

材料力学实验教学中需要澄清的几个概念

吴江龙¹ 袁苗苗¹ 曲淑英¹ 褚福运¹ 董 锐²

(1. 烟台大学土木工程学院 2. 烟台新天地试验技术有限公司)

(0535-6888250 wjl@ytu.edu.cn)

摘要：通过低碳钢、铸铁在拉伸、压缩、扭转实验中试件破坏形式，结合单元体应力状态分析，可得到引起试件破坏的应力种类、方向及大小。将试件破坏真实极限应力与名义极限应力分别定义，对于正确理解材料的名义强度指标的工程意义及分析真实破坏原因有着重要的作用。

1、问题的引出：

材料力学实验教学中往往通过拉伸、压缩、扭转三个实验对材料基本性能进行测试，对应的极限强度均是按试件原始截面尺寸计算的，称之为工程名义强度，分别为：“抗拉强度”、“抗压强度”、“抗扭强度”。这样定义直接反映荷载的类型，有利于工程设计，但由于塑性材料在加载测试过程中试件的截面会不断地变化，试件破坏的最大应力与工程名义强度有较大的差异，如在低碳钢拉伸实验中，由于试件的颈缩，低碳钢的名义“抗拉强度”就小于试件断裂时的极限应力，为区别于“抗拉强度”，定义破坏极限应力为“拉伸强度”。另外，由于材料本身性质的不同，有些试件破坏并非沿名义应力强度方向破坏，如在铸铁扭转实验中，名义强度应力为剪应力，但试件沿轴线成 45°螺旋面破坏，破坏应力为拉应力。

为方便区别比较，分别定义不同形式的破坏应力为“拉伸强度”、“压缩强度”、“剪切强度”，并比较不同实验中名义强度与破坏强度的关系，及同一破坏强度在不同实验中的表现形式。

2、名义强度与真实破坏强度不等的实验

2.1 低碳钢试件拉伸实验

低碳钢 Q235 为典型的塑性材料，材料在破坏前会有较大的塑性变形，在拉伸实验时，“抗拉强度”定义为 $\sigma_b = F_b / A_0$ ，式中 F_b ，拉伸过程最大荷载， A_0 ，试件原始截面面积。这样得到的拉伸实验的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线类似于 $F - \Delta L$ 曲线，从曲线上会明显看出试件在拉伸过程中有应力下降的现象，实际上，低碳钢在拉伸实验过程中，一定是应力不断增加的过程，且在断裂时达到最大应力状态。实验教学中，可以通过测量试件断裂时的荷载及断裂时的截面面积，近似求得考虑应力集中系数时的“拉伸强度” $\sigma_k = F_k / A_k$ ，式中 F_k ，试件断裂时的荷载， A_k ，试件断裂时的截面面积。实测数据表明，低碳钢拉伸试件的“拉伸强度” σ_k 远远大于“抗拉强度” σ_b 。图 1 为进行归一化处理后低碳钢拉伸实验 $F - \Delta L$ 曲线与 $\sigma - \varepsilon$ 曲线比较。

