

B30/QTS爆炸复合板焊接接头 断裂行为的研究

张初冬副教授 武春芝讲师 周志良助教

(大连铁道学院)

吴伦发工程师

(洛阳船舶材料研究所)

摘 要

为了探讨铜合金(B30)+调质钢(QTS)爆炸复合板焊接接头的断裂行为,制备了带各种裂纹取向的多组COD试样进行试验。结果表明:对于裂纹平面平行或倾斜于结合界面而裂纹前沿在界面处或在其近傍的试样,其韧度值与裂纹尖端所在的那层金属本身的韧度值有不同程度的增减。文章提出的“界面附近裂纹尖端塑性区畸变”模型可以解释这些试验结果。对于裂纹平面垂直于结合界面的试样,除了趋于构成平面应力的原因外,认为“裂纹抑制”作用的另一个重要原因是复合界面处金属的剪切破坏。利用扫描电镜断口分析能够观察到这种剪切现象。

1. 序 言

由于复合板材兼有复层金属和基层金属二者的优点,所以在化工、海洋工程等方面得到愈来愈广泛的应用。用爆炸复合(或称爆炸焊接)的方法生产复合板材,其方法简便,成本低廉,目前是国内外生产复合材料的主要工艺方法。

铜-钢复合板材综合了基层金属的高强度和复层金属的耐腐蚀性能,是在腐蚀性介质中工作的理想材料。本研究中所用的铜镍合金(B30)+12NiCrMo调质钢(QTS)复合板是此类材料中综合性能较好的一种。但是,多年来的实践和研究发现,12NiCrMo钢的焊接接头中极易产生冷裂纹,对此类钢断裂行为的研究工作一直在进行着。B30,俗称白铜,则是一种热裂倾向较大的合金材料。当用此两种材料制成的复合板材拼焊结构时,就不可避免地隐藏着这些裂纹,而且裂纹相对于结合界面的方位是多种多样的。

所以, 对此类焊接结构的断裂行为, 必须进行专门的研究。

本研究利用裂纹相对爆炸结合界面不同方位的模拟裂纹试样, 对 B30/QTS 爆炸复合板的断裂特征进行试验研究, 进而为复合板材的断裂性质的研究打下基础。

2. 试验材料

试验板材的复层金属和基层金属的化学成分和力学性能列在表 1 和表 2 中。

表 1 基层和复层金属的化学成分 (Wt%)

材 料	元 素	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Al/Ti	Zr	Cu	Fe
基层	QTS	0.11	0.28	0.48	2.77	0.90	0.21	0.021	0.018	<0.02/<0.029	<0.008	—	其余
复层	B30	—	—	0.81	31.00	—	—	—	—	—	—	其余	0.78

表 2 基层和复层金属的力学性能

材 料	性 能	抗拉强度 σ_b (N/mm ²)	屈服强度 σ_s (N/mm ²)	延 伸 率 δ_5 (%)	断面收缩率 Ψ (%)	杨氏模量 E (N/mm ²)	泊 松 比 ν
基层	QTS	760	691	19	63	2.06×10^5	0.31
复层	B30	366	144	41	75	1.47×10^5	0.33

制取试样的两块板料在取样前均进行了全面超声波检验, 并切取确信复合良好的部位用做实验用料。试验板材结合界面的分离强度为 424~655 (平均 539) N/mm²。

3. 试样制备

B30/QTS 复合板焊接接头中可能出现裂纹的各种取向如图 1 所示。因此, 模拟这些裂纹取向所制备的试样如图 2 所示, 其中包括复层 B30 和基层 QTS 的试样, 共分成 8 组, 19 个分组, 图中标出了试样的形状、尺寸及裂纹与界面的相对位置。

相应于板材中的取样位置见图 3。除 4B、4C、5C、6B 和 6C 分组的试样取自 10+32mm 的一块板料外, 第 7 和 8 组的试样分别取自 32mm 的 B30 和 QTS 原始母材, 而其余试样均取自另一块板料, 其规格为 14+32mm。

