

精密机械制造与 仪器制造中金属 与合金的尺寸稳定性

〔苏〕 M. JI. 亨金 H. X. 洛克申 著

42

JINGMI JIXIEZHIZHAOYUYI QI
ZHIZHAOZHONG JINSHIYUHE JIN
DE CHICUN WENDINGXING

内 容 简 介

本书研究了金属尺寸稳定性的理论问题,合金组织与尺寸稳定性表征的关系,以及制件在使用与长期保存情况下保证材料尺寸恒定的条件。书中列举了材料选择与应用的推荐资料和精密仪器制造中的稳定化处理过程,这在精密机械制造中也可以应用。

本书可供机器与仪器制造工厂、结构设计与工艺研究机构的科研人员参考之用。

М. Л. Хенкин И. X. Локшин
РАЗМЕРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И
СПЛАВОВ В ТОЧНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ
И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

«Машиностроение» 1974

精密机械制造与仪器制造中 金属与合金的尺寸稳定性

[苏] М. Л. 亨金 И. X. 洛克申 著
蔡安源 杜树芳 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1981年1月第一版 开本: 787×1092 1/32

1981年1月第一次印刷 印张: 6 7/8

印数: 0001—5,210 字数: 157,000

统一书号: 15031·325

本社书号: 2005·15—3

定价: 1.10 元

前 言

金属材料与制件自发改变形状和尺寸的能力是保证精密机器与仪器的精度和可靠性不断增长的要求的重大障碍。对于某些精密机器与仪器来说，尺寸不稳定性应限制在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 毫米/毫米。同时还必须保证在恒温和在交变温度 ($-50 \sim +100^{\circ}\text{C}$ 范围内) 长期使用的条件下有必要的尺寸恒定性。

保证上述的要求是一项极复杂的任务。它的解决有赖于：必须利用具有高尺寸稳定性的金属材料，并在制造制件时必须应用特殊的方法和稳定化处理的工艺过程。

尽管有很大的迫切性，但是金属与制件尺寸稳定化的问题在文献中未能充分阐明。在本书所引述的研究进行以前，还没有关于金属与合金尺寸稳定性特征的本国(指苏联——译注)文献报道。稳定化处理的问题一方面从保证合金的相与组织状态的稳定性来研究，一方面从尽可能地降低零件中的宏观残余内应力来研究。

第一种解决方法应用于结构合金零件的尺寸稳定化问题，虽然合适但不全面，这牵涉到第二种解决方法，对此下面将要说明，因此它是不充分的。

由于缺乏有关在科学基础上选择高精度零件用材料和制定保证制件尺寸稳定性条件的文献，这就给解决精密机械制造与仪器制造中的实际任务造成很大的困难。本书试图解决这一问题。

书中尺寸稳定性的理论问题主要是根据金属与合金组织状态和微塑性形变抗力的关系的研究结果来探讨的。研究表

明,尺寸稳定性的表征是以非常大的组织敏感性为特点的。

组织的变化实际上不影响强度性能($\sigma_{0.2}, \sigma_b$),但在一系列情况下导致表征材料尺寸稳定性的微塑性形变抗力的指标显著变化。

因此为了使高精度制件用材料的选择、加工和应用的实际问题得到最好的解决,必须详尽地研究尺寸稳定性的表征与金属及合金的组织的关系,还要研究机器与仪器零件在使用状态下微塑性形变时金属组织的变化。

本书主要致力于结构金属与合金的尺寸稳定化问题。个别章节也讨论了在精密仪器制造与机械制造中常用的有色合金(铝合金、镁合金、钛合金、铜合金)的稳定化处理。

书中列举了适用于室温或从 -50 到 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内的制件工作条件的金属与合金尺寸稳定性的比较特征,以及稳定化处理的工艺过程和规范的推荐资料。

