焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论

汪建华， 陆 皓
（上海交通大学，上海 200030）

摘 要：针对目前存在的一些对焊接残余应力形成机制和消除原理传统理论的质疑和不同观点，采用两端拘束杆件和长板条焊接的一维简化模型，分析比较了经受加热与冷却热循环以及直接从高温冷却下来时的应变历史和残余应力产生的机制。结果表明，前者存在残余压缩塑性应变，后者存在残余热收缩应变。两者对产生残余应力的作用完全是等价的。为了统一概念，建议引入固有应变理论。固有应变包括焊接过程中产生的塑性应变、热应变和相变应变。残余应力是在固有应变源作用下构件自动平衡的结果，消除焊接残余应力必须去除固有应变源。此外对若干容易混淆的问题进行了讨论。

关键词：焊接；残余应力；塑性应变；热应变；固有应变
中图分类号：TG404 文献标识码：A 文章编号：0253－360X(2002)03－75－05

汪建华

0 序 言

焊接应力和变形，多年来各国学者和专家对此都进行了大量研究。早期，如苏联的 H.O. 奥凯尔布朗姆[1]和 C.A 库兹米诺夫[2]的著作里就提出了一维条件下的残余塑变理论。即认为焊接加热过程中焊缝和近缝区的金属热膨胀应变受到周围较冷金属的拘束，从而产生压缩塑性应变。焊接冷却过程中该压缩塑性应变被拉伸抵消一部分，但焊后仍残留部分压缩塑性应变，称为残余压缩塑性应变。并用来分析和预测焊接残余应力和变形。

上述一维条件下的残余塑变理论假定焊缝处一直就是原来工件的一部分，经历了加热和冷却的全过程。就像无填充焊丝的 TIG 热源在薄板表面走一道焊缝一样。然而大多数的情况是焊缝处原来有坡口和间隙，焊接时被熔化的金属所填充。因而焊缝可以说是直接从高温冷却下来的。这样焊缝处从高温冷却下来受到周围的拘束只会产生拉伸塑性应变，焊后也不可能有什么残余压缩塑性应变。于是对上述残余塑变理论产生了质疑[3]，为此对该问题进行分析与讨论。结果表明，焊缝直接从高温冷却下来时，焊后在焊缝处虽然没有压缩塑性应变，但存在着残余热收缩应变，该应变与经历了加热和冷却全过程焊缝处存在的残余塑性应变是等价的。因此一维条件下的残余塑变理论仍然可以用来分析有坡口填充焊缝工件焊接时的残余应力与变形。为了避免混淆，建议引入国外的“固有应变”概念，这样可以完全统一起来。

收稿日期：2001－11－13

1 一维条件下的热弹塑性分析

1.1 两端拘束的杆件均匀加热和冷却过程

设有两端拘束的单位长度的杆件，分析加热和冷却过程中的应变情况。这里再分三种拘束情况进行讨论。

1.1.1 膨胀受刚性拘束但可自由收缩

比较单位长度的杆件经受如下两种热循环后的情况：(1)0 →T_m→0；(2)T_m→0。

情况(1)是从 0 ℃加热到温度 T_m，再冷却到 0 ℃。其中 T_m 超过材料的弹性丧失温度，在该温度下弹性应变可以忽略不计。如图 1a 所示，在加热 0 →T_m 过程结束后，若线膨胀系数为 α，则杆件受热膨胀产生热膨胀应变 αT_m。然而由于膨胀受到刚性拘束，杆件长度保持不变，总的应变 ε 为零。杆件内引起了压缩塑性应变 ε_{PC}。即

$$\varepsilon = \alpha T_m + \varepsilon_{PC} = 0 , \quad (1)$$

$$\varepsilon_{PC} = -\alpha T_m 。 \quad (2)$$

当杆件再从 T_m 冷却到0 ℃时，将有一个热收缩应变－αT_m。从整个0 →T_m→0 过程来分析，由于可自由收缩，最终杆件将缩短，残留一个压缩塑性应变 ε_{PC}。即

$$\varepsilon = \alpha T_m + \varepsilon_{PC} - \alpha T_m = \varepsilon_{PC}。 \quad (3)$$

