

第七届全国焊接学术会议 论文集

PROCEEDINGS OF THE 7TH CHINESE NATIONAL
CONFERENCE ON WELDING

第 7 册

1993年6月3日—6日 中国青岛



中国机械工程学会焊接学会



第七届全国焊接学术会议 论文集

PROCEEDINGS OF THE 7TH CHINESE NATIONAL
CONFERENCE ON WELDING

第 7 册

1993年6月3日—6日 中国青岛



中国机械工程学会焊接学会

中国机械工程学会焊接学会各专业委员会评审出的第七届全国焊接学术会议A类论文452篇, B类论文292篇。《第七届全国焊接学术会议论文集》收入专题报告5篇、A类论文429篇(不符合制版要求及放弃刊登的论文23篇)和全部B类论文题录, 共分七册出版。除大会专题报告安排在第1册外, 其它各册所包括的专业委员会如下:

第1册: Ia、Ib、Ic、XIX

第2册: II、XI、

第3册: IIIa、IIIb、IIIc、XVI、XVIII、XX

第4册: IXa、IXb

第5册: X、XV

第6册: XIIa、XIIb、XVII

第7册: IVa、IVb、IVc、IVd、V、VIII、XIII、XIV

目 录

IVa

新型非真空电子束(电子—等离子束)焊的研究.....	宁斐章等	7—1
电子束扫描频率对AL-9Mn合金焊接熔池Mn分布的影响.....	陈晓风等	7—6
电子束表面快速熔凝处理对GCr15钢组织的影响	史世康等	7—10
电子束表面淬火对GCr15钢组织的影响	史世康等	7—15

IVb

利用等离子弧表面强化灰铸铁.....	杨 勇等	7—19
--------------------	------	------

IVc

一种新的激光焊数学模型及其计算方法.....	刘建华等	7—24
激光与TIG焊电弧相互作用机理的研究	张绍彬等	7—29
用光信号实时监测激光焊接质量.....	骆 红等	7—33
激光重熔参数对重熔处理的影响.....	陈忠孝等	7—38
LC移相双变压器式CO ₂ 激光电源及特性分析	段 军等	7—43

IVd

爆炸焊接复合板交界区冶金行为研究.....	于启湛等	7—48
-----------------------	------	------

V

焊缝射线底片象质指数测定仪的研制.....	张金昌等	7—53
焊缝X射线探伤实时成象系统及其对图象质量的影响	孙忠诚等	7—58
QHME超声波探伤及其信息记录系统在厚壁压力容器上的应用研究.....	郭治旗等	7—62
未经加工的不锈钢堆焊层近表面缺陷液晶检验的研究.....	解应龙等	7—67
用于激光焊缝质量诊断的实时专家系统.....	施克仁等	7—72
充原油管道环焊缝X射线透照方法	韦福水	
微机型焊条稳弧性测试仪的研制.....	杜永贵等	7—77

VIII

酸性焊条烟尘粒度分布的研究.....	施雨湘等	7—82
兰州铁路机床大修厂电焊车间烟尘治理措施的研究.....	王焕钧等	7—87
大连造船厂电焊烟尘卫生标准实验研究.....	毛宗敦等	7—91

电焊工尘肺患病的流行病学调查·····	薛国昌等	7—98
JNL-B型焊接烟尘净化器的研制·····	曹秉鑫等	7—103
大连造船厂电焊工尘肺病因学研究·····	侯瑞玺等	7—107
电焊工、油工妇女劳动卫生学调查·····	王大奎等	7—113
浅谈气体护焊的安全与卫生·····	邱连士	7—117
二氧化碳保护焊劳动卫生调查·····	张福明等	7—122
金属容器焊接防护综合装置的研制及其应用·····	宁文生	
金属球罐焊接对人体影响及预防措施的研究·····	宁文生	
84例电焊工死因的职业流行病学调查·····	赫丽莉等	7—125
电焊烟尘对焊工肺功能影响的调查·····	章芝美	7—128
大连造船厂船体车间486名电焊工体验结果分析·····	杜守明等	7—131
船厂电焊作业工人健康状况调查·····	马素芬等	7—135
造船焊工用力呼气肺量图平均通过时间的测定及其分析·····	庄惠民等	7—139
船舶生产过程中电焊尘浓度计算方法的研究·····	毛宗数等	7—144
全封闭式新型焊工培训间除尘系统的研究·····	郭其安等	7—151
容器内焊接烟尘的防护及加中药送风装置研制·····	龙 红等	7—155
焊工的安全技术培训·····	程 萱	
焊接烟尘静电采样的研究·····	陆 信等	7—160
电焊作业的职业危害与安全卫生·····	朱永康	7—165
预防在危险环境中手工电弧焊操作触电事故的发生采取的安全措施·····	唐 珂	

