

研究简报

## 两种缺口 Q420 钢的低温断裂韧度\*

### FRACTURE TOUGHNESS FOR Q420 STEEL NOTCHED PLATE AT LOW TEMPERATURE

张亚军\*\* 马建坡

(洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471039)

ZHANG YaJun MA JianPo

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

**摘要** 结合工程应用背景, 采用 Q420 桥梁用钢板, 加工成  $W/B = 2$ 、 $S/W = 5$  的非标准三点弯曲试样, 通过线切割和线切割后预制疲劳裂纹两种方式得到相同长度的初始缺口, 对其  $-30$  的低温断裂韧度进行试验研究, 分析比较两种缺口试样断裂韧度测试条件值  $K_{Ic}$  和强度比  $R_{\sigma}$ , 评价具有以上两种缺口时材料对脆性失稳扩展的不同抵抗能力, 并求得相应的缺口修正系数; 最后, 从试样的  $P-V$  曲线图和断口分析其中的原因。试验分析结果为 Q420 钢的具体工程应用提供依据。

**关键词** 非标三点弯曲试样 缺口 断裂韧度条件值 强度比 缺口修正系数

**中图分类号** TG115.57

**Abstract** Based on engineering application background, the non-standard three-point bend specimens in bridge steel Q420 with the dimension of  $W/B = 2$ ,  $S/W = 5$  were machined. Two types of original notch with uniform length were obtained by spark machining then with or without fatigue cracking afterwards respectively. Test study on this metallic material at the temperature of  $-30$  degree was performed. Qualification value  $K_{Ic}$  of fracture toughness and strength ratio  $R_{\sigma}$  of Q420 steel plate were compared and analyzed. Different resistances against unstable brittle growth with the two types of notch were assessed and the corresponding notch correcting coefficients were calculated. Finally, the reasons why they are different were discussed through analyzing  $P-V$  curves and fracture surfaces. The results would provide reference for further engineering usage of Q420 steel.

**Key words** Non-standard three-point bend specimen; Notch; Qualification value of fracture toughness; Strength ratio; Notch correcting coefficient

Corresponding author: ZHANG YaJun, E-mail: zhangyj309 @63. com, Tel: +86-379-67256257, Fax: +86-379-64913642

Manuscript received 20070109, in revised form 20070703.

## 1 引言

工程中常见的裂纹尖端一般是比较尖锐的, 在外力作用下很容易扩展, 尤其对于高强度材料, 一旦达到临界裂纹长度值, 构件便会迅速脆性失稳断裂, 有很大的危险性。由于平面应变断裂韧度对试样厚度的严格要求及预制疲劳裂纹的时间相对较长, 在试验室进行断裂韧度试验所采用的试样, 有时往往直接用钼丝线切割成缺口作为近似的裂纹, 来进行断裂韧度试验及材料评价, 如文献[1][2]<sup>33-36</sup>。然而, 采用钼丝线切割的缺口尖端相对比较钝, 和工程中常见的尖锐裂纹尖端并不一致。因此, 研究线切割切制缺口和模拟工程实际预制尖锐裂纹时材料断裂韧度的差异及定量关系, 很有实际工程意义。本

文采用 Q420 桥梁用钢板, 研究低温环境下具有两种缺口时材料的断裂韧度, 并通过试验数据统计处理, 计算出线切割缺口对尖锐裂纹的缺口修正系数, 为工程设计及应用提供依据。

## 2 试验

### 2.1 试验材料

试验材料为厚度 32 mm 的 Q420 钢板, 热处理状态为控扎 + 控冷。试验材料的常规力学性能见表 1, 各参量的试验方法及相应符号见文献[3]<sup>1-15</sup>。

### 2.2 试样

去掉钢板两个表面的氧化皮, 将 32 mm 厚的 Q420 钢板加工成厚度  $B$  为 30 mm、宽度  $W$  为 60 mm、长度  $L$  为 350 mm 的三点弯曲 S(E) (three-point bend specimen)

\* 20070109 收到初稿, 20070703 收到修改稿。

\*\* 张亚军, 男, 1972 年 8 月生, 河南省新乡市长垣县人, 汉族。中国船舶重工集团公司第七二五研究所高级工程师, 疲劳与断裂试验室主任, 硕士, 研究方向为金属材料的疲劳与断裂性能研究, 发明专利一项, 发表论文 20 余篇。通信地址: 河南省洛阳市 023 信箱 6 分箱。