目 录

前言.....	1
第一章 金属与合金的微塑性形变抗力和尺寸稳定性··	3
1. 金属材料尺寸稳定性的表征	3
2. 金属与合金尺寸稳定性表征的测定方法	8
3. 稳定化处理主要方法的一般特征	16
第二章 短期与长期负载下微塑性形变的形成和发展··	19
1. 短期负载下残余微形变与应力的关系的研究	19
2. 在应力松弛条件下微塑性形变时金属组织的变化	30
第三章 合金与制件借助于热变换作用的尺寸稳定化··	45
1. 含有不同线膨胀系数的相的合金的热循环稳定化处理 ···	47
2. 六角系金属的热循环稳定化处理	72
3. 零件与组合件借助于热变换时利用温度梯度热应力的热 循环稳定化处理	77
第四章 金属与合金在强化状态下的微塑性形变抗力和 尺寸稳定性.....	89
1. 强化的金属与合金微塑性形变抗力和精细组织变化之间 的关系	89
2. 马氏体转变强化的高硬度钢的尺寸稳定性	98
3. 具有切削加工硬化层的金属与合金的再结晶退火	107
4. 合金结构钢在高温形变热处理后的微塑性形变抗力	113
5. 形变热处理对碳素钢微塑性形变抗力的影响	118
第五章 铝合金和镁合金的尺寸稳定性.....	124
1. 形变合金	124
2. 铸造铝合金和镁合金	138

第六章 钛合金的尺寸稳定性·····	145
第七章 提高铜合金的微塑性形变抗力·····	156
第八章 铸件用钢的组织不均匀性与尺寸稳定性·····	163
1. 孔隙度与非金属夹杂物对铸钢微塑性形变抗力和机械性能的影响·····	163
2. 热处理规范对铸钢组织、尺寸稳定性和机械性能的影响·····	167
第九章 高精度金属制件用合金与稳定化处理工艺过程的选择·····	180
1. 高精度制件用结构合金的尺寸稳定性表征与物理机械性能的比较分析·····	180
2. 制造高精度零件包括热稳定化处理工序的工艺过程典型图表·····	188
参考文献·····	211

前 言

金属材料与制件自发改变形状和尺寸的能力是保证精密机器与仪器的精度和可靠性不断增长的要求的重大障碍。对于某些精密机器与仪器来说，尺寸不稳定性应限制在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 毫米/毫米。同时还必须保证在恒温和在交变温度 ($-50 \sim +100^{\circ}\text{C}$ 范围内) 长期使用的条件下有必要的尺寸恒定性。

保证上述的要求是一项极复杂的任务。它的解决有赖于：必须利用具有高尺寸稳定性的金属材料，并在制造制件时必须应用特殊的方法和稳定化处理的工艺过程。

尽管有很大的迫切性，但是金属与制件尺寸稳定化的问题在文献中未能充分阐明。在本书所引述的研究进行以前，还没有关于金属与合金尺寸稳定性特征的本国(指苏联——译注)文献报道。稳定化处理的问题一方面从保证合金的相与组织状态的稳定性来研究，一方面从尽可能地降低零件中的宏观残余内应力来研究。

第一种解决方法应用于结构合金零件的尺寸稳定化问题，虽然合适但不全面，这牵涉到第二种解决方法，对此下面将要说明，因此它是不充分的。

由于缺乏有关在科学基础上选择高精度零件用材料和制定保证制件尺寸稳定性条件的文献，这就给解决精密机械制造与仪器制造中的实际任务造成很大的困难。本书试图解决这一问题。

书中尺寸稳定性的理论问题主要是根据金属与合金组织状态和微塑性形变抗力的关系的研究结果来探讨的。研究表

明,尺寸稳定性的表征是以非常大的组织敏感性为特点的。

组织的变化实际上不影响强度性能($\sigma_{0.2}, \sigma_b$),但在一系列情况下导致表征材料尺寸稳定性的微塑性形变抗力的指标显著变化。

因此为了使高精度制件用材料的选择、加工和应用的实际问题得到最好的解决,必须详尽地研究尺寸稳定性的表征与金属及合金的组织的关系,还要研究机器与仪器零件在使用状态下微塑性形变时金属组织的变化。

本书主要致力于结构金属与合金的尺寸稳定化问题。个别章节也讨论了在精密仪器制造与机械制造中常用的有色金属(铝合金、镁合金、钛合金、铜合金)的稳定化处理。

书中列举了适用于室温或从 -50 到 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内的制件工作条件的金属与合金尺寸稳定性的比较特征,以及稳定化处理的工艺过程和规范的推荐资料。

