

不锈钢矩形端面电极 电阻点焊技术

张小奇 著



科学出版社

不锈钢矩形端面电极 电阻点焊技术

张小奇 著

长春师范大学资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从实现特殊结构焊接、提高点焊效率和满足点焊结构密闭性角度出发,介绍以 SUS304 不锈钢为焊接材料的矩形端面电极电阻点焊技术。全书共 5 章,从焊接工艺和有限元分析等方面,针对电阻点焊电极形状改变对于点焊过程会产生的一系列影响进行了论述,主要包括:矩形端面电极电阻点焊技术的由来及基本原理;电极形状改进后,在原有的点焊焊接参数已不适用情况下,新的焊接参数的优化方法;焊接参数对矩形端面电极电阻点焊接头质量的影响(熔核尺寸、接头强度、焊接缺陷等);焊接过程的有限元分析等内容。

本书可作为高等院校机械、材料等相关专业高年级本科生或研究生学习特殊点焊技术的参考用书,也可作为科研人员、工程技术人员等进行科研与学习的参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

不锈钢矩形端面电极电阻点焊技术 / 张小奇著. —北京:科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047535-0

I. ①不… II. ①张… III. ①不锈钢-电极-电阻-点焊 IV. ①TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044365 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:210 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

点焊作为一种优质、高效的连接手段,广泛应用于航空、航天、汽车和轨道交通等行业中,在伴随着现代工业飞速发展的同时也面临着各种新的问题与挑战。传统点焊电极形状多为锥台形和球面形,施焊所得焊点表面均呈圆形,因而其连接长度有限;同时考虑到焊接变形及焊接电流分流问题的影响,焊点间需保持一定的间隔距离,因此,点焊焊接结构的密闭性相对较低,一般应用于对密闭性要求不高的场合。对于某些结构特殊并且对密闭性要求较高的点焊结构,若采取电阻缝焊方法进行连续点焊,不仅效率低下、焊点位置难以准确控制,而且电极磨损严重,应用时往往受到结构限制而无法施焊。为解决无法利用焊点搭接的方式或者缝焊工艺实现提高密闭性、延长有效连接长度的问题,提出矩形端面电极电阻点焊工艺方法,即将点焊电极对中的一个电极端面加工成矩形,而另一个电极采用圆柱平面电极。利用该方法延长焊点的有效连接长度,对特殊部位进行电阻点焊,可达到提高点焊接头密闭性和点焊生产效率的目的。

矩形端面电极电阻点焊工艺拓宽了点焊的应用范围,其原理与一般电阻点焊原理相比并无本质区别,均是利用电阻产热熔化金属形成熔核以实现焊件有效连接而进行工作的。由于电极端面形状由原来的球面形或锥台形变为矩形,导致其在点焊过程中接触面接触状态、电流及其密度、接触电阻、电极磨损规律、焊接参数范围以及产热和散热状态等均发生改变,而上述内容是影响熔核形成过程、熔核尺寸、接头强度、焊接缺陷等的重要因素。矩形端面电极电阻点焊与普通电极电阻点焊相比具有较好的性能优势,但是电极端面形状的改变引起了一系列的变化,对其进行深入、系统地研究也就显得尤为重要。

鉴于上述原因,作者撰写《不锈钢矩形端面电极电阻点焊技术》一书。全书共5章,第1章主要介绍矩形端面电极电阻点焊技术的由来、基本原理、研究内容;第2章主要介绍矩形端面电极电阻点焊技术工艺试验条件、内容与方法;第3章根据矩形端面电极电阻点焊工艺试验结果对影响点焊质量的因素

进行分析,包括点焊接头组织及其特点、焊接参数、点焊结构密闭性、焊接缺陷以及电极设计等;第4章针对矩形端面电极电阻点焊焊接参数进行优化;第5章为矩形端面电极电阻点焊有限元分析。本书主要面向机械、材料等专业高年级本科生或研究生,作为其学习特殊点焊技术的参考用书,也可为相关领域的科研人员、工程技术人员等开展科学技术研究与工程技术应用提供助力。

在撰写本书过程中,作者参考了国内外的有关文献与资料,引用了其中的一些内容,在此向所有原作者和译者表示感谢。本书获得长春师范大学学术著作出版资助,在此向关心与支持本书出版的有关部门、学者、专家和同事表示衷心的感谢。

