



科 技 讲 座

材料强度研究及应用

江 西 人 民 出 版 社

科学技术讲座

材料强度研究及应用

周惠久

江西人民出版社

科学技术讲座

材料强度研究及应用

周 惠 久

江西人民出版社出版
(南昌百花洲3号)

江西省新华书店发行 江西新华印刷厂印刷

开本 787×1092 $1/32$ 印张 $5\frac{1}{2}$ 字数 11 万
1979 年 12 月第 1 版 1979 年 12 月江西第 1 次印刷
印数: 1—4,000

统一书号: 15110·31 定价: 0.46 元

内 容 简 介

本书以科技讲座的形式，深入浅出地介绍了材料强度的基本概念、研究内容和提高材料强度的方法，着重从理论上全面论述如何提高材料使用强度水平的问题。

本书还介绍了材料主要机械性能指标的物理、技术意义及其变化规律，并用大量实例说明强度研究在生产中的应用。

本书可供机械、冶金工程设计人员、热处理工艺及理化检验技术人员参考，也可作为大专院校有关专业的参考书。

编者说明

应江西省机械工业局的邀请，西安交通大学金属材料及强度研究室主任周惠久教授及邓增杰、朱维斗同志来我省作了题为“材料强度科学及其在生产上的应用”的学术报告，根据机械系统广大科研、设计、工艺及理化检验人员的要求，我们将周惠久等同志的学术报告经过录音整理，以科技讲座的形式予以出版。

该书第一、二讲由周惠久同志主讲，介绍材料强度的概念、内容和研究方法，全面地论述了提高材料使用强度水平的问题；第三讲由邓增杰同志主讲，主要介绍强度性能指标的物理——技术意义、变化规律和测试方法；第四讲由朱维斗同志主讲，主要介绍材料强度研究在生产中的应用实例。

由于我们水平有限，在整理过程中难免有错误缺点，诚望读者批评指正。

江西省机械材料研究所

1978年12月26日

目 录

第一讲 发挥金属材料强度潜力，提高机械产品质量，

节约材料…………… (1)

一、引言——从材料强度谈起…………… (1)

二、材料强度研究在提高机械产品质量、节约材料方面所起的作用…………… (5)

三、设计、工艺、理化检验及材料研究工作者携起手来，为提高机械产品质量而共同努力…………… (11)

第二讲 在机械制造中提高材料使用强度水平问题………… (20)

一、发挥金属材料强度潜力的途径…………… (21)

二、关于材料的冲击韧性及多次冲击抗力…………… (24)

三、关于材料的塑性…………… (48)

四、关于材料的疲劳强度…………… (54)

第三讲 材料的失效抗力指标…………… (71)

一、材料在静载荷下的机械性能…………… (72)

二、材料的疲劳强度…………… (92)

(一) 疲劳破坏的特点…………… (92)

(二) 疲劳抗力指标…………… (95)

(三) 影响材料疲劳抗力的因素…………… (100)

(四) 疲劳断口分析…………… (108)

(五) 关于接触疲劳 (附磨损)	(109)
三、材料的冲击抗力	(112)
(一) 冲击负荷的主要特点	(113)
(二) 冲击抗力的指标	(114)
(三) a_k 的意义	(116)
(四) 低温系列冲击试验	(118)
四、断裂韧性	(120)
(一) 断裂力学产生的背景	(120)
(二) 基本概念	(122)
(三) 断裂韧性实验	(126)
(四) 大范围屈服的断裂韧性	(130)
(五) 用断裂力学方法研究疲劳裂纹亚临界扩张 ...	(137)
(六) 断裂韧性的应用举例	(139)
第四讲 材料强度研究成果在生产中的应用	(142)
一、材料强化方法的分类	(142)
二、材料强度研究的应用实例	(144)
(一) 中碳钢淬火、低中温回火	(144)
(二) 低碳马氏体	(146)
(三) 根据服役条件合理要求渗碳等技术要求	(153)
(四) 薄壳淬火	(156)
(五) 综合强化	(162)
(六) 冷变形模具材料与工艺选择	(165)

