

试件几何形状与尺寸对脆性灰口 铸铁扭转切口强度的影响

鄢君辉 赵 康 郑修麟

摘要 对脆性灰口铸铁轴肩试样和环形切口圆柱试样的扭转断裂特点、扭转切口强度及其概率分布进行了实验研究。结果表明,脆性灰口铸铁轴肩试样、环形切口圆柱试样的扭转切口强度和光滑试样的扭转强度均同时符合正态分布、对数正态分布和Weibull分布。但试件几何形状与尺寸对脆性灰口铸铁的扭转断裂方式及扭转切口强度的统计特征参数有明显的影响,对其原因进行了简要讨论,同时指出光滑试样扭转强度的实验结果可作为强度设计及切口件可靠性分析的依据。

鄢君辉 讲师

关键词 试件几何形状与尺寸 扭转切口强度 概率分布 灰口铸铁
中国图书资料分类法分类号 O 343 4 TH140 1

理论上讲,脆性材料的抗压强度是抗拉强度的8倍^[1]。所以将脆性材料用作承受压应力的构件,工程中已有成功的范例,如灰口铸铁、混凝土等。可见,根据材料的性能特点,合理地使用材料是重要的研究课题。

随着陶瓷、金属间化合物等脆性材料的深入研究并逐步进入工业应用,人们对脆性材料的力学性能如强度、断裂韧性和疲劳等进行了大量的研究^[2~5]。然而,实际构件大多为切口件,用光滑试件测定的强度和用裂纹试件测定的断裂韧性数据不能预测切口件的断裂^[6]。因此,在50~70年代,对韧性金属结构材料的切口强度和切口敏感性做了大量的研究^[7]。对于脆性材料更有必要研究其切口强度和切口敏感性,这对于新型脆性材料制备工艺的改善、合理使用以及强度设计具有重要意义^[7~11]。

但是,这方面的研究目前还很不充分。文献[6]在理论分析的基础上提出了脆性材料切口强度的表达式

$$\sigma_{iv} = \sigma_f / K_\tau \quad (1)$$

式中, σ_f 和 σ_{iv} 分别为脆性材料的断裂强度和切口强度; K_τ 为理论应为集中系数。

式(1)已得到拉伸载荷下脆性金属实验结果的验证^[6]。文献[9]的研究结果表明:对于陶瓷材料的弯曲切口强度,其实验结果也符合式(1)。

值得注意的是,脆性材料的力学性能与其所处的应力状态有关^[12]。因此,文献[10]采用切口圆柱试样,与测定拉伸切口强度所用试样具有相

同的几何形状与尺寸,研究了脆性灰口铸铁材料在扭转载荷下的切口强度及其概率分布。结果表明,脆性灰口铸铁扭转切口强度的均值随 K_τ 增大而升高,与式(1)所示的拉、弯应力状态下的切口强度变化相反^[10]。

但是,承受扭转载荷的轴类零件往往具有台阶状的几何外形,与切口圆柱试件是不同的。尽管试件的 K_τ 相同,但试件几何形状与尺寸的不同会影响到切口根部(应力集中区)的应力状态^[13~15],从而会对扭转切口强度产生影响。为此本文研究了与实际构件几何形状与尺寸更接近,具有不同应力集中系数的轴肩试样的扭转断裂特点和扭转切口强度,讨论了脆性材料扭转切口强度随试件几何形状与尺寸变化的初步规律和实际意义,这对结构陶瓷等其它脆性材料切口强度的研究也有启示。

1 实验过程和方法

实验用料为灰口铸铁,拉伸断裂时延伸率 $\delta < 1.0\%$,可视为脆性材料。材料先切割、车削,再经光学研磨制成两种几何形状的试样,一种为轴肩试样,另一种为环形切口圆柱试件。轴肩试样见图1。试样的大端直径 D 、小端直径 d 和轴肩过渡

