

高等学校试用教材

锅炉制造工艺学

西安交通大学章燕谋 编

机械工业出版社

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会精神,和1978年8月在哈尔滨召开的锅炉专业教材会议制订的《锅炉制造工艺学》编写大纲编写的。

全书共九章,分为两大部分。第一部分共六章,介绍锅炉制造工作中的主要基本工艺,着重介绍了金属材料的切割工艺(包括火焰切割和等离子弧切割),锅炉及压力容器制造中所采用的各种焊接方法(包括埋弧自动焊、磁弧焊接、电渣焊、氩弧焊、二氧化碳气体保护焊、接触焊、摩擦焊及等离子弧焊等)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,各种无损探伤技术(包括射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤、液体渗透探伤与其它各种新的探伤技术)的原理及其应用。第二部分共三章,介绍了锅炉各主要部件(锅筒、管件及其它部件)的制造工艺过程及工艺特点。本书除作为高等院校锅炉专业教学用书外,还可供锅炉厂和化工机械厂等有关方面技术人员阅读和参考。

随着我国社会主义建设事业的发展和群众性技术改造、技术革新运动的蓬勃开展,许多新工艺、新技术逐步得到广泛应用。本书在取材方面,不仅介绍了基本原理,而且着重介绍了我国锅炉制造行业和压力容器制造方面所采用的各种新技术和新工艺,力图能充分地反映我国锅炉工业的制造工艺水平。与此同时,为了更好地学习国外先进技术,本书也注意介绍了国外锅炉制造方面采用的各种新技术以及国外在锅炉制造工艺上的发展趋势。

在编写本书时,根据作者从事锅炉制造工艺教学工作的经验,力求做到由浅入深,由表及里,循序渐进,尽量适合于学生的学习。

在本书编写过程中,曾得到许多锅炉厂及化工机械厂提供的技术资料及热情帮助。本书初稿写成后,由西安交通大学徐通模同志进行了详细的审阅。最后,由上海机械学院刘正武同志进行了全面认真的审查,并提出了许多宝贵的意见。一机部教材编辑室翁善惠同志对本书进行了认真细致的审阅和辛勤的工作。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳切希望读者提出批评指正。

1979年7月

目 录

绪 言	1
第一章 金属材料的切割	3
§ 1-1 火焰切割	3
一、火焰切割基本原理	3
二、气割用的可燃气体	5
三、火焰切割的影响因素	7
四、常用的割炬	9
五、高速火焰切割	9
六、液化石油气或天然气切割	15
§ 1-2 等离子弧切割	17
一、等离子弧的基本原理及其特点	17
二、等离子弧的产生	18
三、等离子弧的类型	18
四、等离子弧切割技术	19
第二章 电弧焊接与电渣焊接	22
§ 2-1 电弧焊接的基本原理	22
一、焊接电弧的特性	22
二、电弧焊的焊接接头	26
§ 2-2 埋弧自动焊接	28
一、概述	28
二、焊接过程自动调节的基本原理	29
三、锅炉锅筒纵向焊缝和环向焊缝的埋弧自动焊接装置	33
四、埋弧自动焊接所用的焊接材料	33
五、埋弧自动焊接技术	35
§ 2-3 磁弧焊接	37
一、磁弧焊接的基本原理及其特点	38
二、管件的磁弧焊接技术	39
§ 2-4 电渣焊接	40
一、概述	40
二、电渣焊接过程的特点	42
三、丝极电渣焊接技术	43
第三章 气体保护电弧焊接	45
§ 3-1 概述	45
§ 3-2 钨极氩弧焊	46
一、电弧在氩气中燃烧的特点	46
二、钨极氩弧焊的特点	47
三、钨极氩弧焊接技术	48