按 GB-2358-80 标准加工试样, 尺寸为 100×20×16mm。因板厚所限, 不足的长度对 B30 一侧和 QTS 一侧分别用 GTAW 和 SMAW 方法由相应的材料接长, 而后进行机械加工。试样的裂纹长度 $a = a_0 + \Delta a$, 由线切割切口长度 $a_0 = 7\text{mm}$ 和疲劳预裂纹长度 $\Delta a = 2\text{mm}$ 组成。

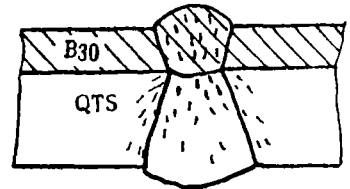


图 1 B30/QTS 复合板焊接接头中可能存在的裂纹示意图

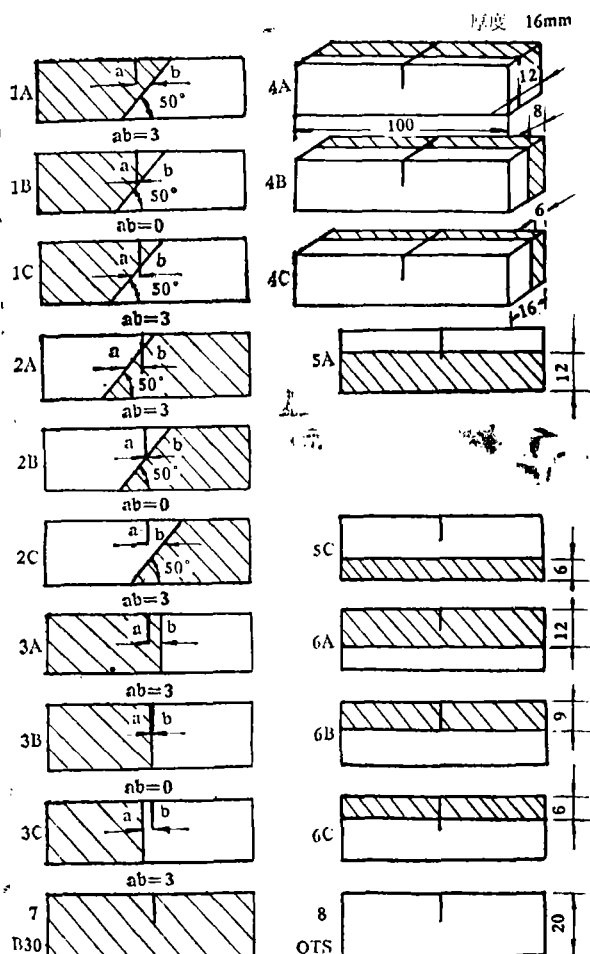


图2 裂纹相对于结合界面不同取向的模拟试样

图中 ab 为裂纹尖端至界面的水平距离

4. 测试方法

室温下在30t万能试验机上进行三支点弯曲COD试验。用X-Y记录仪绘出负荷-位移曲线,同时记录电位和声讯号用来联合检测可能出现的启裂点。每一分组进行5~9个试样,最后按GB-2358-80标准计算 δ_i 或 δ_m 以及 J_m 。

然后,将试样在试验机上压断,观察宏观断口形态,并利用扫描电镜对典型试样进行断口形貌分析,以确定断裂性质。

弯曲试验过程中,唯有第8组表现出明显的启裂,按标准所规定的多试样法测得“表现启裂COD值” δ_i 。第7组试样试验时未发现任何启裂讯号,表明B30合金没有

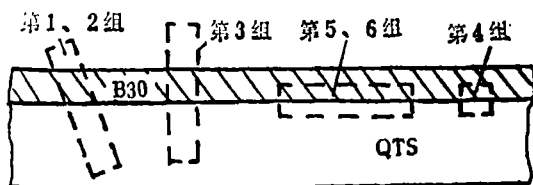


图3 取样方位示意图

失稳断裂现象, 整个弯曲过程中裂纹一直处于稳定扩展。对于其余组的试样, 如 1C, 4B, 4C 分组, 也观察到个别发生启裂的情况, 因其数量少无法进行准确的回归外推来求 δ_i 。因此, 对这些分组的试验均依最大载荷点或最大载荷平台开始点求出“最大载荷 COD 值” δ_m , 并按国标附录 C 中推荐的公式计算出“最大载荷 J 积分值” J_m 。B 分组中某些试样在预制疲劳裂纹过程中就出现沿结合界面断开的情况, 这些试样不计。