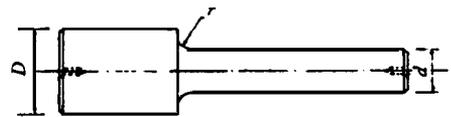


图1 脆性灰口铸铁轴肩试样外观示意图

半径 r , 以及相应的 K_τ 见表 1, 环形切口圆柱试件的切口几何形状与尺寸和相应的 K_τ 如文献 [10] 所述。

表 1

D (mm)	d (mm)	r (mm)	K_τ
30	15	1.8	1.4
20	15	0.6	1.8
26.6	20	0.4	2.0

扭转实验在 Amster—214 型试验机上进行, 其扭矩测量精度为 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试样断裂后, 观察其宏观断口, 计算相应的扭转切口强度, 并对比两种几何形状试件的扭转结果。

2 实验结果及讨论

2.1 脆性灰口铸铁试样的扭转断裂特点

具有不同 K_τ 值的脆性灰口铸铁轴肩试样、环形切口圆柱试样的宏观扭转断裂形貌见图 2。实验发现, 轴肩试样断口几乎都呈螺旋状。对比图 2a 和图 2b 发现, 轴肩试样扭转断口宏观形貌基本与光滑试样的断口形貌一致, 但不同于环形切口圆柱, 后者的断裂局限在切口区域, 断面几乎与试样的轴线垂直, K_τ 值较大的试样尤其如此。

图 2 脆性灰口铸铁的扭转断裂形貌
(a) 轴肩试样 (b) 环形切口圆柱试样

2.2 扭转切口强度及其概率

鉴于轴肩试样和环形切口圆柱试样扭转断裂的上述特点, 并且在实验过程中试样无可观测到的塑性变形和亚临界裂纹扩展, 试样扭转切口强度可按式确定^[16]

$$\sigma = 16M_\tau / \pi d^3$$

式中, M_τ 为测得的最大扭矩; d 为轴肩的小端直径 (对于轴肩试样) 或为切口根部净截面的最小直径 (对于环形切口圆柱试样)。

将按上述方法计算得的扭转切口强度绘于正态坐标纸中 (见图 3), 其中试样的失效概率用平均秩来表示。图 3a 回归分析给出的切口强度与标准正态偏量 U_p 间的线性相关系数远大于起码值 0.88, 这表明由轴肩试样测得的扭转切口强度基本上服从正态分布。图 3b 为脆性灰口铸铁光滑试

样扭转强度和环形切口圆柱试样扭转切口强度的正态分布结果, 可以看出, 用两种几何形状的试样测得的扭转切口强度和光滑试样的扭转强度均服从正态分布。进一步分析还表明, 用两种几何形状的试样测得的扭转切口强度和光滑试样的扭转强度同时也服从对数正态分布和 Weibull 分布, 分别见图 4 和图 5。