X III

铁路旧钢桥中疲劳裂纹扩展寿命的研究·····	徐济民等	7—170
16Mn钢对焊接头锤击件的F1c寿命表达式和变幅疲劳寿命估算·····	李 臻等	7—175
15MnVN9C钢交叉焊缝的疲劳强度·····	王兴铎	
疲劳裂纹扩展动态过程的数值研究·····	李晓延等	7—180
爆炸处理提高焊接接头疲劳性能的研究·····	陈亮山等	7—184
残余应力对09CuPCrNi钢焊接接头近门槛值域内 疲劳裂纹扩展行为的影响·····	邱 海等	7—189
30CrMnSiNi2A钢含焊接缺陷对焊接件的疲劳寿命估算·····	吕宝桐等	7—195
焊接接头焊趾表面裂纹疲劳扩展寿命统计分析·····	张彦华等	7—200
显著提高疲劳试验效率的数据折算并组法·····	张恩深等	7—205
侧槽几何对裂纹扩展速率的影响试验研究·····	张宝昌等	7—210
焊趾疲劳裂纹扩展的P-da/dn- ΔK 关系·····	王立君等	7—215
旧铁路钢桥用钢的疲劳损伤状况分析·····	唐国翌等	7—219
船舶十字接头错边量对疲劳强度影响的研究·····	宋圣扬等	7—224

15MnVNq钢焊接接头疲劳裂纹扩展规律的研究	李广铎等	7—230
焊接结构断裂寿命估计的试验研究	张宝昌等	7—235

XIV

焊接技术人员继续工程教育的探讨	邵泽安等	7—240
我们加强实践性教学环节的做法与体会	西北工业大学	7—245
焊接专业生产实习基地建设工作总结	董俊明等	7—250

B类论文题集:

H-IV a-005-93(B)	电子光学的可变参数对焊接电子束形状的影响	陈 键等	哈尔滨焊接研究所
H-IV a-006-93(B)	70KV、30KW新结构电子枪的研制	秦志云等	桂林电气科学研究所
H-IV a-007-93(B)	电子束焊接机真空程控的一种新方法	宋宜梅等	桂林电气科学研究所
H-IV b-002-93(B)	小孔法等离子弧焊熔透双参数微机控制系统	白 钢等	西北工业大学焊接教研室
H-IV b-003-93(B)	双短路式微束等离子弧焊接的引弧机理分析	关毅雄等	上海交通大学焊接教研室
H-IV b-004-93(B)	光控双头自动微束等离子焊机研制	齐志扬等	上海交通大学焊接室
H-IV c-006-93(B)	超薄板激光焊接技术—金属罐头盒纵缝的激光自动焊接	施克仁等	清华大学机械系
H-IV c-007-93(B)	激光焊接质量实时监测的声谱传感技术	胡伦驥等	华中理工大学焊接教研室
H-IV c-008-93(B)	激光重熔合25%WC的铁基合金涂层的研究	陈忠孝等	大连铁道学院焊接教研室
H-IV c-009-93(B)	多管共源无镇流电阻的CO ₂ 激光器电源	骆 红等	华中理工大学焊接教研室
H-V-008-93(B)	压力容器X射线探伤专家系统	阎 澄等	甘肃工业大学焊接教研室
H-V-0010-93(B)	液晶显示器在智能超声波探伤仪上的应用	王正先等	清华大学机械系
H-V-0011-93(B)	管状T.K.Y节点的超声波检测	高振来等	天津市海洋平台制造公司

H-V-009-93(B)	超厚曲面焊缝超声探伤影响定位精度的因素分析	庄文栋	哈尔滨锅炉厂检查处
H-V Ⅲ-024-93(b)	48例电焊工晶体混蚀的调查	段长昆	大连企荣铸铁管有限公司
H-V Ⅲ-025-93(b)	电焊工尘肺新旧X线标准的对照分析	薛国昌等	齐齐哈尔车辆厂职工医院
H-V Ⅲ-026-93(b)	电焊作业的劳动卫生学调查	赵敏娟等	齐齐哈尔车辆厂职工医院
H-V Ⅲ-027-93(b)	等离子切割噪声抑制	吕作五	北京34信箱17分箱
H-V Ⅲ-028-93(b)	电镜分析焊接烟尘直接采样法研究	杨世柏等	武汉水运工程学院
H-V Ⅲ-029-93(b)	国内外电焊工死因与尘肺发病探讨	严明等	齐齐哈尔车辆厂职工医院
H-V Ⅲ-030-93(b)	尿锰测定对电焊工锰中毒早期诊断价值的探讨	王文龙等	上海市杨浦区中心医院
H-V Ⅲ-031-93(b)	炭弧气刨工尘肺一例报告	朱吉安	芜湖造船厂职工医院
H-V Ⅲ-032-93(b)	关于一起电石桶爆炸事故的原因分析	赵紫东	北京市纺织工业总公司技安处
H-V Ⅲ-033-93(b)	DH-A型焊工护目镜防护效果观察报告	张福明等	上海沪东造船厂职工医院
H-V Ⅲ-034-93(b)	电弧焊接烟尘中可溶性及不溶性氟化物的测定方法	潘永玲	鞍山市立山区深沟寺五田街23号
H-V Ⅲ-035-93(b)	焊接地螺丝引起爆炸的事故分析研讨	李征	南通锅炉厂设备科
H-V Ⅲ-036-93(b)	焊补油箱灼烫事故的分析与思考	陆晓华	南通机械工业局工会
H-V Ⅲ-037-93(b)	溶解乙炔气厂高压部分燃爆危险性分析及对策	高洁等	北京市朝阳区麦子店正街80号
H-V Ⅲ-038-93(b)	溶解乙炔气厂危险性因素分析及对策	吴玉平	北京市第二建筑工程公司
H-V Ⅲ-039-93(b)	溶解乙炔气厂—低压部分燃爆危险性分析及对策	鹿源	中国建筑第一工程局
H-V Ⅲ-040-93(b)	乙炔气厂防火防爆安全管理—乙炔瓶灌装过程中的安全技术管理	史云刚	徐州市齿轮厂安技科
H-V Ⅲ-041-93(b)	焊接气溶胶扩散行为研究	施雨湘等	武汉水运学院焊接教研室

