

文章编号:1003-1995(2019)04-0001-10

# 桥梁用高强钢防断评价研究综述

陆春振<sup>1</sup>, 刘晓光<sup>2</sup>, 李永强<sup>2</sup>, 鞠晓臣<sup>2</sup>, 赵欣欣<sup>2</sup>

(1.中国铁道科学研究院 研究生部,北京 100081;2.中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所,北京 100081)

**摘要** 桥梁用高强钢的低温断裂问题一直是桥梁钢结构设计研究中的热点问题。为了深化对高强度桥梁钢断裂问题的认识,从高强钢的断裂韧性及其评估方法、现行高强钢断裂韧性研究存在的主要问题等方面,系统总结并讨论了高强桥梁钢防断评价研究的现状和发展趋势。高强钢断裂韧性是由多个复杂因素共同决定的弹塑性断裂力学问题,其破坏形式、服役工作温度、使用板厚、材料材质组织均匀性等问题较为复杂。高强钢的断裂韧性试验、防断评价方法及其适用性是钢结构构件防断设计理论的重要基础和防断问题持续深化研究需要迫切解决的问题。

**关键词** 桥梁高强钢; 断裂韧性; 夏比冲击试验; 裂纹尖端张开位移; 综述

**中图分类号** U448.36; TG407

**文献标识码** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1995.2019.04.01

随着我国国民经济的快速发展和国内钢产量的不断增加,钢材在大型基础设施上的应用越来越广泛,大量焊接结构被大范围推广使用。在过去的几十年,钢铁材料技术的迅猛发展,促进了桥梁工程设计、建设的进步,使得现代桥梁在理论设计、施工建造和理论分析方面更加注重发挥钢材轻质、高强的特性,以达到桥梁的功能性、安全性以及经济性要求。20世纪五六十年代,美国、日本等国家已经开始推广使用屈服强度在500~800 MPa的高强钢,并用于以桥梁为代表的基础设施建设中。我国的GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》<sup>[1]</sup>中包括了Q690q等高性能钢种。

随着高强度桥梁钢的应用,钢结构脆断事故屡有发生,其所造成的经济损失和人员伤亡越来越重。同时高强桥梁钢在韧性等力学性质方面不能满足现代桥梁设计需求,很大程度上制约了其在桥梁中的大规模推广使用。因此,为了有效防止桥梁钢结构在低温条件下服役发生脆性破坏,有必要开展对高强钢断裂韧性的研究及评价。

对于桥梁钢结构防断设计,我国最初沿用前苏联的选材设计思想,即采用经典力学理论,将低温冷脆设计纳入钢结构设计规范中。相比于欧、美、日等地区或国家防断选材较合理的原则和方法,这种研究思路比较片面,无法真实反映材料断裂力学性能。从京九铁

路九江长江大桥的试探性研究开始,我国科研工作者对钢桥韧性和防断设计有了初步认识,随后在桥梁设计规范的修订及芜湖长江大桥的建设中,对16Mng钢,14MnNbq钢均进行了专题研究。2006年3月,为建设我国第一座高速铁路桥——南京大胜关大桥,开展了“南京大胜关长江大桥高强度Q420q钢防断试验研究”。随后在沪通公铁两用桥建造时,开展了“Q500q钢防断试验研究”。在完成的同类桥梁钢防断研究工作的基础上,结合沪通长江大桥高速、大跨、重载的特点,对Q500q钢进行了有针对性的防断试验研究。这些研究成果为日后的防断研究提供了坚实的基础。目前,钢材防断研究虽然已发生了巨大变化,大量新方法、新理论不断涌人,深化了对钢材断裂韧性发展现状的认知,推动了钢结构防断选材评价方法的发展和技术进步,但仍有许多问题尚未解决,面临的挑战还很严峻,相关研究仍严重滞后,这也是钢材断裂韧性问题突出的根本原因。因此,总结钢结构构件断裂韧性研究现状,理清当前研究面临的主要问题和未来发展的趋势,具有积极的理论和现实意义。

## 1 桥梁用钢防断评价标准研究

国内外学者通过不同形式的试验,分析材料断裂韧性特征,建立了多种桥梁钢防断评价标准。本节扼要介绍目前国内外常用的基于夏比冲击试验、落锤试验、CTOD(Crack Tip Opening Displacement,裂纹尖端张开位移)试验、宽板拉伸试验等4种试验的桥梁钢防断评价标准研究现状。

收稿日期:2018-10-12;修回日期:2018-12-23

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0304805)

第一作者:陆春振(1991—),男,硕士研究生。

E-mail:lubridge@163.com

## 1.1 基于夏比冲击试验防断评价标准研究

夏比冲击试验是评价金属材料及其焊接接头冲击韧性最简单的方法,是一种传统力学性能试验方法。因此,对各类焊接钢结构材料,目前大都趋于以夏比 V 形缺口冲击试验结果作为材料韧性和冶金质量控制的常规验收指标。夏比冲击试验可以作为确认冶金工艺一致性验收试验中的重要一环,也可以用于定量比较韧性,从而选择韧性好的材料。夏比冲击试验的原理是通过冲击试验机扬起一定高度的摆锤,对处在简支梁状态的含有缺口的标准冲击试样进行冲击,然后测量试样断裂后的冲击吸收功。

根据 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》<sup>[2]</sup>开展夏比冲击试验,得到不同温度下钢材夏比冲击试验值,温度与对应冲击吸收的关系曲线见图 1。

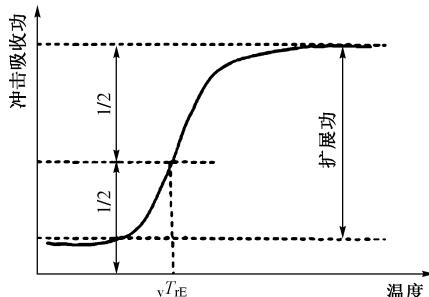


图 1 冲击吸收功-温度曲线

冲击功与温度的关系是一个重要的研究内容。大量研究表明<sup>[3-4]</sup>,随着温度降低和厚度增加,高强钢结构构件的韧性逐渐降低,表现出明显的脆性特征,破坏形式也由韧性断裂转变为脆性断裂。夏比冲击试验是最早被用于钢材断裂韧性研究的试验方法,因其简单方便、易操作等特点而被广泛所采用。赵建平等<sup>[5]</sup>在夏比冲击韧性研究中,总结分析了 Boltzmann 函数(简称 B)、Logisticl 函数(简称 L)、Gompertz 函数(简称 G)、Richards 函数(简称 R)、Weibull 函数(简称 W)、Polynomial 函数(简称 P)等 6 种回归函数方程,表 1、表 2 为采用不同函数回归时的相关系数、残差的数据比较。由表 1、表 2 可见,采用 Boltzmann 函数时残差、回归结果的相关系数优于其他方法。因此,Boltzmann 函数在冲击功与温度的关系曲线回归分析中有较好的适应性,能够明确各参数的物理意义,使得断裂韧性分析具有一定的统一性和可比性。

