

Q390 钢韧脆转变区冲击吸收功的类主曲线模型

孔祥伟^{1,2}, 李绪清^{1,2}, 兰亮云¹, 岳梦龙^{1,2}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用夏比冲击试验、主曲线法思想及冲击吸收功与断裂韧性的经验公式对 Q390 低合金高强度钢在韧脆转变区冲击吸收功的分布规律进行了研究. 通过夏比冲击试验得到的冲击试验特征温度, 求得主曲线的参考温度, 进而获得 Q390 钢的主曲线表达式. 在考虑冲击试样厚度的影响下, 结合最适用于 Q390 钢的经验公式, 最终得到 Q390 钢韧脆转变区内冲击吸收功的类主曲线分布模型. 结果表明, 该模型能很好地描述 Q390 钢韧脆转变区内冲击吸收功、温度以及累计失效概率之间的关系, 在一定程度上拓展了主曲线法的应用.

关 键 词: Q390 钢; 冲击吸收功; 主曲线; 韧脆转变区; 夏比冲击试验; 经验公式

中图分类号: TG 111.91

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)05-0663-05

Impact-Energy Principle Resembling Master Curve Model of Q390 Steel in Transition Temperature Region

KONG Xiang-wei^{1,2}, LI Xu-qing^{1,2}, LAN Liang-yun¹, YUE Meng-long^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: KONG Xiang-wei, professor, E-mail: xwkong@me.neu.edu.cn)

Abstract: The impact energy distribution law of Q390 low-alloy and high-strength steel in transition temperature region was investigated by using the Charpy impact test, the idea of the Master Curve method and the empirical correlations between impact energy and fracture toughness. The Master Curve reference temperature was obtained by the Charpy impact tests. And then the Master Curve expression of Q390 steel was regressed from the Master Curve reference temperature. Besides, considering the influence of the thickness of impact specimen, the impact-energy principle resembling Master Curve distributive model of Q390 steel in transition temperature region was finally acquired by combining the empirical correlation which was most suitable for Q390 steel. The results show that this model fairly describes the relationship among the impact energy, the temperature and the cumulative failure probability in transition temperature region of Q390 steel, and expands the application of the Master Curve method to a certain extent.

Key words: Q390 steel; impact energy; Master Curve; transition temperature region; Charpy impact test; empirical correlation

低合金高强钢是压力容器、桥梁和大型钢结构工程中常用的材料,但由于工作环境恶劣,材料突然的脆性断裂会导致许多重大事故的发生. 这些脆断事故大多发生在韧脆转变温度区和冲击严

重处,尤其是焊接接头处. 因此,对韧脆转变区的断裂行为进行预测和分析是国内外工程领域广泛关注的课题,具有重要的理论和实用意义.

对于材料的断裂破坏分析,通常有两大断裂

判据指标^[1],即冲击韧性指标(冲击吸收功)和基于断裂力学的断裂韧性指标(例如应力强度因子、 J 积分临界值或临界裂纹尖端张开位移)。其中断裂韧性指标虽然可直接用于结构完整性评定,比冲击吸收功更合理安全,但断裂韧性试验方法复杂、成本高、费时费力,有时甚至难以进行。而冲击韧性指标,即冲击吸收功,能评价材料抵抗冲击载荷的断裂能力,对材料的宏观缺陷、显微组织变化都很敏感,可揭示和反映材料的脆断倾向和程度。夏比冲击试验作为冲击吸收功最常用的测量方法,有设备简单、试样小、加工简便、试验时间短、费用低等优点,在实际生产中得到了广泛应用。

大量试验表明,韧脆转变区冲击试验数据的分布存在分散性问题,用确定性的传统断裂参量来描述材料的断裂行为是不科学的^[1]。故本课题以焊接接头的母体材料 Q390 低合金高强度钢为研究对象,利用主曲线法(一种在韧脆转变区中对断裂韧性基于统计、微观结构的分析的方法)的思想来研究韧脆转变区的断裂行为,并结合冲击吸收功与断裂韧性的关系,给出韧脆转变区间冲击吸收功的类主曲线分布模型。