作 者

2015年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 技术背景	1
1.1.1 不锈钢城市轨道交通车辆的发展	1
1.1.2 点焊工艺基本原理与特点	5
1.1.3 问题的提出	6
1.2 电阻点焊工艺发展及现状	10
1.2.1 电阻点焊工艺发展历史	10
1.2.2 电阻点焊工艺	13
1.2.3 电阻点焊电极研究	17
1.2.4 不同材料电阻点焊工艺研究	22
1.3 电阻点焊数值模拟发展及现状	24
1.3.1 电阻点焊过程数值模拟的意义	24
1.3.2 电阻点焊过程数值模拟的发展	25
1.4 本书主要内容	37
第 2 章 试验条件及方法	39
2.1 试验材料	39
2.1.1 不锈钢	39
2.1.2 SUS304 不锈钢组织与性能	40
2.2 矩形端面电极	41
2.3 试验设备	43
2.4 试验方法	45
2.4.1 SUS304 不锈钢矩形端面电极电阻点焊	45
2.4.2 金相分析	47
2.4.3 力学性能检测	48
2.4.4 密闭性检测	48

2.4.5 焊接参数优化	49
2.4.6 有限元分析	50
第3章 矩形端面电极电阻点焊工艺试验及分析	51
3.1 矩形端面电极电阻点焊接头组织及其特点	51
3.2 矩形端面电极电阻点焊参数对接头性能的影响	52
3.2.1 焊接时间对接头性能的影响	53
3.2.2 焊接电流对接头性能的影响	59
3.2.3 焊接压力对接头性能的影响	64
3.3 矩形端面电极电阻点焊电极设计	69
3.3.1 电极矩形端面尺寸	70
3.3.2 电极锥角	70
3.4 矩形端面电极电阻点焊接头密闭性分析	73
3.5 不锈钢矩形端面电极电阻点焊焊接缺陷	74
3.5.1 飞溅	75
3.5.2 压痕过深	77
3.6 本章小结	79
第4章 矩形端面电极电阻点焊工艺参数优化	81
4.1 回归设计	82
4.1.1 最优化	82
4.1.2 试验优化	82
4.1.3 回归设计	83
4.2 试验方案设计	84
4.2.1 试验材料与方法	84
4.2.2 自然因素变化范围的确定及因素编码	84
4.2.3 试验方案	87
4.3 模型回归与检验	90
4.3.1 熔核尺寸的模型回归与检验	90
4.3.2 拉剪力的模型回归与验证	99
4.4 本章小结	105
第5章 矩形端面电极电阻点焊有限元分析	106
5.1 有限元方法	107

5.1.1	数值分析方法概述	107
5.1.2	有限元方法概述	108
5.1.3	有限元方法的发展概况	110
5.1.4	有限元方法常用软件	113
5.1.5	ANSYS 概述	115
5.2	矩形端面电极点焊有限元分析特点	117
5.3	矩形端面电极电阻点焊预压接触分析	118
5.3.1	预压接触分析基础理论	119
5.3.2	有限元模型	124
5.3.3	计算结果及分析	129
5.4	矩形端面电极电阻点焊熔核形成过程的有限元模拟	137
5.4.1	电阻点焊过程温度场有限元分析基本控制方程	137
5.4.2	有限元模型	144
5.4.3	模拟结果与分析	150
5.5	本章小结	160
参考文献		162

第 1 章 绪 论

1.1 技术背景

1.1.1 不锈钢城市轨道交通车辆的发展

1. 城市轨道交通车辆的发展

近年来,随着社会、经济、文化的发展,在城市居民物质、文化生活质量显著提高的同时,城市人口数量急剧增长,城市规模逐渐扩大,城市化进程逐步推进,都市群正在逐渐形成,一些问题也随之而来。一方面,市内交通拥堵现象日趋严重,这不仅出现在北京、上海、广州等中心城市,其他一些大、中型城市也陆续呈现此类状况;另一方面,城市的中心区域目前正逐渐向城市外围区域蔓延扩展,市民往往需要长距离、长时间的出行才能完成正常工作和生活需求,交通拥堵现象同时也出现在城郊区域交通线路中,城市内和城际间的交通压力日益增加。大力发展城市轨道交通则是目前世界各国普遍公认的缓解交通压力问题的有效途径。