IV

§ 3-3 熔化极氩弧焊	49
一、熔化极氩弧焊的熔滴过渡	50
二、熔化极氩弧焊接技术	53
§ 3-4 熔化极脉冲氩弧焊	54
一、熔化极氩弧焊的局限性	54
二、熔化极脉冲氩弧焊的基本原理	54
三、熔化极脉冲氩弧焊接技术	54
§ 3-5 二氧化碳气体保护焊 (简称 CO ₂ 焊)	56
一、概述	56
二、CO ₂ 焊的冶金特点	57
三、CO ₂ 焊的熔滴过渡特点	59
四、CO ₂ 焊的飞溅问题	61
§ 3-6 气电焊的发展简况	62
一、多元保护气体的使用	62
二、窄间隙焊接法	64
第四章 接触焊、摩擦焊、等离子弧焊	65
§ 4-1 接触焊	65
一、概述	65
二、闪光对接焊过程	67
三、闪光对接焊缝的灰斑问题	68
§ 4-2 摩擦焊	70
一、摩擦焊接的基本原理	70
二、摩擦焊接的优点	71
三、摩擦焊接的焊接工艺	72
§ 4-3 等离子弧焊接	74
一、等离子弧焊接的基本原理及其特点	74
二、穿透等离子弧焊接工艺	75
第五章 锅炉钢材的焊接特点	77
§ 5-1 普通低合金结构钢的焊接特点	77
一、焊接接头的冷裂纹	77
二、焊接接头的热裂纹	84
三、焊接接头的再热裂纹	86
§ 5-2 低合金珠光体热强钢的焊接特点	91
§ 5-3 奥氏体不锈钢的焊接特点	92
第六章 无损探伤技术	93
§ 6-1 概述	93
§ 6-2 射线探伤	94
一、射线探伤的优缺点	94
二、X射线发生的基本原理	95
三、X射线的探伤方法	96
四、γ射线发生的基本原理	98
五、γ射线探伤方法	98

§ 6-3 超声波探伤	99
一、超声波的基本性质	99
二、超声波探伤的方法	104
三、超声波探伤技术	105
§ 6-4 磁粉探伤	109
一、磁粉探伤的基本原理	109
二、各种磁化方法的分类及其适用范围	110
三、影响灵敏度的几个主要因素	110
§ 6-5 液体渗透探伤法	112
一、概述	112
二、着色探伤	112
三、荧光探伤	113
§ 6-6 声发射无损探伤	113
一、概述	113
二、声发射的基本原理	114
三、声发射技术的应用	114
§ 6-7 其他探伤方法	115
一、液晶探伤	115
二、高能射线探伤	115
三、激光、全息照相在无损探伤中的应用	116
第七章 锅筒的制造工艺特点	117
§ 7-1 锅筒封头的制造工艺	117
一、封头毛坯展开尺寸的计算	117
二、封头的冲压成型	119
三、封头的爆炸成型	123
四、封头的旋压成型	125
五、成型封头的质量检验	128
§ 7-2 锅筒筒节的卷制	129
一、锅筒筒节的划线与下料	129
二、锅筒筒节的弯卷工作	131
§ 7-3 锅筒的装配与焊接工作	133
一、锅筒纵向与环向焊缝的装配	133
二、锅筒纵、环缝的焊接工作	135
§ 7-4 锅筒制造中的热处理工作	137
一、锅筒筒节的正火处理	137
二、高强度低合金钢锅筒的调质处理	138
三、锅筒的退火处理	139
§ 7-5 锅筒与管件的连接	142
一、排孔划线与钻孔	142
二、锅筒与管件的连接	143
§ 7-6 锅筒制造中的检验工作	145
一、致密性检验	145

