

第 11 篇 绿色产品设计

主 编 蔡建国
编写人 蔡建国

1 概述

1.1 绿色产品设计思想的由来

众所周知,虽然现代工业为人类创造了巨大的社会财富和灿烂的物质文明,但是由于在创造物质财富的过程中,滥用自然资源(包括能源),以致造成资源日趋枯竭,生态环境严重失衡;而工业产品在其生产与使用过程中所排放的废弃物,又给环境带来严重污染,从而引发诸如:温室效应、酸雨、臭氧层空洞等公害。所有这一切,都直接威胁着人类社会的生存与发展。鉴于环境质量的退化是全球性的,所以它所造成的危害,也将威胁全体人类。因此:

■ 1972年6月,联合国环境规划署在瑞典首都斯德哥尔摩,召开了世界环境会议,发表了《斯德哥尔摩宣言》,借此引起人们加深对人类生存环境严重退化的理解和认识。

■ 1982年5月,在肯尼亚首都内罗比再次召开了世界环境大会。会上提出“对环境的威胁,因为贫穷和挥霍浪费而变得更为严重”;“世界各国政府和人民既要集体地,也要单独地负起其历史责任。使我们这个小小的地球能保证人人都能过着尊严的生活,并代代相传下去。”

■ 1992年6月,联合国又在巴西首府里约热内卢,召开了“环境与发展”的全球首脑会议。会议通过了指导各国可持续发展的纲领性文件——《里约环境与发展宣言》和《21世纪议程》。这标志着“可持续发展观”已在全世界范围内得到理解和确认,并成为全人类走向21世纪的共同选择。

绿色产品设计思想,正是针对当前人类社会所面临的上述资源短缺与环境污染的严重威胁,而提出出来的一种新的产品设计理念。其根本目的,就在于在产品阶段,便应考虑如何使所设计的产品,在其生命周期(设计、生产、流通、使用、维修、报废回收、再生利用)的各个阶段中的资源利用率为最高,而对环境的污染却最少。为实现这一根本目的,必须正确设计产品的结构及其在使用与维护时对环境的良好性、正确选择所用材料、正确选用毛坯类型及其生产方法、正确考虑产品生命周期终止后的回收和利用。

1.2 绿色产品设计的发展现状和策略

世界各国政府和人民已将可持续发展视为人类社会与经济发展的基本战略。深知我们当代人不仅要为我们自己,而且也必须为我们的后代留下一个可持续发展的生存环境。因此,我们必须从现在开始就采取有效措施去节约地球上有限的资源,防止、乃至消灭对环

境所造成的严重污染。

据联合国环境规划署的一份统计资料报道,目前世界上每消费1t产品,在其整个生命周期(从产品的设计、生产、使用、维修、到报废处置)内,要给环境增添8t负担。我们把这称之为“冰山现象”,如图11.0-1所示。图中较为形象地说明:人们每天使用着各种形形色色的产品,这好比人们看到的浮出水面的冰山顶部,就只是那么一丁点儿;然而支持露出水面这一丁点儿的,却是沉在水下硕大无比的冰山底部。这顶部与底部的重量比例关系,即如图中所示的1:8。由此可见,消费1t产品,却给环境造成8t的负担(包括全生命周期内所消耗的资源 and 所排放的废弃物)。这一数字着实惊人!如果我们对此继续放任而不加节制,则地球上的资源必将迅速消耗殆尽,而各种废弃物的迅速增长,也必将酿成公害而威胁人类自身的生存。

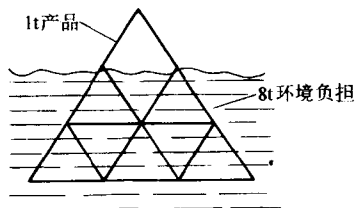


图 11.0-1 产品生产与环境负担间的冰山现象

为了节约资源和防止污染,目前在贯彻可持续制造时所采取的策略有两个,即:“源头预防”和“末端治理”。所谓“源头预防”,是指在设计阶段,便从产品全生命周期的角度去预防滥用资源和产生污染。所谓“末端治理”,则是指在产品生命周期终止(寿终正寝)后,要对报废产品进行有效处置,包括回收、拆卸、重用、焚烧、掩埋等。从长远来看,这两种策略既不应对立,也不可偏废,而应该彼此相辅相成。

就大部分现有产品而言,由于这些产品在当时设计之初,并未刻意强调从可持续发展的战略高度去考虑,因此无法在产品一开始便贯彻“源头预防”的策略,以致使这些产品对环境的友好性很差。正因为如此,所以对于这些现有产品,只能采取“末端治理”的策略。

显而易见,“末端治理”的策略,是一种消极被动的售后处置策略;而“源头预防”的策略,则是一种积极主动的事前防范策略。从倡导绿色产品设计角度来看,必须主张“源头预防”的策略,也即在产品研究、开发和设计之初,便充分考虑节约资源和防止污染,从而使产品在其全生命周期内对环境所造成的负担为最小。事实上,只有在产品设计阶段切实贯彻可持续发展的战略,才能最有效地节约资源和防止污染。

即使在产品设计阶段采取了“源头预防”的策略,

这也并非表示就无需“末端治理”了。其实,只要产品报废,也即产品到了它生命周期的末端,它便须接受治理。只是做好“源头预防”,将使“末端治理”能够更容易、更合理地进行。反过来说,“末端治理”也并非真的消极被动到了无所作为的地步。通过“末端”对报废产品的拆卸,可以发现许多不尽合理的结构设计。由此即可提出改进产品结构的建议,并总结成相应的设计准则,反馈给“源头”,以提高产品结构设计的质量,同时也有利于今后的“末端治理”。此即前面提到的两者相辅相成的含意。

2 传统设计与绿色设计的区别

传统产品设计,它重点考虑产品的功能、质量、成本和寿命,而对于使用、维护及产品废弃过程中对环境的影响考虑得很少,甚至根本没有考虑。因此,设计人员对产品在其整个生命周期中的资源利用是否最优,对环境的影响如何,产品废弃后能否有效再利用知之甚少,只要产品满足要求的功能并易于制造就算完成

设计了。按传统设计生产制造出来的产品,在其废弃后就成为垃圾,回收利用率低,资源浪费严重,更糟糕的是,如果其中含有有毒有害物质,就会严重污染环境,影响可持续发展。如图 11.0-2 所示,产品生命周期的几个阶段在传统设计过程中,从后端向前端反馈的信息较少,产品生命周期表现为从“摇篮到坟墓。”

绿色设计的概念是从并行工程 (Simultaneous Engineering) 思想发展而来, 产品全生命周期中的各个阶段 (包括设计、制造、使用、回收处理) 被看成一个有机的整体, 在保证产品的功能、质量和成本等基本性能情况下, 充分考虑产品全生命周期中各个环节中的资源、能源的合理利用、环境保护等问题 (如图 11.0-3 所示)。产品的生命周期不仅仅是从“摇篮到坟墓”, 而是从“摇篮到坟墓和再生” (如图 11.0-4 所示)。绿色设计包含一系列具体技术, 如全生命周期评估技术 (Life Cycle Assessment), 面向环境的设计 (DFE), 面向回收的设计 (DFR), 面向维护的设计 (DFM), 面向拆卸的设计 (DFD) 等。

