

兰州理工大学材料科学与工程学院

材料成型与控制专业综合实验

指
导
书

2006. 3

实验一 新材料制备与研究实验

——Al-Ti-C 细化合金的燃烧合成及其对铝及铝合金细化效果评价

1 实验简介

1.1 自蔓延燃烧合成法 (SHS) 简介:

燃烧合成 (Combustion Synthesis), 又称自蔓延高温合成 (Self-propagating High Temperature Synthesis, 简称 SHS), 是近年来蓬勃发展的一门现代材料制备科学与技术。SHS 反应过程中放出了大量的热量, 因此反应不需外界提供能量而自我维持。整个过程是将待合成的粉末 (如 A 和 B) 按一定比例混合制成压坯, 在空气中或惰性气体中点燃, 产生大量的放热, 维持反应继续进行, 当燃烧波阵面推移前进时, 反应物转变为生成物。其基本反应式为:

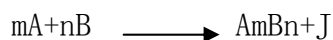


图 1 为 SHS 反应模拟过程。

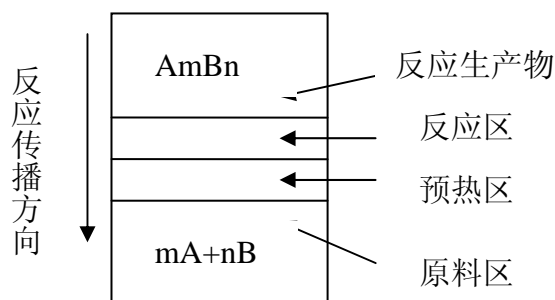


图 1 SHS 反应模拟过程

燃烧合成反应的本质是放热的化学反应过程, 它具有以下特点: 反应温度高; 反应过程速度快, 持续时间短, 生产效率高; 燃烧合成过程有两种点燃 (引发) 方式。一种方式为燃烧法, 反应物局部点燃后, 反应以燃烧波的方式进行, 燃烧波自动蔓延过整个反应。另一种方式热爆法, 将整个反应物加热到某一温度, 整个反应物同时发生反应, 反应不是以燃烧波的方式进行, 而是如同爆炸一样。前一种引发方式适用于高放热体系, 后一种引发方式适用于低放热体系。

1.2 铝及铝合金晶粒细化合金简介

细化晶粒是提高材料强度、塑性和韧性的重要手段之一。铝及铝合金细化剂是铝材加工过程中必须加入的产品, 是提高铝及铝合金加工质量的重要途径, 提高铝及铝合金的铸

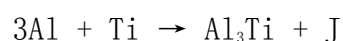
造速度，改善铸锭的表面质量；在生产中晶粒细化剂加入量一般为加工量的 0.1-0.2%。铝箔在生产过程中涉及从熔铸、热轧、冷轧到箔轧的所有加工工艺和热处理工艺，是铝加工生产中工序最多、加工技术难度最大的铝材产品之一，铝箔愈趋于薄型，技术难度愈大，经济效益也愈可观。铝箔生产水平某种程度上代表着一个国家铝加工工业的先进程度和发展水平。减小铝箔厚度和进一步提高铝箔的质量已成为铝箔工业的主要发展方向。但铝箔作为一种特殊加工产品，加工设备参数的调节只能在有限范围内对产品质量进行控制，此时，铝箔组织的控制就显得尤为重要。

国内外铝及铝合金晶粒细化合金主要有 Al-Ti, Al-Ti-B, Al-Ti-B-RE 系列，产品形式有合金锭和线材。应用比较成熟的细化合金系列有 Al-Ti-B, Al-Ti-B-RE。Al-Ti-B 细化晶粒的效率比 Al-Ti 高出十多倍，细化效果的稳定性优于 Al-Ti。但其存在如下问题：

- 1、TiB₂相在铝熔体中几乎不溶，而且容易聚集沉淀。污染熔化炉，不能满足现代铝合金铸轧生产的要求，对产品的性能和质量产生不良影响；
- 2、随着该中间合金的循环使用，废料中可带入一定量的硼，会对一些产品产生污染；
- 3、对于含有 Cr、Mn、Zr 等元素的铝合金，Al-Ti-B 合金晶粒细化能力极弱或完全失去晶粒细化能力，出现通常所说的晶粒细化剂“中毒”现象；
- 4、由于其中含有 B 元素，价格也比较高（如进口 LSM 公司 Al-5Ti-B 的价格为 4.0-4.5 万元/吨）。目前国内外正在研究开发的 Al-Ti-C 铝合金细化合金就是针对以上问题提出的。

但由于 C 元素对 Al 液的浸润性极差，难以进入到 Al-Ti 合金熔体中，制备 Al-Ti-C 中间合金的关键是如何有效的在中间合金中引入足够数量的碳。采用常规的熔炼方法来制备 Al-Ti-C 中间合金时，曾采用通入含碳气体或直接加入石墨进行搅拌的形式引入碳，但由于铝液对碳的润湿性差，最终的效果并不理想，这种原位制备 Al-Ti-C 中间合金的大量研究工作均以失败而告终，最终都没有成功的引入足够数量的 C 进入铝液，这使得很多研究者认为，几乎不可能提高含 Ti 铝合金中的 C 含量，在六十和七十年代，这项研究止步不前。

2000 年荷兰的 Brinkman 等人实验研究表明，Al-Ti-C 细化合金可采用元素粉末通过自蔓延高温燃烧合成法（SHS）热爆合成，反应方程式如下：



这为 Al-Ti-C 细化合金的制备提供了一个崭新的思路，引起了人们广泛的关注。自蔓延高温燃烧合成作为一种制备 Al-Ti-C 细化合金的新方法，由于自身的反应特点而克服了

上述的问题，可以制备出含碳量在一定范围内变化的 Al-Ti-C 细化合金，从而获得所需的相组成和相结构。目前国外一些著名公司生产了部分 Al-Ti-C 晶粒细化线材并在铝加工工厂应用，正在逐渐替代 Al-Ti-B 合金。

2 实验目的

为加强学生对新材料知识的认识，并让学生自己动手，用新方法制备新材料。利用实验室现有的设备对所制备的材料进行结构、性能的测试与表征，从而使其通过实际操作，深刻体会材料性能的实质，感受材料无论在宏观还是微观方面的千变万化，激发学生对材料研究的热情，通过亲自动脑、动手，提高学生的思维能力、创造性及实际操作能力，以期能提高材料学科毕业生的综合素质。

- 1、了解铝及铝合金晶粒细化合金的现状与发展方向；
- 2、掌握 SHS 法制备 Al-Ti-C 时工艺参数（原料成分、反应温度、搅拌方式等）对产物的影响；
- 3、掌握在材料制备中主要研究方法的应用（X 射线衍射仪、金相组织、电子探针分析及力学性能测试等）；
- 4、掌握铝及铝合金晶粒度评价方法。

