

金属拉伸试样断口分析方法

已用 2001.3.15

缪建红

(南通市计量检定测试所, 226001)

丁锦坤

(南通市产品质量监督检验所, 226005)

摘要 讨论了金属拉伸试验过程中拉伸试样的应力分布情况和断裂过程, 分析了影响断口形貌的因素, 并将拉伸断口与冲击断口进行比较。提出的金属拉伸试样断口分析方法是可行的。

关键词 金属, 拉伸试样, 断口, 分析方法

Analysis Method of Fracture Surface of Metallic Tension Test Specimen

Miao Jianhong

(Nantong Metrology Calibration and Measurement Institute, 226001)

Ding Jinkun

(Nantong Products Quality Supervision and Examination Institute, 226005)

Abstract The stress and fracture behaviour of tension test specimen during the cause of metallic tension testing are approached. The factors that affect the fracture shape characters are discussed. The fracture surface of tension test specimen is also compared with that of impact sample. It is put forward that the analysis method of fracture surface of metallic tension test specimen is available.

Key words metal, tension test specimen, fracture surface, analysis method

通过对断口形貌特征进行全面的观察与分析, 可进而研究断裂的类型、方式、路径、过程、性质、原因和机理等。近年来, 不少学者运用扫描电子显微镜、X 射线光电子能谱等先进仪器设备分析断口形貌特征, 并已开始采用分形分析方法等对断口形貌进行定量研究, 以便获得对金属材料断裂机制的本质认识, 进行金属新材料及新型复合材料的性能分析和研制工作^[1~6]。

金属断口分析的研究对象大多为冲击、抗折等断口, 而近来对金属拉伸试样断口进行的观察与分析也时有报道^[7,8]。本文着重讨论金属拉伸试验过程中的应力分布变化情况、裂纹萌生与扩展过程, 并分析影响断口形貌的因素。作者提出的金属拉伸试样断口分析方法可将宏观力学性能指标与微观断裂过程结合起来, 从而形成对所分析金属材料强韧化机理的本质认识。

1 金属拉伸试验过程的应力情况

1.1 产生缩颈前的应力状态

根据退火态低碳钢等金属拉伸试验的典型应力—应变(载荷—变形)曲线, 整个拉伸试验过程中的变形可以分为四个部分: ① 弹性变形; ② 屈服变形; ③ 均匀塑性变形; ④ 缩颈产生

稿件收到日期: 99-11-15

缪建红, 男, 33岁, 工程师

的局部集中塑性变形。当拉伸试样未发生缩颈时,在拉伸载荷 F 的作用下,试样发生均匀的弹塑性变形。如横截面积为 S ,则试样横截面上的正应力为:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

为了全面了解试样承受的应力情况^[9],现假设沿图1中 $Z-Z$ 面(其法线 n 与试样的夹角为 α)把试样的右段切掉,则在斜截面上形成了沿试样轴线的应力 σ' ,其值为:

$$\sigma = \frac{F}{S'} \quad (2)$$

其中 S' 为斜截面的面积,与 S 存在关系式:

$$S' = \frac{S}{\cos \alpha} \quad (3)$$

在图1中,斜截面上的应力 σ' 可以分解为垂直于 $Z-Z$ 截面的正应力 σ_α 和平行于 $Z-Z$ 截面的剪应力 τ_α :

$$\sigma_\alpha = \sigma' \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

$$\tau_\alpha = \sigma' \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

将(1)、(2)、(3)、(4)、(5)式进行整理,得拉伸试样任一截面上的正应力 σ_α 和剪应力 τ_α :

$$\sigma_\alpha = \sigma \cdot \cos^2 \alpha \quad (6)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (7)$$

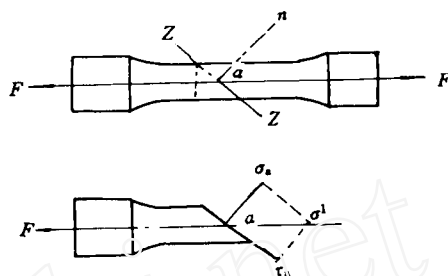


图1 拉伸试样截面上的应力

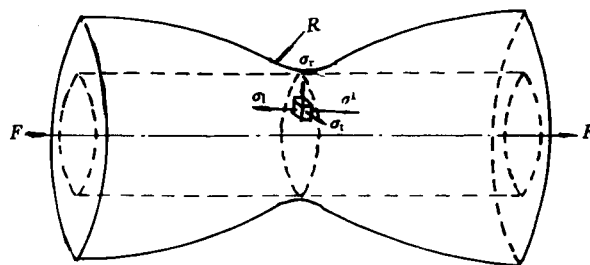


图2 缩颈处应力分布情况

1.2 缩颈部位的应力分布

随着拉伸载荷 F 的继续加大,会同时出现金属形变硬化和承载截面积减小两种情形。当由形变硬化引起的承载能力升高抵偿不了因截面积减小引起的承载能力下降时,就会产生缩颈现象^[10]。

