

文章编号: 1001-1455(2003)01-0047-04

# 加载速率对船用钢断裂韧性的影响\*

张晓欣, 刘瑞堂

(哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在加载速率为  $10^0 \sim 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  的范围内, 分别采用准静态、示波冲击、Hopkinson 杆型试验装置对某船用钢进行了断裂韧性测试。试验结果表明, 此钢的断裂韧性对加载速率敏感, 即随着加载速率的升高, 断裂韧性下降; 应用位错动力学对实验现象作出了解释。

关键词: 固体力学; 加载速率; 断裂韧性; 示波冲击; Hopkinson 杆

中图分类号: O364.2 国标学科代码: 130°1545 文献标志码: A

## 1 引言

舰船在实际海况下, 不可避免地会受到海浪的冲击、冰块等硬物的撞击、甚至接触或非接触爆炸产生的冲击波的作用。因此, 研究舰船、舰载装置及武器装备的动载响应对抗动载设计、提高服役适应性等具有重要的意义。本文中, 我们研究了加载速率  $K = 10^0 \sim 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时某船用钢断裂韧性的变化规律, 为舰船材料选用、安全评定等提供基础数据。

## 2 实验方法和测试原理

按文献[1]对加载速率  $K$  的分类: 准静态断裂范围、动态断裂范围、高速或短脉冲载荷作用下的断裂。本文分别在  $K$  为  $10^0$ 、 $10^5$ 、 $10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  条件下对某船用钢进行了断裂韧性测试。

### 2.1 $K \approx 10^0 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 条件下断裂韧性 $J_{Ic}$ 测试

由于该船用钢在常温下为弹塑性断裂, 其  $J_{Ic}$  测试按照 GB2038-91《利用  $J_R$  阻力曲线确定金属材料延性断裂韧度的试验方法》进行。

### 2.2 $K \approx 10^5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 条件下动态断裂韧性 $J_{Id}$ 测试

目前, 对于此加载速率范围的动态断裂韧性测试方法, 应用最广泛的是示波冲击试验。 $J_{Id}$  的计算可参照 ASTM E24<sup>[2]</sup> 的推荐标准进行, 即

$$J_{Id} = 2U_d / (B(W - a)) \quad (1)$$

式中:  $W$ 、 $B$ 、 $a$  分别为试样的宽度、厚度、裂纹长度,  $U_d$  为起裂功。要确定了起裂点, 将起裂时刻的相关参量代入式(1), 就可得到材料的  $J_{Id}$ 。因此, 测试的关键是动态起裂点的确定。本文中采用小角度冲击的方法来确定动态起裂点, 该方法属于多试样法, 是目前最准确的方法之一, 其细节详见文献[3]。

本文所用的试验机为 Amsler RKP-300 摆锤式示波冲击试验机, 采用的加载速度为  $5.21 \text{m/s}$ 。该试验机配有计算机等一套数据采集与处理系统, 能够记录不同时间的载荷、位移、试样吸收的能量及冲击速度等参数。

### 2.3 $K \approx 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 条件下动态断裂韧性 $J_{Id}$ 测试

在 Hopkinson 杆型试验装置上完成了测试工作。装置细节见文献[4]。

(1) 载荷的计算。根据输入杆上应变片记录的入射波  $\epsilon_i(t)$  和反射波  $\epsilon_r(t)$ , 由一维应力波理论可求得作用于试样上的载荷

\* 收稿日期: 2001-12-18

作者简介: 张晓欣(1973—), 男, 博士研究生。

$$P(t) = EA[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)] \quad (2)$$

式中:  $E$ 、 $A$  分别为输入杆的弹性模量和横截面积。

(2)起裂时间的确定。起裂时间的确定方法很多,如电磁法、电位法、断裂丝栅法、动态焦散线法及电阻应变片法等。本文中采用电阻应变片法确定起裂时间<sup>[5]</sup>。

(3) $J$  积分响应曲线的建立。采用试验-数值法<sup>[6]</sup>建立  $J$  积分响应曲线。其基本步骤是:测出材料的动态应力-应变行为以及施加于试样的载荷,以此作为已知条件输入自行编制的 ANSYS 宏程序,获得  $J$  积分的变化历史( $J_I(t)-t$ ),即  $J$  积分响应曲线。与起裂时间  $t_f$  相对应的  $J$  积分值,即为动态弹塑性断裂韧性值  $J_{Id}$ 。该程序的有效性已在文献[7]中给予了验证。材料的动态应力-应变行为的测试在 SHPB 试验装置上进行,详情参见文献[8]。