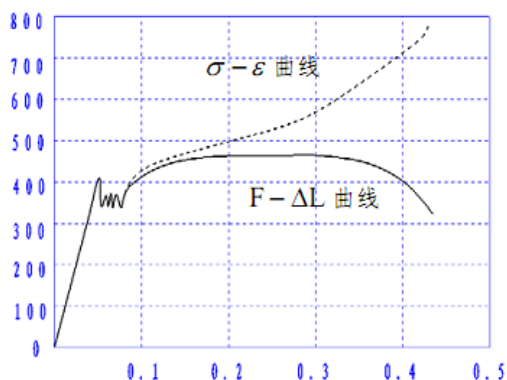


图 1 进行归一化处理后低碳钢拉伸实验 $F - \Delta L$ 曲线与 $\sigma - \varepsilon$ 曲线比较

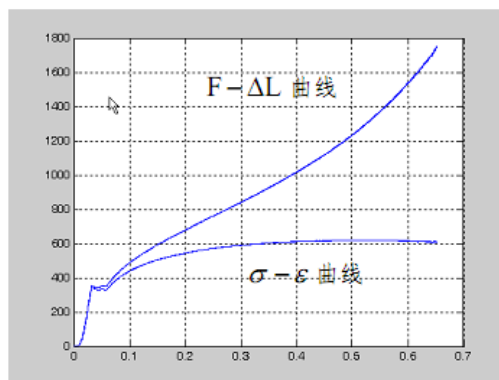


图 2 进行归一化处理后低碳钢压缩实验 $F - \Delta L$ 曲线与 $\sigma - \varepsilon$ 曲线比较

2.2 低碳钢试件压缩实验

同样，在压缩实验时，随着荷载的增加低碳钢产生明显的塑性变形，部分教科书定义 $F-\Delta L$ 曲线为 $\sigma-\varepsilon$ 曲线，这样容易给学生造成低碳钢无极限压缩应力的假象。由于低碳钢试件在压缩过程中，试件整体变形较为均匀，可以近似认为试件各处为等应力状态，在实验中，可以通过测量试件高度的变化来间接反映试件截面面积的变化，从而可近似得到真实的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线。图 2 为进行归一化处理后低碳钢压缩实验 $F-\Delta L$ 曲线与 $\sigma-\varepsilon$ 曲线比较。可以看出，在压缩实验中，虽然荷载不断增加，但由于同时试件的面积不断增加，试件的应力趋近一确定值。因此，低碳钢在压缩实验过程中存在极限压应力。

3、试件破坏不沿名义强度应力方向破坏的实验

3.1 铸铁压缩实验

铸铁压缩实验中单元体应力状态如图 3 所示。

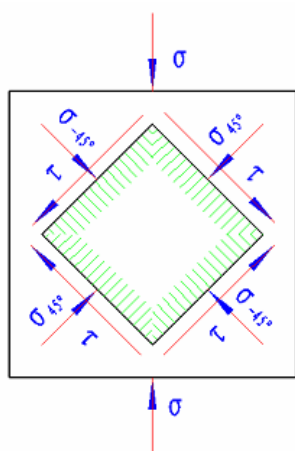


图 3 铸铁压缩实验单元体应力状态

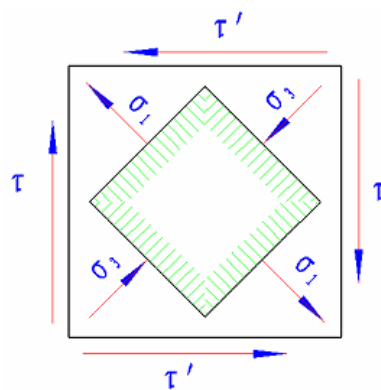


图 4 铸铁扭转实验单元体应力状态

从压缩单元体应力状态分析可以看出，在与主应力方向呈 45° 的斜截面上存在最大剪应力 $\tau = \sigma_{\text{压}}/2$ ，铸铁压缩破坏时试件沿与轴线成 45° 的斜截面剪切破坏，也就是说，在铸铁的压缩实验中，我们无法得到铸铁的极限压应力，因为在压应力未达到极限前，剪应力已达到极限值。这样，我们就可以近似得到铸铁的“剪切强度”，由于在剪切面上同时存在压应力，所以此“剪切强度”应为近似值。

3.2 铸铁扭转实验

铸铁压缩实验中单元体应力状态如图 4 所示。从扭转单元体应力状态分析可以看出，在与剪应力方向成 -45° 的斜截面上存在最大主应力 $\sigma_1 = \tau$ ，在与剪应力方向成 45° 的斜截面上存在最小主应力 $\sigma_3 = -\tau$ ，铸铁扭转破坏时试件沿与试件轴线成 45° 的螺旋曲面破坏，也就是说，在铸铁的扭转实验中，我们无法得到铸铁的极限剪切应力，因为在剪切应力未达到极限前，拉应力已达到极限值。但由于铸铁扭转时应力状态较为复杂的平面应力状态，所以，虽然其由最大拉应力引起破坏，但不能简单地认为由铸铁的扭转实验就可以直接得到铸铁的“拉伸强度”。

