

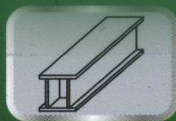
HANJIE GONGYI YU CAOZUO
JIQIAO CONGSHU

焊接工艺与操作技巧丛书

焊接应力、变形的控制

工艺与操作技巧

《焊接工艺与操作技巧丛书》 编委会 编著



辽宁科学技术出版社

LIANJING KEXUEJISHU CHUBANSHE

焊接工艺与操作技巧丛书

焊接应力、变形的控制 工艺与操作技巧

《焊接工艺与操作技巧丛书》编委会 编著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接应力、变形的控制工艺与操作技巧 / 《焊接工艺与操作技巧丛书》编委会编著. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2011.1

(焊接工艺与操作技巧丛书)

ISBN 978-7-5381-6737-5

I. ①焊… II. ①焊… III. ①焊接结构—残余应力—研究②焊接结构—变形—控制 IV. ①TG404

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 220744 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳市北陵印刷厂有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 6.5

字 数: 200 千字

印 数: 1~4000

出版时间: 2011 年 1 月第 1 版

印刷时间: 2011 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑: 高 鹏

封面设计: 刘 彬

版式设计: 于 浪 王 晶

责任校对: 刘 庶

书 号: ISBN 978-7-5381-6737-5

定 价: 17.00 元

联系电话: 024-23284062

邮购热线: 024-23284502

E-mail: lnkj1107@126.com

http://www.lnkj.com.cn

本书网址: www.lnkj.cn/uri.sh/6737

《焊接工艺与操作技巧丛书》

编委会

主 编 周 岐 王亚君

副主编 杨 惠

编 委 张洪志 张 亮 杨建新 赵建平

李 昭 于宝财 梁长兴 宗 战

巴洪波 张一淼 高艳辉

前 言

由于焊接热源的加热和焊接热过程的特点,使焊件受到不均匀的加热,造成焊接金属受热膨胀及冷却收缩的程度不同,这样,在焊件内部就产生了应力和变形。焊接应力往往是造成裂纹的直接原因,同时也大大降低焊接结构的承载能力和使用寿命;变形造成焊件尺寸、形状的变化,使之在焊后要进行大量复杂的矫正工作,甚至使焊件报废。如何减小或消除焊接应力与变形一直是焊接生产中重点关注和探讨的主要工作之一。

因此,我们组织编写了《焊接工艺与操作技巧丛书》,包括《焊条电弧焊工艺与操作技巧》、《CO₂气体保护焊工艺与操作技巧》、《埋弧焊工艺与操作技巧》、《氩弧焊工艺与操作技巧》、《气焊、气割工艺与操作技巧》、《焊接应力、变形的控制工艺与操作技巧》共6册。

本书为《焊接应力、变形的控制工艺与操作技巧》,全书共分八章,分别介绍了焊接应力与变形的产生原因和规律、焊接结构的设计、合理选择装配与焊接程序、焊接变形的估算及反变形法的实施以及其他焊接变形控制工艺、典型结构的装配与焊接、焊后残余变形的矫正和焊接残余应力的防止与消除等内容。其中第二至第七章重点介绍焊接变形的减小与消除工艺与措施,第八章重点介绍焊接应力的防止与消除。本书采取工艺与操作相结合的形式,简明扼要地介绍生产中焊接应力、变形的控制工艺与操作技巧,并配以大量实例及图示,以利于读者更好地学习吸收,并从中得到启发,从而能在实际生产中起到借鉴作用。

本书采用新规范、新标准,内容通俗,特别注重实用性,可供各行各业的焊工、焊接技术人员学习使用。

由于编者水平有限,漏误之处在所难免,恳请读者批评指正。

《焊接工艺与操作技巧丛书》编委会

目 录

第一章 焊接应力、变形概述	1
第一节 焊接热过程	1
一、焊接温度场	2
二、影响焊接温度场的因素	3
三、焊接热循环的概念	5
第二节 焊接应力与变形产生的原因	6
一、焊接应力的一般概念	6
二、均匀加热时引起应力与变形的原因	7
三、不均匀加热及焊接热过程引起应力与变形	11
四、组织应力简述	12
第三节 焊接变形的种类及分布	13
一、焊接接头的横向收缩	16
二、焊接接头纵向变形	19
三、角变形	20
四、由纵向收缩引起的弯曲变形	25
五、压曲变形	26
六、典型焊接接头的残余应力分布	27
第二章 焊接结构的设计	29
第一节 焊接结构及结构强度	29
一、焊接结构的特点	29
二、典型焊接结构	30
三、焊接结构强度	38
第二节 合理选择焊缝形式和尺寸	43
一、焊缝尺寸	43
二、坡口形式	44