在图2中,毗连于细颈附近的最小横截面轴向投影区域以外的金属仍然处于无应力状态,拉伸时,这部分金属将阻止试样的横向变化(横向收缩)。陈篪^[11]对缩颈部位的应力应变问题进行分析,得出如下结果:

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \alpha^2 - r^2}{2R} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_l = \sigma_r + \sigma_0 = \sigma_0 \left[1 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \alpha^2 - r^2}{2R} \right) \right] \quad (9)$$

其中, α 是某一瞬时缩颈最小截面处的半径; R 是某一瞬时缩颈外表面轮廓的曲率半径; r 是距试样中心的距离。

可见,在图2中距试样中心 r 处不再是只承受单向拉应力,而是处于轴向应力 σ_l 径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t 作用下的三向拉应力状态。上述分析结果与 Bridgman^[12]的研究结果基础吻合。

2 金属拉伸试样断裂过程分析

在拉伸试验过程中,试样承受的拉伸载荷逐渐增加,假设拉伸试样的金属基体为完整晶体(如晶须),提伸载荷达到最大值后,断裂应随机地发生在试样平行部位内的任一位置。但根据Griffith理论,晶体内部原来就存在的裂纹,实际金属材料内部还存在析出相、晶料间的界面等。此外,金属拉伸试样表面的加工刀痕也容易作为裂纹源进行扩展,发生断裂。

2.2 脆性材料的断裂过程

在整个拉伸试验过程中,脆性材料拉伸试样平行部位几乎不发生集中的局部塑性变形,截面几何尺寸变化也很小^[13],因而拉伸试样承受的应力主要表现为本文1.1中描述的情形。由于影响裂纹扩展的因素有:应力分布、材料的内部组织结构、裂纹尖端的几何尺寸及取向等。当拉伸试样内部存在一垂直于轴向的裂纹,在(1)式的正应力 σ 的作用下,裂纹将优先沿原有方向扩展。由于金属材料的晶界强度一般比晶粒强度高,裂纹将呈近似直线方向扩展,发生穿晶断裂。但当裂纹尖端前方附近区域存在孔洞、析出脆性相或晶粒界面发生弱化等情形时,参照图1中的斜截面Z-Z,存在正应力 σ_α 和剪应力 τ_α ,裂纹就会以较低能量方式沿与试样轴线呈 α 角的方向扩展。根据(7)式,当 $\alpha=45^\circ$ 时 τ_α 达到最大值。随着拉伸载荷的增加以及试样有效承载面积的减小,裂纹扩展速度加快,尖端区域的金属基体来不及产生塑性变形使应力得到松弛,而外部又有足够的能量促使裂纹在正应力 σ 作用下沿垂直于试样轴线方向以极快的速度呈近似直线方向扩展,最终发生脆性断裂。

现以球墨铸铁拉伸样的断裂过程为例,分析裂纹的扩展过程^[14]:裂纹萌生于暴露在试样表面的石墨球A处,见图3。在拉伸载荷 F 的作用下,裂纹应优先沿垂直于正应力 σ 的方向扩展,但由于裂纹尖端前方附近区域存在类似于孔洞的石墨球B。按(6)、(7)式给出的斜截面上的正应力 σ_α 和剪应力 τ_α ,裂纹将向石墨球B扩展。裂纹到达B球后,又将以上述同样方式从B球缓慢向前扩展,逐渐依次达到较近距离的C、D、E、F、G球。但随着载荷 F 的增加以及有效承载面积的减小,裂纹将从G球开始以极快的速度呈近似直线方向扩展,最终发生脆性断裂。

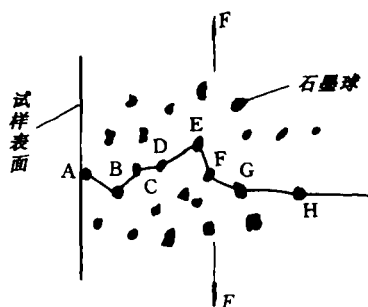


图3 球铁裂纹扩展示意图

2.2 塑性材料的断裂过程

对塑性材料拉伸试样加载,在产生缩颈以前,试样承受的应力状态仍主要表现为本文1.1条描述的情形。随着拉伸载荷 F 的增大,原先存在的显微裂纹(孔洞)聚合,夹杂物或析出第二相粒子与基体的界面处在金属的塑性流变过程中也会萌生裂纹。因此,在上述缺陷相对集中的区域,将会因有效承载面积较小和裂纹尖端应力集中等因素而引发金属基体的剧烈滑移和流变等,导致拉伸试样发生局部大量塑性变形而产生缩颈现象。