二、无损探伤	147
第八章 锅炉管件的制造工艺特点	148
§ 8-1 管件的划线与下料	148
§ 8-2 管子的弯曲	148
一、管子弯曲时的变形	148
二、机械冷态弯管	149
三、机械热态弯管	153
四、小弯曲半径管件的弯制	155
§ 8-3 管子的焊接工作	157
一、管子的闪光对接焊技术	157
二、小口径厚壁管的自动氩弧焊接	159
三、管子的全位置脉冲电流等离子弧焊接	160
§ 8-4 膜式水冷壁的制造特点	162
一、膜式水冷壁管排的组合方式	162
二、膜式水冷壁的高频焊接工艺	164
三、膜式水冷壁管排的组装	165
四、膜式水冷壁管排的弯制	165
§ 8-5 蛇形管受热面的制造特点	166
第九章 锅炉其他零部件的制造特点	169
§ 9-1 集箱的制造特点	169
一、集箱的拼接	169
二、集箱端盖的旋压工艺	171
§ 9-2 钢管式空气预热器的制造特点	171
一、管子的切割下料	171
二、管板的制造	172
三、管箱的装配与焊接	172
§ 9-3 回转式空气预热器的制造特点	175
一、回转式空气预热器的制造工艺特点	175
二、回转式空气预热器的试运转	176
§ 9-4 铸铁省煤器管的制造特点	176
§ 9-5 具有扩展表面的对流受热面管件的制造特点	179

绪 言

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 $0.8 \sim 1.0$ 百万牛顿/米² 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 $2 \sim 3$ 百万牛顿/米²，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。

在二十世纪初期，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。

从六十年代开始，锅炉机组不断向超高参数、大容量方向发展。到七十年代，单机容量已达 100 万千瓦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 $9 \sim 12.5$ 万千瓦范围内，锅炉事故为汽机的 2.5 倍； $20 \sim 38.9$ 万千瓦范围内为 3.1 倍；大于 60 万千瓦为 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是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。100 万千瓦锅炉的事故损失要比 30 万千瓦锅炉多 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46小时,而过热器和再热器事故造成的停炉,每次平均要102小时,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30万千瓦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,从六十年代以来,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进行基本建设。例如,日本三菱公司在长崎造船所内新建了面积为十一万平方米高度机械化、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400万千瓦的电站锅炉。美国拔拍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30万千瓦的原子能发电设备。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。

我国,在解放以前,根本谈不上什么锅炉制造业,只有几个小冷作厂修理和制造一些老式的小型热水锅炉,基本上没有机器设备,主要靠手工劳动。解放后,在1953年成立了我国第一个锅炉厂——上海锅炉厂,并于1955年生产了第一台我国自行制造的中压电站锅炉(蒸发量为40吨/时),从而改变了我国不能制造电站锅炉的落后状况。1957年,我国另一个大型锅炉厂——哈尔滨锅炉厂建成投入生产,并于1958年试制了蒸发量为230吨/时的高压电站锅炉。这标志着我国锅炉工业进入了一个新的发展阶段。建国三十年来,我国已建立了一些成套发电设备制造厂。与此同时,全国各省市都建立了制造业锅炉的中、小型锅炉厂,从而形成了我国锅炉制造业体系。但是,目前我国锅炉制造技术水平还是比较低的,与国外先进水平相比,存在着较大的差距。在实现四个现代化的新长征中,我国锅炉制造业的技术改造工作是十分繁重的。

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、无损检验方法等;第二部分是介绍锅炉主要元件的制造工艺。

第一章 金属材料的切割

锅炉的各种零部件都是以板材、管材及各种型材作为原材料的。在其制造过程中，都需经过切割下料工作。

工业生产中比较广泛采用的切割方法可分为三类：机械切割、火焰切割和等离子弧切割。这三类切割方法，从其工作原理、操作方法及经济效果等方面，都存在着原则性的差别。

机械切割主要是利用机械装置对金属材料施加剪切力，使之被切割分离。在机器制造工业中，常用的各种切剪机械，如龙门式剪床、圆盘式剪床、各种冲剪机等均属于这一类。此外，各种锯床也属于机械切割。

火焰切割是依靠金属在氧气中燃烧形成氧化物，再利用高速气流将氧化物吹除，以达到切割分离金属的目的。火焰切割由于其成本低、切割速度快、设备简单等优点，在锅炉制造中得到十分广泛的应用。

等离子弧切割是依靠特制的割炬，产生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。等离子弧切割在不锈钢及有色金属的切割中得到普遍的应用。