第一讲 发挥金属材料强度潜力，提高机械产品质量，节约材料

一、引言——从材料强度谈起

我们知道所有机械零部件在运转中都在某种程度上承受力或者吸收能量。在力或能和温度、介质等的附加作用下，零部件会发生过量变形、表面损伤以至断裂而失去其效用，这种现象叫作失效。零部件抵抗上述各种失效的能力就是零件强度。在生产实践中零件强度表现为它的短时承载能力和长期使用寿命。例如一个高压容器，不但要经得起一次加压甚至超压试验，而且还要经得起在有效寿命期内多次反复加减压而不破裂或渗漏的考验。发动机的连杆螺栓，首先要能承受足够的预紧力，不拉长，不脱扣，不掉头；还要能经得起发动机运转中无数次气缸爆炸传到它上面的反复冲击拉伸应力而不发生疲劳断裂。显然在零件的形状、尺寸一定时，这种承载能力和使用寿命便主要决定于制造零件所用材料的强度。材料本身对各种类型失效的抵抗能力，即针对不同情况所要求的机械性能组合，都包括在材料强度这一概念之中。

零件强度是许多因素的综合体现，其中主要是结构因素、材料因素和制造工艺因素。

1、结构因素：结构因素是指设计者根据零件在整机中的

作用与效能，而在结构设计中所决定的形状、尺寸、与相连接零件的配合等。合理的设计结构就是要从形状、尺寸上保证用最少的材料使零件发挥其特定的效用，同时具有所要求的承载能力与使用寿命。忽略结构上任何一个细节，都会削弱零件的强度，从而导致零件在运转中早期失效。

2、材料因素：材料因素是指制造零件所用的材料的化学成份、冶金质量、宏观、微观、亚微观组织状态等内在因素以及由此决定的材料强度。材料从冶炼到毛坯成形、加工处理直到零件每一道工序都会对强度发生影响。零件各部位的实际材料强度也有差异，这里除最后化学成份、冶金质量、组织状态以外，还会在不同部位产生不同的缺陷和不同的残余应力，从而影响有关部位的实际材料强度。

值得注意的是残余应力：如零件表面存在残余压应力会大大提高疲劳强度，而存在残余拉应力却对材料强度起不良的影响。所以我们就要设法去除材料的有害残余应力，制成或保存那些有益的残余应力，特别是在零件的危险断面或薄弱环节处。

3、工艺因素：制造工艺的目的是成型，但不可忽视的是所有的成型工艺如铸、锻、冷冲压、机械加工等都在不同程度上影响材料的强度。铸造工艺对强度的影响很大，如球墨铸铁在石墨分布均匀的情况下是一种具有相当高强度的可靠结构材料；如果石墨局部集中，则在该处的局部强度急剧下降。我们在铸造时采取一定的工艺方法可以得到石墨球理想分布的条件，如瞬时孕育处理。

锻造时的锻造比和流纹方向能显著影响某些材料的机械性

能。举例来说， Cr_{12}Mo 模具钢和高速钢原材料中存在碳化物不均匀性，这种碳化物不均匀程度能强烈影响制成工具的热处理工艺性及机械性能，而这种碳化物不均匀性目前在冶炼上难以避免，用热处理手段也无法消除，用锻造的方法却可以使碳化物破碎、细化、分布均匀。所以这类材料的锻造目的不仅仅是成形，也是为了改善碳化物级别。又如所有压延材料，都由于溶解杂质或非金属夹杂物沿压延方向分布，而性能上带有或多或少的方向性。所以在以压延材料为毛坯进行锻造时，可以在工艺上采取措施使各向异性适应于外加载荷。象起重吊钩、齿轮等零件均可在锻造时设法使材料流纹处于最有利的方向。

所有的切削加工工艺都对材料强度有一定的影响，表面光洁度的影响是众所周知的。磨削工艺是纵向或者横向磨削，这对轴类零件的寿命也有影响，磨削不良会造成表面微裂。切削刀具的形状、角度不同，在零件表层所产生的加工硬化和残余应力也不同，从而影响到零件强度，特别是动强度。

材料强度是材料因素总的表现。材料强度一般指材料失效以前所能承受的最大应力，如屈服极限、疲劳极限、蠕变极限等。当然实际情况很复杂，材料强度还应包括与失效有关的所有机械性能，如弹性、塑性、刚度、硬度、韧度和对应力集中、尺寸、温度的敏感性等等。

材料强度学科是一门独立的介于力学与金属学之间的科学，它通过理论分析和实验测试，着重从材料的角度解决零件的失效问题。为此，需要从零件的服役条件（即外在因素）出发，通过典型的失效分析找出造成失效的主导因素，从而确立衡量材料对此种失效抗力的正确判据（强度指标），必要时建立新指

标, 以及相应的测试方法。进一步找到材料的化学成分、冶炼方法、组织状态、内应力的种类、方向、大小等(内在因素)与相应强度指标的关系, 指出改变和提高相应指标以解决机件失效问题的途径。

