第6卷 第1期 2012年3月 Vol.6, No.1 Mar.2012

文章编号:1673-9981(2012)01-0001-04

异种金属焊接接头微观组织的研究进展*

杨丽颖',杨立清²,解文昌',王 涛',李志远',钟 旸'

1. 河北大学质量技术监督学院,河北 保定 071002; 2. 内蒙古科技大学信息工程学院,内蒙古 包头 014010

摘 要:对异种金属焊接接头的焊缝区、熔合区与热影响区的显微组织及元素分布的研究现状进行了综述,指出焊接接头的熔合区易发生失效,对改善异种金属焊接构件的服役组织提供了思路和依据. 关键词:异种金属焊接接头;焊缝;微观组织

中图分类号:TG113.25 文献标识码:A

异种金属焊接广泛应用于石油化工等机械设 备和构件.焊接接头能否满足复杂工况下的服役要 求,关键在于其腐蚀电化学行为与力学性能,而这 些性能由焊接接头的显微组织及元素分布所决定. 为此,本文对异种金属焊接接头的显微组织和元素 分布进行了分析,这对实际的选材具有一定的指导 意义.

焊接接头因受到焊接过程中加热和冷却的作用,而导致焊缝区域的微观组织发生变化,形成了 母材、焊缝、熔合区和热影响区等区域,如图1所示.



图 1 焊接接头中焊缝、热影响区、熔合区的示意图
Fig.1 Sketch of welding seam, heat affected zone and fusion zone in welded joint

1 焊缝区组织

焊接熔池金属结晶形态主要与液相的成分过 冷有关.在焊缝或熔池的边界,易形成平面晶,在焊

缝或熔池中心附近易形成等轴晶^[1]. Lee 等^[2]采用埋 弧焊技术与Ti-Fe合金焊材焊接镍基合金 690 和 SUS 304L 金属, 研究发现随 Ti 含量增加, 焊缝的显 微组织由柱状晶转变为等轴晶. Magnabosco 等^[3]对 铜和钢板异种金属焊接接头研究后发现,焊缝区组 织为含有铜与奥氏体的非平衡混合组织, 选用含镍 高的焊材焊接奥氏体钢与铁素体钢后,在熔合线附 近,柱状晶或平面晶垂直于熔合线生长.在焊缝中 心显微组织主要以树枝晶和胞晶形式存在.因Ni含 量较高,焊缝无马氏体组织,提高了焊缝的韧性和 塑性[4]. 刘成虎[5]研究了NiCrMo-3镍基焊丝焊接Ni 基耐蚀合金C4与管线钢X60后形成的焊缝区的显 微组织. C4侧焊缝区主要为树枝晶及少量胞状晶, 枝晶间距约为10 µm,由于冷却速率大,一次枝晶和 二次枝晶不明显.能谱分析发现由于合金元素的偏 析,枝晶间富含Nb和Mo元素,而且Nb元素的偏析 比Mo元素高,枝晶干的Cr含量略高于枝晶间.

研究表明⁽⁰⁾,焊缝中奥氏体形成元素含量不足, 在焊缝中易形成马氏体组织,恶化接头性能.为了 避免焊缝中马氏体组织的形成,人们根据舍夫勒尔 (Schaeffler)图进行预测^[7],但在实际焊接过程中熔 池各部分金属的流动性以及母材与填充金属熔合 程度的差别较大.在熔池边缘,温度低致使液态金 属流动性差,所受机械搅拌作用较弱,又因液态停 留时间短,母材与填充金属不能充分混合,结果在

收稿日期:2011-07-25

^{*}基金项目:河北大学自然科学研究计划项目(2009-153);河北大学大学生科技创新项目(2011073) 作者简介:杨丽颖(1974-),女,内蒙古赤峰市人,讲师,博士.

这个部位出现过渡层,即接头的熔合区,它处于母 材与焊缝的交界处,是接头的最薄弱环节.

2 熔合区组织

熔合区主要有单相奥氏体区、奥氏体+马氏体 区、类马氏体区(M-L)和细小铁素体+珠光体区等, 而这些还会随着母材和熔敷金属的变化而变化.在 奥氏体钢-铁素体钢焊接接头中,铁素体钢侧的熔合 区主要由细小板条马氏体、少量的细小孪晶马氏 体、贝氏体(B)和碳化物(主要为M₂₂C₆)组成,是一个 复杂的混合组织区,这种组织为类马氏体^[8]. Kacar 等^[9-10]研究表明,选用镍基焊材可降低其熔合区宽 度,使类马氏体层消失,提高熔合区的综合性能.