在锅炉制造中，上述三类切割方法都在一定的条件下得到应用。下面着重介绍火焰切割和等离子弧切割。

§ 1-1 火焰切割

火焰切割通常称为气割，它是利用可燃气体与氧气混合燃烧产生的火焰流（通常称为预热火焰），将被切割的金属材料加热到其燃烧温度，然后喷射高速氧流（称为切割氧），使割缝处被加热到燃点的金属发生剧烈燃烧，并吹除掉燃烧后产生的氧化物，从而把金属分割开来。可燃气体与氧气的混合以及切割氧的喷射都是依靠割炬来实现的。

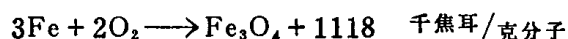
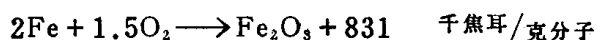
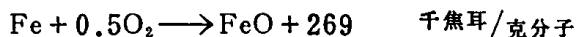
火焰切割主要用于碳素结构钢和低合金结构钢的切割下料工作。其主要特点是：设备简单、生产率高、成本低。特别适用于切割厚度较大的或形状较复杂的零件的坯料。

近年来，火焰切割技术的发展很快，光电跟踪自动气割技术、数字程序控制气割技术以及各种高速气割工艺都已开始广泛采用。这大大提高了气割工作的生产率和切割质量，并且降低了成本。

一、火焰切割基本原理

1. 火焰切割过程

很多金属在氧气中燃烧（剧烈氧化）会产生大量热量。例如，铁在氧气中燃烧就会产生下列各种反应，并放出大量的热量。



气割就是利用金属的这种特点来进行切割工作的。火焰切割过程如图 1-1 所示，它包括

下列三个阶段:

(1) 切割开始时,依靠预热火焰将起割处的金属加热到其燃烧温度。这是一个物理过程。

(2) 向被加热到燃烧温度的金属喷射切割氧流,使该处金属发生剧烈燃烧,形成氧化物,并放出大量热量。这是一个化学过程。

(3) 熔融状态的金属氧化物(熔渣)被高速切割氧流吹除。这是一个机械过程。

第二和第三阶段在实际操作过程中是不容易分辨出来的,因为过程进行得很快。

就被切割钢板的整个厚度来说,在表面层下面的金属不能得到预热火焰的直接加热,它们是依靠上部金属燃烧时生成的热量,被加热到燃烧温度的。当上部的熔渣被吹除后,切割氧流就直接与下部金属接触,由于它已被加热到燃烧温度,便在切割氧流中迅速燃烧,并熔化氧化物。这种情况不断继续下去,就把整个厚度割穿,保证切割工作的连续进行。

2. 火焰切割的条件

火焰切割过程是预热——燃烧——吹渣的过程。但并不是所有的金属都能满足这个过程的要求的。只有当符合下列条件时,才能进行火焰切割。

(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,它保证了燃烧过程的顺利进行。例如,低碳钢的燃点为 1350°C ,其熔点为 1500°C 左右,因而满足了这一基本要求。

(2) 燃烧后生成的金属氧化物的熔点应低于金属的熔点。并且熔融状态氧化物的流动性应较好,以保证氧化物能方便地从割缝中被吹除。如果氧化物的熔点较高,甚至高于金属的熔点,则金属氧化物就不易被吹除,并阻碍了下层金属与切割氧流的接触,使气割过程发生困难。

一些常用金属及其氧化物的熔点见表 1-1。

表1-1 一些常用金属及其氧化物的熔点 ($^{\circ}\text{C}$)

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*	铝	658	2050
低 碳 钢	1500	1370~1565*	铬	1550	1990
高 碳 钢	1300~1400	1370~1565*	镍	1450	1990
灰口铸铁	1200	1370~1565*	锌	419	1800
铜	1083	1230~1336	锰	1250	1560~1785

* 其中 FeO 的熔点为 1370°C , Fe_3O_4 的熔点为 1527°C , Fe_2O_3 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