试样。考虑到试样尺寸相对较大,且在低温环境中进行试验,为尽量减少由于试样发生脆性失稳断裂而可能对试验夹具及试验机造成损坏,跨距  $S$  取  $5W$  (即试样为非标准三点弯曲试样<sup>[4]18-21</sup>),这不会对两种缺口断裂韧度的相对度量结果造成影响。试样共加工 8 件,其中 4 件(编号为 1、2、3、4)采用直径为 0.18 mm 的钼丝线切割一定长度缺口后,再用疲劳试验机预制指定长度的疲劳裂纹模拟实际工程中的初始尖锐裂纹。另四块试样(编号为 5、6、7、8)用钼丝直接切到和以上四块试样具有相同长度的缺口,具体尺寸见图 1。试样裂纹面取向均沿轧制方向。

表 1 Q420 钢的常规力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of Q420 steel

抗拉强度 Tensile strength $R_m$ /MPa	下屈服强度 Lower yield strength $R_{dL}$ /MPa	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A$ (%)	- 40 °C V 型缺口冲击功 Impact work for V-notch at - 40 °C $A_{KV}$ /J
635	555	232	54.5

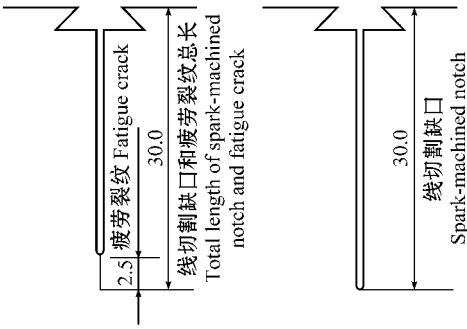


图 1 试样缺口形状

Fig. 1 Profiles of specimen notch and crack

2.3 试验设备与低温装置

采用全数字化 TestStar IIs 控制的 MTS810-100 kN 电液伺服材料试验机预制试样 1、2、3、4 的疲劳裂纹,采用 50 t 的 PWS-50 型电液伺服材料试验机进行断裂韧度试验。

考虑到试验材料服役过程中可能会遇到的极限低温条件,试验在 - 30 °C 的低温环境中进行。采用笔者专门为大型 CTOD (crack-tip opening displacement) 试验设计用过的低温装置进行低温断裂韧度试验<sup>[5]</sup>。

2.4 试验方法

试验参考 GB/T 4161—1984“金属材料平面应变断裂韧度  $K_{IC}$  试验方法”<sup>[4]8-12</sup> 进行。考虑到试验所采用的 SE(B) (three-point bend specimen) 试样为非标准型的,没有采用设备提供的标准试样平面应变断裂韧度试验程序,而整个试验过程均按以上标准提供的原理和方法进行。如果试样的厚度无法满足平面应变条件,可以测定相对度量材料韧性的参量,即试样的强度比

$R_{sb}$ 。试验采用载荷控制,加载速率为 0.4 kN/s,换算出的对应应力强度因子速率为  $0.596 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 。

平面应变断裂韧度的条件值  $K_{Ic}$  按公式(1) 计算

$$K_{Ic} = (P_q S / BW^{3/2}) f(a/W) \tag{1}$$

其中,  $S = 5W$ ,  $f(a/W)$  可根据有效的  $a/W$  通过查表求得<sup>[4]20-21</sup>。

试样的强度比按公式(2) 计算

$$R_{sb} = 6 P_{max} W / B (W - a)^2 R_{p0.2} \tag{2}$$

式中,  $R_{p0.2}$  表示规定非比例伸长率为 0.2 % 时的应力,其试验方法参考文献[3]<sup>10-11</sup>。考虑到本文研究的材料具有明显的下屈服点  $R_{dL}$ ,因此用  $R_{dL}$  代替公式(2) 的  $R_{p0.2}$  计算试样的强度比。

平面应变断裂韧度  $K_{Ic}$  的有效条件判定依据式

(3)

$$P_{max} / P_q \geq 1.10 \text{ 且 } B, a \geq 2.5 (K_{Ic} / R_{p0.2})^2 \tag{3}$$