3 实验内容

实验原料为工业 Al 粉、工业 Ti 粉和石墨粉。原始粉末按一定比例配料后，在混料机上混合均匀，然后在压力机上以一定压力冷压成圆柱形压坯，在井式电阻炉中，采用石墨粘土坩埚，将一定量的工业纯铝熔化，用热电偶测量铝液温度，当温度到达设定值后，将压制的圆柱形样坯加入，在铝液中热爆合成 Al-Ti-C 细化合金。利用 X 射线衍射仪（XRD）、扫描电镜（SEM）、电子探针和光学显微镜分析热爆合成的 Al-Ti-C 细化合金的相组成及微观组织。将热爆合成的 Al-Ti-C 细化合金以及进口 Al-Ti-B 细化合金细化工业纯铝或典型铝合金，制备试样进行晶粒度及力学性能对比。

4 实验要求

4.1 实验材料及设备

原料：工业纯铝、Al 粉（纯度 99.8%，粒度 100—200 目）、Ti 粉（纯度 99.3%，粒度 200 目—450 目）和石墨粉（纯度 99.85%，粒度 200 目—450 目）；

设备及工具：电子天平、行星式球磨机（Planetary Mill “Pulverisette5”）、万能材料实验机（AG-10TA）、井式电阻炉（7kw）、Rigaku D/max-II A 型 X 射线衍射仪（XRD）、Hitachi S-520 型扫描电镜（SEM）、EPMA-1600 型电子探针和光学显微镜、压模一副、石墨粘土坩埚、金属浇铸模、锯弓等。

4.2 实验步骤

1、圆柱样坯准备

原始粉末按一定比例配料后，在行星式球磨机（Planetary Mill “Pulverisette5”）上进行混料 1-2 小时，然后在万能材料试验机(AG-10TA)上冷压成圆柱形压坯。

2、Al-Ti-C 细化合金制备

在井式电阻炉中，采用石墨粘土坩埚，将一定量的工业纯铝熔化，用热电偶测量铝液温度，当温度到达设定值后，将压制的圆柱形样坯加入（加入的 Al-Ti-C 圆柱形样坯按 Ti 浓度为 5% 计算），在铝液中热爆合成 Al-Ti-C 细化合金，待反应后搅拌并保温 15min，浇注到冷的锥形钢模中，得到 Al-Ti-C 细化合金。

3、Al-Ti-C 细化合金分析

利用 Rigaku D/max-II A 型 X 射线衍射仪（XRD）、成分分析、Hitachi S-520 型扫描电镜（SEM）、EPMA-1600 型电子探针和光学显微镜分析热爆合成的 Al-Ti-C 细化合金的相组成及微观组织。观察 Al-Ti-C 细化合金中 Al_3Ti 和 TiC 的形态、大小及分布情况。

4、效果评定

采用铝合金晶粒细化剂标准试验法 TP-I（Aluminum Association Standard Test Procedure for Aluminum Alloy Grain Refiners TP- I, 1987），评价晶粒细化效果。在石墨粘土坩埚炉中将一定量的工业纯铝（99.7%）熔化，Al 液温度达到 $730^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ 时，分别加入 Al-Ti-C、进口 Al-5Ti-B 细化合金（加入量 0.005—0.05%Ti），搅拌、保温 5 分钟后，将铝液浇铸到下端进行水冷的锥形钢模中，获得的试样沿其中轴面一分为二，制成金相试样，进行组织观察并拍金相照片。根据《变形铝及铝合金制品显微组织检验方法》GB3246-2000，采用线截法来确定经 Al-Ti-C 和进口 Al-5Ti-B 细化合金细化后的铝和铝合金试样的晶粒大小。细化后纯铝或铝合金的力学性能评定参照《金属材料室温拉伸试验方法》GB/T228-202，将浇铸成圆形试棒（ $\phi 20mm \times 90mm$ ）机械加工制成拉伸试样（ $\phi 6mm \times 72mm$ ），采用 AG-10TA 万能材料试验机上进行拉伸试验。技术路线见图 2

5 实验结果讨论

5.1 影响实验结果的主要因素

对采用不同工艺参数制备的 Al-Ti-C 细化合金的相组成、相结构以及 Al_3Ti 和 TiC 粒子大小和分布规律进行分析，总结原料成分、原料粒度、铝液温度、搅拌方式等对产物的影响。