### 3 材料和试样

试验材料为某船用钢,其化学成分为:C(0.14%)Mn(1.06%)Si(0.56%)P(0.016%)S(0.06%)Cr(0.54%)Ni(1.12%)Mo(1.2%);常规力学性能为:屈服强度  $\sigma_{ys}=525\text{MPa}$ ,抗拉强度  $\sigma_b=645\text{MPa}$ ,延伸率  $\delta=0.24$ ,截面收缩率  $\psi=0.74$ ,冲击功  $A_{KV}=28\text{J}$ 。试样按  $T-S$  方向取样。

在准静态下采用 B20(20mm×24mm×96mm)试样,其余条件下采用 10mm×10mm×55mm 的冲击试样。为了得到稳定的断裂韧性值,采用的裂纹比  $a/W \approx 0.5$ ,疲劳裂纹预制和裂纹扩展量的测量均参照 GB/T2358-94 进行。所用的设备和仪器分别是红山高频疲劳试验机和 FDIC Jx6 型工具显微镜。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 测试结果

当  $K \approx 10^0 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时,在准静态情况下,测得该钢的  $J_{Ic}=218.1\text{kJ}/\text{m}^2$ 。

当  $K \approx 10^5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时,采用小角度标定的方法确定动态起裂点后,利用 5 个试样进行试验,测得的该钢的动态断裂韧性  $J_{Id}=130.9\text{kJ}/\text{m}^2$ <sup>[3]</sup>。

当  $K \approx 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时,测得常温下该钢的动态拉伸应力-应变关系如图 1 所示。由图 1,通过塑性变形阶段线性拟合后与纵轴的交点求得屈服强度。因此,当  $\epsilon=2.5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$  时,屈服强度  $\sigma_{yd} \approx 674\text{MPa}$ ,表明该钢表现出一定的应变速率敏感性,即随着应变速率  $\epsilon$  的提高,其屈服强度增大。

图 2 为试样上由一维应力波理论所获得的载荷-时间曲线,图 3 为通过试验-数值法获得的  $J$  积分响应曲线。当起裂时间  $t_f=18.5\mu\text{s}$  时,对应的  $J_{Id}=38.7\text{kJ}/\text{m}^2$ 。

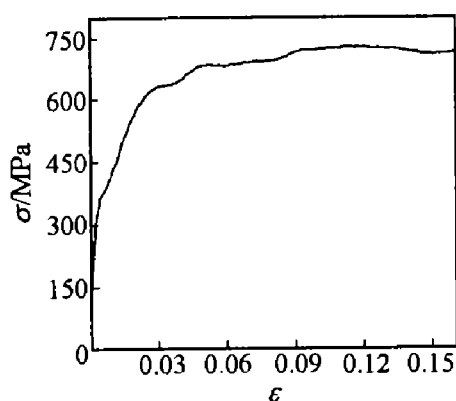


图 1 室温下拉伸应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain relation under room temperature

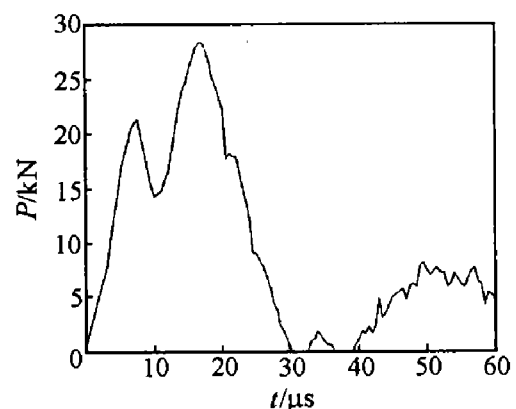


图 2 典型的载荷-时间曲线

Fig. 2 The typical loading time history

## 4.2 结果分析

在不同加载速率条件下, 断裂韧性测试数据为: 当  $K = 10^0 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时,  $J_{Ic} = 218.1 \text{kJ}/\text{m}^2$ ; 当  $K = 10^5, 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时,  $J_{Id} = 130.9, 38.7 \text{kJ}/\text{m}^2$ 。数据曲线如图 4 所示。

