

宝钢宽厚板断裂韧度试验若干问题的研究对策*

RESEARCH SOLUTION OF SOME PROBLEMS RELATED TO THE FRACTURE TOUGHNESS TESTING FOR WIDE HEAVY STEEL PLATE OF BAOSTEEL

丁富连** 方健

(宝钢股份公司 技术中心, 上海 201900)

DING FuLian FANG Jian

(Technology Centre, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

摘要 概述宝钢在开展宽厚板断裂韧度试验过程中所面临的若干问题及研究对策。主要包括单试样柔度法测定 J_c 与 $CTOD$ 指标的试验方法; 开发和设计针对大尺寸宽厚板试样的 J_d 试验手段, 以满足平面应变断裂的有效性判据; 针对高韧性厚钢板落锤撕裂试验(drop weight tear test, DWTT) 试验容易出现无效异常断口的现象, 文中初步分析试样缺口类型对异常断口的影响。

关键词 宽厚板 造船板 输油气管 断裂韧度 动态断裂韧度 动态撕裂试验 落锤撕裂试验

中图分类号 TG15.57

Abstract Some potential problems, existing in the fracture toughness testing for the wide heavy steel plate manufactured by Baosteel, were summarized with the countermeasures. Single specimen compliance method was discussed for the efficiency and feasibility as to the evaluation of J_c and $CTOD$ indexes under the quasi static loading conditions. Instrumented impact testing machine for large dimensions specimen needs to be established to implement the valid J_d evaluation, consistent with the validity criteria of Ir Plane strain conditions. Considering the phenomena of invalid abnormal fracture surface, due to the assessment of shear area index from drop weight tearing test for the high strength and toughness steel plate, the influence of the specimen notch type on the occurrence of invalid abnormal fracture surface were also briefly discussed.

Key words Wide heavy steel plate; Shipbuilding plate; Oil pipe; Fracture toughness; Dynamic fracture toughness; Dynamic tear testing; Drop weight tear testing

Corresponding author: DING FuLian, E-mail: dingfl@baosteel.com, Tel: +86-21-26647197, Fax: +86-21-36071814

Manuscript received 20040425, in revised form 20040830.

1 引言

正在建设中的宝钢 5 m 宽厚板轧机将是国际上最现代化的宽厚板轧机之一, 生产的产品将涉及造船(包括舰船)、海洋结构、锅炉压力容器、石油天然气输送管线、桥梁、建筑、工程机械等行业, 生产的钢号可达数百个, 钢种、厚度、宽度规格将以万计。其中将有大量填补国内空白的高质量宽厚钢板(例如舰船钢板、液化气运输船用低温韧性钢板、高压压力容器钢板、直缝焊管线钢板等)。根据宽厚板的不同用途, 在研发、生产宽厚板的过程中, 需要对宽厚板的板材与焊接接头(包括焊缝金属、熔合线、热影响区)进行大量的力学性能测试、研究工作。有一些测试、研究工作是依据宽厚板的实际工况要求提出的, 国内钢厂从未开展过的新试验项目(例如宽厚板的动态撕裂试验等)或试验设备需要完善、试验方法需改进的试验项目(例如动态断裂韧度

K_d 与 J_d 、单试样柔度法 J_c 与 $CTOD$ 试验等)。针对宝钢宽厚板断裂韧度试验中将遇到的若干问题及相应对策概述如下。

2 试验研究中的若干问题及相应对策

2.1 断裂韧度 J_c 与 $CTOD$ (crack tip opening displacement) 试验

断裂韧度(K_c 、 J_c 与 $CTOD$)与材料的裂纹长度和应力有关。高强度和超高强度材料断裂韧度的测试项目为线弹性断裂韧度 K_c , 测试技术已很成熟。中低强度材料断裂韧度的测试项目主要为弹塑性断裂韧度 J_c 与 $CTOD$, 目前常采用多试样法开展评测工作, 但需要耗费大量试样与测量裂纹长度的时间, 因而效率较低; 单试样法测试技术效率高, 然而测试方法比较复杂, 并存在裂纹负增长修正等问题, 目前正处在不断