5. 试验结果及断口分析

测试计算结果列在表 3 中。B30 合金是一种延性较好的材料, 试验表明, 这种材料不存在失稳断裂的现象。而相比之下, QTS 则表现出明显的失稳启裂特征。

表 3 不同裂纹取向的试样所得到的 δ_m 和 J_m 值

试样分组号	最大载荷 P_m (N)	最大载荷 COD δ_m (mm)	最大载荷 J 积分** J_m (N/mm)
1A	15450	0.0937	81.7
1B	(9500)	0.0229	17.4
1C	19200	0.0560	55.4
2A	16600	0.0896	52.0
2B	6600	0.0056	8.2
2C	9700	0.0238	35.8
3A	16600	0.0902	61.6
3B	(8500)	0.0223	18.3
3C	21600	0.0553	92.2
4A	20000	0.0843	116.0
4B	16000	0.0891	53.5
4C	17600	0.0709	57.8
5A	19600	0.1200	76.8
—	—	—	—
5C	17800	0.0445	87.5
6A	22800	0.1690	90.7
6B	19000	0.0611	113.5
6C	21000	0.0592	101.6
7(B30)	10820	0.1211	88.7
8(QTS)	19800	0.0443*	77.7

* 为表现启裂 COD 值 δ_i 的数值, 而 QTS 的最大载荷 COD 值 $\delta_m = 0.047\text{mm}$ 。

** 该列数据是按 GB2358-80 中附录 C 的公式计算得到的。

试验中发现, 凡是裂纹尖端位于结合界面处或者界面与裂纹尖端紧邻并与裂纹平面倾斜的试样, 裂纹稳定扩展阶段很短, 多数试样将发生结合面的分离, 这种分离所产生的电、声讯号均反映在记录曲线上。

B30 试样的断口扫描电镜照片见图 4(a) (图版 25), 呈现撕裂韧窝状, 表现出此种材

料的良好延展性。QTS试样的多数断口呈现明显的等轴韧窝状,见图4、(b)(图版25)。

裂纹平面与结合界面重合的3B试样在极低的载荷下即行开裂,其宏观断口照片〔图5a(图版25)〕上可以明显地看出爆炸波纹的痕迹。图5b(图版25)是未开裂前的试样垂直横切结合面的放大图象,其中的“波峰”、“波谷”、乃至“浪尖”十分清晰。

裂纹尖端在QTS侧并且裂纹平面垂直结合界面的5c试样,裂纹在QTS内开始并很容易扩展向B30一侧。图6(图版25)中可以看到裂纹如何由QTS侧从波谷穿入B30一侧。

裂纹尖端在B30侧而裂纹平面垂直结合界面的6A试样,可以看到裂纹前沿抵达界面后垂直折向界面的情况,见图7(图版26)。照片中央可以看到暴露出来的界面上的波纹形状。图8(图版26)显示了沿结合界面开裂时垂直裂纹面的断面放大的图象。图9表示了这种开裂的两个阶段。

裂纹平面和裂纹前沿均垂直结合界面的第4组试样,结合面也发生开裂,虽然这种开裂并不降低断裂韧度值,见图10a、b(图版26)。这与QTS试样中所见到的凹凸形成的阴影完全不同〔图10c(图版26)〕。