情况(2)是假设杆件直接从 T_m 冷却到0 ℃时，

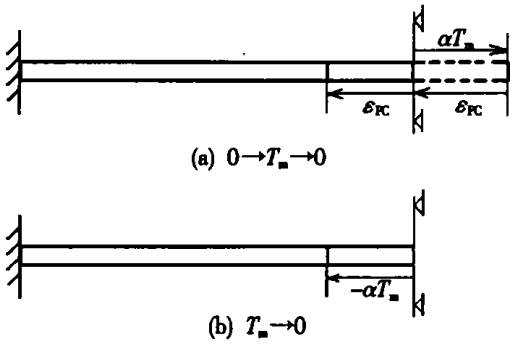

图 1 膨胀受刚性拘束但可自由收缩杆件的应变

Fig. 1 Strains of a bar which is constrained for expansion but can be shrunken freely

没有加热过程(可认为是在其它地方加热到 T_m 温度后再放到该系统中)。那么如图 1b 所示, 很显然由于可自由收缩, 最终冷却后杆件将缩短, 残留一个热收缩应变 $-\alpha T_m$。即

$$\varepsilon = -\alpha T_m \quad 。 \tag{4}$$

比较(1)、(2)两种情况以及式(3)和式(4), 杆件在冷却后均有收缩。前者可认为是压缩塑性应变 ε_{PC}, 后者是热收缩应变 $-\alpha T_m$。但从式(2)可知, 两者是等价的。此时杆件内的应力为零。

1.1.2 膨胀与收缩均受刚性拘束

在杆件两端绝对刚性约束条件下, 先分析(1)$0 \rightarrow T_m \rightarrow 0$ 热循环下的应变情况。如图 2a 所示, 在加热 $0 \rightarrow T_m$ 过程结束后, 杆件内引起了压缩塑性应变($\varepsilon_{PC} = -\alpha T_m$)。当杆件再从 T_m 冷却到 0 ℃时, 将有一个热收缩应变 $-\alpha T_m$。但由于刚性约束, 不能收缩。从整个 $0 \rightarrow T_m \rightarrow 0$ 过程来分析, 由于刚性拘束, 最终杆件长度不变, 即

$$\varepsilon = \alpha T_m + \varepsilon_{PC} - \alpha T_m + \varepsilon_{PT} + \varepsilon_e = 0 \ , \tag{5}$$

式中: 前两项是加热过程中产生的, 后三项是冷却过程中产生的。冷却到室温时, 材料弹性回复。此时 ε_{PT} 是冷却过程中产生的拉伸塑性应变, ε_e 是弹性应变, 其值达到室温时屈服应变。由式(5)可得

$$\varepsilon_e = -(\varepsilon_{PC} + \varepsilon_{PT}) = -\varepsilon_{RP}, \tag{6}$$

式中: $\varepsilon_{RP} = \varepsilon_{PC} + \varepsilon_{PT}$ 即残余压缩塑性应变(ε_{PC} 是负值, 其绝对值大于 ε_{PT}, 所以 ε_{RP} 也是负值)。因此在经过 $0 \rightarrow T_m \rightarrow 0$ 热循环后, 杆件内存在残余压缩塑性应变 ε_{RP}, 由于受拘束不能自由收缩, 引起拉伸弹性应变 ε_e, 也即在棒内产生拉伸应力($\sigma = E\varepsilon_e$, E 为室温时弹性模量)。此时残余变形为零。

下面分析(2) $T_m \rightarrow 0$ 的情况(图 2b)。杆件从 T_m 冷却到 0 ℃时, 由于刚性拘束, 最终杆件长度不变, 即

$$\varepsilon = -\alpha T_m + \varepsilon_{PT} + \varepsilon_e = 0 \ , \tag{7}$$

$$\varepsilon_e = -(-\alpha T_m + \varepsilon_{PT}) = -\varepsilon_{RT}。 \tag{8}$$