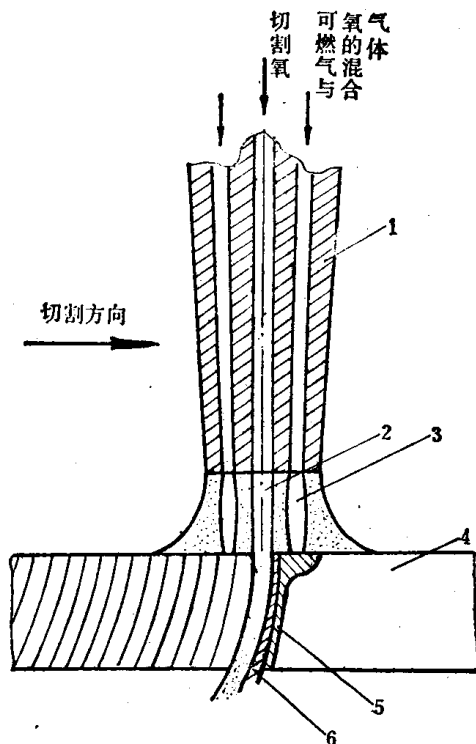


图1-1 火焰切割过程示意图

1—割嘴 2—切割氧流 3—预热火焰 4—被切割材料 5—熔化金属层 6—氧化熔渣层

燃烧时放出的热量如表 1-2 所示。

(4) 金属应具有较低的导温系数, 保证在割缝处能保持较高的温度。否则, 由于温度的很快散失, 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温系数, 也是它们不能采用普通气割方法进行切割的原因之一。

(5) 熔融氧化物的粘度应较小, 以便于被切割氧流吹除。

表1-2 一些金属燃烧形成氧化物时放出的热量

金属氧化物	放出的热量 (千焦耳/克分子)	金属氧化物	放出的热量 (千焦耳/克分子)	金属氧化物	放出的热量 (千焦耳/克分子)
FeO	269	ZnO	348.5	Mn ₃ 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 ₅	1340
Cu ₂ O	175	MnO	389.5	MoO ₂	544.6
Al ₂ O ₃	1646	Mn ₂ O ₃	975	MoO ₃	770

3. 一些合金元素对金属可气割性的影响

(1) 碳 随着钢中含碳量的增加, 钢的熔点降低, 燃点增高。例如:

纯铁	熔点 1534°C	燃点 1050°C
低碳钢	熔点 1500°C	燃点 1350°C
0.7%碳钢	熔点 1300°C	燃点 1300°C

另外, 随着含碳量的增加, 在切割边缘产生淬火裂纹的倾向增加。通常, 对于含碳量较低的碳素钢均可顺利地进行气割; 当含碳量较高时, 则在气割时应采取相应的措施; 对于含碳量很高 ($C > 0.7\%$) 时, 一般讲来不能用普通方法进行气割。

对于铸铁, 由于它的燃点大大高于其熔点, 而且燃烧时产生高熔点的二氧化硅 (SiO_2), 其流动性差, 切割氧流很难把它吹除。此外, 由于铸铁的含碳量很高, 燃烧后产生大量的一氧化碳 (CO) 及二氧化碳 (CO_2) 气体, 冲淡了切割氧流, 大大降低其氧化效果, 使气割过程发生困难。

(2) 锰 钢中一般的含锰量不会影响切割过程。但当含锰量较高时, 切割边缘有明显的硬度升高现象, 在其组织中会出现马氏体, 割后必需进行适当的热处理。

(3) 铝 纯铝不能进行气割, 因其导热性大, 约为铁的三倍。另外, 铝的熔点低于其氧化物的熔点。当钢中的含铝量小于 0.5% 时, 对气割基本上没有影响。

(4) 铬 铬燃烧后生成高熔点的氧化物 (Cr_2O_3)。它对钢材可气割性的影响为:

在含碳量为 0.4% 的碳钢中, 含铬量小于 5% 者均可气割, 但需注意防止切割边缘的淬硬倾向。在含碳量为 0.7% 的碳钢中, 含铬量小于 1.5% 者可以顺利地进行气割。