1 主曲线法

20 世纪 80 年代,芬兰科学家 Wallin^[2] 首先提出使用三参数 Weibull 函数的分布来研究断裂韧性在韧脆转变区的离散性分布,随后经过芬兰技术研究中心(VTT)和美国材料试验协会(ASTM)的共同研究,于 1997 年第一次提出了 ASTM E1921—97“确定铁素体钢韧脆转变区参考温度 T_0 的标准测试方法”,即主曲线法。目前,主曲线法在描述铁素体钢在韧脆转变区的断裂韧性分布方面有了巨大的发展,已广泛应用在核电用钢或压力容器钢的断裂分析中,例如华东理工大学已经利用该技术在反应堆压力容器钢 A508^[2]、加氢反应器用钢 2.25Cr-1Mo、天然气长输管道用钢 X80 等方面进行了探索性研究。

相比于传统断裂韧性实验中需要大量的实验数据^[2-3],主曲线法的优点是只需要少量试样数据(最少为 6 个)就可以获得材料的脆性断裂特征,并能直接用于小试样的断裂韧性研究。基于最弱链统计方法和 Weibull 分布理论,同时考虑断裂韧性的分散性、尺寸效应和温度 3 个因素的影响,使三者能有效地联系起来。最后只用一个特征参量,即参考温度 T_0 的关系式来确定不同失效概

率下的断裂韧性随温度的变化关系;缺点是 T_0 求解按照标准 ASTM E1921^[4] 有单温度法和多温度法两种方法,但试验过程比较复杂,试验较多,且难以掌控。故本课题在夏比冲击试验的基础上^[5] 利用冲击试验的特征温度求解参考温度 T_0 。

2 夏比摆锤冲击试验与结果分析

2.1 试样制备与夏比冲击试验

试验所用材料为 220 mm 厚的连铸坯,经过热热轧工艺后,机加工为 13 mm 厚的钢板,板厚方向两边分别除去 1 mm 和 2 mm 的加工余量,沿纵向统一切取试样,选取轧制方向作为缺口位置的方向。利用摆锤冲击试验机按照国家标准 GB/T 229—2007《金属材料—夏比摆锤冲击试验方法》^[3] 对 Q390 钢进行冲击试验,并采用标准 10 mm × 10 mm 冲击试样,如图 1 所示。

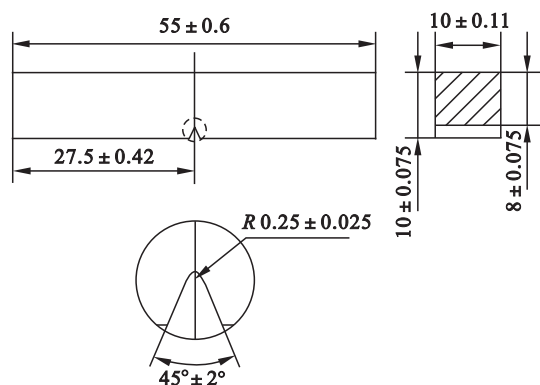


图 1 试样的尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Size of the sample

2.2 冲击试验结果分析

对于离散的冲击试验数据采用统计学方法处理后,材料冲击吸收功随温度的变化关系用双曲正切函数进行拟合,结果如图 2 所示。由此计算出冲击试验的特征温度 $t_{28J} = -49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t_{41J} = -41\text{ }^{\circ}\text{C}$,作为预测断裂韧性试验温度所需要的参量,并且根据双曲正切函数拟合曲线关系式中的 4 个参数的物理意义,可知 Q390 钢韧脆转变点的温度为 $-33.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,韧脆转变的温度宽度为 $28.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,进而估算材料的韧脆转变温度区间大约为 $-50\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