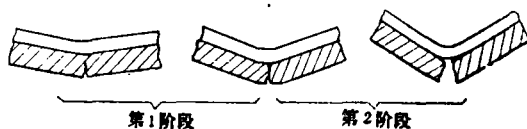


图9 裂纹垂直折向结合界面的示意

6. 结果的分析讨论

6.1 第1、2、3组试样“塑性区畸变”模型

从表3的数据可以看出,对于裂纹前沿紧靠或处于界面处的试样(B分组),其韧性值比基层QTS材料约下跌50%~85%。这种差别可能是由于预制裂纹尖端与界面的相对距离很难做到全都为零,另外,目前还没法预测预制的裂纹尖端的准确位置,例如,它是处在界面处的波峰还是波谷,(目前所有的研究工作还仅仅是把界面当做一个平面来进行宏观分析的)。虽然复合板材的分离强度大致为B30和QTS两种材料强度的平均数,其界面处开切口时的韧度值却大大降低,这可能是由于铜-钢结合界面的剥离强度较低所致,同样切口方位的不锈钢-钢复合板材试样则没有这种现象。

由试验数据发现,当裂纹尖端距结合界面有一定距离时,试样的断裂韧度值与裂纹尖端所在的那一层金属材料的韧度值不同。当裂纹尖端位于QTS中时,试样的韧度高于QTS的韧度值,而当其尖端位于B30中时,其韧度值低于B30的韧度值。初看起来,这三组试样的韧度值,除裂纹尖端位于结合界面者外,均在B30和QTS的韧度值之间。在此,提出一个假想的模型,如图11所示意。

当裂纹尖端位于软质材料(如B30)一侧时,尖端塑性区较大,相应的切口尖端张开位移CTOD) δ_m' 较大,但由于该区受到界面另一侧硬质材料(如QTS)的拘束而畸变(即不对称于裂纹平面),向软质材料一侧偏斜,使CTOD值 δ_m'' 变小,即 $\delta_m'' < \delta_m'$ 。相反,当裂纹尖端位于硬质材料一侧时,尖端塑性区面积相对地小一些,CTOD值 δ_m' 较

小, 由于邻近的软质材料对拘束的松弛作用, 将使塑性区向软质一侧扩展, 而使CTOD值增大, $\delta_m'' > \delta_m'$ 。这个理论可以简单概括为: 结合界面附近的裂纹尖端塑性区向塑性好而强度低的金属一侧发展, 而偏离塑性差而强度高的金属一侧, 一般称之为“裂纹尖端塑性区畸变”模型。

在试验中还发现裂纹会在扩展一段距离后折向与界面重合或与它平行的方向发展(图12)。如前所述, 结合界面的剥离强度很低, 沿裂纹平面向前扩展的一个裂纹似乎“应该”进入界面而使后者开裂。但是, 事实上它却沿平行于界面的另一途径发展下去。这一现象也只能用裂纹尖端塑性区畸变的模型加以解释。

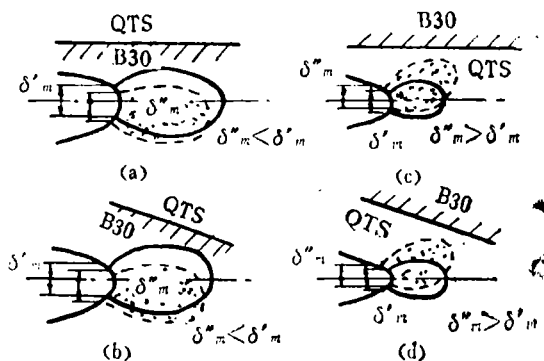


图11 裂纹尖端附近塑性区畸变模型的示意

(δ_m' 和 δ_m'' 分别为畸变前后的尖端塑性区的宽度。
(实线和虚线包围的区域分别为畸变前后塑性区的范围)

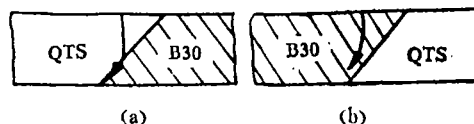


图12 裂纹扩展折向与界面重合(a)或与之平行(b)的情况(2C组和1A组试样的例子)