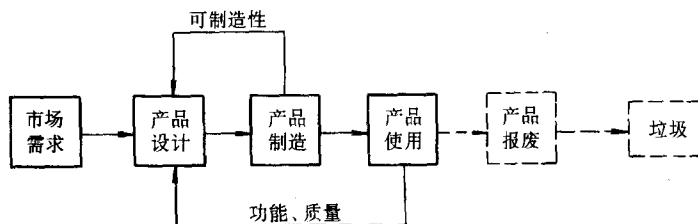


图 11.0-2 传统的产品设计

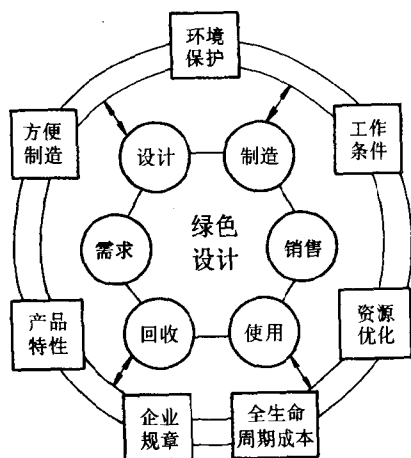


图 11.0-3 绿色设计

在绿色设计过程中,必须充分综合地考虑如下因素:

■ **产品基本属性** 产品能满足消费者所需求的功能、质量、可制造性等基本属性是其立足之本。否则,设计便毫无意义。

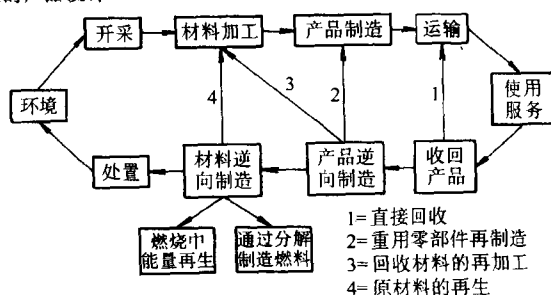


图 11.0-4 产品从“摇篮到坟墓和再生”的全生命周期

■ 资源能源优化利用 传统设计中,企业也从降低产品生产成本角度考虑过节资降耗问题,但由于传统设计中仅仅只考虑产品的设计开发、制造、销售等几个阶段,而不是以系统的观点从产品的全生命周期角度上去考虑该问题,因此,虽然对产品进行了一些节省资源和能源的改进性设计,但是其节资节能效果是有限的。绿色设计则克服了这一缺点,分析所设计产品的全生命周期中各个阶段以及整体的资能源消耗情况,用并行工程的原理并行地考虑产品寿命周期中各

个阶段的节资节能问题,并进行改进设计,从而实现产品全生命周期的资源和能源优化利用。

■ 环境保护 绿色设计中强调无论是在产品生产制造过程中,还是在产品的使用、维护和回收过程中,产品对环境的负面影响最小。

■ 产品全生命周期成本 无论是传统设计中,还是绿色设计中,产品成本都必须作为一个十分重要的因素来考虑。只不过传统设计中通常所考虑的产品成本仅包括设计、制造和营销费用(指商业所需费用,如租金、广告、照明、暖气等非制造成本)成本,未考虑消费者使用成本和产品最终处理成本,而绿色设计中却考虑的是产品的全生命周期成本(由企业成本、用户成本和社会成本三部分组成)。随着环境保护的法制化,企业对产品的整个全生命周期负责已经逐步走向规范化、法制化,因此企业设计时不得不考虑产品的维护和最终处理成本;此外,产品要真正占据市场,企业设计时还得为顾客考虑,为用户降低产品的使用成本;同时从可持续发展观点出发,企业在维护自身经济利益的同时,还应从提高整个社会福利角度考虑,如何降低因产品报废废弃(或部分零部件废弃)后对环境、人们健康等造成的影响而产生的社会成本。

3 原理与方法

3.1 产品的生命周期 (product life-cycle)

产品的生命周期可以分为商业生命周期和物理生命周期。产品的商业生命周期是指产品从概念设计、开发研制、生产维修、成熟、重新评价、到更新并产生下一代产品的一系列商业过程。新产品的商业生命周期一般可分为四个阶段:开发期、增长期、成熟期、衰退期。而产品的物理生命周期是按照材料与能量的流动来定义的。绿色设计里所谈论的产品生命周期是指它的物理生命周期。

产品的物理生命周期(图 11.0-4)开始于材料的获取加工,经历了制造、运输和使用后被淘汰。淘汰的产品可直接回收重用(二手货);或经过拆卸、翻新成为可重用的零部件使其返回产品的制造过程;而对于无重用价值的部分进行材料回收使其返回材料加工;还有一部分材料被分解,作为燃料回收能量或产生再生原料用以材料加工;最后的废弃物被处置,回到自然界而形成个封闭的周期。在产品的生命周期研究中,出现了“逆向制造”(demanufacture)的概念。逆向制造是与制造过程反向的、基于材料和产品回收重用的制造过程。

绿色设计作为一种系统的方法,是在新产品的开发阶段就考虑产品在生命周期内对环境的影响,从而减少对环境的污染、对资源的浪费、对安全和健康等可

能产生的负面作用。

对制造业来讲,绿色设计意味着选择适当的材料,进行合理的功能结构设计、造型设计,制定恰当的制造装配工艺,从而设计出面向环境的产品。在并行工程中,绿色设计与其它许多的设计要求一样,将产品性能(可测试性,可制造性,可装配性,可维护性等)设计贯彻于产品生命周期的各个阶段。

对现有的面向环境的产品设计方法、工具进行归类归纳。总体来讲,可把它们分为两大类:

■ 基于产品生命周期评价 (LCA: Life-Cycle Assessment) 的生命周期设计 (LCD: Life-Cycle Design);

■ 基于改进产品某一方面特性的面向 X 设计 (DFX: Design for X) 的集成。

3.2 产品的生命周期设计 (Life-Cycle Design)

产品的生命周期设计(图 11.0-5)覆盖了产品的整个生命周期,从需求分析、概念设计、直到使用、废弃、回收和处置。通常它采用生命周期评价、影响分析等方法对设计进行检查、分析和改进。在进行 LCD 设计的过程中要对产品生命周期的各个阶段进行分解和分析,对每一个阶段都要考虑以下几个方面:

- 成本
- 政策法规
- 保护环境
- 资源优化
- 产品性能
- 便于制造

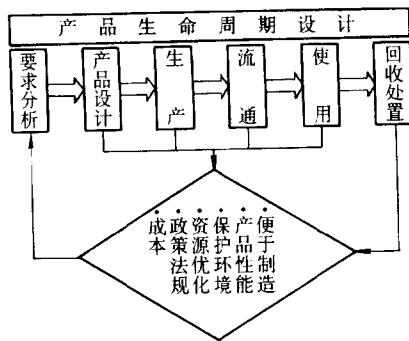


图 11.0-5 产品生命周期设计

也就是说,首先要明确产品在以上几个方面所应该满足的功能、属性、质量等要求,然后再根据这些要求进行产品的概念设计、功能设计、详细设计、试制、批量生产、销售等等。在设计、试制、生产乃至以后的过程中不断地发现问题并改进设计。

通常, LCD 采用生命周期评价或影响分析对产品

的设计进行评估并做出修改。因此在设计的过程中要对产品生命周期各个阶段的输入输出(如材料、能量、劳动力废物等)进行分析。对于 LCD 这种方法来讲,“对产品要求的分析(requirement analysis)”和“产品生命周期评价”是设计成功与否的关键,也是 LCD 方

法的核心。在 LCD 具体实施过程中,往往要使用多重矩阵进行问题的分解与分析。图 11.0-6 所示,是一个简化的对产品进行分析的一个多重矩阵。事实上,对产品生命周期各阶段、各环节的分解,可根据具体情况而进一步地细化。

