

《工程材料》 实验指导书



上海交通大学机械与动力工程学院
基础实验与创新实践教学中心

2023 年 10 月

目 录

实验一	铁碳相图平衡组织分析	1
实验二	碳钢热处理后显微组织观察	4
实验三	铝合金显微组织观察	7
实验四	工程材料力学性能实验	10

实验一 铁碳相图平衡组织分析

一、实验目的

- 1、观察和分析铁碳合金的平衡组织；
- 2、分析铁碳合金显微组织的形成过程。

二、实验原理

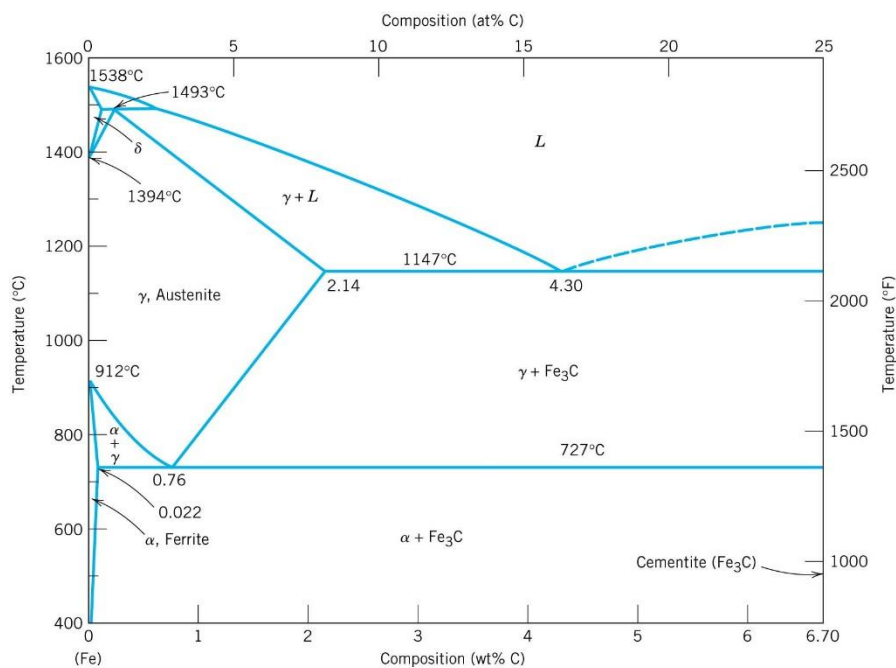


FIGURE 9.21 The iron-iron carbide phase diagram. [Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.]

图 1-1 铁碳平衡相图

铁碳合金是目前应用最广泛的工程材料，铁碳合金的平衡组织是研究铁碳合金的性能及相变机理的基础，其相图如 1-1 所示。通常将缓冷（退火）后的铁碳合金组织看作为平衡组织，具体分类见表 1-1。

表 1-1 铁碳合金的分类和组织

	分类	含碳量 (%)	平衡显微组织
碳 钢	亚共析钢	0.02—0.77	铁素体+珠光体
	共析钢	0.77	珠光体
	过共析钢	0.77—2.11	珠光体+渗碳体

1、铁碳合金的平衡组织

铁碳合金在常温下只有两相，即铁素体和渗碳体，由于含碳量的不同，这两个基本相的相对量，形状和分布情况有很大的不同，因此呈现各种不同的组织形态。下面介绍一下各种显微组织的基本特征：

(1) 铁素体：是碳在 α -Fe 中的固溶体，碳的浓度是可变的，在 727℃ 时达到最大溶解度，为 0.0218%，在常温下，碳的浓度为 0.0008% 左右，铁素体的硬度很低，塑性好，经 4% 硝酸酒精浸蚀后呈白亮色。含碳量较低时，铁素体呈块状分布，随含碳量增加，铁素体量减少，在接近共析成分时，铁素体呈网状分布在珠光体周围。

