

高新技术专著系列

Accelerated Life Test
on Coatings

表面涂层
加速寿命试验技术

王海斗 等 编著
徐滨士 审校



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

ALF ON COATINGS

高新技术专著系列

Accelerated Life Test on Coatings

表面涂层 加速寿命试验技术

王海斗 康嘉杰 濮春欢 编著
张显程 朴钟宇
徐滨士 审校

人民邮电出版社
北京

ATL ON COATINGS

前 言

20 世纪的 100 年，人类创造的物质财富超过了以往 5000 年的历史总和，但也极端消耗了地球资源。我国作为一个正在蓬勃发展的新兴工业国家，如何在资源短缺的情况下保证社会的全面、协调、可持续发展成为了亟待解决的问题。在这种背景下，再制造工程应运而生。在国家可持续发展战略和科学发展观的指导下，再制造工程已成为发展循环经济、构建资源节约型和环境友好型社会、实施节能减排的重要组成部分。

采用高速电弧喷涂、等离子熔覆、激光熔覆、超音速等离子喷涂和纳米电刷镀等先进的表面工程技术，在废旧零部件表面制备有效恢复和改善性能的涂层，是实施再制造的关键技术手段。要实现再制造产品的性能达到或超过新品的目标，需要采取一系列技术措施对其进行质量控制和寿命评估：其一，对再制造毛坯件进行缺陷和应力集中的检测，确定废旧零部件是否可以再制造；其二，不断完善与优化各种表面涂层的制备技术和工艺，保证再制造表面涂层的性能和质量；其三，对附有表面涂层的再制造零件进行基于实验力学和数理统计分析的寿命试验，研究其失效机理和寿命演变规律，为再制造零件的重新服役提供理论基础和数学指导。然而，实验室寿命试验往往具有试验时间过长的的问题，不但浪费人力和物力，也不利于迅速揭示再制造零件表面涂层的失效机理和寿命分布。因此，作者将加速寿命试验技术引入再制造涂层的寿命评估，在不改变其失效机理的前提下，提高各加速因子的应力水平，以大大缩短试验时间，更迅速地揭示再制造表面涂层的失效机理并得到其接触疲劳寿命、磨损寿命或腐蚀寿命的演变规律，为其进入下一寿命周期服役提供坚实的理论支撑。

本书主要涉及加速寿命试验技术在评价表面涂层的接触疲劳寿命、磨损寿命和腐蚀寿命方面的应用。其中，本书第 2 章和第 3 章的内容是作者所在

.....

团队近年来的研究成果，主要包括：应用加速寿命试验技术揭示超音速等离子喷涂 Ni 基涂层、Fe 基涂层和金属陶瓷涂层的接触疲劳失效机理，并初步建立了其服役寿命演变模型；应用加速寿命试验技术揭示高速电弧喷涂和超音速等离子喷涂 Fe 基涂层的磨损寿命演变规律和磨损失效机理，也初步建立了其寿命模型。本书基于加速寿命试验技术，以数理统计方法为工具，涵盖了表面涂层的接触疲劳寿命、磨损寿命和腐蚀寿命等多个应用领域，突出地体现了摩擦学、材料学、再制造工程学、表面工程学、力学、化学以及可靠性等多学科交叉的特点，成为再制造工程乃至表面工程学科中一个新兴的、极具特色的研究方向。

全书由王海斗教授统筹指导并亲自执笔编写，书中各章的执笔者是：第 1 章 康嘉杰、王海斗；第 2 章 张显程、朴钟宇、王海斗；第 3 章 濮春欢、王海斗；第 4 章 康嘉杰、王海斗。全书由王海斗、康嘉杰统稿，徐滨士院士审校。

本书涉及多个学科，由于作者水平和研究领域的限制，只能从一个较狭窄的角度进行阐释，难免有所遗漏，甚至可能存在错误之处，由衷希望广大读者和专家提出批评和建议，作者深表感谢。

