

高等学校教材

锅炉制造工艺学

(修订本)

西安交通大学 章燕谋 编

GAODENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

前 言

本书是在1980年出版的高等学校试用教材《锅炉制造工艺学》的基础上,根据1985年9月高等学校热能工程专业教材编审委员会制订的新教学计划和教学大纲进行修订的。

作者还根据多年的教学经验以及国内外锅炉制造工艺的新技术进行了修订。在体系上仍与原书保持一致,只是在内容上作了更新和适当的修改。

全书共九章,分为两大部分。第一部分共七章,介绍锅炉制造中的主要基本工艺,着重介绍了金属材料的切割工艺、锅炉和压力容器制造中所采用的各种焊接方法(包括埋弧自动焊接、气体保护电弧焊接、电渣焊接、接触焊接、摩擦焊接、等离子弧焊接等)的基本原理及其在锅炉制造中的应用、常用锅炉钢材的焊接特点、锅炉制造中的胀接技术、锅炉和压力容器制造中采用的各种无损检测技术(包括射线检测、超声波检测、声发射检测、磁粉检测、涡流检测、液体渗透检测等)的基本原理及其应用。第二部分共二章,介绍了锅炉主要承压部件(锅筒及各种管件)的制造工艺过程及其工艺特点。

本书除作为高等院校热能工程专业教学用书外,还可供锅炉制造厂和化工机械厂等有关方面技术人员参考。本书也可供锅炉安全监察和检验人员参考。

本书由上海机械学院刘正武副教授进行了全面认真的审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者不吝指正。

章燕谋

1989年8月

目 录

绪论	1	四、钨极氩弧焊接技术	54
第一章 金属材料的切割	3	§3-4 熔化极惰性气体保护焊	55
§1-1 火焰切割 (气割)	3	一、熔化极气体保护焊的熔滴过渡	55
一、火焰切割基本原理	3	二、熔化极氩弧焊接技术	61
二、火焰切割用的可燃气体	6	§3-5 熔化极脉冲氩弧焊	61
三、火焰切割的影响因素	7	一、熔化极氩弧焊的局限性	61
四、火焰切割对钢的成分、组织和力学性能的影响	10	二、熔化极脉冲氩弧焊的基本原理	62
五、高速火焰切割	11	三、熔化极脉冲氩弧焊接技术	62
六、液化石油气或天然气切割	15	§3-6 二氧化碳气体保护焊	63
§1-2 等离子弧切割	17	一、CO ₂ 焊的特点	63
一、等离子弧的形成	17	二、CO ₂ 焊的冶金特性	64
二、等离子弧的特性	18	三、CO ₂ 焊的熔滴过渡特点	65
三、等离子弧的类型	19	四、CO ₂ 焊的飞溅问题	68
四、离子气体的选择	19	第四章 锅炉制造应用的其它焊接方法	70
五、电极与极性的选择	20	§4-1 电渣焊接	70
第二章 电弧焊接	21	一、概述	70
§2-1 电弧焊接的基本原理	21	二、电渣焊的热源和焊缝结晶特点	71
一、焊接电弧	21	三、电渣焊的焊接材料和冶金特点	72
二、焊接冶金过程	27	四、丝极电渣焊接技术	72
三、焊接接头	30	§4-2 闪光对接焊	73
§2-2 埋弧自动焊接	35	一、闪光对接焊的加热	73
一、埋弧自动焊接的特点	35	二、闪光对接焊过程	74
二、埋弧自动焊所用的焊接材料	37	三、闪光对接焊缝的灰斑问题	77
三、焊接过程自动调节的基本原理	39	§4-3 摩擦焊	79
四、锅炉锅筒纵向焊缝和环向焊缝的埋弧自动焊接装置	42	一、摩擦焊的基本原理	79
五、埋弧自动焊的焊接技术	43	二、摩擦焊接过程	79
第三章 气体保护电弧焊接	45	三、摩擦焊接的优点	81
§3-1 概述	45	四、金属的摩擦可焊性	81
§3-2 焊接用保护气体	45	五、摩擦焊接工艺	82
一、焊接时气体的保护作用	45	§4-4 等离子弧焊接	83
二、常用保护气体简介	46	一、等离子弧焊接的基本原理及其特点	83
三、焊接保护气体的选用原则	47	二、等离子弧焊接的分类	84
§3-3 钨极惰性气体保护焊	49	三、穿透等离子弧焊接工艺	84
一、电弧在氩气中燃烧的特点	49	§4-5 高频焊	85
二、电流的种类和极性	50	一、高频焊接的基本原理及其特点	85
三、电极材料及其尺寸	53	二、鳍片管的高频焊接工艺	87
		§4-6 窄间隙焊接	88