城市轨道交通作为大、中城市的基础性公共交通设施,包括地铁、轻轨、市郊铁路、有轨电车、独轨铁路等,具有封闭线路,准时运行,便捷可靠,不受气候、道路、交通等条件影响的特点,其中地铁和轻轨是未来城市轨道交通发展的主要方向。自 1863 年世界上第一条地铁在伦敦建成通车以来,城市轨道交通已经迅速发展成为世界各国百万人以上大城市公交体系中的重要组成部分。早在 20 世纪 60 年代,日本东京的轨道交通就已成为市民通勤的主要交通方式,在各种通勤交通方式中的占比超过 57%,居于主体地位。与欧美等发达国家相比较,我国的城市轨道交通建设目前仍处于初级发展阶段,但是可以预见的是其未来发展势头强劲、发展空间广阔。

我国在国家“十二五”规划纲要中就已经明确提出“适应城市群发展需要,以轨道交通和高速公路为骨干……推进城市群内多层次城际快速交通网

络建设”、“科学制定城市轨道交通技术路线,规范建设标准,有序推进轻轨、地铁、有轨电车等城市轨道交通网络建设”、“建设北京、上海、广州、深圳等城市轨道交通网络化系统,建成天津、重庆、沈阳、长春、武汉、西安、杭州、福州、南昌、昆明等城市轨道交通主骨架,规划建设合肥、贵阳、石家庄、太原、济南、乌鲁木齐等城市轨道交通骨干线路”等内容。加大城市轨道交通发展力度将会是我国交通业在今后相当长一段时间内的主要发展方向,到2020年,预计我国将有40个城市建设地铁,总规划里程达到7000km。而轨道交通装备产业则是影响城市轨道交通发展进程的重要因素,因此在《国务院关于加快培育和战略性新兴产业的决定》中,明确提出了轨道交通装备产业是我国高端装备制造业中的五个重点发展方向之一。

城市轨道车辆主要由车体、车门、车钩缓冲装置、转向架和制动装置组成,其中,车体是轨道车辆的主体结构。车辆运行安全的可靠性和舒适性、车辆的能耗、加减速、载客能力以及列车的编组形式等均取决于车体,而车体的结构形式、性能和技术经济指标则主要取决于车体材料^[1]。可见,车体材料是影响城市轨道车辆整体质量的重要因素。

目前,城市轨道车辆车体所采用的材料主要有普通钢、不锈钢和铝合金三种。其中,普通钢车体包括碳钢车和耐候钢车(高耐候结构钢)。普通碳钢车由于存在自重大、腐蚀严重、维护频率高和维修费用大等缺点,已经逐渐被排除在轨道客车的生产制造外。耐候钢车体一般采用板梁组合整体承载全焊结构,与铝合金和不锈钢车体相比具有材料费与制造费低、工艺性好等优势,但也具有自重较大、耐腐蚀性差等缺点^[2]。铝合金车体结构包括板梁、大型开口型材和大型中空闭口型材及其组合形式,其重量较轻,一般可达普通钢车体的1/2,易于实现轻量化要求,但是其车体刚度较差,并且在焊接时必须用工装卡具来限制焊接变形,其造价要远高于普通钢车体和不锈钢车体^[3]。

2. 城市轨道车辆的车体材料

奥氏体不锈钢以其耐腐蚀性好、强度高、维修量低等特点被广泛应用于城市轨道车辆车体的制造中。

不锈钢的抗拉强度与屈服强度具有较高比值,其断裂以前的伸长率相对较大,提高了车体的抗冲击能力,并且具有较高的安全性;不锈钢的熔融温度是铝合金的2.6倍,其抗高温能力要远远高于铝合金;与普通钢车体比较,不

锈钢车体造价虽然较高,但是却远远低于铝合金车体,并且不锈钢车体的维修费用最低。考虑到车辆轻量化要求,由于铝合金的密度要远低于不锈钢和普通钢,因而铝合金是车体的首选材料。但是近年来轻量化不锈钢的出现为轨道车辆车体材料的选用提供了新的可能。

在各种车体材料中,综合经济性、强度、轻量化、制造工艺、维护等因素多方面考虑,不锈钢是目前轨道车辆车体材料的最佳选择^[4]。城市轨道车辆不同类型材料车体优缺点的比较见表 1.1^[2,3]。

表 1.1 城市轨道车辆不同材料车体的优缺点

车体材料	特点
普通钢 (碳钢、耐候钢)	优点:耐热性好、焊接性好、制造价格低、能够实现车体气密结构、加工工艺成熟 缺点:难以实现轻量化、耐腐蚀性一般、材料强度一般、维护频率高、维修费用大
铝合金	优点:耐腐蚀性好、易于实现轻量化、易满足高速化要求、能够实现车体气密结构 缺点:制造成本高、耐热性低、材料强度略低
不锈钢	优点:材料强度高、可实现轻量化、耐腐蚀性优越、车体外表无需再次加工、耐热性好 缺点:制造成本高于普通钢但是低于铝合金、车体密封性差