冲击试验的主要结果是得到冲击吸收功与温度间存在的变化规律,如图 2 所示,其关系曲线大致可分为 3 部分:温度较低时,冲击吸收功变化较平缓,在达到完全脆性断裂后,冲击吸收功基本不会随着温度变化,曲线表现为一段稳定的下平台区,属于脆性断裂区;温度较高时,冲击吸收功的

变化也很小,曲线表现是一段稳定的上平台区,属于韧性断裂区;在上平台区和下平台区之间是一段很陡的过渡区,称为韧脆转变温度区,在该区域内,材料的冲击吸收功变化急剧,且试验数据相差比较明显,离散特性明显,因而基于主曲线法思想研究冲击吸收功的分布规律是科学合理的. 选择图 2 关系曲线不同区域的典型冲击试样进行断口扫描分析,如图 3 所示,15℃, -30℃与 -50℃, -80℃分别对应于图 2 中的韧性断裂区、韧脆转变区和脆性断裂区. 15℃时断口存在较明显的撕裂棱和典型的韧窝分布,塑性变形较大,属于韧性断裂; -30℃与 -50℃时,随着温度降低,撕裂棱和韧窝的数量逐渐减少,断口表现出准解理的趋势,并开始具有河流状花样,说明断口特征由韧性逐渐向脆性转变; -80℃时,断口呈现出明显的

舌状花样和河流状花样,属于明显的脆性断裂. 可以看出电镜扫描的分析结果和冲击吸收功与温度变化曲线呈现的规律基本一致.

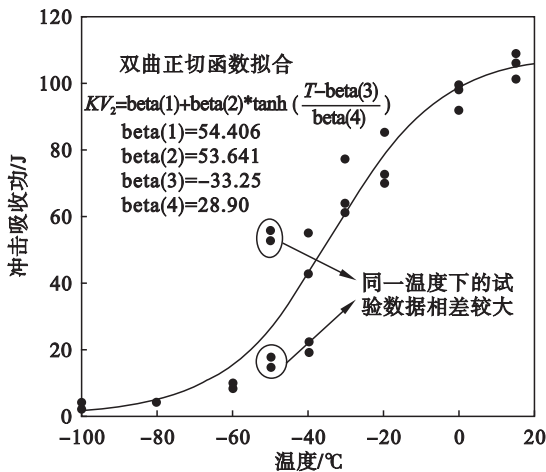


图 2 冲击吸收功与温度变化曲线
Fig. 2 Impact energy vs. temperature curve

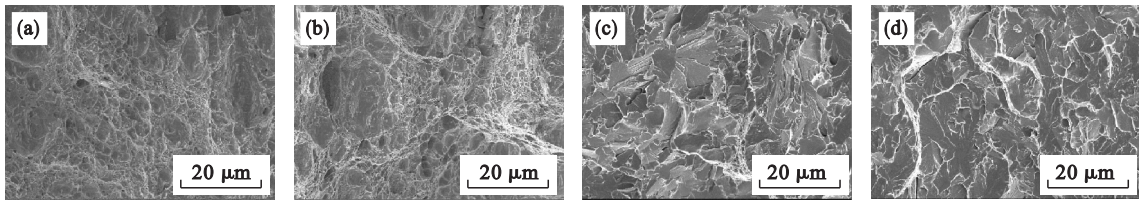


图 3 不同温度下断口微观形貌
Fig. 3 The fracture microstructure under different temperature

(a)—15℃缺口位置; (b)—-30℃缺口位置; (c)—-50℃缺口位置; (d)—-80℃缺口位置.