6.2 第4组试样结果的讨论

文献〔1〕曾介绍过力学不均质接头的COD试样的研究工作, 其基本出发点之一是解理断裂起始在韧性最差的区段, 所谓最薄弱环节模型。但是, 本研究中大多数此类试样不发生启裂, 而所得的韧性值均高于韧性较低的基层QTS材料, 从而与文献中的结果不尽符合。其原因可能有两个: 一是本文选用的两层材料的力学性能相差悬殊而且二者的韧性均较好; 二是本研究所用板料的结合界面较易开裂, 开裂后使界面两侧更趋于平面应力状态。当然, 随QTS一侧的厚度比的增加, 复合板材试样的韧度值将更接近于QTS材料的韧度值。

本研究中主要是用 δ_m 为判据进行分析的。但是, 试验中还发现, 用 δ_m 为判据和用 I_m 为判据, 对于这类不均质的试样, 将会导致混乱的结论, 其它组的试样亦有类似情况, 有时甚至利用两种判据会得出矛盾的结论。因此, 对非均质材料应采用什么判据方能更准确地反映其断裂行为, 应当是一个重要的研究课题。

6.3 第5、6组试样, “裂纹抑制”现象

按照文献〔2〕的观点, 此类试样可能首先在层间结合界面破坏, 使形成足够薄的分层, 从而使尖端处呈现平面应力状态。这一观点在本研究中已得到证实, 并且不难被人理解。

本研究还通过电镜观察发现, 在断口表面上有明显拉长的韧窝(图13)(图版26)。由图8可以看出, 当界面开裂后爆炸波纹的“浪尖”已不复存在了。因此, 有理由认

为,在界面开裂过程中,“浪尖”遭到了剪切破坏,而图13中箭头所指的被拉长的韧窝正是这种剪切留下的证据。

此类试样,当裂纹尖端位于QTS一侧时,其韧度值(I_m)高于QTS的韧度值;当尖端位于B30一侧时,它将比B30的韧度值高。(前一结果与文献〔3〕中对SUS304+HT80复合板材上所得的结果相似。)这种现象称之为“裂纹抑制”现象,这类试样被称为“裂纹抑制”型试样。复合板材的优越性在这种情况下突出地表现出来。

7. 结 论

用B30/QTS爆炸复合板制取的裂纹相对结合面不同方位的试样,进行不均质材料的COD试验,证明了此种板材焊接接头中可能隐藏的裂纹依其对结合界面的不同方位使其对结构的断裂行为产生不同的影响。

1. 如果裂纹尖端恰位于结合界面处,则此种复合板材的韧度值将比QTS材料的韧度值下跌50%~85%。

2. 对裂纹平面平行或倾斜于结合界面的情况,其韧度值介于基层材料和复层材料的韧度值之间并取决于裂纹相对界面的方位。一个简单的“裂纹尖端塑性区畸变模型”可以解释这一现象,即,裂纹尖端塑性区的畸变是使结合界面附近的塑性区向塑性好而强度低的金属(B30)一侧发展,而偏离塑性差而强度高的金属(QTS)一侧。

3. 对于裂纹平面和裂纹前沿均垂直于结合面的情况(4组),其韧度值取决于两层金属的厚度的比例。结合界面的分离并使其两侧趋于平面应力状态,是此类试样韧度增高的主要原因。

4. 对于裂纹平面垂直于结合界面而裂纹前沿平行界面的情况(5、6组)下的韧度值提高的现象,一般所谓的“裂纹抑制”作用,应归结为三方面的原因: B30复层对裂纹尖端应变拘束的松弛;结合界面处剪切破坏对能量的吸收;以及平面应力状态的构成。

(1985年11月2日收到)

参 考 文 献

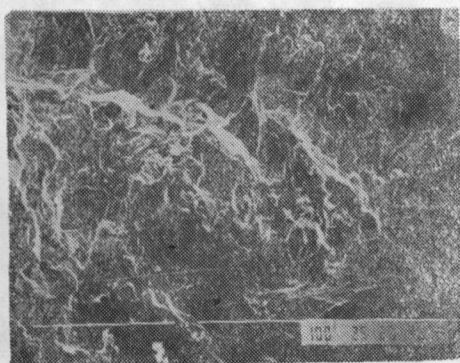
- 〔1〕 Satoh K. et al.: IIW Doc. X-1064-84.
- 〔2〕 Микляев П.Г.: 《断裂动力学》, Москва, (1979), 陈石卿等译, (1984)。
- 〔3〕 小田 勇: 《溶接学会誌》, 50(1981), №2, P140~146。