3. 不锈钢城市轨道车辆的发展历史

世界上最早的不锈钢轨道车辆出现在美国(1933 年,巴德公司)。为满足车体的轻量化要求,世界各国纷纷开始了不锈钢车体的研发与制造。日本自 20 世纪就引进不锈钢车辆制造技术,并大力开展研发,其发展势头迅猛,目前已经成为世界上不锈钢车体制造量最大、制造技术遥遥领先的国家。

不锈钢车体的发展主要经历了四个阶段:第一个阶段是在外墙板采用不锈钢、车架采用普通钢的外板不锈钢车;第二个阶段是底架等结构采用普通钢的半不锈钢车;第三个阶段是除牵引梁、枕梁等采用低合金钢其余全部采用不锈钢的全不锈钢车;第四个阶段是采用新型不锈钢材料、新型结构和点焊工艺的轻量化不锈钢车^[5,6]。目前,其减重效果已经可以与铝合金车体相媲美,完全可以满足城市轨道车辆轻量化发展的需求。

我国的不锈钢轨道车辆车体制造技术的研究与应用始于 20 世纪 80 年代,主要由我国最大也是最早的轨道客车制造企业——原长春轨道客车股份

有限公司及其前身长春客车厂完成^[7]。20 世纪 80 年代,长春客车厂采用太原钢铁厂生产的 0Cr18Ni9 材料制造了两辆半不锈钢客车,其质量相当于日本东京早期生产的轨道客车;20 世纪 90 年代,他与韩国韩进重工业株式会社合作,采用点焊工艺生产了时速为 200km 的第一代全不锈钢铁路客车;21 世纪初,他又聘请外国专家,研制了全新的点焊接结构轻量化全不锈钢车体。2003 年 7 月,我国首例自行研制的不锈钢城轨车下线,其速度达到 100km/h,这是我国轨道车辆技术由碳钢车体向不锈钢车体跨越的标志^[6,7]。

中车长春轨道客车股份有限公司为香港铁路有限公司(港铁)西港岛项目研制的车体强度最高、车辆使用寿命最长、噪声控制和防火标准世界最高的地铁列车于 2012 年 12 月 6 日下线,其车体为 A 型不锈钢轻量化不涂装车体,如图 1.1 所示。



图 1.1 中车长春轨道客车股份有限公司生产的不锈钢轻量化地铁列车

4. 不锈钢城市轨道车辆车体的焊接方法

在不锈钢城市轨道车辆的车体制造过程中,需要将各种零部件和结构连接起来制造成车体,同时还要保证车体能够满足连接强度和外表美观等要求,通常可以采用焊接工艺实现车体的连接要求。轨道客车车体制造过程中,常用的焊接方法包括熔焊、点焊、搅拌摩擦焊等焊接方法。激光焊也是近年来应用于车体焊接的一种连接方法。不锈钢车体的厚度一般为 0.5~4mm,与碳钢相比,不锈钢具有电阻率高、热导率低等特性,焊接过程中如果热输入过大,容易出现难以控制的焊接变形,产生很大的焊接残余应力,因此电阻点焊(resist-

ance spot welding, RSW)作为一种热输入低的焊接技术成为不锈钢城轨车体生产制造的首选焊接方法^[8]。电阻点焊与一般熔焊方法相比具有如下优点:热量集中、加热时间短、焊后变形小;焊接过程中一般不需填充焊接材料,冶金过程简单;可实现连接的材料很多,不仅仅局限于不锈钢、碳钢、高强钢、镀层钢板的连接,也适合于镁、铝有色金属的连接,同时可实现异种材料、各种板厚组合的连接;焊接工艺过程简单,辅助工序少,易于实现机械化及自动化;生产效率高、成本低,劳动环境好,生产文明程度高。因此,电阻点焊在不锈钢城轨车体及汽车车体等制造领域都得到了极为广泛的应用,在不锈钢车体焊装制造过程中占有极大的比重,是车身制造中的一项关键技术,大量车身构件之间的连接都是采用电阻点焊来完成的,通常每辆不锈钢车体有高达 5 万个焊点,电阻点焊接头的质量直接影响整个车体的安全性能和使用性能^[8]。

