

TIG 熔修对船体结构抗裂性能试验研究

宗 培

(海军工程大学 船舶与动力学院, 武汉 430033)

摘 要: 采用 TIG 熔修和焊缝打磨技术, 提高环肋圆柱壳板承受水下爆炸冲击载荷的能力和改善结构破坏方式. 通过水下爆炸试验, 分析 TIG 熔修和焊缝打磨提高结构抗动态撕裂能力的原因. 试验结果表明, TIG 熔修对焊缝及热影响区的金相组织, 硬度和低温冲击韧性没有显著的影响; TIG 熔修和焊缝打磨大幅度提高结构的抗动态撕裂能力, 特别是结构在动态冲击载荷下塑性变形的能力; 其根本原因是 TIG 熔修和打磨降低了焊趾处的应力集中状态.

关键词: 焊接工艺; 焊接接头; 金相组织; 爆炸冲击; 断裂韧性

中图分类号: TG441.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8354(2008)02-0063-04

Experimental study on the effect of TIG dressing on the anticrack performance of hull structure

ZONG Pei

(College of Ship & Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033, China)

Abstract: The impact strength and the fracture model of stiffer shell have been improved supporting underwater explosive impact load by TIG dressing or polishing. The reasons have been analyzed through the underwater explosion tests. The result shows that TIG dressing has little influence on the metallurgical structure, hardness and low temperature impact toughness of the weld metal and the heat affected zone; the impact strength and ductility of the welding structure have been largely enhanced, especially the ductility of the structure under the dynamic impact load. Its prime reason is that TIG dressing and polishing reduce the state of stress collection at the welding toe.

Key words: welding technics; welding tie-in; metallurgical structure; explosion impact; fracture toughness

TIG 熔修是用钨极氩弧焊电弧对已完成的焊缝表面进行焊缝金属的再熔化, 达到光顺焊缝表面、修复焊缝表面微小缺陷和改善焊缝金属与母材之间过渡状况的目的. TIG 熔修对提高焊接接头的疲劳强度、抗冲击性能, 特别是抗爆炸冲击性能有明显的效果^[1-3]. 但是, TIG 熔修是如何提高焊接结构的抗动态撕裂性能, 是通过改善焊缝及热影响区的组织结构, 特别是粗晶区的组织结构, 还是提高了材料的冲击性能, 还是降低了焊接接头的残余应力等问题都有待解决. 本文就环肋圆柱壳板在水下爆炸冲击载荷作用下, 研究结构的抗动态撕裂能力及破坏方式, 力学因素和冶金因素对结构破坏性能的影响. 为评价环肋圆柱体的水下生存能力, 提高和改进结构设计、制造方

式提供依据.

1 实验材料、试样制备和研究方法

1.1 试样制备

试验的钢材为 12Ni3CrMoV 船体用钢. 为了考核环肋圆柱体材料与焊缝的局部抗脆性破坏能力, 在研究阶段一般并不要求采用整个圆柱壳体进行试验, 只需选择从结构和冶金角度具有代表性的局部结构单元进行试验. 试验模型如图 1 所示. TIG 熔修工艺参数如表 1 所示.

表 1 结构单元 TIG 熔修工艺参数表

电流 I	电压 V	速度 v	流量	线能量
180 A	32 V	9.12 cm/s	15 l/min	625 J/cm

收稿日期: 2007-05-30; 修回日期: 2007-07-17

作者简介: 宗培 (1961-) 男, 副教授, 主要研究方向: 焊接质量焊接结构的脆性破坏.

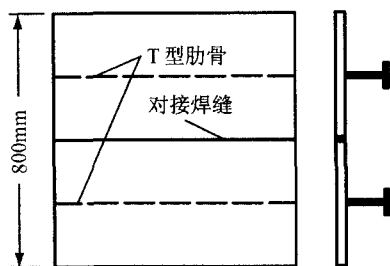


图1 结构单元试验模型示意图

1.2 研究方法

试验通过对熔修和未熔修的角接焊缝、打磨和未打磨对接焊缝的结构单元进行水下爆炸试验,考核TIG熔修以及打磨对T型肋骨与壳板之间的角接焊缝和壳板环焊缝对结构抗爆性能的影响.并通过对焊接接头的低温冲击试验、金相分析、硬度试验等试验,确定TIG熔修对提高结构抗爆性能的机理和主要影响因素.