感谢国家 863 计划项目（2007AA04Z408）、国家自然科学基金面上项目（50975285）和国家自然科学基金重点项目（50735006）的支持。

作者
2011 年 3 月

目 录

第 1 章 可靠性基础和加速寿命试验

1.1	再制造工程与表面工程	2
1.2	可靠性的定义	3
1.3	可靠性指标	4
1.3.1	失效分布函数	4
1.3.2	可靠度函数	4
1.3.3	失效率函数	5
1.3.4	特征寿命	6
1.4	寿命试验和加速寿命试验	6
1.4.1	寿命试验	6
1.4.2	截尾寿命试验	7
1.4.3	加速寿命试验	8
1.5	加速寿命试验的类型	8
1.5.1	恒定应力加速寿命试验	9
1.5.2	步进应力加速寿命试验	9
1.5.3	序进应力加速寿命试验	10
1.6	加速寿命试验的常用寿命分布	11
1.6.1	指数分布	11
1.6.2	Weibull 分布	12
1.6.3	对数正态分布	14
1.7	加速寿命试验的常用加速模型	15
1.7.1	阿伦尼斯模型	15
1.7.2	逆幂律模型	16

1.7.3 阿伦尼斯和逆幂律统一模型 16
参考文献 17

第 2 章 加速寿命试验预测涂层接触疲劳寿命

2.1 涂层加速接触疲劳寿命预测的研究现状与趋势 22
 2.1.1 涂层接触疲劳损伤行为概述 22
 2.1.2 涂层加速接触疲劳寿命试验和分析方法 24
2.2 加速寿命试验预测 Cr₃C₂-NiCr 涂层的接触疲劳寿命 29
 2.2.1 Cr₃C₂-NiCr 涂层制备工艺及结构性能表征 29
 2.2.2 Cr₃C₂-NiCr 涂层加速接触疲劳寿命预测 31
 2.2.3 Cr₃C₂-NiCr 涂层接触疲劳失效机理分析 35
2.3 加速寿命试验预测激光重熔 Ni60AA 涂层的接触疲劳寿命 49
 2.3.1 Ni60AA 涂层制备工艺及结构性能表征 49
 2.3.2 Ni60AA 涂层加速接触疲劳寿命预测 54
 2.3.3 Ni60AA 涂层接触疲劳失效机理分析 57
2.4 加速寿命试验预测 FeCrBSi 涂层的接触疲劳寿命 67
 2.4.1 FeCrBSi 涂层制备工艺及结构性能表征 67
 2.4.2 FeCrBSi 涂层加速接触疲劳寿命预测 78
 2.4.3 FeCrBSi 涂层接触疲劳失效机理分析 83
参考文献 88