一、概述	88	一、超声波的基本性质	128
二、窄间隙熔化极气体保护焊接	89	二、超声波的发生	133
三、窄间隙钨极气体保护焊接	91	三、超声波检测方法	134
四、窄间隙埋弧焊接	92	四、超声波检测技术	135
第五章 锅炉钢材的焊接特点	94	§7-4 声发射检测	138
§5-1 低合金结构钢的焊接特点	94	一、概述	138
一、焊接接头的冷裂纹	94	二、声发射检测的基本原理及其特点	139
二、焊接接头的热裂纹	101	三、声发射测量参数	141
三、焊接接头的再热裂纹	103	四、声发射检测仪简介	142
四、焊接接头的层状撕裂	106	五、声发射检测技术在压力容器中的 应用	142
§5-2 低合金珠光体热强钢的焊接特点	108	六、声发射检测中缺陷有害度的评定	143
§5-3 奥氏体不锈钢的焊接特点	109	§7-5 磁粉检测	145
一、奥氏体不锈钢焊接接头的晶间腐蚀	109	一、磁粉检测的基本原理	145
二、奥氏体不锈钢焊接接头的热裂纹	111	二、磁化方法	146
§5-4 珠光体钢与奥氏体钢焊接的特点	111	三、磁粉检测方法及其特点	147
一、焊缝化学成分的控制(稀释问题)	111	四、影响检测灵敏度的主要因素	148
二、凝固过渡层的形成	111	§7-6 涡流检测	149
三、碳迁移过渡层的形成	112	一、涡流检测的特点	149
四、残余应力的形成	112	二、涡流检测技术	150
第六章 胀接	113	§7-7 液体渗透检测	151
§6-1 胀接连接的实质	113	一、概述	151
§6-2 影响胀接质量的因素	114	二、液体渗透检测过程	152
一、胀接连接的胀管率	114	三、液体渗透检测液	152
二、胀接材料的匹配	115	四、液体渗透检测方法的应用	154
三、匹配材料的硬度	115	第八章 锅筒的制造工艺特点	155
四、管子与管孔的配合间隙	116	§8-1 锅筒封头的制造工艺	155
五、管孔表面的粗糙度	117	一、封头毛胚展开尺寸的计算	155
六、胀接长度(管板厚度)	117	二、封头的冲压成型	157
七、管子壁厚	117	三、封头的爆炸成型	161
§6-3 胀接方法	117	四、封头的旋压成型	164
一、机械胀接法	117	五、成型封头的质量检验	168
二、爆炸胀接法	118	§8-2 锅筒筒节的卷制	168
三、柔性可控胀接法	118	一、锅筒筒节的划线与下料	168
§6-4 胀接技术	119	二、锅筒筒节的弯卷工作	170
一、胀接管孔的型式	119	§8-3 锅筒的装配与焊接工作	173
二、管端扳边	119	一、锅筒纵向与环向焊缝的装配	173
第七章 无损检测技术	121	二、锅筒纵、环缝的焊接工作	174
§7-1 概述	121	§8-4 锅筒制造中的热处理工作	175
§7-2 射线检测	122	一、锅筒筒节的正火处理	175
一、基本原理	122	二、高强度低合金钢锅筒的调质处理	175
二、无损检测用的射线	123	三、锅筒的退火处理	176
三、射线检测技术	125	§8-5 锅筒与管件的连接	178
§7-3 超声波检测	128		

一、排孔划线与钻孔	178	一、膜式水冷壁管排的组合方式	198
二、锅筒与管件的连接	178	二、膜式水冷壁管排的组装	201
§8-6 锅筒制造中的检验工作	182	三、膜式水冷壁管排的弯制	201
一、原材料的检验	182	§9-5 蛇形管受热面的制造特点	202
二、锅筒元件的检验	182	一、弯头元件与直管组装拼焊而成 的蛇形管	202
三、锅筒焊接缺陷的检验	182	二、预先接长的直管连续弯制成蛇 形管	202
第九章 锅炉管件的制造工艺特点	189	三、边弯管边接长的方法制造蛇形管	204
§9-1 管件的划线与下料	189	§9-6 具有扩展表面的对流受热面管 件的制造特点	204
§9-2 管子的弯曲	189	一、纵向鳍片管式对流受热面	204
一、管子弯曲时的变形	189	二、横向肋片管式对流受热面	204
二、机械冷态弯管	190	三、螺旋翅片管式对流受热面	205
三、机械热态弯管	193	主要参考文献	207
四、小弯曲半径管件的弯制	196		
§9-3 管子的焊接工作	197		
§9-4 膜式水冷壁的制造特点	198		

绪 论

现代蒸汽锅炉是一个庞大而复杂的设备，它由许多零部件组成。仅锅炉的本体部分就包括：锅筒、水冷壁、蛇形管受热面（过热器、再热器和省煤器等）、各种集箱、各种汽水导管、空气预热器、燃烧设备及锅炉构架等。上述各零部件由于其工作条件和工作性质的不同，对所用的材料及制造方法也提出不同的要求。特别是各承压部件（如锅筒、受热面管件、集箱和汽水导管等）所用的材料和其制造质量对锅炉的安全运行具有十分重要的作用。

由于锅炉的零部件十分复杂，整个锅炉的制造过程，包括了许多加工工艺方法：如锻压加工（封头冲压、热卷锅筒以及其他各种锻制工艺等）、热处理、机械切削加工、冷作工艺（包括校形、管件弯制以及各种型材弯曲等）、金属的焊接和切割以及各种装配工作等。因此，锅炉制造工作是由许多加工工艺综合而成的。

从蒸汽动力技术的发展历史也可看出，锅炉制造工艺水平的提高对锅炉技术发展的影响。最初，锅炉的工作压力很低，一般为 $0.8\sim 1.0\text{MPa}$ 以下，那时的锅炉制造工作主要靠手工劳动，敲敲打打，铆接工艺是其中的一项主要技术。由于压力很低，锅炉元件所用的材料也都是塑性好的低碳钢，因而，采用铆接连接尚能满足锅炉安全使用的要求。以后锅炉的工作压力逐渐提高到 $2\sim 3\text{MPa}$ ，此时，仍采用铆接结构就会产生许多问题。最主要的是在锅炉运行过程中，在铆接处会产生裂纹，甚至会造成严重的爆破事故。这主要是因为随着锅炉压力的提高，所用钢材的厚度相应增加，同时，对铆接连接的强度和严密性提出了更高的要求。这样，在铆接处的钢材内部就产生了很大的内应力，在运行条件下，就会由此处产生裂纹。由此可知，必须改变这种制造工艺才能适应锅炉技术的发展。

在20世纪初期，人们已开始采用焊接技术。电弧焊接也开始在锅炉制造中得到应用。但由于当时焊接技术还处在发展的初期，还很不完善，它不能充分保证锅炉的安全运行。因而，在1920年左右，英、德等国相继采用了锻制式锅筒，以满足锅炉技术发展的要求。但是锻制式锅筒存在着金属耗量大，制造工时多以及需要具有大型锻制设备等缺点，因而其发展受到限制。直到1930年左右，随着焊接技术的发展和不断完善，焊接技术才在锅炉制造中得到广泛采用，并为锅炉的发展开辟了广阔的前景。

