

早
接
吉
构

高等学校试用教材

焊 接 结 构

哈尔滨工业大学 田锡唐 主编

机械工业出版社



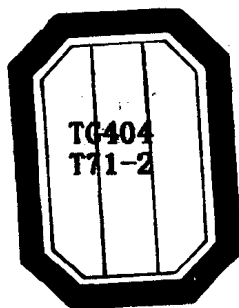
TG404
T71-2

439730

高等学校试用教材

焊 接 结 构

哈尔滨工业大学 田锡唐 主编



00430730



机械工业出版社

焊接结构

哈尔滨工业大学 田锡唐 主编

(重排本)

责任编辑:董连仁 版式设计:吴静霞

责任印制:卢子祥 责任校对:熊天荣

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $14 \frac{1}{2}$ · 字数 356 千字

1997 年 10 月第 1 版第 15 次印刷

印数 70 961—73 960 定价:15.50 元

*

ISBN 7-111-01810-9/TG · 459 (课)

ISBN 7-111-01810-9



9 787111 018100 >



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的精神和同年六月在黄山召开的全国焊接专业教材会议所制定的《焊接结构》教学大纲编写的。

本书为大专院校焊接专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

在编写过程中力求理论联系实际，突出基本问题并适当反映国内外的新成就和新的发展趋势。全书共分六章。

本书第一章和第二章由哈尔滨工业大学田锡唐编写，第三章由吉林工业大学郭占林编写，第四章由天津大学霍立兴、贾安东编写，第五章由天津大学霍立兴、张玉凤编写，第六章由吉林工业大学那学忠编写。全书由田锡唐主编，西安交通大学唐慕尧、上海交通大学陈楚和周浩森审阅，第一机械工业部教材编辑室董连仁同志为责任编辑。由于我们水平有限，加之时间又较仓促，书中难免有缺点和错误，请读者批评指正。

本书在编写、汇总、修改过程中曾得到哈尔滨工业大学焊接教研室朱鸿官、钟国柱、黎明、王式正等同志的帮助，谨此致谢。

1981年8月



目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 焊接应力与变形	5
§ 2-1 内应力及变形的一些基本概念	5
一、内应力及其产生原因	5
二、自由变形、外观变形和内部变形	6
三、长板条在不均匀温度场作用下的变形和应力	7
四、焊接引起的内应力及变形	10
§ 2-2 焊接残余变形	18
一、焊接残余变形的分类和研究焊接残余变形的意义	18
二、纵向收缩变形以及它所引起的挠曲变形	20
三、横向收缩变形及其产生的挠曲变形	23
四、角变形	29
五、波浪变形	32
六、焊接错边	35
七、螺旋形变形(扭曲变形)	35
八、预防焊接变形的措施	36
九、矫正焊接变形的措施	42
§ 2-3 焊接残余应力	47
一、焊接残余应力的分布	47
二、焊接残余应力的影响	55
三、在焊接过程中调节内应力的措施	61
四、焊后消除焊接内应力的方法	63
五、焊接残余应力的测定	66
第三章 焊接接头	71
§ 3-1 焊接接头的一般性能	71
一、焊接接头的基本概念	71
二、焊接接头的均匀性及其力学行为	72
三、焊缝及接头的基本型式	77
§ 3-2 焊接接头的工作应力分布和工作性能	81
一、应力集中的概念	81
二、电弧焊接接头的工作应力分布和工作性能	82
三、接触焊接头的工作应力分布和工作性能	90
四、钎焊联合结构与钎焊联合接头	91
§ 3-3 焊接接头静载强度计算	93
一、工作焊缝和联系焊缝	93
二、焊接接头强度计算的假设	93
三、电弧焊接头的静载强度计算	94
四、接触焊接头的静载强度计算	109
§ 3-4 焊缝许用应力	112
§ 3-5 焊缝代号	114
第四章 焊接结构的脆性断裂	122
§ 4-1 脆断事故和研究脆断的意义	122
§ 4-2 金属材料的断裂及其影响因素	124
一、金属材料断裂的形态特征	124
二、影响金属脆断的主要因素	126
§ 4-3 金属材料的脆性断裂的能量理论	129
§ 4-4 材料断裂的评定方法	130
一、转变温度方法	131
二、断裂力学方法	134
§ 4-5 焊接结构的特点及其对脆断的影响	135
一、与铆接结构相比焊接结构具有刚性大与整体性强的特点	135
二、焊接结构制造工艺的特点	136
§ 4-6 焊接结构抗开裂性能与止裂性能的评定方法	141
一、脆性断裂的产生(引发)、扩展和停止	141
二、焊接结构的两种设计原则	142
三、焊接接头抗开裂性能试验	142
四、止裂试验	145
§ 4-7 预防焊接结构脆性断裂的措施	147
一、正确选用材料	147
二、采用合理的焊接结构设计	148
三、用断裂力学方法评定结构安全性	151
第五章 焊接接头和结构的疲劳强度	157
§ 5-1 研究本问题的意义	157
§ 5-2 疲劳断裂的过程和断口特征	158
§ 5-3 在焊接结构中疲劳限的常用表示法	159
一、基本概念	159

IV

二、疲劳强度的常用表示法	160	一、机身的一般要求	191
§ 5-4 焊接接头的疲劳强度计算	162	二、切削机床的焊接机身	192
§ 5-5 断裂力学在疲劳裂纹扩展研究 中的应用	167	三、锻压设备焊接机身	194
一、裂纹的亚临界扩展	167	四、柴油机机身	198
二、疲劳裂纹扩展特性 $da/dN-\Delta K$ 曲线的一般关系	169	五、减速器箱体	200
三、疲劳裂纹扩展寿命的估算	170	§ 6-3 焊接容器	201
§ 5-6 影响焊接接头疲劳强度的因素	171	一、薄壁容器	202
一、应力集中的影响	171	二、厚壁容器	204
二、近缝区金属性能变化的影响	173	三、多层容器	210
三、残余应力的影响	176	四、球形容器	212
四、缺陷的影响	178	§ 6-4 焊接旋转体	213
§ 5-7 提高焊接接头疲劳强度的措施	180	一、齿轮、皮带轮和飞轮	213
一、降低应力集中	180	二、水轮机工作轮	214
二、调整残余应力场	181	三、汽轮机转子	215
三、改善材料的机械性能	185	四、水轮发电机转子支架	216
四、特殊保护措施	185	五、鼓筒	217
第六章 机器焊接结构	186	§ 6-5 薄板结构	219
§ 6-1 焊接结构的合理性分析	186	一、薄板结构的局部稳定性	220
一、从结构强度方面分析结构的 合理性	186	二、薄板结构的工艺性	221
二、焊接结构的制造工艺性及经济性	187	三、薄板结构实例	222
§ 6-2 焊接机身	191	§ 6-6 电渣焊结构	224
		一、电渣焊接头形式	224
		二、电渣焊结构的合理性分析	225
		三、电渣焊机器部件实例	226