第一章 金属与合金的 微塑性形变抗力和尺寸稳定性

1. 金属材料尺寸稳定性的表征

金属制件尺寸的自发变化是以下两个因素的结果:

- 1) 材料的相与组织状态的不稳定性;
- 2) 在各种热加工与冷加工工艺过程中以及在机械装配操作时零件中发生的残余内应力的松弛。

是第一种因素还是第二种因素在尺寸自发变化过程的发展中起主要作用,取决于材料的性质及其组织状态.在具有稳定的相成分的合金零件中,尺寸的变化与内应力的松弛有关.在具有亚稳定组织的合金中,尺寸的变化是两种因素同时作用的结果.这时相与组织的转变急剧地加强残余内应力的松弛过程.同时内应力又对相与组织的转变起激活的影响,使其达到较平衡的状态.

实际上制件的尺寸不稳定性是由于在施加的结构应力(工作应力)与残余内应力的作用下材料中发生松弛过程的结果.在具有亚稳定的相与组织状态的合金中发生非常强烈的松弛过程.高精度仪器和机器在使用条件下观察到缓慢而连续增长的塑性形变过程,这时材料中的内应力随着时间而减小,屈服极限显著减小.通常进行着没有规定关系的应力松弛过程(这就是说不遵守弹性形变与残余形变总和守恒)或应力随时间而变化减小的蠕变过程.

由上所述得出结论,材料随时间的微塑性形变抗力越大,

则在使用状态和长期保存时其尺寸稳定性越高。显然，金属与合金微塑性形变抗力的指标表征着其尺寸稳定性。

在国外主要用精密弹性极限 (Precesion elastic limit) 或微屈服强度 (Microyield strength)* 作为金属尺寸稳定性的主要表征。这些指标用试样卸载后产生 $(1\sim2)\times 10^{-6}$ 残余形变时的应力值来测定，或用引起微形变与负载的直线关系偏离时 (在相同的残余形变容限下) 的应力值来测定。