熔合区由"未混合区(unmixed zone(U))"、"部分 熔化区(partially melted zone (P))"和焊接边界(weld interface(I))组成,如图2所示."未混合区"主要是马 氏体或类马氏体(M-L),这些细小板条马氏体、孪晶 马氏体、贝氏体和碳化物等组成的混合组织[11-12]与 该区合金元素含量有关.从焊接金属到母材热影响 区(HAZ)之间,随Cr与Ni含量减少,马氏体的开始 转变温度(Ms)升高.当Cr,Ni含量为某一值时,特别 是Ni含量低于5%~6%时,该区域组织开始发生马 氏体相变,最终在该区域形成一个马氏体层^[13]."部 分熔化区"的组织有奥氏体/类马氏体(M-L)边界和 类马氏体(M-L)/铁素体(F)或类珠光体(P-L)."部分 熔化区"的宽度与母材碳含量成正比关系^[14],主要与 母材的局部熔化量、碳含量、冷却速率以及合金元 素的偏析等因素有关.另外,焊接工艺对部分熔化



图2 单道次焊接熔合区的示意图



区宽度也有影响,如采用等离子焊工艺焊接 NiCrSiB 镍基合金与 304L 不锈钢异种金属后,其部分熔化 区宽度约 760 µm,采用钨极气体保护焊接后其部分 熔化区宽度约 2.5 mm^[19].

Chen 等^[16]对 Ti/Al 异种合金焊接研究后发现, 熔合区包含 α -Al和三元 α -Al, Si与Mg₂Si伪共晶结 构. 某电站设备用 2.25 Cr-1 Mo 铁素体钢和 AISI 316 不锈钢焊接的接头在服役期间发生失效,Ahmed 等177研究后发现,失效位置为靠近焊接界面铁素体 钢的熔合区,见如图3(b). 在焊缝和热影响区(HAZ) 之间的熔合区出现裂纹,其主要原因是此处存在残 余应力,在高温服役期间,由于铁素体钢与焊缝(奥 氏体钢)的热膨胀系数不同,使铁素体钢的热影响 区(HAZ)产生循环应力,进而沿着熔合线产生裂 纹.另外,在焊接过程中焊缝区产生残余应力,该应 力也助长了裂纹产生. 裂纹的形成过程是在焊缝根 部区形核,沿熔合线孕育,然后扩展到铁素体的热 影响区(HAZ). 在焊缝中,并非所有焊接熔合区都 不可避免地出现裂纹,裂纹的出现与熔合区成分有 关. Mai 等[18]研究了铜和工具钢异金属的焊接,发现 铜扩散至钢板形成的部分熔化区中未熔化的晶粒





图 3 异种金属焊缝边界⁽¹⁷⁾ (a)显微组织;(b)裂纹 Fig.3 Boundary of welding seam for dissimilar metal welding joint (a) microstructure; (b) crack

2012

边界出现了裂纹,但如果只有少量的铜熔解在钢 内,其边界裂纹消失,由于铜和铁的熔化温度相差 约450 □,该温度相当于对熔合区进行热处理,使铁 和铜的浓度逐渐减小,并获得成分均匀的熔合区, 所以不会出现裂纹现象. Tosto 等¹⁰⁹发现铜与AISI 304L不锈钢对接焊后,在熔合区和热影响区没有发 现孔隙和微裂纹. Li 等四研究了Fe₃Al与Cr18-Ni8异 种金属的焊接,结果发现,在Feal侧熔合区产生裂 纹,主要为穿晶断裂,河流花样是其最主要的特征, 不同密度的位错分布于熔合区,这些位错是Fe,Al/ Cr18-Ni8 接头的潜在裂纹源. 采用低合金钢焊丝焊 接C4镍基合金/X60钢四,结果发现在接头熔合区靠 近C4镍基合金熔合线附近出现了含奥氏体组织的 未混合区,其宽度约为350 um,X60 钢熔合区的组 织未出现明显的未混合区;在C4镍基合金未混合区 内Cr,Ni元素含量较高,但从焊缝中央到X60钢熔 合线,Cr元素含量明显减少,Ni元素含量增加.

3 热影响区组织

热影响区包括粗晶区、细晶区和再结晶区三部 分(图1),其宽度与母材导热系数有关. Marashi等²²¹ 采用电阻焊焊接镀锌碳钢与奥氏体不锈钢异种金 属.由于碳钢的热传导系数比不锈钢大,因此,碳钢 一侧的熔合区较小,热影响区较宽.用NiCrMo-3焊 材焊接C4镍基合金与X60钢获得的焊接接头的热 影响区显微组织²²¹显示:在C4镍基合金侧的热影响 区受焊接加热温度的影响,奥氏体晶粒长大.X60钢 侧的热影响区均包括粗晶区和细晶区两部分.焊接 接头经快速冷却后,细晶区(FGHAZ)的珠光体组织 较多,粗晶区(CGHAZ)的珠光体组织较少.