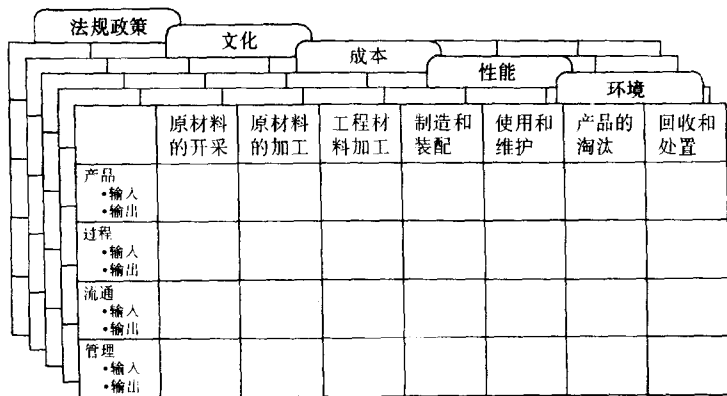


图 11.0-6 产品生命周期设计的分析矩阵

3.3 面向 X 的设计 (DFX)

面向 X 的设计集中于对产品生命周期中某一具体阶段中、某些具体特性的分析与改进,并常常以经济性作为评价指标。表 11.0-1 是对 DFX 方法的分类划分。该类方法通常将产品的结构信息输入图表,计算各种方案与策略的成本与收益,进行经济性分析与评价,从而得到最优的设计方案。目前的 DFX 方法一般只触及各类环境特性的某一方面,因而缺乏整体性、综合性和系统性。图 11.0-7 表示了该类方法的基本结构。对绿色设计来讲,是基于生命周期的思想,要就产品在生命周期各个阶段对环境可能造成的影响放在设计的时候进行预测、分析和解决。因此绿色设计是各种 DFX 方法的集成和综合。

表 11.0-1 DFX 方法的内容

面向制造的设计 DFM: Design for Manufacturing	面向制造的设计 (DFM) 面向装配的设计 (DFA) 面向制造与装配的设计 (DFMA)
面向生命的设计 DFL: Design for Life	面向维修的设计 (DFMAIN) 面向服务的设计 (DFS)
面向回收的设计 DFR: Design for Recycling	面向拆卸的设计 (DFD/EOL: End of Life) 面向回收的设计 (DFR) 面向处置的设计 (Design for Disposal)

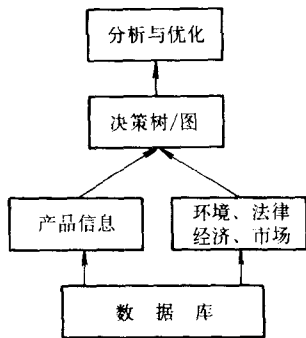


图 11.0-7 DFX 方法的基本框架

4 绿色产品设计指南

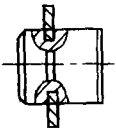
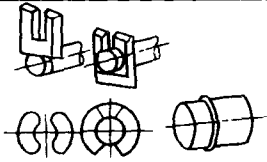
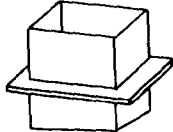
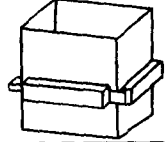
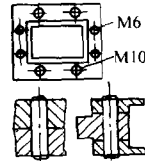
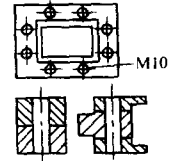
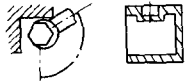
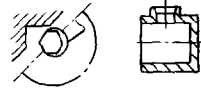
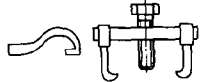
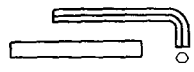
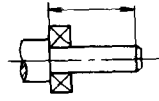
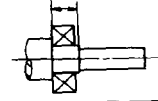
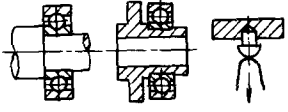
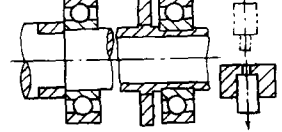
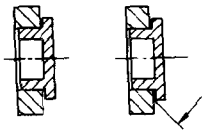
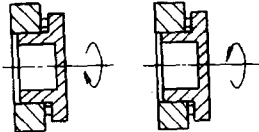
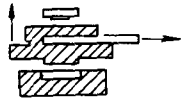
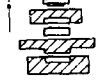
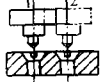
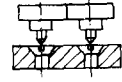
4.1 材料的选择

材料的选择是产品设计中的一个关键环节,同时也在很大程度上决定了产品的环境性能。由于缺乏对产品环境影响的考虑,因而传统设计中的材料选择具有诸多缺点,例如:

- 材料种类繁多,没有标识,增加了回收过程中材料分类的难度;
- 有些材料加工过程能耗大,资源利用率不高;
- 材料的加工、存储、使用和回收对环境污染大,有些是有毒有害过程;
- 没考虑报废后的回收问题。

在产品设计的过程中,材料的选择受到各种因素的影响,例如材料的价格、力学性能、功能结构和安全

表 11.0-4 连接准则

	准 则	可 拆 卸 性 差	可 拆 卸 性 好
1	利用轻的易拆或可损坏连接件		
2	减少连接件数目		
3	使用相同的连接件		
4	给拆卸工具留下足够的工作空间		
5	使用简单的标准连接件		
6	减少拆卸距离		
7	避免损坏拆卸零件		
8	采用相同的装配和拆卸操作方法		
9	拆卸方向一致		
10	合并可能的连接件		

4.3 毛坯设计与制造

毛坯的设计制造不仅影响毛坯的制造成本,而且影响到后续工序的经济性和环境影响。综合起来,设计准则如下:

■ 尽可能利用如精铸、精锻、冷轧、冷挤压、粉末冶金等加工精度高的工艺,这样可大大减少机械加工量,充分利用资源;

■ 结合具体的生产条件,考虑外协的可能性,实现毛坯的专业化生产,从而可在大批量生产的模式下采用新工艺和新技术;

■ 对于形状较简单的小型零件,将其合成一个毛坯,当加工到一定阶段再分离,如发动机连杆;

■ 一般用途的钢质阶梯轴零件,如各台阶直径相差不大,选用棒料;如台阶直径相差大,选用锻件;

■ 形状复杂的毛坯,常用铸造方法。中小型零件采用先进的精确铸造方法;

■ 根据零件的材料确定毛坯类型。如材料是铸铁,则选用铸造毛坯;如材料是钢铁,且力学性能要求高时,优选锻件;力学性能要求较低时,选用型材或铸钢。

4.4 绿色制造工艺

产品的制造是产品全生命周期中重要阶段,直接决定产品的成本,并且对环境的影响贡献很大;甚至一些产品全生命周期对环境的影响就是由该阶段决定的。绿色的制造工艺应当产生较少的切屑,节约资源;消耗或不用切屑液,不产生有毒有害气体、液体,减轻环境负担,同时保护工人的身体健康。基于此,干切削、激光加工方法值得优先考虑。

干切削是消除切削液污染,实现清洁化生产的有效途径,在很大程度上要依赖于新型刀具的开发与应用。陶瓷刀具由于具有高耐热性和良好的化学稳定性,非常适合用于干切削。但陶瓷材料脆性大、强度及韧性差等固有物理特性却在很大程度上限制了它在干切削中的应用。新型陶瓷材料通过减小陶瓷晶粒尺寸,提高材料纯度较好地解决了这一难题。切削试验表明,晶粒更细、晶界更纯的新型氧化铝陶瓷刀片具有良好的抗机械冲击和热冲击性能以及极高的耐磨性和抗破损能力,是用于干切削的理想刀具。