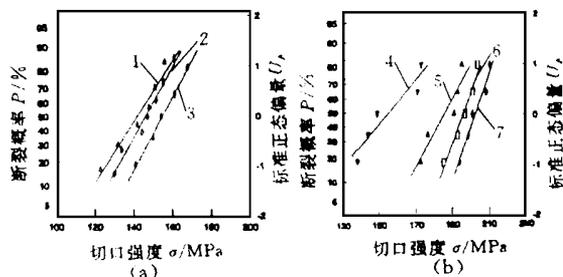


图 3 脆性灰口铸铁扭转强度和扭转切口强度的正态分布

(a) 轴肩试样 (b) 环形切口圆柱试样

1. $K_\tau = 1.4$ 2. $K_\tau = 1.8$ 3. $K_\tau = 2.0$

4. $K_\tau = 1.0$ 5. $K_\tau = 1.82$ 6. $K_\tau = 1.50$ 7. $K_\tau = 1.27$

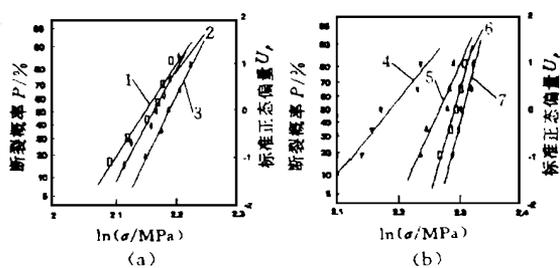


图 4 脆性灰口铸铁扭转强度和扭转切口强度的对数正态分布

(a) 轴肩试样 (b) 环形切口圆柱试样

1. $K_\tau = 1.4$ 2. $K_\tau = 1.8$ 3. $K_\tau = 2.0$

4. $K_\tau = 1.0$ 5. $K_\tau = 1.82$ 6. $K_\tau = 1.50$ 7. $K_\tau = 1.27$

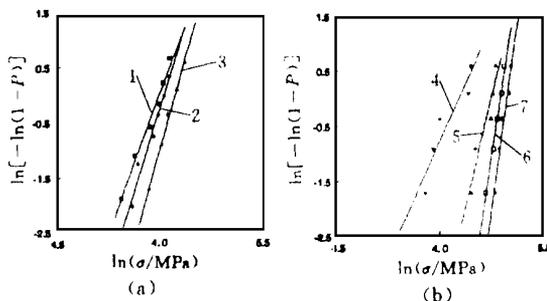


图 5 脆性灰口铸铁扭转强度和扭转切口强度的 Weibull 正态分布

(a) 轴肩试样 (b) 环形切口圆柱试样

1. $K_\tau = 1.4$ 2. $K_\tau = 1.8$ 3. $K_\tau = 2.0$

4. $K_\tau = 1.0$ 5. $K_\tau = 1.82$ 6. $K_\tau = 1.50$ 7. $K_\tau = 1.27$

2.3 脆性灰口铸铁扭转切口强度统计特征参数随 K_τ 的变化关系

根据图3、图4和图5,可以分别求出脆性灰口铸铁的扭转强度和不同 K_T 对应的扭转切口强度的统计特征参数,图6给出了这些统计特征参数随 K_T 的变化关系。

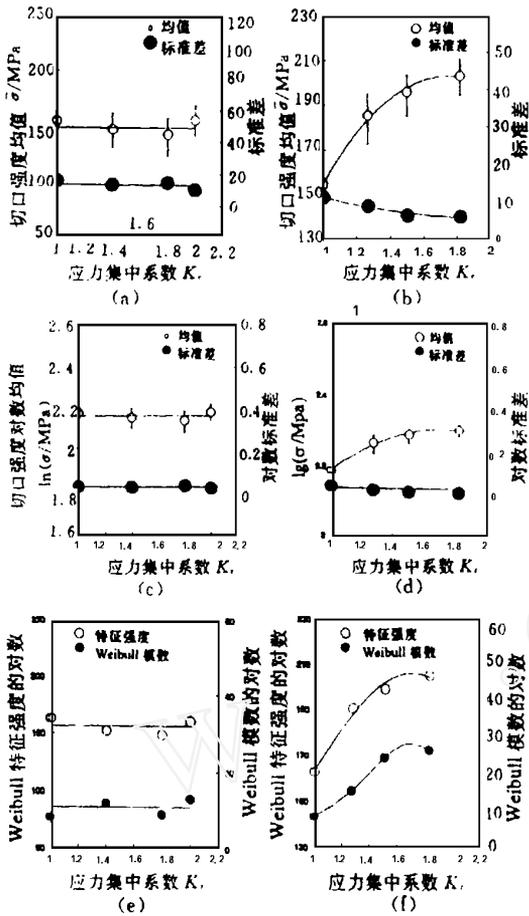


图6 脆性灰口铸铁扭转切口

强度统计特征参数随 K_T 的变化关系

- (a) 正态分布(轴肩试样) (b) 正态分布(环形切口圆柱试样)
- (c) 对数正态分布(轴肩试样) (d) 对数正态分布(环形切口圆柱试样)
- (e) Weibull 分布(轴肩试样) (f) Weibull 分布(环形切口圆柱试样)

从图6a 可以看出,轴肩试样切口强度均值及其标准差几乎与 K_T 无关,可视为常数,其值分别近似为光滑试样扭转强度均值和标准差。这与图6b 所示的脆性灰口铸铁环形切口圆柱试样的扭转切口强度均值及其标准差随 K_T 的变化规律明显不同,其中扭转切口强度的均值随 K_T 的增大而上升,但其标准差却与 K_T 成反比,这表明对于环形切口圆柱试样扭转切口强度的分散性随 K_T 的增大而减小。从图6c 和图6d 可以看出,两种几何形状试样切口强度对数的均值随 K_T 的变化也呈现出明显不同的规律,但切口强度对数的标准差却几乎与 K_T 无关。图6e 与图6f 则表明,轴肩试样切口强度的 Weibull 特征强度和 Weibull 模数