H-XⅢ-016-93(b)	组织遗传对焊接接头韧性的影响	帅玉峰等	太原山西机床厂
H-XⅢ-017-93(b)	应力比R 对09CuPcrNi 钢焊接接头 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 的影响	李广铎等	大连铁道学院 焊接教研室
H-XⅢ-018-93(b)	不均质焊接接头疲劳裂纹扩展动态 过程及不均质性的影响	李晓延等	哈尔滨工业大学 焊接教研室
H-XⅢ-019-93(b)	力学不均质性焊接接头疲劳裂纹闭 合行为的有限元分析	李晓延等	哈尔滨工业大学 焊接教研室
H-XⅢ-020-93(b)	焊接接头压力(区)疲劳裂纹的发现 和初步分析	张恩深等	哈尔滨焊接研究室
H-XⅢ-021-93(b)	国家标准《焊接接头脉动拉伸疲劳 试验方法》要点剖析	张宝昌等	哈尔滨焊接研究室
H-XⅢ-022-93(b)	国家标准《点焊接头剪切拉伸疲劳 试验方法》要点分析	张宝昌	哈尔滨焊接研究室
H-XⅢ-023-93(b)	侧槽试样与对应平板试样裂纹扩展 速度关系的试验研究	张宝昌等	哈尔滨焊接研究室
H-XⅢ-024-93(b)	爆炸冲击改善16Mn钢焊缝疲劳特性 机理的影响	赵铁民	中科院沈阳金属 研究所
H-XⅢ-025-93(b)	爆炸冲击波强度对16Mn钢焊缝疲劳 性能的影响	陈亮山	沈阳机床厂
H-XⅣ-004-93(b)	打破传统模式, 增加实验内容的深 度与广度—弧焊电源课程实验教学 改革	刘金合	西北工业大学焊接 教研室
H-XⅣ-005-93(b)	人体生物节律在焊考工作中应用的 初步尝试	杨友民等	沈阳工业大学焊工 培训中心

补遗 (因论文清稿晚到):

H-X-004-93		钟国柱等	7—255
H-XⅡa-008-93		耿 正等	7—260
H-XⅦ-002-93		殷树言等	7—265
H-XⅦ-007-93		耿 正等	7—270
H-XⅦ-013-93		耿 正等	7—275

MIG焊熔透动态过程的计算机视觉检测与

分析(H-XX-005-93) 王 滨

新型非真空电子束（电子——等离子束）焊的研究

哈尔滨焊接研究所 宁斐章 郑锦山 陈 健

摘 要

本文提出了新型非真空电子束（电子——等离子束）焊方法。将大功率高能密度电子束和等离子串联、叠加起来，充分发挥等离子体的泵效应，空心通道和附加保护作用，对放置在大气中的薄板进行高速焊接，或单道一次焊接厚板，克服了真空室的限制。当加速电压100KV、束流50-100A、等离子电流100A时，焊接低碳钢的最大熔深接近20mm，焊缝深宽比为5:1-10:1。与国外的非真空电子束焊相比，虽然加速电压较低和引出孔直径较大（2-3mm），由于采用了先进的等离子法引出技术，电子束的能量损失和能量密度的降低较少，加热效率最高，焊缝的深宽比最大，这些突出的优点将会推动非真空电子束焊迅速发展。

关键词：电子束焊、等离子焊、非真空、离子束

一、前言

卅多年来，熔化焊新热源的发展非常迅速，其主要特点是大幅度地提高能量密度，出现了等离子、电子束和激光这著名的高能三束。焊接厚板产品和大量生产薄板焊件时为了提高单道焊的熔深和焊接速度，仅仅增大功率是不够的，必须提高焊接热源的能流密度。因此，等离子、电子束和激光焊在生产中的应用，是熔化焊技术的根本变革，意义重大。

电子束的能流密度比电弧高2-3个数量级，现在钢板电子束单道焊的最大熔深为320mm，焊接薄板的最大速度为40-60mm/min，这些都是电弧和等离子焊接热源无法做到的。但是，电子束焊接时，通常必须把工件放在真空工作室内，为了克服真空室对焊接大型工件、连续性工件和大批量产品的限制，减少真空设备的投资，提高焊接生产率，三十年来，国外一直都在大力发展低真空、局部真空和非真空电子束焊。由于电子束进入大气中的散射，能量的损失和能流密度的降低都很大，这是非真空电子束焊发展的主要障碍。为了解决这个问题，现在国外的非真空电子束焊向高压大功率发展。同时，也注意到了进一步提高电子束能流密度的重要性。但是，到目前为止，效果并不理想。