第三节	合理安排焊缝的数量和位置	47
第三章	合理选择装配与焊接程序	52
第一节	装配与焊接用夹具	52
一、	概述	52
二、	支承件及其使用	57
三、	定位器及其使用	62
四、	夹紧器及其使用	69
第二节	合理选择焊接方法与焊接规范	83
第三节	选择合理的装配焊接顺序	86
一、	装配的原理	86
二、	装配方法	88
三、	结构的装焊过程	90
四、	装配焊接顺序	97
五、	合理的焊接方向	103
第四章	反变形法	108
第一节	焊接变形的估算	110
一、	对接接头横向收缩变形的估算	110
二、	角焊缝的横向收缩量的估算	114
三、	纵向收缩变形的估算	115
四、	角变形的估算	119
五、	纵向弯曲变形的估算	123
第二节	操作实例与技巧	125
一、	工字梁盖板的塑性反变形	125
二、	锅炉集箱的弹性反变形	125
三、	炼钢炉炉柱的弹性反变形	127
第五章	其他控制焊接变形方法	129
第一节	刚性固定法	129
一、	固定在刚性平台上	129
二、	组合成更大的结构	130

三、利用焊接夹具	131
四、临时支撑或加强梁	133
第二节 预热法	135
第三节 散热法	137
第六章 典型构件的装配焊接	139
第一节 T形梁的装配焊接	139
第二节 工字梁的装配焊接	142
第三节 箱形梁的装配焊接	145
第四节 圆筒节的装配焊接	147
第五节 管道的装配与焊接	151
第六节 球罐的装配焊接	153
第七节 桁架的焊接	156
第八节 电动机底座的装配焊接	157
第七章 焊后残余变形的矫正	160
第一节 矫正变形的原理	160
第二节 机械矫正法	161
第三节 火焰加热矫正法	163
一、火焰加热矫正的方式	164
二、火焰加热矫正的温度	166
第四节 操作技巧与实例	169
一、波浪变形的火焰矫正	169
二、T形梁焊后变形的火焰矫正	172
三、翘曲变形的火焰矫正	173
四、圆筒体变形的矫正	174
五、钢管弯曲的火焰矫正	175
六、转炉风管焊接变形的矫正	176
七、钢板对接角变形的矫正	176
八、槽钢局部弯曲变形的矫正	177
第八章 焊后残余应力的防止与消除	178

第一节 残余应力的测定	178
一、应力释放法	179
二、磁性法	181
三、X射线衍射法	182
四、云纹法	183
五、脆性涂层法	183
六、硬度法	184
七、无损电测法	185
第二节 减小残余应力的设计措施	185
一、减少焊缝的数量及尺寸	185
二、避免焊缝过分集中	185
三、采用刚度较小的接头形式	186
四、避免应力集中	186
第三节 减小残余应力的工艺措施	187
一、选择合理的焊接顺序	187
二、保证焊缝自由收缩	189
三、开缓和槽减小应力	189
四、采用冷焊	190
五、预热法	191
六、加热“减应区”	191
七、敲击法	192
第四节 残余应力的消除	192
一、高温回火	192
二、局部加热低温回火	193
三、超载法	194
四、振动时效	195
参考文献	201

第一章 焊接应力、变形概述

焊接变形与应力往往使焊接产品质量下降，或使下一道工序无法进行，而校正变形有时要消耗数倍于焊接的时间和物资，个别情况下甚至因无法补救而不得不报废。因此要焊接好一个焊接结构，必须从结构的整体考虑，而不应局限于一条焊缝。焊接裂纹的产生和焊接变形与应力也有密切的关系，必须较深入地分析焊接变形与应力的规律，例如分析焊接变形与应力的产生原因，在分析时必须掌握材料的物理、机械特性即产生变形与应力的内因，同时还必须了解焊接的热过程及构件刚性等外因。外因是通过内因起作用的，不这样分析，就不能对变形与应力有较深刻的认识，也就不能从实际情况中找出对付变形与应力的办法来。焊接变形在一般情况下是坏事，但是掌握了变形的机制和规律，就可以进行反变形，即可以利用变形来校正变形，利用变形来达到焊接结构的要求。

