156
3.3.6	再生铝生产中的环境问题	167
第4章	再生铝的熔炼设备	179
4.1	常用再生铝熔炼炉	179
4.1.1	坩埚炉	179
4.1.2	反射炉	181
4.1.3	感应炉	183
4.2	熔炼炉内的气氛	185
4.3	再生铝熔炼设备耗能	186
4.4	高效再生铝熔炉技术	187
4.4.1	竖炉及其技术特点	187
4.4.2	喷射式熔炉及其技术特点	189
4.5	熔盐回转熔炉	190
4.6	双室反射炉	192
4.7	再生铝熔炼炉技术发展	193
4.7.1	多室反射炉	193
4.7.2	双膛火焰炉熔炼炉	195
4.7.3	熔剂熔化炉	195
4.7.4	密闭双熔池	196
4.7.5	其他常用工艺装备	197
第5章	再生铝的生产实例	199
5.1	铝渣的处理与再生加工	199
5.1.1	造渣与出渣	200
5.1.2	铝熔渣的保护	200
5.1.3	铝熔渣的处理	201
5.1.4	铝渣再生铝的质量	203
5.1.5	铝渣的再生利用率	203
5.1.6	铝渣再生铝的应用	205
5.2	铝制饮料罐的再生加工	205

5.2.1	易拉罐再生加工过程	207
5.2.2	加工技术的研究与发展	209
5.3	汽车废铝的再生加工	212
5.3.1	汽车用铝合金的主要特点	214
5.3.2	汽车废铝的回收与再生利用	216
5.3.3	汽车的闭环生产系统	217
5.3.4	汽车废铝生产铝铸件	221
5.4	建筑领域废铝的再生加工	221
5.4.1	面板废铝材	222
5.4.2	门窗铝废料	222
5.4.3	其他废铝件	222
5.5	废铝箔加工铝粉	222
5.6	非重熔法再生铝加工技术	224
第6章	生产检验与质量控制	228
6.1	化学成分分析	228
6.1.1	比色法或分光光度法	230
6.1.2	先进的快速分析方法	232
6.1.3	化学成分分析的取样	234
6.2	组织检验	236
6.2.1	宏观组织检验	236
6.2.2	显微组织检验	243
6.3	无损检测	250
6.3.1	X射线探伤法	250
6.3.2	超声波探伤法	253
6.3.3	荧光渗透探伤法和着色渗透探伤法	255
6.4	力学性能及测试	257
6.4.1	铝和铝合金的力学性能	257
6.4.2	拉伸试验	264
6.4.3	硬度试验	265
第7章	再生铝的应用与发展	267
7.1	在交通运输业的应用	268

7.1.1	轨道车辆	271
7.1.2	汽车制造	272
7.1.3	摩托车和自行车	275
7.2	在建筑领域的应用	277
7.3	在航空航天工业的应用	278
7.3.1	现代飞机中铝合金使用量	279
7.3.2	使用部位	280
7.3.3	飞机用材料的变化情况	281
7.3.4	航空航天工业发展对高性能铝合金的性能需求	281
7.3.5	高性能再生铝的发展	282
7.3.6	再生铝合金在飞机制造中的应用前景	283
7.4	再生铝的技术发展	283
7.4.1	相关理论与技术发展	284
7.4.2	发展前景	291
参考文献		293

第 1 章 概 述

铝及铝合金由于性能优异和广泛的适用性，是国民经济不可或缺的基础原材料。随着现代铝工业的发展，铝及铝合金的产量迅速增长，仅次于钢铁材料位居第二，其用途也在不断扩大，广泛用于建筑、包装、交通运输、电力、电信、航空航天和军事等各个领域，在国民经济和国防建设中发挥着重要作用。