另一种方法是设计合理的纳米涂层可使刀具的硬度和韧性显著增加,使其具有优异的抗摩擦磨损及自润滑性能,适合用于干切削。美国学者开发的纳米涂层(Nanocoatings)是其中最成功的一种。这种涂层方法可采用多种涂层材料的不同组合(如金属/金属组合、金属/陶瓷组合、陶瓷/陶瓷组合、固体润滑剂/金属组

合等),以满足不同的功能和性能要求。

此外,有学者通过液氮内冷方式,而不用传统切削液来冷却刀具,已取得了较好的效果。

激光加工是利用激光束的单色性、相干性和平行性的特点,并且能连续(或脉冲)输出非常高的能量密度,可以在瞬间使材料受热、熔化,甚至蒸发、气化,达到加工的目的。已广泛用于材料的打孔、切割、成形、焊接及表面处理。与传统的加工工艺相比,激光加工具有以下特点:

1) 加工面大,几乎可加工从金属到非金属所有的材料,还特别适合加工极硬、极脆、极薄和熔点极高的难加工材料;

2) 加工区小,热变形很小,加工质量高;

3) 效率高,材料省;

4) 无需切削液,污染少,噪音低,劳动强度低。

具体来讲,激光打孔精度高($\pm 0.02\text{mm}$)、表面粗糙度好($R_a 1.6\mu\text{m}$),当采用数控激光打孔时,孔的位置精度约为 $5\mu\text{m}$;

当切割材料参数发生变化时,激光切割能克服冲裁工艺需要重新制造和更换模具的缺点,从而能缩短生产准备周期,降低生产成本。激光切割具有切缝窄、速度快、热变形小、切割部位和切口平整等优点,且可实现套裁以节约材料。切割部位和切割温度能方便而灵活地予以控制,便于实现生产自动化。

激光弯曲成形是将激光照射在工件所要弯曲成形的表面上,使材料局部受热后因热胀冷缩而产生局部应力-应变场,由此产生弯曲变形。激光弯曲成形不需模具,生产效率高,成本低;弯曲时不需外力、无回弹效应、精度高;适用于用传统工艺方法难以或不可能成形的硬质、脆性材料,如铸铁、Mo、Ti等。

4.5 易于维修

产品经过运行使用,必将导致机件的磨损和松动;严重时,甚至造成产品毁坏或无法正常工作。这时,必须对产品进行维修。在产品的维修阶段,如同在产品生命周期的其他阶段一样,应该力求使资源利用率为最高,而排放的废弃物为最少。此外,还应该使产品的维修工作能够方便而迅速地进行。为满足产品维修工作所提出的上述要求,显然必须在产品设计阶段便对日后的维修工作给予充分的考虑。使所设计的产品结构,在维修时能节约资源、防止污染、并能便捷地拆装。为此,归纳出以下面向维修的设计准则,以供设计产品时参考。

■ 在产品设计时,应尽可能使零部件具有较高的耐磨性。这是一条积极的产品维修策略。因为零部件愈耐磨,则其使用时间愈长,所以维修次数减少。

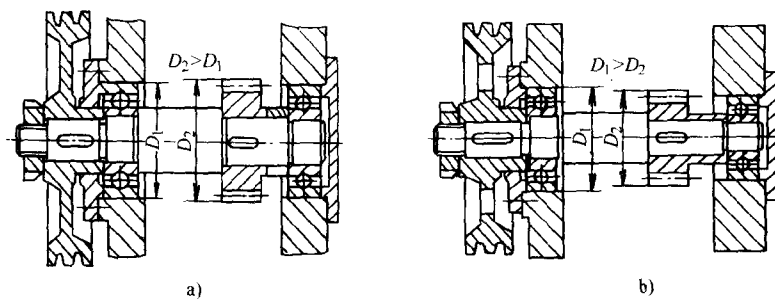


图 11.0-8 维修的便捷性与可达性

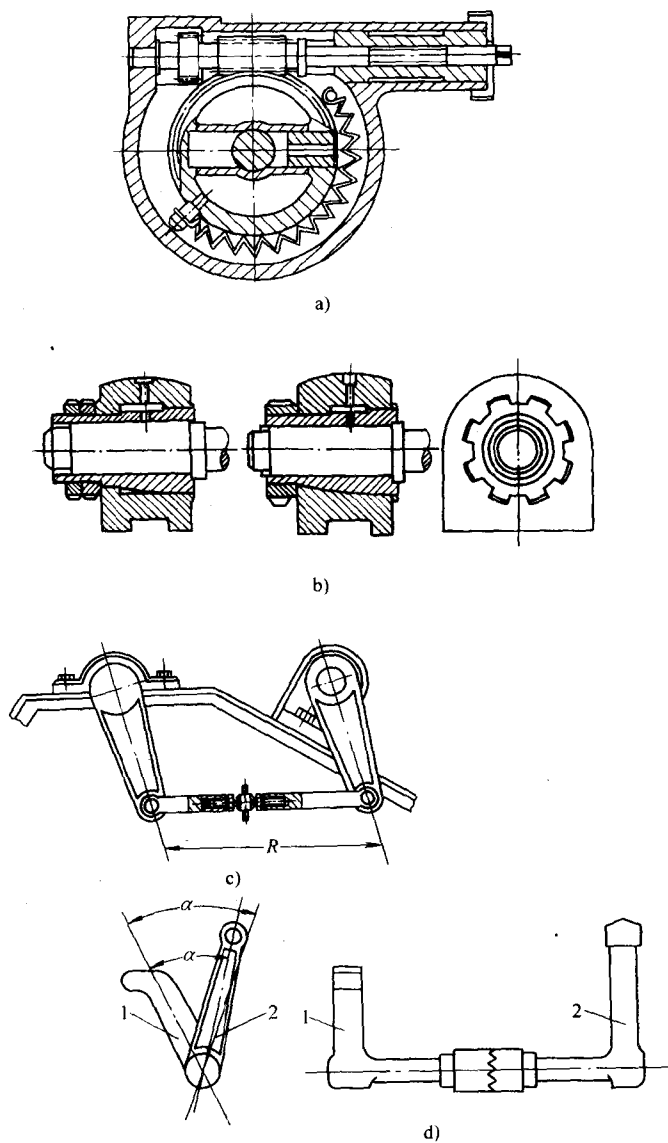


图 11.0-9 各种补偿磨损的可调节结构

维修次数少,意味着为维修所消耗的资源减少,所排放的废弃物也减少。

■ 产品及其零部件的结构,应具有良好的维修便捷性。维修的便捷性表现为:拆装方便快捷,可达性好。也即在产品维修时,能方便快捷地拆开产品而直达所欲维修处。维修完毕后,又能方便快捷地将产品装配成原样。否则,将增加维修难度,从而增加维修的劳动量。下面举一实例,并通过结构的对比方式,以说明维修的便捷性与可达性。

图 11.0-8 所示为一传动箱的部分装配结构。由图 a 可以看出,因为轴上的齿轮外径 D_2 大于箱体上左侧轴承孔径 D_1 , 所以该齿轮无法与轴预先装配成组件,而只能待轴穿过上述轴承孔后,才可将齿轮连同隔圈和右端的滚动轴承,依次在箱体内套装在轴上。显然,这样拆装极其复杂,毫无便捷性可言。为此,对此结构加以改进如图 b 所示。由图中可知,此处仅仅将箱体左侧的轴承孔孔径 D_1 加大,使 $D_1 > D_2$ 。于是,情况便大为改观。这时轴上所有的零件均可预先与该轴装配成一独立的部件(或称:装配单元)。因此,这种结构便具有良好的维修便捷性。值得注意的是,图中左边 V 带轮的轮辐上,设有沿圆周分布的一组孔。这些孔固然可以减轻带轮的重量,然而更重要的是,它们提供了维修时拆装的可达性。正因为有了这些孔,所以便可使拆装左侧轴承盖时的套管扳手,方便地穿过这些孔而直接抵达轴承盖的螺钉头部。否则,必须先拆卸左端的锁紧螺帽和 V 带轮,方能拆卸轴承盖。由此可见,结构设计时只需对维修的便捷性和可达性稍加考虑,便可显著降低维修劳动量,节约人力资源。