(2) 渗碳体：是碳与铁的一种化合物，化学式为 Fe_3C ，含碳量很高，达 6.69%，坚硬而脆，抗浸蚀能力很强，经 4% 硝酸酒精浸蚀后成白亮色。在过共晶白口铸铁中的一次渗碳体是从液态中直接结晶成的，故呈条状分布。在过共析钢和亚共晶白口铸铁中的二次渗碳体是从奥氏体中沿晶界析出的，所以呈网状分布在珠光体的周围。由于渗碳体硬度很高，所以在磨面上是突起的。

铁素体和渗碳体经 4% 硝酸酒精浸蚀后都呈白亮色，若用苦味酸纳溶液浸蚀，铁素体仍为白色，渗碳体则被染成黑褐色，由此可区别铁素体和渗碳体。

(3) 珠光体：是铁素体和渗碳体的两相混合物。

片状珠光体是经一般退火后得到的铁素体和渗碳体的片层交叠组织，经 4% 硝酸酒精浸蚀后，这种组织在显微镜下由于放大倍数不同而有不同的特征，在 600 倍以上观察时，可见珠光体中平行相间的宽条铁素体和细条渗碳体都呈白亮色，而边界呈黑色；在 400 倍左右观察时，由于显微镜鉴别率降低，白亮的细条渗碳体被黑色的边界所“吞没”而呈黑色，这时看到的珠光体是宽条白亮色铁素体和细条渗碳体相间；在 200 倍以下观察时，宽条白亮色的铁素体也难以区分了，这时的珠光体特征是暗黑色，低碳钢中的珠光体量很少，片间距细小，即使在较高倍观察时也是暗黑色的。

2、各组织的机械性能

为了掌握铁碳合金的机械性能，必须控制各种组织的相对量，已知铁素体软而塑性好，渗碳体硬而脆，珠光体是这两相的机械混合物，莱氏体则是渗碳体和珠光体的混合物。铁素体、渗碳体、和珠光体的机械性能如表 1-2。

表 1-2 铁素体、渗碳体、和珠光体的机械性能

	硬度 (HB)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (Δ%)
铁素体	50—90	190—250	40—50
渗碳体	750—880	30	0
珠光体	190—230	860—900	9—12

3、碳钢中含碳量的计算

在熟悉了碳钢中各种组织分布特征后，就可以借助于显微镜来估算碳钢中的含碳量。首先，估计在某一视场中各种组织所占有的面积百分比，令：

n：铁素体所占面积百分比

K：珠光体所占面积百分比

B：渗碳体所占面积百分比

根据 Fe—Fe₃C 相图，已知常温下铁素体中含碳量约为 0.0008%，珠光体含碳量约为 0.77%，渗碳体含碳量约为 6.69%，那么，根据杠杆定律，可以得到下列：

对于亚共析钢，有：
$$\%C = \frac{n \times 0.0008}{100} + \frac{K \times 0.77}{100}$$

对于过共析钢，有：
$$\%C = \frac{B \times 6.69}{100} + \frac{K \times 0.77}{100}$$

上述计算，是假定各组织的比重是相等的，事实上它们的比重也是近似相等的。

三、实验设备和材料

1、1#~6#碳钢试样（亚共析、共析、过共析）

2、金相显微镜

四、实验内容

1、每人轮流在置有各种标准样品的显微镜下观察样品的形貌特征并绘图；

2、研究 1#(工业纯铁)和 6#(T12 钢)的形貌特点，对 1#~5#试样按照含碳量高低进行排序；

3、选择 2#~6#中一碳钢试样，估计它各组织所占的面积百分比，估算出它的含碳量。

实验二 碳钢热处理后显微组织观察

一、实验目的

- 1、观察碳钢经不同热处理后的显微组织
- 2、了解热处理对钢的组织性能的影响规律
- 3、识别常用热处理组织的形态和特征

二、实验原理

碳钢经退火、正火可得到平衡或接近平衡能的组织，经淬火得到的是不平衡组织，因此，研究热处理的组织时，不仅要参考铁碳相图，更重要的是参考 C 曲线，如下图 2-1 所示。

FIGURE 10.9
Isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition, including austenite-to-pearlite (A-P) and austenite-to-bainite (A-B) transformations. [Adapted from H. Boyer (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.]