3 Q390 钢的主曲线求解

3.1 主曲线理论基础

主曲线的理论基础是关于解理断裂概率分布的断裂韧性统计模型,从微观的角度去分析解理断裂萌生和扩展的概率^[5],经过推导后,最终得到一个三参数 Weibull 分布的表达式,即

$$P_f = 1 - \exp\left(-\frac{B}{B_0} \cdot \left(\frac{K_I - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}}\right)^4\right). \quad (1)$$

式中: P_f 为累计失效概率; B 为所用试样的厚度, mm; B_0 为标准 1T 试样的厚度,为 25.4 mm; K_0 为当 $P_f = 63.2\%$ 时的 K_I 值, MPa; K_{\min} 为断裂韧性的门槛值.

其中当累计失效概率为 $P_f = 50\%$ 的中值断裂韧性 - 温度曲线被称为主断裂韧性曲线,即主曲线,不同材料的主曲线都可以用表达式(2)描述:

$$K_{JC(50\%)} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)]. \quad (2)$$

式中: T_0 为 1T 厚试样 K_{JC} 分布的中值断裂韧性等于 100MPa \sqrt{m} 时的温度,即主曲线参考温度; K_{JC}

为由 J 积分换算得到的等效断裂韧性,在韧脆转变区和下平台区,可与应力强度因子相互换算.

按照标准 1T 试样的形式,累计失效概率为 50% 时式(1)与式(2)相等,即可得到

$$K_{JC(P_f)} = 20 + [-\ln(1 - P_f)]^{1/4} \cdot (11 + 77 \exp[0.019(T - T_0)]). \quad (3)$$

式(3)把主曲线和断裂韧性的三参数 Weibull 分布综合在一起,在求得材料参考温度 T_0 的情况下,即可得到 1T 厚试样在任一累计失效概率时,断裂韧性与温度的关系.

3.2 主曲线参考温度的求解与验证

文献[5]根据目前主曲线法的计算标准,通过分析大量实验数据,提出在夏比冲击试验的基础上,利用小尺寸冲击试样的特征温度计算主曲线参考温度的经验公式(4)和公式(5),确定材料的主曲线.

$$T_0^{28J} = T_{28J} + 3, \quad (4)$$

$$T_0^{41J} = T_{41J} - 1. \quad (5)$$

根据冲击试验的结果分析,将求得的冲击试验特征温度代入式(4)和式(5)计算出 $T_0^{28J} = -46^\circ\text{C}$, $T_0^{41J} = -42^\circ\text{C}$. 由文献[5]可知此经验公

式 T_0 取更高的温度值,故 $T_0 = -42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过冲击试验预估的断裂韧性试验温度可以对参考温度 T_0 进行验证,给出估算断裂韧性试验温度的经验公式:

$$T = T_{\text{CVN}} + C. \tag{6}$$

式中: T_{CVN} 为冲击吸收功 28 J 或 41 J 所对应的温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为常数, $^{\circ}\text{C}$, 因试样尺寸而异, 详细数据参考文献[2]。

根据标准 1T 厚断裂韧性试样, 参考文献[2]选择 $n = 1$ 时试样尺寸对应的常数 C , 冲击吸收功为 28 J 和 41 J 时计算得到的推荐温度分别为 $-67\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相差 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与主曲线经验公式计算的参考温度 T_0 相差 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 按照 ASTM E1921 规范中 T_0 有效性判定的要求, 测试温度在 $T_0 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 满足标准要求, 说明主曲线经验公式计算的参考温度 T_0 是有效的, 主曲线法适用于 Q390 低合金高强度钢^[6]。Q390 钢的主曲线式(3)最终为

$$K_{\text{JC}}(P_f) = 20 + [- \ln (1 - P_f)]^{1/4} \cdot (11 + 77 \exp [0.019 (T + 42)]) .$$

4 冲击吸收功的类主曲线分布模型

为得到 Q390 钢韧脆转变区内冲击吸收功的类主曲线分布模型, 首先根据国家标准 GB/T 229—2007《金属材料 - 夏比摆锤冲击试验方法》^[3]要求, 冲击试样厚度为 10 mm, 在考虑厚度因素的影响下, 可得夏比冲击试验试样下 Q390 钢在任一累计失效概率时, 断裂韧性与温度的关系式(7):

$$K_{\text{JC}}(P_f) = 20 + [- \ln (1 - P_f)]^{1/4} \cdot (13.8 + 96.6 \exp [0.019 (T + 42)]) . \tag{7}$$