我们通过大功率电子束聚焦和在低真空中散射的研究，提出了He气保护低真空13.332-133.322Pa和1/100大气压电子束焊接工艺。同时通过等离子体的泵效应和空心通道的研究，证实了1970年提出的电子——等离子束焊的可行性及其明显的优点。

二、非真空电子束焊的技术关键

非真空电子束焊有三个大的技术问题：一是需要有一支高能密度的大功率高真空电子束，这个条件我们已经具备。二是把高真空电子束引出到大气中时如何保持电子枪室的高真空度，同时，还要防止电子束的散射和损失。三是如何防止焊接熔池的污染和保证焊接质量。上述三个技术问题中，第二个是最关键的。

国外认为，非真空电子束焊的技术关键：一是电子束由真空电子枪室内引出到大气中的

*王旭有、才荫先、张文铎、赵惠民、赵惠哲等同志参加了本文中的研究工作。

能量损失不能太大；二是电子束由电子枪室通过引出孔到达工件的能量密度不能降得过低^[1]。

为了使电子束由真空电子枪室内引出到大气中，枪室下端必须开一引出小孔，其直径在0.75-1.5mm之间。引出孔不能太小，要保证电子束顺利通过，但又不能太大，又要防止大气分子过多的流入枪室，从而降低电子枪工作部分的真空度。通常电子枪阴极发射、静电聚焦与加速电子束部分的真空度为0.013-0.067Pa。为了进一步保证电子束的发射、聚焦、加速和防止电子束在引出过程中和大量的气体分子碰撞，这种碰撞引起的散射不仅大大降低电子束的能量密度，同时也会引起电子束能量的大量损失。国外采用了一系列提高枪室真空度的电子束引出技术：（1）用孔板把枪室分成几段后分别抽气，在不大的距离内造成很大的真空梯度，而使泵的抽气量降到最小的分段真空法；（2）用高速气流在电子束引出孔外造成一个低气压区，减少大气分子从引出孔流入枪室的气流密封法；（3）加热蒸发压力低和不分解的物质，其蒸气进入引出孔后冷却凝固，提高枪室真空度的热塞法；（4）采用环形低速电子轰击引出孔周围，阻止大气分子流入枪室的电子轰击法等等。

为了使电子束由引出孔到达工件间的散射减少，除了减少这段工作距离之外，主要的是提高电子束的加速电压，如提高到150-200千伏，用以增大电子的动能。另外还要在工作距离内采用原子量小的保护气体，如氦气，使高速运动的电子和保护气体分子碰撞时减少电子束的散射。这样才能保证电子束从高真空电子枪室内成功的引出，电子束的能量损失较小。

能量密度降低也较少，在惰性气体保护下可对置于大气环境中的工件进行非真空电子束焊^[2]。

为了更好的解决非真空电子束焊的技术关键和保护焊接熔池，提高焊接质量，我们提出了用等离子引出电子束的新方法。新型的非真空电子束焊也称电子——等离子束焊。

三、电子——等离子束焊的特点

电子——等离子束焊是把电子束和等离子串联，叠加起来进行焊接。见图1。电子束从高真空枪室中通过分段真空室和等离子空心阴极进入大气，穿过等离子弧以后轰击，熔化金属熔池，进行焊接。采用等离子引出电子束具有下列特点：

1、等离子体的泵效应。等离子体的泵效应三个，一是气流抽吸效应，它提高真空室的真空度；二是热压效应，降低真空室的真空度；三是热塞效应，它提高真空室的真空度，其效果最为显著。等离子体的气流、电流越大，泵效应作用也越大，真空度往往提高一个数量级。等离子体的泵效应相当于国外气流密封法、热塞法和环型低速电子轰击法的综合^[3]。

2、等离子体的空心通道。压缩的等离子弧的温度，在中心可达25000-30000℃左右。根据气体基本定律，可以粗略的计算出，当压力不变时温度升高273℃等离子体的体积增大一倍，而25000-30000℃时等离子体的密度几乎为室温时的1/100，这时的密度相当于常温时1/100大气压的气体分子密度。电子束通过这样的空心通道散射将是很小的，因而其能量的损失和能量密度的降低也将是很少的。

3、等离子体的附加作用。Ar或He气等离子能很好的保护焊接熔池，串联的附加热源不仅

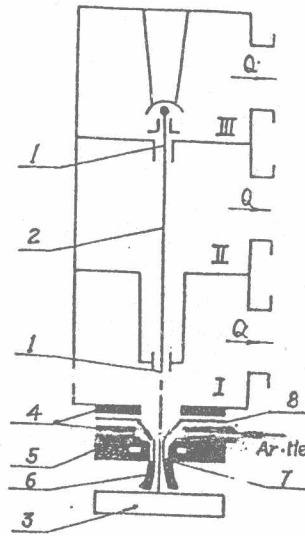


图1 电子——等离子束焊接示意图

I、II、III—第一、二、三级真空室，Q—泵的抽气速率；1—气阻孔；2—电子束；3—工件；4—绝热密封垫；5—等离子喷嘴；6—等离子弧；7—电子束引出孔；8—空心阴极。