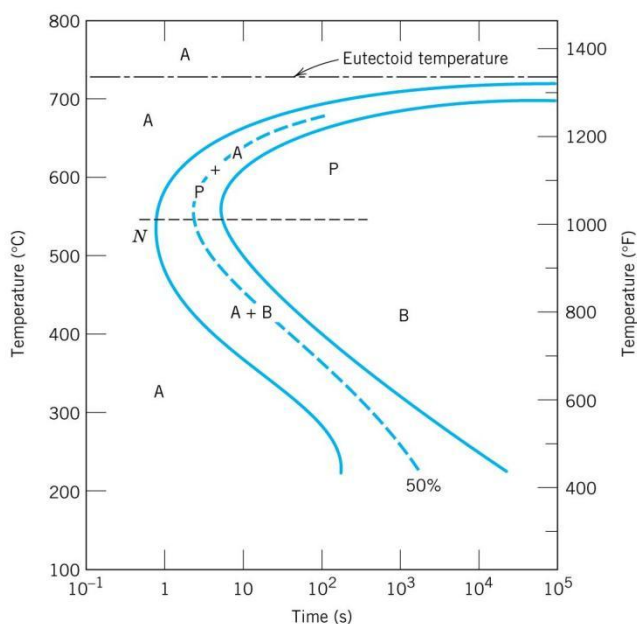
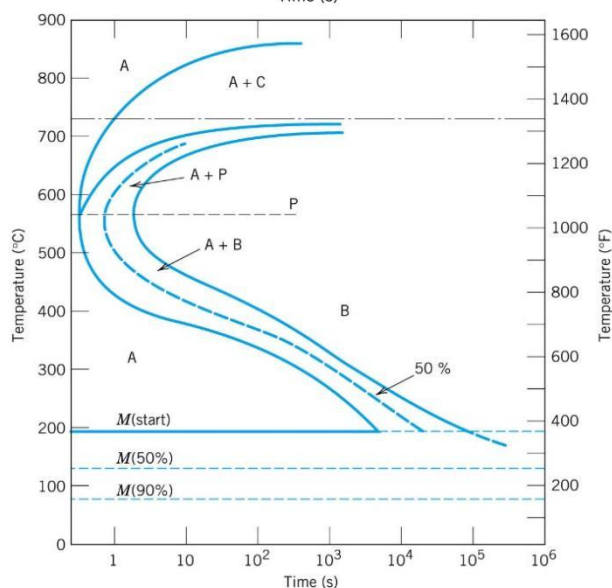


FIGURE 10.28
Isothermal transformation diagram for a 1.13 wt% C iron-carbon alloy: A, austenite; B, bainite; C, proeutectoid cementite; M, martensite; P, pearlite. [Adapted from H. Boyer (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 33.]