由于实验中影响产物的工艺参数较多且较复杂，实验按以下几种方案分组进行，分组后可选择其中一个方案或几个方案进行实验，实验结果共享。

1、原料成分的影响：通过改变 Al 粉、Ti 粉及 C 粉的比例控制产物中 Al_3Ti 和 TiC 的比例，获

得细化效果较好的Al-Ti-C细化合金配方。

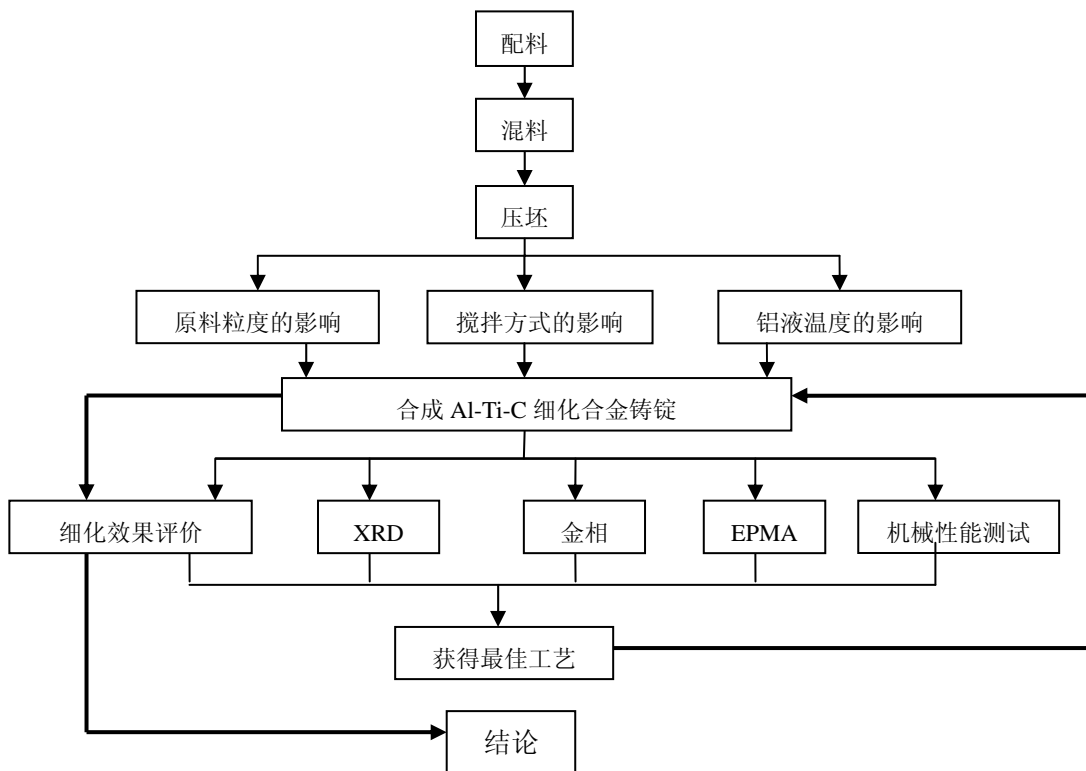


图 2 实验的技术路线

- 2、原料粒度的影响：通过改变Ti粉及C粉的颗粒大小控制产物中 Al_3Ti 和TiC颗粒的大小。
- 3、铝液温度的影响：通过改变铝液温度（在 $750^{\circ}C$ — $900^{\circ}C$ 范围）控制产物中 Al_3Ti 的形态。
- 4、搅拌方式的影响：通过改变搅拌方式控制产物中 Al_3Ti 和TiC在铝基体上均匀性。

5.2 实验结果及分析

图 3 为 Al-Ti-C 及进口 Al-Ti-B 细化合金的 XRD 谱对比。

观察Al-Ti-C细化合金铸锭显微组织及面扫描分析（显微组织见图4 a，EPMA分析见图5），Al-Ti-C细化合金组织均匀，TiC粒子细小，并在铝基体中均匀分布， Al_3Ti 粒子呈块状分布，粒子尺寸平均在 $8-15\mu m$ ，Al-Ti-C细化合金中的 Al_3Ti 粒子数量与尺寸与进口Al-5Ti-B细化合金相近。

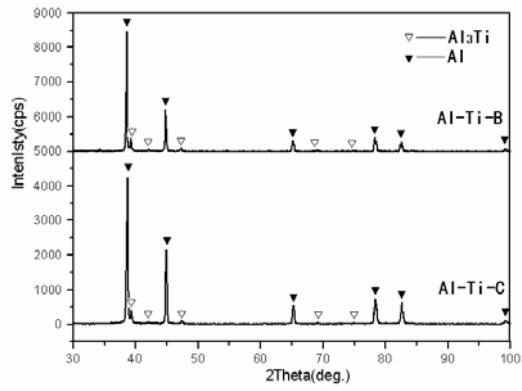
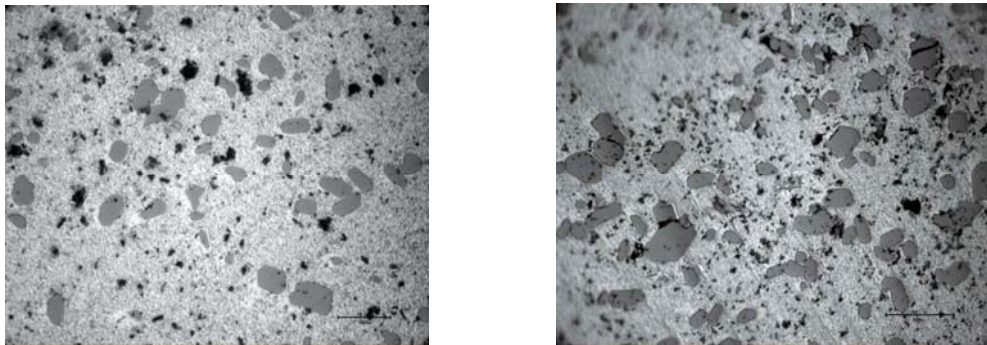


图3 Al-Ti-C及进口Al-Ti-B细化合金XRD谱



(a) Al-Ti-C 细化合金

(b) 进口 Al-5Ti-B 细化合金

图4 Al-Ti-C 细化合金和进口 Al-5Ti-B 细化合金微观组织

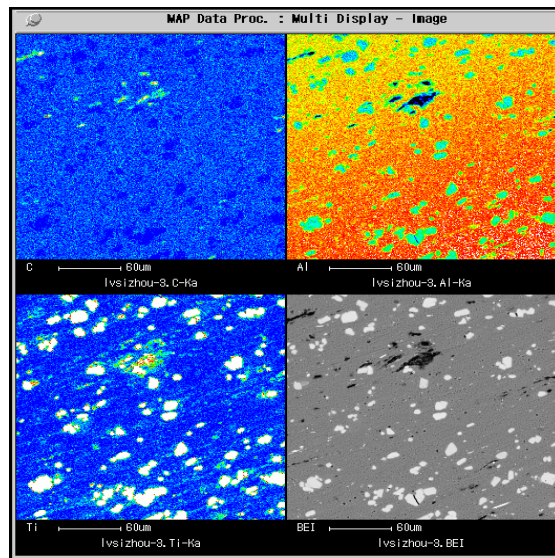
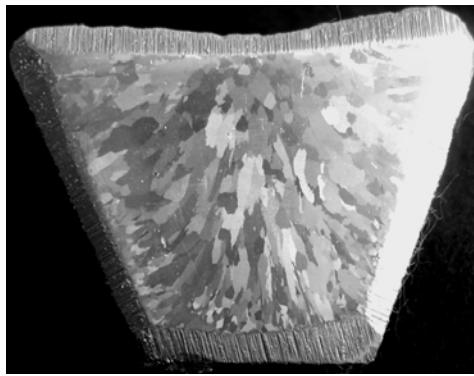
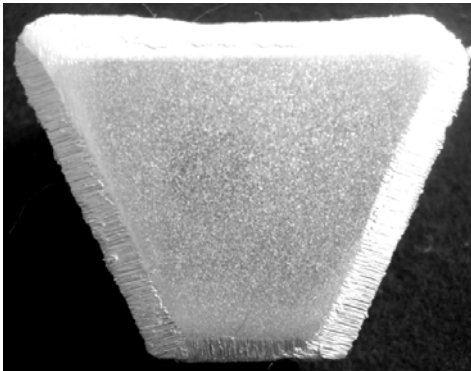


图5 Al-Ti-C 细化合金的电子探针及面扫描

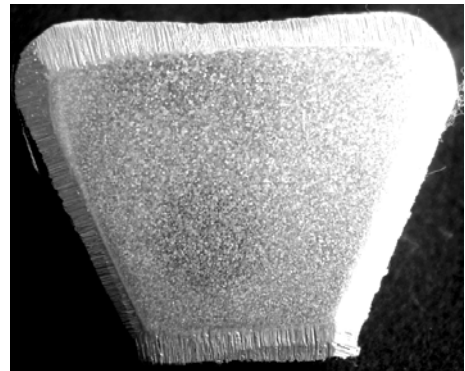
图6是纯铝及在纯铝中加入Al-Ti-C及进口Al-Ti-B细化合金的宏观照片。图7是在纯铝中加入新型Al-Ti-C细化合金和进口Al-Ti-B丝的微观组织，其加入后的Ti含量均为0.01%，由图可见，经过细化的试样晶粒均为等轴晶，晶粒尺寸相近，晶粒度达到一级。