图 1 表示对 440 C (11X18 M) 不锈钢和铁镍合金在残余形变 0.0001% 条件下测定 MYS 参数以及其与预形变的关系的示例。

精密弹性极限与微屈服强度是短时负载下塑性形变起始

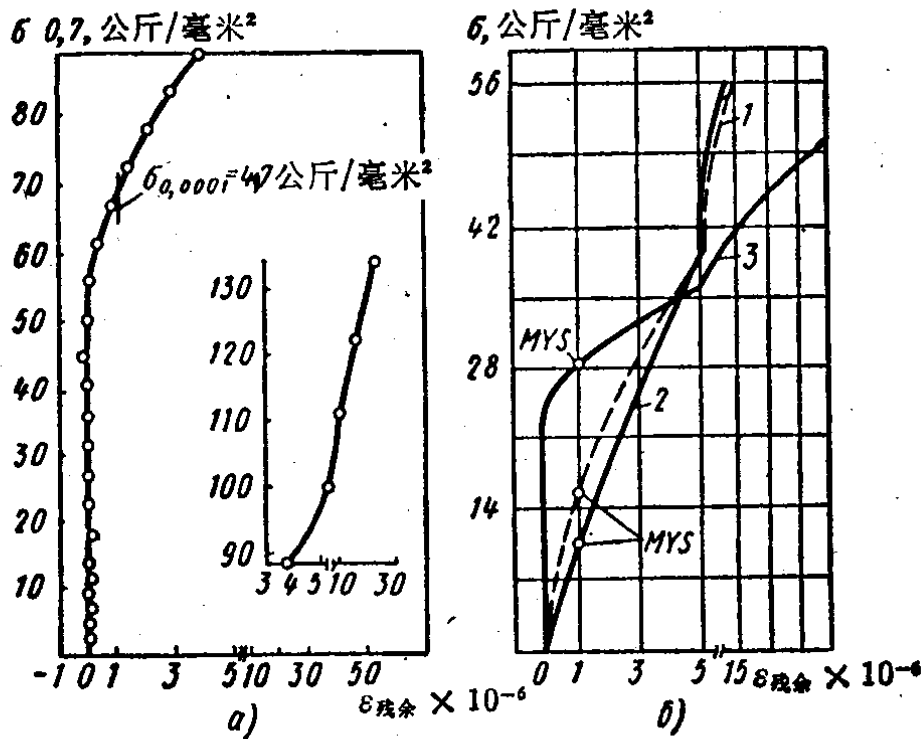


图 1 440C 不锈钢 (a) 与 Ni-Span-C 铁镍合金 (b) 在室温下的形变曲线^[34]。

1——预形变 5%；2——预形变 2.5%；3——无预形变

* 通常分别用 PEL 和 MYS 作为这些参数的缩写符号。

阶段抗力的表征。 但在不稳定的组织与相状态下, 这些参数不足以表征制件在使用条件下(在应力松弛或蠕变时)材料的微塑性形变抗力。 在短时负载下和长期负载下的微塑性形变抗力指标之间的相互关系可能是没有的。

表 1 各种合金的微塑性形变抗力^[34]

合金牌号*	热 处 理 规 程	20℃时 $\sigma_{0.0001}$	$\sigma_{0.2}$	蠕变 应力	15.6℃ 1400 小时蠕变后 形变平均值 $\times 10^{-6}$ ***
		公斤/毫米 ²			
铁镍合金	982℃ 1.25 小时淬火水冷, 673℃ 21 小时回火,空冷	28.1	73.1	14.1	12 (1000 小时)
440C (11X18M) 不锈钢	1037℃ 30 分钟 淬火油冷 2 分钟,随后在液氮中 30 分钟,271℃ 1 小时回火,空冷	49.2	—	23.6	0 (1000 小时)
A356 (AJI 9 T 5) 铝合金	538℃ 16 小时淬火,冷于沸水中,159℃ 4 小时时效,空冷	5.3	15.5	2.8	20 (1000 小时)
2024 (Д 16 Т 1) 杜拉铝	500℃ 淬火于水中,204℃ 1 小时时效,空冷	36.7	42.2	12.7	5
5456 (AMr 6) 铝合金	半冷作硬化,204℃ 1 小时退火,空冷	14.1	19.7	7.7 10.5	38 45
6061 (AД 33) 铝合金	520℃ 1 小时淬火水冷,170℃ 12 小时时效,204℃ 稳定化退火,空冷	18.3	28.8	12.7 16.9	5 10
AZ31 (MA 2) 镁合金	232℃ 1 小时退火,空冷	2.4	4.9	1.8 2.1	7 10
TZM 钼	锻造,1204℃ 1 小时在氢气中退火,慢冷	37.2	84.3	26	<2
J-400 铍	热压,593℃ 1 小时真空退火,慢冷	4.9	42.2	4.1	5

* 括号中所示为成分相近的苏联合金的牌号。

** 原文中是 10°, 恐系印误。——译注

表 1 列示出在美国仪器制造中常用的某些合金的弹性极限 $\sigma_{0.0001}$ 值, 在室温时负载 50~80% $\sigma_{0.0001}$ 的试验条件下蠕变的形变量, 并与其屈服极限值相对比。

图 2 所示为 5456 (AMr 6) 铝合金在 50% $\sigma_{0.0001}$ 应力下的微蠕变曲线。

由表 1 得出, 除了不锈钢和钼以外, 这些材料在室温下显出相当大的蠕变形变。

图 3 表示 B 95, AL 9 铝合金与 MJ 5 镁合金在 100℃ 和

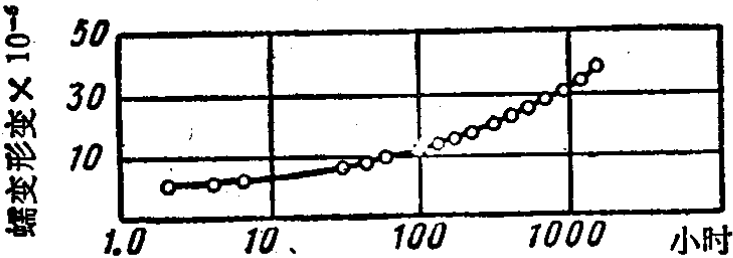


图 2 5456 铝合金在室温下的微蠕变试验^[34]