Boltzmann 函数为

$$A_{kv} = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(T-T_1)/T_r}} \quad (1)$$

式中: $A_{kv}$  为冲击吸收功; $A_1, A_2$  分别为冲击功拟合曲线的下平台能、上平台能; $T$  为温度; $T_1$  为韧脆转变温度; $T_r$  为转变温度区范围。

表 1 采用不同函数回归时的相关系数

试验方案	函数模型							
	B	L	G	R	W	P(6)	P(5)	P(4)
1	0.970	0.968	0.961	0.969	0.967	0.966	0.965	0.962
2	0.970	0.969	0.967	0.969	0.919	0.967	0.965	0.945
3	0.963	0.953	0.944	0.958	0.950	0.947	0.945	0.919
4	0.932	0.930	0.923	0.931	0.931	0.933	0.930	0.929
5	0.951	0.950	0.952	0.952	0.951	0.956	0.951	0.950
6	0.971	0.970	0.969	0.971	0.968	0.971	0.969	0.965
7	0.962	0.961	0.955	0.962	0.963	0.965	0.965	0.962
8	0.920	0.920	0.917	0.920	0.919	0.923	0.919	0.913
9	0.985	0.978	0.966	0.989	0.984	0.983	0.979	0.975
10	0.952	0.950	0.954	0.955	0.954	0.957	0.952	0.942

注:P(6)表示 6 阶多项式,P(5)表示 5 阶多项式,P(4)表示 4 阶多项式。下同。

表 2 采用不同函数回归时的残差

试验方案	函数模型							
	B	L	G	R	W	P(6)	P(5)	P(4)
1	4.53	4.63	5.68	4.68	4.96	5.41	5.45	5.74
2	3.19	3.24	3.48	3.33	8.73	3.84	3.91	5.92
3	4.05	4.96	5.95	4.58	5.45	6.17	6.19	8.89
4	8.03	7.98	8.76	8.13	8.15	8.51	8.63	8.37
5	6.02	5.96	5.78	5.93	6.03	5.91	6.25	6.20
6	4.42	4.29	4.55	4.39	4.83	4.70	4.89	5.27
7	5.32	5.28	6.16	5.30	5.25	5.33	5.16	5.36
8	8.02	7.77	8.07	8.01	8.13	8.30	8.45	8.73
9	2.03	2.79	4.39	1.46	2.18	2.49	2.87	3.37
10	2.42	8.25	7.54	7.71	7.80	7.86	8.37	9.89

孔祥伟等<sup>[6]</sup>在对 Q390 钢韧脆转变区冲击吸收功的研究中,在基于夏比冲击试验结果三参数 Weibull 函数分布的基础上,结合断裂失效概率分布统计模型,揭示了冲击吸收功、温度、累计失效概率之间的变化关系为

$$K_{JC(P_f)} = 20 + [-\ln(1 - P_f)]^{1/4} \times [13.8 + 96.6e^{0.019(T+42)}] \quad (2)$$

式中: $K_{JC(\cdot)}$  为由 J 积分换算得到的等效断裂韧性; $P_f$  为累计失效概率。

夏比冲击试验所获得的冲击功包括裂纹萌生功和裂纹扩展功,而试验结果无法准确反映二者的相对关系,也不能很好地反映材料的断裂行为,因此无法通过冲击试验得到真实的材料韧脆性能。夏比冲击试验多采用 10 mm×10 mm×55 mm 标准试件,因此用夏比冲击试验评价材料韧性指标有很大的局限性,表现在:①标准试件具有显著的尺寸效应,使得与实物试验所得结果往往存在严重的背离。②冲击试验局部取样的方法,改变了材料的应力状态,将钢结构构件原本的三

向应力状态转变为平面应力状态,再由冲击试验结果评价材料韧性,得到的结果有较大误差。③钢板厚度大小及沿厚度方向的位置差异对冲击韧性均匀有较大的影响<sup>[7]</sup>。

## 1.2 基于落锤试验的钢材防断评价标准研究

由于夏比冲击试验无法反映不同厚度钢板断裂韧性差异,落锤试验方法应运而生,并在船舶、压力容器、桥梁等工程领域得到大量应用。落锤试验是由美国海军研究所 Pellini 等在 20 世纪 50 年代创立,之后在美国钢材防断韧性研究中推广使用。该方法用于研究在特定温度下钢材的抗脆性断裂性能,1963 年该方法首次被 ASTM E208-17e1 Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels<sup>[8]</sup> 所采纳并经历数次修订。

落锤试验得到最主要参数指标是 NDT (Nil Ductility Transtition,无塑性转变) 温度,该温度值是判定结构材料防断设计的一个重要指标。NDT 温度是指在标准试验中标准试样发生断裂的最高温度值,能够表征含裂纹的钢材在动态加载屈服应力作用下发生脆性断裂的最高温度。落锤试验方法测定得到 NDT 温度,以此确定钢材在某一厚度下的最低使用温度,也可求得在设计应力下结构允许的最大裂纹尺寸,或由裂纹尺寸确定发生断裂的最小应力。

何成等<sup>[9]</sup>在工业汽轮机气缸用材无塑性转变温度的研究中提出:通过先进的冶炼技术和热加工工艺严格控制 P,S 元素含量,细化晶粒等手段,可有效降低钢材的 NDT 温度,以实现材料良好的断裂韧性。李国宝等<sup>[10]</sup>在管线钢落锤试验中,分析了材料偏析度、夹杂物、碳化物析出组织均匀性和组织类型对落锤试验结果的影响。结果表明:①当钢材偏析度越大,轧制时出现带状组织概率越高,而落锤试验试件取横向试样即垂直于带状组织方向,当试件受力时带状组织由于应力集中极易产生裂纹并沿带状组织边界迅速扩展,发生脆性断裂;②杂质存在产生明显的裂纹源,大大降低了材料韧性;③碳化物的析出割离集体的连续性,在落锤试验过程中碳化物与基体交界处产生应力集中,导致脆性断裂发生。

以上 2 项研究在很大程度上启发了科研人员更多地关注材料微观特性,改变以往只针对材料宏观力学性能的研究方法,使科研人员认识到真正影响材料断裂韧性的关键在于材料材质问题。这既有助于帮助科研人员更好了解材料的本质属性,又促使他们通过优化材料生产工艺获得更好的断裂韧性。

诸多研究表明<sup>[11-13]</sup>,落锤试验过程中冲击作用荷

载一部分转化为弹性应变;另一部分被材料转化成其他形式的能量,造成不可恢复的损伤。由此对冲击过程中的冲击接触力、冲击速度、被冲击试件产生的冲击变形量等参数进行研究,分析得到材料损伤和冲击能量吸收之间的关系以及相关力学行为,具有实际的意义。