对于含铬量大于 5% 的钢材, 通常不能用一般的方法进行气割。

(5) 钼 钢中含钼量小于 2% 时, 对气割没有影响。对于低碳钢, 含钼量达 3.5% 时, 仍能进行气割。但如果含碳量大于 0.3%, 则气割就困难了, 因为此时会生成钼的碳化物 ($\text{Fe}_2\text{Mo}_2\text{C}$), 妨碍了钢的燃烧。

二、气割用的可燃气体

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，其单位为千焦耳/米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	混合气体中可燃气体含量(%容积)		可燃气体名称	混合气体中可燃气体含量(%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	10.0~73.6
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。

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。

表1-4 各种可燃气体的主要特性

可燃气体名称及其成分 (%容积)	密度 (公斤/米 ³) (在20℃及760毫米水银柱时)	低发热量 (千焦耳/米 ³) (在20℃及760毫米水银柱时)	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 (米 ³ /米 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 (97.8%CH ₄ , 0.9%C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , 1.3%N ₂ , CO ₂)	0.7~0.9	31400~33050	2000	290~530	按公式计算*	1.0~1.5
焦炉煤气 (50~59%H ₂ , 25~30%CH ₄ , 1.8~ 3%C ₂ H ₄ 和其它, 5~7% CO, 6~13%N ₂ 及 CO ₂ , 0.5~0.8%O ₂)	0.4~0.55	14650~17580	2000	—	按公式计算*	0.75~0.8
城市煤气 (6~10%H ₂ , 60~70% CH ₄ , 5~7%C ₂ H ₄ 和 其它, 4~6%CO, 其 余N ₂ 及CO ₂)	0.84~1.05	17160~20900	2000	445~600	按公式计算*	1.2~1.3
丙烷-丁烷混合气 (85%C ₃ H ₈ , 12%C ₄ H ₁₀ , 3%以下C ₂ H ₆)	1.92	88800	2100	—	5.0	3~3.5

* 可燃气体完全燃烧所需的氧可按公式计算：

$$\beta = 0.01[0.5H_2 + 2CH_4 + 5C_3H_8 + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n + 0.5CO - O_2]$$

三、火焰切割的影响因素

1. 预热火焰

气割时必须具有预热火焰。预热火焰在切割过程中的作用主要有下列四方面：

(1) 在切割开始前，将起割处的钢板加热到其燃烧温度，使之能与切割氧发生快速燃烧。

(2) 在切割过程中，将紧靠割缝前缘的钢板表面加热至燃烧温度，以帮助切割过程的不断进行。

(3) 在切割过程中，补偿切割区因热传导、辐射等引起的热损失，以保持切割区的高温。

(4) 清除钢板表面的锈皮、污垢等，便于切割氧与金属的燃烧反应。

气割时，预热火焰都采用中性焰，或轻微的氧化焰。一般不能用还原焰，因为它会使切割边缘发生增碳现象。

预热火焰的能率通常以可燃气体每小时的消耗量 (公斤/时或米³/时) 来表示。一般讲来，割件愈厚，预热火焰能率应愈大；但如火焰能率过大，则会使割缝的上边缘产生连续的珠状熔化钢粒，甚至被熔化成圆角，同时造成割件背面粘附着的熔渣增多，从而影响切割边缘的

质量。

如果预热火焰能率过小，则割件得不到足够的热量，迫使气割速度减慢，甚至使气割过程无法进行。

2. 切割氧

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 1-2 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，1 公斤铁生成四氧化三铁 (Fe_3O_4) 时，需要氧 0.27 米³。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。图 1-3 表示了切割氧流量与切割质量的关系。由图中可以看出，一定的切割氧流量与切割速度的配合能获得优良的切割质量。