* 20040425 收到初稿, 20040830 收到修改稿。

** 丁富连, 男, 1952 年 2 月生, 浙江省湖州市人, 汉族。高级工程师, 从事金属力学性能测试研究, 在金属材料断裂、疲劳、成形等方面有多篇论文发表。通讯地址: 上海市宝山区果园克东路 1 号, 宝钢股份公司技术中心(201900)。

地发展、改进之中^[1,2]。还有一些需要解决的技术问题,如现有试验机的CTOD试验软件按ASTM E1820—1999编制,其试验数据的处理与分析不能完全满足ASTM E1820—2001的要求,试验机厂商的软件升级步伐很难紧跟试验标准修订的速度,需要作一些人工处理的工作;另外,按ASTM E1820—1999编制的CTOD试验软件对试验数据的处理不能满足GB/T 2358—1994的要求,需按GB/T 2358—1994对试验数据重新进行人工处理,大大降低了试验工作效率。需通过试验研究,开发相应的数据处理、分析软件,建立能跟踪并同时满足GB/T 2358与ASTM E1820最新版标准的高效率的“单试样柔度法测定 J_c 与CTOD的数据分析平台”。

2.2 动态断裂韧性试验

舰船、长距离管线管、压力容器等领域要求所选用的钢板在高速冲击力下具有足够的断裂韧性。由于断裂韧性 K_{Ic} 、 J_{Ic} 与CTOD是随加载速率不同而变化的,在一定的动态载荷条件下金属材料的断裂韧性会显著降低,准静态载荷条件下断裂的试验方法与断裂韧性 K_{Ic} 、 J_{Ic} 与CTOD指标无法满足材料和结构在动载作用下的安全性要求,需要研究材料的动态断裂韧性 K_{Id} 与 J_{Id} 。一些文献介绍了各自的试验方法与成果,根据仪器化冲击试验实测的冲击力—位移曲线,可求解出冲击能量的分布关系,特征力值点的相对位置,冲击吸收功可以被划分为启裂功 E_i 和裂纹扩展功 E_p 两部分,可以更好地表明材料的韧性性能与强度的关系^[3];确定动态启裂点的方法^[4];研究了船板、石油套管等钢材的动态断裂特性^[4~6];动态断裂韧性测试方法的有效性分析^[6];由仪器化冲击试验曲线上的特征点计算剪切面积百分比^[7,8]等。

基于经典断裂力学理论,我们成功开发出“金属材料动态断裂性能集成式评测软件”(ImpactPlus 2.0)。以仪器化冲击试验为数据源,基于单试样仪器化冲击(夏比或艾氏)所记录的力—位移曲线,全面表征材料在塑性变形、动态启裂、稳态裂纹扩展、失稳断裂等不同断裂阶段的本质行为,并定量评价材料在动态加载条件下所表现出的塑性、强度与韧性性能的优劣。软件自带的参量指标体系包括动态屈强比 F_{gy}/F_m 、流变屈服应力 σ_{yd} 、临界裂纹长度 a_c 等,为深入揭示材料断裂机理,建立动态加载模型提供了强大的试验分析平台。

目前国内外动态断裂性能的试验研究大多采用300J或450J摆锤式仪器化冲击试验机与10mm×10mm×55mm预制裂纹冲击试样。宽厚板产品基本上都是中低强度弹塑性材料,由于受试样尺寸的限制,所

测得的 J_{Id} 通常并不是平面应变条件下的动态断裂韧性^[6]。为了使所测材料的 J_{Id} 满足平面应变要求,需采用大尺寸试样,并使用几千焦耳的仪器化冲击试验机进行仪器化冲击试验。目前,国内外还没有几千焦耳能量的仪器化冲击试验机定型产品,宝钢正在与试验机厂合作,设计、生产5000J仪器化冲击试验机,将开展大尺寸试样(可达40mm×80mm×350mm)的宽厚板动态断裂性能的试验研究,以及开展动态载荷条件下平面应变断裂判定条件中有关试样几何尺寸修正系数的标定工作。