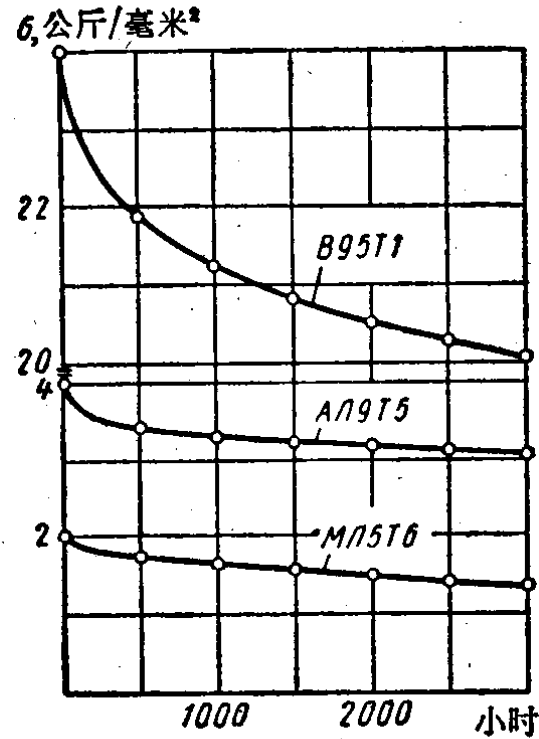


图 3 MJ 5 T6, AL 9 T5 与 B 95 T 1 合金在 100℃ 时的应力松弛

70% 弹性极限 $\sigma_{0.005}$ 应力下松弛试验的结果。虽然为了稳定组织的目的, 在保持合金强度性能的条件下所允许的最高温度对试样进行了时效, 但仍出现很大的松弛。

由此可见, 在不够稳定的相状态情况下, 在原子扩散迁移时, 在远小于室温测定的精密弹性极限的应力下微塑性形变就激烈地发展。

在一般情况下, 金属材料的尺寸稳定性应该用长期

负载下微塑性形变抗力的指标——应力松弛或微蠕变的判据来表征^[9]。

蠕变过程与应力松弛过程的物理本质是相同的^[11,63]。但是认为用应力松弛判据来表征金属的尺寸稳定性比较好些，因为应力随时间而减小的试验在较大程度上与实际制件中材料的行为状况相符合。

在试验条件下不发生松弛的最大应力值（考虑到试验方法的误差）可以用作尺寸稳定性的定量表征。如所周知，应力松弛曲线的特征是有两个阶段——试验初始阶段强烈松弛，随后第二阶段松弛过程速度减慢。松弛强度相应地应该用松弛不超过容许极限（依残余形变值而定）的最大应力值来表征，并按试验第一阶段与第二阶段而区分开。如结构金属与合金开口圆环试样在 20~150℃ 温度范围内试验的结果所示，快速松弛阶段一般不超过 500 小时。同时松弛到不高出规定值（通常决定于试验方法的鉴别率）的最大应力值 σ_1 在 100~150℃ 以及更低的温度下通常与精密弹性极限相关。由上所述得出，这一指标不是材料尺寸稳定性的全面的表征，它只能说明制件在制造、装配和调整期间（这一期间在生产过程中一般为数百小时）保持尺寸恒定的能力。

材料随时间的尺寸稳定性的最全面的表征是在试验第二阶段（500~3500 小时）不发生松弛*的最大应力值，它被称为条件松弛极限^[63]。这一指标的作用对于有色合金特别大，当 100~150℃ 时在温度和应力作用下将激发起扩散过程。应当利用这一应力值作为精密仪器制造和机器制造中合金尺寸稳定性的主要表征。

* 考虑到试验方法的误差。

2. 金属与合金尺寸稳定性表征的测定方法

用逐步加负载使试样卸载后得到规定的残余形变的方法来测定精密弹性极限与微屈服强度。在试验的初始阶段用手工加砝码进行加载^[81]。

为此目的，最近通常利用“Instron”试验机，它备有加载精度为 $\pm 0.1\%$ 的液压加载系统。为了保证试样与加载轴线精确地同轴，采用装有球承座的卡头（图4）。为了测量 1×10^{-6} 的残余形变，利用金属线的、金属箔的和电容的传感器，