2 试验结果与分析

2.1 TIG熔修对角焊缝几何形状的影响

TIG熔修对角焊缝最显著影响是在一定程度上改变了角焊缝的接头形状,见图2.通过TIG熔修,角焊缝的上下焊趾 K_1 、 K_2 ,特别是 K_2 有明显的提高(如表2),同时TIG熔修使角焊缝的表面更加光滑,焊缝金属与母材金属的过渡更加光顺(图2B),提高了接头形状的连续性,达到降低焊趾处应力集中的目的.

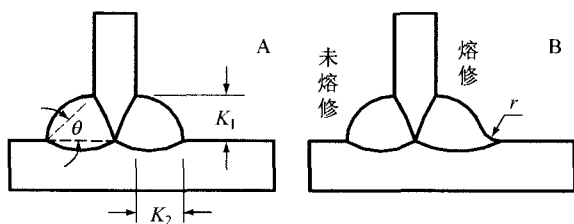


图2 角焊缝尺寸示意图

表2 角焊缝熔修前后上下焊趾宽度测量结果

模型编号	熔修前		熔修后	
	K_1/mm	K_2/mm	K_1/mm	K_2/mm
1	15.0	11.0	15.0	13.5
2	13.2	9.0	13.2	12.0
3	11.2	12.0	11.2	14.0
4	14.0	11.8	14.0	13.5
5	12.0	9.0	12.0	11.8

2.2 TIG熔修对低温冲击韧性的影响

为了确定TIG熔修对焊缝及焊接热影响区,特别是粗晶区性能的影响,对经过TIG熔修和未经过TIG熔修的角焊缝分别取样,进行 -20°C 环境下V型缺口低温冲击试验.缺口均开在焊接热影响区的粗晶区处.试验结果如表3所示.

表3 熔修前后低温冲击试验结果

试样编号	冲击韧性 $Akv -20^\circ\text{C} / \text{J}$	
	经过熔修	未经熔修
1	41	38
2	50	43
3	32	39
4	32	47
5	34	38
平均值	37.8	41

由表3可知,经过熔修后,粗晶区的冲击韧性略有下降,平均值下降约10%.这主要是由于熔修时的线能量较低,为 $625\text{J}/\text{cm}$,仅为角焊缝焊接时线能量($20.8\text{KJ}/\text{cm}$)的3%,再加上TIG电弧的能量密度较高,使热影响区变窄,从而对热影响区的低温冲击性产生一定的影响.但从具体数量来看,效果并不显著.

2.3 TIG熔修对金相组织的影响

分别对经熔修和未经熔修的角焊缝进行金相分析,分析结果如表4所示.

表4 TIG熔修对角焊缝组织影响分析结果

	部位	显微组织
经过熔修	焊缝金属	粒状B + 先共析 α + 针状 α
	熔合线	板条M + 粒状B + 先共析 α + 针状 α
	粗晶区	板条M + 粒状B
	细晶区	B + α + M
	重结晶区	B + α + M + P
未经熔修	焊缝金属	粒状B + 晶界自由 α
	熔合线	板条M + 粒状B + 先共析 α + 针状 α
	粗晶区	板条M
	重结晶区	B + α + M + P

*注:B为贝氏体; α 为铁素体;M为马氏体;P为珠光体.

由表4可知,TIG熔修对焊缝和热影响区的显微

组织基本上没有影响。

2.4 TIG 熔修对显微硬度的影响

分别对经过和未经过 TIG 熔修的焊缝和热影响区进行显微硬度测试,确定 TIG 熔修对其的影响。试验结果如表 5 所示。

表 5 TIG 熔修对显微硬度的影响

部位	维氏硬度/V		硬度变化率/%
	未经熔修	经过熔修	
焊缝金属	299	346	15.7
粗晶区	369	380	3.0
细晶区	358	366	2.2
重结晶区	349	320	-8.3
母材	282	282	0

由表 5 可知,TIG 熔修对角接接头的焊缝和热影响区的硬度在总体上有一定的提升,但在焊接接头最薄弱的环节--粗晶区的上升幅度极为有限,仅为 3%。有趣的是在焊缝金属的提高幅度相对较大,为 15.7%。焊缝和焊接热影响区的硬度值标志着被焊金属的淬硬性倾向,为了保证金属材料在焊接过程中不出现淬硬组织,一般的方法是将焊缝和热影响区的硬度值控制在某一刚好不出现冷裂纹的临界值范围内。根据日本焊接学会标准(WES-135)和日本压力容器协会标准(HPIS-B101)的规定,屈服极限为 560MPa 的结构钢的最高硬度许用值为 420HV。由此可见,无论是经过还是未经过 TIG 熔修的角接接头的焊缝和热影响区的最高硬度值都远低于其允许值。也就是说,TIG 熔修对角接接头的硬度值影响不大,这个结果与金相分析结果基本一致。

