

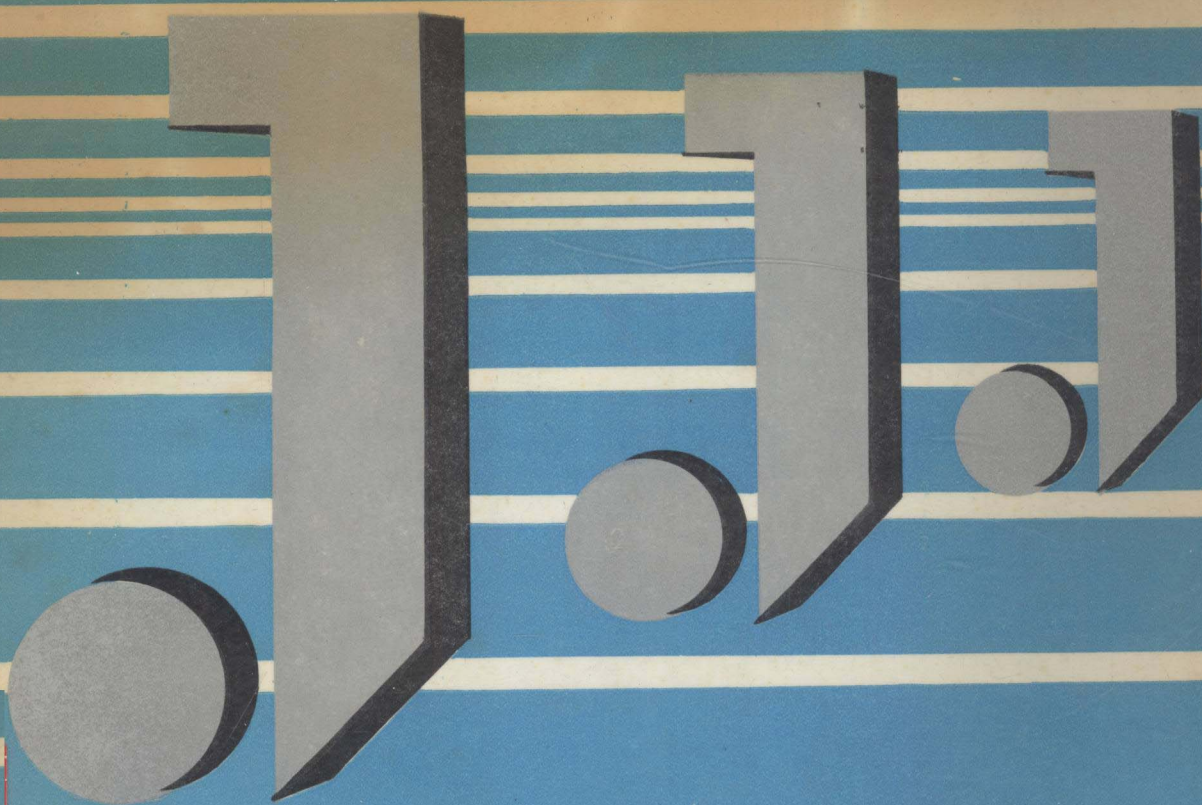
机械工业部 统编

力学性能实验工 操作技能与考核

(中级工适用)

机械工人操作技能培训教材

JIXIEGONGRENCIAOZUO JINENGPEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人操作技能培训教材

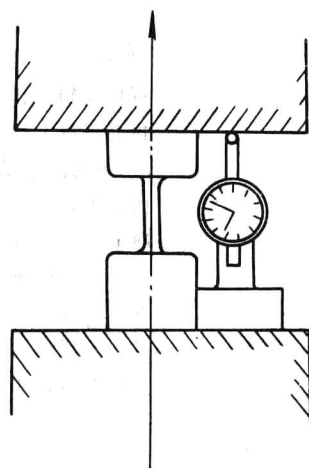
力学性能实验工操作技能与考核

(中级工适用)

机械工业部 统编



机械工业出版社



本套教材是依据机械工业部审定的《机械工人中级操作技能培训大纲》编写的,教材的基本内容及所包涵的技能知识、技能水平同《工人技术等级标准》和《职业技能鉴定规范》相关工种的中级工技能要求一致。本工种教材包括以下主要内容:拉伸试验技能,高温硬度试验技能,冲击试验技能,扭转试验技能,弯曲疲劳试验技能,蠕变、持久强度和应力松弛试验技能,磨损试验技能,金属材料工艺性能试验技能,断口的宏观分析技能以及考核实例(共20题)。

本教材供中级工培训和考核使用,也可作为机械类技工学校、职业学校生产实习课参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

力学性能实验工操作技能与考核/机械工业部统编. —北京:机械工业出版社, 1996. 12

机械工人操作技能培训教材·中级工适用

ISBN 7-111-05266-8

I. 力… II. 机… III. 金属材料-力学性能试验-技术培训-教材
N. TG115.5

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第12224号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:崔世荣 版式设计:霍永明 责任校对:宁秀娥
封面设计:姚毅 责任印制:卢子祥
北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年12月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/16·11印张·262千字

0 001—1 500册

定价:15.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

机械工业部

机械工人操作技能培训教材

编审委员会名单

(均按姓氏笔画排列)

主任委员: 陆燕荪

副主任委员: 王文光 谷政协 吴关昌 郝广发 (常务) 郭洪泽
委员: 丁占浩 (常务) 于新民 (常务) 王治中 王贵邦
王 斌 (常务) 刘亚琴 (常务) 刘起义 汤国宾
关连英 关荫山 孙 旭 沈 宇 (常务) 沈富强
李国英 李炯辉 (常务) 李震勇 (常务) 杨国林
杨晓毅 (常务) 杨溥泉 吴天培 吴铁钢 房志凯
林丽娟 范广才 苗明 (常务) 张世银 胡有林 (常务)
胡传恒 施 斌 唐汝均 董无岸 (常务)

本工种教材由 陈运远、钟文达、蔡 靖、奚建法、何伟康、王琼礼
李炯辉 **编著** 李炯辉、王承忠 **审稿**

前 言

继 1991 年我们组织编写出版初级技术工人基本操作技能培训教材之后,经过几年努力,一套中级技术工人操作技能与考核培训教材又将问世了。这套教材共 35 种,包括 34 个技术工种,是建国以来首次为我国机械工业中级技术工人组织编写的正规的操作技能培训教材。