(a) 未加细化剂

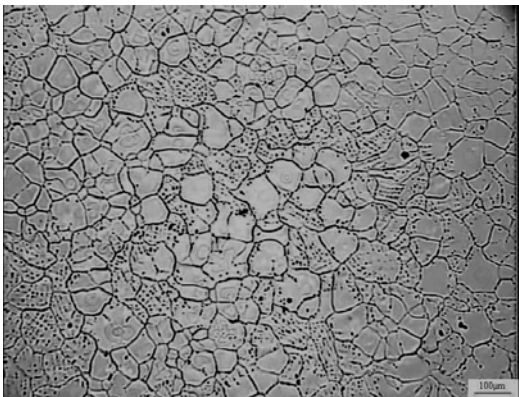


(b) 加进口 Al-Ti-B 细化合金

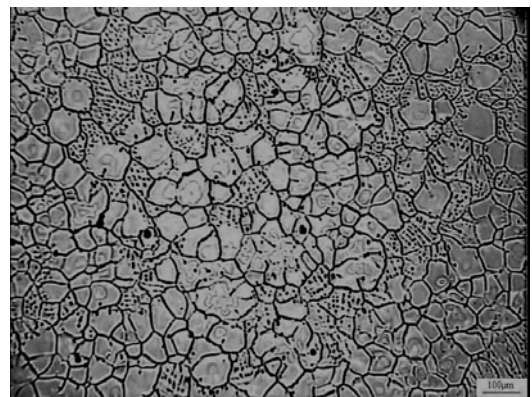


(c) 加 Al-Ti-C 细化合金

图 6 细化合金对工业纯铝细化效果对比



(a) 加入进口 Al-Ti-B 细化合金



(b) 加入 Al-Ti-C 细化合金

图 7 Al-Ti-C 与 Al-Ti-B 细化合金细化纯铝的显微组织

细化后纯铝试样力学性能实验结果说明，加入 Al-Ti-C 细化合金和加入进口 Al-Ti-B 细化后的纯铝试样力学性能相当，不同细化合金细化后纯铝的力学性能见表 1。

表 1 细化合金细化后的纯铝的力学性能对比

试 样	屈服强度 σ_s (mPa)	抗拉强度 σ_b (mPa)	延伸率 δ (%)
加入 Al-Ti-C 合金	32	75	40
加入进口 Al-Ti-B	30	75	41

6 实验报告

对整个实验过程进行认真总结，对记录的原始数据进行分析，解释实验过程中出现的现象；尽可能用自己的思想去解决问题，把自己所掌握的部分写入报告中。主要包括以下几方面：

- 1、实验原理；
- 2、主要设备使用方法及用途；
- 3、工艺参数对产物的影响规律；
- 4、所制备材料的相组成、相结构以及材料性能的代表方法；（有必要的图、表，并对图、表加以说明）
- 5、实验中遇到的问题及自己认为应该怎样解决
- 6、写出对该实验的感受，提出自己的看法。

实验二 活性焊

1 背景资料

近年来,活性焊接法引起了世界范围内人们的高度重视。活性焊接法在钨极氩弧焊(TIG)中应用较早,已经形成 A-TIG 焊的概念。A-TIG (Activating flux TIG) 焊接法是在施焊板材的表面涂上一层很薄的表面活性剂,引起焊接电弧收缩或熔池流态发生变化,从而大大改善焊接熔深的焊接方法。利用这种方法可使焊接熔深比常规 TIG 焊增加 1~3 倍,对板厚 3-12mm 的材料无需开坡口,可一次焊接完成。而用常规 TIG 焊焊接 12mm 厚板时则需开坡口,至少需六道焊接才能完成。A-TIG 焊技术与常规 TIG 焊比较有以下三条突出优点:

(1) 焊接熔深深,生产率高;(2) 对施焊材料的微量元素波动不敏感,焊接熔深稳定;(3) 成本低,应用领域广,易实现焊接自动化。目前,国际上对活性焊接法的研究主要集中在以下三个方面:(1) 适用于各种材料的活性剂的开发与应用。(2) 活性剂对增加焊接熔深的机理研究。(3) 其它活性焊接法的研究,如:活性电子束焊接法、活性激光焊接法、活性等离子焊接法等。

乌克兰巴顿焊接研究所于六十年代中期发现,在 TIG 焊时涂敷活性剂可以使钛合金的焊接熔深增加。九十年代,活性剂在焊接碳锰钢、低合金钢方面获得最大成功,并发展成一种新的焊接工艺方法 — A-TIG 焊接法。目前,国际上致力于活性剂材料研究的正是三大最著名的焊接研究所 (PWI、EWI、TWI),随着国内外对活性剂增加焊接熔深的机理和工艺研究的逐渐成熟,新品种、新工艺的出现,A-TIG 焊接工艺将彻底改变传统 TIG 焊的缺点,在生产中得到广泛应用。由于表面活性剂材料具有成分组成范围宽、来源丰富、成本低、无毒、无污染、符合环保要求的特点,因而使“A-TIG”成为一种极具开发和应用价值的新型高效节能型焊接技术,可广泛应用于电站锅炉、汽车工业、航空、化工等领域。

2 实验目的

通过实验,全面了解活性焊接技术。了解不同活性剂对焊接熔深的影响规律,运用所学知识分析焊接熔深增加的原因。

3 活性剂使用方法

- (1) 活性剂适用于不锈钢、低碳钢和铝合金材料。
- (2) 取适量活性剂置于烧杯中,加入 2-3 倍体积的丙酮,将其调成糊状。
- (3) 用刷子均匀地刷涂到焊缝表面,刷涂厚度以能遮盖母材本色为宜,刷涂宽度约 10-20mm,每米焊道活性剂消耗量在 2-5g 左右,待丙酮挥发后进行焊接。
- (4) 活性剂受潮时,可烘干 10 分钟左右后使用。

4 实验内容

可从下列研究内容中任选一项进行实验。

- (1) 实验单一活性剂对 TIG 热源的作用现象及对焊接熔深的影响规律。
- (2) 实验可使 TIG 焊接熔深提高 2 倍的活性剂。
- (3) 实验活性剂涂敷条件下，焊接规范参数对熔深的影响。
- (4) 测试活性剂涂敷条件下的焊缝性能。
- (5) 研究活性剂对熔池的作用机理。
- (6) 研究活性剂对 TIG 热源的作用机理。