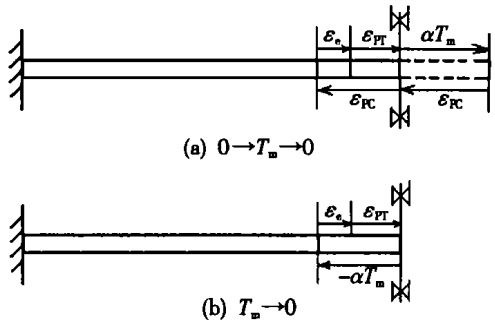

图 2 膨胀与收缩均受刚性拘束杆件的应变

Fig. 2 Strains of a bar which is constrained for both expansion and shrinkage

比较(1)、(2)两种情况以及式(6)、(8), 杆件在冷却后无残余变形但均产生拉伸弹性应变, 即产生拉伸应力。前者可认为是残余压缩塑性应变 ε_{RP} 引起, 后者是由 ε_{RT}, 即热收缩应变($-\alpha T_m$)被拉伸塑性应变 ε_{PT} 抵消后的残余部分引起的, 可称之为残余热收缩应变。比较式(8)、(6), 残余热收缩应变和残余压缩塑性应变数值和符号都相等, 因而是等价的。

1.1.3 膨胀与收缩均受弹性拘束

假设杆件两端并非绝对刚性而是有一定弹性的拘束, 那么杆件在加热和冷却过程中都有一定的位移。设加热到温度 T_m 后以及冷却后杆件的单位位移分别为 Δ_H 和 Δ_C。先分析(1) $0 \rightarrow T_m \rightarrow 0$ 热循环下的应变情况。如图 3a 所示, 在加热 $0 \rightarrow T_m$ 过程结束后, 杆件有一个伸长的单位位移 Δ_H, 即

$$\varepsilon = \alpha T_m + \varepsilon_{PC} = \Delta_H \quad 。 \tag{9}$$

因此杆件内引起了压缩塑性应变为

$$\varepsilon_{PC} = -\alpha T_m + \Delta_H \quad 。 \tag{10}$$

当杆件再从 T_m 冷却到 0 ℃时, 将有一个热收缩应变 $-\alpha T_m$。从整个 $0 \rightarrow T_m \rightarrow 0$ 过程来分析, 由于是弹性约束, 杆件有一个缩短的单位位移 Δ_C(负值), 于是有

$$\varepsilon = \alpha T_m + \varepsilon_{PC} - \alpha T_m + \varepsilon_{PT} + \varepsilon_e = \Delta_C, \tag{11}$$

式中: 前两项是加热过程中产生的, 后三项是冷却过程中产生的。冷却到室温时, 材料弹性回复。此时 ε_{PT} 是冷却过程中产生的拉伸塑性应变, ε_e 是弹性应变, 其值达到室温时屈服应变。由式(11)可得

$$\varepsilon_e = \Delta_C - (\varepsilon_{PC} + \varepsilon_{PT}) = \Delta_C - \varepsilon_{RP}, \tag{12}$$

式中: $\varepsilon_{RP} = \varepsilon_{PC} + \varepsilon_{PT}$ 即残余压缩塑性应变。由图 3a 和式(12)可以看出, 当杆件存在残余变形(单位位移 Δ_C)时, 残余压缩塑性应变的绝对值总是要超过弹性应变绝对值, 因为

$$|\varepsilon_{RP}| = |\varepsilon_e| + |\Delta_C| \quad 。 \tag{13}$$

下面再分析(2) $T_m \rightarrow 0$ 的情况(图 3b)。杆件从

T_m 冷却到 0 ℃时，将有一个热收缩应变 $-\alpha T_m$。由于弹性拘束，最终杆件长度有一定缩短（单位位移 Δ_C），即

$$\varepsilon = -\alpha T_m + \varepsilon_{PT} + \varepsilon_e = \Delta_C, \qquad (14)$$

$$\varepsilon_e = \Delta_C - (-\alpha T_m + \varepsilon_{PT}) = \Delta_C - \varepsilon_{RT}。 \qquad (15)$$