当前,我国正在建立社会主义市场经济体制。在市场经济体制下,企业的竞争,产品的竞争,归根结底是人才的竞争。谁拥有人才,谁就能够在激烈的市场竞争中立于不败之地。

在机械工业企业中,技术工人是职工队伍的主体,是生产第一线的主力军和骨干力量,是高技能人才的后备军,是企业人才群体中重要的组成部分。但是,据调查,目前机械工业企业中,有相当一部分中级技术工人(包括一部分技工学校毕业生),其实际业务水平同国家颁布的《工人技术等级标准》和《职业技能鉴定规范》的要求相比,尚存在差距,而在操作技能方面,差距更大。这种状况,是造成企业产品质量不稳定,影响产品质量进一步提高,使产品缺乏市场竞争力,制约机械工业产品结构调整、科技进步和生产发展的重要因素之一。

因此,继续加强中级技术工人的业务培训,特别是操作技能培训,不仅是提高企业职工队伍素质、改善企业整体素质的需要,同时也是实施机械工业高技能人才工程、加强企业“能工巧匠”队伍建设的一项基础性工作,对于振兴我国机械、汽车工业也具有重要的战略意义。本套教材的编写和出版,为机械工业企业开展工人中级操作技能培训,并使培训工作制度化、正规化、规范化提供了条件。

本套教材是依据机械工业部审定的《机械工人中级操作技能培训大纲》编写的,教材的基本内容及所包涵的基本技能知识、技能水平同《工人技术等级标准》和《职业技能鉴定规范》相关工种的中级工技能要求一致。因此,这套教材也可以作为机械类技工学校、职业学校生产实习课参考教材。

本套教材的编写贯彻了“从实际出发,面向企业,面向生产,学以致用”的岗位培训原则,以培养能够熟练地综合运用基本操作技能,全面掌握中级操作技能,并具有一定的工艺分析能力和解决生产中实际问题能力的中级技术工人之目的。教材内容分为操作技能训练课题和考核实例两大部分。

操作技能训练课题的设计和安排,遵循由浅入深、由易到难、由简单到复杂循序渐进的教学规律,注意了与工艺学教材的区别,内容包括:加工工艺和具体的、规范的操作方法,加工步骤,工艺分析和加工过程中的质量检验,重在解决“会做和做好”的问题。若干个技能训练课题之后,插入一个工艺分析能力训练课题,以集中培养、提高工人这方面的能力。

考核实例的设计和选定,紧密结合课题,结合生产实际,力求照顾到不同产品的生产企业和不同地区的实际,体现行业的针对性,具有典型性、通用性和可行性,不仅可供培训、考核使用,还可供技能竞赛、技能鉴定命题参考或选用。

本套教材图文并茂、形象直观,叙述文字简明扼要,通俗易懂,较好地体现了工人培训教材的特点;严格贯彻了最新国家标准和法定计量单位。

本套教材的编写,借鉴了我部技术工人教育研究中心和天津市机械局教育教学研究室编

写的《工人中级操作技能训练辅导丛书》的经验，参考了《丛书》中的部分内容，特此说明。

参加本套教材编写工作的有天津、上海、四川、江苏、沈阳等地区机械厅（局）和中国第一汽车集团公司、湘潭电机厂、上海材料研究所等单位。在此，谨向这些地区和单位的领导、组织者和编、审人员以及其他热心支持这项工作的单位和同志表示衷心的感谢！希望行业广大技工培训工作者和读者对本套教材多提宝贵意见，以便今后修改完善。

机械工业部技工培训教材编审组

1995年3月10日

目 录

前言

课题 1 拉伸试验技能	1
作业一 常用拉伸试样制备与夹持	1
作业二 拉伸试验中测定 E 、 μ 、 σ_p 、 σ_r 的操作及数据处理	6
课题 2 高温硬度试验技能	22
作业一 高温硬度试验的准备	22
作业二 高温维氏硬度试验程序和操作	25
课题 3 冲击试验技能	33
作业一 金属材料的一次冲击试验技能	33
作业二 金属材料的高、低温冲击试验技能	35
作业三 钢材韧脆转变温度的测定	39
作业四 钢材的应变时效试验技能	40
课题 4 扭转试验技能	42
作业一 扭转试样的准备和扭转夹具的使用	42
作业二 扭转试验操作	43
作业三 扭转试验各项指标的测定	44
课题 5 弯曲疲劳试验技能	50
作业一 旋转弯曲疲劳试样的制备	50
作业二 旋转弯曲疲劳试验的操作	51
作业三 材料疲劳极限 σ_{-1} 及 $\sigma-N$ 曲线的测定	54
课题 6 蠕变、持久强度和应力松弛试验技能	63
作业一 蠕变试验技能	63
作业二 持久试验技能	76
作业三 拉伸应力松弛试验技能	88
作业四 弯曲应力松弛试验技能	94
课题 7 磨损试验技能	103
作业一 磨损试样的制备	103
作业二 磨损试验机的调整及操作技能	111
作业三 磨损试验数据的整理	122
课题 8 金属材料的工艺性能试验技能	126
作业一 金属材料的弯曲试验	126
作业二 金属管材的工艺性能试验	129
作业三 金属线材的工艺性能试验	131
作业四 金属薄板的杯突试验	134
课题 9 断口的宏观分析技能	136
作业一 断口试样的制备	136
作业二 断口类型及各种缺陷在断口上的形貌鉴别技能	139