第 3 章 加速寿命试验预测涂层磨损寿命

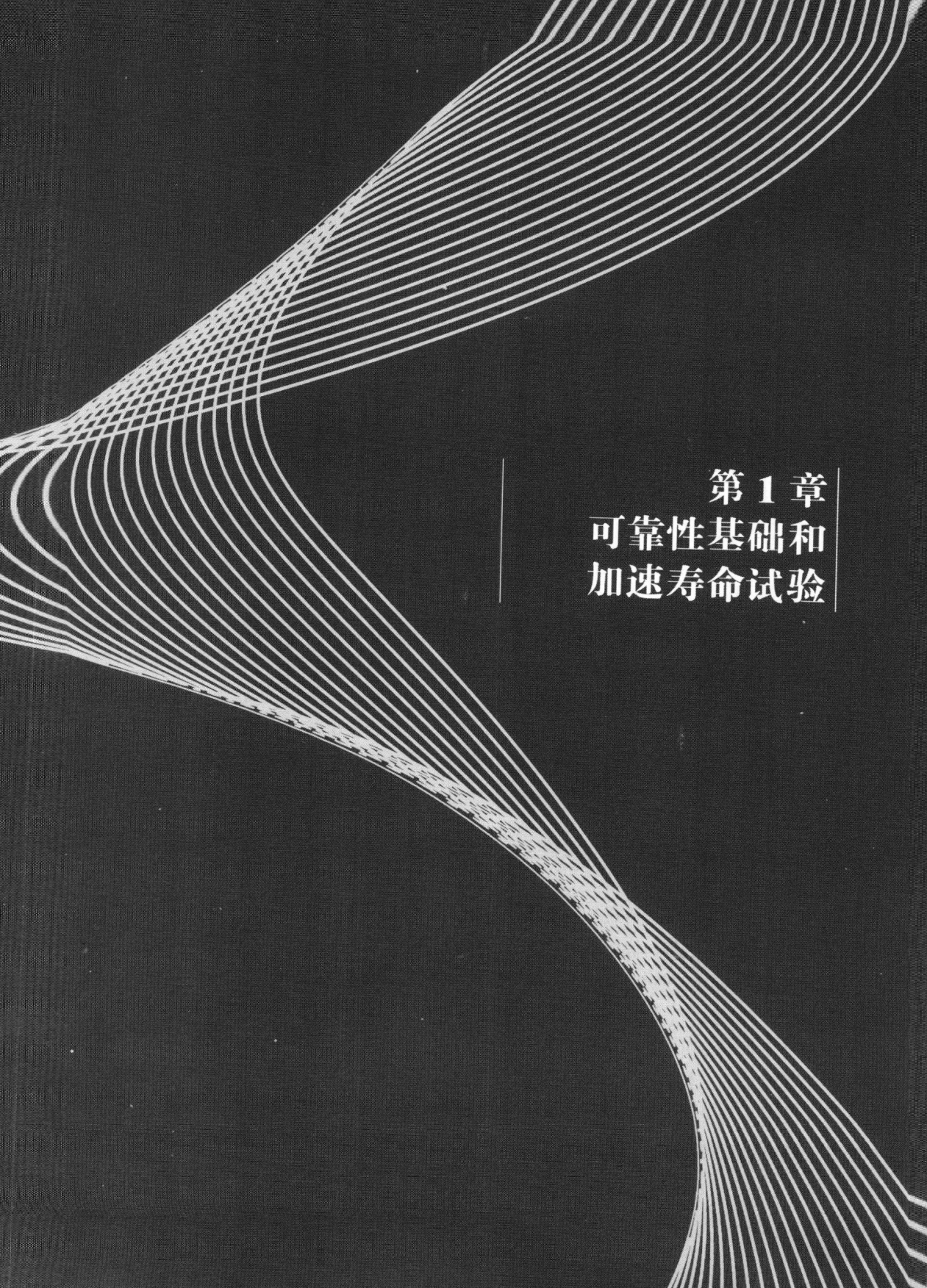
3.1 涂层加速磨损寿命预测的研究现状与趋势 94
 3.1.1 磨损寿命预测概述 94
 3.1.2 加速磨损寿命试验 96
3.2 干摩擦加速条件下的涂层磨损寿命研究 100
 3.2.1 3Cr13 涂层的组织结构分析 101
 3.2.2 干摩擦条件下的 3Cr13 涂层加速磨损机理分析 105
 3.2.3 干摩擦条件下的 3Cr13 涂层磨损寿命试验 113
3.3 含磨粒润滑油加速条件下的涂层磨损寿命研究 120
 3.3.1 磨粒优选试验 120

3.3.2	含磨粒加速磨损寿命试验	124
3.3.3	磨粒的加速磨损机理分析	128
3.4	重载加速条件下的涂层磨损寿命研究	131
3.4.1	3Cr13 涂层磨损寿命试验	132
3.4.2	FeCrBSi 等离子涂层磨损寿命试验	137
3.5	加速磨损试验机的设计	144
3.5.1	设计思路	145
3.5.2	试验机系统组成	145
3.5.3	试验机的应用	157
	参考文献	160