2.5 结构单元爆炸试验结果及分析

结构单元水下爆炸试验结果表明,在爆炸冲击载荷作用下,破坏首先发生在肋骨与壳板的角焊缝上、下焊趾处,其次发生在壳板对接焊缝末层焊道焊趾处。无一起裂于母材或焊缝的内部缺陷处。也就是说,由于肋骨对壳板的约束,结构单元在爆炸冲击载荷的作用下,其弯曲应变与中面应变叠加,使得肋骨和跨中两处为拉伸应变最大的部位。此外,这两个部位又正处于角焊缝和对接焊缝几何形状突变造成的应力集中区;焊接残余应力的拉伸应力区;塑性韧性大大下降的粗晶区。即结构单元的肋骨与壳板的角焊缝和跨中的对接焊缝,是环肋圆柱体承受爆炸冲击载荷的要害部位,而在肋骨与壳板的角焊缝处尤为突出。

为了比较消除角焊缝趾端应力集中对壳体动态断裂韧性的影响,对 5 个结构单元模型的角焊缝焊趾进行了 TIG 熔修,并把对接焊缝的余高一律磨平。试验结果表明,角焊缝焊趾处经过 TIG 熔修后,壳板厚度减薄率炸到 15% 左右时,才在靠近焊趾的母材处出现微裂,甚至当减薄率达到 35% 时,裂纹仍然局限在壳板表层。相比之下,对于未经 TIG 熔修的角焊缝试验模型,仅炸到减薄率为 3% 左右时,就在焊趾端开裂,并迅速向板厚度方向扩展,形成贯穿性裂纹。对于对接焊缝,余高磨平后,一直炸到减薄率达到 38%~42% 时,仍无裂纹扩展迹象。而未经磨平的试验模型,仅炸到减薄率在 3%~5% 时,就出现明显的裂纹。由此可见,焊趾处的应力集中对结构的动态断裂强度有十分重要的影响。

与断面收缩率类似,壳板破坏时的减薄率是描述其变形能力和破坏方式的重要指标。一般认为减薄率小于 10% 的破坏为脆性破坏,减薄率大于 10% 的破坏为韧性破坏。结构在承受爆炸冲击载荷时,通过结构的塑性变形来吸收爆炸冲击载荷传递过来的能量。结构的塑性变形能力决定结构抗裂性能和破坏方式。影响变形能力的外部因素主要有应力状态、加载速率、环境温度等;影响变形能力的内部因素主要有材料的状态如成分、组织等^[4]。TIG 熔修对角焊缝的组织状态基本上没有明显的影响。略微降低材料的低温冲击韧性。由于低温冲击试验是标准状态下的材料性能试验,用于评价材料在低温环境下,承受冲击载荷时的缺口敏感性。其优点是可以比较焊缝和热影响区不同部位的材料韧性;其缺点是不能评价结构的整体抗裂性能。试验结果表明,TIG 熔修和打磨的效果使结构的变形能力有大幅度的提高,其根本原因是降低了焊缝焊趾处的应力集中水平。在爆炸冲击载荷作用下,由于应力集中引起材料的局部开裂,导致应力状态的恶化:裂纹尖端的应力状态由平面应力状态变为平面应变状态。从而降低了材料的变形能力,即阻止裂纹扩展的能力,造成裂纹贯穿性失稳扩展而形成脆性破坏。

示波冲击试验将材料的冲击功分为起裂功和裂纹扩展功,应力集中明显地降低了起裂功^[5],也就是说,应力集中导致裂纹萌生的门槛值下降。裂纹一旦萌生,裂纹扩展功将是阻止裂纹扩展的主要因素,而裂纹扩展功除了取决于材料的性能以外,还取决于裂纹尖端的塑性区的大小或应力状态以及裂纹扩展路径。试验结果表明,裂纹沿板厚方向扩展并造成局部脆性破坏是结构释放爆炸冲击载荷的捷径。所以,未

经 TIG 熔修的模型,由于应力集中导致结构整体在发生较小的塑性变形的情况下,发生局部脆性破坏;经过 TIG 熔修的模型,由于改善了焊接接头的几何形状,缓和了应力集中,提高了裂纹萌生的门槛值,导致结构以发生大范围的塑性变形吸收爆炸冲击载荷的形式,提高结构抗动态撕裂能力.由此可见,降低应力集中,提高裂纹萌生的门槛值是提高结构变形能力的关键.