其次利用韧脆转变区内冲击吸收功与断裂韧性的关系式, 将式(7)中的断裂韧性变量替换为冲击吸收功, 即可得到冲击吸收功、温度以及累计失效概率三者之间的关系式。因而通过查阅文献^[7-10], 总结了以下两个适合 Q390 钢韧脆转变温度区的冲击吸收功与断裂韧性的经验公式:

$$K_{\text{IC}} = 15.5 (A_{\text{KV}})^{0.5}, \tag{8}$$

$$K_{\text{IC}}^2 / E = 0.22187 (A_{\text{KV}})^{1.5}. \tag{9}$$

经验公式中, A_{KV} 为冲击吸收功, 弹性模量 E 按合金钢材料取 206 GPa, 为找到其中最适用于 Q390 钢冲击吸收功与断裂韧性的经验公式, 根据上述求解分布模型的方法, 可得 Q390 钢韧脆转变区内冲击吸收功的类主曲线分布模型关系式

(10)、式(11)为

$$A_{\text{KV}} = [1.3 + [- \ln (1 - P_f)]^{1/4} \cdot (0.9 + 6.2 \exp [0.019 (T + 42)])]^2, \tag{10}$$

$$A_{\text{KV}} = [3 + [- \ln (1 - P_f)]^{1/4} \cdot (2 + 14.3 \times \exp [0.019 (T + 42)])]^{4/3}. \tag{11}$$

然后与冲击试验数据比较, 最终得到了基于夏比冲击试验和主曲线法思想的 Q390 钢韧脆转变区内冲击吸收功的分布曲线及其 95%, 5% 上下边界与冲击试验数据的对比图, 如图 4 所示。从图 4 中可分析出, 在整个温度定义域上, Q390 钢冲击吸收功的分布曲线并不适合韧脆转变温度区间($-50 \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$)外的冲击试验数据, 通过对比两图韧脆转变区的分布情况, 发现由 Barsom 等提出的经验式(9)求得的冲击吸收功分布曲线与冲击试验的离散性数据吻合程度更好。进而确定 Q390 钢韧脆转变区间内冲击吸收功的类主曲线分布模型关系式为式(11), 适用范围为 $-50 \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 模型很好地描述 Q390 钢在韧脆转变区间内冲击吸收功的分散性, 同时可得在任意温度下, 冲击吸收功与累计失效概率的关系, 即冲击吸收功在韧脆转变温度区间内的分布规律。