第4章

加速寿命试验预测涂层腐蚀寿命

4.1	涂层加速腐蚀寿命预测的研究现状与趋势	167
4.1.1	常用的防腐耐蚀涂层体系	167
4.1.2	涂层加速腐蚀试验	170
4.2	加速寿命试验预测金属防腐涂层的腐蚀寿命	179
4.2.1	锌铝基防腐涂层的加速腐蚀试验	180
4.2.2	锌铝基防腐涂层的耐蚀机理分析	182
4.3	加速寿命试验预测无机防腐涂层的腐蚀寿命	184
4.3.1	无机富锌防腐涂层的加速腐蚀试验	184
4.3.2	无机富锌防腐涂层的耐蚀机理分析	186
4.4	加速寿命试验预测有机防腐涂层的腐蚀寿命	188
4.4.1	环氧树脂防腐涂层的加速腐蚀试验	188
4.4.2	环氧树脂防腐涂层的加速老化试验	189
4.4.3	环氧树脂防腐涂层的耐蚀机理分析	191
	参考文献	192



第 1 章
可靠性基础和
加速寿命试验

1.1

再制造工程与表面工程

再制造工程是以机电产品全寿命周期设计和管理为指导,以废旧机电产品实现性能跨越式提升为目标,以优质、高效、节能、节材、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,对废旧机电产品进行修复和改造的一系列技术措施或工程活动的总称^[1]。再制造的重要特征是再制造产品的质量和性能要达到或超过新品,成本仅是新品的 50%左右,节能 60%、节材 70%以上,对保护环境的贡献显著。在国家的可持续发展战略和科学发展观的指导下,再制造工程作为具有中国特色的循环经济 4R (减量化——Reduce、再利用——Reuse、再制造——Remanufacture、再循环——Recycle) 原则的重要组成部分,在构建资源节约型和环境友好型社会的进程中发挥着越来越大的作用^[2]。

再制造工程的关键支撑技术之一是表面工程技术。表面工程是指经表面预处理后,通过表面涂覆、表面改性或多种表面工程技术复合处理,改变固体材料表面的形态、化学成分、组织结构和应力状态等,以获得所需要表面性能的系统工程^[3]。目前,已经开展了将高速电弧喷涂^[4-7]、等离子熔覆^[8,9]、激光熔覆^[10,11]、超音速等离子喷涂^[12,13]和纳米电刷镀^[14-16]等一系列先进表面工程技术应用于再制造工程领域的研究,并获得了丰硕的成果。

为了保证再制造产品的质量达到或超过新品,对再制造产品进行质量控制是一个必不可少的重要环节。目前,对于再制造产品的质量控制主要包括以下 3 方面的工作:①对再制造毛坯件进行缺陷和应力集中的检测,确定废旧零部件具有再制造价值^[17-19];②不断完善与优化各种再制造涂层的制备技术和工艺,保证再制造涂层的性能和质量^[20-23];③在实验室对再制造涂层进行基于实验力学、物理学、化学和数理统计分析的接触疲劳、磨损和腐蚀等类型的寿命试验,研究其失效机理和寿命演变规律,这是对再制造涂层服役质量控制的重要手段^[24-27]。其中,实验室寿命试验可以模拟再制造涂层的服役工况,为其投入运行后的可靠性和安全性分布规律提供理论基础和数学指导。但是,一般情况下的实验室寿命试验往往具有试验时间过长的问題,既消耗了大量的资源,也不能在失效机理和寿命演变规律方面为再制造涂层的服役可靠和安