作业三 断口分析技能	146
考核实例	154
1. 采用引伸计测定调质 45 钢的弹性模量 E 和泊松比 μ	154
2. 测定调质 35CrMo 钢的规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ 和规定残余伸长应力 $\sigma_{r0.2}$	154
3. 测定合金钢试样的高温硬度曲线	155
4. 测定 16Mn 钢的韧脆转变温度	156
5. 采用扭角仪测定 45 钢的切变模量 G	156
6. 采用作图法测定 35 钢的规定非比例切应力 $\tau_{p0.3}$	157
7. 采用升降法测定 40Cr 钢的疲劳极限 σ_{-1}	158
8. 采用成组试验法测定 40Cr 钢的 $\sigma-N$ 曲线	159
9. 排除和处理蠕变试验过程中的一般故障	159
10. 测定蠕变试验机室温同轴度	160
11. 确定 15CrMo 钢蠕变极限	161
12. 采用等温线法确定 15CrMo 钢持久强度极限	162
13. 25Cr12WMoV 钢拉伸松弛试验	162
14. 25Cr12WMoV 钢弯曲应力松弛试验	163
15. 钢与青铜、钢与钢的磨损试验	164
16. 低碳钢薄板杯突性能试验	165
17. 20 钢管材的压扁和扩口试验	165
18. 测定金属线材的扭转性能和反复弯曲性能	166
19. 评定 20g 板材或棒材的冷弯性能	167
20. 金属断口检验	167

课题 1

拉伸试验技能

作业一 常用拉伸试样制备与夹持

●要点 常用拉伸试样的形式、尺寸与夹持

●训练 1 形式和尺寸的确定

一、拉伸试样的形式

拉伸试验是力学性能试验最普遍的试验方法。它是采用一定形式的试样，在拉力试验机上测定单轴受力下的各项强度和塑性指标。

试样形式，一般是由原材料规格、形状所决定。常用的试样形式，有圆形截面试样（记作 R 形试样）、矩形截面试样（记作 P 形试样）和异形截面试样（记作 S 形试样）三类，见图 1-1。也可采用材料的原始形状直接

进行试验，具体选择详见 GB6397—86 金属拉伸试验试样。

二、拉伸试样尺寸的确定

1. 试样坯料尺寸的确定 试样毛坯尺寸尽可能接近被检测材料的尺寸，取自材料具有综合性能的部位，以反映该材料的真实情况。在试验机负荷允许的情况下，最好采用原材料或零部件直接进行试验。但是，为了经济，一般都是取样进行试验。对于某些必须经过热处理的试样，应按有关标准规定的试样毛坯进行热处理后，再精加工成标准试样。

2. 试样基本尺寸的确定 试样基本尺寸可按下式确定。

对于长比例试样

$$l_0 = 11.3 \sqrt{S_0} \text{ 或 } l_0 = 10d_0 \quad (1-1)$$

对于短比例试样

$$l_0 = 5.65 \sqrt{S_0} \text{ 或 } l_0 = 5d_0 \quad (1-2)$$

式中 l_0 ——试样标距长度 (mm)；

S_0 ——试样截面积 (mm^2)；

d_0 ——试样直径 (mm)。

从式 (1-1) 或式 (1-2) 中可以看出，长比例试样的标距是短比例试样标距的 2 倍。一般采用短比例试样进行试验。其中， $l_0 = 11.3 \sqrt{S_0}$ 或 $l_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ 适用于 P 形和 S 形试样，而 $l_0 = 10d_0$ 或 $l_0 = 5d_0$ 适用于 R 形试样。式 (1-1) 和式 (1-2) 所确定的标距长

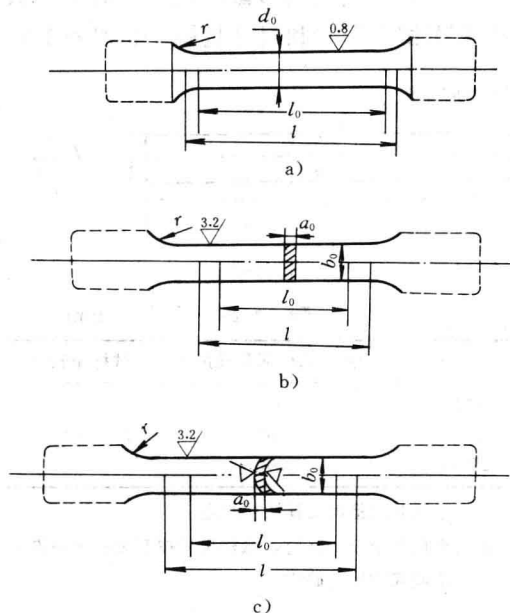


图 1-1

a) R 型试样 b) P 型试样 c) S 型试样

度,称为比例试样标距长度。在特殊情况下,根据产品标准或双方协议,比例试样标距长度也可采用 $l_0=4.52\sqrt{S_0}$ 、 $l_0=9.04\sqrt{S_0}$ 或 $l_0=4d_0$ 、 $l_0=8d_0$ 等,可根据需要分别选用。特别要指出的是,由各计算公式计算的标距长度 l_0 确定的试样所测定的伸长率不能相互比较,应按照有关标准换算成同一标距长度的伸长率后才能进行比较。

试样标距的另一种确定法是定标距,即试样标距长度不是按比例计算,而是规定一个定尺寸,一般定标距长度为 $l_0=50\text{mm}$ 、 $l_0=80\text{mm}$ 、 $l_0=100\text{mm}$ 、 $l_0=200\text{mm}$ 等。定标距试样一般适用于薄板、带材和线材或有关技术条件规定的试样。

当试样截面尺寸确定后,即可按式(1-1)、式(1-2)或其他计算式确定试样标距长度 l_0 。必须指出, l_0 是伸长率的计算基准长度,也叫试样平行部分(或工作部分)长度。在进行规定非比例伸长应力 σ_p 或残余伸长应力 σ_r 测定时,要考虑到能方便地装夹引伸计的空间,因此可以考虑适当增加平行部分的长度。对于圆形截面试样,平行部分长度 $l=l_0+(1\sim 2)d_0$;对于矩形截面试样, $l=l_0+(0.5\sim 1)b_0$ 。其中, l_0 为试样标距长度, d_0 和 b_0 分别为圆形截面试样直径和矩形截面试样宽度。

对于从事力学性能测试的人员,应能根据有关标准,正确绘制试样的加工图,这是一项基本技能。其中,拉伸试样的加工图可参照《力学性能实验工基本操作技能》(初级工适用)一书^①课题2进行绘制。