比较(1)、(2)两种情况以及式(12)和式(15)，杆件在冷却后存在一定缩短，且均产生拉伸弹性应变，即产生拉伸应力。前者可认为是残余压缩塑性应变 ε_{RP} 引起，后者是由残余热收缩应变 ε_{RT} 引起的。比较式(12)和式(15)可看出，若两种情况下杆件的弹性拘束相同，残余热收缩应变和残余压缩塑性应变基本上也是等价的。

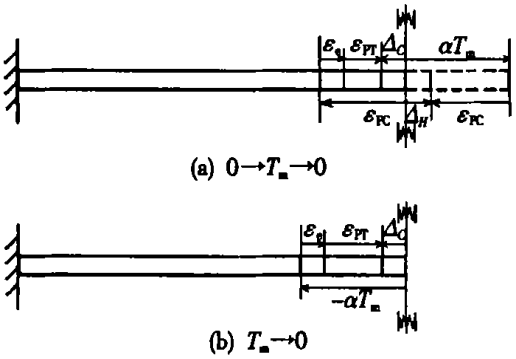

图 3　膨胀与收缩均受弹性拘束杆件的应变

Fig. 3　Strains of a bar which is elastically constrained for both expansion and shrinkage

1.2　长板条中间焊接时的加热和冷却过程

下面分析一个金属长板条中间焊接时的加热和冷却过程。温度曲线假定为截面内焊接时能达到的最高温度曲线，并认为平截面假设成立。在此基础上从板条中切出一单位长度来进行分析。

如图 4 所示，板条端面 A_0A_0 加热时膨胀平移到 A_1A_1，即有一个伸长的单位位移 $A_0A_1 = \Delta_H$。内应力在整个 A_0A_0 截面上平衡。也就是 A_1A_1 截面位置根据内应力平衡条件决定。由此可见，在加热过程中近缝区温度超过弹性丧失温度以及热膨胀应变超过屈服应变的部分都将产生压缩塑性应变。

在板条冷却过程中，这些压缩塑性应变将保留下来。假如把焊件看成无数互不相连的纤维组成，则冷却后焊件的端面将形成凹面 $A_0B_0EFHFEB_0A_0$。B_0B_0 区域内称压缩塑性应变区，由于在焊接过程中受到压缩，产生不同程度的塑性应变。然而由于焊件具有整体性，根据平截面假定，其冷却后的实际残余变形线为 A_2A_2，即有一个缩短的单位位移 $A_0A_2 = \Delta_C$，因此出现了内应力。焊缝及其附近出现达到屈服的拉应力，两侧出现压应力。可以看到，在此过程中压缩塑性应变又被因屈服而产生的拉伸塑性应变 ε_{PT} 抵消许多。最终完全冷却后板条中存在的是残余压缩塑性应变，即图 4 中的 B_0KKB_0 部分。同样，可以发现残余压缩塑性应变的量总是要超过屈服应变的量（相差一个 Δ_C）。