艾氏冲击试验比较适合承受悬臂梁式冲击力的材料(例如大型悬臂吊用钢等)。从仪器化艾氏冲击试验测得的高强钢力—位移曲线(图1)可以看出,试样折断的艾氏冲击韧性值反映试样折断过程所吸收的能量,试样未完全折断的艾氏冲击韧性值反映试样折断过程所吸收的能量以及试样折弯后撞击定位块所吸收的能量。仪器化艾氏冲击试验可以将试样折弯后撞击定位块所吸收的能量从总吸收能中剔除,为评价材料在悬臂梁式冲击加载条件下抗断裂性能提供高效的试验平台。但常规艾氏冲击试验无法将其剔除,造成艾氏冲击韧性的“虚高”,这是使用常规艾氏冲击试验需要研究、解决的问题。

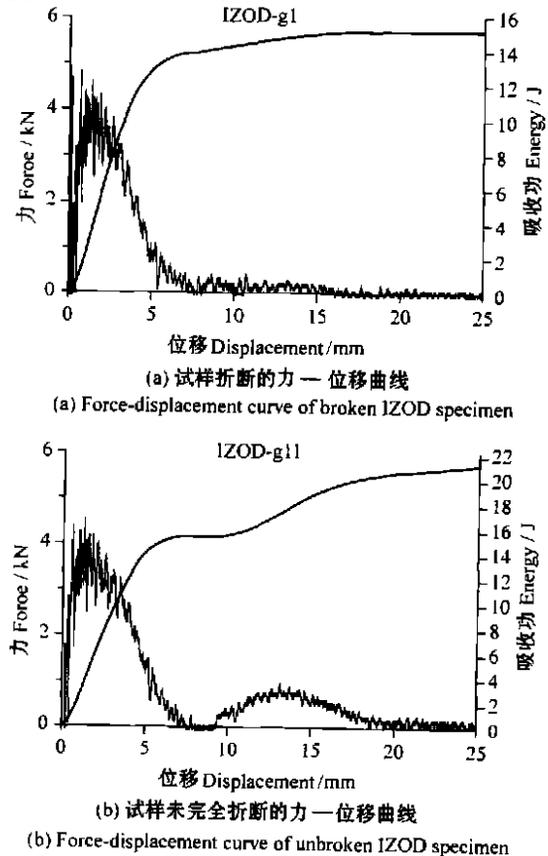


图1 仪器化艾氏冲击试验测得的高强钢力—位移曲线

Fig. 1 Force-displacement curve of high strength steels by using instrumented Izod impact testing

2.3 动态撕裂试验(DT 试验, dynamic tear test)

宽厚板的动态撕裂试验是二战期间发生大规模船舰脆断事故后, 美国海军研究所研究开发的试验项目, 通过大量试验研究^[9], 现已成为评定舰船等重要钢材的必需试验项目。按美国军标或中国军标的要求, 舰船用 HSLA80、HSLA100、921、923 钢板等都要进行 DT 试验, 将标准试样(DT16 试样)的试验结果列入产品质保书。当用户有要求时, 钢厂应取合适厚度的辅助试样进行 DT 试验, 提交试验结果给用户。

国内仅少数几家研究院所与船厂做过少量 DT 试验, 钢厂还未开展过 DT 试验项目。值得指出的是, 标准试样(DT16 试样)的长度和宽度分别为 180 mm、40 mm, 当板厚 t 为 5 mm ~ 16 mm 时应取全板厚试样, 板厚 $t > 16$ mm 时取厚度为 16 mm 的试样。因此根据初步测算需建立 5 000 J 左右的冲击试验机。另外, 大尺寸辅助试样的厚度分别为 25 mm、32 mm、40 mm、50.8 mm、76.2 mm 的 DT25、DT32、DT40、DT2in、DT3in 试样等(长度和宽度相应增大), 因此需具备更大能量的冲击试验机。宝钢计划配置 30 000 J 仪器化落锤冲击试验机, 以开展包括标准试样及部分辅助试样在内的宽厚板 DT 试验, 满足供货客户的试验要求。

2.4 落锤撕裂试验(drop weight tear test, DWTT)