第一章 绪 论

焊接技术在工业中应用的历史并不长,但它的发展却是非常迅速的。在短短的几十年中焊接已在许多工业部门的金属结构中,如建筑钢结构,船体,铁道车辆,·压力容器中几乎全部取代了铆接。不仅如此,在机器制造业中,不少过去一直用整铸整锻方法生产的大型毛坯改成了焊接结构,大大简化了生产工艺,降低了成本。在这方面,我国在解放后的三十多年中取得了很大的进展。早在五十年代末和六十年代初,我国就设计制造出焊接的72500千瓦水轮机工作轮,12000吨水压机(见图1-1)。六十年代中和七十年代初,又分别用小锻件和小铸件拼焊了125000千瓦汽轮机转子和重达120吨的大型水轮机工作轮(图1-2)。许多尖端技术如宇航、核动力等如果不采用焊接结构,实际上是不可能实现的,图1-3为反应堆压力容器焊接结构。焊接在整个工业中的地位还可以从这样一个事实来判断,即世界主要工业国家每年生产的焊接结构约占钢产量的45%左右。焊接结构之所以有如此迅速的发展是因为它具有一系列优点。

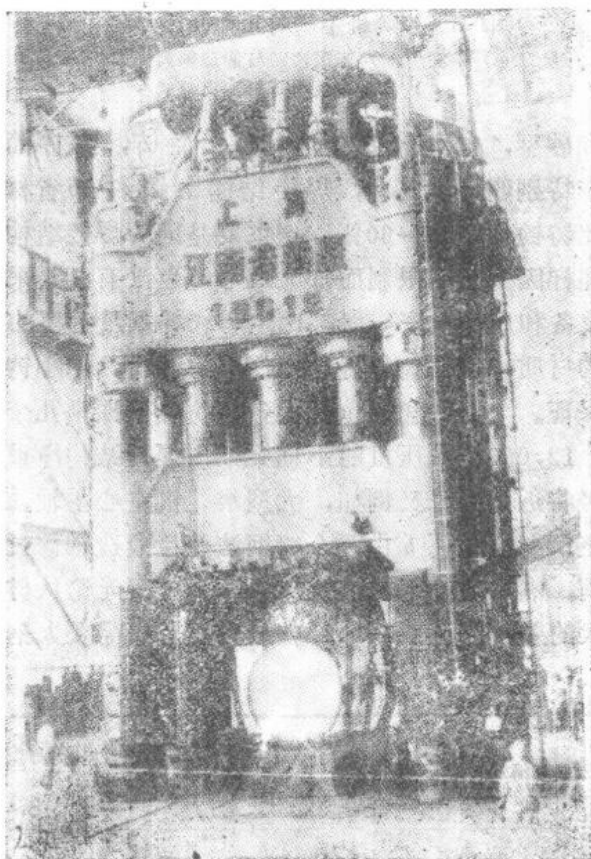


图1-1 12000吨水压机

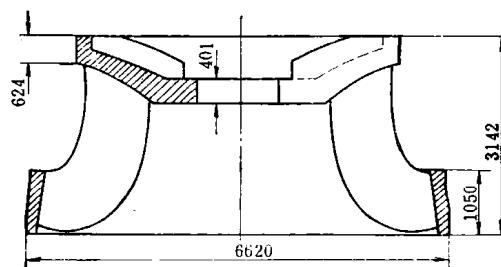


图1-2 大型水轮机工作轮

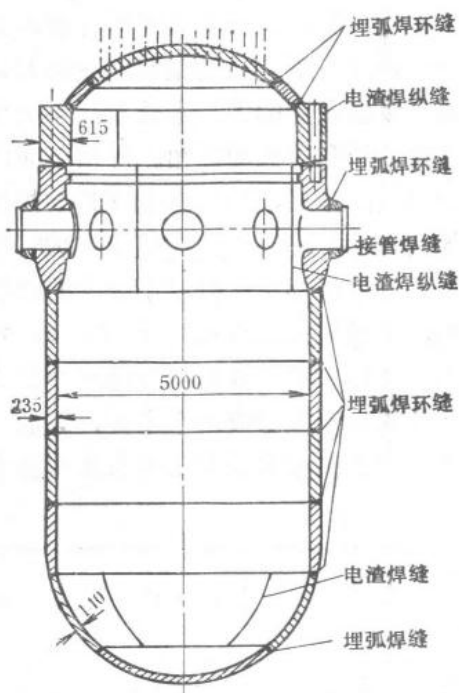


图1-3 大型原子反应堆压力容器

与铆接结构相比它可以节省大量金属材料。例如起重机采用焊接结构，其重量往往可以减轻15~20%，建筑钢结构一般可减轻10~20%。其原因在于焊接结构不必打铆钉孔，材料截面得到充分利用；此外，它也不需要象角钢那样的辅助材料（图1-4）；而且，焊缝金属的重量一般比铆钉轻。其次，焊接结构生产不需打孔，划线的工作量也比较少，因此比较省工。焊接设备一般亦比铆接生产所需的大型设备如多头钻床等的投资低。最后，焊接结构具有比铆接结构好得多的密封性。这是压力容器特别是高温高压容器不可缺少的条件。