材料强度研究的内容, 可以大致分为两个方面, 即强度和强化。强度指导强化, 强化保证强度。总的目的在于正确选择合理使用材料, 最大限度地发挥材料的强度潜力, 以在保证产品效能的前提下, 减轻产品重量, 延长使用寿命并节约材料。强度研究方面, 包含:

1. 在零件服役条件下, 材料失效类型及现象, 过程和规律(如塑性变形及断裂的宏观规律, 裂纹的发生与发展, 磨损、麻点剥落的形态与发展过程等等)

2. 正确衡量相应失效抗力的判据(强度指标)的物理本质和技术意义, 它们之间的相互关系, 探索新指标及相应测试方法。

3. 外在因素(负荷种类, 应力状态, 温度, 加载速度, 环境介质, 形状, 尺寸和表面状态等因素)对失效抗力的影响。

4. 材料内在因素(化学成份, 组织状态, 冶金质量和残余应力等)对失效抗力的影响。

5. 失效分析及分析方法(宏观断口分析, 电子显微镜断口形态学; 宏观裂纹的检测与跟踪; 内应力测试; 破断过程的高速摄影; X射线检查裂纹的孕育; 声发射检测加载过程中裂纹扩展等)。

强化研究方面, 包含合金化、热处理、表面处理、冷热变形强化的个别规律、综合强化规律及其与失效抗力的关系。这

样，从零件的服役条件→失效分析→主要强度性能指标→材料（化学成分、组织状态和冶金质量）→各种强化工艺→强度试验与检验→生产应用，构成了强度研究的完整环节。

综上所述，可以认为，材料强度是一门从材料的角度与机械失效作斗争的科学。研究材料强度的目的在于：为正确选择和合理使用材料提供依据，充分发挥材料的强度潜力，从而减轻机械产品重量，延长使用寿命和节约材料。材料强度研究工作，通过为设计提供正确的许用应力和选材的依据，而与结构设计联系起来；通过研究各种加工处理工艺对材料强度的影响而与工艺联系起来，从而使材料强度成为设计、材料和工艺三者间的纽带。

二、材料强度研究在提高机械产品质量、节约材料方面所起的作用

毛主席教导我们“一切产品，不但求数量多，而且求质量好”，给我们指出了质量与数量的辩证关系。没有数量当然谈不上质量，但只有质量上去，数量才能发挥作用。

机械产品的主要质量标志是：效能、寿命、重量/容量比等，其中，效能当然是首要的，在保证了解能以后，接着就要提出寿命和重量等质量问题。当前我国某些产品与国际先进水平的差距还不同程度上表现在：产品粗大笨重和寿命不长，钢材特别是高级合金钢材的使用不尽合理，有不同程度的浪费材料现象。机械产品能否做到轻巧耐用，是表证我们生产技术水平的一个重要标志。减轻产品体积和重量不但可以节约材料，而

且还可以节约动力和燃料。延长产品的使用寿命等于增加了生产。因此，减轻产品重量，延长使用寿命，也就是最大的节约。减轻产品重量，延长使用寿命和节约钢材的问题，应核从结构设计、制造工艺(从毛坯到装配)、使用、维护和材料技术方面加以综合考虑才能解决。我们着重从材料技术方面来谈这个问题。材料技术包含两个方面：研制新材料和正确选择并合理使用现有材料。解放以来，我国在研制立足国内资源的新钢种方面取得了很大的成绩，解决了不少产品的材料问题。当然随着工业发展需要不断研制新材料，这是应该肯定的。但是，在正确选择和合理使用材料方面，也就是说在发挥现有材料的潜力方面，还没有得到足够的重视，往往产品质量过不了关就埋怨材料不好，换上新钢种还是解决不了问题，问题在于我们对材料强度的研究工作开展得不够，因而在选材和用材方面还带有一定的盲目性。

正确选择和合理使用材料，要按照国家的经济技术政策、依据其使用性能、工艺性能三方面来加以考虑。对一般机件来说，首先要求材料能满足它的使用性能——其中主要是机械性能(即材料强度)。因为所有机械零件都在某种程度上传递力或能，材料受力或能的作用发生变形、断裂、表面损伤及尺寸改变而失效。在考虑使用性能时，当然同时要兼顾工艺性，即制造的可能性、经济性和生产效率，但应该以积极的态度去促进工艺的变革，而不能用牺牲使用性能的办法来解决工艺性，否则就很难提高机械产品的质量，我们一定要处理好这一对矛盾。