5 实验步骤

活性剂准备(称量，研磨，调和)——试板准备（打磨，清洗，画线，打号）——活性剂涂敷——调节设备（电焊机，控制柜，循环水箱，氩气瓶）——调节焊接参数——焊接——记录焊接过程参数——观察电弧现象——关电源（先焊接电源，后控制台电源）——拍照——测量——分析成型——切割——磨金相——腐蚀——拍照——测量——分析

6 实验报告

实验报告内容包括：(1) 焊接参数。(2) 活性剂种类。(3) 焊缝外观分析，熔深对比。(4) 分析焊接熔深变化的原因。

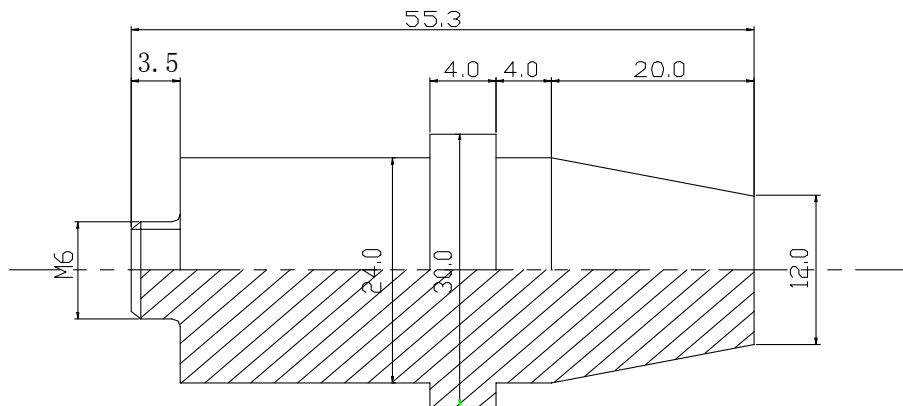
实验三 搅拌摩擦焊

一、实验目的

了解搅拌摩擦焊原理,熟悉搅拌摩擦焊工艺,确定搅拌摩擦焊焊接 4mmL2 的焊接参数,掌握实验中采用的基本实验方法。

二、实验材料

名称	数量	具体尺寸
搅拌摩擦头	1 个	参见图 1
铝合金 L2	2 块	尺寸 4X80X260



三、实验设备及主要技术指标

设备名称	产地	主要用途	主要技术指标
搅拌摩擦焊机	中国	铝、铜及其合金的连接	(1) 调速范围 0—1500r/min; (2) 自动限制最低转速功能; (3) 功率调节范围 1.2—7.5KW; (4) 焊接速度调节范围 0—350mm/min; (5) 可一次性自动焊接长度为 450mm; (6) 可在线显示电机实际输出功率、摩擦扭矩
金相显微镜及图像处理系统	中国	观测焊缝组织	
程控拉伸机	中国	测定焊缝抗拉强度	

四、实验步骤

1. 焊前准备阶段

- 1.1 安装摩擦头；
- 1.2 将两块铝合金板按照摩擦头前进方向对正、对中夹持在移动平台上；
- 1.3 开冷却水，焊机开启，调节摩擦头位置使之处于焊接起始位置；

2. 焊接阶段

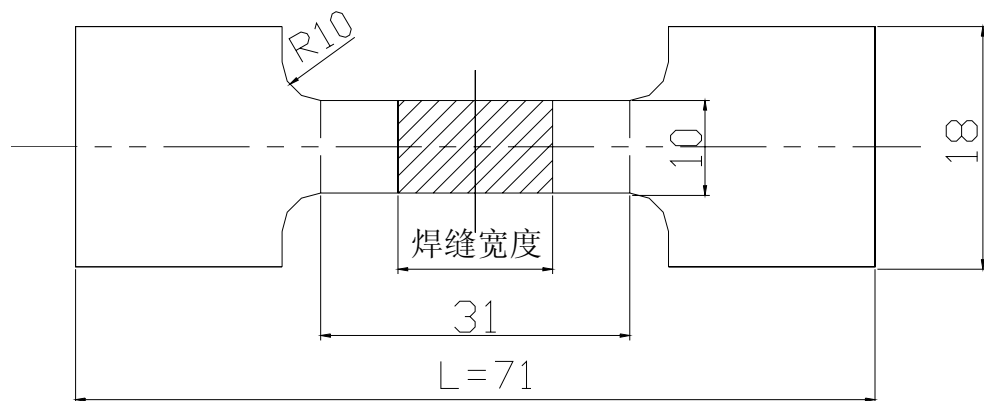
- 2.1 设定摩擦头转速，摩擦头旋转下降；
- 2.2 摩擦头完全深入工件，停止下降，保温 10S；
- 2.3 工作台按照调定的焊接速度向后移动，焊接开始；
- 2.4 工作台停止移动，摩擦头旋转向上移动，焊接完成；

3. 焊后处理阶段

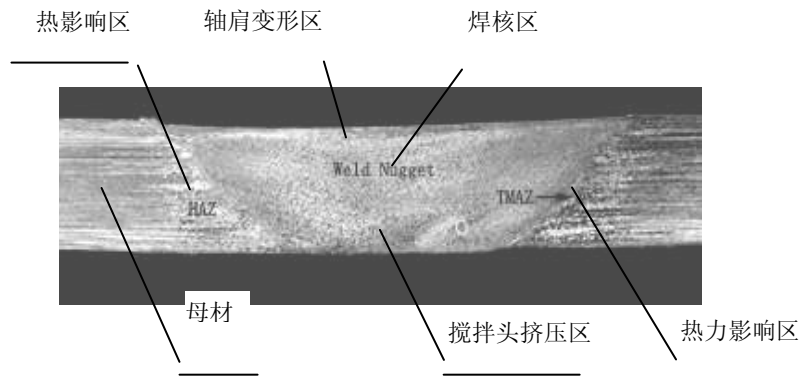
- 3.1 摩擦头停止旋转，焊机关闭，停冷却水；
- 3.2 拆掉工件，将工件按照实验方法的要求加工成各种试样。

四、思考题

1. 掌握基本的实验方法，简单叙述实验过程。
 - 1.1 金相显微镜观测焊缝接头微观组织
 - 1.2 程控拉伸机测定焊缝接头抗拉强度，基本拉伸试样尺寸如图 2



2. 根据所观测到的焊缝金相，指出焊缝接头组织有哪几部分组成，并将其与母材组织相比较，下图是搅拌摩擦焊焊缝电子透镜金相组织图：



3. 将所加工的拉伸试样置于程控拉伸机，观测断裂位置，测定抗拉强度 σ_b ，并与母材抗拉强度相比较，同时运用你所学的金属热处理知识分析实验结果，可以得出一个结论。
4. 描述一下实验后看到的焊缝接头的外观，观测到的内部金相组织，测得的焊缝抗拉强度，并与熔焊接头做比较，指出搅拌摩擦焊的技术优势和缺陷。