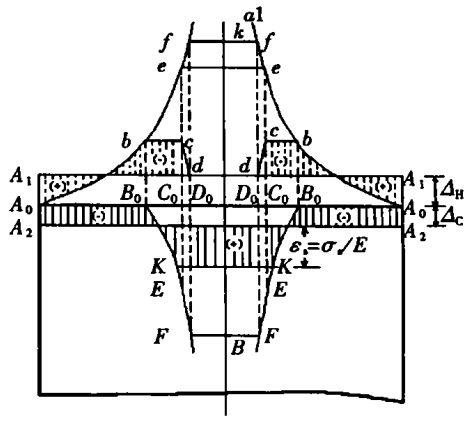

图 4　长板条焊接时的应力应变

Fig. 4　Stress and strain of a long welded plate

从分析看，焊缝的情况与上节讨论的膨胀与收缩均受弹性拘束的杆件完全相似。若假定焊缝本身经受加热过程，那么焊缝处与近缝区母材温度超过弹性丧失温度的区域可同样分析，完全冷却后焊缝处存在残余压缩塑性应变。若假定焊缝是填充金属直接从高温冷却下来，则由于热收缩应变被冷却过程中的拉伸塑性应变抵消一部分，完全冷却后焊缝处存在残余热收缩应变。根据前面的分析，实际上残余压缩塑性应变和残余热收缩应变两者是等价的。因此上述图形仍然可用于填充金属焊接工件的分析。这也就是为什么无坡口焊缝工件与有坡口填充焊缝工件焊接时残余应力与变形产生的结果完全类似的原因。

2　关于固有应变的概念

所谓固有应变可以看成是内应力的产生源[4]。若将物体处于既无外力也无内力的状态看作为基准状态，固有应变 ε^* 就是表征从应力状态切离后处于自由状态时，与基准状态相比所发生的应变，它等于总的变形应变 ε 减去弹性应变 ε_e，即

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \varepsilon_e 。 \qquad (16)$$

在焊接过程中，固有应变将是塑性应变 ε_P、热应变 ε_T 和相变应变 ε_X 三者之和，即

$$\varepsilon^* = \varepsilon_P + \varepsilon_T + \varepsilon_X 。 \qquad (17)$$

焊接结束以后固有应变就是塑性应变、热应变和相变应变三者残余量之和。当焊接低碳钢等材料不考虑相变对应力变形的影响时，固有应变就是残余的热应变和塑性应变之和。前面的分析已知，若假定无坡口焊缝本身经受加热过程，由于加热和冷却的热应变抵消为零，那么完全冷却后焊缝处存在残余压缩塑性应变。若假定焊缝是填充金属直接从高温冷却下来，则完全冷却后焊缝处存在残余热收缩应变。残余压缩塑性应变和残余热收缩应变都是固有应变，这样把概念完全统一了起来。

固有应变存在于焊缝及其附近，固有应变的大小和分布就决定了最终的残余应力和变形。因此应用固有应变理论来研究和预测焊接变形与残余应力[5]，目前在国内外都取得了不少进展，并具有较广阔的应用前景。

3 若干问题的讨论

3.1 关于传统的压缩塑性变形观点

“既然焊缝中不存在压缩塑性应变，那么焊接残余应力的形成机制与消除原理都得重新评价。”这种误解可能导致新的概念混淆，有必要加以澄清。

如前所述，若假定焊缝本身经受加热和冷却过程，完全冷却后焊缝处存在残余压缩塑性应变。若假定焊缝是填充金属直接从高温冷却下来，则完全冷却后焊缝处存在残余热收缩应变，该应变与残余压缩塑性应变是等价的，起着相同的作用。因此传统的一维条件下的残余塑变理论同样可以用于填充焊缝焊件的分析。当然，最好引入固有应变概念，这样可以完全统一起来，避免误解。