1.1 循环型经济与再生资源

传统铝工业像其他许多工业一样是以消耗自然资源和能源为基础的。在过去的 100 年中，能源技术、信息技术、生物技术、材料技术、航空航天技术、制造技术等竞相高速发展，工业规模日益扩大。人类社会在充分享受技术与经济发达带来的丰富物质财富时，逐渐清醒地意识到，伴随着经济的高速发展，自身正面临着自然资源（包括能源）的迅速减少以及废弃物质所造成的生态环境恶化。资源与环境问题已严重威胁到人类的生存和社会经济的可持续发展。然而，值得思考的是，地球的自然生态系统已经有 40 多亿年历史，各种物质（动物、植物、微生物）之间一直保持着平衡与和谐的自然演化过程，只是到了最近，大约 300 年的工业社会的出现及发展，这种平衡与和谐才逐渐被破坏。其原因是，自然生态系统是一个封闭的良性循环系统，它遵循的规律是，原料与废物之间不断进行交替转化，自然物质在这种转化之间保持着一种物态平衡关系（图 1-1），并且能够被循环利用。然而，工业生产的介入，破坏了这种良性循环系统。一直以来，工业发展都是以追求高的生产效率和经济效益为主要目标，没有顾及其对自然规律的干扰，遵循的是一种单向发展模式，即不断消耗自然资源和能源，同时又不断向社会积累废弃物和对环境造成污染（图 1-2）的模式。以这种单

向发展的经济模式，工业规模越扩大，资源匮乏和环境负荷就越严重。

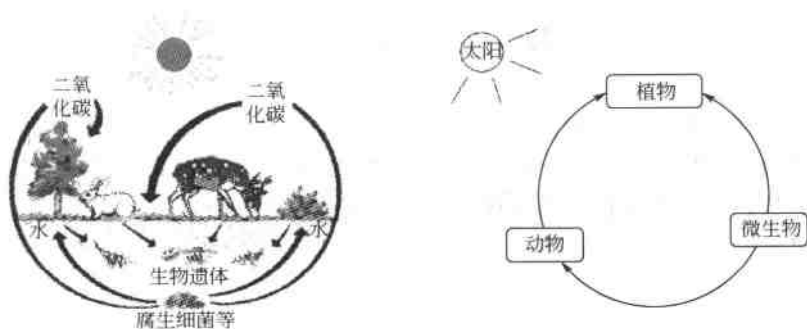


图 1-1 自然界物质的良性循环关系

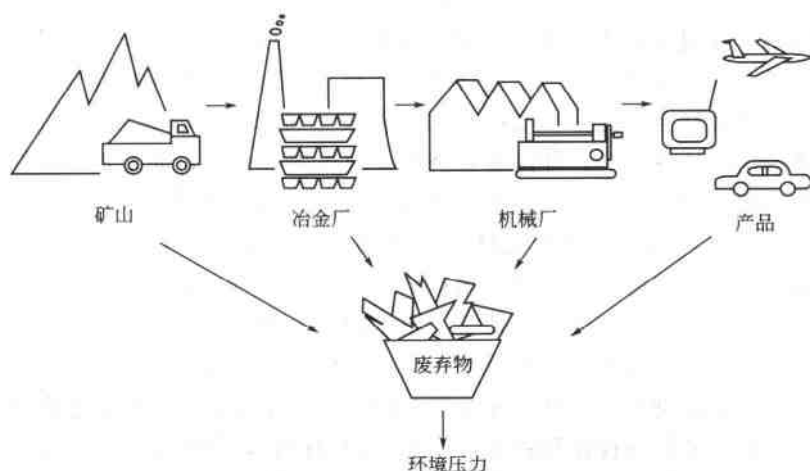


图 1-2 工业生产的单向发展模式

在经过以上的对比思考后，近年来，循环经济（Circular Economy）、资源的循环利用（Resources Recycling）和生态环境材料（Ecology Materials）的理念应运而生。现在，大力开展材料的环境协调性评估，发展零排放和零废弃的新材料技术，促进资源