讲到合理使用材料，避免优材劣用的浪费现象问题时，应

该着重提出的一点，就是要勇于冲破传统习惯观念的束缚，特别是肃清苏修教条主义、形而上学学术观念的流毒和影响。在材料强度科学技术方面，这种影响还是相当深的。例如对于冲击韧性指标 a_k 和塑性指标 δ 、 ψ 的过份迷信，曾经是妨碍我们提高材料使用强度水平的严重障碍。我们从1958年开始，20年来对这些问题进行了较系统的试验研究工作，一些理论成果已在生产中得到考验。这次讲座，主要是结合我们在工作中的体会来谈的。下面我想通过一个具体例子来说明在材料强度研究工作中如何尽量发挥材料潜力，以达到提高质量，延长使用寿命、节约材料的目的。关于我们解决问题的思路，前面已经讲过，这里不再重述。这里举的是大幅度减轻石油钻井中的一个重要工具——吊卡的重量以减轻钻井工人劳动强度的例子。石油钻机吊环、吊卡和吊钳是钻井过程中起钻、下钻的三件主要工具，简称“三吊”。过去从苏联进口的和国产仿苏“三吊”极为笨重，钻井工人年龄超过三十五岁就干不动。铁人王进喜同志生前在石油工业部一次会议上尖锐地提出了这个问题。要求石油机械厂的工人、技术人员尽快研究出我们自己独特的轻型“三吊”。在铁人王进喜同志的鼓励下，宝鸡石油机械厂和我们共同协作，积极承担了这一试验研究任务。经过几年来的努力，已研制出我国独特的轻型吊环和吊卡。初步实现了大庆铁人王进喜同志的遗愿。

吊卡的作用是通过它来支承和起吊几千米长的钻杆，其外形如图<1>所示。吊卡是个很主要的工具，工作中要保证绝对安全，如果在工作中突然断裂，就会发生重大人身事故，造成国家财产的损失。原吊卡材料是35CrMo钢，经调质处理强度

极限为 $\sigma_b = 80 \text{ Kg/mm}^2$ 左右，显然强度偏低，但塑、韧性很高。选择这种材料和热处理规范，是根据了苏联传统理论观点。这种观点认为，为了保证安全，就必须牺牲一些强度去追求较高的塑性和韧性，这样一来，势必把吊卡做得很笨重。承载150吨的吊卡，重量竟达126公斤。井台的工作位置很窄，地面很滑，只能由两个工人操作，劳动强度很大。我们急工人之所急，下决心把吊卡的重量大幅度减下来。

先来看看吊卡的服役条件和失效方式。按图<1>所示的受力情况，类似一个短的简支梁，它主要受到静负荷；按起、下钻多次间歇受力情况，属低周次疲劳(但非高应变疲劳)；当处理“卡钻”事故时，还受到过负荷作用；此外，在大庆油田等寒冷地区，吊卡还在低温下工作。关于失效方式，老吊卡没有发