三、特殊试样的取样

在某些事故分析时或对特殊工艺材料进行拉伸试验时,试样取样要考虑试样材料的多少和对特定部位取样,例如对焊接材料取样等。

1. 试样形状和尺寸

(1) 焊接接头矩形截面试样:可以采用

板条状试样,也可以加工成带头板条状试样,其形状和尺寸见图1-2和表1-1。

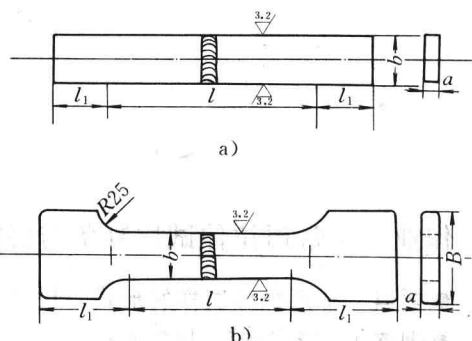


图 1-2

a) 板条状试样 b) 带头板条状试样

表 1-1 (mm)

焊板厚度	试样宽度 b	夹头部分宽度 B	平行部分长度 l	试样全长 L
<4.5	15 ± 0.5	25	50	$L=l+2l_1^{①}$
$>4.5\sim 10$	20 ± 0.5	30	60	
$>10\sim 25$	25 ± 0.5	35	100	
$>25\sim 50^{②}$	30 ± 0.5	40	160	

① l_1 根据试验机夹具尺寸而定。

② 板厚大于50mm时,试样尺寸按有关技术条件规定或双方协议确定。

(2) 焊接接头圆形截面试样:焊接接头圆形截面试样形状和尺寸见图1-3和表1-2。

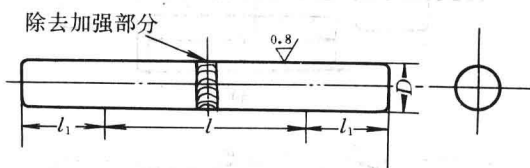


图 1-3

表 1-2 (mm)

直径 D	试样平行部分长度 l	试样全长 L
<10	60	$L=l+2l_1^{①}$
$>10\sim 25$	100	
$>25\sim 50^{②}$	160	

① l_1 根据试验机夹具尺寸而定。

② 直径大于50mm时,试样尺寸按有关技术条件规定或双方协议确定。

① 机械电子工业部统编·北京:机械工业出版社出版,1992。下同。

试样的焊缝加强部分应加工除去，使其与母材齐平。但也可根据有关技术条件规定不除去，例如钢筋对接试样，其焊接表面不予加工。

(3) 焊接管试样：管壁厚度在 6mm 以下、外径尺寸在 25mm 以下时，可采用图 1-4a 或图 1-4b 带加强的试样，进行整管拉伸试验。当管壁厚度为 6~10mm 的焊接管时，可采用图 1-4c 剖管条状试样，其加强部分应除去。管壁厚度大于 10mm 的对接管，可在管壁上截取并加工成图 1-3 所示的圆形截面试样。或加工成图 1-5a、b 所示的小试样。试样截取部位及数量根据有关技术条件规定执行。

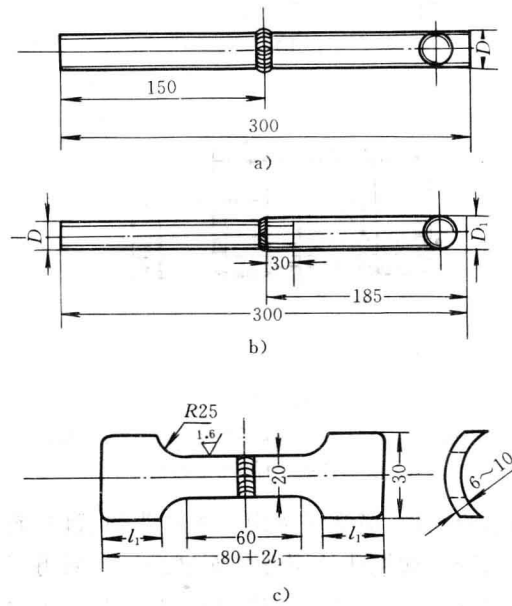


图 1-4

(4) 在焊接接头上测定焊缝强度的试样：试样形状和尺寸见图 1-6 和表 1-3，但焊缝加强应加工除去，使之与母材齐平，加工刀痕应与焊缝轴线垂直，棱边应锉圆，棱角半径应不大于 1mm。

抗拉强度计算公式为

$$\sigma_b = K F / S_0 \quad (1-3)$$

式中 K ——为修正值。对于碳素结构钢和

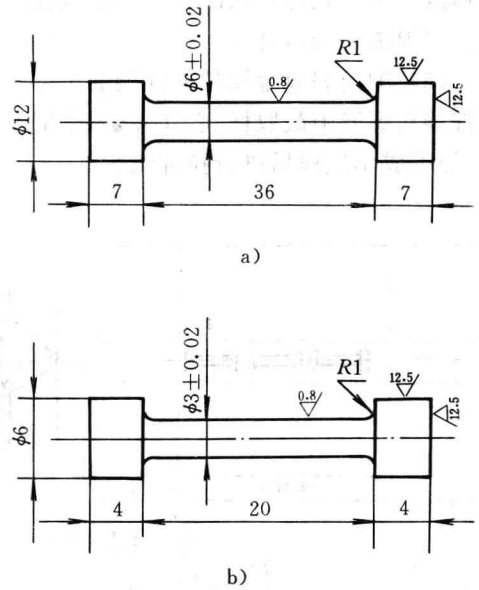


图 1-5

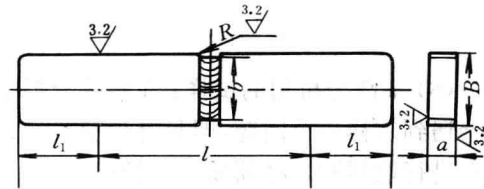


图 1-6

表 1-3 (mm)

焊板厚度	试样夹头部分宽度 B	圆弧半径 R	受试部分长度 l	受试部分宽度 b
<4.5	25	8 ± 1	40	15 ± 0.5
$>4.5 \sim 10$	30	15 ± 1	60	20 ± 0.5
$>10 \sim 25$	38	20 ± 2	70	25 ± 0.5