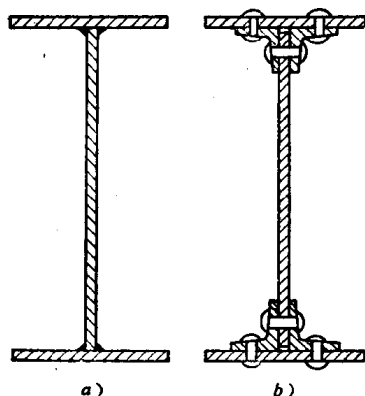


图1-4 焊接工字钢与铆接工字钢对比
a) 焊接工字钢 b) 铆接工字钢

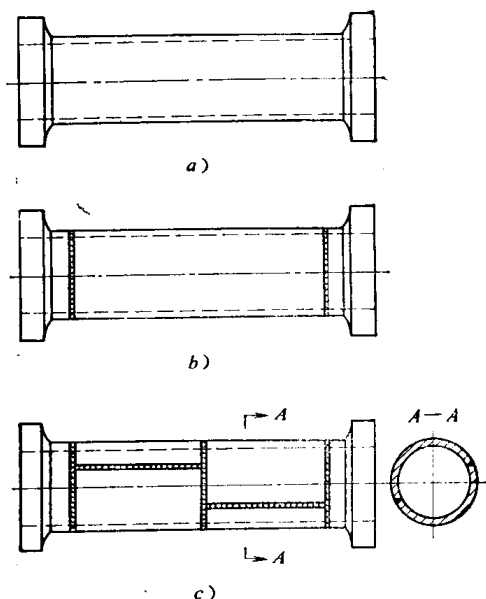


图1-5 水轮机主轴的几种设计方案
a) 整锻 b) 铸钢法兰与锻造轴筒焊成
c) 铸造法兰与焊接轴筒焊成

与铸件相比焊接结构生产不需要制作木模和砂型，也不需要专门熔炼、浇铸，工序简单，生产周期短。这一点对于单件和小批量生产特别明显。其次，焊接结构比铸件节省材料。一般情况下它比铸钢轻20~30%以上，比铸铁件轻50~60%。这主要是因为焊接结构的截面可以按设计的需要来选取，不必象铸件那样因工艺的限制而加大尺寸，也没有必要采用过多的筋板和过大的圆角。焊接车间所需的设备和厂房投资一般都比生产同样重量毛坯的铸造车间低。最后，采用轧制材料的焊接结构的材质一般比铸件好。即使不用轧材，用小铸件拼焊成大件，小铸件的质量也比大铸件容易保证。与锻件相比情况大致相仿。下面举几个实例来说明采用焊接结构以小拼大的经济效益。12,000吨水压机的下横梁采用焊接结构净重260吨，而采用铸钢件则重达470吨，重量减轻将近45%。又例如，大型水轮机空心主轴，净重达47.3吨（图1-5）可以用三个方案来制造：a全锻；b由两个铸钢法兰与锻造轴筒拼焊；c轴筒由厚板弯成两个半筒，焊成一个整筒，然后与铸钢法兰拼焊。三个方案无论从材料消耗到大型机床的加工工时来比较都有相当大的差别（见表1-1）。整锻方案首先需要大钢

表 1-1

方 案	项 目	净重(吨)	毛重(吨)	消耗钢材(吨)	占用大型机床 (台时)	成本对比 %
1	整锻	47.3	110	200	1400	100
2	铸焊(I)	47.3	66	132	1300	70.6
3	铸焊(II)	47.3	53	102	1000	53.0

锭。钢锭大所需浇冒口也大，因此消耗钢材最多。同时因为毛坯不易保证尺寸精确度，故加工裕量最大，占用大型机床的时间亦最长。而采用厚钢板筒身和铸造法兰拼焊最为经济。

在一般情况下，成批生产采用铸造的成本较低，比采用焊接结构经济。但这也不是绝对的。例如暖气片用薄板冲压成形再用接触焊焊接，不但生产率高，而且可以减轻重量三分之二。如果板材供应充足，比铸造合算（图1-6）。压型焊接结构在成批生产中取代铸件很有发展前途。

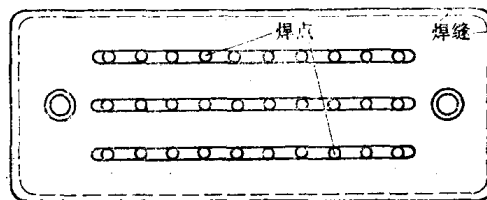


图1-6 焊接暖气片

焊接结构还有一些用别的工艺方法难以达到的优点。例如，焊接结构可以在同一个零件上，根据不同要求采用不同的材料或分段制造来简化工艺。举两个实例来说明：大型齿轮的轮缘可用高强度的耐磨优质合金钢，而其它部分则可用一般钢材来制造。这样既提高了齿轮的使用性能，又节省了优质钢材。拖拉机的半轴（图1-7）的一端有花键轴孔，如果采用整料就无法用拉刀加工。如果改成拼焊，可先用拉刀将花键孔加工完毕，然后再用摩擦焊与另一端焊成一个整体，则可简化工艺提高零件质量。

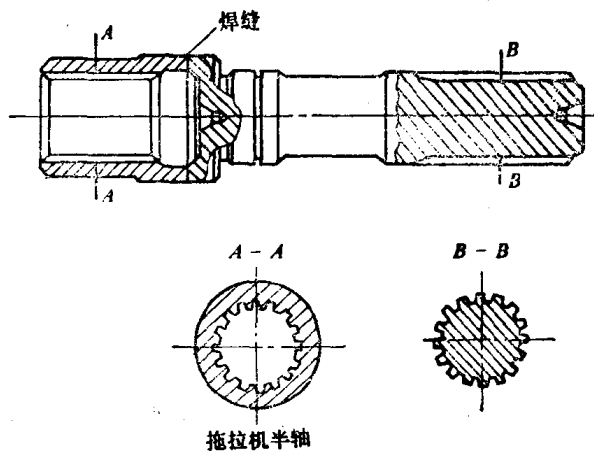


图1-7 拖拉机半轴

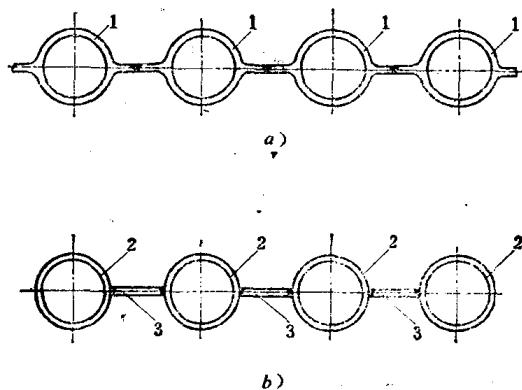


图1-8 大型锅炉水冷壁方案比较

a) 由轧制鳍片管焊成 b) 由无缝钢管加板条焊成
1—鳍片管 2—无缝钢管 3—钢板

有些型材如果采用焊接结构比轧制经济。例如用宽扁钢与钢板焊成的大型工字钢（高度大于70cm）往往比轧制的成本低。又如大型锅炉的水冷壁（图1-8）采用无缝钢管2加焊板条3的办法来制造（图1-8b）往往比用轧制的鳍片管1（图1-8a）来制造要经济，因为鳍片管的价格比无缝钢管贵得多。