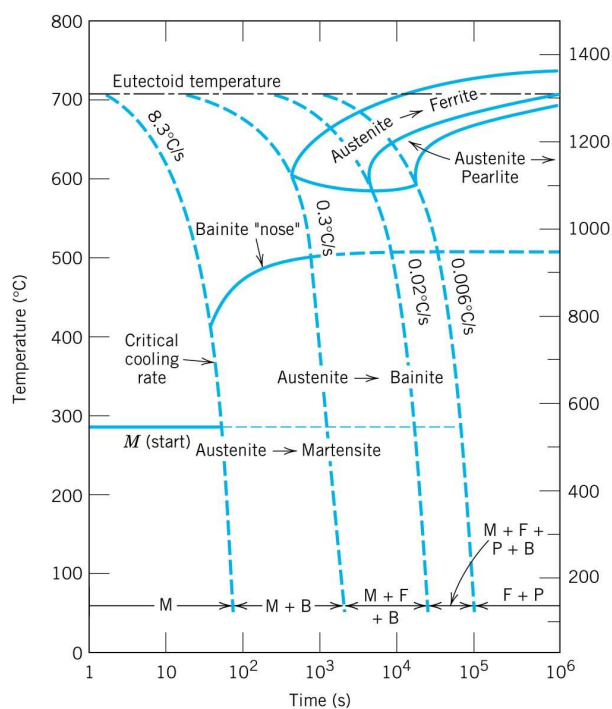


FIGURE 10.19

Continuous cooling transformation diagram for an alloy steel (type 4340) and several superimposed cooling curves demonstrating dependency of the final microstructure of this alloy on the transformations that occur during cooling. [Adapted from H. E. McGannon (Editor), *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 9th edition, United States Steel Corporation, Pittsburgh, 1971, p. 1096.]

图 2-1 转变曲线

碳钢随成分和热处理方式不同呈现出不同的组织形态。其基本组织特征如下：

a) 珠光体

以较慢的速度冷却得到珠光体组织。珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物。当冷却速度更慢时得到的是更细密的片层。

b) 贝氏体

铁素体和珠光体的两相混合物。铁素体呈单个片状，片与片常常相交。在铁素体片内沉淀有碳化物粒子，但碳化物粒子在光学显微镜下分辨不清且易受浸蚀，显微镜下呈黑色针状。

低碳钢连续冷却时得到粒状贝氏体：大的铁素体块内有一些孤立的小岛状组织。白块状的铁素体与岛状的组成物组成。

c) 马氏体

钢中马氏体的典型形态是板条马氏体和片状马氏体两种。低碳钢（低碳合金钢）淬火可得到板条状马氏体，高碳钢（高碳高合金）淬火可得到片状马氏体。而中碳钢（中碳合金钢）往往得到两种马氏体的混合组织。

d) 残余奥氏体

当含碳量大于 0.5%时，马氏体转变不完全，在室温下会有残余奥氏体。残余

奥氏体不易受硝酸酒精溶液的浸蚀，在显微镜下呈白亮色，分布在马氏体之间，无固定形态。未经回火时，残余奥氏体与马氏体很难区分，都呈白亮色；只有在回火后马氏体变暗，残余奥氏体才能被辨认。

e) 回火马氏体

低温下回火得到的组织在显微镜下为黑针状；

中温下回火得到的组织中，铁素体基体基本保持原马氏体的形态，渗碳体呈极细的颗粒状，光学显微镜很难辨认；

高温回火后，可以看到呈等轴细晶粒状的铁素体基体上分布着已聚集长大的粒状渗碳体。

表 2-1 不同钢种经各种热处理后的试样的金相组织

序号	钢号	热处理工艺			浸蚀剂	显微组织
		加热温度 (°C)	冷却方式	回火温度 (°C)		
17#	45 钢	800	空冷(正火)		4% 硝酸酒精	F+S
18#			油淬			M+T
19#			水淬			中碳 M(板条+针状)
22#			调质	600		回火 S
23#		750	水淬			M+F
25#	T12	750	球化退火			球状 P
26#		800	水淬	200		回火 M+Fe ₃ C
27#		1100	水淬	200		回火 M+残余 A
14#	T8	800	300°C 等温 淬火			B _下 +M+残余 A