全提供及时的理论指导。因此，我们将加速寿命试验技术引入再制造涂层的质量控制和寿命评估中。加速寿命试验是在不改变试验对象失效机理的前提下，通过提高各加速因子的应力水平，显著地缩短试验时间。这使得在较短时间内准确揭示再制造表面涂层的失效机理，并预测其寿命演变规律成为可能。目前，包括本书作者在内的科研工作者们已经开展了应用加速寿命试验技术预测再制造表面涂层的接触疲劳寿命、磨损寿命和腐蚀寿命的研究，分别在本书的第2~4章进行详细的论述。

1.2 可靠性的定义

可靠性的定义是：产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力^[28]。其中“产品”指研究或试验的对象，例如元件、零件、部件、设备和机组等。“规定条件”包括储存条件、使用条件、维修条件、环境条件、装配条件、保障条件，不同的对象可能遇到不同的具体条件，如载荷、压力、温度、湿度、振动、磨损、腐蚀等。“规定时间”包括任务时间、试验时间、工作时间、储存时间、动作次数、运输时间等，需要注意的是，时间的度量不仅局限于日历时间，也可以是正比于时间的循环次数或运行距离等广义上的时间参数。“规定功能”是指产品能够保持完成其规定功能应具备的技术指标。产品丧失规定的功能称为失效，如果可以修复则称为故障。

“可靠性”包括广义可靠性和狭义可靠性两种^[29,30]。广义的可靠性是指产品在其整个寿命周期内完成规定功能的能力，狭义的可靠性则指产品在某一规定时间内发生失效的难易程度。可以简单地认为广义可靠性 = 狭义可靠性 + 维修性。

由产品的设计、制造所决定的可靠性，称为固有可靠性。它存在的前提是假设产品在理想条件下使用。产品的固有可靠性在其设计和制造工艺确定之后即为一定值。产品在广义使用条件下，保证固有可靠性的发挥程度称为使用可靠性，

表面涂层加速寿命试验技术

它是由产品的设计、制造、安装、储存、运输和使用等综合因素共同决定的。一般情况下，使用可靠性 \leq 固有可靠性。

1.3 可靠性指标

由于产品的使用条件各不相同，其寿命也是随机的，因此通常无法直接用寿命作为指标来度量产品的可靠性^[31-34]。为了定量描述产品的可靠性，定义了下述可靠性指标^[35-38]。

1.3.1 失效分布函数

产品的寿命是随机的，因此可以用非负随机变量来表示产品的寿命。设 t 是产品的寿命，它表示产品从开始工作到失效的时间；函数 $G(t)$ 为产品寿命的失效分布函数，简称分布函数；如果 $G(t)$ 是可微的，则称 $g(t) = \frac{dG(t)}{dt}$ 为产品寿命的失效密度函数，简称密度函数。产品分布函数与密度函数之间的关系是

$$G(t) = \begin{cases} \int_0^t g(x)dx, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

1.3.2 可靠度函数

在实际中，产品在 $[0, t]$ 时间内正常工作的概率记为 $W(t)$ ，即产品在时刻 t 时的可靠度函数，简称可靠度。当寿命 T 具有密度函数 $g(t)$ 时，可靠度函数 $W(t)$ 又可表示为

$$W(t) = \int_t^{\infty} g(x)dx \quad (1-2)$$

1.3.3 失效率函数

失效率函数（简称失效率）是指已工作到时刻 t 的产品在该时刻后单位时间内发生失效的概率，即

$$\delta(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(T + \Delta t) - W(T)}{\Delta t} \quad (1-3)$$

当 T 具有失效密度函数时，有如下关系：

$$\delta(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(T + \Delta t) - P(T)}{W(t)\Delta t} = \frac{g(t)}{W(t)} \quad (1-4)$$

由式（1-4）可知，失效率函数与失效分布函数和可靠度函数的关系为

$$\left. \begin{aligned} W(t) &= \exp\left[-\int_0^t \delta(u)du\right] \\ G(t) &= 1 - \exp\left[-\int_0^t \delta(u)du\right] \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