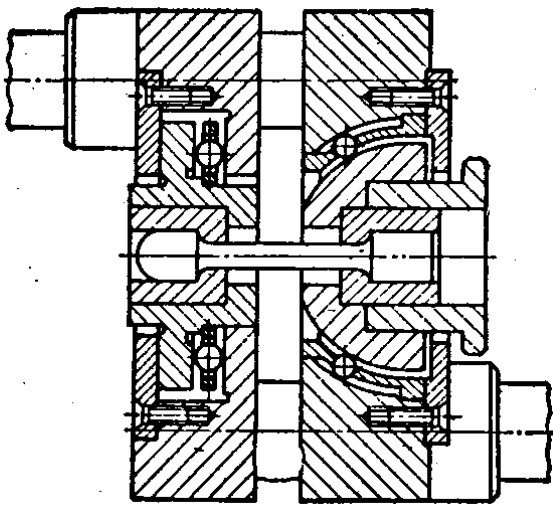


图4 测定精密弹性极限时
试样拉伸用的卡头

光学干涉仪^[76]。同时要采用试验用具振动隔离以及使温度稳定于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 范围内的特殊方法。后者的必要性是显而易见的，因为结构金属与合金的热膨胀系数大于 $5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。要特别注意胶的选择和在试样上粘贴传感器的工艺问题，以防胶夹层的蠕变^[85]。借助于电容应变计可测得 5×10^{-8} 残余形变的试验结果^[35]。在密闭的

试验室内温度稳定在 $\pm 0.005^\circ\text{C}$ 范围的试验条件下用严格控制的液体静压力进行加载。

在我们的研究中，用ГОСТ 1497-73 №. 18 К $\phi 5$ 毫米的圆柱试样测量拉伸弹性极限。用纸基金属线伸长传感器测量残余形变。利用自动电子电桥作为测量装置，电桥借助于异步电动机能恢复平衡，电动机经由测量对角线中的放大器而被接通，并与可动变阻器和指针——标度指示器相联接。为

了提高可靠性,同时用两个基底为 10 毫米的伸长传感器粘贴在试样中部轴线的两对面上来进行形变的检测。利用如图 4 所示的球承座可使试样在加载过程中自动对准中心线。为了补偿温度引起的形变,在电桥的对应的一臂上联接一组相同的传感器,这些传感器以同样的方式粘贴在不加载的试样上。规定残余形变值为 1×10^{-5} ,但为了提高弹性极限试验方法的精确度,在残余形变值为 $0.002 \sim 0.005\%$ 时测量。

测定残余形变为 10^{-6} 及更小数量级的拉伸弹性极限的困难首先在于必须使温度和其它实验条件稳定化。因此在苏联弯曲试验方法获得广泛应用。同时为了测定残余形变为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 的弹性极限,需要以 0.001 毫米级的灵敏度来测量残余挠度,而这在实际上是容易做到的。

在实际应用上最可接受的方法是拉赫什塔特 (А.Г. Рахштадт) 与什特列麦利 (М. А. Штремель) 的薄片 (厚度 0.5 毫米) 纵向弯曲试验法^[48],以及由拉赫什塔特及其同事制定的试样厚度为 0.5 和 2 毫米的纯弯曲试验方法^[47]。在我们的研究中按皮斯卡列夫 (В. Д. Пискарев) 所改进的方案利用这些方法^[41]。他详细研制了利用电接触头的测量组件的结构,当测量端移动 0.00003 毫米时可保证稳定的信号,实际上完全消除了测量力。图 5 表示皮斯卡列夫结构仪器的加载组件 (a)、残余挠度测量组件 (б) 和接触头的电路图 (в)。测量 0.006 毫米的残余挠度值相当于 5×10^{-7} 残余形变的分辨率,这比早已熟知的光学测量系统的结构要高 $1.5 \sim 2$ 个数量级。这种仪器的可靠性和高生产率使其可运用于大量试验,其中包括在生产条件下检查热处理质量。当利用电接触头测量以悬臂机构加载的纯弯曲试样 (图 6) 的弹性极限时,残余形变的分辨率为 6×10^{-8} 。