■ 产品及其零部件,应尽可能采用可调节的结构去补偿磨损,以取代零部件的直接置换。采用可调节结构以补偿磨损的方法,即可避免直接更换已磨损的零部件。因为更换已磨损的零部件,乃属消耗资源,而用以补偿磨损的可调节结构,则属节约资源。

图 11.0-9 表示各种补偿磨损的可调节结构。图中 a 是利用弹性元件(此处用的是弹簧)实现自动补偿;图 b 是利用锥体实现回转副间磨损的可调节补偿(同样也可以用斜面或斜楔实现平面副间磨损的可调节补偿);图 c 是用螺纹实现长度方向磨损的可调节补偿;图 d 则是用圆周上的细齿实现角度方向磨损的可调节补偿。

■ 产品结构设计时,应尽量优先选用各种标准化、规格化、系列化以及模块化的零部件。在不得不用零部件直接置换的方式进行维修时,最好将这类零部件设计成标准化的、规格化的、系列化的和模块化的。这样,一则由于标准化的互换性好,因此能使维修置换时方便快捷;二则置换下来的磨损零部件经翻新修复

后,可以重用或移用于规格化的零件与系列化的部件中。这有利于节约资源和提高已有资源的利用率。

4.6 便于拆卸回收

拆卸与回收是产品生命周期中的关键环节。产品拆卸和回收性能的好坏决定了产品生命周期结束后如何处置的问题。可以说,正是因为以往产品设计的拆卸与回收性能比较差,才造成了目前大量废弃产品难以处理、填埋场地的日益紧张、环境负担的日益加重的状况。也正因为有了拆卸和回收,才使得工业生态系统形成闭环(close the loop)型式。因此绿色设计必须考虑产品的可拆卸性和可回收性。

拆卸是采用一定的工具和手段,解除对零部件造成约束的各种联接,将产品的零部件逐个分离的过程。针对拆卸过程进行分析,可以发现影响产品拆卸性能的主要因素有:

■ 待拆零部件的数目:它决定了到底有多少个零部件需要被拆解出来。这个数目越大,那么拆卸所需要的时间显然就越长。因此在设计的过程中,应尽量减少这个数目。这时可以采取将不必要的零件删除掉、将可合并的零件设计成一个零件等方法。某个零部件是否需要被拆解出来,一方面取决于它是否造成了其他要拆零部件的约束,另一方面取决于该零部件的回收策略。

■ 待拆零部件在产品中所处的深度:这是与产品结构密切相关的一个参数。要拆卸的零部件在产品结构中所处的位置越深,那么取得它所牵涉的其他零部件和联接数目就越多、拆卸过程消耗的时间就越长。因此,在设计的时候要尽量降低产品结构的深度,或将回收价值高的零部件的位置设计在易于取得的地方。

■ 每个联接所联系的零件数:它在一定程度上描述了产品结构的简单程度。一般来讲,一个联接所联系的零件数是两个。但在结构设计比较合理的情况下,一个联接可以联系或紧固多个零件,这不但减少了联接件的数量,也提高了拆卸的效率。如果拆除了某个联接“螺钉 S”,得到了零件 A、B 和 C,那么零件 A、B、C 之间就是一种“与”(AND)的关系。

■ 拆卸过程的独立性:由于产品结构的特征,造成了拆卸过程可能是并行的也可能是顺序的。并行的拆卸过程指的是在某个时刻,可以从不同的路线对产品进行拆卸,这意味着有多条拆卸路线可以选择。各条拆卸路线之间是一种“或”(OR)的关系。顺序的(串行)的拆卸过程是指零部件的拆卸必须顺序进行。也就是在获得零件甲之前必须把零件乙拆除。显然并行拆卸过程比串行拆卸过程效率高。从另一个角度讲,并行拆卸降低了产品结构的深度。

■ 待拆联接的数目：联接是造成零部件相互约束的根本原因。联接可以是独立于零件的紧固件，如螺钉；也可以与零件做成一体，如滚有螺纹的瓶盖。为获得某些零部件，所需要拆卸的联接数目越多，显然拆卸所需要的时间就越久，拆卸效率就越差。

■ 待拆联接在产品中所处的深度：与零部件在产品中所处的深度类似，联接在产品结构中位于越深的层次，则为要触及所需要进行的前期拆卸就越多，效率就越差。

■ 联接的拆卸时间：不同的联接形式拆卸时所需要的时间不同。设计过程中，在满足需要的情况下，应尽量选择拆卸时间短的联接。同时，应采取措施减少联接的拆卸时间，例如计算机外壳的紧固螺钉采用滚花的头部，这样可以直接用手进行拆卸，减少了工具拿放和对准时间，也方便了使用者在没有工具的情况下进行拆卸。

■ 联接的种类和拆卸所需工具数量：产品中联接的种类越多，拆卸过程中更换工具的次数越多，拆卸的时间也就越长，效率就越差。在产品中如果可能，应尽量选择种类、规格一致的联接件。例如同样是螺纹联接，没有必要在一个产品中既出现六角头螺钉又出现十字头螺钉又出现内六角螺钉。

■ 联接的易达性：产品设计时应将联接件布置在易触及的地方。同时，应考虑到安装或拆卸时的操作空间。同样是一个螺钉，如果工具可以回旋 360°进行拆卸，其拆卸时间当然要比工具只能在 90°内旋转运动要短得多。

■ 拆卸时联接的可能状态：在拆卸时经常会遇到这样的情况，某个螺钉生锈或者螺钉头部打滑而无法将其旋出。遇到这种情况，就必须采用破坏性的方法，把螺钉破坏，或者在螺钉头部再造新的工具夹持表面。这就大大降低了拆卸效率，有时候甚至还破坏到原本可以回收重用的零部件。因此在设计时应对联接可能发生的状况进行估计，并在设计的时候就提供解决对策。

回收是使得产品能够以能量、材料或零部件的形式得以再生与重用的过程。产品的回收性能要在回收的不同层次上进行分析，即产品层、部件层、零件层和材料层。对于产品和零部件层，主要考虑的是产品和零部件的重用性，而材料层主要考虑的是材料的可回收性。材料的回收的一般过程：首先对材料进行粉碎、分离和纯化，然后进行分解或冶炼、制成再生材料用于制造新产品。

决定产品和零部件的可重用性的主要因素有：产品和零部件的可靠性、残余寿命、是否便于翻新和检测、以及是否可以实现非破坏性的拆卸等。对于材料的

回收性能，我们知道它是由材料本身的回收属性、产品所含材料的纯度以及这些材料的一致性（或兼容性）决定的。材料本身的回收属性要受到现有技术水平的制约，现在不能回收的材料，将来或许就能采用一定的技术手段将其回收。目前的回收技术状况是单一材料的回收、金属材料的回收技术相对比较成熟，而对于复合材料和混合材料的回收还存在着一定的困难，而且往往是以牺牲回收材料的质量为代价的。正因如此，才对材料的纯度和混合材料的一致性有比较高的要求。影响回收材料纯度和以及混合材料兼容性的因素有：