从60年代开始，锅炉机组不断向超高参数、大容量方向发展。到70年代，单机容量已达1000MW并向更大的容量发展。随着锅炉机组容量的不断增长，锅炉的事故损失也不断增加。美国对1960~1968年间火电机组的运行情况进行的统计表明，随着单机容量的提高，锅炉与汽机相比，事故大大增多。在 $90\sim 125\text{MW}$ 范围内，锅炉事故为汽机的2.5倍； $200\sim 389\text{MW}$ 范围内为3.1倍；大于600MW为7.1倍。苏联的研究也认为，在蒸汽参数不变时，锅炉管子的总长度、集箱数量及集箱上开孔的数量、管接头的数量等是与机组容量成正比例增长的。因此，在保持原来的制造工艺水平和质量检验水平时，由各种缺陷造成的损失与锅炉机组的功率的平方成比例。亦即，锅炉容量的增加，将使事故损失急剧增加。1000MW锅炉的事故损失比300MW锅炉多10倍左右。

众所周知，在锅炉主要承压部件中，过热器蛇形管的工作条件最为恶劣。锅炉制造质量

的好坏,将首先在过热器的运行中暴露出来。美国火电站的运行经验表明,锅炉强迫停炉主要是由水冷壁、过热器和再热器事故造成的。在1964~1967年内,水冷壁事故造成的停炉,每次平均为46h,而过热器和再热器事故造成的停炉,每次平均为102h,所造成的损失要大得多。此外,根据国外资料的分析,造成强迫停炉的原因,除锅炉设计不良,安装质量不好和运行不当之外,最普遍的原因是管子本身的质量不好和管件的制造质量不佳所造成的。

工厂的制造质量问题,主要是焊接质量不好,使承压元件焊接接头的运行可靠性大大降低。我们知道,在锅炉运行过程中,焊接接头的破坏型式有脆性破坏、疲劳破坏和腐蚀破坏三类。但不论是何种型式的破坏,大都是由于制造厂的焊接缺陷造成的。例如,苏联第一台300MW锅炉机组在运行过程中锅炉管件的损坏,有30%~40%是由于管件的闪光对接焊接头质量不好所造成的。

由上述各事例可知,随着锅炉机组向大容量、超高参数发展,原有的锅炉制造工艺水平,就不能确保锅炉运行的安全可靠了。因此,为了适应锅炉发展的需要,从60年代以来,很多国家的锅炉制造业,都进行了较大规模的技术改造、工艺装备更新和重点基本建设。例如,日本三菱公司在长崎造船所内新建了面积为11万 m^2 高度机械化、自动化的直流锅炉制造厂(香烧),根据有关资料的介绍,该厂的年生产能力相当于发电量为4000MW的电站锅炉。美国拔柏葛公司新建了维尔农分厂,装备了大型加工设备和起重运输设备,用以生产化工和原子能发电设备的容器。另外,美国西屋公司也于1967年新建一个分厂,每月能生产两套300MW的原子能发电设备。意大利勃莱达公司也增建了重型车间等。在新建、扩建和调整原有生产线的过程中,各国都比较重视设备的更新和大量采用各种新技术和新工艺(如各种新型的焊接方法,数控弯管、钻孔和气割等均已有了较广泛的应用)。同时,为了提高制造质量,都加强了从原材料进厂直到成品出厂的一系列工艺过程中的质量管理,采用了许多新型的检验方法和检验设备,并实现了焊缝的自动化检验。总的来说,近年来锅炉制造工艺的发展重点是生产过程的机械化和生产过程中工艺参数的自动控制和记录。电子技术在锅炉制造中得到了广泛应用,特别是焊接过程和热加工的自动控制和自动记录。此外,对某些锅炉零部件(如蛇形管受热面等)在产品系列化、通用化、标准化的基础上,采用专用设备,组织流水生产线。

锅炉制造工艺学是研究现代蒸汽锅炉主要元件,特别是各主要承压元件的制造工艺过程。其内容分为两部分:第一部分是讲述锅炉制造中的主要基本工种,如切割、各种焊接技术、胀接技术、无损检验方法等;第二部分是介绍锅炉主要承压元件的制造工艺。

第一章 金属材料的切割

工业生产中采用的各种切割方法大致可分为三类：机械切割、火焰切割和等离子弧切割。

机械切割是利用各种机械设备对被割材料施加剪切力或切削力，使之分离。常用的各种剪床（如龙门式剪床、圆盘式剪床等）、锯床（如齿条锯床、圆盘锯床等）以及一些专用切管机均属于这一类。机械切割在工业生产中得到广泛采用，但受到机床结构及传动功率的限制，通常只能用以切割厚度相对较薄的板材以及尺寸相对较小的型材与管材。

火焰切割也称为气割，是依靠金属材料的被割部位在火焰的高温下发生燃烧，生成熔化状态的金属氧化物，再利用高速气流将氧化物吹除，形成切口。火焰切割具有成本低、切割速度快、设备简单等优点，在工业生产中得到广泛的应用。

等离子弧切割是依靠特制的割炬，产生具有极高温度的高速等离子焰流，使金属材料局部熔化而形成割缝。在工业生产中，等离子弧切割常用于不锈钢和有色金属材料。

在锅炉制造中，上述三类切割方法都在一定范围内得到应用。

§1-1 火焰切割(气割)

火焰切割是利用可燃气体与氧气混合燃烧产生的火焰（通常称为预热火焰），将金属材料的切割部位加热到其燃烧温度，然后喷射高速氧流（称为切割氧），使切割部位金属发生快速燃烧，形成液态金属氧化物，同时依靠高速切割氧流的冲刷作用，吹除金属氧化物，形成割缝。

火焰切割的主要特点是：设备简单、生产率高、成本低。主要用于碳素结构钢和低合金钢的切割下料工作，特别适用于切断厚度较大或形状较复杂的零件的坯料。

火焰切割除了可用简单的气割枪或气割小车进行手工或半自动切割外，也可利用某些光电跟踪或数字程序控制设备进行全自动切割，还可利用一些仿形机构进行特殊形状零件的仿形自动切割。