揭示用不同方法测得的数据之间的相互关系有着重要的

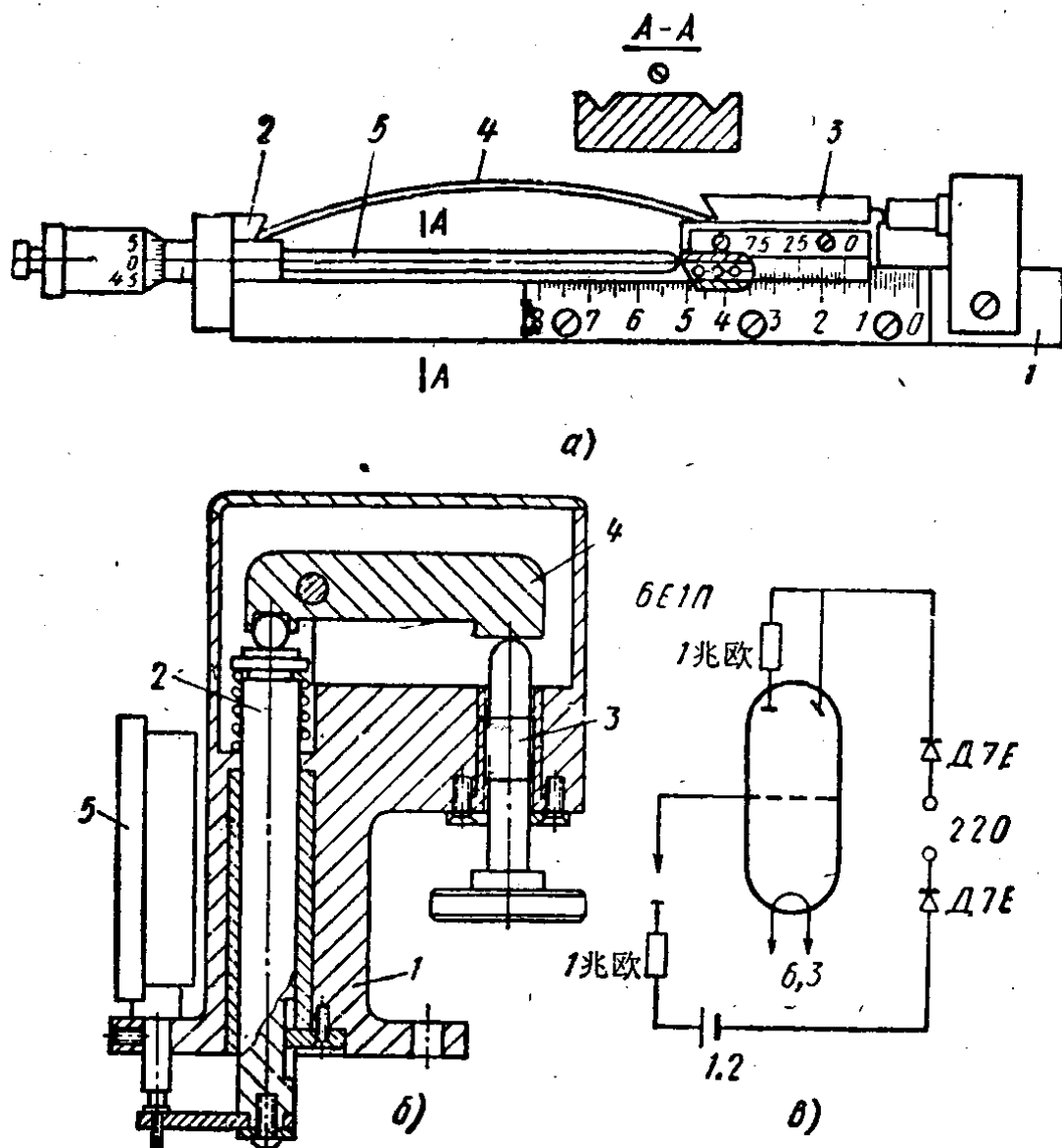


图5 按拉赫什塔特-什特列麦利方法测量纵向弯曲弹性极限的皮斯卡列夫结构仪器:

a) 加载组件: 1——基体; 2——不动支座; 3——活动支座; 4——试样; 5——杆. b) 残余挠度测量组件: 1——座架; 2——带弹簧的杆; 3——螺杆; 4——杠杆; 5——指示器. c) 接触头电路图