也几乎与 K_T 无关,可视为常数,其值分别近似为光滑试样扭转强度的 Weibull 特征强度和 Weibull 模数,但环形切口圆柱试样的扭转切口强度的 Weibull 特征强度和 Weibull 模数却随 K_T 的增大而上升。

2.4 简要讨论

2.4.1 试件几何形状与尺寸的影响

图2显示,光滑试样不构成对裂纹扩展的拘束,为典型的脆性正断。对于环形切口圆柱试样,不同切口半径的切口对裂纹扩展的拘束作用不同;当切口根部半径较大时,切口试样相对光滑试件而言,对裂纹有一定的拘束作用,因此,切口试样扭转断裂的表面与轴线间的夹角小于 45° ;随着 K_T 的增大,即切口根部半径的减小,这种拘束作用逐渐加强,所以当 $K_T=1.8$ 时,断面基本与试样的轴线垂直,此时试样相当于在切应力作用下而断裂。由此可见,试样对裂纹扩展的拘束作用越强,裂纹扩展路径偏离无约束时的正断路径的程度就越大,消耗的能量就越多,因此,表观断裂应力就越高,同时,由于切口的存在,使裂纹启裂及扩展部位集中于切口区域,因而断裂应力的分散性也下降,其结果见图6a。相对而言,轴肩试样对裂纹扩展不能构成拘束作用,因此,其断口形貌与光滑试样的一致,并且切口强度也与光滑试件的切口强度无明显差别。

由上可见,对于脆性灰口铸铁,切口几何形状与尺寸明显地影响着试样的扭转断裂方式及扭转切口强度。因此,在进行脆性材料机械零件的强度细节设计时,必须充分考虑到切口几何形状与尺寸的影响。

2.4.2 脆性灰口铸铁的切口敏感性

早先的研究中,是用具有一定切口几何形状与尺寸和应力集中系数的切口试件,测定拉伸切口强度,进而将切口强度 σ_{IN} 对抗拉强度 σ_b 的比值定义为切口强度比 NSR ,即 $NSR = \sigma_{IN} / \sigma_b$ 。当 $NSR > 1.0$ 时,材料为切口韧性的,即对切口不敏感;反之, $NSR < 1.0$,材料为切口脆性的,即材料对切口敏感^[17]。同样,可以定义扭转载荷下的切口强度比 NSR ,显然对于本研究中所用的脆性灰口铸铁,当为环形切口圆柱试样时, $NSR > 1.0$,当为轴肩试样时, $NSR < 1.0$ 。由此可见,在扭转载荷下脆性灰口铸铁是切口不敏感的。

另外,图3、图4和图5表明采用两种几何形状的试样测得的扭转切口强度,与光滑试样的扭转强度一样均符合正态分布、对数正态分布和 Weibull 分布。由此再鉴于脆性灰口铸铁的 NSR

不小于1.0,那么只要知道光滑试样的扭转强度及其概率分布,而不必进行昂贵而费时的切口试样的扭转实验,便可进行扭转载荷下脆性灰口铸铁等脆性材料构件的强度设计和可靠性评估,即光滑试样的扭转强度及其概率分布可作为扭转状态脆性材料切口强度设计和可靠性评估的依据。

上述结果对陶瓷等脆性材料扭转状态下的强度设计和应用有一定启示,但尚需进一步研究。

3 结论

(1) 脆性灰口铸铁轴肩试样扭转断口宏观形貌基本与光滑试样的一致,但环形切口圆柱试样的断裂局限在切口区域,断面几乎与试样的轴线垂直, K_{τ} 较大的试样尤其如此。

(2) 脆性灰口铸铁轴肩试样、环形切口圆柱试样的扭转切口强度和光滑试样的扭转强度均同时符合正态分布、对数正态分布和Weibull分布。

(3) 脆性灰口铸铁轴肩试样切口强度均值及其标准差、切口强度对数的均值和标准差以及切口强度的Weibull特征强度和Weibull模数,均几乎与 K_{τ} 无关,可分别视为常数,其值分别近似为光滑试样扭转强度相应的统计特征参数值。