焊接结构有自己的特点，只有正确地认识切实地掌握它的特点，才能设计制造出性能好经济指标高的焊接结构。历史上许多焊接结构失效的事例追其根源，多数与结构未能考虑焊接结构的特点有关。有的焊接结构照搬铆接结构的设计，结果酿成事故。至于由于因袭旧结构的形式造成浪费的例子很多，如不必要地加大焊缝尺寸，随便加焊筋板等等就更不胜枚举了。焊接结构的主要特点可以归纳为下列几点。

一、焊接结构的应力集中变化范围比铆接结构大 这是因为铆钉孔周围的应力集中系数变化较少。而焊接结构与铆接结构不同，焊缝除了起着类似铆钉的连接元件作用之外，还与基本金属组成一个整体，并能在外力作用下与它一起变形。因此焊缝的形状和焊缝的布置就

必然会影响应力的分布，使应力集中在较大的范围内变化。应力集中对结构的脆性断裂和疲劳有很大的影响。从断裂力学角度来分析，应力集中区域内的裂纹（这在焊接结构上的可能性是比较大的）的应力强度因子要比在同样的外载条件下平滑构件上尺寸相同的裂纹的应力强度因子大（图1-9）。采取合理的工艺和设计，可以控制焊接结构的应力集中及提高其强度和寿命。

二、焊接结构有较大的焊接应力和变形
绝大多数焊接方法都采用局部加热，故不可避免地产生内应力和变形。焊接应力和变形不但可能引起工艺缺陷，而且在一定条件下将影响结构的承载能力，诸如强度，刚度和受压稳定性。除此以外还将影响到结构的加工精度和尺寸稳定性。因此，在设计 and 施工时充分考虑焊接应力和变形这一特点是十分重要的。

三、焊接结构具有较大的性能不均匀性
由于焊缝金属的成分和组织与基本金属不同，以及焊接接头所经受的不同热循环和热塑性应变循环，焊接接头的不同区域具有不同的性能，形成了一个不均匀体。它的不均匀程度远远超过铸件和锻件。这种不均匀性对结构的力学行为特别是断裂行为必须予以足够的重视。

四、焊接接头的整体性 这是焊接结构区别于铆接结构的一个重要特性。这个特性一方面赋予焊接结构高密封性和高刚度，另一方面又带来了问题，例如止裂性能不如铆接结构好。裂纹一旦扩展就不易制止，而铆接缝往往可以起到限制扩展的作用。

本课程的第二、三、四、五章将从几个方面来论述焊接结构的主要特性，阐明其规律和原理并介绍控制它们的途径。第六章介绍典型焊接结构的实例，通过这些实例使学生更好地掌握焊接结构的特点，为正确分析焊接结构的工艺性和构造合理性，为解决有关设计和工艺问题打好基础。

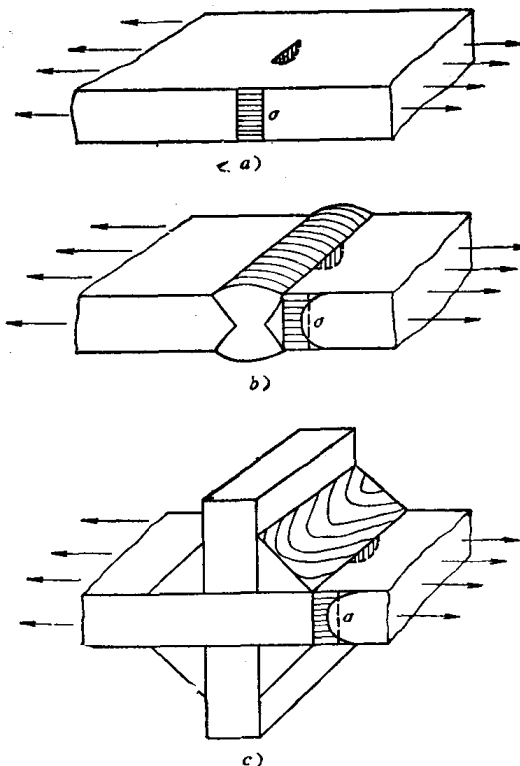


图1-9 不同应力场中的裂纹
a) 平板表面裂纹 b) 对接接头焊趾裂纹
c) 十字接头焊趾裂纹

第二章 焊接应力与变形

§ 2-1 内应力及变形的一些基本概念

一、内应力及其产生原因

内应力是在没有外力的条件下平衡于物体内部的应力。这种应力存在于许多工程结构中，如铆接结构、铸造结构、焊接结构等。

内应力按其分布范围可分为三类：第一类内应力，它在较大的范围内平衡，这个范围大小可以与物体尺寸来比量，故称之为宏观内应力。第二类内应力，它的平衡范围大小可以与晶粒尺寸来比量。第三类内应力，它的平衡范围更小，其大小可与晶格尺寸来比量。第一类内应力研究得比较多。

内应力按其产生原因可分为温度应力和残余应力等几种：

（一）温度应力（热应力）

温度应力是由于构件受热不均匀引起的。举一个简单例子来说明。图 2-1，是一个金属框架，如果只让框架的中心杆件受热，而两侧杆件的温度保持不变，则前者由于温度上升而伸长，但是这种伸长的趋势受到两侧杆件的阻碍，不能自由地进行，因此中心杆件就受到压缩，产生压应力。而两侧杆件在阻碍中心杆件膨胀伸长的同时受到中心杆件的反作用而产生拉应力。这种应力是在没有外力作用下出现的，且拉应力与压应力在框架中互相平衡，就构成了内应力。因为这是由于不均匀温度造成的，所以称之为温度应力或热应力。如果温度应力不高（低于材料的屈服极限），在框架里不产生塑性变形，那么，当框架的温度均匀化以后，热应力亦随之消失。