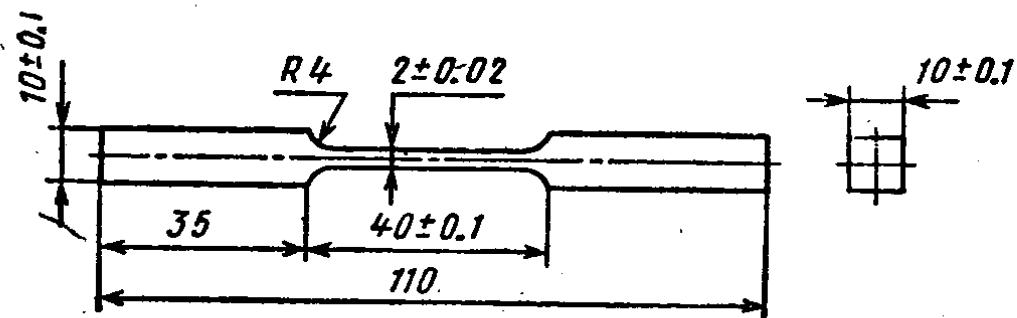


图6 测量纯弯曲弹性极限用的试样

意义。为此目的,将尺寸为 $0.5 \times 10 \times 100$ 毫米试样的纵向弯曲试验、工作截面为 2×10 毫米的纯弯曲试验以及最大截面为 5×5 毫米的等弯曲强度的圆环试样的纯弯曲试验所得到的弹性极限值进行实验对比^[63]。在此情况下预先对圆环试样用楔块加载 60~90 昼夜,测量圆环缺口以确定其弹性极限。

图 7 表示 Д 16, ВАД 1 铝合金与 ЭИ 395 钢*在室温下试验的结果。图中列示的实验点是不少于 10 个试样测量结果的均方值。在相同的残余形变时,用不同的方法测出的弯曲弹性极限具有相同的数值。由此可见,在室温和残余形变为 $5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-5}$ 范围的条件下弯曲弹性极限实际上与试样的尺寸、形状以及加载方式无关。既然超过弹性阈限而发生残余形变是由被激发的位错与原来的晶格之间的作用所造成的,这些结果就可用材料表面层位错容易激发这一已由实验证明了的事实来解释。

拉伸应力松弛试验方法基于补偿原理:随着由

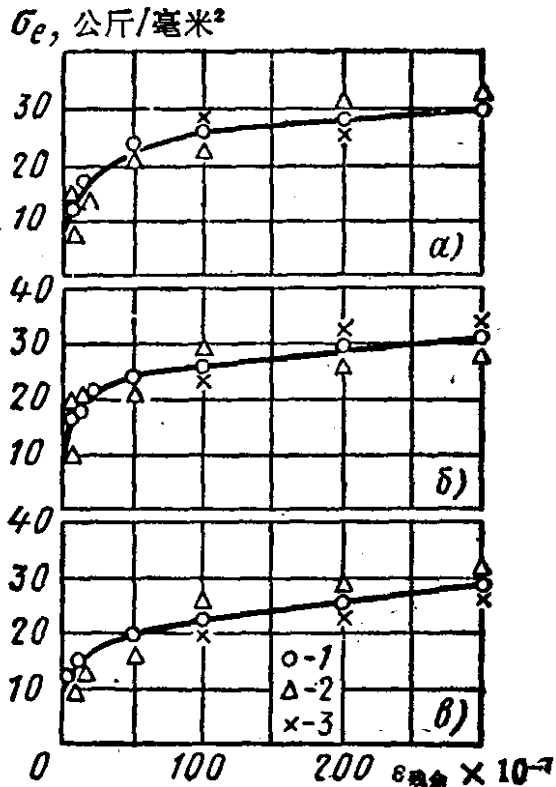


图 7 各种合金的残余形变与弯曲应力的关系^[11]。

а) Д 16 合金 (490℃ 淬火, 190℃ 时效);
б) ВАД 1 合金 (490℃ 淬火, 190℃ 时效);
г) ЭИ 395 钢 (1050℃ 淬火, 350℃ 时效);
1——纵向弯曲; 2 与 3——纯弯曲

* 合金的机械性能: Д 16: $\sigma_b = 57$ 公斤/毫米²; $\sigma_{0.2} = 43$ 公斤/毫米²; $\delta = 6.4\%$; ВАД 1 相应为: 60, 45 与 4, ЭИ 395——82, 40 与 42。