一、火焰切割基本原理

1. 火焰切割过程

火焰切割过程如图 1-1 所示。整个过程可归结为相互关联的四个阶段：

(1) 依靠预热火焰加热起割处的金属到燃烧温度，并在切割氧的作用下，发生燃烧反应。

(2) 金属的燃烧反应沿厚度方向由表面向下层发展。

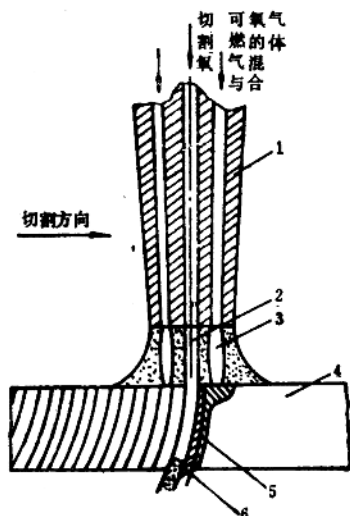


图 1-1 火焰切割过程示意图

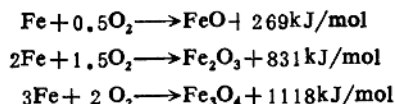
1—割嘴 2—切割氧流 3—预热火焰
4—被割材料 5—熔化金属层 6—熔
化金属氧化物层

(3) 依靠切割氧的冲击力将燃烧后生成的熔融金属氧化物(即熔渣)强行吹除, 切断金属。

(4) 预热火焰及燃烧反应热使切割氧流前方的金属迅速加热到燃烧温度, 使切割过程得以连续地进行。

由此可知, 火焰切割的实质是金属在高纯度氧气中燃烧, 并用氧流吹力把熔渣吹除的过程, 而不是金属的熔化过程。

在切割钢材时, 烧燃反应主要是在铁与氧之间进行的。铁与氧的反应会生成下列三种氧化物:



在实际火焰切割时, 这些反应混杂在一起, 很难判别出它们的比例。但不论哪一种反应都要放出大量的热。据计算, 1g铁生成FeO时, 放出4.82kJ, 而生成Fe₃O₄时则放出6.62kJ, 比预热火焰的热量高6~8倍。所以, 火焰切割过程中所需的热量主要来自铁与氧的烧燃反应, 预热火焰供给的热量是次要的。

2. 火焰切割的条件

火焰切割过程是预热→燃烧→吹渣的过程。不是所有金属都能满足这个过程的要求。只有满足下列条件的金属才能顺利地进行火焰切割。

(1) 金属的燃点应低于其熔点。这是保证火焰切割正常进行的基本条件, 否则金属受热时先发生熔化, 无法进行燃烧反应, 而变成熔割过程。

(2) 金属的熔点应高于切割过程中形成的金属氧化物的熔点。否则, 高熔点的氧化物附着在金属表面, 阻碍了氧与金属相接触, 使燃烧过程中断。

一些金属及其氧化物的熔点, 列于表1-1。

表1-1 一些常用金属及其氧化物的熔点/°C

材料名称	熔 点		材料名称	熔 点	
	金 属	金属氧化物		金 属	金属氧化物
纯 铁	1534	1370~1565 ^①	铝	658	2050
低 碳 钢	1500	1370~1565 ^①	铬	1550	1990
高 碳 钢	1300~1400	1370~1565 ^①	镍	1450	1990
灰口铸铁	1200	1370~1565 ^①	锌	419	1800
铜	1083	1230~1336	锰	1250	1560~1785

①其中FeO的熔点为1370°C; Fe₃O₄的熔点为1527°C; Fe₂O₃的熔点为1565°C。

(3) 金属的燃烧过程应能放出大量热量。在气割过程中, 这一条件也是很重要的, 因为燃烧过程放出的大量热将对下层金属起着预热的作用。例如, 切割低碳钢时, 由金属燃烧所产生的热量占预热金属所需热量的70%左右, 预热火焰仅能供给30%的热量。一些金属燃烧时放出的热量如表1-2所示。

(4) 金属应具有较低的导热系数, 保证在割缝处能保持较高的温度。否则, 由于热量的很快散失, 会使割缝处的温度低于金属的燃点, 使气割过程无法进行。铜、铝等金属具有高的导热系数, 也是它们不能采用普通气割方法进行切割的原因之一。

表1-2 一些金属燃烧形成氧化物时放出的热量/(kJ·mol⁻¹)

金属氧化物	放出的热量	金属氧化物	放出的热量	金属氧化物	放出的热量
FeO	269	ZnO	348.5	Mn ₂ O ₄	1410
Fe ₂ O ₃	831	SnO	284	WO ₂	546
Fe ₃ O ₄	1118	NiO	244	WO ₃	818
CuO	157	Cr ₂ O ₃	1142	V ₂ O ₃	1340
Cu ₂ O	175	MnO	389.5	MoO ₃	544.6
Al ₂ O ₃	1646	Mn ₂ O ₃	977	MoO ₃	770

(5) 熔融氧化物的粘度应较小, 以便于被切割氧流吹除。

3. 一些合金元素对钢材可气割性的影响

钢材所含合金元素不同, 对气割过程的影响也不同。有的对气割过程虽无明显影响, 但会引起切口边缘淬硬或裂纹; 有些使气割过程变慢, 或产生难熔的氧化物, 使气割过程难于进行。

碳 随着钢中含碳量的增加, 钢的熔点降低, 燃点增高。钢中含碳量低于0.45%时, 对气割过程无影响。当含碳量超过0.5%时, 气割过程明显恶化。当含碳量大于1%~1.2%时, 就难于气割了。这不仅是由于此时钢的燃点已高于其熔点, 而且由于气割时产生的大量CO₂气体, 污染了切割氧流。

锰 钢中含锰量小于4%时, 对气割过程无影响; 大于4%时, 则气割困难, 割前需预热; 超过14%时, 则无法气割。

硅 一般钢中的含硅量对气割过程无影响。但含量过多时, 由于形成熔点很高的SiO₂, 使气割过程恶化。

硫、磷 钢中含硫、磷的量不超过0.04%时, 对气割过程无影响。

铬 钢中含铬量在4%~5%以下时, 对气割过程基本无影响, 但因形成的Cr₂O₃的熔点高, 使熔渣的粘性增大, 切割速度降低。含量较大时, 不能用一般气割方法进行切割。

钼 钢中含钼量小于2%时, 对气割无影响。含量在4%~5%以下, 仍能气割, 但由于使钢的可淬性增加, 使切口边缘硬度明显升高。

镍 钢中含镍量低于7%时, 对气割无明显影响。含镍量过高, 则由于生成的氧化物熔点高而无法进行气割。

铝 钢中含铝量小于0.5%时, 对气割无影响。小于10%时, 仍能气割, 但切割速度明显降低。超过10%时, 则无法进行气割。

各种金属材料的气割性能可归纳如下:

纯铁和含碳量小于0.5%的碳素钢均具有良好的气割性能。

铸铁的气割性能不好, 不能用一般方法进行气割。这是因为: (1) 铸铁的燃点(1350℃)高于其熔点(1200℃); (2) 燃烧时产生熔点高、粘度大的SiO₂, 妨碍气割过程的进行; (3) 由于铸铁含碳量高, 碳燃烧后生成大量CO和CO₂气体, 降低了切割氧流的纯度, 使气割困难。

高铬钢和铬镍钢的气割性能不好, 不能用一般方法进行气割。这是因为在燃烧时产生大量高熔点的氧化铬(熔点1990℃)和氧化镍(熔点1990℃), 覆盖在金属表面, 使切割难于进行。

铜、铝及其合金的气割性能不好,不能用一般方法进行气割。其原因是:(1)铜、铝及其合金的导热、导热性较高,不易在切口处形成并保持高温;(2)铝在气割过程中产生的氧化物熔点很高(2050℃);(3)铜在燃烧时放出的热量较低。

由上可知,火焰切割主要用于切割低碳钢和低合金钢。锅炉用材主要是低碳钢和各类低合金钢,所以火焰切割在锅炉制造中得到广泛的采用。

二、火焰切割用的可燃气体

火焰切割时用的气体有两类:一是可燃气体,另一是助燃气体。可燃气体的种类很多,例如乙炔、氢、天然气、煤气、丙烷—丁烷混合气等。究竟应该怎样选择可燃气体呢?评定适用于气割的可燃气体应从四方面予以考虑,即热效率、经济性、安全性和贮运方便性。

1. 热效率

评定可燃气体的热效率主要从发热量及火焰温度两方面来考虑。

可燃气体的发热量是指单位体积可燃气体完全燃烧时放出的热量,其单位为 kJ/m^3 。我们希望可燃气体的发热量高。

可燃气体燃烧形成的火焰是分层的,由焰心、内焰和外焰三部分组成。这三部分的温度是不同的,其中以内焰温度最高。我们所说的火焰温度就是指内焰的温度。

2. 经济性

经济性主要是指气割时可燃气体和氧气消耗量的多少。可燃气体的消耗量主要决定于其发热量。作为助燃氧的消耗量决定于可燃气体完全燃烧时所需的氧量。可燃气体完全燃烧时所需的氧量由两部分组成:主要部分是由氧气瓶供给,这部分氧称为初级氧;另有少部分氧来自周围空气,称为次级氧。我们所指的助燃氧耗量是指的初级氧。其需要量愈少,则经济性好。

3. 安全性

可燃气体容易引起爆炸,安全使用是十分重要的。不过纯粹的可燃气体是不会发生爆炸的,只有当可燃气体与氧或空气混合时才会发生爆炸。实践表明,不是任何成分的混合气体都会引起爆炸,只有在一定范围内才会引起爆炸。通常把这个能引起爆炸的混合气体成分范围称为爆炸极限。各种可燃气体的爆炸范围见表1-3。

表1-3 可燃气体与空气或氧混合的爆炸范围

可燃气体名称	混合气体中可燃气含量 $\times 100$ (容积)		可燃气体名称	混合气体中可燃气含量 $\times 100$ (容积)	
	空气中	氧气中		空气中	氧气中
乙炔	2.2~81.0	2.8~93.0	丙烷	2.17~9.5	—
氢	3.3~81.5	4.65~93.9	丁烷	1.55~8.4	—
一氧化碳	11.4~77.5	15.5~93.9	城市煤气	3.8~24.8	10.0~73.4
甲烷	4.8~16.7	5.0~59.2	焦炉煤气	7.0~21.0	—
乙烷	3.12~15.0	4.1~50.5	天然气	4.8~14.0	—

从安全性的观点来看,可燃气体的爆炸范围应愈小愈好。当然,爆炸范围只是表明具备了引起爆炸的内在条件,没有外界条件,亦即没有一定的温度和压力,是不会引起爆炸的。另外,在爆炸范围内往往还有最易发生爆炸危险的比例。例如,乙炔最危险的爆炸比例为7%~13%(在空气中)及30%(在氧气中)。

4. 贮运方便性

我们希望使用的可燃气体便于贮存和运输。一般讲来,以固体状态最为方便,液体状态次之,气体状态较不方便。

表1-4列出了各种可燃气体的主要特性。

表1-4 各种可燃气体的主要特性

可燃气体名称及其成分	密度/(kg·m ⁻³) (在20℃及 标准大气压)	低发热量/ (kJ·m ⁻³) (在20℃及标 准大气压)	与氧气混合 的火焰最高 温度/℃	在空气中的 燃烧温度 /℃	氧气需要量/(m ³ ·m ⁻³)	
					完全燃烧时 (理论值)	在焊炬中
乙炔(C ₂ H ₂)	1.09	52700	3150	305	2.5	1~1.3
氢(H ₂)	0.084	10040	2100	320	0.5	0.3~0.4
天然气(CH ₄ 97.8%, C ₂ H ₆ 0.9%, C ₃ H ₈ , N ₂ 1.3%, CO ₂)	0.7~0.9	31400~33050	2000	290~530	按公式计算 ^①	1.0~1.5
焦炉煤气(H ₂ 50%~59% CH ₄ 25%~30%, C ₂ H ₆ 1.8%~3%和其它, CO5% ~7%, N ₂ 6%~13%及 CO ₂ , O ₂ 0.5%~0.8%)	0.4~0.55	14650~17580	2000	—	按公式计算 ^①	0.75~0.8
城市煤气(H ₂ 6%~10% CH ₄ 60%~70%, C ₂ H ₆ 5% ~7%和其它, CO4%~6% 其余N ₂ 及CO ₂)	0.84~1.05	17160~20900	2000	445~600	按公式计算 ^①	1.2~1.3
丙烷-丁烷混合气(C ₃ H ₈ 85%, C ₄ H ₁₀ 12%, C ₂ H ₆ 3%以下)	1.92	88800	2100	—	5.0	3~3.5