三、实验设备和材料

金相试样、金相显微镜

四、实验内容

- 1、观察表 2-1 样品的显微组织；
- 2、绘出样品的显微组织示意图并标注样品号、热处理方式及相组织；
- 3、比较马氏体和回火马氏体的组织性能差异。

实验三 铝合金显微组织观察

一、实验目的

- 1、观察硬铝 2A12 铸造、时效样品显微金相组织特点；
- 2、了解铸造、固溶、轧制及时效等不同材料加工工艺对铝合金组织特征及其性能的影响；

二、实验原理

铝合金是工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料，在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中大量应用。在铝中加入适量 Cu, Mg, Zn, Si, Mn, Cr, Ti 等合金元素组成不同成分的铝合金经冷变形或者热处理后可有效提高纯铝的强度并保持其密度小、耐腐蚀等特性。铝合金按成分和生产工艺特点通常可分为变形铝合金和铸造铝合金。加入的合金元素在固态铝中的溶解度一般都是有限的，它们与铝所形成的相图大都具有二元共晶相图的特点，如图 1 所示。相图上最大饱和溶解度 D 是这两类合金的理论分界线。溶质合金含量低于 D 点的合金为变形铝合金，加热时均能形成单相固溶体组织，塑性

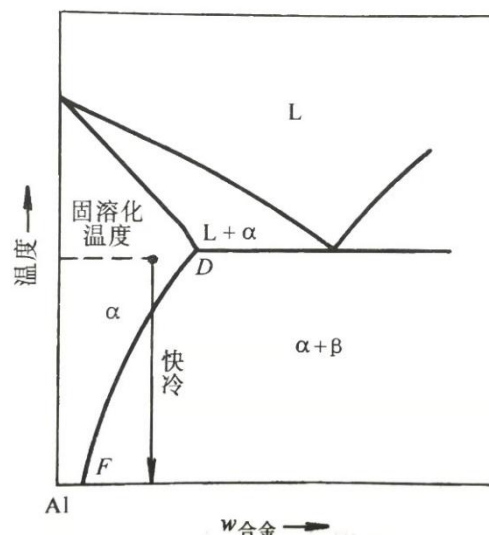


图 3-1 铝合金相图的一般类型

好，适于锻造、轧制。溶质合金含量大于 D 点的合金为铸造铝合金，其熔点低，结晶时发生共晶反应，塑性差，但流动性好，适于铸造。铸造铝合金用来直接浇铸各种形状的机械零件等，按加入的主要元素不同可分为 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Zn 系、Al-Mg, Al-RE 系五大类。变形铝合金可分为可热处理和不可热处理两类，成分位于图中 F 点左侧的合金不能进行热处理强化，为不可热处理强化铝合金，但它们能通过变形强化和再结晶处理调整其组织性能。成分位于 F 点和 D 点之间的铝合金固溶体成分随温度变化而发生改变，可以通过热处理改性，属于可热处理强化铝合金。

变形铝合金根据其用途又可分为防腐铝合金、硬铝、超硬铝和锻铝。常用的防

铸铝合金主要是 Al-Mn-Mg 合金，其特点是耐腐蚀，抛光性好，可长时间保持光亮表面，多用于制造与液体接触的零件、日用品等；硬铝是 Al-Mn-Mg 合金，并含少量锰，根据其合金元素含量不同可分别制造铆钉、飞机的螺旋桨及飞机上的高强度零件；超硬铝是含有 Zn 的硬铝，其硬度、强度均比硬铝高，是航空工业的重要材料之一；锻铝在一般状态下具有高的塑性，强度大，用来制造各种锻件或冲压件，如内燃机活塞等。

铝合金无同素异构体，合金元素对铝的强化作用主要表现为固溶强化、时效强化和细化组织强化。固溶强化是指合金元素加入纯铝后形成铝基固溶体，导致晶格发生畸变，增加了位错运动的阻力而提高铝的强度。合金元素的固溶能力与其本身的性质和固溶度有关。时效强化是指合金成分含量位于 F 点和 D 点的铝合金经固溶处理后在室温或者较高的环境温度下，随着停留时间的延长其强度、硬度升高，塑性和韧性下降的现象。一般把合金在室温放置过程中发生的时效称为自然时效；把合金在加热条件下发生的时效称为人工时效。时效强化效果受到时效时间、温度、淬火温度、淬火冷却速度等因素影响。一般来说淬火温度越高，淬火冷却速度越快，得到的固溶体过饱和度越大，时效后的强化效果越好。时效温度越高，原子活动能力越强，沉淀相脱溶速度越快，达到峰值时效需要的时间越短。细化组织强化是指在铝合金中添加微量合金元素以细化合金组织晶粒，起到提高合金强度和韧性的作用。