低合金结构钢， $K=0.9$ ；其他材料的 K 值参照有关技术条件规定；

S_0 ——试验前试样圆弧处最小横截面积；

F ——拉断时最大负荷。

试样拉断后，除了测定抗拉强度 σ_b 值外，尚需记录其断口的位置，如焊缝处、热

影响区、母材处等，其断口缺陷有气孔、夹渣、未焊透、未熔合等。

(5) 测定焊缝金属拉伸性能的试样：可以直接从焊缝中截取样坯，取样部位见图 1-7。加工成小试样后进行拉伸试验。

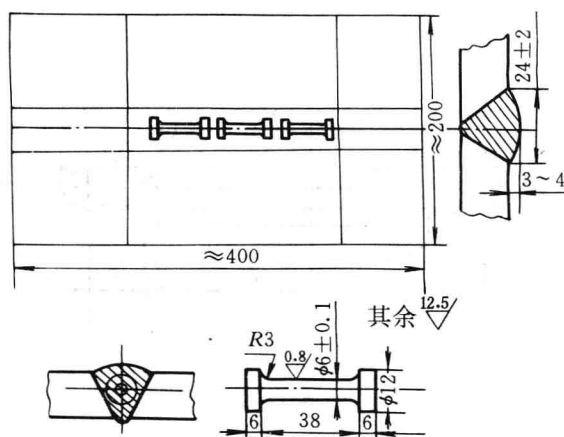


图 1-7

(6) 事故分析用的试样：在事故分析中，常会遇到这样一个问题，即只有少量残片。因此在取样时，必须设计一种小试样，见图 1-8。其中，图 1-8a 为矩形截面试样，图 1-8b、c 为圆形截面试样。这类试样的加工要求特别严格，其尺寸精度与表面粗糙度均标在图中。拉伸试验是在特殊的微小型拉伸试验机上进行，试验时必须非常细致，以保证每次试验时尽可能得到更多的试验数据，从而为事故分析提供更多的依据。

●训练 2 拉伸试样的夹持

试样的头部形状与夹持的匹配，有时会往往成为试验成败的关键，这对于某些特殊的材料试验尤为重要。

一、试样的头部形状和尺寸

试样的头部形状和尺寸，应适于试验机夹头的夹持。对于一般低碳钢棒材，可直接截取一段作为试样。对于淬火回火钢，当采用引伸仪来测定微小变形抗力时，为了不使试样在拉伸过程中因夹持部分“打滑”而影

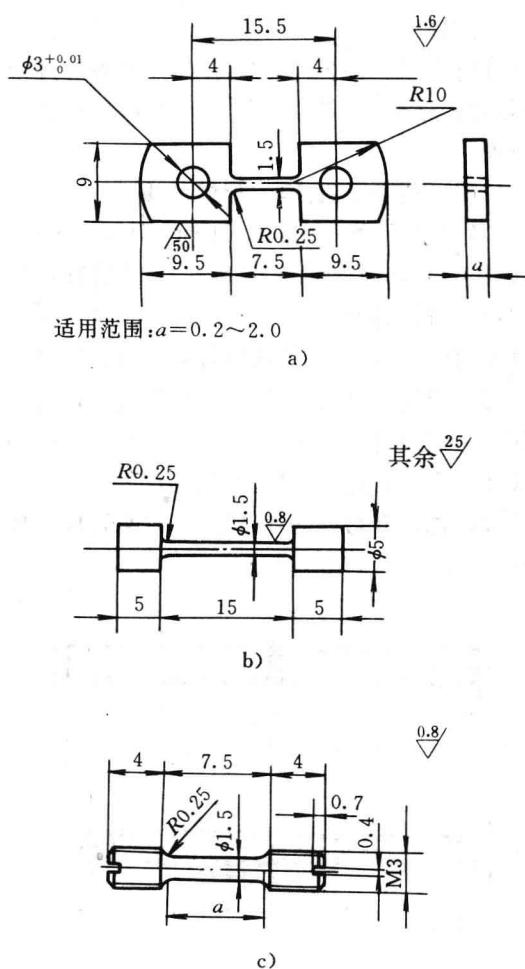


图 1-8

- a) 矩形截面试样 b) 头部不带螺纹的圆形截面试样
c) 头部带螺纹的圆形截面试样

响试验工作，通常应采用带螺纹头的试样，或头部带承载销孔的矩形截面试样。当采用带螺纹头的试样时，其螺纹长度以 15mm 为宜。螺纹太长了，操作不方便。试验时，应将螺纹头全部夹入夹具内，否则试样会断在螺纹根部。当采用带承载销孔的矩形截面试样时，要求销孔的中心与标距部分宽度的中心线的偏离量应不大于标距部分宽度的 0.005 倍。带销孔的矩形截面试样，一般为高强度材料试验，因为试验时不易夹持。但是，由于试样的头部开了销孔，销孔处即成为危险断面，因此一定要考虑到试样头部的宽度、

长度、孔的大小以及销钉材料等。带螺纹头试样形状和尺寸见图 1-9。带承载销孔试样形状和尺寸见图 1-10。

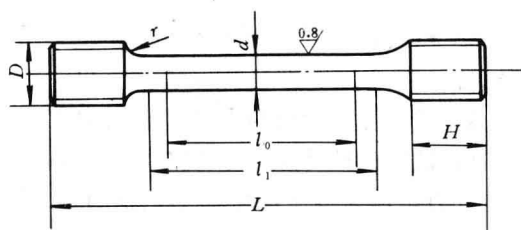
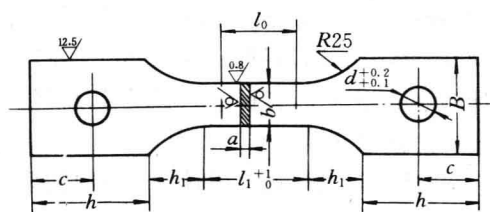


图 1-9



两孔中心与试样中心偏差不大于 0.1/100

图 1-10

二、特殊材料试样的夹持

当试样厚度小于 0.1mm 的弹性材料时，一般是采用宽度为 10mm 的带状试样，而常用的试验机夹具是无法夹持这类试样的，只能通过改进试验机的夹具才能解决试样的夹持问题。为此，可采用市售的扁锉刀，用砂轮片将其切割成锉刀片用于夹持。根据试样的厚薄程度，可分别选用中纹锉或细纹锉，将切割的锉刀片磨去毛刺后镶嵌在楔形夹板上，见图 1-11。实践证明，这种夹具对于高强度丝材夹持也是适合的。但是，需要指出的是在镶嵌锉刀片时，锉刀的刺方向应与拉伸方向相反，否则试样也会打滑而使试验无法进行。