从而得到失效率函数 $\delta(t)$ 具有如下性质。

定理 函数 $\delta(t)$ 为失效率函数的充分必要条件是：

- ① $\delta(t) \geq 0, t \geq 0$;
- ② $\int_0^{+\infty} \delta(t)dt = +\infty$ 。

在评价产品可靠性时，失效率是重要的可靠性指标，失效率越低，可靠性越高。失效率函数主要有下面 3 种类型。

① 早期失效，其 $\delta(t)$ 为下降函数，这是由于产品设计和加工等缺陷造成的失效，随着不断发现和排除，失效率会不断下降。

② 随机失效，其 $\delta(t)$ 近似为常数，此时产品性能比较稳定。

③ 耗损失效，其 $\delta(t)$ 为上升函数，即随着产品的磨损、腐蚀、疲劳和老化等，其失效率呈上升趋势。

1.3.4 特征寿命

设产品寿命 T 的失效密度函数为 $g(t)$ ，那么产品的平均寿命可用式 (1-6) 表示：

$$F(t) = \int_0^{+\infty} tg(t) dt \quad (1-6)$$

在实际中，除使用平均寿命等指标外，还可以采用可靠寿命度量产品可靠性。可靠寿命的定义是：若产品的可靠度函数为 $W(t)$ ，使可靠度函数等于定值 ω （称 ω 为可靠水平， $0 < \omega < 1$ ）的时间为可靠寿命，记为 t_ω 。可靠水平为 $\omega = 0.5$ 时的可靠寿命 $t_{0.5}$ 称为中位寿命，可靠水平为 $\omega = e^{-1}$ 时的可靠寿命 $t_{e^{-1}}$ 称为特征寿命。

1.4 寿命试验和加速寿命试验

1.4.1 寿命试验

要掌握产品的可靠性指标，研究产品失效机理，就要进行寿命试验。寿命试验的定义是：从一批产品中随机抽取 n 个产品组成一个样本，其中每个产品又称为样品，样品的个数 n 称为样本量，把此样本放在相同的正常应力水平下进行试验，观察每个样品的第一次失效（或故障）发生的时间，即为寿命。用统计学方法对这些不同样本的寿命分布规律进行处理，即可获得这批产品的各项可靠性指标。

以试验场所划分，寿命试验可分为现场寿命试验和模拟寿命试验两类^[39]。

① 现场寿命试验是指在实际使用条件下获得产品的失效数据和寿命的试验。在实际工况下得到的寿命数据是最真实的，但这种试验方法也有组织管理工

作繁重、投资大、时间长的缺点，而且同种产品在不同运行现场的环境差异巨大，会对产品的失效规律和寿命演变规律产生较大干扰，因此现场寿命试验应用较少，只有在大型机电设备（如发电设备）等场合下才会采用。

② 模拟寿命试验又称实验室寿命试验。它是指在实验室内模拟产品现场使用的工作条件和参数（如温度、湿度、电压、电流、功率、振动、负载等）进行的试验，这些关键参数由人工控制，以保证参试样品都在相同工作条件下进行寿命试验。与现场寿命试验相比，模拟寿命试验具有容易实现、管理简便、投资小、重复性好等优点。但是产品的真实运行条件复杂多样，在实验室内进行模拟寿命试验时，只选择对产品寿命影响最大的几种工作参数进行模拟，这些工作条件或参数通称为应力，其取值称为应力水平。例如对于热喷涂涂层在载荷 50kN 和转速 2000r/min 的工作条件下进行磨损寿命试验，则 50kN 就是载荷这个应力的应力水平，而 2000r/min 就是转速这个应力的应力水平。不做特殊说明的话，本书内的寿命试验均指模拟寿命试验。

1.4.2 截尾寿命试验

寿命试验的寿命值是基于产品失效来获得的。一些产品的寿命很长，这就导致寿命试验时间大大延长，增加了试验的费用，且试验结果不能及时获得。因此如何缩短试验时间成为寿命试验中亟待解决的问题之一。