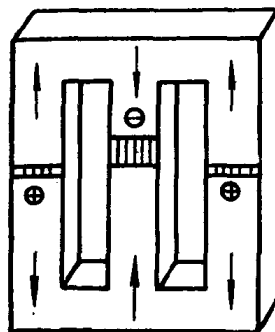


图2-1 金属框架

热应力比较广泛地出现在各种温度不均匀的工程结构中，如化工反应容器、热交换器、飞行器等。

（二）残余应力

如果不均匀温度场所造成的内应力达到材料的屈服限，使局部区域产生塑性变形。当温度恢复到原始的均匀状态后，就产生新的内应力。这种内应力是温度均匀后残存在物体中的，故称之为残余应力。以图 2-1 的金属框架为例，如果中心杆件加热产生的压应力达到材料的屈服限，杆件中将出现压缩塑性变形。当杆件温度恢复到原始状态时，若任其自由收缩，那么它的长度必然要比原来的短。这个差值就是中心杆件的压缩塑性变形量。实际上框架两侧杆件阻碍着中心杆件自由收缩，使它受到拉应力。而两侧杆件本身，则由于中心杆件的反作用而产生压应力。这样，就在框架中形成了一个新的内应力体系，即残余应力。

我们知道金属在相变时其比容也有所变化，也就是说其尺寸有所变化。如果温度升高，使局部金属发生相变，伴随这种相变所出现的体积变化将产生新的内应力。当温度恢复到原始状态后，如果相变的产物还保留下来，那么这个金属框架里就产生相变应力。它也是残余

应力的一种。

二、自由变形、外观变形和内部变形

物体在某些外界条件（如应力、温度等）的影响下，其形状和尺寸可能发生变化，这种变化都有一定的规律性。

当某一金属物体的温度有了改变，或发生了相变，它的尺寸和形状就要发生变化，如果这种变化没有受到外界的任何阻碍而自由地进行，这种变形称之为自由变形。以图 2-2 中的一根金属杆件为例，当温度为 T_0 时，其长度为 L_0 ，当温度由 T_0 升至 T_1 时，如不受阻碍，其长度将由 L_0 增长至 L_1 ，这段长度的改变就是自由变形，其大小可用下列公式来表示：

$$\Delta L_T = \alpha \cdot L_0 (T_1 - T_0)$$

式中 α ——金属的热膨胀系数，它的数值随材料而异，在不同温度情况下其数值也有一定程度的变化。

而自由变形率即单位长度上的自由变形量，用 ϵ_T 来表示：

$$\epsilon_T = \frac{\Delta L_T}{L_0} = \alpha (T_1 - T_0)$$

当金属物体在温度变化过程中受到阻碍，使它不能完全自由地变形，只能够部分地表现出来（见图 2-2 b），我们把能够表现出来的这部分变形，称之为外观变形，用 ΔL_e 表示。其变形率则为 ϵ_e ，可用下式表达：

$$\epsilon_e = \frac{\Delta L_e}{L_0}$$

而未表现出来的那部分变形，我们称之为内部变形。它们的数值是自由变形和外观变形之差，因为是受压故为负值，可用下列公式表示：

$$\Delta L = -(\Delta L_T - \Delta L_e) = \Delta L_e - \Delta L_T$$

同样内部变形率用下式来表达：

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

应力和应变之间的关系可以从材料试验的应力—应变图中得知。以低碳钢为例，当应变在弹性范围以内时，应力与应变是直线关系，可以用虎克定律来表示：

$$\sigma = E \cdot \epsilon = E(\epsilon_e - \epsilon_T) \quad (2-1)$$

对于低碳钢一类材料，应力—应变曲线可以简化为图 2-3 中 0ST 线，即当试棒中的应力达到

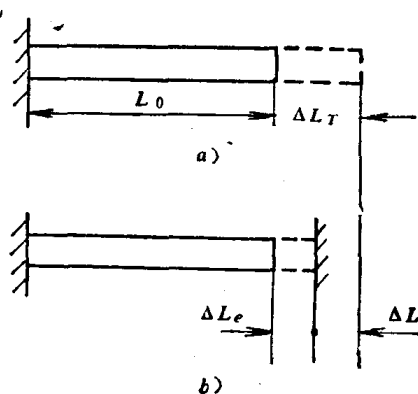


图2-2 金属杆件的变形
a) 自由变形量 b) 可见变形量

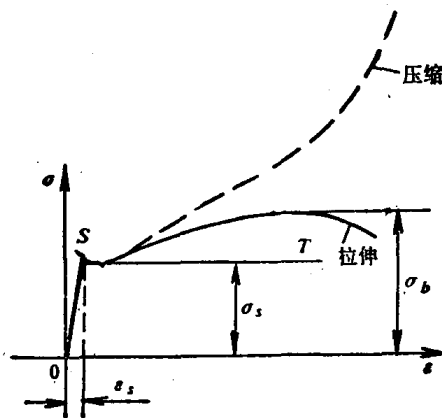


图2-3 低碳钢的 $\sigma - \epsilon$ 图

材料的屈服限 σ_s 后不再升高。

当金属杆件在加热过程中受到阻碍，其长度不能自由增长，则在杆件中产生内部变形，如果内部变形率的绝对值小于金属屈服时的变形率 ($|\varepsilon_1| < \varepsilon_s$)，说明杆件中受到小于 σ_s 的应力 ($\sigma_1 = E\varepsilon$)。当杆件温度从 T_1 恢复到 T_0 时，如果允许杆件自由收缩，则杆件将恢复到原来长度 L_0 ，杆件中也不存在应力。假如使杆件温度升得较高，达到 T_2 ($T_2 > T_1$)，使杆件中的内部变形率大于金属屈服时的变形率，即 $|\varepsilon_2| > \varepsilon_s$ 。在这种情况下，杆件中不但产生达到屈服极限的应力，同时还产生压缩塑性变形，其数值为 $|\varepsilon_p| = |\varepsilon_s - \varepsilon_T| - \varepsilon_s$ 。在杆件温度由 T_2 恢复到 T_0 的过程中，若允许其自由收缩，最后杆件比原来长度缩短 ΔL_p ，杆件中也不存在内应力。

三、长板条在不均匀温度场作用下的变形和应力

前面分析的是一根金属杆件在均匀加热过程中，受到约束而发生应力和变形的情况。现在再来分析一个金属长板条受不均匀温度场作用时，其变形和应力的情况。我们分析一个长度比宽度大得多的板条，这样除了两个端部以外，可根据“材料力学”中的平面假设原理（即当构件受纵向力或弯矩作用而变形时，在构件中的平截面始终保持是平面）来进行分析。