拉伸试样产生缩颈后,缩颈处的应力分布情况已发生明显变化。在图2中,距试样中心 r 处不仅承受单向拉应力,而是处于轴向应力 σ_L 、径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t 共同作用下的三向拉应力状态,裂纹较易萌生、聚合与长大。在缩颈处中心区域,由于距试样中心的距离 r 几乎为零,由(8)、(9)式可知, σ_r 、 σ_t 、 σ_L 在这一区域达到最大,更有利于裂纹的继续萌生以及聚合与长大。因而缩颈处中心区域的显微裂纹、夹杂物(孔洞)或析出第二相粒子与基体的界面等处常成为金属拉伸试样断裂的裂纹源。在三向拉应力的作用下,溶解于金属基体中的气体原

子也可能发生迁移和聚集^[15]。

根据(8)、(9)式,如果 r 增大,与 σ_L 相比 σ_r 和 σ_t 相对减小,裂纹尖端的受力状态由三向拉应力状态逐渐向单向拉应力 σ_L 的状态过渡。当裂纹尖端前方附近区域存在显微裂纹、夹杂物(孔洞)或析出第二相粒子与基体界面处的显微裂纹时,也会沿与试样轴线呈 α 角的方向进行扩展,并发生明显塑性变形。当裂纹扩展至缩颈处横截面边缘区域时,距中心的距离 r 近似地等于缩颈处最小截面半径 a ,则由(8)式可知, σ_r 、 σ_t 几乎为零,因而试样近似地处于单向拉应力 σ_L 的作用下,由于边缘区域范围较窄,发生剪切变形的抗力较小,因而试样在边缘区域以接近 45° 的角度发生剪切变形而最终断裂形成剪切唇。

3 影响金属拉伸试样断口形貌的因素

金属基体组织是影响拉伸试样断口形貌的内因因素;拉伸试验加荷速度、环境温度、环境介质等则是影响拉伸试样断口形貌的外在因素。此外,拉伸试样取样部位与试样尺寸及加工精度也影响断口开貌。

3.1 金属基体组织

在金属拉伸试验过程中,拉伸试样优先在晶粒界面、第二相与基体的界面等应力集中处萌生裂纹,金属基体组织也会直接影响裂纹的扩展方式和拉伸试样的断口特征。金属基体内存在的夹杂、气泡等缺陷对裂纹的萌生与扩展方式影响更为明显。

3.2 加载速度

由于裂纹的萌生和扩展都伴随着金属(特别是塑性材料)基体的塑性变形,如果加荷速度过快,金属基体来不及发生充分的塑性变形,裂纹则会优先沿试样横截面方向以角理方式向前扩展,因而拉伸试样断口也会呈现出更多的脆性特征。尹万全^[8]等人曾对拉拔加工过程中发生异常断丝的某批 $\phi 6.5\text{mm}72\text{A}$ 钢盘条分别选择两种拉伸速度进行试验,拉伸断口对比观察结果见表1。

表1 拉伸断口对比结果

拉伸速度/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	3.0	0.3
缩颈情况	无缩颈	有缩颈
断口外形	断口平整	杯锥状
断口特征	发亮结晶状区域:解理、韧窝混合断口; 边缘舌形灰色纤维区域(较小):延性韧窝断口	中间部分脆性断裂区域(较小):解理、 韧窝混合断口; 周围纤维状区域:延性韧窝断口

3.3 环境温度

环境温度对金属基体组织的特性有一定的影响,因而对拉伸试样断裂机制和断口形貌也会产生影响。但在室温环境下,温度变化较小,其影响的效应难以显现。如在较高的温度下进行拉伸试验,金属基体组织软化、晶界弱化等,拉伸试样断口形貌则呈现塑性断裂倾向。沈保罗^[7]等人曾对MMC铝基复合材料在室温和 300°C 条件下进行拉伸试验,发现 300°C 下断口上的韧窝较室温时大。

3.4 环境介质

一些环境介质会对金属基体产生有害的化学或电化学反应,腐蚀金属基体,使晶界等处强度降低,如在应力的共同作用下,环境介质的作用更为明显。可见环境介质会对拉伸试样断裂过程及断口形貌的影响已引起人们的广泛关注。腐蚀性环境介质的存在会使金属拉伸断口呈现脆性断裂倾向。