① 可燃气体完全燃烧所需的氧可按公式计算:

$$\beta = 0.01[0.5H_2 + 2CH_4 + 5C_2H_6 + \sum(m + \frac{n}{4})C_mH_n + 0.5CO - O_2]$$

由表1-4可得,乙炔的突出优点是发热量大,火焰温度高。它比其它可燃气体的火焰温度高1000℃左右。因而,乙炔在气割中得到了十分广泛的应用。乙炔的主要缺点是成本较贵和爆炸危险性大。总的来讲,在确定气割用的可燃气体时,必须根据具体情况,因地制宜选择适当的可燃气体。例如,在我国西南地区有着丰富的天然气资源,在这些地区应用天然气进行切割;另外,随着我国石油资源的大量开采,油井废气及炼油废气——液化石油气将大量用来进行切割工作。

三、火焰切割的影响因素

1. 预热火焰

预热火焰在气割过程中具有十分明显的作用,主要有下列几方面:

(1) 在切割起始点把钢板加热到其燃烧温度,使之能与切割氧流发生快速燃烧。

(2) 将钢板表面的锈皮、污垢等熔化、烧毁或剥离,便于切割氧与金属的燃烧反应,使气割能连续地进行。

(3) 遮蔽燃烧反应区,不使热量过多地散失,并补充热量以加速钢板表面达到燃烧

温度。

(4) 减少切割后拖量。

(5) 屏蔽周围空气以保持切割氧的纯度。

根据可燃气体与氧气混合比的不同, 预热火焰可分为中性焰、碳化焰和氧化焰三种。

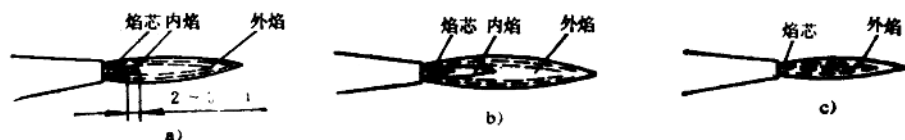


图1-2 火焰的构造

a) 中性焰 b) 碳化焰 c) 氧化焰

当可燃气体完全燃烧时, 形成中性焰, 如图1-2a所示。中性焰的焰芯呈尖锥状, 色白而明亮, 轮廓清晰。但焰芯温度不很高。焰芯前端为内焰, 呈蓝白色杏核形, 其温度较高。离焰芯尖端2~4mm处是火焰温度最高部分。外焰较长, 由里向外逐渐从淡紫色变为橙黄色。乙炔与氧燃烧形成的中性焰的温度分布如图1-3所示。

可燃气体未充分燃烧的火焰称为碳化焰, 如图1-2b所示。焰芯呈白色, 外围略带蓝色, 内焰为淡白色, 外焰为橙黄色。碳化焰火焰长而软, 温度较低。由于内焰部分存在着未燃烧的碳, 因而具有还原性。

可燃气体充分燃烧并有剩余氧时, 称为氧化焰, 如图1-2c所示。这种火焰只有焰芯和外焰两部分。焰芯短而尖, 呈青白色; 外焰略带紫色, 长度不大。由于火焰中存在过剩的氧, 所以具有氧化性。

预热火焰的能率和火焰的性质是气割过程的主要参数。气割时一般采用中性焰, 有时也用轻微的氧化焰。一般不用碳化焰, 因为它会使切割边缘发生增碳现象。

预热火焰的能率, 通常随钢板厚度的增大而加大, 见表1-5。此外, 还取决于钢的化学成分和切割速度。当切割含碳量较高或合金元素较多的钢材时, 因其燃烧温度较高, 火焰能率应适当大些。切割速度快时, 也应相应增大火焰能率。但火焰能率不能太大, 否则会引起切口上缘发生珠粒状熔渣, 下缘熔渣粘附, 并使切口面光洁程度变差。

2. 切割氧

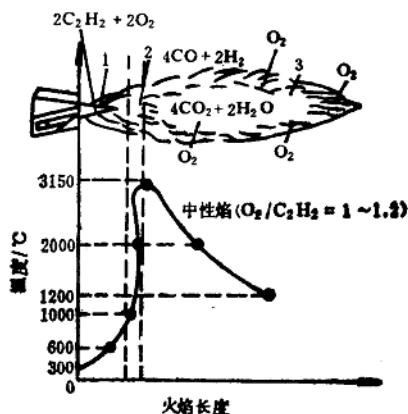


图1-3 氧—乙炔中性焰的温度分布

1—焰芯 2—内焰 3—外焰

表1-5 气割时氧—乙炔火焰的能率

钢板厚度/mm	6~25	25~50	50~100	100~200	200~300
火焰能率/(m ² ·h ⁻¹)	0.4~0.55	0.55~0.75	0.75~1.0	1.0~1.2	1.2~1.3

在气割过程中，切割氧的主要作用是与铁发生快速燃烧和吹除燃烧生成的熔融氧化物。显然，它对切割过程有着重大的影响。

在切割氧的各参数中，尤以纯度和流量对切割过程的影响最为显著。

氧气的纯度对切割速度、气体消耗量以及割缝质量均有很大的关系。氧气纯度的降低，使金属的氧化速度减慢，切割时间增加。而且，气割单位长度割件所需的氧气量也增加。例如，当氧气纯度在97.5%~99.5%范围内时，每降低1%纯度，每米长割缝的切割时间约增加10%~15%，氧气消耗量增加25%~35%。图1-4中曲线1即表示切割氧纯度与气割时间的关系；曲线2表示切割氧纯度与氧气消耗量的关系。对于采用发热值较低的可燃气体时，更应注意切割氧的纯度，此时，宜将其纯度增至99.7%~99.9%。

众所周知，气割时所需的理论氧流量可根据铁燃烧时的化学反应式来计算。例如，1kg铁生成四氧化三铁(Fe_3O_4)时，需要氧0.27m³。氧量不足会引起金属燃烧不完全和清除氧化熔渣的能力减弱，但氧量过多，则会使切口处金属冷却，使切割速度和切割质量下降。