五、实验感想

通过整个搅拌摩擦焊实验过程，你有何收获？你对搅拌摩擦焊有多少了解？你也可以发表一下你对搅拌摩擦焊研究的几点意见。

实验四 弧焊机器人

工业机器人作为现代制造技术发展重要标志之一和新兴技术产业，已为世人所认同。并正对现代高技术产业各领域以至人们的生活产生了重要影响。

焊接制造工艺由于其工艺的复杂性、劳动强度、产品质量、批量等要求，使得焊接工艺对自动化对于其工艺的自动化、机械化的要求极为迫切，实现机器人焊接代替人工操作成为焊接工作者追求的目标。

经过十几年的机器人焊接技术应用实践，国内焊接机器人应用虽已具有一定规模，但与我国焊接生产总体需求相差甚远，焊接机器人推广任务还十分艰巨。就推进我国机器人焊接技术应用而言，首先应是焊接机器人知识与观念的普及，焊接工作者对焊接机器人技术基础及应用知识有着强烈的需求，但是在大学本科教材中有关焊接机器人方面的介绍十分简单，学生虽然对弧焊机器人技术有着浓厚的兴趣，但是仅仅通过教材很难对弧焊机器人及其柔性加工单元技术建立清晰的概念，通过本项目的开展可以使学生有机会进行实际操作进而对弧焊机器人机器柔性加工单元技术的应用及发展有一个完整的认识。

一、 实验目的：

- 1、了解弧焊机器人技术基础和应用知识
- 2、了解机器人的构造及其运动模式、工作模式
- 3、了解机器人的示教工作原理
- 4、通过实验进行实际操作而对弧焊机器人及其柔性加工单元技术的应用及其发展有一个完整的认识
- 5、学会分析焊接过程中出现的问题及其解决方案

二、 实验设备及主要技术指标

设备名称	产地	主要用途	主要技术指标
弧焊机器人	德国	柔性焊接过程的执行机构	负载能力：15kg 重复定位精度：±0.1mm 工作范围：直径 4100mm 半球
两轴数控焊接变位机	自行研制	配合弧焊机器人完成复杂工件的焊接	负载能力：500kg 重复定位精度：±0.3mm 旋转轴工作范围：0~360°， 倾斜轴工作范围：0~110° 驱动：交流伺服电机。
多功能 MIG 焊机	德国	焊接电源，具有双脉冲，可以实现铝合金和不锈钢等的焊接	最大焊接电流：400A 负载持续率：100%AT315A,60%AT400A 功率：13.7kw 功率因子：0.95

三：实验材料

- 1、铝板： 厚度：4mm
- 2、低碳钢试样： Q235A 各种规格
- 3、不锈钢试样： 1Cr18Ni9Ti 各种规格

四：实验原理

1. 弧焊机器人系统简介

机器人要完成焊接作业必须依赖于控制系统与辅助设备的支持和配合。完整的焊接机器人系统一般由如下几部分组成：机器人操作机、变位机、控制器、焊接系统、焊接传感器、中央控制计算机和相应的安全设备等，如图 1 所示。

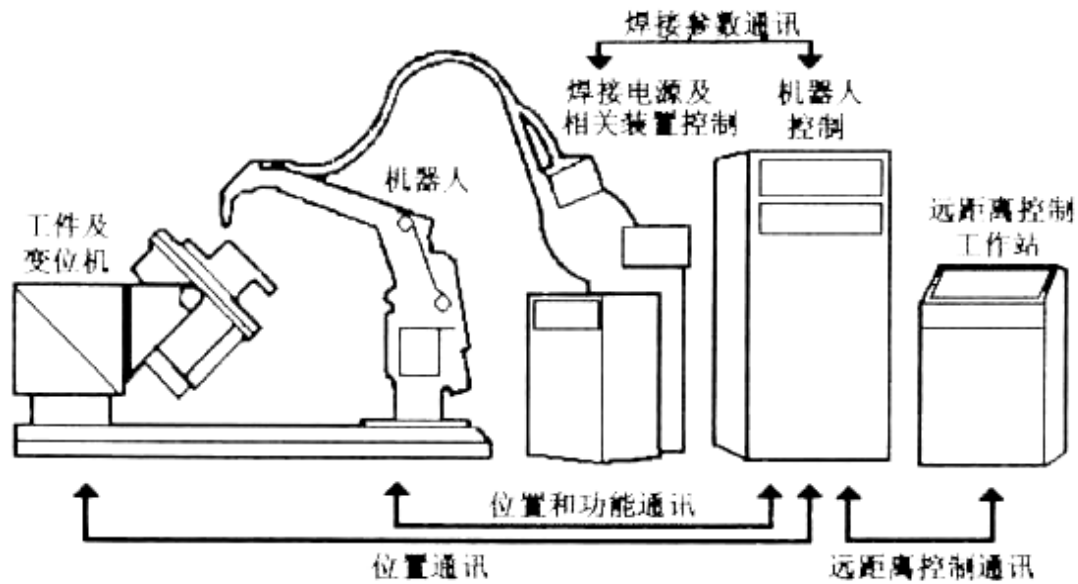


图 1 机器人焊接系统原理图

机器人操作机是焊接机器人系统的执行机构，它由驱动器、传动机构、机器人臂、关节以及内部传感器（编码器）等组成。它的任务是精确的保证末端操作器所要求的位置、姿态和实现其运动。由于具有六个旋转关节的铰接开链式机器人操作机从运动学上已被证明能以最小的结构尺寸为代价获取最大的工作空间，并且能以较高的位置精度和最优路径到达指定位置，因此这种类型的机器人操作机在焊接领域得到广泛的应用。

变位机作为机器人焊接生产线及焊接柔性加工单元的重要组成部分，其作用是将焊工件旋转(平移)到最佳的焊接位置。在焊接作业前和焊接过程中，变位机通过夹具来装卡和定位被焊工件，对工件的不同要求决定了变位机的负载能力及其运动方式。为了使机器人操作机充分发挥效能，焊接机器人系统通常采用两台变位机，当在其中一台上进行焊接作业时，另一台则完成工件的上装和卸载，从而使整个系统获得最高的费用效能比。

机器人控制器是整个机器人系统的神经中枢，它由计算机硬件、软件和一些专用电路构成，其软件包括控制器系统软件、机器人专用语言、机器人运动学及动力学软件、机器人控制软件、机器人自诊断及自保护软件等。控制器负责处理焊接机器人工作过程中的全部信息和控制其全部动作。所有现代机器人的控制器都是基于多处理器，根据操作系统的指令，工业控制计算机通过系统总线实现对不同组件的驱动及协调控制。