3.2 关于焊接残余应力消除原理

文献[3]认为：“焊接时焊缝不存在压缩塑性变形，消除焊接残余应力的原理不是设法产生拉伸塑性变形来抵消、补偿焊缝产生的压缩塑性变形，而是产生塑性应变抵消弹性应变。在一般情况下，焊缝和近缝区产生拉伸塑性应变，抵消此处的拉伸弹性应变，从而减少焊缝及近缝区残余拉应力。”又称：“所有消除残余应力的过程都是将弹性应变转变为塑性应变的过程。”作者认为，上述用拉伸塑性应变抵消拉伸弹性应变的观点是不妥当和值得商榷的。首先，弹性应变和塑性应变是两类不同性质的应变。前者是可恢复的应变。后者是不可恢复的应变，在无外载的情况下，构件中不均匀分布的塑性应变是产生弹性应变的根源之一。两类不同性质应变量之间的抵消在逻辑上是不通的。其次，即使仅仅从数量观点来讨论上述问题，拉伸塑性应变抵消拉伸弹性应变的观点也是不准确的。先不谈拉伸抵消拉伸不符合逻辑，即使就绝对值来说，当拉伸塑性应变达到一个弹性屈服应变时，一般情况下也并不能完全消除残余应力。因为通常焊后残留固有应变量的绝对值要超过一个弹性屈服应变值。拉伸塑性应变达到一个弹性屈服应变时，仍有部分固有应变残留下来，构件重新平衡仍存在内应力，只是降低了很多。只有当拉伸塑性应变完全抵消收缩的残留固有应变量时，除去了残余应力的生成源，才能完全消除残余应力。下面举一个比较极端的例子来说明这一问题。

如图 5a 所示，设一个长板条截面中央占宽度一半的距离 B_0B_0 范围内，存在着数值为两倍屈服应变的压缩的固有应变（$-2\varepsilon_S$）。这样根据平截面假定和内应力平衡条件，截面 A_0A_0 将缩短移至 A_1A_1。板条中央为拉伸应力，两端为压缩应力它们都达到了屈服极限。现在来分析用加载拉伸法消除该板条的残余应力。如图 5b 所示，当板条加载拉伸一个屈服应变时（A_1A_1 移到 A_0A_0），板条中央因已达拉伸屈服，应力不再增加，从而产生一个拉伸屈服应变。而板条两端原来是一个压缩屈服应变，拉伸后，应变为零，应力也为零。也就是加载拉伸一个屈服应变后，中央为拉伸屈服应力，两端应力为零。中央产生一个拉伸屈服应变使该处存在的压缩固有应变值减少了一半，但仍残留一个屈服应变的压缩固有应变（$-\varepsilon_S$）。因此板条在卸载以后，如图 5c 所示，内应力重新平衡，截面 A_0A_0 将移动。板条中央为拉伸应力，两端为压缩应力。它们的数值均为屈服极限的一半。现在假定板条加载拉伸两个屈服应变（A_1A_1 移到 A_3A_3，如图 5d 所示）时，同样板条中央因已达拉伸屈服，应力不再增加，从而产生两个拉伸屈服应变。而板条两端原来是一个压缩屈服应变，拉伸后，变成一个拉伸屈服应变。也就是加载拉伸两个屈服应变后，中央和两端都达到拉伸屈服应力。中央产生的两个拉伸屈服应变完全抵消了该处存在的压缩固有应变。因此板条在卸载以后，如图 5e 所示，截面 A_3A_3 将恢复至 A_0A_0。内应力重新平衡后也完全消除，因为此时已没有任何引起内应力的固有应变源。从本例分析可知，拉伸塑性应变需要两个屈服应变时才能完全消除残余应力。当然本例是一个极端情况，一般情况下，焊缝和近缝区的压缩固有应变量在一到两个屈服应变之间，它与该处截面的单位位移 Δ_C（又称变形应变）有关，见式(13)。

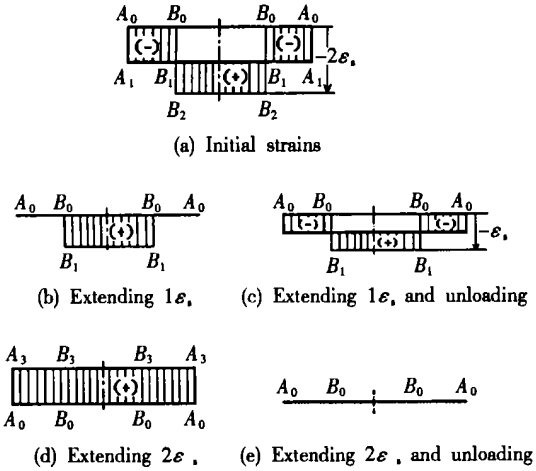

图 5　加载拉伸消除残余应力

Fig. 5　Relieving welding residual stress by extension

从上面分析可以充分说明，消除焊接残余应力必须去除产生残余应力的固有应变源。机械拉伸法、温差拉伸法、滚压法以及高温消除应力处理等方法，其原理都是设法消除和减少产生残余应力的固有应变源，从而消除和减少残余应力。