3. 钢板的初始温度

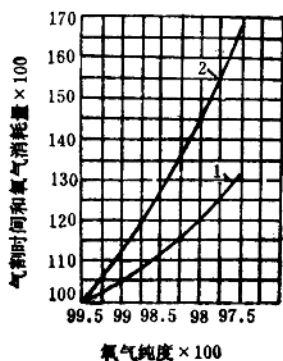


图1-4 氧气纯度对气割时间和氧气消耗量的影响
1—对气割时间的影响 2—对氧气消耗量的影响

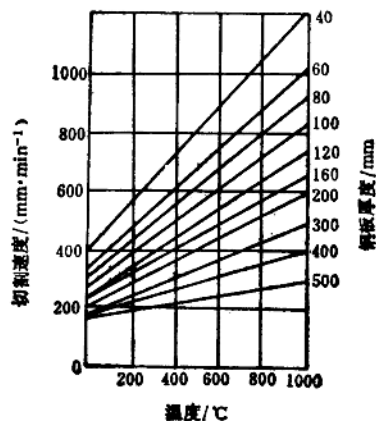


图1-5 钢材初始温度与切割速度的关系

试验研究表明，被割钢板的初始温度对气割过程有着明显的影响。如果把钢板由10℃加热到400℃、700℃和1000℃时，气割速度可相应提高33%、67%和108%。对于不同厚度的钢板，钢板的初始温度与切割速度的关系如图1-5所示。

随着钢材初始温度的提高，不仅可增加切割速度，而且可减少切割氧耗量。因此，在实际生产中，应根据具体情况尽量利用前道工序的剩余热量进行气割工作，以提高切割速度、节约能源、降低成本。

4. 割炬后倾角

火焰切割时，割炬通常垂直于钢板表面。但在直线切割时，如将割炬适当后倾可充分利用熔渣的热量来预热割缝前缘，减少后拖量，提高切割速度。由图

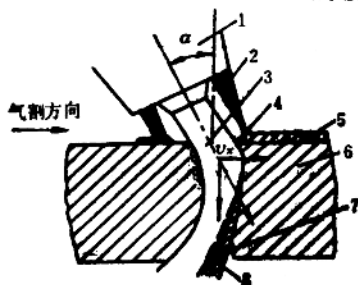


图1-6 割炬后倾时的切割过程
1—割炬 2—预热火焰 3—切割氧气流
4—气割混合层 5—熔渣 6—割件
7—燃烧气体 8—熔渣

1-6可知, 割炬后倾, 使切割氧射流产生水平方向的分速度 v_x , 使切口表面的液态熔渣层减薄, 并使一部分切割氧直接流向反应面, 加速了燃烧反应。与此同时, 切割氧的水平分速度使一部分液态熔渣被吹至割缝前缘, 起到预热的作用。

在使用超音速割嘴切割时, 随着割嘴后倾角的增大, 切割速度明显增加。图1-7为各种超音速割嘴的切割速度与后倾角的关系。

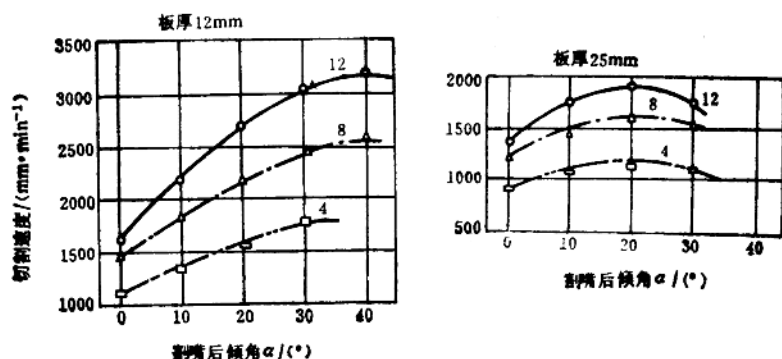


图1-7 割嘴后倾角对切割速度的影响

由图可知, 若后倾角过大, 切割速度反而逐渐降低, 这是因为切割氧流在垂直方向的分速度减小, 使排渣能力减弱。因而, 后倾角不能任意增大, 一般应小于 35° 。

四、火焰切割对钢的成分、组织和力学性能的影响

在气割过程中, 钢材切口附近区域, 由于受到快速加热和冷却以及化学反应, 使其成分、组织和力学性能均发生变化。变化区域的深度取决于钢材的成分、厚度和切割速度, 如表1-6所示。

表1-6 钢材气割时热影响区的深度

钢材厚度/mm	切割速度/(mm·min ⁻¹)	热影响区深度/mm		
		低碳钢	中碳钢	铬镍钢
25	250	0.4~0.7	0.8~1.5	2~3
50	170	1.0~1.5	1.5~2.5	3~4
100	125	1.5~2.0	2.0~3.0	4~5
250	100	2.0~3.0	3.0~5.0	5~8

钢的厚度愈大, 热影响区的深度也愈大; 提高切割速度, 热影响区的深度减小。

在钢材切口边缘深度约0.02~0.2mm范围内, 碳、镍和铜的含量比原来有所增高, 而锰、铬和硅的含量则略有降低。当钢材厚度大、含碳量高、切割速度较慢时, 切口边缘增碳现象更明显。

在气割低碳钢时, 切口边缘材料的组织变化主要是晶粒长大。气割中碳钢和合金钢时, 会出现马氏体组织, 使切口面上产生裂纹。

由于化学成分和组织的变化, 使切口边缘的力学性能也发生相应的变化。对于含碳量大于0.4%的钢, 强度略有降低, 硬度有所提高, 对冲击韧性无明显影响。另外, 气割对疲劳

强度也有影响,通常比用机械加工的边缘低20%~40%,强度愈高的钢其疲劳强度降低愈多。

五、高速火焰切割

1. 提高火焰切割速度的途径

如前所述,钢材的火焰切割过程实质上是铁和氧的快速燃烧反应过程。显然,铁和氧的反应速度的快慢将直接影响到切割速度。关于反应速度的最高理论值至今还在不断研究中。在本世纪70年代以前,一般认为,理论切割速度为4.3m/min左右。近年来的研究表明,改变氧流的初始温度、被割钢材的初始温度以及切割氧流的倾斜角(即割炬的后倾角)时,能大大提高切割速度。在提高钢材初始温度的情况下,最高理论切割速度可达26.4m/min。当割炬后倾20°时,最高理论切割速度还可进一步提高,例如当钢材温度为20℃时,可达36.1m/min;当钢材被加热到1388℃时,可达77.2m/min。由此可见,大幅度地提高钢材的切割速度是完全有可能的。关键问题是必须弄清究竟是哪些因素限制了实际切割速度的提高,这就要求全面地、深入地研究气割过程的机理。