■ 联接件与被联接零件所采用材料的兼容性：如果两者不兼容，可能造成回收材料纯度下降。例如，被联接的两个零件材料相同但联接件材料却是与它们不兼容的，从拆卸的经济性考虑不需要再继续拆卸下去，所以联接件进入了非兼容材料的回收处理过程。再如，由于某个联接被腐蚀，很难将其从被联接件上拆除，因而该联接材料就被混入了其他材料的回收过程中。

■ 被联接零件的材料兼容性：当拆卸的经济性比较差的时候，往往就不再继续拆卸了，这时候那些被作为材料回收的、还没有被拆开的零部件就被混在一起统一处理了。对混合材料的处理，一般会先将各种成分采用一定的技术手段（如磁铁分离铁金属，利用比重不同分离塑料）进行分离，然后再进行回收。但这种分离的效果就比较差，大大降低了材料的纯度，也使回收材料的质量下降。因而在设计时，应尽量使被联接的零部件选择同样的或者兼容的材料。

■ 金属件嵌入塑料中：这在家电和一些日常电器商品中经常出现。由于这些小金属件是在塑料成型过程中镶嵌在塑料零件中的，分离很不方便，而且经济性又较差。这就造成了材料可回收性的下降。因此产品设计时应予以避免。

■ 塑料零件缺少标识：产品中使用的塑料种类繁多，成分千差万别，对它们的回收还比较困难。由于它们在外形上极其类似，就使得塑料的区分和分离成为一大难题，因而 ISO 颁布了塑料成分标识的国际标准。但目前国内很多企业在进行产品设计的时候根本没有对所采用的塑料成分进行标注说明，这对回收造成了很大的困难。

■ 采用材料不兼容的标签、粘接剂或墨水：很多产品为了美观、宣传和广告等目的，在产品表面粘贴了很多标签、或印上各种颜色的图案。虽然粘贴在装配过程中是一个快捷的操作，但对于拆卸来讲就很困难了。因此从回收和环保的角度来看，应尽量少贴标签，或采用材料兼容的标签、粘接剂和墨水。例如，各种饮料瓶上的标签、洗涤美容美发用品容器上喷印的文字图案

等等。

提高产品可拆卸和可回收性能的设计指南（表 11.0-

由以上分析，可归纳出以下绿色设计中应遵循的 5）。

表 11.0-5 面向拆卸与回收的设计指南

便于拆卸回收的设计指南	作为设计指南的原因
1. 提高重用零部件的可靠性	便于产品和零部件得到重用
2. 提高产品和回收零部件的寿命	确保重用的产品和零部件具有多次生命周期
3. 便于翻新和检测	简化回收过程、提高回收价值
4. 重用件应能不被损坏地拆除	使重用成为可能
5. 减少产品中不同种材料的种类数	简化回收过程，提高可回收性
6. 相互联接的零部件材料要兼容	减少拆卸和分离的工作量，便于回收
7. 使用可以回收的材料	减少废弃物，提高产品生命周期结束时的价值
8. 对塑料和相似零件进行材料标识	便于区分材料种类，提高材料回收的纯度、质量和价值
9. 使用回收的材料生产零部件	节约资源；刺激并促进回收市场的发展
10. 保证塑料上印刷用墨水的材料兼容性	获得回收材料的最大价值和纯度
11. 减少产品上材料不兼容的标签	避免费时的撕标签工作和分离工作，提高产品的回收价值
12. 减少联接数量	由于大量的拆卸时间是消耗在联接的分离上，因此减少联接数量有利于提高拆卸效率
13. 减少对联接进行拆卸所需要的工具数量	减少拆卸中的工具更换时间，提高拆卸效率
14. 联接件应具有易达性	降低拆卸的困难程度，减少拆卸时间，提高拆卸效率
15. 联接应便于解除	减少拆卸时间，提高拆卸效率
16. 快捷联接的位置应明显并便于使用标准工具进行拆卸	提高拆卸效率
17. 联接的材料应与被联接零部件材料兼容	减少不必要的拆卸操作，提高拆卸效率和回收率
18. 如果相连零部件材料不兼容，应使它们容易分离	提高可回收性
19. 减少粘接，除非被粘接件材料兼容	许多粘接造成了材料的污染并降低了材料回收的纯度
20. 减少连线和电缆的数量和长度	柔软的元件拆卸效率差；铜对钢铁材料回收造成污染
21. 将不方便拆卸的联接设计成便于折断的形式	折断是一种快捷的拆卸操作
22. 减少零件数	减少拆卸工作量
23. 对产品尽可能采用模块化设计，使各部分功能分开	便于维护、升级和重用
24. 将不能回收的零件集中在产品中便于分离的某个区域	提高拆卸时间和拆卸效率，提高产品回收性
25. 将高价值的零部件布置在易于拆卸的位置	提高部分拆卸的回报率
26. 将包含有毒有害材料的零部件布置在易于分离的位置	拆卸中尽快减少具有负价值零部件
27. 产品设计应保证拆卸过程中的稳定性	对含有稳定基础件的产品，其手工拆卸效率高
28. 避免嵌入塑料中的金属件和塑料零件中的金属加强件	减少拆卸工作量，便于采用粉碎操作提高效率；提高材料回收的纯度和价值
29. 联接点、折断点和切割分离线应比较明显	提高拆卸效率

5 绿色产品评价方法

对面向环境的设计而言,分析、评价方法是对产品的设计方案和设计参数进行优化和筛选的关键,它决定了设计者将如何进行决策。这里简要讨论一下通常使用的一些分析、评价方法,包括定性的和定量的方法。

5.1 检查表 (checklist)

检查表是最简单而且最广泛使用的一种定性评价方法。它把所要遵循的一些原则通过问题的形式罗列出来,设计者通过对这些问题的逐个回答和分析而不断地改进设计方案。表 11.0-6 是一个用于材料选择分析的检查表例子。通常,检查表用作设计初始阶段的一种分析方法,因为检查表分析法对数据和其他一些参数的需要程度不高,而且便于维护,可以不断地更新问

表 11.0-6 材料选择检查表

对材料选择使用的检查表	是否采用了潜在供应不足的材料?
	是否采用了有毒有害或放射性的材料?
	是否使用了破坏臭氧层和使得全球变暖的材料?
	是否采用了不能或难以回收的材料?
	如果对上面任何一个问题的回答是“是”,那么是否考虑采用其他的替代材料?
	如果对上面任何一个问题的回答是“是”,那么是否考虑了减少材料的用量?
	是否可以采用回收材料生产,而不使用原始材料?
	可以通过改进设计减少材料的用量吗?