A STUDY OF THE FRACTURE BEHAVIOUR
OF B30/QTS CLAD PLATE WELDED JOINTS

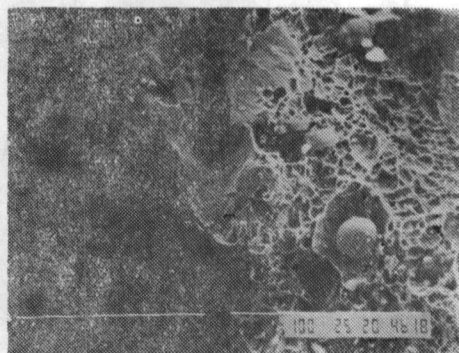
*Associate Professor Zhang Chudong,
Lecturer Wu Chunzhi, Assistant Zhou Zhiliang
(Dalian Railway Institute)
Engineer Wu Lunfa
(Luoyang Ship Material Research Institute)*

Abstract

In order to study the fracture behaviour of the welded joint of explosive B30 alloy clad QT-steel plate, many types of COD specimens with various crack-direction were prepared and tested. From the test results, it is concluded that for the specimens of which the crack-plane is parallel or inclined to joint interface and the crack-tip is at or in the vicinity of the interface, the toughness values will be decreased or increased in different amounts as compared to those of the metal layer which the crack-tip is located in. Thus a hypothesis model named "Crack-tip plastic-zone abnormal development model" was proposed and for those specimens of which the crack-plane is perpendicular to the interface, the main cause of "crack-arresting action" is considered to be the shearing of the metal at the clad interface, besides the formation of plane-stress state. This phenomenon can be observed by SEM fractography.

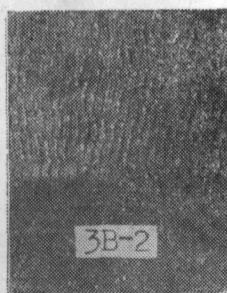


(a) 复层B30合金 ×200



(b) 基层QTS ×250

图4 原始材料断口的SEM照片



(a)



(b) ×100

图5 沿结合界面断开的3B试样的断口(a)和复合界面未裂前的波纹(b)



图6 裂纹由QTS一侧穿过爆炸结合的波状界面向B30一侧扩展 ×300

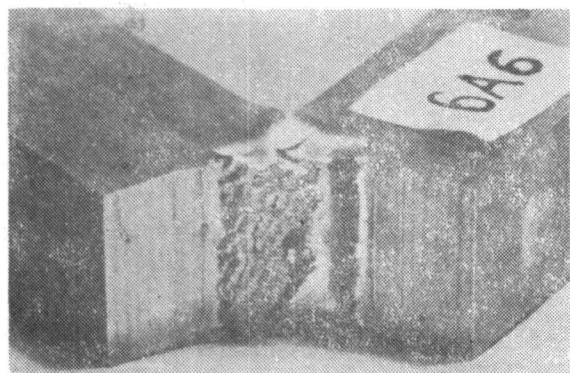


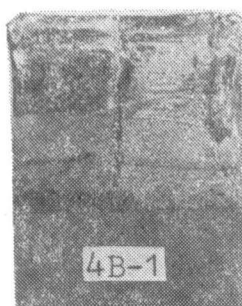
图7 裂纹的扩展垂直折向结合面内的情况



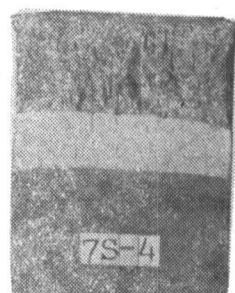
图8 结合面处开裂时裂口两侧的形貌 ×50



(a)



(b)



(c)

图9 裂纹平面横切结合界面的试样 (a和b)和QTS试样(c)的断口形貌比较



图13 界面分裂的断口上发现被拉长的韧窝 ×250