1.1.2 点焊工艺基本原理与特点

1. 点焊工艺的基本工作原理

根据焊接要求,将待焊工件装配后夹紧于上、下电极之间,借助电极对其施加的预定压力,并按照一定形式馈之以电流,在焊件接触面上形成真实的物理接触点,该点随着通电加热的进行而不断扩大,利用电流流过工件间接触面及其邻近区域时所产生的电阻热熔化焊件金属,进而在两工件间形成熔核,实现有效连接,该方法称为电阻点焊,如图 1.2 所示。

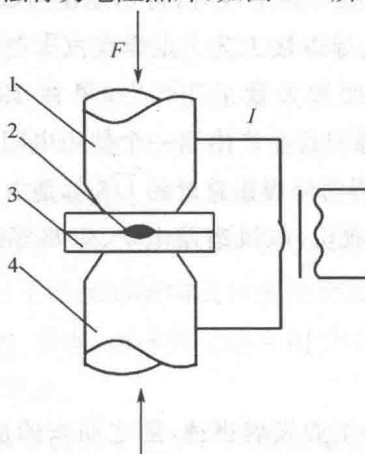


图 1.2 电阻点焊基本原理

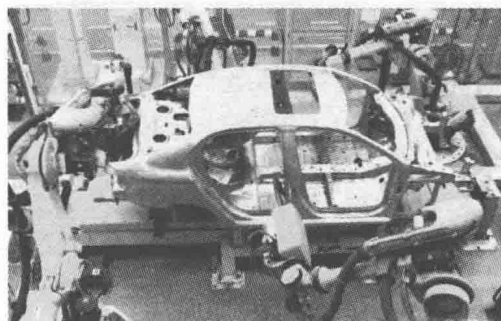
1-上电极;2-熔核;3-工件;4-下电极

2. 点焊工艺的特点与应用

自 1856 年英格兰物理学家 James 发现电阻焊原理、1877 年美国人 Elihu 发明电阻点焊并于 1885 年获得专利至今,电阻点焊的基础理论发展已经比较成熟,主要包括:点焊熔核形成的基本规律;点焊过程焊接参数与熔核形状、几何尺寸及接头强度的关系等理论;电极材料、磨损、形状等因素对点焊熔核形成的影响;点焊接头缺陷与组织变化出现的原因;针对焊接过程中焊接参数的变化进行的各类质量监测与控制;焊接电源、焊机结构与驱动装置对点焊质量产生的影响;建立电阻点焊过程物理模型及各种数值计算模型,对点焊过程的应力场变化和温度场变化进行模拟分析等。一般情况下,对各类金属和合金进行点焊时,如果采取合理的点焊工艺规范,均能获得良好的点焊质量。电阻点焊焊接材料由最初的低碳钢、不锈钢、高强钢、镀锌钢板扩展到铝合金、镁合金及金属基材料,利用电阻点焊工艺可以实现不同材料、不同板厚和多层板件的焊接。常用的点焊零件的厚度为 $0.05 \sim 0.06\text{mm}$,目前点焊最大厚度的钢件为 $30\text{mm} + 30\text{mm}$,铝合金已达 $7 \sim 8\text{mm}$,而最薄的点焊件厚度以微米计算。另外,还可以实现三层板焊接、管板焊接等特殊焊接^[9]。点焊作为电阻焊中一种重要连接手段,具有变形小、生产效率高、焊点质量高、易于实现机械化和自动化控制等特点,因此,在航空、航天、能源、电子、轻工业以及汽车等工业生产中得到广泛应用,如飞机机翼、航空发动机扰流器、建筑用钢筋网、仪表壳体、电器元件引线等,特别是作为以车身、车门、车架等为代表的薄板结构焊接的主导焊接工艺。点焊在汽车制造领域和轨道客车制造领域(见图 1.3)中更加被大量采用^[10,11],早在 1912 年位于美国费城的 Edward G. Budd 公司就已经生产出第一个使用电阻点焊焊接的全钢汽车车身。据不完全统计,世界每年焊接总量的 $1/3$ 都是由点焊完成的。除此之外,家用电器如电冰箱、洗衣机、电风扇及电炉、家具等的生产也大量采用点焊工艺。

1.1.3 问题的提出

航空、航天、汽车等工业发展迅速,随之而来的是对其相关产品在材料、结构及制造工艺等方面的更高要求,相应的,对与其发展密切相关的电阻点焊工艺也提出了新的要求与挑战。在实际生产中,密闭性对许多产品