题以改进检查表,同时它又容易理解和完成。例如,检查表被广泛应用于材料的选择,它把符合环境要求的各种推荐材料以及对环境有不良影响的或禁用的材料罗列出来,以供设计者进行选择和优化。尽管检查表具有便于使用的优点,它也有很多不足之处。例如:

■ 虽然检查表可以进行一些数量评分,但它还是一种定性的分析方法。也就是说它只能对产品性能进行粗略地评价和改进。例如,检查表中可能出现这样的问题:“是否有将生产的废弃物转化成有用产品的方法?”一个简单的回答“是”但几乎没有携带任何信息。回收性能的改进还需要更进一步对废弃物的类型、回收的难易程度等进行分析和评价。

■ 检查表可以检查的项目是有限的。检查表并没能使设计者注重那些重要的产品属性,例如,它没能指出减少资源用量和提高可回收性两者之间那个更重要。也没能考虑产品研发经费或许会限制产品优化方案的实施。

■ 仅仅通过检查表的一系列检查,设计者或许会误以为产品的设计已经符合要求而且考虑全面了。这样显然是不对的。所以说检查表只能作为设计初期对设计进行粗略分析的一种定性方法。

5.2 矩阵分析 (matrix)

矩阵法是一种对设计中多重决策进行折衷分析的有效方法。它通过矩阵的形式,用矩阵的行元素表示优化的目标,用矩阵的列元素表示产品的各种属性,对交叉项进行打分。矩阵法的最广泛应用之一就是质量屋(也即:质量功能配置·QFD—Quality Function

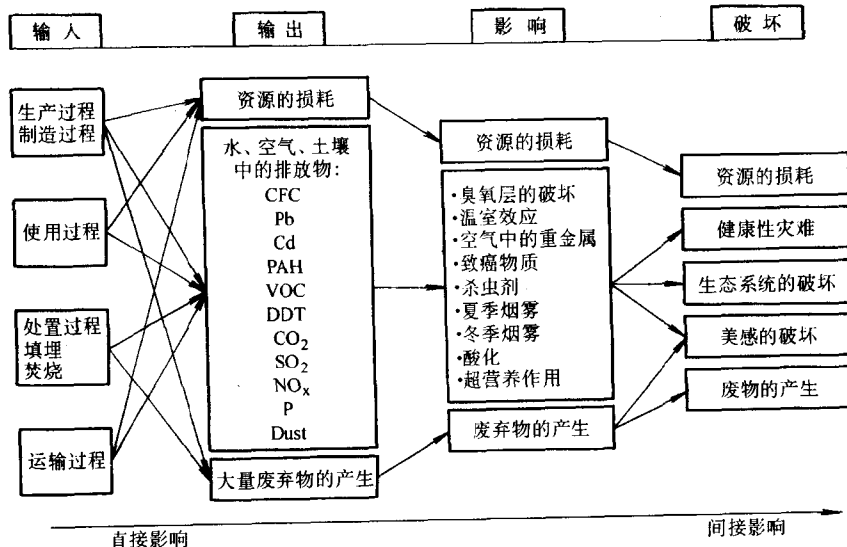


图 11.0-10 生命周期评价

Dispbymnt)。它通过将产品设计参数和用户要求进行综合评价、打分,从而优化参数和决策。在应用的过程中可对不同的优化目标进行加权,从而突出不同设计目标的重要程度。而且它还可以用于对产品生命周期的各个阶段进行分解、分析和综合。图 11.0-10 是矩阵法应用的一个例子。

5.3 产品的生命周期评价 (life-cycle assessment)

生命周期评价是对产品在其整个生命周期内对环境所造成的影响进行评价的一种方法。使用这种方法需要识别与量化产品在生命周期内消耗的能量与材料,释放的废弃物,分析它们对环境的影响并对改进方案进行评价。具体的过程包括:

- 目标定义与限定;
- 清单分析;
- 影响分析;
- 改进分析。

由图 11.0-10 可见, LCA 涉及了产品生命周期的各个阶段,对产品整个生命周期中向环境输入、输出的能量、材料与废弃物进行统计、折算、分析与评价。生命周期评价方法涉及范围的广度与评价内容的深度既是它的有力之处,也成为它的最大弱点。一方面,获得所需要的全部信息与数据是很困难的;另一方面,这些信息与数据的准确性、考察的目标、范围将对评价结果的有效性产生重要影响。

5.4 影响分析 (Impact analysis)

影响分析方法通过对产品在制造、运输、使用和处

理过程中对环境释放的各种物质和能量进行分析,而评价产品对环境造成的各种影响。这些影响包括:对环境、健康、安全等方面的影响。这些影响可以是地方性的、区域性的、也可以是全球性的。例如对土地的使用和污染、对臭氧层的破坏、对使用者健康和安全的影响。

由于我们知识的局限性,对一些环境恶化的规律性和成因还不甚明了,对环境变化和对健康危害的研究都还比较理论,因此对这一方法的应用和分析结果的可靠性都有很大影响。但目前它仍然是面向环境设计中经常采用的一种分析方法。

5.5 环境会计 (environment accounting)

我们知道,目前的会计方法并没有计入因环境管理的改善而引起的收入与支出的变化。这有两个方面的原因,一是传统的会计方法没有包括环境成本;二是环境成本的计算还很不成熟。例如,由于对材料、水、土壤和能量等资源的使用而造成的对环境的影响是难以用经济指标来计算的。因为传统的价格计算是基于市场变化的,而市场中的供需关系是不能反映资源的使用和它的社会影响之间的关系的。也就是说通过提高产品的可回收性而带来的经济收益是传统会计方法难以计算的,即便通过当前回收材料的市场价格来计算,那也是不全面的,因为它没有计入那些间接的对环境的影响、对社会的影响,和随之带来的收益。

目前,基于活动的成本 (ABC: activity-based costing)、总成本评价 (total-cost assessment) 和生态平衡 (eco-balance) 等会计方法在面向环境的设计中得到了越来越多的应用。表 11.0-7 是环境会计应用的一个例子。

表 11.0-7 环境会计应用举例

投入成本	能量	数量	流通成本	总成本	减少废物而节省的成本	回收产品的收益	总收益	平衡
塑料回收 \$ 5.6K	160kWh \$ 17.9K	526tons	\$ 1.6K	\$ 25.1K	\$ 92.0K	\$ 317.5K	\$ 409.5K	+ \$ 384.5K
纸回收 —	66kWh \$ 7.4K	307tons (labels & cardboard)	\$ 2.7K	\$ 10.1K	\$ 168.4K	\$ 740.0K	\$ 169.1K	+ \$ 159.0K
纯化 \$ 42.7K	185kWh \$ 20.7K	378tons	\$ 77.9K	\$ 111.2K	\$ 78.3K	—	\$ 78.3K	— \$ 32.9K
玻璃回收 —	—	519tons	—	—	\$ 24.7K	\$ 5.0K	\$ 29.7K	+ \$ 29.7K
总计 \$ 18.3K	412kWh \$ 45.9K	1730tons	\$ 82.1K	\$ 146.3K	\$ 363.4K	\$ 323.3K	\$ 686.7K	+ \$ 540.3K

6 绿色包装设计

6.1 产品包装设计的现状

■ 产品包装的地位和功用

在现代商品流通领域中,产品的包装,特别是产品的外包装,具有十分重要的地位。因为产品的外包装不啻是产品的一件漂亮的外衣。这犹如人们外在的穿着打扮,以显示其气质、情趣、修养、身价和地位。因此,产品的包装往往能够吸引消费者的购买欲,提高产品的竞争价位,乃至增强企业的品牌效应和市场竞争能力。这也是许多企业乐意花费大量投资于产品包装的原因。据报道,全球每年用于产品包装的费用达 500 亿美元。当然,产品包装的目的,主要并不在于此。产品包装的目的,主要在于它具有以下的功用:

- 1) 确保被包装的产品在到达消费者手中时,是处于完好无损的状态;
- 2) 当产品在仓储(保管)和配送时,应使产品的损坏和报废减小到最小程度;
- 3) 保证产品的卫生与安全(由于消费者害怕污染不洁,因此这一点变得愈益重要);
- 4) 包装应便于产品的运输、搬移、堆垛和存放;
- 5) 包装应便于消费者迅速识别商品(这一点对于商品种类繁多的自助式超级市场而言,则尤为重要。因为这时同类商品很多,所以能让消费者一眼识别出所欲购买的商品,便显得格外重要);
- 6) 包装也是厂家与消费者进行信息交流沟通的重要手段(有关产品的属性、使用和保养方法的说明、以及与厂家联系的地址、电话等信息,都可印刷在包装上)。