3. 钢板的初始温度

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 1-4 所示。

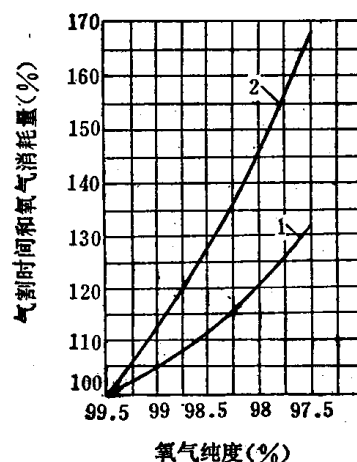


图1-2 氧气纯度对气割时间和氧气消耗量的影响

1—对气割时间的影响 2—对氧气消耗量的影响

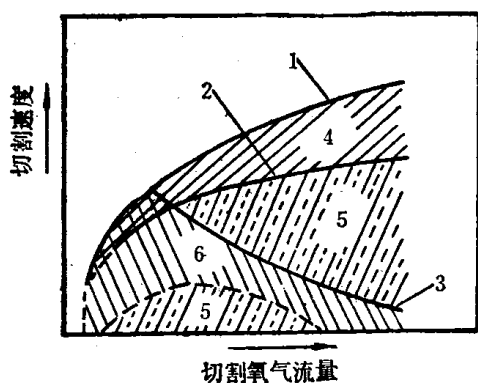


图1-3 氧气流量与切割质量的关系

1—临界切割速度 2—最高切割速度 3—优质切割最高速度 4—未完全割断 5—切口有熔渣附着 6—切口优良

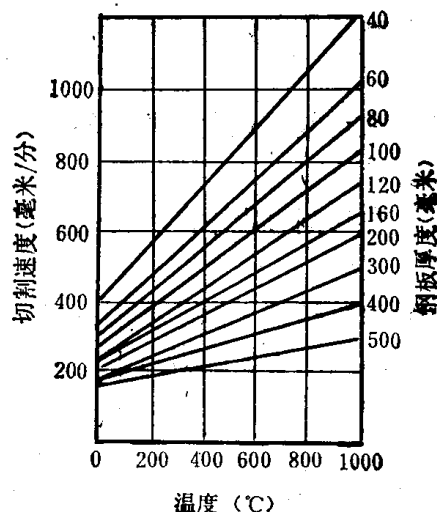


图1-4 钢材初始温度与切割速度的关系

随着钢材初始温度的提高,不仅可以增加切割速度,而且可以使切割氧的消耗量减少。因此,在实际生产上,应根据具体情况尽量利用这一有利条件。例如,在钢铁厂里,宜将轧制后的钢材在热状态下就进行气割,以提高效率和降低成本。

4. 切割速度

我们知道,切割速度的大小将直接影响到生产率,因此,我们总是希望尽量提高切割速度。但切割速度与许多因素有关,如钢板厚度、预热火焰能率、切割氧的纯度和流量、钢板的初始温度以及割炬喷嘴的形式等。在确定切割速度时,必须在保证切割质量的前提下,综合考虑上述各因素。对于目前生产上常用的割炬,切割速度与钢板厚度的关系如图1-5所示。由图可知,为了保证优质的切割质量,随着钢板厚度的增加,切割速度应适当减小。

5. 切割的后拖量

在切割过程中,尤其是切割厚板时,上部金属与下部金属的燃烧总是不均匀的。上部的燃烧速度较快,下部较慢。切口下部比上部燃烧迟缓的距离称为后拖量。后拖量可以从切口面上的沟纹很容易地看到和测量出来。由于后拖量的存在使切割时间有所增加。产生后拖量的主要原因是:

(1) 上部金属在燃烧反应时产生的气体与切割氧流混合,冲淡了切割氧的纯度,从而使下部金属燃烧缓慢。

(2) 切口下部的金属受不到预热火焰的直接加热,因而其温度较低。

(3) 切口下部的金属离割炬喷嘴的距离较远,切割氧在流经切口上部的金属时,消耗了一部分能量,从而使其对下部金属的排渣能力减弱。

(4) 当气割速度较快时,后拖量增加。严重时,甚至使割件不能割透。

用普通割炬喷嘴切割直线时,后拖量的数值大致如下:

钢板厚度 (毫米)	后拖量 (毫米)
5~25	1~5
25~50	5~8
50~100	8~12
100~200	12~15

在气割时可采用割炬后倾的方法使后拖量减少。

四、常用的割炬

割炬按可燃气体与氧气混合的方式不同可分为:射吸式和等压式两种。目前国内两种形式都有应用,但射吸式割炬应用较多。

常用割炬的型号及主要技术数据见表1-5。

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

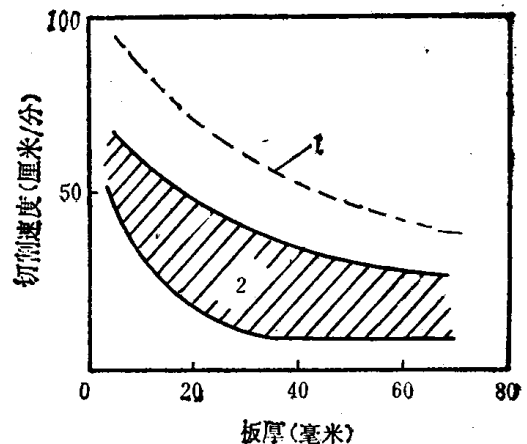


图1-5 切割速度与钢板厚度的关系 (普通割炬, 切割氧进口压力0.3百万牛顿/米²)

1—临界切割速度 2—优质切割区

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。在本世纪七十年代以前,一般认为,理论切割速度为4.3米/分左右。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26.4米/分。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°C 时,可达36.1米/分;当钢材被加热到 1388°C 时,可达77.2米/分。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。

表1-5 常用割炬的型号及主要技术数据

割 炬 型 号	G01-30			G01-100			GD1-100		
结 构 形 式	射 吸 式						等 压 式		
割嘴号码	1	2	3	1	2	3	1	2	3
割嘴孔径 (毫米)	0.6	0.8	1.0	1.0	1.3	1.6	0.8	1.0	1.2
切割厚度范围 (毫米)	2~10	10~20	20~30	10~25	25~30	50~100	5~10	10~25	25~40
氧气压力(百万牛顿/米 ²)	0.2	0.25	0.3	0.2	0.35	0.5	0.25	0.3	0.35
乙炔压力(百万牛顿/米 ²)	0.001~ 0.1	0.001~ 0.1	0.001~ 0.1	0.001~ 0.1	0.001~ 0.1	0.001~ 0.1	0.025~ 0.1	0.03~ 0.1	0.04~ 0.1
氧气消耗量 (米 ³ /时)	0.8	1.4	2.2	2.2~2.7	3.5~4.2	5.5~7.3			
乙炔消耗量 (米 ³ /时)	210	240	310	350~400	400~500	500~610			
割 嘴 形 状	环 形			梅花形和环形			梅 花 形		

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1-6所示。铁原子与氧的燃烧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

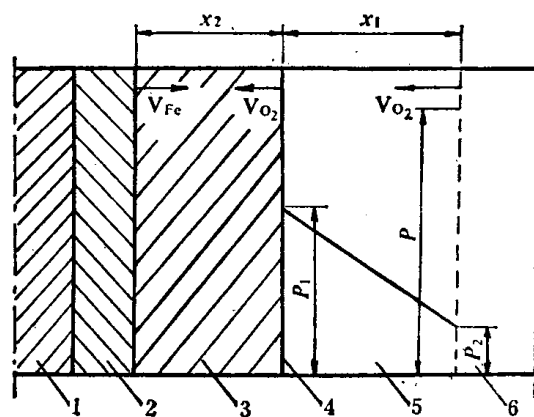


图1-6 气割过程中燃烧反应示意图

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

$$N = \frac{DP}{RTx_1} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

式中 N ——氧通过边界层的扩散速度，公斤分子/秒·米²；

D ——扩散系数，米²/秒；

P ——反应区总压力，百万牛顿/米²；

R ——气体常数，百万牛顿·米/公斤·K；

T ——反应区的温度，K；

x_1 ——边界层厚度，米；

P_1 ——反应面上杂质气体的分压力，百万牛顿/米²；

P_2 ——切割氧流中杂质气体的分压力，百万牛顿/米²。

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 1-6 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：

第一，必须尽量提高氧气的纯度，特别是进入割缝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。

第二，必须设法提高切割氧流的流速和动量。

第三，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