本实验中使用硬铝 2A12 (LY12) 作为样品，其主要化学成分和力学性能如表 1、表 2。

表 3-1 2A12 化学成分

牌号	化学成分 %														
	Si 硅	Fe 铁	Cu 铜	Mn 锰	Mg 镁	Cr 铬	Ni 镍	Zn 锌	备注	Ti 钛	Zr 锆	其他		Al 铝	备注
												单个	合计		
2A12	0.500	0.500	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	—	0.010	0.300	Fe+Ni:0.50	0.150	—	0.05	0.10	余量	LY12

表 3-2 2A12 力学性能

合金牌号	电导率 20℃ (68°F)	密度 (g/cm ³)	抗拉强度 (25° C MPa)	屈服强度 (25° C MPa)	硬度 500kg 力 10mm 球	延伸率 1.6mm (1/16in) 厚 度	最大剪应力 Mpa
2A12	30-40	2.78	472	325	120	10	285

三、实验设备和材料

- 1、硬铝样品（2A12 铸态、时效）
- 2、金相显微镜

五、实验内容和实验报告

- 1、观察比较硬铝样品金相组织特征并绘出其示意图；
- 2、比较铸造和时效处理对铝合金样品组织特征和材料性能的影响。

附加实验

实验四 工程材料力学性能实验

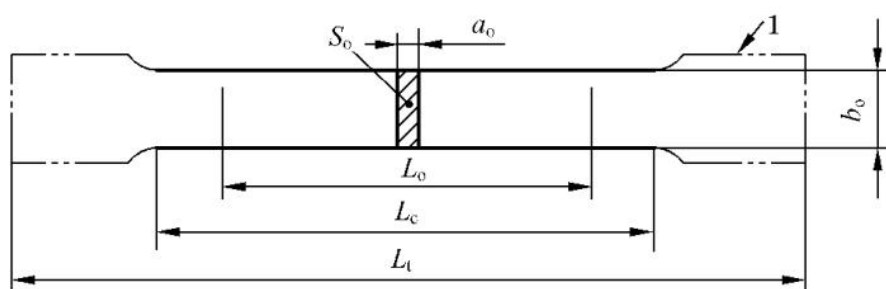
一、 实验目的

- 1、掌握如何运用材料拉伸试验机进行金属材料拉伸实验；
- 2、观察在拉伸过程中的屈服、加工硬化和断裂等现象，采集数据，绘制拉伸曲线（应力—应变曲线）；
- 3、掌握计算金属材料（低碳钢/铝合金）的弹性模量 E 、屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、延伸率 δ 、截面收缩率 ψ 的方法。

二、 实验原理

1、拉伸试样实验试样制备

为了使试验结果具有可比性，按 GBT 228.1-2021 规定加工成标准试件（板材）。试件的标准图样如下：



标引符号与序号说明：

a_0 —— 矩形横截面试样原始厚度或原始管壁厚度；

b_0 —— 矩形横截面试样平行长度的原始宽度；

L_0 —— 原始标距；

L_c —— 平行长度；

L_t —— 试样总长度；

L_u —— 断后标距；

S_0 —— 平行长度的原始横截面积；

1 —— 夹持头部。

注：试样头部形状仅为示意性。

单位为毫米

b_0	r	$k=5.65$			$k=11.3$		
		L_0	L_e	试样编号	L_0	L_e	试样编号
10	≥ 20	$5.65 \sqrt{S_0} \geq 15$	$\geq L_0 + b_0/2$ 仲裁试验： $L_0 + 2b_0$	P1	$11.3 \sqrt{S_0} \geq 15$	$\geq L_0 + b_0/2$ 仲裁试验： $L_0 + 2b_0$	P01
12.5				P2			P02
15				P3			P03
20				P4			P04
注 1：优先采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。如比例标距小于 15 mm，采用表 B.2 的非比例试样。 注 2：如需要，厚度小于 0.5 mm 的试样在其平行长度上可带小凸耳以便装夹引伸计。上下两凸耳宽度中心线间的距离为原始标距。							