落锤撕裂试验是美国海军研究所与美国石油学会为评定管线钢的断裂韧度发展起来的一种试验方法, 试验结果主要是建立断口形貌与温度的关系, 确定管线钢的韧脆转变温度, 以保证管线在韧性温度区工作, 避免发生脆性断裂事故。由于该试验方法获得的结果与管道实物爆破试验结果相当吻合, 已被各国用于管线钢的评定。西气东输等管线用钢均要求进行 DWTT 试验, 试验结果列入产品质保书。高韧性厚钢板 DWTT 试验容易出现无效的异常断口, API RP 5L3 规范要求压制 V 型缺口试样出现无效的异常断口时重新取样, 改用人字形缺口进行试验, 但改用人字形缺口后仅能减少出现无效异常断口的概率, 不能完全避免无效异常断口的出现, API RP 5L3 规范对此没有给出进一步的规定, 目前尚无有效的解决方法。对异常断口产生的原因以及如何合理评定, 文献[10, 11]给出了研究成果。然而, 要提出管线工程实用的 DWTT 断口评判方法仍需进行大量试验研究, 争取避免或减少无效异常断口的出现, 并能给出合理的评定。

3 结束语

随着国内现代化宽厚板轧机的新建与改造, 将开发出大量现代化工业生产急需并填补国内空白的宽厚板产品, 需要有相应的新测试技术与试验设备与之配套, 宝钢已立项开展试验研究工作, 为中国早日从钢铁大国转变为钢铁强国作出努力。

References

- 1 Steenkamp D A. $J-R$ curve testing of three-point bend specimen by the unloading compliance method. *Fracture Mechanics*, ASTM STP 945, 1988. 583 ~ 610.
- 2 Yu S F, Xie M L, Li Z Y, et al. Determination of the COD resistance curve for welded joints by unloading compliance method with a single specimen. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(1): 120 ~ 125 (In Chinese) (余圣甫, 谢明立, 李志远, 等. 卸载柔度单试样法测定焊接接头 COD 阻力曲线. *实验力学*, 1998, 13(1): 120 ~ 125).
- 3 Kobayashi T. Analysis of impact properties of A533 steel for nuclear reactor pressure vessel by instrumented Charpy test. *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, 19(1): 49 ~ 65.
- 4 Fang J, Ding F L, Wang C Z. Experimental study on the material dynamic fracture properties by instrumented Charpy impact test with single specimen method. *Journal de Physique IV France*, 2003, 110: 551 ~ 557.
- 5 Ma Q R. The dynamic fracture toughness of oil casing. *Materials for Mechanical Engineering*, 1999, 23(3): 10 ~ 11, 49 (In Chinese) (马秋荣. 石油套管的动态断裂韧性. *机械工程材料*, 1999, 23(3): 10 ~ 11, 49).
- 6 Jiang F C, Liu R T. Analysis of validity of dynamic fracture toughness measurement. *Journal of Harbin Engineering University*, 1999, 20(3): 97 ~ 101 (In Chinese) (姜凤春, 刘瑞堂. 动态断裂韧性测试方法的有效性分析. *哈尔滨工程大学学报*, 1999, 20(3): 97 ~ 101).
- 7 Bohme W. Experience with instrumented Charpy tests obtained by a DVM round-robin and further developments. E. van Walle. *Evaluating Material Properties by Dynamic Testing ESIS 20*. London: Mechanical Engineering Publication, 1996. 1 ~ 23 (ISBN 1860580041).
- 8 Fang J, Wei Y J, Sun G Q, et al. Application of instrumented impact testing in evaluating the percentage of shear fracture for fracture surface. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical testing)*, 2004, 40(2): 71 ~ 75 (In Chinese) (方健, 魏毅静, 孙国强, 等. 仪器化冲击在评测试断口剪切面积比例中的应用. *理化检验—物理分册*, 2004, 40(2): 71 ~ 75).
- 9 Lange E A, Loss F J. Dynamic tear energy—a practical performance criterion for fracture resistance. *Impact Testing of Metals ASTM STP 466*, 1970. 241 ~ 258.
- 10 Iwasaki N, Yamaguchi T, Taira T. Characteristics of drop-weight tear test on line pipe steel. *Mechanical working and steel processing*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Metallurgical Society of AIME, 1975. 22 ~ 23, 294 ~ 314.
- 11 Muraoka R, Ishikawa N, Endo S. Evaluation for abnormal fracture appearance in drop weight tear test with high toughness line pipe. *Proceeding of OMAE 2002*, Norway, Oslo, 2002. 1 ~ 8, 23 ~ 28.