对于某些特薄、特细的试样，可以采用图 1-12 所示的夹紧装置。这种夹紧装置是采用两块平板把试样夹紧，为增加摩擦力，可以在夹板与试样夹持部分衬上砂皮，砂皮的

粗细应视试样厚薄或粗细程度而定，以不损伤被夹持试样为准。

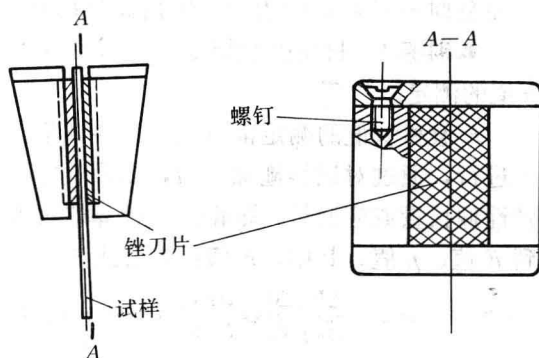


图 1-11

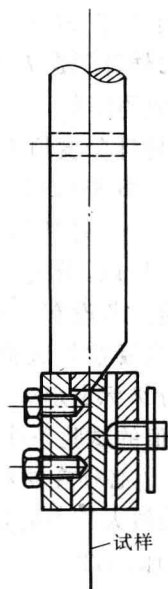


图 1-12

试样夹持是拉伸试验的关键，试样夹不牢或打滑都会使试验无法进行。虽然拉伸试验机都配有各种夹持试样的夹具，但都是常用的，对于特殊规格的材料，就不适用了，特别是随着材料科学的发展，材料的强度、硬度越来越高，其规格特薄、特细，必须对试验机的夹持装置进行革新，才能使试验工作顺利进行。

作业二 拉伸试验中测定 E 、 μ 、 σ_p 、 σ_r 的操作及数据处理

●要点 进行拉伸试验测定材料的弹性模量 E 、泊松比 μ 、规定非比例伸长应力 σ_p 和规定残余伸长应力 σ_r 的力学性能指标及数据处理

●训练1 材料弹性模量 E 值及泊松比 μ 值的测定

E 值和 μ 值的测定都可以在材料试验机上进行,通过对试样施加拉力,测量试样的弹性伸长量或应变值,根据公式计算即可得到 E 值、 μ 值。其中, E 值计算公式为

$$E = \sigma / \varepsilon = \frac{\Delta F}{S_0} \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\Delta F l_0}{S_0 \Delta l} \quad (\text{MPa}) \quad (1-4)$$

式中 ΔF ——分级载荷 (N);

S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2);

l_0 ——引伸计标距 (mm);

Δl ——相应于 ΔF 的伸长量 (mm)。

一、采用引伸计测定 E 值

1. 测定 E 值的仪器

1) 表式引伸计分度值不得大于 1/1000 mm, 即精度值不低于 0.001mm。

2) 引伸计的分级达到 B 级。仲裁试验时要求达到 A 级。所以,测定 E 值的引伸计必须经过分级标定。若没有分级标定,必须按照 GB228—87 金属拉伸试验方法附录 A 规定的程序进行分级标定定级。

2. 测定 E 值的试验条件

1) 测定 E 值必须在材料弹性范围内测量弹性变形,故最大应力值要低于 $\sigma_{p0.01}$,但不得低于最大值的 1/2。

2) 最终应变负荷值应与试验机测量范围相当。

3) 最终变形量要与引伸计量程相当。

4) 试验时拉伸速度不宜过高,也不能太低,应力增加速度应保持在 1~20MPa/s 范围内。

3. 采用引伸计测定 E 值实例 假设钢试样的直径 d_0 为 10mm, 试样截面积 S_0 为 78.54mm², 预期规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.01}$ 为 900MPa, 引伸计标距 l_0 为 20mm, 表式引伸计最小分格为 0.001mm。试测定 E 值。

(1) 测试步骤

1) 装好试样,夹上引伸计,在预期规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.01}$ 的 70%~80% 范围内反复加载 2~3 次,使引伸计准确调零,计算相应于预期规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.01}$ 的 80% 的载荷。即 $F' = \sigma_{p0.01} S_0 \times 0.8 = 900 \times 78.54 \times 0.8 \approx 56550\text{N}$ 。

2) 调整引伸计零点,将载荷 F' 分成 8 级,然后按等级加载,其分级载荷取整数为

$$\Delta F = F' / 8 \approx 7000\text{N}$$

记录等级加载和相应的试样伸长量 (即读出引伸计的格数),每根试样反复试验 3 次,表 1-4 为测得的一次记录数据。

表 1-4

K	F (N)	σ (F/S_0) (MPa)	L (表式引伸计读数)		Δl (级间差值)		ε (L/L_0) (%)
			(格)	(mm)	(格)	(mm)	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	7000	89.13	8.7	0.0087	8.7	0.0087	0.000435
2	14000	178.25	17.5	0.0175	8.8	0.0088	0.000875
3	21000	267.38	26.0	0.0260	8.5	0.0085	0.0013
4	28000	356.51	34.9	0.0349	8.9	0.0089	0.001745
5	35000	445.63	43.9	0.0439	9.0	0.0090	0.002195
6	42000	534.76	52.7	0.0527	8.8	0.0088	0.002635
7	49000	623.89	61.4	0.0614	8.7	0.0087	0.00307
8	56000	713.01	69.8	0.0698	8.4	0.0084	0.00349

注:表中 K 为级数。

(2) 数据处理: 根据 GB 8653—88 标准, 此时可采用拟合法处理数据, 即用最小二乘法将轴向应力 σ 对轴向应变 ϵ 进行直线回归, 回归直线的斜率 b 就是 E 值。对于此例, 由表 1-4 数据, 经拟合后得:

$$\sigma = 0.8597 + 203346\epsilon$$

$$(a = 0.8597, b = 203346)$$

$$(\text{回归相关系数 } \gamma = 0.99997)$$

所以, 所求杨氏模量 $E = 203346 \approx 2.03 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