综上所述,不管是夏比冲击试验还是落锤试验,桥梁用高强钢防断评价仅用某一参数或者某一项试验结果反映钢材断裂韧性是片面的。为克服防断评价指标单一、理论性差等缺点,需要综合考虑多方面因素,提出敏感性防断评价控制指标,制订并完善全面的评价标准。

## 1.3 基于 CTOD 的试验钢防断评价标准研究

断裂力学韧性参数,无论是裂纹张开位移  $\delta$ ,还是裂纹临界状态应力强度因子  $K_c$ ,都随着温度、构件厚度、加载速率变化而发生变化<sup>[14]</sup>。为了研究钢结构构件及其焊接接头断裂韧性,国内外诸多学者进行了大量重复试验,通过统计试验结果特性、分析试验数据,试图通过有效途径寻找钢结构构件断裂韧性评价方法及标准。

CTOD 能够反映材料抵抗裂纹扩展的能力,因此 CTOD 特征值可以作为钢材防断评价判定指标。CTOD 试验包含了引发断裂的 2 个重要因素——应力和裂纹尺寸,通过不同温度下试验结果可以归纳得到规律性结论,并被用于钢材防断评价研究。将材料试验测试的 CTOD 特征值  $\delta$  与工程应用时的 CTOD 允许值  $\delta_{min}$  进行比较,若所测 CTOD 特征值  $\delta \geq \delta_{min}$ ,则材料的断裂韧度合格,可以使用。工程应用时的 CTOD 允许值  $\delta_{min}$  是结构设计人员根据可靠性设计统计得到的,无法由试验确定,一般在产品标准中或者行业规范中给定。例如挪威船级社 DNV-OS-C401—2014 Fabrication and Testing of Offshore Structures<sup>[15]</sup> 规定允许  $\delta_{min}$  为 0.15 mm,美国石油协会 API RP 2Z—2005 Recommended Practice for Preproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures<sup>[16]</sup> 规定试验研究中允许最小 CTOD 值为 0.13 mm。我国规范尚未对钢材 CTOD 允许值  $\delta_{min}$  作出规定,导致许多 CTOD 试验在完成试验后依然无法判断其韧性是否满足使用要求。

从 20 世纪 90 年代开始,科研工作者开始对 CTOD 试验进行大量研究,但在如何依据 CTOD 试验结果选取钢材断裂韧性评价指标方面没有统一定论。张玉玲<sup>[17]</sup>在 14MnNbq 钢,16Mnq 钢 CTOD 试验中,根据 CTOD 试验结果得到  $P-V$  关系曲线,见图 2。图中,  $F_Q$  为最大力;  $F_c, F_u, F_m$  分别对应  $\delta_c, \delta_u, \delta_m$ 。由此可将试件破坏状态分为脆性失稳、脆性稳定失稳、韧性失稳 3 个阶段,因此 CTOD 临界值应由试件破坏状态决

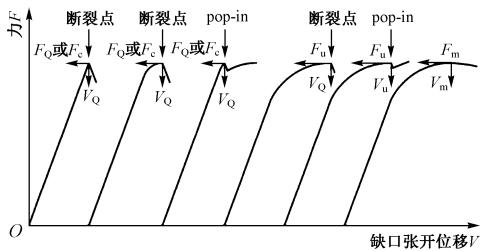


图 2 P-V 关系曲线

定。在对试验所得复杂数据进行个性因素剔除后, 得到 CTOD 计算式如下:

对于 14MnNbq 钢母材

$$\delta_B = \frac{a}{W} [0.2118 + \frac{2.766}{1 + e^{-0.0778(T+90.66)}}] \quad (3)$$

对地 16Mnq 钢母材

$$\delta_B = \frac{a}{W} [0.1299 + \frac{1.6958}{1 + e^{-0.0778(T+42.116)}}] \quad (4)$$

对于焊缝

$$\delta_W = \frac{a}{W} [0.1836 + \frac{1.3229}{1 + e^{-0.0767(T+24.19276)}}] \quad (5)$$

式中:  $\delta_B, \delta_W$  为母材和焊缝的裂纹尖端张开位移, mm;  $a$  为裂纹长度, mm;  $W$  为试样宽度, mm;  $T$  为温度, °C。

根据桥梁结构需求, 考虑桥梁构件裂纹形式、焊接残余应力、接头错位、角变形、裂纹尖锐度等因素下, 提出各种板厚不发生脆性破坏时的允许最低使用温度。

为了能够准确预测钢材的断裂破坏, 王元清等<sup>[18]</sup>提出了考虑裂纹构件扩展, 最大载荷点裂纹扩展量  $\Delta a$  比实测值偏大的钢结构构件防断设计公式。该方法依据 CTOD 试验对裂纹扩展阻力曲线的参数进行标定, 将钢材最大荷载 CTOD 特征值  $\delta_m$  定为裂纹扩展阻力, 并分析含裂纹钢构件断裂驱动力  $\delta_{\Delta a}$  与  $\delta_m$  的关系, 钢结构构件防断设计式为

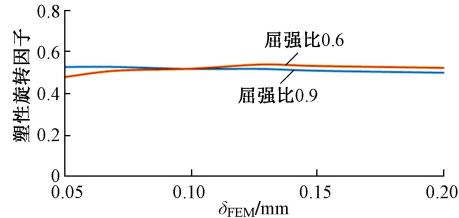
$$\delta_{\Delta a} = \frac{2\pi\sigma_y}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 (1 + 0.4\Delta a) a \leq \delta_m \quad (6)$$

式中:  $\sigma_y$  为钢材屈服强度;  $E$  为钢材弹性模量, 取 206 GPa。

有研究表明<sup>[19]</sup>, 在钢材断裂韧性 CTOD 特征值选取指标问题上一直没有定论。选取不同的特征值会直接影响结构的安全水平, 若选用启裂特征值为特征值则安全水平过高, 偏于保守; 若选用最大荷载特征值则安全水平偏低。

在 CTOD 断裂韧性测试中, 塑性铰模型用于计算 CTOD 的塑性分量, 但塑性铰模型的精度一直存在争议。为此, Yoichi 等<sup>[20]</sup>通过有限元模型分析得到塑性

旋转因子  $r_p$ 、裂纹尖端张开位移有限元计算值  $\delta_{FEM}$ , 对屈强比为 0.6, 0.9 的试件进行对比分析时发现, 在紧凑型 CTOD 试样模型中, 屈强比对塑性旋转因子的影响非常小, 在 2 种屈强比的钢模型中, 塑性旋转因子的平均值为 0.52, 见图 3。图中采用的是 C(T) 试件, 厚度  $B=25$  mm, 宽度  $W=50$  mm,  $a_0/W=0.52$ ,  $a_0$  为预制疲劳裂纹。该塑性旋转因子与传统旋转因子一致, 并且合理地用于 CTOD 计算。