改善焊缝应力集中状况的方法有焊趾打磨、捶击、焊缝整体磨光和 TIG 熔修等,并且以 TIG 熔修的效果最为显著^[4].

对于对接接头,随着焊缝余高的增加,应力集中系数增加,在正常工艺条件下,其变化范围在 1.2 ~ 2.8 范围内^[6].对于角接接头,应力集中系数主要取决于 θ 角和焊趾过渡半径 r (图 2A),随着 θ 角降低和焊趾过渡半径 r 增大,应力集中系数迅速下降.由于 θ 角的大小取决于 K_1 和 K_2 的比值.在 K_1 基本不变的条件下,随着 K_2 的增大, θ 角将下降.对接接头焊缝余高打磨,角接接头 TIG 熔修,从而改善角焊缝应力集中状态,提高裂纹萌生的门槛值,是提高结构抗动态撕裂能力的主要原因.

3 结论

通过以上分析,可以得到以下结论:

1) 结构单元的肋骨与壳板的角焊缝和跨中对接焊缝,是环肋圆柱体承受爆炸冲击载荷的要害部位.

(上接第 47 页)

通过方程(16)~(21),得到连杆 b, c, b_1, c_1, b_2, c_2 与各水平方向转角 $\beta_1 \sim \beta_8$ 之间的映射关系.

采用 ANSYS 软件对机械手的关键零件进行有限元法分析得到了各零件的应力云图,观察发现,各零件的应力集中现象比较明显,各零件的最大应力均发生在销孔部位,其它部分都没有明显的应力集中现象,这一特点符合理论分析的结果.

3 结论

本文对机械手的工作原理进行了研究,完成了机械手结构设计,对机械手的静力学特性进行研究、分析并建立其数学模型.该机械手有效解决了自由度数目和驱动方式、重量、灵活性之间的矛盾,具有形状自适应能力,抓取物体时,手指能够完全包络物体,并且能够适应物体的形状,结构简单、重量轻,能完成捏拿、抓握等动作,采用液压驱动,可用于水下机器人用

2) 对于对接接头,对焊缝余高打磨可以提高结构的变形能力,壳板破坏时的减薄率从未经磨平的 3% 至 5% 提高到打磨后的 38% ~ 42%.

3) 对于角接接头,TIG 熔修可以提高带肋骨圆柱壳体承受爆炸冲击载荷的能力.壳板破坏时的减薄率从未经 TIG 熔修的 3% 提高到熔修后的 35%.

4) TIG 熔修对焊缝和热影响区的组织、硬度和低温冲击韧性没有显著影响.

5) TIG 熔修和焊缝打磨主要是通过改善焊趾处的应力集中状况提高结构的抗动态撕裂能力.

参考文献:

- [1] 宗培,王志国,仲晨华等. TIG 熔修对焊接接头的金相组织及断裂韧性的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(5): 40-43.
- [2] 朱梅武,殷沐德,严明君等. TIG 熔修提高船体钢焊接接头抗爆性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(4): 37-43.
- [3] 朱梅武,严明君,殷沐德等. 45kg 及船体钢焊接接头 TIG 熔修效果研究[J]. 中国造船, 1999, (1): 92-98.
- [4] 桂赤斌. 高强度钢船体焊接技术[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2006.
- [5] 陈冰莹,史耀武. 关于管线钢及其焊接接头示波冲击试验中 E_i 的研究[J]. 焊接学报, 1989, 10(3): 172-179.
- [6] 于有生,卢伟. 对接接头工作应力分布及其应力集中系数的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(1): 124-125.

于完成诸如水下救生打捞、清除废物以及装配、修理、连接海下装置等任务.

参考文献:

- [1] 王启明,谭定忠. 水下作业工具系统[J]. 机械工程师, 2004, 8: 65-68.
- [2] 张铭钧,谭定忠. 局部回归神经网络在水下机器人运动控制中的应用[J]. 船舶工程, 2000, 4: 57-59.
- [3] 谭定忠,孟庆鑫. 水下作业液压机械手软抓取技术研究[J]. 机床与液压, 2000, 6: 142-144.
- [4] Birglen L, Gosselin CM. On the force capability of uncleractuated fingers[A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Taipei, China. 2003: 1139-1144.
- [5] 梅凤翔,刘瑞,罗勇. 高等分析力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1991.