4 结 语

在异种金属焊接的过程中,由于焊接接头的化 学成分不均匀,经历焊接热循环后,焊接接头各个 区域出现不同的微观组织,特别是在熔合区出现极 其复杂的组织结构和元素分布.在奥氏体与珠光体 钢的异种钢接头中,奥氏体一侧的熔合区出现类马 氏体、贝氏体和奥氏体等多种复杂的组织,使熔合 区成为焊接接头最容易发生失效的位置,从而影响 焊接构件的服役寿命.目前,焊接材料的选择主要 局限于结构材料,而含Ni高的功能材料也可作为焊 材,这对异种金属的焊接是一个新的挑战和研究方 向.异种金属焊接接头组织的分析与评价对工程构 件焊材的选择具有一定的实际意义.

参考文献:

- [1] 武传松、焊接热过程与熔池形态[M].北京:机械工业出版 社,2008.
- [2] LEE H T, JENG S L, YEN C H, et al. Dissimilar welding of nickel-based alloy 690 to SUS 304L with Ti addition[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 335 (1):59-69.
- [3] MAGNABOSXO I, FERRO P, BONOLLO F, et al.An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel[J].Materials Science and Engineering A, 2006, 424(1):163-173.
- [4] 王锁根.双相不锈钢焊接显微组织状态[J].焊接技术, 2009,38(2):21-22.
- [5] 刘成虎.C4镍基合金与X60管线钢焊接接头的组织及性能研究[D].北京:北京科技大学,2007.
- [6] BUDDEN P J, CURBISHLEY I.Assessment of creep crack growth in dissimilar metal welds[J].Nuclear Engineering and Design, 2000, 197:13-23.
- [7] 张汉谦.钢熔焊接头金属学[M].北京:机械工业出版社, 2000.
- [8] MAI T A, SPOWAGE A C.Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium[J].Material Science and Engineering A, 2004, 374(2): 224-233.
- [9] KACAR R, ORHAN B.An investigation of microstructure/ property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steels[J].Materials and Design, 2004,25:317-329.
- [10] PARK J D, STRATFORD G C.The high-temperature performance of nickel-based transition joints fracture behaviour[J].Marerial Science and Engineering. 2001, A299: 144-184.
- [11] PAN C X, WANG R, GUI J.Direct TEM observation of microstructures of the austenitic/carbon steel welded joint [J].Journal of Materials Science, 1990, 25(7):3281-3285.
- [12] WANG Z H, XU B Y, YE C P.Study of the marensite structure at the welt interface and the fracture toughness of dissimilar metal joints[J].Welding Journal, 1993, 72 (9): 297-303.
- [13] PAN C X, ZHANG Z.Characteristic of the weld interface in dissimilar austenitis-pearlitic steel welds[J].Materials Characterization, 1994, 33(2): 87-92.

- [14] PAN C X, ZHANG Z.Morphologies of the transition zone in dissimilar austenitic-pearitic steel welds[J].Materials Characterization, 1996, 36(1):5-10.
- [15] SUDHA C, SHANKAR P, SUBBA RAO R V, et al. Microchemical and microstructureal studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(10): 2103-2112.
- [16] CHEN S H, LI L Q, CHEN Y B, et al. Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509 (3):891-898.
- [17] AHMEDH E. Characterization of the GTAW fusion line phases for superferritic stainless steel weldments[J].Journal of Materials Processing and Technology, 2001, 118(2): 127-131.
- [18] MAI T A, SPOWAGE A C.Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium[J].Material Science and Engineering A,2004,374(2): 224-233.

- [19] TOSTO S, NENCI F, HU G J D, et al.Microstructure of copper-AISI type 304L electron beam welded alloy[J].Materials Science and Technology, 2003, 19(4):519-522.
- [20] LI Yajiang, MA Haijun, WANG Juan.A study of crack and fracture on the welding Joint of Fe₂Al, and Cr18-Ni8 stainless steel[J].Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13-14): 4343-4347.
- [21] QUAN Y J, CHEN Z H, GONG X S, et al.CO₂ laser beam welding of dissimilar magnesium-based alloys[J].Materials Science and Engineering A, 2008, 496(1-2):45-51.
- [21] 杨丽颖,董小平,柳伟,等.低合金钢焊丝焊接C4镍基合金/X60 钢熔合区组织与耐蚀性[J].腐蚀科学与防护技术,2009,21(1):40-43.
- [22] MARASHI P, POURANVARI M.Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels[J]. Materials Science and Engineering A,2008,480(1-2): 175-180.
- [23] 杨丽颖:耐蚀合金-碳焊接接头微观组织及其力学和腐蚀 行为研究[D].北京:北京科技大学,2008.

Research process of microstructure of dissimilar metal welding joint

YANG Liying', YANG Liqing', XIE Wenchang', WANG Tao', LI Zhiyuan', ZHONG Yang'

1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

Abstract: Current research status on microstructure and elements distribution in welding seam, fusion zone and heat affected zone were reviewed in this paper. The microstructure leading to failure at the corresponding fusion zone was pointed out. It will provide researchers with thinking and ground to improve the control factors of excellent microstructure for dissimilar metal welding joint with excellent service life.

Key words: dissimilar metal welding joint; welding seam; microstructure