第一节 焊接热过程

在多数和主要的焊接方法中材料的加热是一个基本的条件。尤其是局部加热（熔化焊就是局部加热），除了为焊接创造重要的条件，也给焊接过程带来了许多问题。其中主要的有：

(1) 金属材料的局部加热熔化，熔池金属会与气体反应，改变了金属的化学成分，在冷却凝固时，得到不同的组织，这将使焊缝金属有可能产生缺陷或对焊缝金属的性能有很大的影响。

(2) 金属材料局部加热时，热影响区的组织和性能将发生变化，在多数情况下热影响区的性能都是不好的。

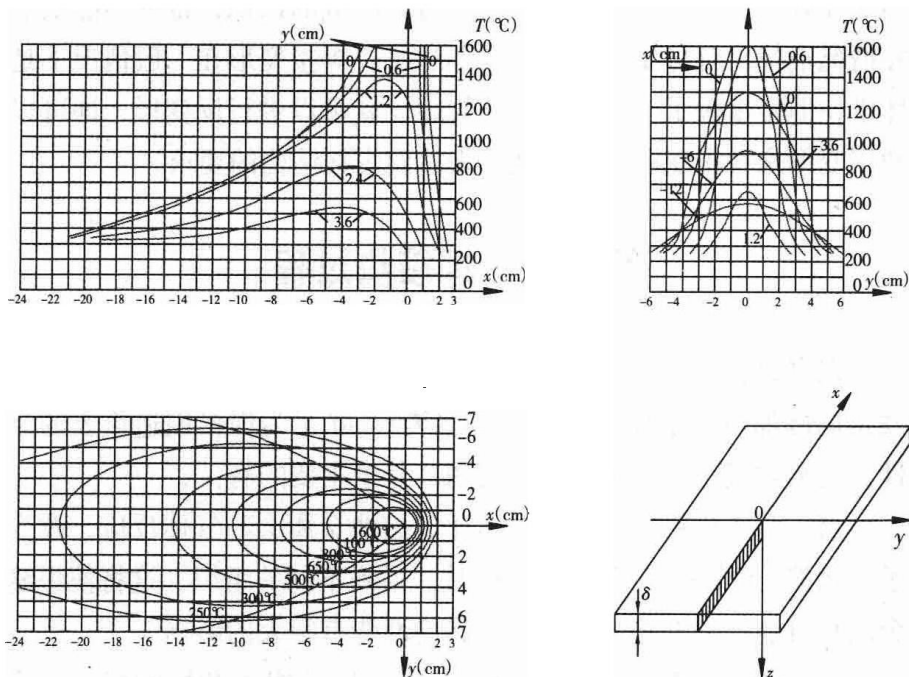
(3) 金属材料的局部加热和冷却过程，引起材料各区域不均匀的体积膨胀和收缩，使得结构中产生焊接变形与应力。

(4) 熔化焊的生产率取决于基本金属及焊条（或焊丝）的熔化效率，不同的加热方式影响着熔化焊的生产率。

因此为了解决焊接结构的质量和焊接生产率，我们就需要了解焊接时材料的加热和冷却过程。下面我们讨论熔化焊接时的热过程特点。

一、焊接温度场

金属材料受到热源加热时温度就会升高。焊接时一般为局部加热，热源又是移动的，因此离开热源不同距离的各点，其温度也是不同的。为了分析焊接时材料的受热和冷却，就需要有一个温度场的概念，所谓温度场（或称热场）就是指在某一瞬间，材料上各点温度的分布情况。温度场可用图形来表示，如图 1-1 所示。



二、影响焊接温度场的因素

影响焊接温度场的因素可归纳为以下几个主要方面。

1. 热源的影响

不同热源由于它们的热强度（单位时间内供给的热量）和热量分布不同，因而影响温度分布。电弧的热强度比气焊火焰的热强度大。所以在焊同一厚度的材料时，电弧焊的温度场就比气焊小。况且电弧热量分布较气体火焰热量集中，也就是受热作用的区域小，即焊接热影响区小。在一般情况下热影响区小对焊接接头的性能有利。因此热强度越大，热量分布越集中的热源（如电子束，等离子弧等）在焊接工艺中越有发展前途。