焊接系统是焊接机器人完成作业的核心装备，其主要由焊枪、焊接控制器及水、电、气等辅助部分组成。焊接控制器是由微处理器及部分外围接口芯片组成的控制系统，它可根据预定的焊接监控程序，完成焊接参数输入、焊接程序控制及焊接系统故障自诊断，并实现与本地计算机及手控盒的通讯联系。用于弧焊机器人的焊接电源及送丝设备由于参数

选择的需要，必须由机器人控制器直接控制，电源在其功率和接通时间上必须与自动过程相符。

在焊接过程中，尽管机器人操作机、变位机、装卡设备和工具能达到很高的精度，但由于存在被焊工件几何尺寸和位置误差，以及焊接过程中热输入能引起工件的变形，传感器仍是焊接过程中(尤其是焊接大厚工件时)不可缺少的设备。传感器的任务是实现工件坡口的定位、跟踪以及焊缝熔透信息的获取。

中央控制计算机在工业机器人向系统化、PC化和网络化的发展过程中发挥着重要的作用。通过串行接口与机器人控制器相连接，中央控制计算机主要用于在同一层次或不同层次的计算机形成通讯网络，同时与传感系统相配合，实现焊接路径和参数的离线编程、焊接专家系统的应用及生产数据的管理。

安全设备是焊接机器人系统安全运行的重要保障，其主要包括驱动系统过热自断电保护、动作超限位自断电保护、超速自断电保护、机器人系统工作空间干涉自断电保护及人工急停断电保护等等，它们起到防止机器人伤人或周边设备的作用。在机器人的工作部还装有各类触觉或接近传感器，可以使机器人在过分接近工件或发生碰撞时停止工作。

2、CLOOS—76AW 弧焊机器人关节结构

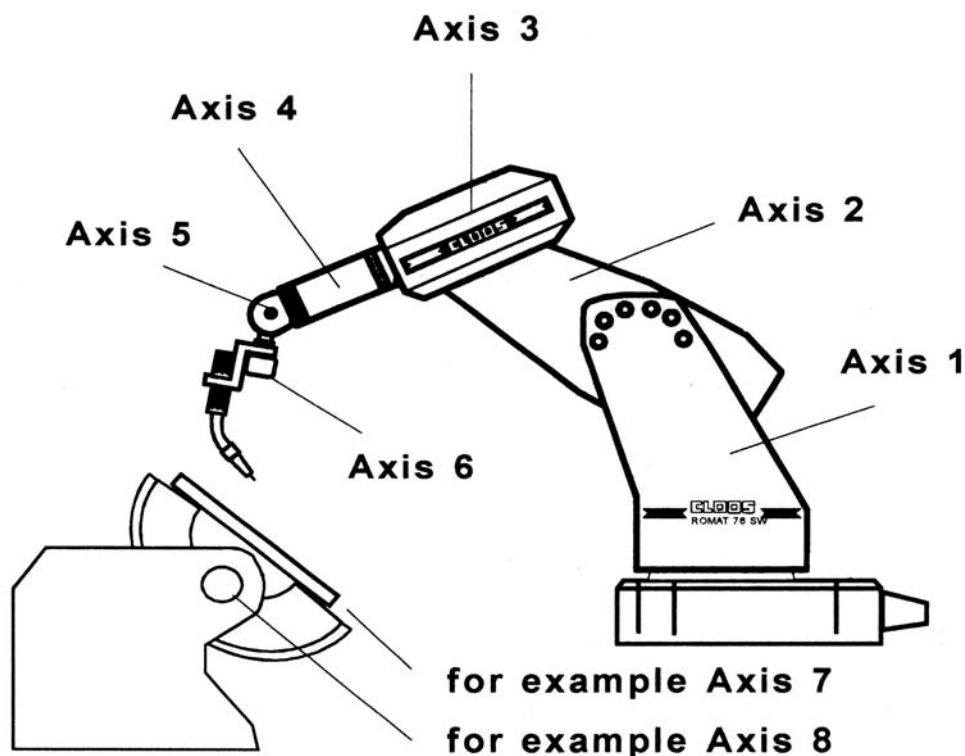


图 2 弧焊机器人的关节结构

3、弧焊机器人的运动模式

1) 弧焊机器人的坐标系

机器人的坐标系分为：关节坐标系（图 3）和直角坐标系（图 4）。关节坐标系是单轴运动方式，在关节坐标模式下通过示教盒可以控制机器人各轴围绕关节旋转运动，该运动方式适合机器人进行大范围运动时使用。直角坐标系为多轴合成运动方式，机器人以焊丝尖端为相对坐标原点，按笛卡儿直角坐标运动，该方式适合靠近工件时的小范围机器人运动姿态调整和示教。

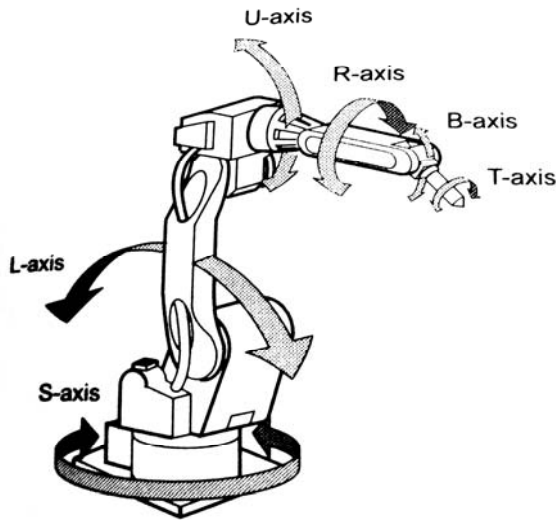


图 3 关节坐标

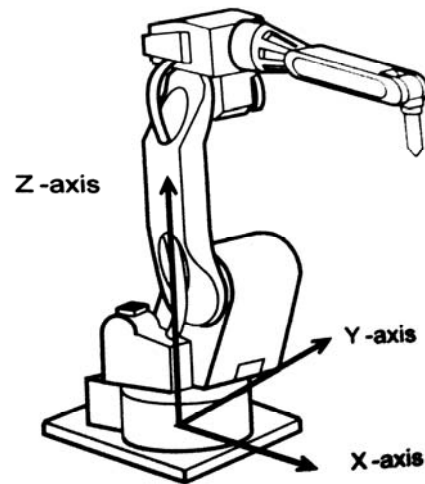


图 4 直角坐标

2) 弧焊机器人的运动方式

机器人的运动方式分为 PTP 方式和 CP 方式。PTP 方式为点到点方式（即机器人以全速从起始点运动到终点，而对两点间轨迹不做规定）。CP 方式为连续轨迹方式（即机器人以设定的速度按特定轨迹从起始点运动到终点）。基于以上特点可知，对弧焊机器人进行编程时，如果仅仅是空间运动或位置变换，应该使用 PTP 运动方式，而机器人进行焊接操作时（即对焊缝轨迹编程），宜采用 CP 运动方式。