4 金属拉伸试样断口分析方法评价

4.1 提出金属拉伸试样断口分析方法的必要性

自1765年美国科学家本杰明·弗兰克林设计制造出第一台试验机以来^[16],人们已建立了一整套金属拉伸试验方法标准,并运用金属拉伸试验获得的强度和塑性指标进行强度设计和校核。近年来,人们在科研生产过程中已开始重视对金属冲击等断口形貌进行系统分析和研究^[17]。由于存在各类缺陷的拉伸试样会影响强度和塑性指标的检测结果,有关标准也规定不对这类试样进行拉伸^[18]。虽然人们对运用拉伸断口显示冶金缺陷等已有一定认识,但是对金属拉伸试样断口形貌进行的系统研究相对较少。人们可凭肉眼或借助各类先进检测仪器设备,结合金属基体组织、加荷速度、环境温度、环境介质、取样部位与试样尺寸加工精度等因素,对拉伸断口进行观察和分析,从而获得对裂纹萌生与扩展过程的正确认识。在此基础上,有效地将金属拉伸试验获取的宏观力学性能指标与断口分析得出的微观断裂过程有机地结合起来,将有利于获得对金属材料强韧化机理的本质认识。宏观与微观相结合的材料试验技术是未来材料试验发展的趋势,因而有必要系统地开展金属拉伸断口分析方面的研究工作。

4.2 金属拉伸试样断口与冲击(含抗折)断口的比较

目前,人们除对金属拉伸断口进行观察和分析外,还对冲击(含抗折)等断口进行分析,现将两者进行比较,结果见表2。

表2 拉伸和冲击断口比较

类 别	拉伸试验断口	冲击(含抗折)断口	
		无缺口	有缺口
加荷速度	可控制	瞬时完成无法控制	
应力情况	拉应力(缩颈处为三维拉应力)	内侧:压应力 外侧:拉应力	
断裂位置	基体组织均匀时,随机发生在试样平行部位内;基体组织不均匀时,优先发生在冶金缺陷等相对密集的区域	优先发生在弯矩最大处	优先发生在缺口或槽口处
断口外形	粗糙	相对平整	

5 结论与建议

(1) 根据金属拉伸试样承受应力的分布情况,考虑影响断口形貌的诸多因素,并对拉伸试样断口的微观断裂过程进行观察和分析,再与宏观力学性能指标结合起来,可以获得对金属材料强韧化机理的本质认识。

(2) 应尽快从金属基体组织、加荷速度、环境温度、环境介质、取样位置与试样尺寸及加工精度等方面作出统一规定,采用分形技术等建立金属拉伸试样断口分析方法和评价标准,确保金属拉伸试样断口分析结果的可比性和准确性。

参 考 文 献

- 1 蒋兴纲,崔建忠,马龙翔.理化检验—物理分册,1990,26(3):23
- 2 于杰,金志浩,张小燕等.理化检验—物理分册,1993,29(3):18~20
- 3 王承忠.理化检验—物理分册,1994,30(5):33~35
- 4 徐苏,田琮,宋沂生等.金属热处理,1991(2):19~23
- 5 黄建忠,黄伯云,吕海波.粉末冶金技术,1996,14(1):37~43
- 6 葛荣德,王盘新,赖和怡.机械工程材料,1995,19(3):32~35
- 7 沈保罗,赵平,高升吉等.特种铸造及有色合金,1999(1):21~22
- 8 尹万全,郭延凤,曹家鹏等.金属制品.1998,24(5):6~10
- 9 凌树森.理化检验—物理分册,1994,30(1):56
- 10 黄明志,石德珂,金志浩.金属力学性能.西安:西安交通大学出版社,1986:36~39,52~55
- 11 陈镜.金属断裂研究文集.北京:冶金工业出版社,1978:169
- 12 P. Briggman. Trans. ASM, 1994,32:553
- 13 缪建红,丁锦华.金属制品.1998,24(6):38~40
- 14 崔连成,刘承菊.理化检验—物理分册.1983,19(4):51~52
- 15 孙盛玉.理化检验—物理分册.1996,32(5):62
- 16 美国金属学会.金属手册(第九版、第八卷).北京:机械工业出版社,1994:前言
- 17 戎忠良.理化检验—物理分册.1983,19(5):44~45
- 18 GB6397-86 金属拉伸试验试样

(上接 45 页)

找出了问题存在的根源,也就找到了解决问题的途径,即利用更高内阻的电压表测量。由于实验室没有更高内阻的电压表,我们便使用带 1:10 衰减的高内阻(10M Ω)的双踪示波器来测量。同样的电路参数与测试条件,其测试结果如表 2 所示。

表 2 双踪示波器测试结果

动态指标	R_i/K	R_o	A_v
理论值	123.22	38.00	0.985
实验值	128.57	35.00	0.987<1
误差	4.34 %	7.89 %	0.20 %
测试条件	$I_e = 1 \text{ mA}$		

结果显示,测试值接近于理论值,提高了测试射极输出器动态指标的精度,解决了射极输出器电压放大倍数大于 1 这一难题。

参 考 文 献

- 1 康华光主编.电子技术基础,北京:高等教育出版社,1993
- 2 王瑞兰.示波器法测量阻抗的性质及参数,电工技术,1999(3)