2. 基本金属热物理性能的影响

(1) 导热系数 (λ) ——表示材料传导热量的能力，不同材料的导热系数差距很大，如图 1-2 所示。同一材料的导热系数也随温度的变化而变化。

(2) 比热 (c) ——单位重量的材料温度升高 1°C 所需的热量。不同的材料其比热也不同，铝比热较大，碳钢比热较小，而铜介于二者之间，如图 1-3 所示。

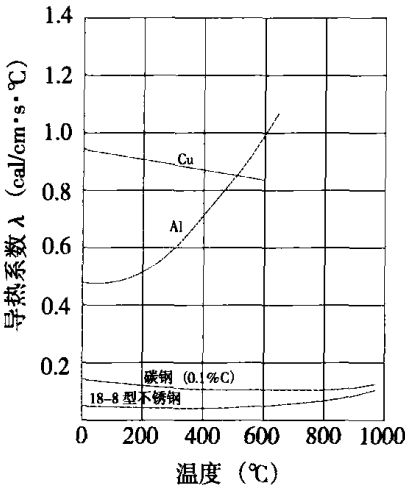


图 1-2 四种金属的导热系数与温度的关系

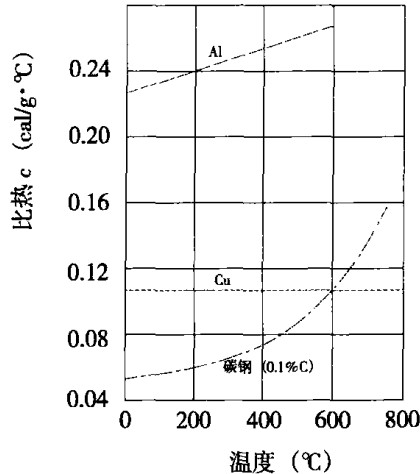


图 1-3 几种金属的比热与温度的关系

由于材料的热物理性质不同（主要是热导系数，比热），使温度场的分布相差很大。导热能力越差的材料其高温受热区域越大，也就是引起组织性能变化和变形的热影响区越大，往往由此而引起的问题越多越严重。但从另一角度讲，导热差的材料对热源的热利用率高，焊接熔化效率较高。

3. 焊接工艺参数的影响

焊接工艺参数中，以电弧率及焊接速度影响较大。

在板厚及焊接速度一定时，电弧功率大，受热达 600°C 的高温区域就增大。在电弧功率和板厚一定时，增大焊接速度，则 600°C 的高温区域就缩小。因此我们可适当调节焊接工艺参数，控制热影响区的大小。