3.3　焊件纵向变短的原因和液化裂纹形成机制

由于残余塑性应变和残余热应变在焊件纵向都是收缩的，这也就是焊接以后焊件纵向变短的原因。文献[3] 中有关焊件纵向变短原因的叙述认为："焊件变短主要是由于金属局部熔化随后凝固收缩造成的。"这个说法也是值得商榷的。事实上，熔池凝固大约 3%的收缩，甚至材料在弹性丧失温度以上冷却时的收缩对最终的残余应力和变形影响是不大的。因为此时材料处于热塑性状态，热收缩应变受到周围较冷金属的约束被拉伸塑性应变所抵消。文献作者忽略了一个最重要的因素，也就是焊缝金属从高温，特别从弹性丧失温度冷却至室温时的热收缩应变($-\alpha T_m$)，正是该应变起着与压缩塑性应变同样的作用。可以说一系列质疑都是由此而引起的。

此外在近缝区包括熔合区，焊接时材料经受了加热和冷却的全过程。在加热过程中产生了压缩塑性应变，而在高温冷却下来时，这时产生的是拉伸塑性应变，也是熔合线处产生液化裂纹等热裂纹的原因之一，它与加热过程中产生的是压缩塑性应变无关。拉伸与压缩塑性应变是在不同时刻发生的，并不矛盾。

4　结　　论

（1）采用两端拘束杆件和长板条焊件的一维简化模型，分析比较了经受加热与冷却热循环以及直接从高温冷却下来时的应变历史。结果表明，前者存在残余压缩塑性应变，后者存在残余热收缩应变。两者对产生残余应力的作用完全是等价的。从而也表明传统的残余塑变理论仍然是合适的。

（2）在焊接过程中，固有应变为塑性应变、热应变和相变应变之和。在焊接以后固有应变则是它们残余量之和，包括残余压缩塑性应变和残余热收缩应变等。固有应变存在于焊缝与近缝区，是产生残余应力与应变的根源。

（3）残余应力是在固有应变源作用下构件自动平衡的结果。因此消除焊接残余应力必须去除该固有应变源。由于焊接过程中在焊缝与近缝区处形成的固有应变总是收缩的（不管是残余压缩塑性应变，还是残余热收缩应变）。因此利用拉伸塑性应变可以消除或减少该处的固有应变，从而使构件重新平衡后的残余应力得以消除或减少。

参考文献：

[1]　奥凯尔勃洛姆 H O. 焊接应力与变形[M] . 雷原译. 北京：中国工业出版社，1958.

[2]　库兹米偌夫 C A. 船体结构的焊接变形[M] . 北京：国防工业出版社，1978.

[3]　王者昌. 关于焊接残余应力消除原理的探讨[J] . 焊接学报，2000，21(2)：55 ~ 58.

[4]　Ueda Y，Kim Y C，Yuan M G. A prediction method of welding residual stress using source of residual stress (Report I) — Characte-ristics of inherent strain (source of residual stress)[J] . J Trans. Of JWRI，1989，18(1)：135 ~ 141.

[5]　汪建华，陆皓. 预测焊接变形的残余塑性应变有限元方法[J] . 上海交通大学学报，1997，31(4)：53 ~ 56.

作者简介：汪建华，男，1939 年 8 月出生，上海交通大学教授，博士生导师，中国焊接学会计算机应用技术专业委员副主任。主要从事焊接力学和计算机在焊接中的应用研究。在国内外已发表著作和学术论文 120 余篇。

Email：jhwang@mail. sjtu. edu. cn