提高了能量密度和热效率，合适的温度梯度也有助于焊缝表面的成形。

电子—等离子束热源不是机械的叠加、串联，而是有机的结合，各取所长。等离子很好的引出了电子束，而电子束又加热、压缩了等离子弧而成束。因此，电子—等离子束是新型非真空电子束焊的理想热源。

四、电子——等离子束焊试验结果

在大功率低真空电子束焊研究的基础上^{[4][5]}，电子束的加速电压采用100KV，束流为50-100mA。He气保护，尽量缩短工件到引出孔的工作距离。电子束的引出孔直径为2-3mm，等离子电流100A左右。电子—等离子束焊接20号锅炉钢板的工艺规范见表1。各种焊接规范的焊缝低倍组织见图2。采用表1中1号规范焊接，当电子束未引出时等离子的附加熔化深度见图2(d)这个熔深是很浅的，说明图2(a)的焊缝几乎全是电子束焊接的，而等离子主要是引出电子束的工具。电子—等离子束焊接过程稳定，焊缝成形良好，没有发现缺陷。

表1 电子——等离子束焊接规范

序 号	加速 电压 (KV)	束功率 (KW)	焊 接 速 度 (mm/min)	工 作 距 离 (mm)	焊接 熔深 (mm)	焊 缝 宽 度 (mm)		焊 缝 深 宽 比	
						表面	中部	(表面+ 中部)/2	中部
1	100	7.0	1200	8	12.0	7.5	1.2	2.8:1	10:1
2	100	7.5	900	8	16.5	8.0	2.0	3.3:1	8.2:1
3	100	8.5	200	8	19.5	12.5	3.3	2.4:1	5.6:1

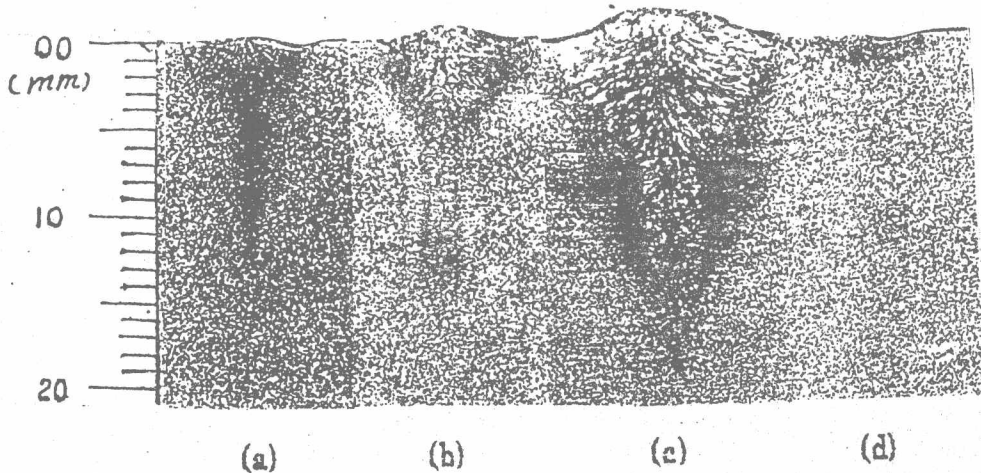


图2 电子——等离子束焊缝低倍组织 (a).表1中1号规范试件 (b).2号规范试件 (c).3号规范试件 (d).等离子附加熔化焊缝低倍组织(表1中电子束未引出时1号规范的试件)

五、非真空电子束焊国内外水平对比

现将美国、日本和法国等非真空电子束焊接的典型的和最新的焊接规范与焊缝形状、熔化效率等有关技术数据列入表2进行比较。

国外非真空电子束焊虽然主要采用高电压、大功率，但由于引出技术不先进，结果并不理想。法国的电子束聚焦水平很高，但单位熔深线能量还是不高，单位功率熔深不大，焊缝深宽比也不大。见图3、4、5。为了更全面的对比焊缝的深宽比，这里除了选取焊缝中部三分之一处的宽度外，同时还选取焊缝的表面宽度与中部宽度的平均值计算深宽比。

我们的新型非真空电子束（电子——等离子束）焊虽然加速电压较低，只有100kV，较大的引出孔直径（2-3mm）和焊接导热较好的低碳钢试件，但是，由于采用了先进的等离子法引出电子束，充分发挥了等离子的泵效应，空心通道和附加保护作用等，保证了电子枪室的高真空度，并使得电子束的能量损失较小，能量密度降低较少，焊接熔池受到保护。与国外相比，在其他条件相近时，单位熔深线能量最低，单位功率熔深最大，焊缝深宽比也最大，达到8:1-10:1。焊接新方法特点明显、优点突出，设备造价低，X射线易于防护，适于发展大功率非真空电子束焊接，有利于与大功率等离子和激光焊接相竞争。