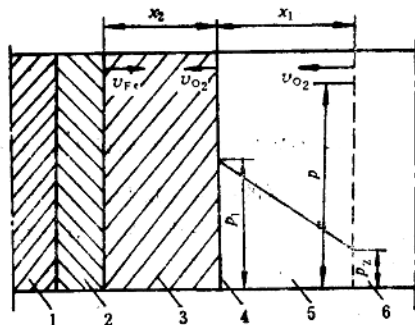


图1-8 气割过程中燃烧反应示意图

1—固体金属 2—熔融金属 3—熔融氧化物层
4—燃烧反应面 5—气体边界层 6—切割氧流

关于气割的燃烧反应,可用威尔斯(Wells)和霍非(Hofe)理论来予以解释。

既然气割过程是铁与氧的燃烧反应过程,因此,要加速燃烧反应速度必须尽量促使铁原子与氧气的相互接触。气割过程中燃烧反应过程如图1-8所示。铁原子与氧的烧燃反应主要发生在熔融氧化物层与气体接触的表面。此外,有少量氧原子进入熔融氧化物层与铁原子发生反应。由此可知,要使铁原子与氧发生反应,必须使铁原子由熔融金属扩散到熔融氧化物层的表面;与此同时,氧必须由切割氧流扩散到与熔融氧化物接触的表面。这两者的扩散速度都影响着铁与氧的燃烧反应速度。

威尔斯认为氧气的扩散速度是影响燃烧反应的主要因素。大家知道,在切割氧流中,总是含有一定量的杂质气体(今假设其分压力为 p_2),这些杂质气体与氧一起向燃烧反应面扩散。当这两种气体达到反应面后,氧就与铁发生燃烧反应而被消耗掉了,而杂质气体由于不能与铁发生化学反应而残留在反应面附近。这样,在切割氧流与反应面之间就形成了一个杂质气体浓度逐渐变化的边界层(与反应面最接近的部位,杂质气体的分压力最高,今假设为 p_1)。如果边界层的厚度为 x_1 ,反应区的总压力为 p ,则氧气通过扩散层的扩散速度,按扩散理论可表示为

$$N = \frac{Dp}{RTx_1} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

式中 N ——氧通过边界层的扩散速度,单位为 $10^3 \text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$;

D ——扩散系数,单位为 m^2/s ;

p ——反应区总压力,单位为MPa;

R ——气体常数,单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——反应区的温度,单位为K;

x_1 ——边界层厚度, 单位为m;

p_1 ——反应面上杂质气体的分压力, 单位为MPa;

p_2 ——切割氧流中杂质气体的分压力, 单位为MPa。

通常认为铁和氧的反应速度是很大的, 因而在反应面上杂质气体的分压力 p_1 趋近于气体的总压力 P 。这样, 上式可改写为

$$N = \frac{Dp}{RTx_1} \ln \frac{p}{p_2}$$

即

$$N = \frac{Dp}{RTx_1} \ln \frac{1}{\eta}$$

式中 η ——杂质气体在切割氧流中的体积比, $\eta = \frac{p_2}{p}$ 。

由此可知, 氧的扩散速度与边界层厚度 x_1 成反比关系, 边界层的厚度愈薄, 氧的扩散速度愈快。边界层的厚度主要决定于氧流的雷诺数。

根据这一分析, 为了提高切割速度, 必须提高切割氧的纯度和减小边界层的厚度。在这里, 减小边界层的厚度是最主要的, 这就要求提高切割氧的流速。

霍非认为铁原子的扩散速度是影响燃烧反应的主要因素。由图1-8可知, 熔融金属层不能与氧气流直接接触, 其间隔着一层熔融氧化物膜。铁原子必须从熔融金属中扩散到反应面才能与氧发生燃烧反应。显然, 铁原子扩散到反应面的快慢, 主要决定于熔融氧化物层的厚度 x_2 。尽量减薄氧化物层的厚度就可以使反应速度加快。减小厚度 x_2 的主要途径是增加切割氧流的动量, 以提高其排渣能力。另一方面, 降低这层氧化物熔渣的粘度, 也会有利于排渣, 从而减薄其厚度。

综上所述, 可以归纳出提高切割速度的主要途径为:

(1) 必须尽量提高氧气的纯度, 特别是进入割炬中的切割氧流的纯度。这就要求采取各种措施防止在切割过程中氧气流纯度的降低。

(2) 必须设法提高切割氧流的流速和动量。

(3) 必须强化对切口的预热。由于热量的主要来源是燃烧反应热。因此, 首先须向反应区送入足够数量的、高纯度的氧气, 使燃烧过程加剧; 另一方面, 必须充分地、有效地利用氧化物熔渣中的这种反应热, 如采取割炬后倾等措施; 再者, 也可采取一些其它的预热措施或适当增加预热火焰能率等。

在生产实践中, 往往同时采用上述三方面的措施, 但以提高切割氧的流速和动量、效果最显著。因此, 为了进一步提高切割速度必须尽量设法提高切割氧的流速和动量。

2. 高速扩散型喷嘴

通常气割时所用的割炬喷嘴都是直筒型或收缩型喷嘴, 这种喷嘴从实现高速切割的要求来看, 在空气动力学上都存在着一定缺

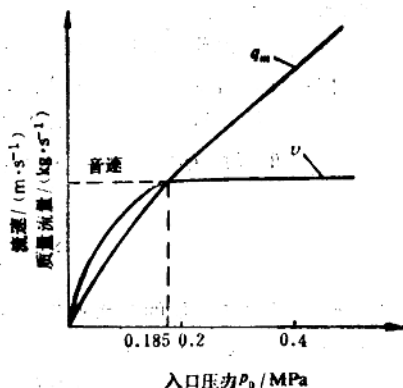


图1-9 亚音速喷管出口流速、流量与入口压力的关系