2、实验速率（应变速率方法 A）

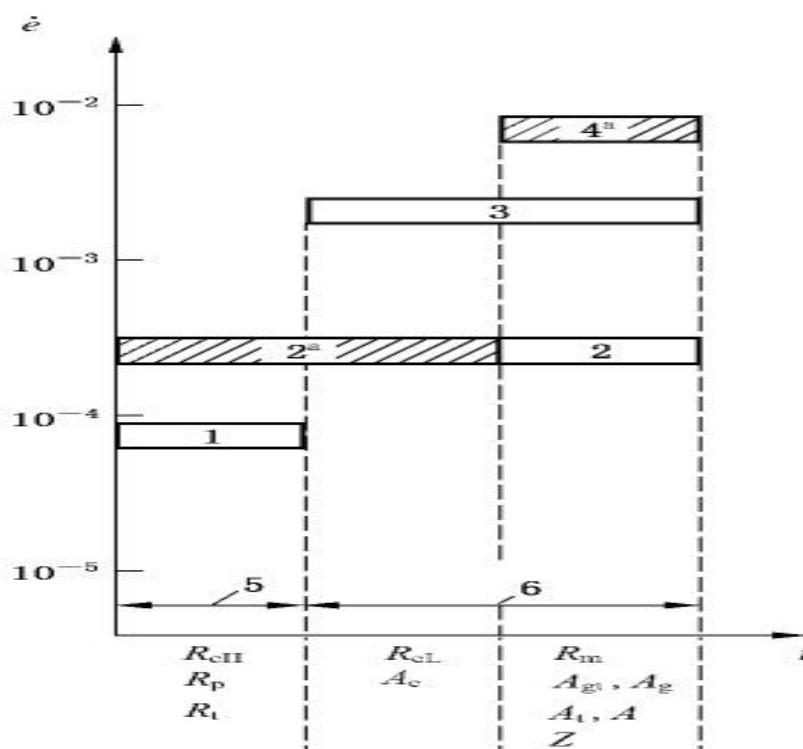
根据国标 GB/T 228.1—2021 的标准要求，在测定屈服强度或拉伸强度后，根据试样平行长度估计的应变速率（ $\dot{\epsilon}_{Lc}$ ）在下述范围中：

范围 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.000\ 25\ s^{-1}$ ，相对偏差 $\pm 20\%$ ；

范围 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.002\ s^{-1}$ ，相对偏差 $\pm 20\%$ ；

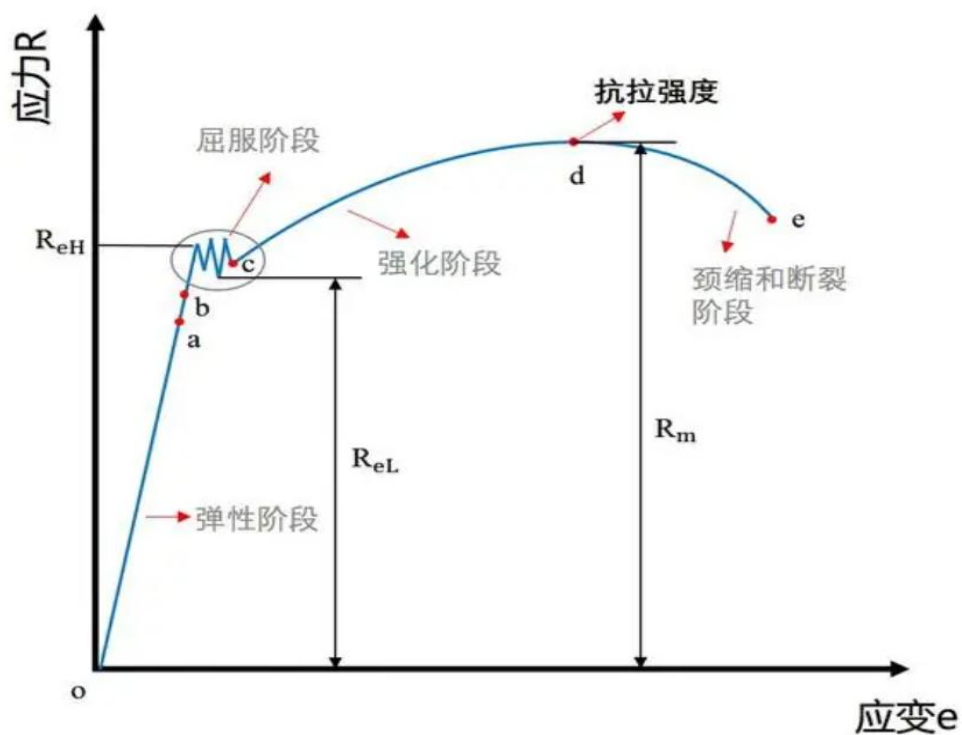
范围 4: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.006\ 7\ s^{-1}$ ，相对偏差 $\pm 20\%$ （ $0.4\ min^{-1}$ ，相对偏差 $\pm 20\%$ ）（如果没有其他规定推荐选取该速率）。