图 3 塑性旋转因子  $r_p$  与  $\delta_{FEM}$  变化关系曲线

CTOD 试验前要预制试件疲劳裂纹, 且对预制疲劳裂纹的精度有着严格的要求。GB/T 21143—2014《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》<sup>[21]</sup>规定  $0.45 \leq a_0/W \leq 0.70$ 。Tomoya 等<sup>[22]</sup>在研究裂纹宽度比时提出了新的 CTOD 计算式

$$\delta_{\text{新}} = \frac{K^2}{m\sigma_y E} + fC_{Vp} \frac{r_p(W-a)}{r_p(W-a)+a+z} V_p \quad (7)$$

式中:  $K$  为应力强度因子;  $m=4.9-3.5(YR)$ ,  $YR$  为屈强比;  $f$  为 CTOD 塑性分量修正系数,  $f=Ff_{B=25}$ ,  $F$  为厚度修正系数,  $F=0.8+0.2e^{-0.019(B-25)}$ ,  $f_{B=25}=-1.4(YR)^2+2.8(YR)-0.35$ ;  $r_p=0.43$ ;  $V_p$  为缺口张开位移的塑性分量;  $C_{Vp}=C_{Vp1}+C_{Vp2}$ , 计算式为

$$C_{Vp1} = 0.3362 \frac{a_0}{W} + 0.8391$$

$$C_{Vp2} = \begin{cases} -11.95\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 4.78\frac{a_0}{W} - 0.478 & \frac{a_0}{W} < 0.2 \\ 0 & \frac{a_0}{W} \geq 0.2 \end{cases}$$

通过比较 ISO 标准公式与式(7), 计算得到  $\delta$  误差曲线, 误差较小, 能够满足工程要求。该公式可以应用于高强钢  $\delta$  值的计算。

田越<sup>[23]</sup>在针对 Q500 钢断裂韧性的研究中, 将 CTOD 试样的单边疲劳预裂纹作为缺陷, 结合 BS 7910—2013 Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaw in Metallic Structures<sup>[24]</sup>的失效评定曲线(FAD 图), 提出对桥梁钢 CTOD 值防断性能评定方法。

结合 BS 7910—2013<sup>[24]</sup>对钢板的 CTOD 值进行评定的思路如下: ① 通过试验得到钢板的 CTOD 值和对

应温度下的单轴拉伸应力-应变曲线;②根据单轴拉伸应力-应变曲线得到钢板的真应力-真应变曲线;③由真应力-真应变曲线,按照 BS 7910—2013<sup>[24]</sup>中 2B 级评定方法的规定,得到钢板的 CTOD 的失效评定曲线;④确定钢板 CTOD 值对应的载荷比  $L_r$  和断裂韧度比  $\delta_r$ ,利用失效评定曲线 FAD 对钢板的 CTOD 值进行评定。

对高强度 Q500 钢的 CTOD 值的评定可以采用 BS 7910—2013<sup>[24]</sup>的 2B 级评定方法。2B 级失效评定曲线的公式为

$$\begin{cases} \sqrt{\delta_r} = \left[ \frac{E\epsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{L_r^3\sigma_y}{2E\epsilon_{ref}} \right]^{-0.5} & L_r \leq L_{rmax} \\ \sqrt{\delta_r} = 0 & L_r > L_{rmax} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\sqrt{\delta_r}$  为断裂韧度比; $L_r$  为载荷比(或应力比); $\sigma_y$  为屈服强度或  $\sigma_{0.2}$ ;  $L_{rmax} = (\sigma_y + \sigma_u)/(2\sigma_y)$ ;  $\epsilon_{ref}$  为真应力-真应变曲线上对应于真应力  $\sigma_y$  的真应变。

当理想弹塑性材料裂纹尖端达到全面屈服后,塑性屈服区的应力与屈服应力  $\sigma_y$  相等,因此

$$L_r = \sigma_{ref}/\sigma_y = 1 \quad (9)$$

式中: $\sigma_{ref}$  为荷载作用下裂纹尖端的真实应力。

评定中,断裂韧度比  $\sqrt{\delta_r}$  为

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_l/\delta_{mat}} \quad (10)$$

式中: $\delta_{mat}$  为 CTOD 试验值; $\delta_l = K_l^2/(X\sigma_y E')$ ,  $K_l$  为 I 型裂纹实际的应力强度因子, $X$  为与裂纹尖端情况、几何约束和材料硬化能力相关的参数,一般取 1~2,为安全起见取 1; $E'$  为考虑约束条件的弹性模量,平面应力状态时  $E' = E$ ,平面应变状态时  $E' = E/(1-\nu^2)$ , $\nu$  为泊松比。

如果评定指标值落在坐标轴线与评定曲线所包围的区域内,则该缺陷可以接受;如果评定指标值落在评定曲线上或评定曲线外,则该缺陷不可以接受,见图 4。

国外已经大量运用 CTOD 特征值评价钢材母材和焊接接头的断裂韧性,相关规范中也给出了 CTOD 最小的允许  $\delta$  值,而国内在对钢材母材及其焊接接头断裂韧性评价中尚未给出 CTOD 最小的允许  $\delta$  值,导致在实际钢结构构件设计中缺少相关依据。苗张木等<sup>[25-26]</sup>在对焊接接头断裂韧性 CTOD 评定分析研究中,提出确定钢结构焊接接头 CTOD 允许值的“母材参考法”,即若焊接接头中焊缝和热影响区的特征 CTOD 值都不小于母材 CTOD 值,则焊接接头韧性合格,但大量研究证明,热影响区和焊缝试样的 CTOD 特征值都小于母材,因此“母材参考法”并不适用于焊接接头断裂韧性评定。