对于此法, 也可按照式 (1-5) 直接进行计算:

$$E = \left[\sum (\epsilon \sigma) - K \bar{\epsilon} \bar{\sigma} \right] / \left[\sum \epsilon^2 - K (\bar{\epsilon})^2 \right] \quad (1-5)$$

此外, 也可采用算法平均法, 对于本例已知 $\Delta F = 7000 \text{ N}$, $l_0 = 20 \text{ mm}$, $S_0 = 78.54 \text{ mm}^2$,

$$\Delta l = \bar{\Delta l} = \frac{0.0698}{8} = 0.008725 \text{ mm}。$$

将以上数值代入式 (1-4), 得:

$$E = \frac{\Delta F l_0}{S_0 \Delta l} = \frac{7000 \times 20}{78.54 \times 0.008725} = 204302 \approx 2.04 \times 10^5 \text{ MPa}$$

此结果与拟合法所得结果基本一致。如果上述的试验重复进行三次, 即能得到如表 1-4 所示的三次数据, 可分别计算得到 E_1 、 E_2 、 E_3 , 再取其平均值 $E = \frac{1}{3} (E_1 + E_2 + E_3)$, 则所得 E 值将更为精确。

二、采用电阻应变测量法测定 E 值和 μ 值

在材料的预期规定非比例伸长应力的 $\sigma_{p0.01}$ 的范围内分级加载, 用电阻应变仪逐级测出相应的试样纵、横向的应变变量 ϵ_1 、 ϵ_2 , 然后通过计算即可求得 E 值和 μ 值。

E 值的计算公式为

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{\Delta F}{S_0 \Delta \epsilon} \quad (\text{MPa}) \quad (1-6)$$

式中 ΔF ——分级载荷 (N);

S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2);

$\Delta \epsilon$ ——相应于 $\Delta \sigma = \Delta F / S_0$ 的应变变量 (%)。

μ 值的计算公式为

$$\mu = \left| \frac{\Delta \epsilon_2}{\Delta \epsilon_1} \right| \quad (1-7)$$

式中 $\Delta \epsilon_1$ ——纵向应变变量;

$\Delta \epsilon_2$ ——横向应变变量。

1. 电阻应变片的粘贴 电阻应变测量方法, 是以电阻应变片作为传感元件或转换元件, 将其粘贴在试样上, 以电阻应变仪作为测量仪器, 测量试样表面的应变变量, 从而转换成应力。

(1) 应变片和粘合剂的选择: 在实验室内, 常用的电阻应变片采用金属丝式 (圆角线栅式) 典型应变片和纸基应变片, 见图 1-13、图 1-14。根据测试要求, 选择应变片规格和技术参数, 即应变片的尺寸、敏感栅材料、形式、基底材料以及粘合剂种类等。表 1-5 为常用的几种国产应变片的技术数据。

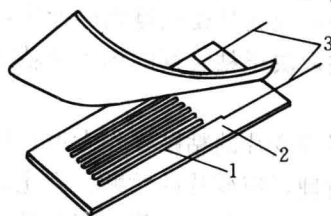


图 1-13

1—敏感元件 2—基底 3—引线

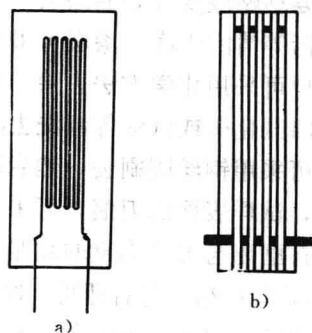


图 1-14

a) 圆角线栅式 b) 直角线栅式

实验室常用型号为 PZ-17 型电阻应变片。粘合剂采用 KH501 胶或 KH502 胶。

表 1-5

型号	形 式	阻值 (Ω)	灵敏系数 K	线栅尺寸 $S \times L$ (mm)
PZ-17	圆角线栅、纸基	120 ± 0.2	$1.95 \sim 2.1$	2.8×17
8120	圆角线栅、纸基	118	$2.0 \pm 1\%$	2.8×18
PJ-120	圆角线栅、胶基	120	$1.9 \sim 2.1$	3×12
PJ-320	圆角线栅、胶基	320	$2.0 \sim 2.1$	11×11
PB-5	箔式	120 ± 0.5	$2.0 \sim 2.2$	3×5
2×3	箔式	$87 \pm 0.4\%$	2.05	2×3
2×1.5	箔式	$35 \pm 0.4\%$	2.05	2×1.5

KH501 胶粘度较小, 固化时间短, 粘合强度高; 而 KH502 胶粘度较大, 固化时间稍长, 粘合强度更高, 但储存期较短。

(2) 应变片的粘贴操作: 应变片通常是采用粘合剂粘贴在试样上, 在应变测量时粘合剂所形成的胶层起着非常大的作用, 它要正确无误地把试样的变形传递给线栅。在测量系统中, 应变片是关键性的元件, 测试的成败往往取决于粘合剂的选用和粘贴方法的正确与否。

电阻应变片的粘贴操作大致包括: 试样表面的清理, 应变片的粘贴、固化、安装连接, 粘贴质量检查和保护层的敷设等。

1) 试样表面的清理 为了使应变片能粘贴牢固, 试样表面必须进行清理。首先, 将试样表面要粘贴应变片处的漆层、锈蚀、氧化皮、油污等清除干净。漆层可采用除垢刮刀刮去, 也可采用化学方法去除。油污可采用甲苯、四氯化碳或汽油等清洗去除。锈蚀和氧化皮可采用钢丝刷刷去, 然后用砂纸打光。其次, 试样表面的刀痕, 可采用细纹锉刀和砂纸打磨出与刀痕垂直的纹路, 其表面粗糙度达到 $R_a 3.2 \mu\text{m}$ 左右即可。对于过于光滑的试样表面, 可采用细砂布打磨出与应变片轴线成 45° 的纹路, 然后再用刷子将表面的尘埃和加工后的残留物清除干净。最后, 是在试样表面上划出定位标记, 以便于粘贴应变片。清洁后的试样表面应马上进行贴片, 否