(一) 在长板条中心加热

图2-4所示厚度为 δ 的长板条，在中间沿长度上用电阻丝进行间接加热，则在板条横截面上将出现一个中间高两边低的不均匀温度场，而沿板条长度方向的温度分布可视为均匀的。关于这个板条的变形和应力的情况，我们可以从板条中切出一单位长度的小段来进行分析。

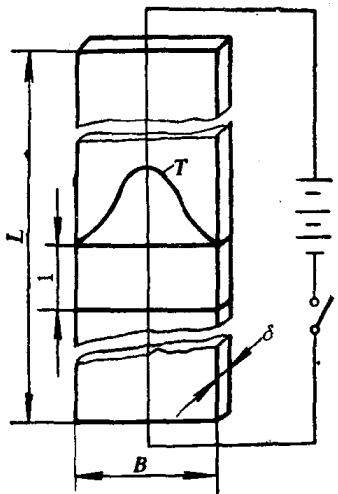


图2-4 长板中心受热

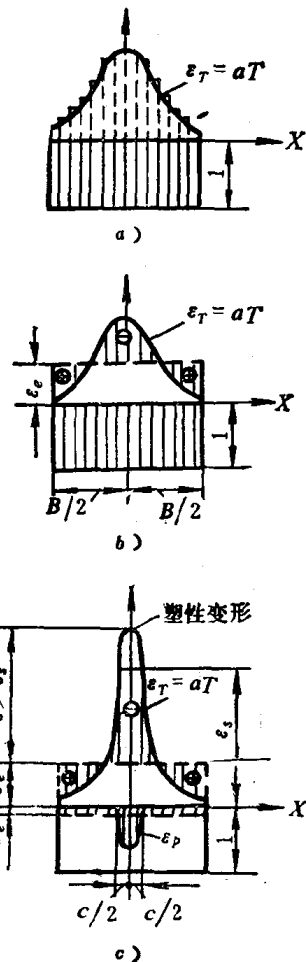


图2-5 板条中心加热的应力与变形

假设这个金属板条是由若干互不相连的小窄条组成，则每根小窄条都可以按着自己被加热到的温度自由变形，其结果使单位长度板条端面出现图2-5 a所示的曲面， $\varepsilon_T = aT$ 。实际

上,组成板条的小窄条之间是互相牵连和约束的整体,截面必须保持平面。由于温度场在板条上的分布是对称的,故端面只作平移。移动距离为 ϵ_s 。曲线 ϵ_T 与 ϵ_s 之间的差距为应变。平行线以上的为负值,产生压应力。平行线以下的为正值,产生拉应力。在这种情况下,板条中间受压两侧受拉。这三个区域的应力相互平衡,即平行线以上的面积和平衡线以下的面积相等,见图2-5b。如果已知温度分布是 x 的函数 $T = f(x)$,则应力的平衡条件可以用数学方程式来表达。其平衡条件是:

$$\begin{aligned}\Sigma Y &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma \cdot \delta \cdot dx = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} E(\epsilon_s - \epsilon_T) \cdot \delta dx \\ &= E \cdot \delta \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} [\epsilon_s - \alpha f(x)] dx = 0\end{aligned}\quad (2-2)$$

因为温度场对称于中心轴,故 $\epsilon_s = \text{const}$,截面只作平移,外观应变 ϵ_s 可以从方程式(2-2)求出。代入(2-1)则可求出各点的内应力值。

由上述可知,加在板条上的不均匀温度场,将使板条产生内应力和变形。如果上述温度场在金属板条中所引起的内应力 σ 小于金属的屈服极限 σ_s ,当加热电源断开以后,板条逐渐冷却,恢复到原来的温度,此时板条亦将恢复到原来长度,应力和变形均将消失。

如果加在板条上的不均匀温度场使板条中心部分受热较高,则在板条中心“c”区内产生较大的内部变形,使“c”区中的内部变形率 ϵ 大于金属屈服限时的变形率 ϵ_s 。这种情况可在图2-5c中看出。则在“c”区中将产生塑性变形。塑性变形区的宽度 c 的大小和塑性变形的分布可按公式(2-2)稍加修正来求得。内应力在 $-\frac{B}{2} \sim -\frac{c}{2}$ 和 $\frac{c}{2} \sim \frac{B}{2}$ 区中为 $\sigma = E(\epsilon_s - \epsilon_T)$, $-\frac{c}{2} \sim \frac{c}{2}$ 区中 $\sigma = E\left[\epsilon_s - \alpha f\left(\frac{c}{2}\right)\right] = -\sigma_s$ 。此时我们把加热电源断开,让板条渐渐冷却。由于在板条“c”区中产生压缩塑性变形,当板条温度恢复到原始温度后,应力和变形就不能象上述情况那样消失。如果允许其自由收缩,板条“c”区的长度将比原来短,其缩短量等于温度场存在时所产生的压缩塑性变形量。此时板条端面就成了一个中心凹的曲面。实际上板条是一个整体,“c”区的收缩受到两侧金属的限制,截面保持为平面,因此出现了新的变形和应力。板条中心部分受拉,两侧受压,这个新的平衡应力系统就是残余应力。而板条端面的位移就是残余变形。如果已知塑性区压缩变形的分布规律 $\epsilon_p = f_p(x)$,则残余应力:

$$\sigma = E[\epsilon'_s - f_p(x)] \quad (2-3)$$

式中 ϵ'_s 为残余外观应变变量。残余应力和变形也可用数学方程式来表达。平衡条件:

$$\begin{aligned}\Sigma Y &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma \cdot \delta \cdot dx = E\delta \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (\epsilon'_s - \epsilon_p) dx \\ &= E\delta \int_{-\frac{B}{2}}^{-\frac{c}{2}} \epsilon'_s dx + E\delta \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} [\epsilon'_s - f_p(x)] dx + E\delta \int_{\frac{c}{2}}^{\frac{B}{2}} \epsilon'_s dx\end{aligned}$$

$$= E\delta\epsilon'_c(B-c) + E\delta\int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{b}{2}} [\epsilon'_c - f_p(x)]dx = 0 \quad (2-4)$$

由于 ϵ_p 的分布对称于中心轴,故截面同样只作平移, $\epsilon'_c = \text{const.}$ 。可从(2-4)和(2-3)式中求出残余应变和应力。