(a)汽车



(b)轨道客车

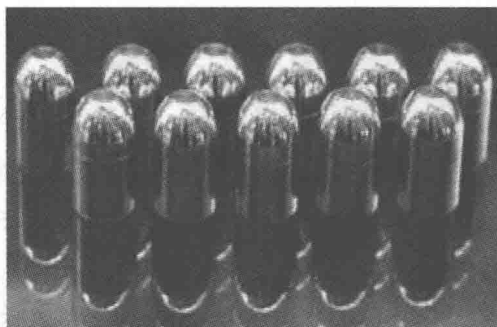
图 1.3 点焊在汽车制造领域和轨道客车制造领域中的应用

而言是一个重要的评价指标。在传统的电阻点焊工艺中,采用的电极一般为锥台形电极或球面形电极(见图 1.4)。在采用上述两种电极施焊时,所得的焊点表面均为圆形(见图 1.5),其实际连接长度有限,并且在焊点之间存在一定的间隙,因而导致其密闭性不佳。采用一般点焊工艺以连续密集焊接的方法施焊时,虽然可以提高接头的密闭性,但是分流等因素的影响使得点焊接头的强度无法得到保证。在采用缝焊工艺施焊时,虽然可以实现连续焊接并形成连续焊缝,满足产品对于接头的密闭性要求,但是对于现实生产中需要加工的某些产品而言,由于产品的结构或位置较为复杂、特殊以及电阻缝焊工艺本身的局限性(结构、原理)而导致无法采用缝焊工艺施焊,因此难以满足对焊接接头的密闭性要求。

为解决上述问题,本书研究了矩形端面电极电阻点焊工艺,即将原电极对中的一个电极端面加工成矩形,沿矩形端面四边以 45° 角斜切电极,如图 1.6(a)所示;而为保证良好的工艺特性,将电极对中的另一个电极加工成平面



(a)锥台形电极



(b)球面形电极

图 1.4 锥台形电极和球面形电极

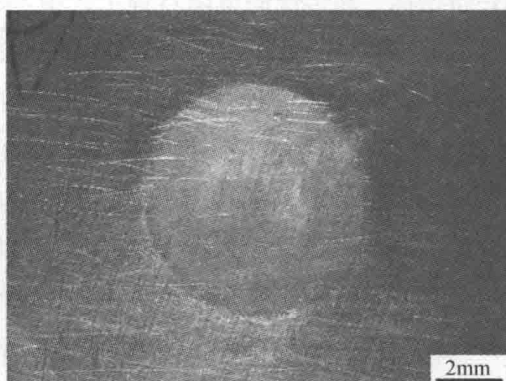
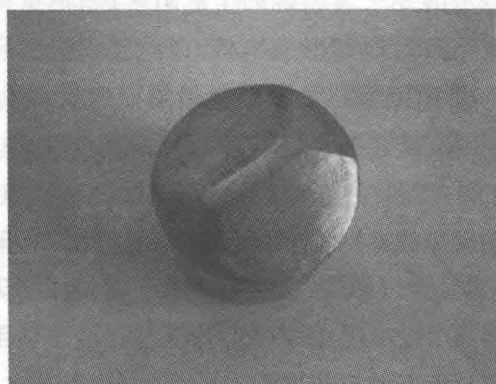


图 1.5 普通电极点焊焊点

端面电极,如图 1.6(b)所示。采用矩形端面电极电阻点焊工艺,可以实现特殊部位或特殊结构的焊接、延长焊点的有效连接长度并以较高的生产率获得密闭性良好的焊接接头。采用矩形端面电极施焊所得焊点如图 1.7 所示。



(a) 矩形端面电极



(b) 平面电极

图 1.6 矩形端面电极

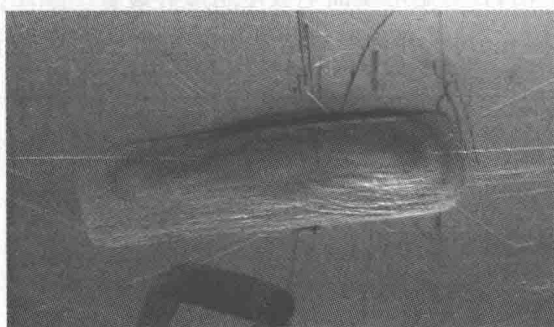


图 1.7 矩形端面电极电阻点焊焊点

矩形端面电极电阻点焊与传统的普通电极电阻点焊相比,在工作原理上并无本质差别,均属于电阻焊的范畴,都是将工件夹于上、下电极之间,施加