3 试验结果及分析讨论

根据以上试验方法及公式(1) ~ (3),计算得到相应的试验结果,对平面应变断裂韧度的条件值  $K_{Ic}$  进行适当的统计处理,并计算出其标准离差和线切割缺口对疲劳尖锐缺口的修正系数,见表 2。

由表 2 可见,根据平面应变断裂韧度的有效判定条件式(3),本试验中完成的八块试样,均有  $P_{max} / P_q > 1.10$  (材料脆性倾向不够显著),  $2.5 (K_{Ic} / R_{p0.2})^2 > B = 30 \text{ mm}$  (试样尺寸不满足平面应变状态),因此,8 个试样均没有有效的  $K_{Ic}$  值。但是,试验所获得的  $K_{Ic}$  的条件值  $K_{Ic}$  在这里亦即  $K_{Ic}$ ,其大小也能反映给定厚度下材料的抗断能力<sup>[6]</sup>,同时考虑到工程中对 32 mm 厚度 Q420 钢的大量应用需求,这里通过比较分析试验所获得的  $K_{Ic}$  及试样强度比  $R_{sb}$  的大小关系,定量评价两种方法获得相同初始缺口长度时材料对裂纹扩展的抗力。

表 2 中的计算数据表明,无论是  $K_{Ic}$  的条件值  $K_{Ic}$ ,还是用来相对度量材料韧度的试样强度比  $R_{sb}$ ,机加工缺口试样的这两个参数比疲劳尖锐缺口试样的都高,这说明如果直接采用机加工缺口试样获得的试验结果在工程中进行设计应用,将是偏于危险的。

从表 2 试验数据可进一步计算,机加工缺口试样的强度比均值  $R_{sb均}$  与平面应变断裂韧度  $K_{Ic}$  的条件值  $K_{Ic均}$  的均值分别是疲劳尖锐缺口试样的 1.2 倍和 1.1 倍,表明对于厚度为 32 mm 的 Q420 钢板而言,在 - 30 °C 条件下工程结构中出现实际尖锐裂纹时,该材料要比通过机加工方法获得相同缺口长度时对裂纹脆性失稳扩展的抗力低 10 % ~ 20 %,这在工程设计中参考试验值时要格外引起注意。

表 2 试验结果

Tab. 2 Test results

缺口形状	试样编号	条件载荷	最大载荷	试样强度比	$R_{sb}$ 均值	$K_c$ 的条件值	$K_q$ 均值	$K_q$ 标准离差	数据处理	修正系数
Notch shape	Specimen No.	Qualification value of load $P_q$ / kN	Maximum load $P_{max}/$ kN	Strength ratio of specimen $R_{sb}$	Mean of $R_{sb}$ $R_{sb\bar{}}$	Qualification value of $K_c$ $K_q/(MPa \cdot m^{1/2})$	$\frac{Mean}{MPa} \cdot \frac{K_{q\bar{}}}{m^{1/2}}$	$K_q$ standard deviation / s	Processed data	Corrected coefficient
疲劳缺口 Fatigue crack	1	45.00	66.17	1.59	1.48	82.67	82.47	3.89	74.69 ( $K_{q\bar{}} - 2s$ )	0.66
	2	48.50	57.56	1.34		86.46				
	3	45.00	59.21	1.45		83.59				
	4	42.00	62.81	1.52		77.16				
线切割缺口 Spark-machined notch	5	45.00	76.54	1.84	1.78	82.36	91.51	10.80	113.11 ( $K_{q\bar{}} + 2s$ )	
	6	53.50	78.68	1.89		97.92				
	7	56.50	63.85	1.53		103.41				
	8	45.00	77.09	1.85		82.36				