4. 板厚的影响

材料厚度对温度场的分布影响也很大，厚度大导热快，厚度小导热慢。因此在相同的热源功率和工艺规范时，厚板的温度场分布范围较小，薄板的温度场分布范围较大。

5. 焊接接头形式的影响

不同的接头形式，热的传导情况不同，如图 1-4 所示，热传导最容易的接头其热场分布范围最小（热传导的易难相当于材料导热能力的大小）。

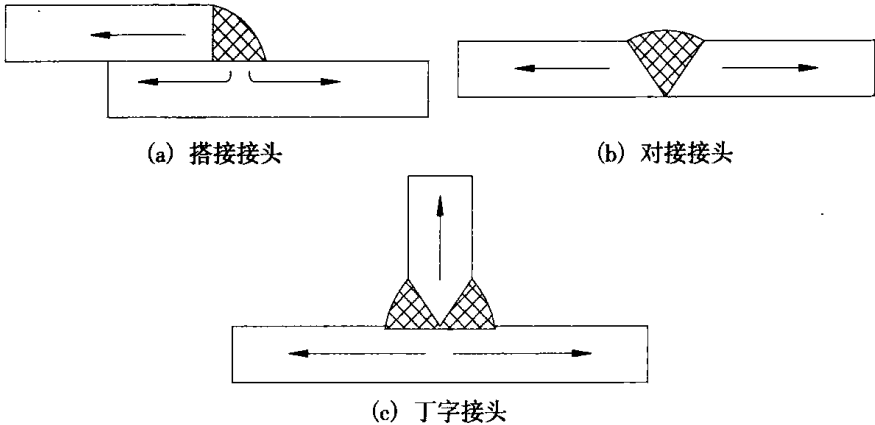


图 1-4 焊接接头时散热的方向

三、焊接热循环的概念

焊接温度场是指焊接热源对材料加热时，某一瞬时材料上各点温度的分布情况，从焊接温度场可以了解到受热区域的大小，以及不同部位上达到的温度是不一样的。但是焊接时焊接热源是在移动的，因此对材料上某一固定点来说，该点受到的热作用是变化的。当热源的热还没有传导来时，该点的温度与周围温度相同，随着热的传来使温度升高，在热源移动过去后，温度又下降。因此对焊接热影响区内任一点来说，它在整个热源作用时间内，温度由低到高，再由高到低的整个变化过程称为这一点的热循环，如图 1-5 所示。

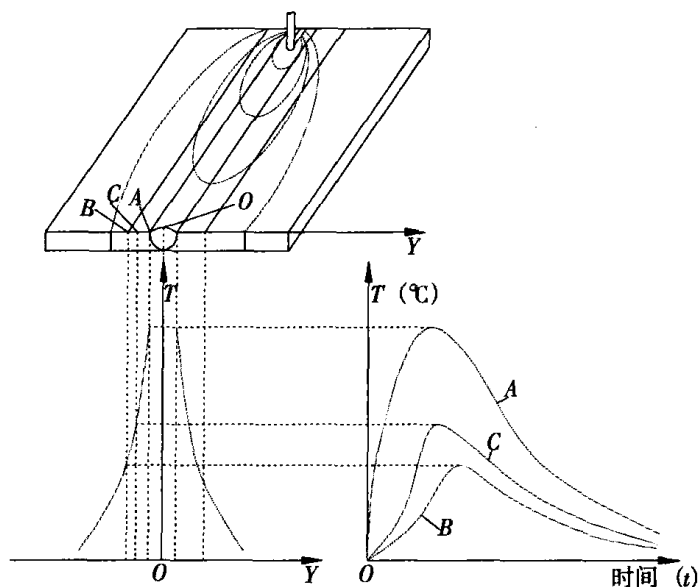


图 1-5 焊接热循环曲线

热影响区内材料受到的热循环相当于受到一次“焊接热处理”，使材料的组织、性能发生变化。在一定的焊接工艺规范条件下，热循环曲线具有一定的形状，在不能获得满意的焊接接头性能时，就要用改变热循环曲线的形状来保证焊接接头的性能要求。在一般情况下，主要通过以下途径来调节热循环曲线。

(1) 改变材料初始能量，即改变单位长度内加入到材料中的热量。

(2) 改变材料初始温度（预热）。

(3) 焊后加热或改变焊接层数。

第二节 焊接应力与变形产生的原因

一、焊接应力的一般概念

物体受外力作用就会在其中产生内力，其大小与外力相等，而方向相反。在单位面积上的内力称为应力。如果没有外力作用时物体内部也存在的应力称为内应力，例如铆接结构中，铆钉杆冷却时有缩短的趋向，但钢板阻止铆钉杆的收缩，因此在铆钉杆中形成拉伸应力，而在钢板中形成压缩应力，如图 1-6 所示。

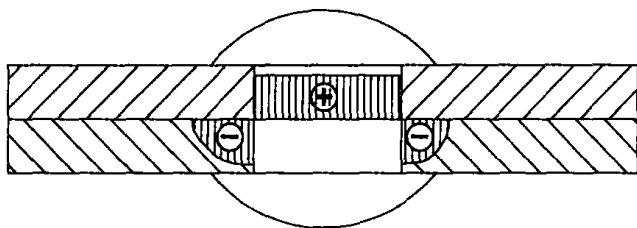


图 1-6 铆接结构中的应力分布

内应力的特点：内应力是在无外力作用下形成，因此应该形成相互平衡的力系，也就是说应当遵守静力学的平衡条件。例如在铆钉结构中，铆钉杆的拉伸应力和与钢板平面的压缩应力总和平衡。