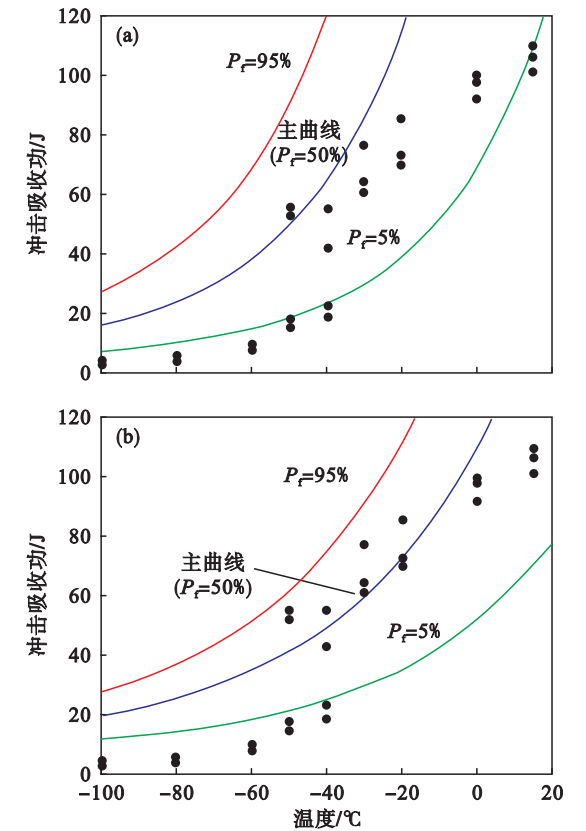


图 4 Q390 钢冲击吸收功分布曲线与冲击试验数据对比
Fig. 4 Comparison between the impact energy curves of Q390 steel and impact test data

(a) 一式(9)的冲击吸收功; (b) 一式(11)的冲击吸收功。

5 结 论

1) 通过对 Q390 钢进行夏比冲击试验,分析得到冲击吸收功与温度的关系曲线可分为上平台区、过渡区和下平台区 3 部分,分别对应断口扫描分析中的韧性断裂区、韧脆转变区和脆性断裂区,体现出 Q390 钢的韧脆转变特征.

2) 通过小尺寸冲击试样的特征温度计算主曲线参考温度的经验公式,求得参考温度 $T_0 = -42\text{ }^{\circ}\text{C}$,并从断裂韧性试验的推荐温度验证了参考温度 T_0 的合理性和有效性,证明利用此经验公式计算主曲线参考温度具有可行性,说明主曲线法适用于 Q390 钢.

3) 基于夏比冲击试验,利用主曲线法思想和冲击吸收功与断裂韧性的经验公式,最终求得 Q390 钢韧脆转变区内冲击吸收功的类主曲线分布模型,该模型表示冲击吸收功以失效概率为 50% 的曲线为中心,离散性地分布在 5% 到 95% 的上下边界之间,揭示了韧脆转变区内冲击吸收功、温度及累计失效概率之间的变化关系,在一定程度上拓展了主曲线法的应用.

参考文献:

[1] 武延民. 钢结构脆性断裂的力学机理及其工程设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2005.
(Wu Yan-min. Research for mechanism of brittle fracture of structural steel and its engineering design method [D]. Beijing:Tsinghua University,2005.)

[2] 杨帆. 基于 Master Curve 方法的 A508 - III 钢小尺寸断裂韧性试样加工关键问题的研究[D]. 上海:华东理工大学,2015.
(Yang Fan. Research on processing problems of nuclear steel

A508-III compact tension specimen based on Master Curve approach[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2015.)

[3] 中华人民共和国国家技术监督局:金属夏比缺口冲击试验方法:GB/T 229 - 1994[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
(General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials—Charpy notch impact test:GB/T 229 - 1994[S]. Beijing:China Standards Press,2007.)

[4] ASTM E1921. Standard test method for determination of reference temperature, T_0 , for ferritic steels in the transition range[S]. Annual book of ASTM standards,2002.

[5] Sattari-Far I, Wallin K. Application of master curve methodology for structural integrity assessments of nuclear components [M]. Stockholm: Statens kärnkraftinspektion, 2005:16 - 30.

[6] Lucon E. A closer look at the fracture toughness of ferritic martensitic steels [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367(4):575 - 580.

[7] Sailors R H, Corten H T. Relationship between material fracture toughness using fracture mechanics and transition temperature tests [C]// Fracture Toughness: Part II. New York:ASTM International,1972:164 - 191.

[8] Barsom J M, Rolfe S T. Correlations between K_{IC} and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range[C]// Impact Testing of Metals. New York: ASTM International, 1970:281 - 302.

[9] Asghari V, Choupani N, Hanifi M. CVN - K_{JC} , correlation model for API X65 gas pipeline [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 79:51 - 63.

[10] Chao Y J, Ward J D, Sands R G. Charpy impact energy, fracture toughness and ductile - brittle transition temperature of dual-phase 590 Steel [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(2):551 - 557.