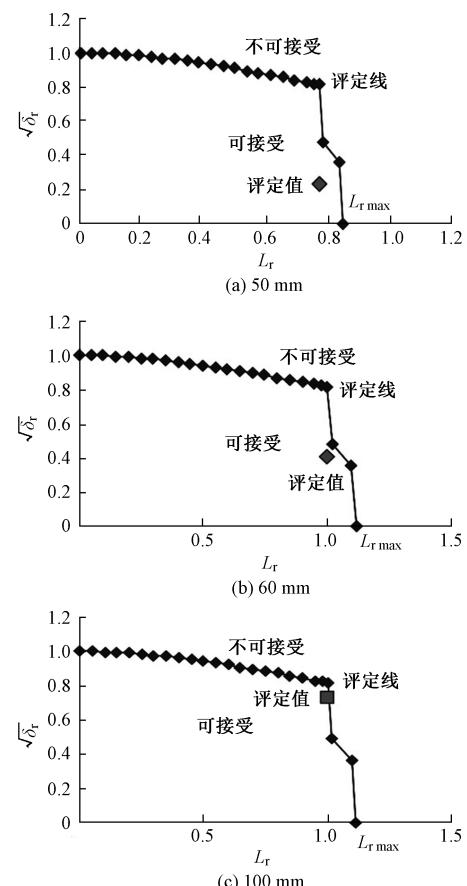


图 4 不同厚度 S420ML 桥梁钢 CTOD 值评定曲线

可靠度工程学经过长期发展,已经得到人们的重视,逐渐应用于钢结构构件的可靠度分析。该方法基于裂纹尺寸、应力状态、断裂韧性 3 方面进行分析,而对钢结构构件的断裂韧性概率分布规律的统计分析尤为关键<sup>[27-29]</sup>。王宽幅等<sup>[30]</sup>在球形容器用 16MnR 材料断裂韧性 CTOD 概率分布的研究中,对常用的正态分布、对数正态分布、双参数 Weibull 分布等 3 种形式进行分析,再用 K-S 检验法(柯尔莫哥洛夫-斯米尔洛夫检验法)检验,最后分析认为断裂韧性 CTOD 值的分布规律更适合于 Weibull 分布,见表 3。钢结构构件在实际工程中组织本身并非均匀、各向不完全同性、焊接接头金属成分、焊接方式、焊接参数以及裂纹、夹杂、气孔、未焊透等宏观缺陷都导致 CTOD 试验结果必然是分散的,因此建立断裂韧性概率分布规律模型,有助于更好地分析钢结构构件断裂韧性分布规律。

CTOD 试验作为断裂韧性指标,在工程上被广泛应用。大量研究表明,裂纹尖端张开位移由弹性分量  $\delta_e$  和塑性分量  $\delta_p$  组成。弹性分量对温度、板厚变化不敏感,而塑性分量对温度、板厚较为敏感,随温度的降低而明显减小。目前对于钢结构构件,尤其是高强桥梁钢构件的研究不够充分,试验数据体量不够大,不够完整。

表 3 断裂韧性数据统计分析结果

组数	试样数	均值	标准差	概率分布	变异系数	参数估计		K-S 检验水平 (显著性水平取 0.05)	检验结果
						$\mu$	$\sigma$		
1	16	0.156 1	0.024 2	正态分布	0.155 0	$\mu=0.156 1$	$\sigma=0.024 2$	0.181 5<0.327 3	服从
				对数正态分布	0.173 9	$\lambda=-1.870 9$	$\xi=0.172 5$	0.206 1<0.327 3	服从
				Weibull 分布	0.135 0	$\beta=8.726 9$	$\theta=0.165 8$	0.185 7<0.327 3	服从
2	16	0.182 6	0.033 5	正态分布	0.183 5	$\mu=0.182 6$	$\sigma=0.033 5$	0.133 7<0.327 3	服从
				对数正态分布	0.201 3	$\lambda=-1.720 0$	$\xi=0.199 3$	0.133 0<0.327 3	服从
				Weibull 分布	0.196 8	$\beta=5.867 6$	$\theta=0.197 3$	0.131 1<0.327 3	服从
3	16	0.108 2	0.027 4	正态分布	0.253 2	$\mu=0.108 2$	$\sigma=0.027 4$	0.200 5<0.348 9	服从
				对数正态分布	0.248 4	$\lambda=-2.254 5$	$\xi=0.244 6$	0.163 2<0.348 9	服从
				Weibull 分布	0.277 2	$\beta=4.054 0$	$\theta=0.118 8$	0.213 9<0.348 9	服从

#### 1.4 基于断裂力学 $K$ 概念的桥梁钢结构防断评判标准研究

断裂力学( Fracture Mechanics)是以钢材内存有裂纹为前提评价材料和结构强度的工学方法。钢材在发生断裂时,断裂力学以裂纹尖端周围状态的物理量作为破坏特性值处理其断裂破坏强度,即把作用应力、应变、缺陷尺寸、材料的断裂特性等处理成相关定量。20世纪30年代,由 Griffith<sup>[31-32]</sup>按能量理论用完全脆性材料(玻璃)进行研究,取裂纹尖端应力强度因子  $K$  作为断裂参数。该概念是建立在裂纹尖端的塑性变形远远小于裂纹尺寸的基础上,称为线弹性断裂力学。弹性裂纹尖端近旁的应力场可根据应力场参数  $K$  进行定义。 $K$  是裂纹尖端应力场强度的尺度,是外力、裂纹大小、弹性体形状等的函数。据此,建立  $K$  与外荷载、裂纹长度、弹性体形状等因素的关系。

刘家驹等<sup>[33]</sup>在 16Mnq 钢断裂韧性防断评判研究中,将大尺寸试件的宽板拉伸试验数据结果和小尺寸试件的夏比冲击试验数据结果进行线性回归分析,该评判方法通过对夏比冲击试验与宽板拉伸试验进行定量分析,确定二者关系表达式为

$$_1T_K^W = 0.632 2_v T_{vE}^W + 5.47\sqrt{t} - 1.0 \quad (11)$$

$$_1T_K^B = 0.518 2_v T_{vE}^B + 4.64\sqrt{t} + 12.7 \quad (12)$$

式中: $_1T_K^W$ , $_1T_K^B$  分别为宽板拉伸试验母材、焊接接头特征转变温度, $K$ ;  $v T_{vE}^W$ , $v T_{vE}^B$  分别为夏比冲击试验母材、焊接接头特征转变温度, $K$ ;  $t$  为板厚,mm。

式(11)相关系数  $R=0.902 4$ ,式(12)相关系数  $R=0.801 5$ 。

将宽板拉伸试验和夏比冲击试验用于 16Mnq 钢焊接桥梁防断适用性研究之后,对材料断裂韧性有了更深入认识,并逐步形成一套完整防断评价标准,在 Q420qE 钢、Q500q 钢防断评价中得到应用。

2006 年 8 月 4 日,京沪高速铁路上的控制性工程——南京大胜关长江大桥破土动工,主跨采用 2×

336 m 连续钢桁拱桥。南京大胜关长江大桥首次采用了 Q420qE 级高强度、高韧性与良好焊接性能的新型钢材,针对 Q420qE 钢断裂韧性,利用断裂力学  $K$  概念通过全厚度深缺口宽板拉伸试验、夏比 V 形缺口冲击试验,将影响桥梁钢结构断裂韧性的焊接结构工艺、接头性能、结构设计应力、构件厚度、结构的加载速率、临界裂纹尺寸、最低环境温度等因素全面、系统地归纳为结构断裂驱动力与断裂抗力的函数,并定量地确定断裂驱动力与断裂抗力的表达式。

桥梁结构断裂驱动力是通过断裂力学概念进行表述,断裂驱动力为

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a/2} \quad (13)$$

式中: $K_I$  为裂纹尖端应力场的应力强度因子; $Y$  为结构因子; $\sigma$  为结构工作应力。

结构材料的断裂抗力由深缺口宽板拉伸试验测定的  $K_c$  值表示,是包含了温度  $T$ 、冲击试验 1/2 上平台能温度, $T_{vE}$ 、板厚  $t$  等影响因素的结构材料断裂抗力函数。