表2 国内外非真空电子束焊技术数据对比

序号	加热电压 (KV)	束功率 (KW)	焊接速度 (mm/min)	工作距离 (mm)	焊接熔深 (mm)	焊缝宽度 (mm)		数据来源
						表面	中部	
1	165	52	150	16	53.0	30.5	9.5	1976美国
2	165	10	900	15	4.0	7.7	2.1	1990美国
3	150	12	1000	9.5	10.0			1975美国
4	175	6.4	720	6.1	8.8			1987美国
5	175	12.3	250	9.5	19.0	7.2	4.2	[16]
6	65	6.5	1000	6	7.0	3.1	1.4	1988法国
7	250	20	600	12	16.0	14.5	4	1978日本
8	100	7.5	900	8	16.5	8	2.0	1990哈焊所

注：在技术数据例图对比美国的五个规范中分别选取最佳数据对比。保护气体除5号规范为空气外，其他全部是氮气，焊接材料除2、3、8号规范为碳钢外，其他全部是不锈钢。

数据来源于国外参考文献，详见论文单行本。

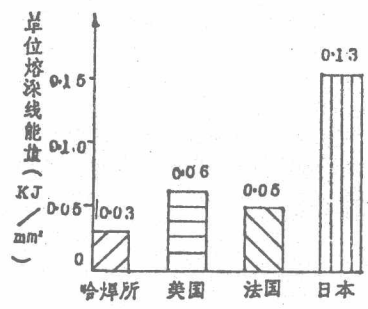
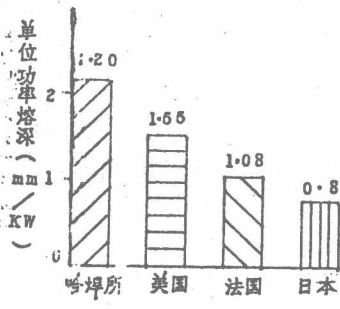


图3 国外非真空电子束焊单位功率熔深对比 图4 国外非真空电子束焊单位熔深线能量对比

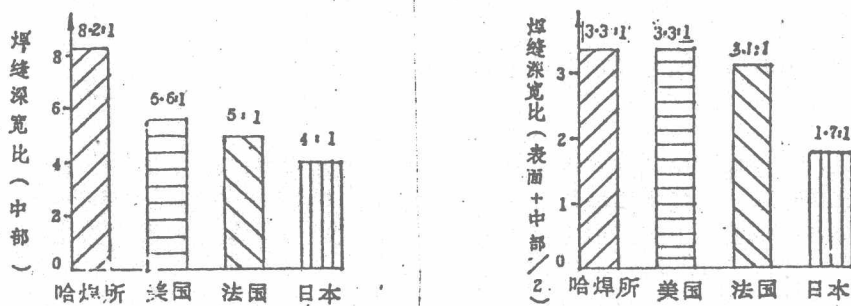


图5 国外非真空电子束焊缝深宽比对比

六、结语

新型非真空电子束(电子+等离子束)焊是把电子束和等离子串联、叠加起来,对放置在大气中的薄板进行高速焊接和单道一次焊接厚板产品,克服了真空室的限制。

在大功率低真空电子束焊研究的基础上,又充分发挥了等离子体的泵效应、空心通道和附加保护作用等,实现了加速电压100KV、束流50-100mA、等离子电流100A左右的新型非真空电子束焊。焊接低碳钢的最大熔深接近20mm,焊缝成形良好,深宽比为5:1-10:1,焊接过程稳定。

新型非真空电子束焊与美、日、法等国相比,虽然加速电压较低和引出孔直径较大,但由于采用了先进的等离子法引出技术,电子束的能量损失和能量密度的降低较少;加热效率最高;焊缝的深宽比最大。因此,有利于发展大功率非真空电子束焊并与激光焊接相竞争。

参考文献

- [1] John W. Meier, Recent Developments in Vacuum and Nonvacuum EB Welding Technology British welding Journal, May 1988
- [2] 非真空电子束焊, "焊接", 1972.3
- [3] 宁斐章、赵惠民、等离子体的泵效应, 哈尔滨焊接研究所, 1990
- [4] 宁斐章、赵惠哲、He气保护低真空 (1×10^{-1} - 1 Torr) 电子束焊接工艺的研究, 第一届中国、联邦德国焊接学术会议论文集, 1987
- [5] 宁斐章、陈健、郑锦山、厚板1/100ATM电子束焊接工艺的研究, 第六届全国焊接学术会议论文集, 第七集1990, 中国机械工程学会焊接学会
- [6] Welding Handbook, Seventh Edition, Volum3, American Welding Society (1987)

电子束扫描频率对Al-9Mn合金焊接熔池Mn分布的影响

中国科学院金属研究所 陈晓风 陈 雄 李忠库

摘 要

本文对Al-9Mn合金焊缝金属晶体细化及焊接熔池中Mn溶质浓度分布进行了研究, 当电子束扫描频率为300Hz时, 焊缝金属晶体细化9倍, 测出扫描频率与Mn溶质浓度分布的关系。观察到 $f=0$ Hz时Mn溶质传输为上坡扩散型, 表明熔池未出现对流现象, 不发生熔化回转运动。当扫描频率为100, 300, 500Hz时, Mn溶质传输均为重叠扩散型。建立了溶质上坡扩散模型, 表明电子束扫描焊接时溶质重叠扩散, 溶池不发生回转运动。否定了搅拌熔池回转运动破碎晶枝细化晶粒理论。重叠扩散区中间出一低谷是电子束扫描熔切晶体的踪迹, 证明电子束扫描焊接细化晶体是电子束周期回扫熔切晶体的重复过程。