根据上述两种情况分析,可以归纳如下:在板条中心对称加热时,板条中产生温度应力,中心受压,两边受拉。同时平板端面向外平移(伸长)。如果此时不产生塑性变形,即 $|\epsilon| < \epsilon_s$,当温度恢复到原始状态后,内应力消失,平板端面亦恢复到原来的位置。如果此时产生塑性变形,即 $|\epsilon| > \epsilon_s$,当温度恢复到原始状态时,还会出现由于不均匀塑性变形引起的残余应力,其符号与温度应力大致相反,同时板条端面向内平移(缩短),即为残余变形。

(二) 非对称加热 (一侧加热)

在图2-6所示长板条一侧用电阻丝间接加热,则在长板条中产生对断面中心不对称的不均匀温度场,它将使板条产生变形和应力。它们也应符合内应力平衡和平面假设原则,此板条端面亦有一个位移。位移的大小受内应力必须平衡这一条件所制约,因而不是任意的。图2-6 b、c所示情况,它们只能产生两个符号相反,而不作用在同一直线上的力,这样就构成了不平衡力矩,因此是不可能的。图2-6 d所示情况,形成了三个正负相间的应力区,只有在这种条件下内应力才可能平衡。在这种情况下,板条的外观变形不仅有端面平移,还有角位移。板条沿长度上就出现了弯曲变形(图2-6 e)。如果已知温度按 $T = f(x)$ 分布,则板条的应力与变形可用数学方式来表达。内应力的平衡条件为:

$$\Sigma Y = \int_0^B \sigma \delta dx = E\delta \int_0^B (\epsilon_c - \epsilon_T) dx = E\delta \int_0^B [\epsilon_c - \alpha f(x)] dx = 0 \quad (2-5)$$

$$\Sigma M = \int_0^B \sigma x \delta dx = E\delta \int_0^B (\epsilon_c - \epsilon_T) x dx = E\delta \int_0^B x [\epsilon_c - \alpha f(x)] dx = 0 \quad (2-6)$$

由于截面有转动,因此 ϵ_c 并非常数,而是 x 的线性函数:

$$\epsilon_c = \frac{B\epsilon_{s0} + (\epsilon_{eB} - \epsilon_{s0})x}{B} \quad (2-7)$$

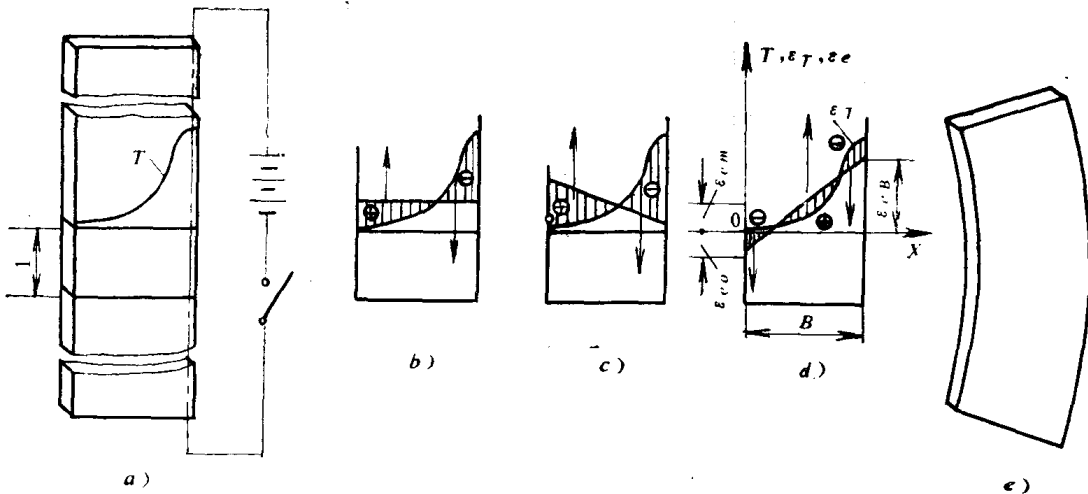


图2-6 板条一侧受热的应力和变形

将(2-7)式代入(2-5), (2-6)解联立方程即可求出 ε_{e0} , ε_{eB} , 进一步求出内应力的分布。从图2-6中不难看出板条的平均伸长率为:

$$\varepsilon_{em} = \frac{\varepsilon_{e0} + \varepsilon_{eB}}{2} \quad (2-8)$$

板条的曲率为:

$$c = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{eB} - \varepsilon_{e0}}{B} \quad (2-9)$$

如果在加热时板条中的内部变形率小于金属屈服限时的变形率 ε_s , 则当温度恢复到原始温度时, 板条中不存在残余应力, 也不出现残余变形。如果在加热时, 板条中的内部变形率 ε 大于金属屈服时的变形率 ε_s , 则板条中将出现压缩塑性变形。冷却时, 板条恢复到原始温度, 其中将出现残余应力。板条也产生残余弯曲变形和收缩变形, 但方向与加热时相反(见图2-7)。变形位置则由平衡条件来决定。

四、焊接引起的内应力及变形

(一) 焊接应力与变形的特殊性

焊接应力和变形与上述不均匀温度场引起的应力和变形的规律是一致的, 但是前者更为复杂。其复杂性首先表现在焊接时的温度变化范围比前面分析的情况要大得多, 在焊缝上最高温度可高达材料的沸腾点, 而离开热源温度急剧下降直至室温。金属在高温下性能随温度发生变化,