把 n 个投试样品试验到全部失效或发生故障的试验称为完全寿命试验。所获得的 n 个失效数据称为完全样本。在完全样本基础上进行统计分析，获得的可靠性指标也较为可靠，但此种试验通常需要较长时间。

把 n 个投试样品试验到部分失效就停止的试验称为截尾寿命试验。在截尾寿命试验中，先后记录的失效数据 $t_1, t_2 \cdots t_\omega$ ($t_1 \leq t_2 \leq \cdots \leq t_\omega$) 称为截尾样本，其中 ω 为失效数，一般 $\omega \leq n$ 。一般来说，截尾样本所含的失效信息总比完全样本少一些。假如我们知道产品的寿命分布，譬如是指数分布，或是 Weibull 分布，或是对数正态分布，那么用截尾样本加上产品的寿命分布信息，进行统计分析，获得的产品可靠性指标的估计仍然是可靠的。当今不少产品都采用截尾寿命试验，以减少寿命试验时间。常用的截尾寿命试验包括定时截尾寿命试验和定数截尾寿命试验两种。

① 定时截尾寿命试验。它是指试验到指定时间就立即停止的试验，但是在这一规定时间里样本的失效个数是随机的，可能会发生失效个数过大或过小的情

表面涂层加速寿命试验技术

况，这会严重影响定时截尾寿命试验的结果，因此，恰当地规定试验停止时间是实施定时截尾寿命试验的关键。

② 定数截尾寿命试验。它是指试验到指定的失效个数时停止的试验。失效个数一般取样本总数的一个百分比，如 50% 等。当样本失效个数达到参加定数截尾寿命试验样本总数的 50% 时，即停止试验。但是定数截尾寿命试验停止时间是随机的，为了避免试验时间过长导致试验失败，恰当地规定失效比例是进行定数截尾寿命试验的关键。

1.4.3 加速寿命试验

截尾寿命试验是一种常用的寿命试验方法。目前截尾样本在指数分布、Weibull 分布和对数正态分布等常见分布下的统计分析方法研究已经比较成熟，可以较准确地获得各种可靠性特征^[40]。但是，随着科学技术的发展，高可靠性长寿命的产品越来越多，在越来越多的场合下，截尾寿命试验也不能很好地进行评价。譬如，制备于内燃机活塞上的热障涂层，其热震寿命在正常工作温度 600℃ 下可达数千次以上，若取 1000 个制备有该涂层的样本，则要进行数百万次热震试验。这种情况下，如何快速而准确地估计出该热障涂层的热震寿命成为一个难题。如果我们把工作温度由 600℃ 提高到 800℃，甚至 1200℃，只要失效机理不变，由于试验环境变得更加恶劣，该涂层的失效个数会增多，从而大大节省试验时间，保证寿命试验的成功进行。这种在超过正常应力水平下的寿命试验称为加速寿命试验。

1.5 加速寿命试验的类型

加速寿命试验的类型很多，常用的包括恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验和序进应力加速寿命试验 3 种^[41-45]。

1.5.1 恒定应力加速寿命试验

恒定应力加速寿命试验简称恒加试验，是指在高于正常应力水平的条件下，分别对样品进行寿命试验，其试验原理如图 1-1 所示。先选一组高于正常应力水平 S_0 的加速应力 $S_1, S_2 \cdots S_N$ ，将样品分为 N 组，每组在一个加速应力水平下进行寿命试验，直到各组均有一定数量的样品发生失效。由图 1-1 可见，恒加试验是由若干个寿命试验组成的。通常每个寿命试验均采用截尾寿命试验，以更好地发挥加速寿命试验缩短试验时间的优点。