关键词: 电子束扫描焊接、溶质扩散、晶粒细化、熔池回转。

一、前言

控制凝固组织细化, 消除凝固缺陷是提高焊缝金属承载能力, 保障结构体安全运行的重要措施。但是由于人们一直沿用搅拌熔池, 液态金属回转破碎晶枝理论来解释电子束焊接熔池中晶粒细化现象。所以一直达不到有效控制晶粒细化的目的^[1]。在过热的焊接熔池中未发现凝固相^[2]。实际上在熔池液态金属中不存在现成表面也不可能发生非均质形核。本文用电子束扫描焊接Al-9Mn合金, 测出Mn溶质上坡重叠扩散传输。表明熔池中不存在凝固相, 无对流现象, 熔池不发生回转运动, 也不能破碎晶枝。用上坡扩散物理模型进一步证明“熔切晶体”细化焊缝金属晶粒理论的正确性。

二、试验用材料及方法

本研究选用 $K\alpha>1$ 溶质上坡扩散的Al-9Mn合金, 试样尺寸为 $50\times 25\times 5$, 化学成分见表1:

表1 Al-9Mn合金化学成分(Wt%)

Mn	杂 质	Al
9.0	<0.01	余量

用正弦波发生器调整电子束扫描波型及频率, 电子束单道焊接规范见表2。用“定态”试样付刻, 出一次结晶组织, 用电子探针垂直熔池固液界面测出Mn溶质浓度分布。

表2 电子束焊接规范

加速电压 (KV)	束 流 (mA)	聚集电流 (mA)	工作距离 (mm)	ab值	焊接速度 (mm/s)	真空度 (Torr)
60	10	40	238	1	10.5	5×10^{-4}

三、试验结果

(一) 电子束扫描频率对焊缝金属晶体主轴长度的影响如图1所示。从图中看出在焊接速度不变的情况下随着电子束扫描频率的提高, 焊缝金属晶体主轴长度减短。当 $f=300$ Hz时晶体

* 参加本研究工作的还有孙长义、代炳权

主轴最短，晶体细化9倍，当扫描频率增加到500Hz时晶体主轴增长，晶粒开始粗化。

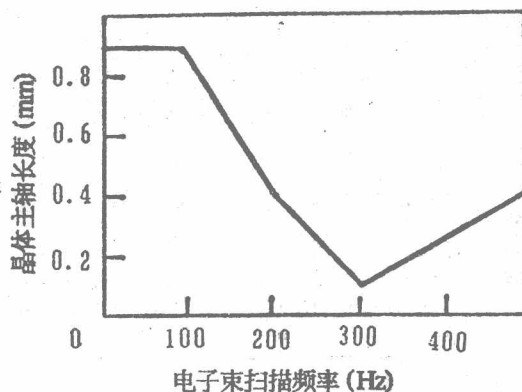


图1 电子束扫描频率与焊缝金属晶体主轴长度的关系

为阐明电子束扫描焊接时晶粒细化的本质，测出不同扫描频率下Mn溶质浓度分布。用溶质传输的模型来证明熔池是否发生回转运动。从图2看出当 $f=0$ 时，Mn溶质上坡扩散，不是一条水平线熔池内无对流产生，液态金属不发生回转运动。