如果拉伸试验只测定抗拉强度，范围 3 或范围 4 内的任一平行长度应变速率的估计值（ $\dot{\epsilon}_{Lc}$ ）可适用于整个试验。



3、金属材料拉伸性能曲线

随着拉伸实验的进行，试件在连续变载荷作用下经历了弹性变形阶段、屈服阶段、强化阶段以及局部颈缩阶段等四个阶段。其拉伸应力—应变曲线如下所示：



低碳钢的应力—应变曲线

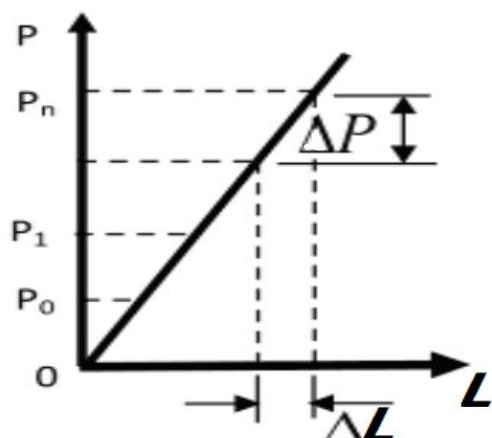
4、低碳钢弹性模量 E 的实验计算

在已经获得的拉伸应力—应变曲线上取伸长长度约为标距的 1%~8%的距离范围内适当的两点（本实验选取了伸长为 4%和 8%的两点），读出其应力和应变代入相关的计算公式计算出弹性模量 E。

$$\therefore \Delta L = \Delta P * L / E * A$$

$$\therefore E = \Delta P * L / \Delta L * A \text{ (GPa)}$$

其中：A 为截面面积，L 为标距长度，P 为应力



三、 实验设备和材料

- 1、 拉伸材料试验机（Zwick、Instron、三思）
- 2、 拉伸试样（淬火处理、未热处理）
- 3、 游标卡尺

四、 实验内容和实验报告

- 1、 实验所得原始数值结果（可附页）
- 2、 绘制实验数据力——位移曲线
- 3、 绘制工程应力——应变曲线
- 4、 参数计算（要求写出计算公式）
 - 弹性模量 E ：
 - 屈服极限 σ_s ：
 - 抗拉强度 σ_b ：
 - 断后延伸率 δ ：
 - 截面收缩率 ψ （选做）：

思考题：

- 1、 拉伸实验中的拉伸速度大小对实验结果有什么影响？
- 2、 根据金相组织分析热处理前后对材料力学性能的影响。
- 3、 根据拉伸实验结果数据，分析该材料在实际工程中的应用范围（场合），请写出理由。