与材料的循环利用，开发生态环境材料，逐步建立新的循环型经济体系已成为 21 世纪人们的共识。

循环经济是经济学家在研究 21 世纪世界经济发展时提出的新的经济模型，是对物质闭环流动型（Closing Materials Cycle）经济的简称。它是与传统经济相对比而提出的新概念。循环经济强调按照自然生态系统物质循环和能量流动规律重构经济系统，使得经济系统和諧地纳入到自然生态系统的物质循环过程中，建立起一种新的经济形态。传统经济与循环经济的运行模式比较，传统经济的特点是“资源-生产-产品-消费-污染排放”，物质是单向流动的。在这种经济模式中，自然资源和能源被持续地开发利用，与此同时生产加工和消费过程又把废弃物大量排放到环境中去。而循环经济则是“资源-生产-产品-消费-废弃物再资源化”，物质是反复循环利用的。它强调在社会的生产和消费过程中，不产生或者只产生很少的废弃物，因此可从根本上解决长期以来环境与发展之间的尖锐冲突。由此可见，循环经济是一种人类与自然和谐共处的经济模型，是建立在质量守恒定律基础上的科学模式。只有遵从这一模式，才能维护生态平衡。循环经济的建立是个庞大的系统工程，它涉及到从企业到社会结构的变化，人们消费观念的变化，法规制度的变化，国民经济核算体系的变化和与之相适应的科学技术的进步。

资源循环是循环经济的重要组成部分。它是指：将生产加工中产生的废余料、社会使用过的报废物品作为二次资源，经过技术处理后重新服务于社会。正如自然界中存在的许许多多、大大小小的自然循环一样，资源循环可以维持整个生态的平衡，并且可以修复长期以来遭到破坏的环境，造福人类社会。因此，资源循环、再生与再利用，即所谓的 3R(Recycle, Reduce, Reuse) 形成了一个重要的工业发展领域，其主要任务和作用是开发利用二次资源、释放环境压力、节约能源和降低成本，是一个绿色产业。

资源循环可以有几种不同的模式或途径，对社会经济做出各自贡献，见图 1-3。

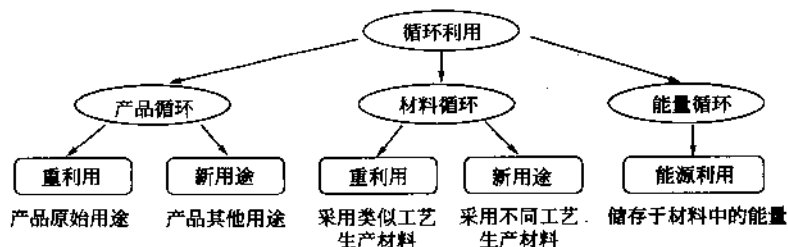


图 1-3 资源循环的不同模式

生态环境材料的开发是循环经济建设更高层次的追求。所谓生态环境材料，是指那些具有良好的使用性能或功能，并且与环境有很好的协调性的材料。是 20 世纪 90 年代在国际高技术新材料研究中形成的一个新的科技领域。它的主要内容包括：废物的再资源化技术，环境污染修复技术，材料制备加工中的洁净技术，以及节省资源和能源的技术；此外，还包括研究开发对于经济持续发展和环境保护有利的材料，对材料的环境协调性进行评价等。

1987 年 UN 报告“我们共同的未来”中对于什么是可持续发展给出了这样的解释：满足这一代人需求的发展不会使将来一代人满足他们需求的发展空间受到威胁。可见，一个向自然界索取资源最少，对生态环境破坏最小，能够保证人类社会良好发展的循环经济型，是人类的努力目标。

1.2 铝资源与再生铝

1.2.1 铝的资源

铝是地壳中蕴含量最多的金属元素，也是在地壳中分布最广泛的元素之一。世界已知储量在 550 亿~750 亿吨，探明储量约 220 亿吨。分布在几内亚（25%）和澳大利亚（20%）较多，约占一半，其他储量较多的还有十几个国家。自然界中的含铝矿物约有 250 多种，常见的矿物约 43 种，其中最重要的是铝硅酸盐及其风化产物铝矾土，即所谓的铝土矿。铝土矿是经化学处理后制取氧化铝的主要原料。我国的铝土矿资源也十分丰富，估计储量达 23 亿吨。