由此得到 Q420 钢母材及其焊接接头的断裂抗力表达式  $K_c$  以及驱动力表达式  $K_I$ ,根据断裂力学判据  $K_I \leq K_c$  和计算、试验结果确定该桥 Q420qE 高强度结构钢选材标准。其防断选材思路为:①结构母材及其焊缝的断裂抗力通过深缺口宽板拉伸试验测定断裂韧性  $K_c = f(T, _1T_k)$ ;②将结构基材及其焊缝通过 V 形缺口试验测定的冲击韧性值,建立  $E_r = f(T, v T_{vE})$ ;③通过宽板试验  $K_c$  和冲击试验  $E_r$ ,建立特征温度关系式,把宽板试验  $K_c$  值表示为温度  $T$ ,材料冶金因素  $v T_{vE}$ ,加载速率  $\varepsilon$ ,板厚  $t$ ,裂纹尖锐度修正系数  $F$  等影响因素在内的结构材料抗断能力函数  $K_c = F \cdot f(T, v T_{vE}, \varepsilon, t)$ ;④由杆件内应力  $\sigma$ ,临界裂纹长度  $a$ ,结构几何因素  $Y$ ,则可建立结构断裂驱动力  $K_I$ [即式(13)],由断裂力学判据  $K_I \leq K_c$  能确定结构在各种环境条件下和设计条件下满足防断要求的材料极限使用厚度。

通过深缺口宽板拉伸试验与夏比 V 形冲击试验,

将钢材断裂抗力与板厚、温度相联系得到  $K_c$ , 利用理论计算得出 Q420 钢断裂驱动力  $K_1$ 。当  $K_c \geq K_1$  时, 满足防断 Q420 钢极限使用厚度<sup>[34-37]</sup>。

结构中的构件发生失稳断裂时, 临界裂纹尺寸主要与构件的形式尺寸、设计承载、断裂韧性、服役环境温度湿度等因素相关, 结构每个部位对钢构件的韧性要求也不同, 因此不同部位的裂纹临界长度也不同。但是在工程设计分析中, 经常统一裂纹临界长度, 因为这个临界裂纹长度非钢结构构件允许存在的使用裂纹长度, 而是作为评判钢结构构件断裂韧性的重要缺陷参数。临界裂纹过长会导致材料韧性要求过高; 临界裂纹过短则导致安全性较低。因此, 曲占元<sup>[38]</sup>在分析桥梁钢断裂驱动力时选用  $a = 50 \text{ mm}$  作为临界裂纹尺寸; 钱维平<sup>[39]</sup>在对焊接桥梁结构 H 形结构进行简化分析时, 选用临界裂纹长度  $a = 60 \text{ mm}$ 。

钢结构构件大多在复杂环境下服役, 在整体设计中既要考虑整体结构, 又须考虑局部结构承载各种外力的能力。蒋和岁等<sup>[40]</sup>在材料韧性要求作为断裂控制准则中, 采用转变温度、断裂力学  $K$  概念建立断裂失效极限状态方程, 方程式为

$$R = 1 - P_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_s(x) dx \quad (14)$$

式中:  $R$  为极限状态函数概率可靠度;  $F_R(x)$  为断裂抗力概率分布函数;  $f_s(x)$  为断裂驱动概率密度函数。该表达式准确性尚需大量数据验证。

钢结构焊接构件中存在的内应力是驱动结构断裂的主要因素。焊接残余应力是其中重要组成部分, 焊接部位有缺陷存在时, 必须考虑残余应力, 残余应力的大小取决于焊接部位的形状、缺陷所在位置, 可表示为<sup>[39]</sup>

$$\sigma_R = \beta \sigma_s \quad (15)$$

式中:  $\sigma_R$  为焊接残余应力;  $\beta$  为产生断裂时的焊接残余应力系数, 取  $\beta = 0.6$ <sup>[41]</sup>;  $\sigma_s$  为材料的名义屈服强度。

## 2 桥梁用高强钢防断性能研究存在的问题

发达国家的桥梁建设早已步入以钢结构桥梁为主的发展阶段, 而受限于社会经济发展水平和建设发展阶段, 钢结构桥梁在中国桥梁工程总数中所占的比例不足 1%, 远低于欧美发达国家<sup>[42]</sup>。继 Q420q 钢、Q500q 钢等高强钢推广使用之后, Q690q 钢也逐步进入实桥安装使用阶段。钢材在强度提高的同时, 也伴随一系列问题, 如塑性降低、屈强比增加等, 对于铁路桥梁这种动荷载很大的结构, 可能带来安全储备降低的风险。GB/T 714—2015 已经将 Q500q 钢、Q690q 钢

纳入其中; TB 10091—2017《铁路桥梁钢结构设计规范》<sup>[43]</sup>将 Q500q 钢作为新材料应用到铁路桥梁设计中; JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》<sup>[44]</sup>中最高强钢材仍为 Q420 钢。新型桥梁钢无法广泛应用, 主要有以下几个原因: ①由于生产力和生产水平导致桥梁用高强钢质量稳定性较差; ②新型钢材性能参数匮乏, 试验数据不够充足, 设计人员不敢贸然在设计中采用新型钢材; ③配套焊接工艺技术标准无法满足新型钢材焊接需求<sup>[45-46]</sup>。

目前, 针对桥梁用高强钢防断选材的研究呈现出多元化发展的特征, 逐步走向成熟完善。各种试验方式及评价方法从不同的角度提出材料断裂韧性规律, 但是其中依然存在诸多亟待解决的问题。

夏比冲击韧度本质上是一个衡量钢材抗冲击能力的指标, 不能全面反映母材与焊接接头的真实韧度。由于冲击试验不能把缺口尖的“开裂”和“扩展”区分开, 因而较难从理论层面解释焊接接头的失效机制。另外夏比冲击试验取样受限, 规定以  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$  的 V 形缺口试样为标准试样。这一规定尺寸对于部分厚度是准确指标, 但对于整体厚度未必准确, 容易造成以偏概全。夏比冲击试验方法简便, 费用较低, 能大批量进行试验。但是, 仅仅依靠夏比冲击韧性, 理论上依据不足, 无法真正反映材料抗断裂的能力。因此, 必须通过采用断裂力学的方法, 由合适的模型推导建立力学关系。

为了克服冲击试验带来的局限性, 研究人员提出落锤试验。采用“全厚”试样的落锤试验, 所得到的 NDT 温度其为与板厚无关的材料常数。由 NDT 温度建立的断裂分析图( Fracture Analysis Diagram, FAD )可以确定应力、温度和裂纹尺寸三者之间的定量关系。冲击试验、落锤试验等传统判据都是在特定试验条件下得到, 缺乏对实际工况条件的模拟, 所以改变试验环境条件容易导致结果偏差。