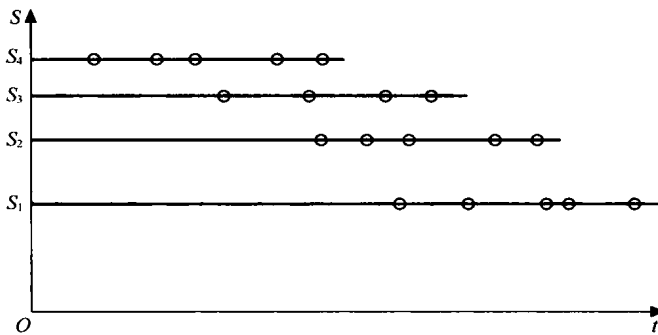


图 1-1 恒加试验示意图 (○表示失效)^[39]

1.5.2 步进应力加速寿命试验

步进应力加速寿命试验简称步加试验，是指对样品随时间分阶段逐步增大应力水平，直到全部或一定数量的样品都失效的寿命试验，其试验原理如图 1-2 所示。和恒加试验一样，步加试验也是先选定高于正常应力水平 S_0 的加速应力 $S_1 < S_2 < \cdots < S_N$ 。试验开始时，把一定数量的样品都置于应力水平 S_1 下进行寿命试验，经过一段时间后，把应力提高到 S_2 ，将未失效的样品在 S_2 下继续进行寿命试验。如此继续下去，直到全部或有一定数量的样品发生失效为止。

从图 1-2 可见，在步加试验中一个样品先在加速应力水平 S_1 下工作一段时间，若发生失效，则退出试验；若没有失效，将随着应力水平的提高，又进入 S_2 下的寿命试验。由于在步加试验中，有些样品会经历不止一个加速应力水平，其失效

表面涂层加速寿命试验技术

较恒加试验要快些，所以步加试验更加节省时间，并且可以减少参试样品个数。但是步加试验对于可靠性特征量的估计不如恒加试验下的估计精确。这个缺点可以通过对两组样品平行进行步加试验来克服。

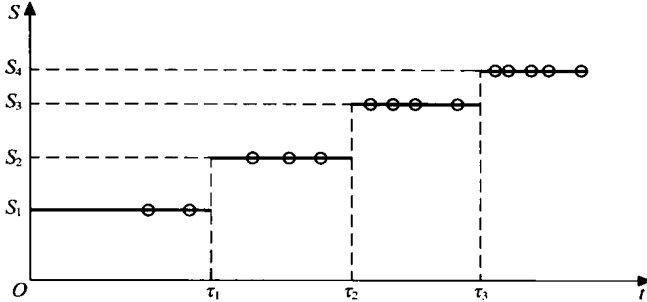


图 1-2 步加试验示意图 (o表示失效)^[39]

1.5.3 序进应力加速寿命试验

序进应力加速寿命试验简称序加试验，是指对样品随时间等速增大应力水平，一直到全部或有一定数量的样品发生失效的寿命试验，其试验原理如图 1-3 所示。序加试验与步加试验原理相似，不同之处仅在于序加试验的加速应力水平将随时间连续上升。应力水平直线上升是一种最常见的序加试验方法，图 1-3 显示了应力水平以两种不同速率直线上升的序加试验的示意图。与恒加试验和步加试验相比，序加试验的特点是应力变化快，失效也会更早发生。因此实施序加试验时，需要有专门控制应力水平变化的设备和跟踪产品失效的记录设备，以保证序加试验的顺利实施和数据的准确记录。

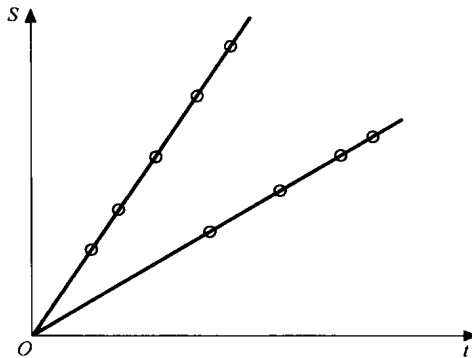


图 1-3 序加试验示意图 (o表示失效)^[39]