3) 弧焊机器人的工作模式

弧焊机器人有如下工作模式：

EDI 模式：编辑程序。在 EDI 模式下创建、编辑、编译、管理所有的焊接程序。

TEA 模式：测试外部设备。对弧焊机器人 I/O 接口进行管理与测试。

TCP 模式：修正焊枪坐标。当更换不同形状的焊枪或焊枪变形校正后对焊枪坐标进行修正。

TECH 模式：示教方式。对所有工作点进行示教操作。

本次实验最重要和要求学生掌握的是 EDI 模式和 TECH 模式。

4) 弧焊机器人的指令系统

弧焊机器人的指令系统十分复杂，本次实验要求掌握如下指令：

GP (P1, P2, P3, ... , Pn); 表示以 PTP 模式依次以直线从第 P1 点运动到第 Pn 点

GC (P1, P2, P3, ... , Pn) 表示以 CP 模式依次以直线从第 P1 点运动到第 Pn 点

ARC (P1, P2, P3) 表示以 CP 模式走以点 P1, P2, P3 确定的圆弧

LISTn (...) 定义焊接规范参数，并以序号 n 命名。如 list1 即 1 号规范。指令括号中的参数由专用程序操作输入。

\$ (n) 表示在该指令之后的所有 CP 模式运动中调用第 n 号焊接规范。

机器人的任意运动轨迹都是由直线和圆弧近似而成，因此弧焊机器人的编程过程主要包括两方面的内容：一是关键点坐标的示教，二是用弧焊机器人指令系统对各点间确定的轨迹（直线或圆弧）及运动关系的描述。

5) 编程举例：

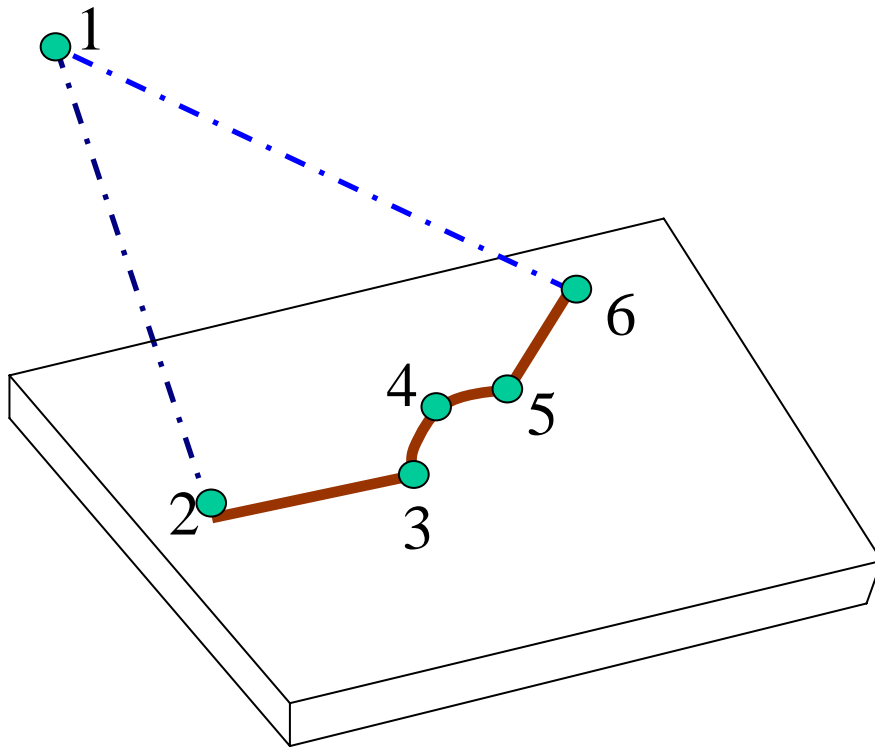


图 2 编程举例

如图 2 所示，工件上 2、3、4、5、6 点确定的是焊缝轨迹，1 为机器人的初始位置。因此从 1 点到 2 点和从 6 点到 1 点是空间轨迹，从 2 点到第 6 点是焊缝轨迹。如果要求 2、3 段焊缝和 3、4、5、6 段焊缝的焊接规范不同，则整个机器人焊接过程的程序为：

- 1 LIST1(...) 具体参数略
- 2 LIST2(...) 具体参数略
- 3 MAIN 表示程序开始

- 4 GP(1,2) 机器人焊枪从 1 点以 PTP 方式运动到 2 点
- 5 \$(1) 调用焊接规范 1
- 6 GC(2,3) 从点 2 以直线按规范 1 焊接到点 3
- 7 \$(2) 调用焊接规范 2
- 8 ARC(3,4,5) 从点 2 开始用焊接规范 2 焊接以 3、4、5 点确定的圆弧型焊缝
- 9 GC(5,6) 从点 5 以直线按规范 2 焊接到点 6
- 10 GP(6,1) 从 6 点以 PTP 方式运动到 1 点
- 11 |
- 12 END 11 行和 12 行表示程序结束

五：实验内容：

弧焊机器人柔性焊接单元的生产过程与普通的焊接生产过程不同，它具有自己的特点。为了使学生对弧焊机器人柔性焊接单元的生产过程具有全面的认识，实验设计了以下几个方面的内容：

- 1、根据提供的实验材料，学生自己设计一个较为简单的焊接结构件，指导教师对学生设计的焊接结构件提出改进意见使其符合机器人焊枪可达性的要求，然后通过手工点焊装配。
- 2、根据所选用的材料，查阅资料选用合适的焊接规范，并进行焊接工艺实验，制定合适的焊接规范。
- 3、制定合理的焊接顺序，防止焊接变形。规划机器人的运动路径，指导教师对学生设计的运动路径提出改进意见，避免运动死区和危险碰撞的发生。
- 4、根据设计的焊接机器人运动路径，规划关键点，并对关键点进行机器人和变位机的示教和记忆操作。
- 5、进行焊接程序的编制，对程序编译排错后进行试运行，试运行时观察是否有碰撞和运动死区，并应仔细观察焊枪姿态是否正确。
- 6、以上操作均正常后，进行实际焊接实验，将焊接结构件焊接完成。
- 7、对实验结果和焊接缺陷进行分析，提出下一步改进意见并实施，
- 8、按要求的内容和格式完成实验报告。

六：思考题：

- 1、机器人不同的坐标系有什么特点？各用在什么情况下？
- 2、为什么焊接过程和空间运动过程采用不同的运动方式？

3、机器人由哪几部分组成？各有什么作用？

4、机器人编程有哪几个关键的过程？