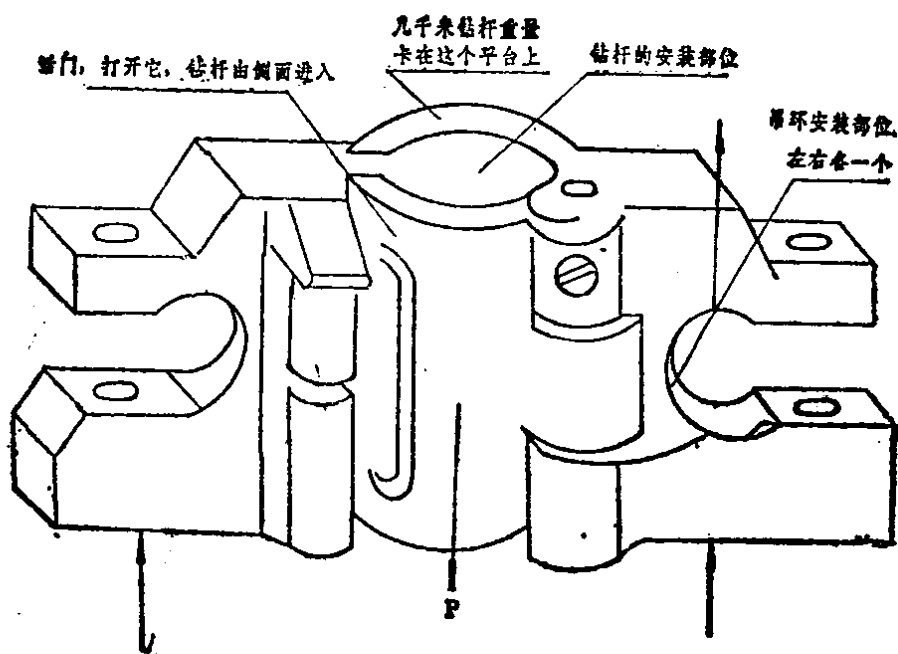


图1 石油钻机吊卡结构示意图

生过断裂事故，其失效方式主要是过量塑性变形。表现为使用一段时间后，吊卡变成船形。两端向上翘起。第二种失效方式

是上平台磨损。变形和磨损到一定程度，会使钻杆失去垂直度、不稳定，吊卡就不能继续使用了。服役条件和失效方式基本搞清楚之后，我们就可以考虑要确定哪些强度指标。既然失效以过量塑性变形为主，而我们的目标又是要减轻吊卡重量，那么，首先就要提高材料对塑变的抗力—屈服极限 σ_s 和强度极限 σ_b 。与此同时，还要保证有足够的塑性和韧性。因为吊卡形状复杂，应力集中系数大。在某些部位受到三向拉伸“硬”的应力状态。如果没有足够的塑性，就会产生早期脆性断裂。还有，如上所述，低温脆化倾向也要加以考虑。总之，对吊卡材料性能的要求是：既要有高强度，又要有大的塑性和韧性。根据性能要求，就可以着手选择材料及其强化工艺了。

当时，我们对于低碳马氏体已经进行了很多研究工作。低碳马氏体是一种高强度和大塑性、韧性相结合的材料。对吊卡这个零件显然是很适合的。但淬透性成了主要矛盾。因为当时还没有一种能使吊卡这样大截面得到全低碳马氏体组织的合适材料。我们就研制符合我国资源条件的高淬透性的低碳马氏体用钢。在研制中，坚持不使用铬镍元素。宝鸡石油机械厂干部、工人、技术人员和我们下厂同志组成的三结合小组，经过多次试验研究，选定的25SiMn₂MoV钢完全可以达到要求。后来为了保证吊卡安全，进一步提高塑性、韧度、把碳含量降低，即20SiMn₂MoV钢。在大炉冶炼、轧制、质量控制等方面得到大冶钢厂的共同协作。我们对20SiMn₂MoV钢还进行了断裂韧性试验，在相同强度水平下，它的断裂韧性比40CrNiMo还高，接近马氏体时效钢的水平，对于保证不发生脆断就更有信心了。

20SiMn₂MoV钢是一个值得推荐的能在大截面得到低碳马氏体的钢。据大冶钢厂测定 $\phi 110\text{mm}$ 空冷可以淬透。我们的吊卡是用油冷，250°C回火。这种材料回火温度高了塑性、韧性会下降，回火温度太低了对消除淬火应力不利，我们试验了好几种回火温度，最后确定选用250°C回火。经这样处理后的20SiMn₂MoV钢性能很优越， $\sigma_b = 160\text{Kg/mm}^2$ ， $\sigma_{0.2} = 130\text{Kg/mm}^2$ ， $\delta = 12\%$ ， $\psi = 50\%$ ， $a_k = 7 \sim 10\text{kgm/cm}^2$ ，低温脆性转化温度 $T_k = -70^\circ\text{C}$ 。

材料的问题解决了，为了尽可能做到等强度设计，还要探索设计方面问题，进一步减轻重量。原来用35CrMo钢制造的老吊卡在超负荷压力下要经很大的塑性变形以后才断裂。现在钢种变了，强度水平提的这么高，它的失效形式是什么呢？是不是还是变形和磨损呢？

为了摸清高强度轻型吊卡的失效形式，我们制造了几个吊卡实物，进行摹拟实验。先在吊卡表面上涂“脆性漆”，然后进行摹拟加载，漆层会产生裂纹，裂纹总是垂直于主应力方向，这样就找到了主应力的走向。根据“脆性涂漆”方法得到的资料，在吊卡的重要部位贴电阻应变片，测量实际应力。最后吊卡在300吨以上的负荷下断裂，发现虽然材料的塑性很高，但在高强度及“硬性”应力状态下，断裂时没有什么塑性变形。

根据摹拟实验得到的资料，进行结构的改进：该减薄的地方继续减薄；应力集中的地方设法缓和；薄弱环节，适当加强。最后我们制造了一个轻型吊卡，重量只有58公斤。（正式投产时成品为60公斤）在试压中每一个都通过了225吨的考验，有的加压到280吨，不仅没有断裂，而且没有一点残余变形，