上述最后一个功用,对于许多小商品的包装而言,是很重要的。事实上,不少消费者正是通过阅读包装上这些信息而了解这一商品,从而产生购买这一商品的欲望的。

■ 产品包装引起的环境问题

正如以上所述,包装只是产品的一层外衣。它除了在商品流通领域的运输、仓储、配送过程中,使商品免受损伤外,严格地说,别无其他功能。因此,当商品一旦到达消费者手中后,包装便完成了它的使命而寿终正寝。因为消费者购买的是产品本身的使用价值,而非产品的包装,所以拆除包装后,包装便变得一无用处。这时的包装便成为一种废弃物,一般被当作垃圾处理。

根据欧洲和北美大多数国家的统计资料显示,城市固体废弃物中,有 30% 是来自商品的包装材料。由此可见,包装材料对增加环境负担的影响是很大的。

产品包装一般可以分为外包装与内包装。目前用

作外包装的材料有:塑料、木材、纸板、金属等;用作内包装的材料:主要是起填充(使产品在包装中正确定位)和缓冲(抵抗冲击与振动)作用的泡沫塑料,以及防水和防潮用的塑料薄膜等。这类塑料包装材料不易回收处理,因而对环境造成极大的危害。因此,从产品绿色设计的角度去看,产品的包装设计也是一个不容忽视的、对环境具有重大影响的重要问题。

6.2 绿色包装设计

针对现代产品包装对环境造成的负担,以及由于过分包装对产品成本的增加,因此必须从观念上重新认识产品包装的功用,必须在包装设计时考虑:节省资源和防止污染的绿色原则。

绿色包装设计的准则

■ 合理选用包装材料

包装材料的选择是一个使人模棱两可或不知所措的问题。因为有的材料虽然在其生产时要消耗较多的能源或不可再生的资源,但是却具有较长的使用寿命;有的材料易于回收利用;有的材料容易降解处理且无害;有的材料在焚烧处理时能回收其热能,但与此同时却会污染大气。总之,迄今为止,还没有找到一种对环境完全友好的包装材料。然而,这并不妨碍我们提出合理选用包装材料的基本准则。

- 1) 尽可能选用无毒性的包装材料,以便在包装材料的生产、使用和最终处置时,不对环境和人体健康产生有害影响。
- 2) 选用的包装材料,其资源应该比较丰富,以便降低产品的包装成本。
- 3) 尽量选用可重用或再生的材料,这样可使包装材料循环利用,有利于降低包装成本。目前可重新利用的再生材料有:纸、纸板、玻璃和某些塑料。
- 4) 使所设计的包装尽量选用单一材料,以便日后易于经济地回收和处置。

■ 合理设计包装结构

合理设计产品的包装结构,是从根本上节省资源、减少污染和降低包装成本的有效途径。这也是最能体现包装设计人员创新才能的一个设计环节。

- 1) 力求使包装结构小型化和轻量化。这将显著节约包装材料,而且也便于搬移和运输。
- 2) 所设计的包装结构应便于日后回收重用。
- 3) 尽量使包装结构简单化或简装化。目前的包装设计过于花俏。一味片面地追求美学的视觉效果。甚至颠倒了包装功能与美观要求的关系。这样只能使产品的包装费用陡增,造成资源的极大浪费。

值得注意的是,据美国的一份资料报道,预计今后 40% 左右的商品与服务并非为个体消费者购买,而是

政府部门和其他集团单位集中购买。因此,这时为这类社会集团提供的商品,其包装可以大大简化。我国政府部门也已采取集中统一采购商品的政策,这将有利于简化包装,从而能够节约大量包装材料,以及由此节约可观的包装成本。

美国东北部的州长会议,为了更好地解决产品包装废弃后对环境造成的巨大危害,特地制订了选用产品包装方法的优先顺序政策如下:

- 1) 无包装
- 2) 最小包装
- 3) 可返回或可再灌装/可重用的包装
- 4) 可回收利用的包装

上述优先顺序是自上而下递减。即优先选用无包装,而最后不得意才选用可回收利用的包装。

为了贯彻绿色包装,迫切需要作的事情是转变人们的观念,否则收效不会太大。因为当人们还热衷于追求包装的美学视觉享受时,是不太会顾及环境问题的。厂家为了迎合消费者的心理,也不会自觉放弃非绿色的包装设计的。因此,我们还有一个十分艰巨的转变人们思想观念的宣传教育工作要做。

参 考 文 献

- 1 F. Joane etc. . A Key Issue in Product Life Cycle : Disassembly. Annals of the CIRP, 1993, 42 (2) .
- 2 Hart. S.L, Beyond Greening: Strategy for a Sustainable World, Harvard Business Review, 1997. Jan-Feb
- 3 C.I. WhiterII, W.Olson and J.W.Sutherland, Methodology for Including Environment Concerns in Concurrent Engineering, Society for Design and Process Science, 1995, v1: 8-13
- 4 L. Alting, Lite Cycle Design of Industrial Products, Concurrent Engineering, 1991.v1: 6
- 5 R. Zuest, G. Caduff, Life-cycle Modeling as Instrument for life-cycle Engineering, Annals of the CIRP, 1997.v46 (1): 351-354
- 6 P. Sheng, D. Bennet, S. Thurwachter, Environmental-Based Systems Planning for Machining, Annals of the CIRP, 1998.v47 (1): 409-414
- 7 P. Sheng, MSrinivasan, Multi-objective Process Planning in Environmentally conscious manufacturing: A Feature-Based Approach, Annals of the CIRP, 1995.v44 (1): 433-437
- 8 L. Bock, material-Process Selection Methodology: Design for Manufacturing and cost Using Logic Programming, Cost Engineering, 1991.v33 (5): 9-14
- 9 B. Bras, Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization, UNEP Industry and Environment, 1997. Jan-Jun: 7-13
- 10 E. Westkaemper, D. V. d. Osten-Sacken, Product Life Cycle Costing Applied to Manufacturing System, Annals of the CIRP, 1998.v47: 353-356
- 11 倪俊芳,杨晓东,蔡建国. 面向经济回收的产品设计. 机械科学与技术, 1997.v16 (6): 1009-1012
- 12 倪俊芳. 面向回收的产品设计. 上海交通大学博士论文, 1998.2
- 13 于军, 蔡建国. 绿色产品设计及其关键技术. 机械设计与研究, 1997.4: 10-12
- 14 刘飞, 张华, 岳仁辉. 绿色制造-现代制造业的可持续发展模式. 中国机械工程, 1998.v9 (6): 76-78
- 15 刘光复, 刘志峰. 绿色产品及其评价系统框架. 机械设计与研究, 1997.v4: 12-14
- 16 汪永超 张根保 向东 周亿. 绿色设计原则初探. 机械设计与研究, 1999
- 17 F M Kustas et al. Nanocoatings on cutting tool for dry machining, CIRP, 1997, 46 (1)
- 18 N Narutaki et al. A new advanced ceramic ford ry machinnng. CIRP, 1997, 46 (1)
- 19 Konstruieren recyclinggerrechter technischer Pro-dukte/Grundlagen und Gestaltungsregeln. VDI-Verlag, Duesseldorf, 1993.
- 20 李建锋. 激光在钣金工艺中的应用. 航空工艺技术, 1994 (5): 26~29
- 21 Geiger M. Vollertsen F. The mechanism of laser forming. CIRP Annals. 1993, 42 (1): 301~304
- 22 Vollertsen F. Holzer S. Laser beam forming-fundamentals and possible application. VDI-Z, 1994
- 23 李华. 机械制造技术. 北京: 机械工业出版社, 1997