则要涂上一层凡士林油作为保护, 待贴片时, 再用甲苯、四氯化碳或汽油等去除保护层后进行贴片。在应变片粘贴前, 还必须对试样表面进行最后清洗, 可采用蘸有甲苯、四氯化碳或丙酮溶剂的脱脂棉球擦拭试样表面贴片处, 不断更换棉球, 直到擦后棉球上无污染为止, 经过最后清洗的试样表面严禁手指接触。

2) 应变片的粘贴 应变片的粘贴方法, 应视粘合剂和应变片的基底种类不同而异。一般的粘贴操作过程如下: 先在最后清洗过的试样表面上, 用不脱毛的画笔蘸上适量的胶液涂上一层薄而均匀的胶层, 待干固后, 再均匀的涂一层胶液, 并立即将应变片不加压地放置在涂有胶液的试样表面上。放置应变片时, 可轻拿其引出线, 将应变片稍稍移动, 以达到正确定位。操作时, 手指应用丙酮洗净, 注意手指切勿触及应变片的线栅区域, 当应变片移动至正确位置后, 用一小片滤纸覆盖其上, 并用手指轻轻把多余的胶液和气泡从应变片下挤出, 用另一滤纸轻轻除去挤出的胶液, 此时要及时检查应变片的位置是否正确, 尚可微量调整定位。此时更换薄滤纸, 其大小伸出应变片的边缘 $5 \sim 10\text{mm}$, 将其覆盖在应变片上, 引出线一边除外, 此时用左手的中指和食指通过滤纸按紧应变片的引出线区, 同时用右手的食指像滚子一样沿应变片的纵向滚压, 使应变片下多余的胶液连同气泡全被挤出, 在应变片下形成薄的胶层。然后在应变片上再覆盖上毛毡或聚乙烯塑料膜, 并在其上加重块施压或指压, 一般压力不超过 0.1MPa (1kgf/cm^2), 保持 5min 左右, 去除压块或指压和毛毡。此时应变片的胶层进入固化阶段。由于 KH502 胶属于氰基丙烯酸酯快干胶, 其固化速度很快, 因此粘贴时动作一定要快, 防止其粘手指; 同时在贴片时要注意不让引线与试样短路, 引线应向上翘起。

3) 粘合层的固化 固化的过程是溶剂

挥发或单体聚合的过程。固化条件，视粘合剂而异。对于一次性使用的应变片，固化工艺最好采用使用简单、固化时间快的 KH502 胶，其固化压力可采用指压 $0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ($0.5 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$)，在室温条件下保持 1h 即完成固化。

4) 粘贴质量的检验，当将应变片粘贴在试样上后固化之前，应对其粘贴质量进行初步检查，检查可采用万用表测量应变片线栅的电阻值，检查其有否断路；然后再用万用表检查其引线与试样间有无短路现象。经过这样的初检，才可进行固化，否则要重新粘贴新片，直到检查无问题为止。

固化后的粘合层的绝缘电阻应达到 $10000 \text{ M}\Omega$ ，一般只测到绝缘电阻达到 $50 \sim 100 \text{ M}\Omega$ 即可。要求高时应超过 $100 \text{ M}\Omega$ ，长时间稳定的精密测量应达到 $10000 \text{ M}\Omega$ 。此外，还要进行粘合层中气泡的检查。其检查的方法，是把应变片接到静态应变仪上，用手指或用带有橡皮头的铅笔轻轻敲打应变片的敏感栅部，如果粘合层中存有气泡，则应变仪指针会有较大的偏转。

5) 连接线的安装 应变片与测量仪器的连接，一般可采用多股铜线与引线钎焊连接（即用电烙铁锡焊），焊头用粘胶塑料薄膜包裹绝缘，并固定在试件上，见图 1-15。

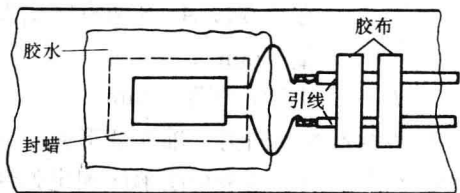


图 1-15

6) 应变片的保护 固化后经检查合格的应变片，可用石蜡熔化后封住整个应变片部位，然后再用粘贴塑料薄膜包裹，图 1-16 为应变片保护层剖面示意图。

以上为应变片的粘贴操作。

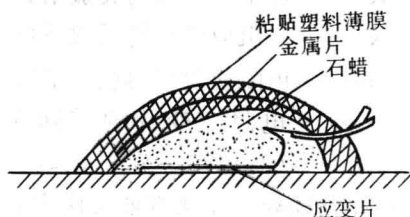


图 1-16

前已述及，电阻应变片的功能是将应变 ϵ 转换成电阻的变化 ΔR ，它们之间有以下关系

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (1-8)$$

由于一般电阻应变片的 $K=2 \sim 2.5$ ， $R=100 \sim 500 \Omega$ ，被测材料的应变又很小，故应变片的电阻值变化很小。为了测量方便，必须把这个微小信号进行放大，这要依靠电阻应变仪来完成。就是将应变片接入电阻应变仪的电桥线路，把电阻应变片变化信号转换成电压信号，经放大后（通过电阻应变仪），由检测仪表或记录仪器即可指示出其应变数值。

2. 测定步骤

1) 确定试样的具体尺寸和贴片情况。假设有一矩形截面试样，已知试样工作部分的宽度 $b_0=30 \text{ mm}$ ，厚度 $a_0=10.5 \text{ mm}$ ，试样工作部分截面积 $S_0=a_0b_0=315 \text{ mm}^2$ ，在矩形截面试样板面中间部位的纵、横方向各贴 2 片电阻应变片，试样的预期规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.01}=800 \text{ MPa}$ ，电阻应变仪的最小应变值 ϵ 为 10^{-6} 。试测定试样的 E 值和 μ 值。

在试样的轴向板面相对粘贴上 2 片应变片，串联，以消除偏心拉伸影响。在试样横向同样各粘贴 2 片应变片，以测定横向应变值。按前述方法粘贴应变片，烘干，焊接引出线，与电阻应变仪连接，选仪器的灵敏系数，使其尽可能接近应变片的灵敏系数。实际应变值的计算公式为

$$\epsilon_{\text{实}} = \frac{K_{\text{仪}}}{K_{\text{片}}} \epsilon_{\text{仪}} \quad (1-9)$$