为了工程结构的安全及应用方便,获得具有相同长度机加工缺口和疲劳尖锐缺口时,材料对裂纹扩展抗力的定量关系是必要的。对于桥梁结构钢而言,非破坏概率一般取 97.7 %<sup>[7]</sup>,即取二倍的标准偏差  $s$  (反映概率分布中各种可能结果对期望值的偏离程度,也即离散程度的一个数值) 作为置信带范围。为此,对平面应变断裂韧度  $K_c$  的条件值  $K_q$  进行适当的统计处理。从安全角度考虑,在工程应用中,当材料具有比较危险的疲劳尖锐缺口时,在可接受置信度范围 ( 97.7 %) 内,可取  $K_{q\bar{}} - 2s$  作为  $K_c$  条件值  $K_q$  的下限临界值,作为表示材料具有疲劳尖锐缺口时最大危险程度的参量;由于试验中用线切割方法获得缺口模拟工程实际尖锐裂纹具有潜在的危险性,在可接受置信度范围 ( 97.7 %) 内,可取  $K_{q\bar{}} + 2s$  作为  $K_c$  条件值  $K_q$  的上限临界值,作为表示最大潜在危险性的参量。基于上述分析,经过计算得到 0.66 的缺口修正系数。考虑到试样数量的限制,该修正系数和文献[2]<sup>33-36</sup> 中提到的 0.68 的修正系数基本上是一致的。

为了进一步分析具有两种缺口时材料断裂韧度差异的原因,分别对从试验中获得的  $P-V$  曲线、试样断口等方面进行分析讨论。

3.1 两种缺口试样  $P-V$  曲线

在试验中,采集试样所受载荷  $P$  及缺口嘴处张开位移  $V$ ,经过数据处理得到  $P-V$  曲线,如图 2 和图 3。

从图 2 和图 3 可见,在线弹性范围内,随着缺口嘴处张开位移的增加,疲劳尖锐缺口试样 1 ~ 试样 4 的载荷增加量基本一致,即它们具有大致相同的刚度,单位变形抵抗外载荷的能力基本相当。当最大载荷达到 59 kN ~ 66 kN (平均约 60 kN),同时试样缺口嘴处张开总位移平均不足 0.8 mm 时,四块疲劳缺口试样便发生脆性失稳断裂,并伴随有清脆的断裂声响。对于机加工

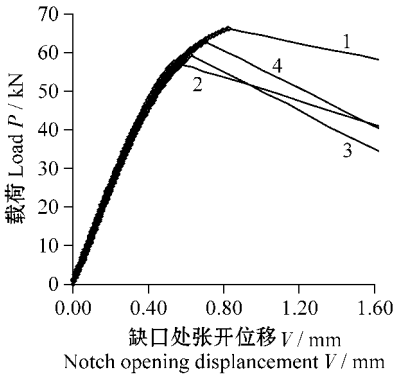


图 2 试样 1 ~ 4 的  $P-V$  曲线图

Fig. 2  $P-V$  curves for specimen 1 ~ 4

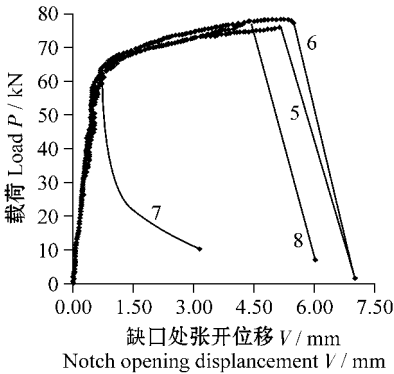


图 3 试样 5 ~ 8 的  $P-V$  曲线图

Fig. 3  $P-V$  curves for specimen 5 ~ 8

缺口试样 5 ~ 试样 8,在线弹性范围内,也具有基本一致的刚度。除了试样 7 具有如上类似的最大载荷和缺口嘴处的张开位移特征外,试样 5、试样 6、试样 8 在脆性失稳断裂前,它们的最大载荷均超过 75 kN,同时缺口嘴处张开总位移均超过了 4.3 mm。这表明 Q420 钢中缺口越是尖锐,抵抗外加载荷的容限就越小,且越容易发生塑性变形,抵抗裂纹脆性失稳扩展的能力越差,从而越容易发生脆性失稳断裂,在工程中也越危险。这和表 2 中的试验结果是一致的。