(4) 脆性灰口铸铁环形切口圆柱试样的扭转切口强度均值、切口强度对数的均值随 K_{τ} 的增大而上升,扭转切口强度的标准差却与 K_{τ} 成反比,切口强度对数的标准差几乎与 K_{τ} 无关,其值分别近似为光滑试样扭转强度对数的标准差,但环形切口圆柱试样的扭转切口强度的Weibull特征强度和Weibull模数却随 K_{τ} 的增大而上升。

(5) 脆性灰口铸铁轴肩试样和环形切口圆柱试样的扭转断裂方式、扭转切口强度的统计特征参数随 K_{τ} 的变化表现出的不同规律,可能与不同的切口几何形状与尺寸对裂纹扩展的拘束作用不同有关。

(6) 脆性灰口铸铁扭转切口强度和光滑试样的扭转强度服从相同的概率分布,且 NSR 不小于1.0,故光滑试样的扭转强度的概率分布可作为承受扭转载荷的切口件可靠性分析的依据。

参 考 文 献

- 1 McCIntock F A, Argon A S. Mechanical Behaviour of Materials. Addison-Wiley Publishing Company, 1996
- 2 Quinn G D. Design Data for Engineering Ceramics: A Review of the Flexural Test. J. Am. Soc., 1991, 74(9): 2037~ 2066

- 3 Sakai M, Bradt R C. Fracture Toughness Testing of Brittle Materials. Int Mater. Review, 1993, 38(2): 53~ 78
- 4 Buxbaum O. Fatigue Design Criteria for Ceramic Components Under Cyclic Loading. Int J. Fatigue, 1994, 16: 257~ 265
- 5 Alarcon O E. Fracture of Glass in Tension and Bending Tests. Metall Mater. Trans., 1994, 25A(3): 961~ 968
- Zheng X L. On a Unified Model for Predicting Notch Strength and Fracture Toughness of Metals. Eng. Fract. Mech., 1989, 33(5): 685~ 695
- 7 黄明志. 金属力学性能. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- 8 Meng L, Zheng X L. Tension Characteristics of Notched Specimens for Al-Li-Cu-Zr Alloy Sheets with Various Cerium Contents. Metall Mater. Trans., 1996, 27A(10): 3089~ 3094
- 9 Wang F H, Zheng X L, Lu M X. Notch Strength of Ceramics and Statistical Analysis. Eng. Fract. Mech., 1995, 52(5): 917~ 921
- 10 Yan J H, Zheng X L, Meng L. Preliminary Experimental Study of the Notch Strength of Gray Cast Iron and its Probability Distribution Under Torsion Loading. Int J. Fract., 1997, 86(3): 19~ 23
- 11 White C S. Notched Tensile Creep Testing of Ceramics. Mater. Sci. Eng., 1995, A203: 217~ 221
- 12 Mftakhar A. Calculation of Elasto-Plastic Strains and Stresses in Notches Under Multiaxial Loading. Int J. Fract., 1995, 70(4): 357~ 373
- 13 Minami F. Evaluation of Specimen Geometry Effect on Brittle Fracture Resistance Based on Local Approach. J. Soc. Mater. Sci. Japa., 1996, 45(5): 544~ 551
- 14 Nojima T. Effect of Initial Crack Length and Specimen Geometry on Fracture Toughness of Rate Sensitive Ceramics. J. Soc. Mat. Sci. Japan, 1995, 44(499): 445~ 456
- 15 Ouyang Cheng Sheng, Surendra P. Shah. Geometry-Dependent R-Curve for Quasi-Brittle Materials. J. Am. Cem. Soc., 1991, 74(11): 2831~ 2836
- 16 郑修麟. 材料的力学性能. 西安: 西北工业大学出版社, 1991
- 17 郑修麟, 孟亮, 王锋会. 材料的切口强度与切口敏感性. 中国机械工程, 1998, 9(1): 81~ 83

鄢君辉 男, 1967年生, 西北工业大学(西安市 710072)材料科学与工程学院讲师, 在职博士研究生, 主要研究方向为材料及焊接结构的力学性能, 焊接过程的计算机测控, 获省部科技进步奖2项, 发表论文10余篇。

赵 康 郑修麟 西安市 710072 西北工业大学