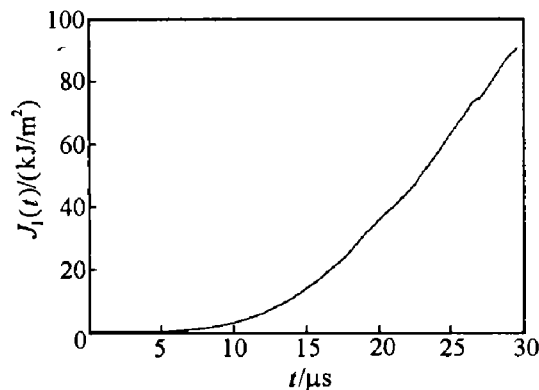


图 3 典型的  $J$  积分响应曲线

Fig. 3 The typical response curve of  $J$  integral

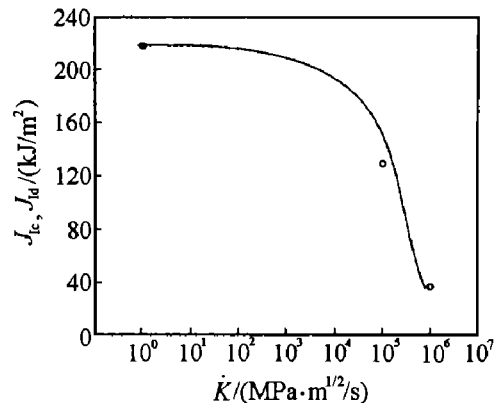


图 4 断裂韧性值与  $K$  的关系

Fig. 4 The relationship between fracture toughness and loading rate

由测试数据及图 4 可知, 随着  $K$  的升高, 断裂韧性下降。尤其在  $K = 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$  时, 该钢的抗断能力降到极低水平。同时,  $K$  的升高与缺口效应和低温效应相似, 使裂尖约束加强, 材料韧性降低, 导致脆化现象。

随着  $K$  的增加, 材料断裂韧性连续下降。这将意味着材料对  $K$  很高的载荷没有抵抗能力, 但这是一种过于理想的情况, 与试验事实不相符, 因为无论对  $K$  多高的载荷, 材料在破坏过程中总是要从外界吸收能量的。因此在  $K$  超过某一极限值后, 材料的断裂韧性将转而升高。对于本文中研究的  $K$  范围, 该钢的断裂韧性连续下降, 至于  $K$  为何值时, 该钢的断裂韧性会转而升高还有待于进一步研究。

此外, 在断裂过程中, 裂纹尖端发射位错, 从而形成塑性区并钝化裂尖, 使裂尖周围的应力场松弛, 起到屏蔽外应力对裂尖的作用。当  $K$  增加时, 发射位错的临界应力强度因子增加, 导致裂尖发出并塞积在裂尖前方的位错数目减少, 屏蔽效应削弱, 从而使得材料的断裂韧性下降<sup>[9]</sup>。

因此, 承受动载荷作用的结构, 应依据相应载荷条件下的试验结果为设计依据, 否则将造成结构的过早失效。

## 5 结论

(1) 随着  $K$  的升高, 该船用钢断裂韧性下降, 表明具有较强的率敏感性。

(2) 鉴于该钢动态力学性能不同于准静态力学性能, 在舰船的设计、选材和安全评定时, 应采用该钢动态力学性能数据。

## 参考文献:

- [1] 赵亚溥. 裂纹动态起始问题的研究进展[J]. 力学进展, 1996, 26(3): 362-376.  
ZHAO Ya-pu. The advances of studies on the dynamic initiation of cracks[J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(3): 362-376.
- [2] ASTM E24.03.03. Proposed standard methods of test for instrumented impact testing of precracked Charpy specimen of metallic materials, draft 2D[S].
- [3] 姜风春, 刘瑞堂, 张晓欣. 船用 945 钢的动态力学性能研究[J]. 兵工学报, 2000, 21(3): 257-260.  
JIANG Feng-chun, LIU Rui-tang, ZHANG Xiao-xin. A study on the dynamic mechanical behaviors of shipbuilding steel 945[J]. ACTA Armamentarii, 2000, 21(3): 257-260.
- [4] 刘瑞堂, 张晓欣, 姜风春, 等. 用 Hopkinson 压杆技术测试材料动态断裂韧性的方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(6): 18-21.  
LIU Rui-tang, ZHANG Xiao-xin, JIANG Feng-chun, et al. Study of the method for measuring dynamic fracture tough-

- ness by Hopkinson pressure bar technique[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1999, 21(6): 18-21.
- [5] GUO W G, LI Y L. Analytical and experimental determination of dynamic impact stress intensity factor for 40Cr steel [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997, 26(1): 29-34.
- [6] Yokoyama T. Determination of dynamic fracture-initiation toughness using a novel impact bend test procedure[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1993, 11(5): 389-397.
- [7] 张晓欣. 金属材料动态断裂韧性测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2000.
- [8] 刘瑞堂, 姜凤春, 张晓欣, 等. 用于材料动态力学性能研究的试验装置[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(1): 13-18.  
LIU Rui-tang, JIANG Feng-chun, ZHANG Xiao-xin, et al. A testing system for dynamic behavior of materials[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1999, 20(1): 13-18.
- [9] 储武扬, 乔利杰. 断裂与环境断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

## Effect of loading rate on fracture toughness of a ship-building steel

ZHANG Xiao-xin, LIU Rui-tang

(Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The fracture toughness of a ship-building steel was measured under loading rate  $10^0 \sim 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ , using quasi-static Charpy impacting system and Hopkinson bar. The results show that the steel is a rate-sensitive material and the fracture toughness decreases with the increase of loading rate. Also, the results provide the base for the security assessment of the steel.

**Key words:** solid mechanics; loading rate; fracture toughness; Charpy impacting system; Hopkinson bar