4、不同材料名义强度与破坏强度的关系

对于典型塑性材料低碳钢而言，其“抗拉强度”为名义值，小于其“拉伸强度”；“抗扭强度”为名义值，大于其“剪切强度”，且“剪切强度”等于 0.75 倍的“抗扭强度”；按“抗压强度”定义，低碳钢无极限抗压强度，事实上，与铸铁压缩实验相同，在低碳钢压缩过程中，在与主应力方向呈 45° 的斜截面上同样存在最大剪应力 $\tau = \sigma_{\text{压}}/2$ ，但低碳钢试件并不沿与轴线成 45° 的斜截面剪切破坏，

也就是说，在低碳钢压缩实验过程中，其切应力始终未达到“剪切强度”，故其“压缩强度”小于 2 倍的“剪切强度”。

对于典型脆性材料铸铁而言，其“抗拉强度”等于其“拉伸强度”；“抗扭强度”为名义值，小于其“剪切强度”；“抗压强度”为名义值，小于“压缩强度”，且“压缩强度”大于 2 倍“剪切强度”。

5、应用举例

如 5 所示的低碳钢拉伸试件，左边圆弧处的剖面与右边圆柱体部分的剖面面积相同，如果不区别“抗拉强度”与“拉伸强度”，考虑应力集中原因，试件应在圆弧处断裂，实际上由于受到周边的约束，圆弧处并不发生颈缩现象，拉伸时圆柱体部分将发生颈缩断裂。

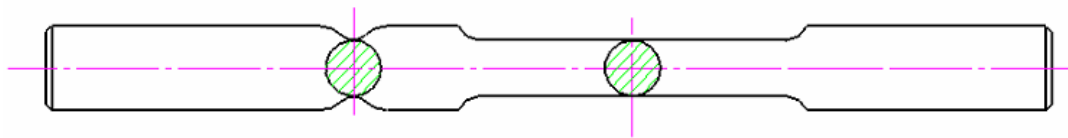


图 5 带圆弧的低碳钢拉伸试件

同样，在铸铁压缩实验中，我们可以近似得到铸铁的“剪切强度”，其明显高于在铸铁扭转实验中得到的“抗扭强度”，如不将名义强度与真实破坏强度分开，很难将不同实验测得的数据进行比较。

6、实测实验数据

本文所有的实验验证均在烟台新天地试验技术有限公司生产的“YDD-1 型多功能材料力学试验机”上进行，该机将拉伸、压缩、弯曲、扭转、弯扭组合等加载形式组合在一台试验机上进行，并配有先进的计算机数据采集、分析系统，除可完成大纲要求的全部验证性实验外，还可进行多种研究性、综合性试验，非常适合于开放式的实验教学。实验验证中拉伸、扭转采用直径 10mm 的标准试件，压缩实验采用直径 12mm，高 20mm 的圆柱体试件。实验中实测的一组数据见表一：

表一：名义强度与破坏强度比较

材料名称	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	抗扭强度 (MPa)	拉伸强度 (MPa)	压缩强度 (MPa)	剪切强度 (MPa)
低碳钢 Q235	410	不存在	537	985*	624	403
铸 铁 HT200	220	754	240	220	未得到	377*

注：低碳钢的拉伸强度为断裂时的近似应力，铸铁的剪切强度为近似值。

7、结论

通过将强度按受力形式和破坏形式区别定义，有利于学生利用单元体正确地根据破坏现象分析破坏机理，从而，比较不同材料的力学特性，及同一材料不同强度之间的关系，有利于学生正确理解各实验曲线的物理意义，建议在本科教材中引入此概念。

由于受到材料力学特性、实验种类、试件类型的制约，有些强度指标还无法直接测得，如低碳钢的“拉伸强度”、铸铁的“压缩强度”等，有些强度指标无法通过两种受力形式测得以便相互比较如铸铁的“剪切强度”等，这些都需要在今后的实验教学中去补充和完善。

参考资料：

- 1 孙训方 方孝淑 关来泰编, 材料力学 I, 高等教育出版社, 2002. 第四版.
- 2 GB/T228-2002 金属材料室温拉伸试验方法.
- 3 GB/T7314-2005 金属材料室温压缩试验方法.
- 4 GB/T7314-2005 金属室温扭转试验方法.
- 5 韦德骏 材料力学性能与应力测试, 湖南大学出版社, 1997. 第一版.
- 6 R. C. Hibbeler 著, 汪越胜等译, 材料力学. 电子工业出版社, 2006. 第一版.