焊接应力可按下列特征分布。

1. 根据内应力的发生和相互平衡所在的范围大小划分

(1) 第一类应力，它们具有一定的方向和数值，并在整个物体内部平衡，由和外力作用而产生的应力相似，亦称宏观应力。

(2) 第二类应力，它们在微小体积范围内（也就是在金属晶粒

间) 互相平衡。与物体的大小和形状无关, 因此也没有一定方向, 亦称微观应力。

对第一类应力的研究最详细, 这种应力首先对焊接和结构的形状有显著地影响。第二类应力主要和金属的组织变化有关, 近年来研究较多; 在合金钢的焊接时要充分估计到第二类应力的影响。

2. 根据引起应力的基本原因划分

(1) 热应力: 由于焊接时温度分布不均匀所引起的应力。

(2) 组织应力: 由于温度变化而引起组织变化所产生的应力。

3. 根据应力存在的时间划分

(1) 瞬时应力: 在一定的温度及刚性条件下, 某一瞬时内存在的应力。

(2) 残余应力: 通常指焊接结束和完全冷却后仍继续存在的内应力。

4. 根据应力作用的方向划分

(1) 纵向应力: 其方向平行于焊缝轴线。

(2) 横向应力: 其方向垂直于焊缝轴线。

5. 根据应力在空间的方向划分

(1) 单向应力: 在焊件中沿一个方向存在。

(2) 两向应力 (或称平面应力): 应力作用于—平面的不同方向上。

(3) 三向应力 (或称体积应力): 应力沿空间所有方向存在。

严格地说, 在焊件中的应力总是三向的, 但在一个或两个方向上的应力数值很小时, 内应力可假定为单向或两向的应力。

二、均匀加热时引起应力与变形的原因

为了便于了解焊接时应力与变形形成的基本原因, 首先对均匀加热产生的应力与变形进行讨论。

1. 不受外界条件约束（自由状态）的杆件在均匀加热时的应力与变形

不受外界条件约束的杆件在均匀加热和均匀冷却过程中，它的外部尺寸不断变化着，根据金属材料的物理性能（即热胀冷缩），其变化如表 1-1 及图 1-7（a）所示。

表 1-1 金属材料的热胀冷缩变化

	加热前	加热到 T 时	冷却后
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	T_0	$T=T_0+\Delta T$	T_0
长度 (mm)	l_0	$l_T=l_0(1+a\Delta T)$	$l_0'=l_0$

注：表中 a 为线膨胀系数。

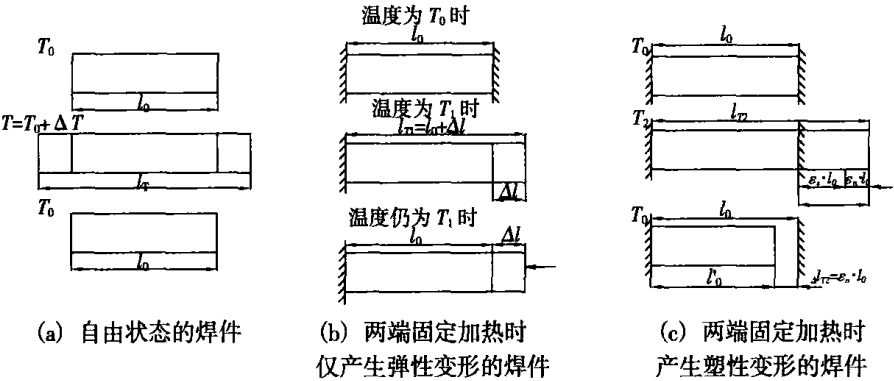


图 1-7 焊件在不同状态下的加热及冷却时的应力与变形

因此杆件在自由状态下均匀加热和均匀冷却，在杆件中不会发生任何内应力，也不会有任何残余应力及变形。

在焊接生产中，利用这个基本原理，以减小和消除焊接应力与变形，例如铸铁或铸钢件的焊接，在焊前将焊件均匀地加热到高温，并在焊后造成均匀冷却的条件，则在焊件中的应力与变形很小或接近于零，也就是说焊件与焊缝加热的均匀程度越高，则焊件中的残余应力与变形越小。

2. 杆件在均匀加热时不能自由膨胀的应力与变形

假设杆件两端被阻于两壁之间，限制了它在加热时的延长，而允许在冷却时自由地缩短，如图 1-7（b）所示，同时假定：