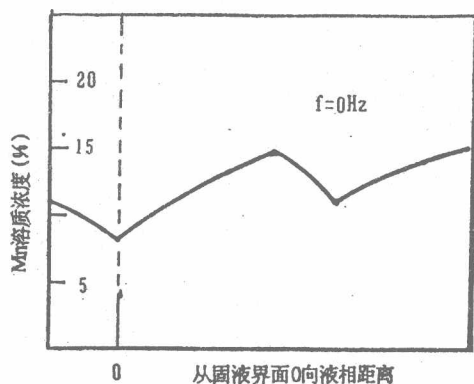


图2 $f=0$ 时在固液界面前沿Mn溶质浓度分布

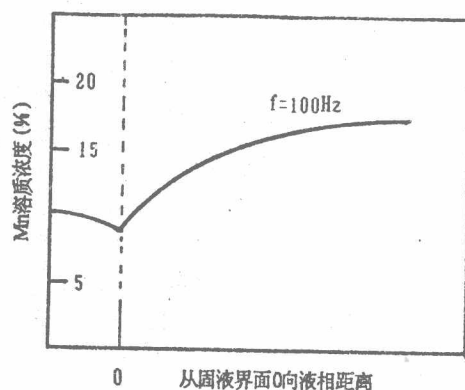


图3 $f=100$ Hz时在固液界面前沿Mn溶质浓度分布

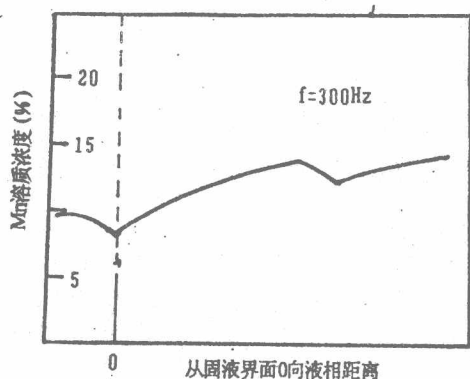


图4 $f=300$ Hz时固液界面前方Mn溶质浓度分布

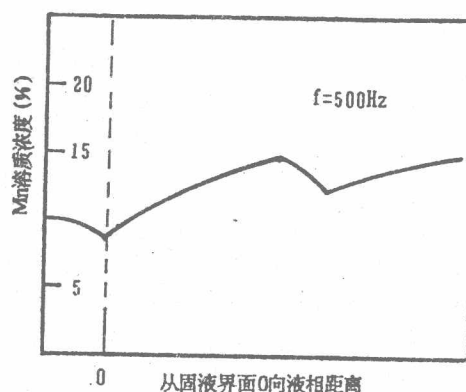


图5 $f=500$ Hz时固液界面前方Mn溶质浓度分布

从图3看出当 $f=100\text{Hz}$ 时熔池固液界面前方Mn溶质以增函数上坡扩散，达到最高点后又以减函数扩散，到达最低点后又以增函数上坡扩散。Mn溶质传输为重叠扩散型不是一条水平线表明熔池内无对流产生，液态金属不发生回转运动。从图4, 5可看出扫描频率为 300Hz , 500Hz 时固液界面前方Mn溶质浓度分布的规律与 $f=100\text{Hz}$ 时分布规律相似。进一步证明电子束扫描焊接熔池不发生回转运动，细化晶粒不是液态金属破碎晶枝的结果。

四、分析讨论

在铸造平衡凝固理论中有四种不同的细化晶粒观点^[9]。焊接界一直沿用搅拌熔池，液态金属回转运动破碎晶枝，游离形核生成等轴晶的理论。本研究结果证实，在电子束扫描条件下Mn溶质传输为重叠上坡扩散型不是一条水平线，熔池中无对流产生，熔池不发生回转运动。用测出的Mn溶质浓度分布曲线，建立熔切晶体前沿Mn溶质传输的模型(见图6)进行分析讨论。

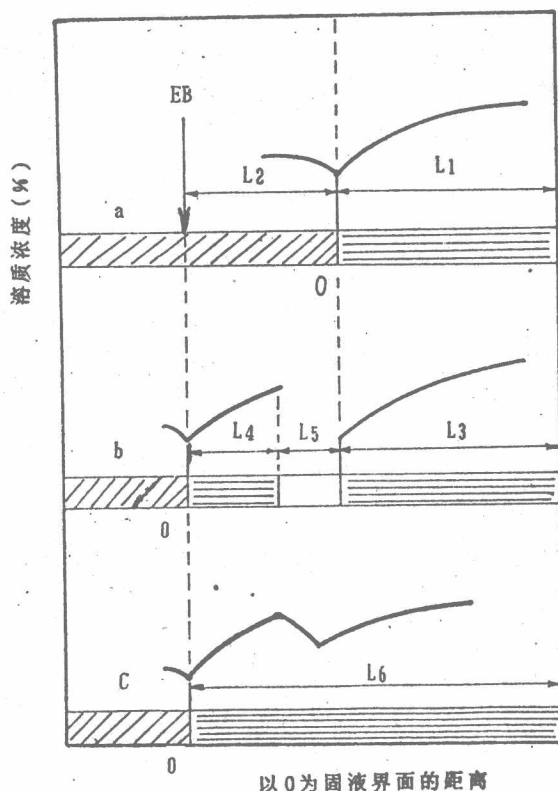


图6 Mn溶质传输模型

从图6a中看到当电子束扫描熔切前，固液界面前沿Mn溶质上坡扩散区长度为 L_1 ，当电子束扫描熔切 L_2 长度时，在切口处残留的膜厚度为 L_4 和空腔的宽度为 L_5 ，(见图6b)，在 L_4 区域Mn溶质上坡扩散，当液态金属回填与液膜会合后，则溶质浓度密集区 L_3 与 L_4 在交接处发生互扩散，形成一夹谷(见图6c)，因此可知夹谷是电子束扫描熔切晶体留下的痕迹，Mn溶质传输为上坡扩散型，证明熔池不发生回转运动。从而否定了“破碎晶枝”细化焊缝金属晶粒理论，证实了“熔切晶体”细化焊缝金属晶粒理论是正确的。

五、结论

- 1、随着电子束扫描频率的提高,焊缝金属晶体主轴长度减短,当 $f=300\text{Hz}$ 时,晶体主轴长度减小9倍,达到最佳细化。扫描频率继续提高,晶体主轴长度开始增长。
- 2、电子束扫描焊接熔池固液界面前沿的溶质传输出现上坡重叠扩散区,熔池中液态金属未产生对流现象,表明熔池未发生迴转运动。细化晶粒不是熔池回转运动破碎晶枝造成的。
- 3、溶质上坡重叠扩散中间出现的夹谷,是电子束熔切踪迹,证实焊缝金属晶粒细化是电子束周期扫描、重复熔切的结果。

参 考 文 献

1. V.A.Lebige, Autonom. Weld., 1960 13, 21.
- 2 陈晓风等, 焊接学报, 1987, No1.
- 3 大野笃美著 金属凝固学, 1978。