CTOD 值能够直接反映裂纹尖端材料抵抗开裂的能力, 是描述裂纹体状态的一个断裂力学参数。试验中测定的 CTOD 值越大, 表示裂纹尖端材料的韧性越好, 反之 CTOD 值越小, 韧性就越差。国际上厚板焊接结构的 CTOD 试验方法较为成熟, 而且 CTOD 作为标准材料断裂韧度的指标而广泛应用于结构设计规范。国内的类似应用比较少见, 而将 CTOD 试验结果与结构完整性评估技术相对接在国内外仍处于试验研究状态。

20 世纪 50 年代, 由于断裂力学的发展,  $K$  概念在防断选材中被大量应用于工程实践, 依据断裂力学判据  $K_t \leq K_c$  确定结构在各种环境条件下满足防断要求

的材料极限使用厚度。但是断裂韧性  $K_c$  存在一定的局限性:断裂韧性  $K_c$  的概念及计算方法仅限于线弹性断裂及小范围塑性断裂范畴,对于塑性变形程度较大的弹塑性断裂实用性差,当材料状态处于韧脆转变曲线上平台区间时,断裂韧性  $K_c$  将失去意义,其与冲击功不一定满足相关性方程。

在高强钢断裂问题上,船舶领域同样面临着与桥梁相似的问题,船体断裂事故屡有发生。为了解决大型船舶易发生断裂事故的问题,国际船级社协会(IACS)UR S33 *Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates*<sup>[47]</sup> 和中国船级社指导性文件 GD 13—2016《船用高强度厚板检验指南》<sup>[48]</sup> 采用梯度温度场型(简称“梯温型”)ESSO 试验和双重拉伸试验等宽板拉伸止裂试验方法。通过该类梯温型宽板拉伸止裂试验,测定钢板在一定应力水平下的止裂温度  $T_k$  或一定温度下的止裂韧性  $K_{ca}$ ,将  $T_k$  或  $K_{ca}$  作为判定钢板止裂性能的物理参数。使用具有良好断裂韧性和抑制脆性裂纹传播特性的钢材实现抗脆性断裂的目标。

目前,针对船用钢材断裂评价体系的 ESSO 试验、双重拉伸试验采用大尺寸试件,虽然试验结果与实际结构性能较为接近,但试验操作复杂,费用高昂。此外,其对试验设备要求较高,试验周期长,效率低。钢板断裂韧性沿厚度方向并不均匀,表面性能优于中心性能,纵向性能优于横向性能。这使得 ESSO 试验和双重拉伸试验并不宜用于桥梁钢防断选材评价试验研究。

### 3 桥梁用高强钢防断性能研究的发展方向

桥梁用高强钢防断控制最初依靠强度控制,后来则依托断裂力学理论性分析<sup>[31]</sup>。断裂韧性研究经过了半个多世纪的发展,科研人员试图通过不同形式的试验或有限元模拟,建立半经验半理论公式分析模型,以此解释和评定钢材的断裂韧性,但此类研究无法真实反映钢结构构件实际所处环境、受力状态、材料自身组织类型。这说明对钢材断裂韧性的研究还不够充分,也启发科研人员转换思路。

在钢材冶炼和轧制过程中,为了达到良好的断裂韧性,通常控制金属组织以得到多变型铁素体和针状铁素体组织,同时还应细化钢材表面晶粒组织,使有效粒径较小。高强钢主要通过细化晶粒作为强化机理手段,既可以提高低温冲击韧性,又可以满足断裂韧性要求。钢铁冶炼工艺技术、控温控轧技术和钢材微合金化技术的开发应用成为改善优化高强钢低温下断裂韧性的重要途径与未来发展方向。

近年来,对材料断裂过程的研究逐渐呈现出由宏

观向微观过渡发展的趋势,使得宏微观断裂力学开始被应用于材料断裂韧性研究中。这得益于宏微观研究的广泛应用及试验、理论与技术的长足进步。谭鸿来<sup>[49]</sup>通过建立材料断裂韧性与加载速率关系的临界加载速率理论,利用宏微观结合的方式解释了材料的断裂行为。钢结构构件的断裂是由一系列内部因素和外部因素共同作用引发的,因此断裂韧性试验分析结果呈现出明显的分散性、概率性和随机性,从而使用概率断裂力学研究方法是重要的发展方向<sup>[50]</sup>。

### 4 结论和建议

钢材断裂韧性是衡量钢结构设计和制造水平的重要标志。钢结构构件材料的韧性是保证不发生脆性断裂的关键指标。寻找合理的防断设计评价标准是钢材性能研究的基础课题,可保证钢结构在服役阶段全寿命周期性能与成本最优。本文重点介绍了高强钢结构构件断裂韧性的试验研究、断裂韧性评估方法等方面的研究现状和发展方向。主要结论和建议如下:

1) 断裂韧性试验研究是桥梁钢结构构件断裂韧性问题的重要基础。现行的试验研究主要有夏比冲击试验和落锤试验,虽然在一定程度上能够反映材料的断裂性能,但该类断裂韧性试验的试样形状、试样尺寸、加载工况、试验设备等很难准确反映构件性能,与实际情况有偏差。因此,应在现有研究的基础上,建立相应的理论数学模型,推动该类断裂韧性试验研究理论体系的完善,并为未来更高强度等级钢如 Q690q 钢等新型材料的断裂韧性试验奠定坚实的理论基础。

2) 高强钢断裂力学参数评价研究是防断研究的最终目标。主要内容包括:建立钢结构构件试验结果数据库;选取适当的分析方法和力学特征指标反映钢材断裂韧性;通过统计分析建立并逐步完善力学特征值与断裂韧性的关系;建立便于工程应用的断裂韧性评估方法;提出适合中国国情的断裂韧性设计方案;发展基于可靠度理论的钢结构构件断裂韧性评估方法。

随着试验的开展和研究的更加深入,以及新试验检测设备和先进的制造加工工艺所提供的技术支撑,对断裂韧性特点也将有全新的认识。对钢材断裂韧性问题进行深入研究,将为后续更高强度等级材料的断裂韧性评价奠定基础。

### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标

- 准化管理委员会.金属材料夏比摆锤冲击试验方法:GB/T 229—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [3]肖光春,荆洪阳,徐连勇,等.预应变下高强结构钢低温断裂性能[J].焊接学报,2011,32(3):41-44,115.
- [4]肖光春,荆洪阳,徐连勇.预应变对高强结构钢低温断裂韧性的影响[J].天津大学学报,2011,44(4):303-307.
- [5]赵建平,张秀敏,沈士明.材料韧脆转变温度数据处理方法探讨[J].石油化工设备,2004,33(4):29-32.
- [6]孔祥伟,李绪清,兰亮云,等.Q390钢韧脆转变区冲击吸收功的类主曲线模型[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(5):663-667.
- [7]王元清,周晖,石永久,等.基于冲击韧性的钢结构厚板防止脆性断裂的选材方法[J].钢结构,2011,26(7):43-46.
- [8]ASTM. Standard Test Method for Conducting Drop-weight Test to Determine Nil-ductility Transition Temperature of Ferritic Steels: ASTM E208-17e1 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [9]何成,刘中华,周黎明,等.工业汽轮机汽缸用材无塑性转变温度的研究[J].大型铸锻件,2016(3):13-14,17.
- [10]李国宝,徐洪庆,彭海红.管线钢落锤性能的影响因素分析[J].宽厚板,2006,12(6):5-8.
- [11]邱自学,袁江.落锤式冲击试验机及其多参数测试系统[J].电子测量与仪器学报,2006,20(1):52-55.
- [12]薛钢,宫旭辉,苏洋,等.Q500钢焊接接头断裂韧性 $K_c$ 与冲击功 $KV_2$ 的相关性统计规律[J].材料开发与应用,2016,31(4):1-6.
- [13]田越.Q500qE高性能桥梁钢防断性能试验研究[J].桥梁建设,2016,46(1):65-69.
- [14]苏洋,易伦雄,马建坡,等.Q500钢焊接接头断裂韧性 $K_c$ 的表达式[J].材料开发与应用,2015,30(3):1-5.
- [15]Det Norske Veritas. Fabrication and Testing of Offshore Structures: DNV-OS-C401—2014 [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2014.
- [16]American Petroleum Institute. Recommended Practice for Reproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures: API RP 2Z—2005 [S]. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2005.
- [17]张玉玲.大型铁路焊接钢桥疲劳断裂性能与安全设计[D].北京:清华大学,2005.
- [18]王元清,周晖,石永久,等.基于裂纹扩展阻力曲线的钢结构构件断裂行为评估模型[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(5):595-600.
- [19]苏本伟,郑加,李旭光.用宽板试验研究铁路钢桥的抗断裂性能[J].铁道学报,1995,17(1):85-92.
- [20]YOICHI K, TOMOYA K. Evaluation of Rotational Deformation in Compact Specimens for CTOD Fracture Toughness Testing [J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 5: 286-293.
- [21]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法:GB/T 21143—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [22]TOMOYA K, TETSUYA T, YOICHI K, et al. Applicability of New CTOD Calculation Formula to Various  $a_0/W$  Conditions and  $B \times B$  Configuration [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 179: 375-390.
- [23]田越.CTOD与BS 7910结合的桥梁钢断裂韧度评定方法[J].中国铁道科学,2010,31(2):40-44.
- [24]British Standards Institution. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaw in Metallic Structures: BS 7910: 2013[S]. London: British Standards Institution, 2013.
- [25]苗张木,陶德馨,杨荣英,等.焊接接头韧度CTOD评定的适用性与允许值研究[J].机械强度,2006,28(1):150-154.
- [26]苗张木.厚钢板焊接接头韧度CTOD评定研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.
- [27]陈国明,许发彦.海洋平台用A633钢焊接接头的概率断裂韧性[J].石油机械,1999,27(12):21-24.
- [28]陈国明,王维东,许发彦,等.海洋平台用钢焊接接头断裂韧性概率特性的试验研究[J].石油大学学报(自然科学版),1996,20(2):54-58.
- [29]许亮斌,陈国明.基于模糊贝叶斯理论更新概率可靠性模型[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):53-56.
- [30]王宽福,高红俐.球形容器用16MnR材料断裂韧性(CTOD)概率分布的研究[J].理化检验(物理分册),1994,30(3):24-27.
- [31]EWALDS H L, WANHILL R J H. 断裂力学[M].朱永昌,浦素云,译.北京:北京航空航天大学出版社,1988.
- [32]LAWN B. 脆性固体断裂力学[M].龚江宏,译.北京:高等教育出版社,2015.
- [33]刘家驹,蒋和岁,严明君,等.16Mnq钢用于焊接桥梁的防断适用性研究[J].材料开发与应用,1994,9(2):1~6,31; 1994,9(3):1-7; 1994,9(4):1-7.
- [34]曲占元,马建坡,徐科.Q420桥梁钢及其焊接接头的断裂抗力分析[J].机械强度,2008,30(4):668-672.
- [35]梅大鹏,易伦雄.Q420qE高强度结构钢的焊接接头力学性能标准[J].桥梁建设,2010(5):20-23.
- [36]钱维平.14MnNbq钢用于焊接桥梁的防断适用性[J].材料开发与应用,2001,16(4):5-9.
- [37]钱维平,李刚,马建坡.14MnNbq钢及其焊缝的断裂抗力表述[J].材料开发与应用,2000,15(3):33-36.
- [38]曲占元.桥梁钢及其焊接接头的断裂驱动力分析[J].四川兵工学报,2009,30(11):93-95.
- [39]钱维平.焊接桥梁结构的断裂驱动力分析[J].材料开发与应用,2001,16(5):16-19.
- [40]蒋和岁,刘家驹,严明君.舰船结构防断选材可靠性分析方法的探讨[J].舰船科学技术,1995(1):22-25.
- [41]The Japan Welding Engineering Society. Method of Assessment for Flaws in Fusion Welded Joints with Respect to Brittle Fracture and Fatigue Crack Growth: WES 2805 [S]. Tokyo: The Japan Welding Engineering Society, 2011.

- [42] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30, 39.
- [43] 国家铁路局. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [44] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [45] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 碳素结构钢: GB/T 700—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [46] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2008
- [47] International Association of Classification Societies. Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates: UR S33 [S]. London: International Association of Classification Societies, 2015.
- [48] 中国船级社. 船用高强度钢厚板检验指南: GD 13—2016 [S]. 北京: 中国船级社, 2016.
- [49] 谭鸿来. 材料断裂过程的宏微观研究[D]. 北京: 清华大学, 1996.
- [50] 段权, 程光旭, 姜培正. 16MnR 压力容器用钢断裂韧性的概率模型[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 71-74, 93.

## Research Review on Evaluation of Fracture Resistance of High Strength Steel for Bridges

LU Chunzhen<sup>1</sup>, LIU Xiaoguang<sup>2</sup>, LI Yongqiang<sup>2</sup>, JU Xiaochen<sup>2</sup>, ZHAO Xinxin<sup>2</sup>

(1. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co. Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract** The low-temperature fracture problem of high-strength steel for bridges has always been a hot topic in the research of bridge steel structure design. In order to deepen the understanding of the fracture problem of high-strength bridge steel, the present situation and development trend of high-strength bridge steel fracture evaluation research were systematically summarized and discussed from the aspects of fracture toughness of high-strength steel and its evaluation methods, and the main problems in the study of fracture toughness of high-strength steel. The fracture toughness of steel is an elastoplastic fracture mechanics problem determined by a number of complicated factors. Furthermore, the failure mode, service temperature, plate thickness and uniformity of material are more complicated. Fracture toughness test, evaluation method of steel fracture prevention and its applicability are the important basis of the theory of fracture prevention design of steel member. Also, they are the urgent research topics of sustainable deep research of the fracture prevention.

**Key words** High strength steel for bridge; Fracture toughness; Charpy impact test; Crack Tip Opening Displacement (CTOD); Review

(责任编辑 李付军)