### 3.2 两种缺口试样断口

将不同程度脆性断裂 8 个试样的剩余部分在试验机上逐一压开,观察它们的断口形貌特征,见图 4。

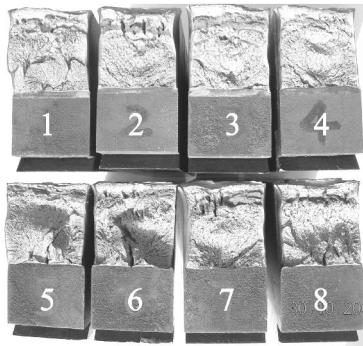


图 4 试样的断口形貌

Fig.4 Fracture surfaces of the specimens

从图 4 中的断口可见,8 个试样的断口外貌型式均为部分斜断口,但试样 2、试样 3、试样 4、试样 7 的断裂面沿着初始缺口面,而试样 1、5、6、8 的断裂面却沿着偏离初始缺口面一定角度的方向发生断裂。进一步观察发现,试样 5、试样 6、试样 8 偏离初始裂纹面中心处的断口上明显有沿裂纹扩展方向的裂缝带,裂缝带的长度约为试样宽度的四分之一,试样 1 相对不够明显。这表明材料缺口越是尖锐,发生脆性失稳断裂时的断面越易沿着初始缺口面进行,且断口光滑平齐,反之容易偏离初始缺口面,而沿着组织弱化面或缺陷面断裂。这是因为,缺口越是尖锐,在外载荷作用下,缺口根部应力集中的程度越大,三向拉应力的状态越明显,脆性断裂的倾向越显著<sup>[8]</sup>。这从另一个方面反映表 2 中的试验结果。

## 4 结论

1) 比较而言,材料具有尖锐疲劳缺口(裂纹)时的断裂韧度值低于具有通过线切割方法制造的缺口时的断裂韧度值,因而前者抵抗裂纹扩展的能力弱于后者。对于 32 mm 厚的 Q420 钢而言,在 -30℃ 条件下,该钢板具有疲劳尖锐缺口(裂纹)时比钼丝线切割同样长度缺口时对裂纹脆性失稳扩展的抵抗能力平均低约 10%~20%。相应的缺口修正系数为 0.66,这与文献中的研究结果基本一致。

2) 材料具有越是尖锐的缺口,抵抗外加载荷的能力越差,且越不容易发生塑性变形,从而越容易发生脆

性失稳断裂,断裂面越容易沿着初始缺口面,且断口相对比较平齐;反之,就容易偏离初始缺口面,沿着组织弱化面或缺陷面断裂。

### 参考文献 (References)

- [1] 钱维平,李刚,马建坡. 用四点弯曲试验确定焊接接头的薄弱区[J]. 材料开发与应用, 2000, 15(2): 23-26.  
QIAN WeiPing, LI Gang, MA JianPo. Determination of the weakness zone welding joint by doing four-point bend testing[J]. Development and Application of Materials, 2000, 15(2): 23-26 (In Chinese).
- [2] 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.  
QIAN WeiPing, LI Gang, MA JianPo. Fracture resistance of 14MnNbq steel and its weldment[J]. Development and Application of Materials, 2000, 15(3): 33-36 (In Chinese).
- [3] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1-15.  
National Steel Standardization Technical Committee. GB/T 228—2002 Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature [S]. Beijing: China Standard Press, 2002: 1-15 (In Chinese).
- [4] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 4161—1984 金属材料平面应变断裂韧度  $K_{IC}$  试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1984: 8-12; 1984: 18-21.  
National Steel Standardization Technical Committee. GB/T 4161—1984 Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials [S]. Beijing: China Standard Press, 1984: 8-12; 1984: 18-21 (In Chinese).
- [5] 张亚军,朱林放. 海洋泊链用钢大尺寸试样 CTOD 试验研究[J]. 理化检验—物理分册, 2005, 41(7): 340-343.  
ZHANG YaJun, ZHU LinFang. Research of CTOD test of large dimension specimens for anchor chain in sea [J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2005, 41(7): 340-343 (In Chinese).
- [6] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 104-106.  
CHEN ChuanYao. Fatigue and fracture [M]. Wuhan: Huazhong Science and Technical University Press, 2005: 104-106 (In Chinese).
- [7] 铁道部标准计量所. TB/T 2349—1993 铁路钢桥连接疲劳试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993: 6-7.  
Standard Measuring Station in Ministry of Railways. TB/T 2349—1993 Fatigue test method for connection of railway steel bridge [S]. Beijing: China Standard Press, 1993: 6-7 (In Chinese).
- [8] 船体结构钢编写组. 船体结构钢[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 45.  
Ship Hull Structural Steel. Ship hull structural steel [M]. Beijing: National Defenses Industry Press, 1977: 45 (In Chinese).