图2-8是低碳钢、铝合金和钛合金的 σ_s 与温度的关系图。由图可以看到低碳钢在500℃左右

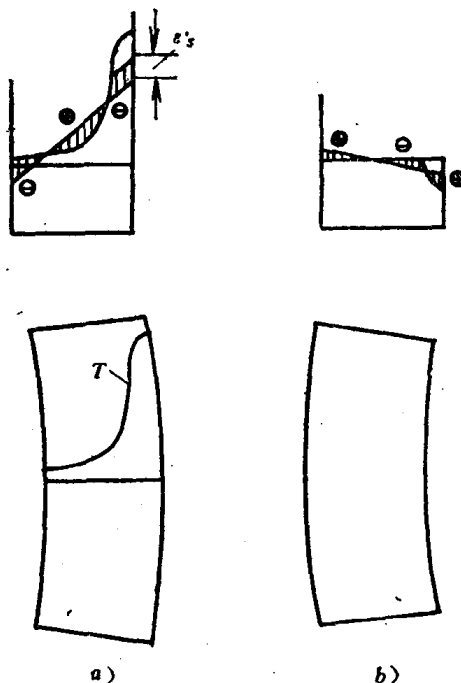


图2-7 长板条一侧受热后产生的残余应力和变形

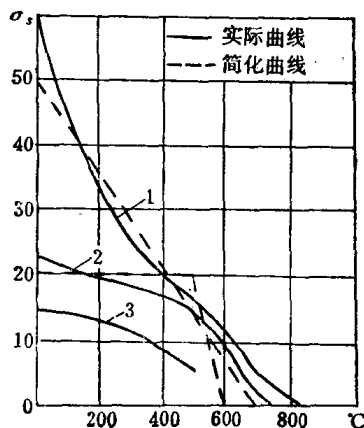


图2-8 金属屈服限 σ_s 与温度的关系

1—钛合金 2—低碳钢 3—铝合金

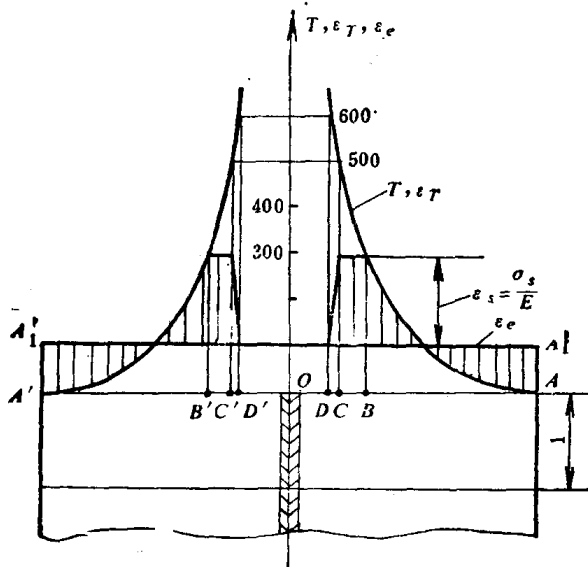


图2-9 平板中心焊接时的内应力分布

σ 迅速下降。为了分析方便通常用一条水平线和一条斜线（图上的虚线）组成的折线来简化。假设在 500°C 以下 σ 为一常量，而 500°C 至 600°C σ 直线下降到零。而钛合金的 σ 则用一条斜线来简化。图中铝合金的 σ 曲线未作简化。这些变化必然会影响到整个焊接过程中的应力分布，使问题复杂化。下面将举低碳钢作为例子进行分析：

设有一低碳钢平板条，沿中心线进行焊接。在焊接过程中出现一个温度场。在接近热源处取一横截面。该截面上的温度如图 2-9 所示。按照长板条中心加热时的应力和变形分析的基本方法，可找出该截面附近金属单元体的自由变形 ε_r 和外观变形 ε_e 。假设端面从 AA' 平移到 $A_1A'_1$ ，则 AA_1 即为 ε_e 。在 DD' 区域内，金属的温度超过 600°C ， σ 可视为零，不产生应力。因此这个区域不参加内应力的平衡。 DC 和 $D'C'$ 区域，温度从 600°C 降至 500°C ，屈服极限迅

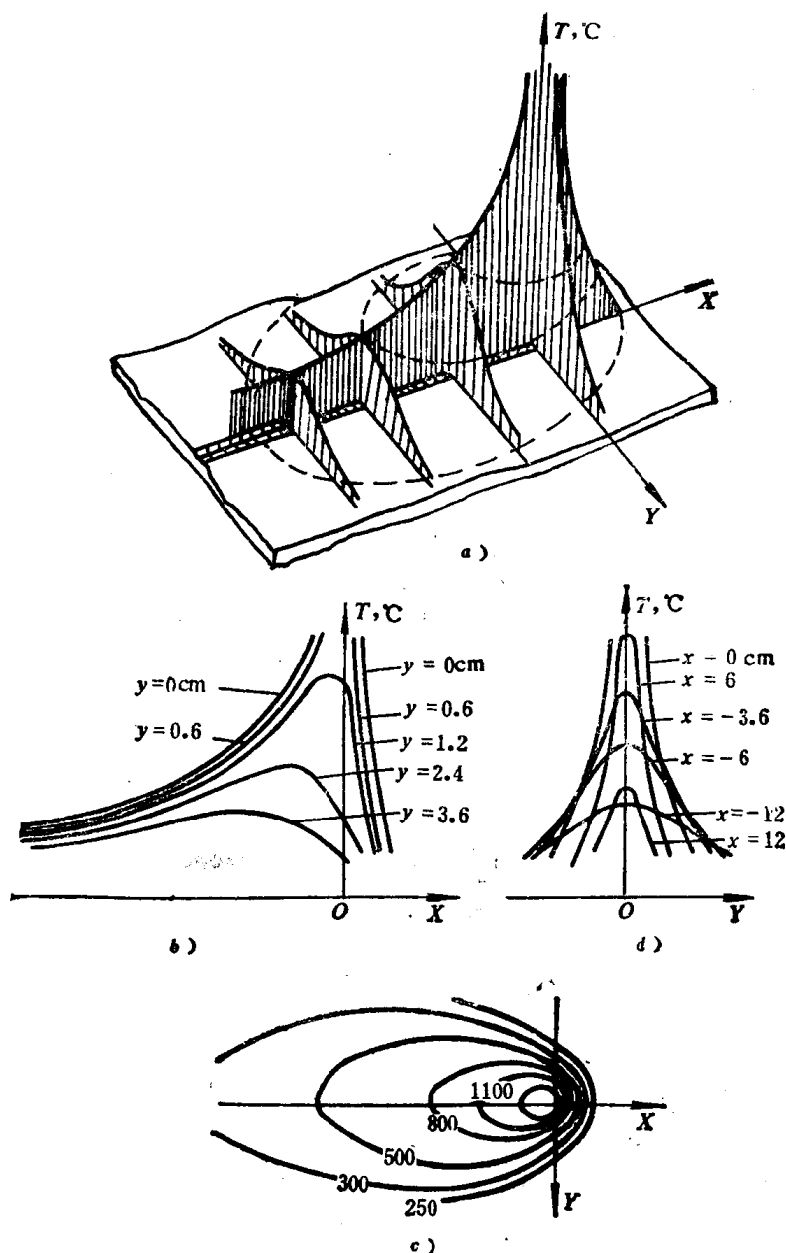


图2-10 焊接温度场

a) 立体图 b) 沿纵向截面的温度分布 c) 等温线 d) 横向截面的温度分布