铝土矿根据其所含的主要矿物类型分为：三水铝石型、一水软铝石型和一水硬铝石型。国外铝土矿主要是三水铝石型，其次为一水软铝石型，一水硬铝石型的铝土矿较少。而我国的铝土矿中98%的是一水硬铝石型铝土矿，三水铝石型铝土矿极少。一水硬铝石又叫做含水铝石，其结构简式为 $\text{AlO}(\text{OH})$ 或 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。在铝矿石中一般都含有 TiO_2 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Ga_2O_3 、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 等杂质。水铝石溶于酸和碱，但在常温常压下溶解甚弱，需在高温高压和高浓度强酸或强碱下才能完全分解。一水硬铝石形成于酸性介质，与一水软铝石、赤铁矿、针铁矿、高岭石、绿泥石、黄铁矿等共生，其水化后可变成三水铝石。

国外的三水铝石型铝土矿具有高铝、低硅、高铁的特点，矿石质量好，适合用耗能低的拜耳法处理。我国的一水硬铝石型铝土矿，属于难溶出型矿物，其特征是高铝、高硅、低硫、低铁，具有中低铝硅比，矿石质量差，加工难度大，这使得我国的氧化铝生产不能像大多数国家那样完全采用拜耳法，而多采用耗能高的联合法。

1.2.2 铝的生态环境特征

从严格的意义上讲，任何矿产资源的消耗都是不可逆的。尽管我们拥有的铝资源十分丰富，但是，长期无节制地开采消耗，终究会导致资源匮乏。另外更值得重视的是，在铝矿大量开采和铝的冶炼加工过程中，所造成的能源消耗和环境破坏极大。采矿和选矿时会破坏植被、产生粉尘、排放大量废水，冶炼时产生烟气，氧化铝和电解铝生产需要消耗大量的电能。因此，以矿产资源为基础的铝工业，是建立在对生态环境带来大量不可逆破坏基础之上的。减轻资源、环境与需求之间的矛盾可通过三个途径：一是提高材料质量，使材料的使用寿命延长和材料使用效能提高来减少原材料的消耗；二是采用节能和环保的生产加工技术，减小材料生产过程对环境造成的破坏；三是资源的再生利用，即通过废弃材料的回收与再生利用来减少自然资源的消耗。过去，人们习惯根据一个材料的力学、化学和物理的性能来评价它的发展潜力，因此，将材料的使用性能和加工性能作为材料研究与发展重点。近年来，人们开始重

视材料的环境协调性 (ecotechnology) 评价和生态环境材料 (eco-material) 的发展, 使得材料的开发及生产加工技术的选择更科学。材料的环境协调性, 强调在保持材料的工艺性能和实用性能基本不变或有所提高的前提下, 使材料在生产、加工过程中消耗较低的资源、能源, 排放较少的废弃物, 或使其废弃物易于分解、回收和再生利用。具有良好环境协调性的材料被视为生态环境材料, 即“绿色”材料, 值得大力发展。

按照这个评价标准, 铝及铝合金材料具有两重特性, 在原生铝的生产中, 消耗自然资源并且耗能很高、环境破坏也较大。但是, 铝的耐蚀性很好, 不易氧化锈蚀, 填埋于土壤中需要 300 年才能分解。因此, 与其他金属比较, 其回收率很高; 废旧铝的再生加工, 耗能较原生铝生产大大降低, 可节省电能 95%, 因此, 铝的再生效益很大; 铝经过再生加工后, 其品质和性能不会受到影响, 理论上可达到与原生铝一样的水平, 因此, 在基础金属材料中铝的可再生利用性是最好的。随着世界原铝产量和消费量的迅速扩大, 社会上积聚的废旧铝材数量也在不断增多, 可用于再生铝生产的资源越来越充足。可见再生铝的生产具有良好的环境效益, 属于绿色产业。减少原铝生产, 利用铝的易回收性、再生效益高、再生资源丰富的优势, 大力发展再生铝产业, 是符合经济可持续发展要求的。许多国家在保护环境方面的立法也极大地推动了再生铝工业的发展, 例如再生利用法、填埋法规、生态税等。

1.2.3 铝的再生利用

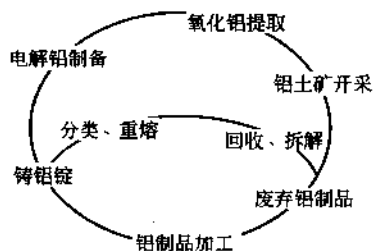


图 1-4 铝的循环应用

建立图 1-4 所示的铝的生产-消费-回收-再生利用的循环, 需要对以下几方面的基本条件进行评估, 即可再生性、节能效益、资源条件。

1.2.3.1 铝的可再生性

在工业常用的金属材料中, 铝的可回收性是最好的。

这是由于铝具有良好的抗腐蚀性能。除了某些铝制化工容器与装置外，铝制产品在其使用期间几乎不被腐蚀。如建筑铝门窗、高压输配电线、交通运输工具上的铝结构与零配件、铝制易拉罐等在其服役期间仅发生极少量的腐蚀损失，可回收率极高。在重复熔炼铸造过程中，仅产生大约 4%~8% 的损耗（含烧损与机械损耗）。与其他常用金属材料比较，铝的循环再利用的另一个显著优势是，再生后的材料品质较之原生铝几乎不会降低。因此，铝又被称作可持续发展的“绿色金属材料”。

铝的可再生性很早就为人们了解并加以利用。事实上，距霍尔-赫洛特电解法的发明还不到 7 年就开始了最早的再生铝的生产。“二战”期间，产生了大量破损报废的军用飞机，迎来了再生铝冶金的第一个高潮。此后，20 世纪 50 年代，美国的乔·亨特（Joe. Hunter）树立起再生铝的第二个里程碑。他将废杂铝熔化，再在带坯铸机内处理熔融，获得了可锻的半加工品，使再生铝走出了仅限于铸件的使用范围。随着工业生产的逐年扩大，世界铝材的需求和消耗量迅速增长。民间集聚的废弃铝材不断增多，为开发利用提供了巨大的二次资源。铝的回收价值很高，因为回收的废旧铝，可以反复多次重熔，再生后利用，其成本大大低于原生铝。随着再生加工技术提高，在一些工业发达国家，将再生铝重复用于同一产品，例如，铝制饮料罐，能够做到单独收集，重熔加工后，再次用于制造饮料罐，其损失很小且能保证原有质量。目前，在工业技术和设备比较先进的国家，再生铝已经越来越多地用于重要的高端产品，美国已有再生铝加工企业，为航空航天制造领域提供高性能的再生铝材料。

1.2.3.2 节能效益

再生铝的生产与电解铝生产比较，在能源消耗方面具有极大的优势。若以矿石为起点生产原铝，需要经过从铝土矿开采→氧化铝提取→电解制铝→铸成锭块这一复杂的生产过程，每个环节都需要消耗大量能源。其中电解制取金属铝电能消耗最高，每吨铝的直流电耗约为 13000~18000kW·h。如果用回收废铝生产

再生铝，则可省去这部分能耗。通常情况，再生铝生产的能耗不超过电解铝生产总能耗的 5%。有资料报道生产 1t 原铝需耗能 $21310.8 \times 10^4 \text{ kJ}$ （电能约占 82%），而生产 1t 再生铝合金能耗仅为 $548.8 \times 10^4 \text{ kJ}$ ，只有原生铝的 2.6%。图 1-5 所示为原铝和再生铝生产的能量消耗分布及消耗量对比。与原生金属相比，再生铝的生产过程还省去了复杂的采矿、选矿等工序，每生产 1t

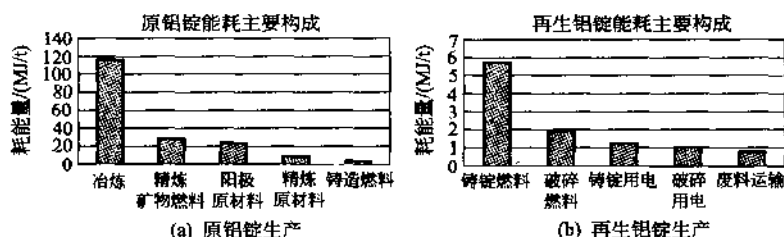


图 1-5 原铝和再生铝生产的能量消耗分布及消耗量

再生铝，除了节约大量的电能，还可节省 10.5t 水，少用固体材料 11t。有报道说，生产一只再生铝饮料罐所节省的能量可以点亮 100W 灯泡 3.5h。由于我国铝土矿资源的特殊情况，氧化铝生产能耗比国外的大一倍。因此，再生铝的生产对我国来说，更是一项效益巨大的节能工程。

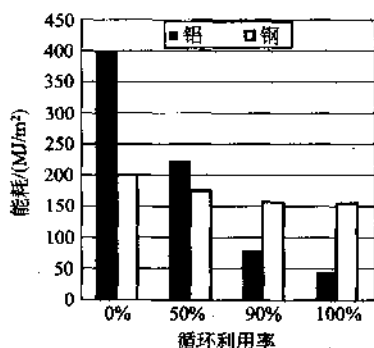


图 1-6 轿车用铝板和钢板的循环利用率与能量消耗的关系（理论上的）

再生铝的节能效益与其他材料比较也有明显优势。图 1-6 显示了轿车用铝板和钢板的循环利用率与能量消耗的关系比较，可以看到，在完全不进行再生利用的条件下（回收率为零时），铝材的能耗明显高于钢材。而随着再生利用率提高，铝材的能耗降低，在充分回收再生的情况下，铝材的节能效益将远远超过钢材。可

见，从节能角度来看，提高铝材的循环利用率更为重要。

1.2.3.3 资源优势

以回收的废弃铝作为再生资源无论在数量上还是在品质上都超过矿产资源。随着我国经济的迅速发展，材料需求量增加很快。铝矿的开采量、铝材加工和铝产品的消费量都急剧加大，同时含铝废弃料的社会积聚量也迅速增加。也就是说，作为一次资源的矿物资源在减少，而再生铝生产所需的二次资源的储备在不断增加。其储量可以根据原铝的消耗量以及铝及其产品的生命周期进行估算。按照各种铝产品的使用期限以及2000年废铝的回收率德国所作的分析是：使用期最长的是建筑及结构件用铝，最高可达到30年；使用期限最短的是铝的包装品，仅约6个月；平均报废期为14年。在中国除了有法规规定期限强制报废的产品外，许多产品如家用电器、铝门窗、日用品等的使用年限都比发达国家的长一些，因此，我国铝制品的报废期要长一些，有人提出大约为15年。原铝的消费是再生资源的基础，社会消费铝材的总量以及15年前铝材消耗的增长速度可大致看作是当前再生资源的储量和增长速度。20世纪90年代后，我国铝消费开始迅速增长，1990年国内市场原铝消费量为83万吨，加上再生铝的用量，实际消费量约108万吨。2004年原铝产量达到667万吨，消费量达到600万吨；铝材产量439.66万吨。考虑铝材及再生铝的消费，全铝消费已超过850万吨。从20世纪90年代初到现在，经过了15年后，大量消费的铝材开始进入回收期。根据粗略统计，我国积蓄在社会上的各种形式的铝已达到了5000万吨以上，并且还在快速继续增长，据测算，2004~2010年，我国废铝还可再积蓄约4300万吨。它们将成为一笔巨大的资源财富。

从另外一个角度看，循环回收的铝又是杂质可以进行机械和物理分离的超高品位“富矿”，属于优质资源。目前，采用国际先进技术已可以做到不添加原铝调整成分即可生产出性能与使用原铝为主的合金相当的再生铝材料。由此可见，与自然资源比较，可回收再生的铝资源具有品质优良和蕴含量丰富两个方面的巨大优势。充