

# 焊接时金属结构变形的 计 算

奥凯尔勃朗姆著



机械工业出版社

# 焊接时金属结构变形的计算

奥凯尔勃朗姆著

庄翠娟等译



机械工业出版社

## 出版者的話

本書敘述工程上計算制造各种焊接金屬結構及构筑物时产生变形的近似法。本書中以一系列例題說明采用計算方法来确定在規定焊接次序下的变形值，及来选择复杂結構装配与焊接的最合理的工艺过程。

本書供工厂及設計局的工程技術人員閱讀。

苏联 Н.О.Окерблом 著 ‘Расчет деформаций металлоконструкций при сварке’ (Машигиз 1955 年第一版)

№2016

---

1959年3月第一版      1959年3月第一版第一次印刷

850 × 1168  $\frac{1}{32}$  字数 184 千字    印張 7  $\frac{1}{16}$     0,001—4,400册

机械工业出版社 (北京阜成門外百万庄) 出版

北京五三五工厂印刷    新华書店發行

---

北京市書刊出版业營業許可証出字第 008 号    定价 (11) 1.35 元

# 目 次

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 序言 .....                                     | 5   |
| 第一章 結構焊接时产生的变形及其計算 .....                     | 7   |
| 1. 焊接时产生的变形值及其計算方法 .....                     | 7   |
| 2. 焊接时产生的变形种类 .....                          | 10  |
| 3. 现有的計算焊接变形的近似法 .....                       | 12  |
| 4. 計算整个結構焊接时所产生变形的一般方法 .....                 | 14  |
| 第二章 計算焊接变形工程方法的理論基础 .....                    | 18  |
| 5. 焊接时温度的分布 .....                            | 18  |
| 6. 理論上确定不均匀加热时变形的一般方法 .....                  | 28  |
| 7. 計算加热及接着冷却时所产生的变形 .....                    | 32  |
| 8. 計算焊接时的残余縱向变形 .....                        | 38  |
| 9. 計算焊接时所产生变形的簡化方法 .....                     | 45  |
| 第三章 計算型截面构件的整体变形 .....                       | 53  |
| 10. 計算由縱向焊縫所引起的撓度及縱向变形 .....                 | 53  |
| 11. 确定簡單截面的几何特性 .....                        | 58  |
| 12. 計算由几条縱向焊縫所产生的变形 .....                    | 64  |
| 13. 当焊縫靠近时, 塑性变形区域部分遮住<br>对于最終变形的影响 .....    | 71  |
| 14. 縱向焊縫多層性及断續性的影响 .....                     | 79  |
| 15. 計算橫向焊縫所产生的縱向变形 .....                     | 83  |
| 16. 橫向焊縫所引起变形的特殊情况 .....                     | 89  |
| 第四章 計算局部变形 .....                             | 100 |
| 17. 引起局部变形的原因及其計算的理論前提 .....                 | 100 |
| 18. 在堆焊焊波时, 熔化区域的形状和深度与角变形<br>及橫向收縮的关系 ..... | 106 |
| 19. 計算堆焊焊波及对接焊縫时角变形的近似方法 .....               | 112 |
| 20. 計算堆焊焊波及对接焊时橫向收縮的近似方法 .....               | 121 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 21. 計算用單面角焊縫將翼板焊在丁字形及<br>工字形截面的腹板上時翼板的變形·····  | 124 |
| 22. 計算用雙面角焊縫將翼板焊在丁字形截面構件的<br>腹板上時翼板所產生的變形····· | 128 |
| 23. 計算板結構中的局部變形·····                           | 135 |
| 24. 計算焊接時薄板結構中的局部變形·····                       | 144 |
| <b>第五章 計算結構製造時所產生變形的例題</b> ·····               | 151 |
| 25. 計算製造焊接結構構件時的變形·····                        | 151 |
| 26. 計算梁架結構焊接時所產生的變形·····                       | 160 |
| 27. 計算焊接水力發電機定子外殼時所產生的變形·····                  | 168 |
| 28. 計算蒸汽過熱器汽室上焊了連接管後的變形·····                   | 176 |
| 29. 計算薄板結構的局部變形·····                           | 179 |
| <b>第六章 防止結構焊接時產生變形的措施</b> ·····                | 192 |
| 30. 結構裝配及焊接的次序對於整體變形的影響·····                   | 192 |
| 31. 裝配時零件的固定方法對於由焊接引起的<br>最終變形值的影響·····        | 196 |
| 32. 計算外力作用在焊接結構上後所產生的殘余變形·····                 | 201 |
| 33. 計算固定及反彎曲對於焊接構件整體變形的影響·····                 | 205 |
| 34. 固定對於局部變形值的影響·····                          | 209 |
| 35. 計算防止角變形所需的反彎曲值·····                        | 214 |
| <b>第七章 選擇結構裝配與焊接的合理工藝過程</b> ·····              | 221 |
| 36. 梁架結構裝配與焊接次序的方案·····                        | 221 |
| 37. 採用專門措施防止扭歪的方案及選擇梁架結構製造<br>工藝過程的最終方案·····   | 227 |

# 焊接时金属结构变形的计算

奥凯尔勃朗姆著

庄翠婷等译



机械工业出版社

## 出版者的話

本書敘述工程上計算制造各种焊接金屬結構及构筑物时产生变形的近似法。本書中以一系列例題說明采用計算方法来确定在規定焊接次序下的变形值，及来选择复杂結構装配与焊接的最合理的工艺过程。

本書供工厂及設計局的工程技術人員閱讀。

苏联 Н.О.Окерблом 著 ‘Расчет деформаций металлоконструкций при сварке’ (Машигиз 1955 年第一版)

№2016

---

1959年3月第一版      1959年3月第一版第一次印刷

850 × 1168  $\frac{1}{32}$  字数 184 千字    印張 7  $\frac{1}{16}$     0,001—4,400册

机械工业出版社 (北京阜成門外百万庄) 出版

北京五三五工厂印刷    新华書店發行

---

北京市書刊出版业營業許可証出字第 008 号    定价 (11) 1.35元

# 目 次

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 序言 .....                                     | 5   |
| 第一章 結構焊接时产生的变形及其計算 .....                     | 7   |
| 1. 焊接时产生的变形值及其計算方法 .....                     | 7   |
| 2. 焊接时产生的变形种类 .....                          | 10  |
| 3. 现有的計算焊接变形的近似法 .....                       | 12  |
| 4. 計算整个結構焊接时所产生变形的一般方法 .....                 | 14  |
| 第二章 計算焊接变形工程方法的理論基础 .....                    | 18  |
| 5. 焊接时温度的分布 .....                            | 18  |
| 6. 理論上确定不均匀加热时变形的一般方法 .....                  | 28  |
| 7. 計算加热及接着冷却时所产生的变形 .....                    | 32  |
| 8. 計算焊接时的残余縱向变形 .....                        | 38  |
| 9. 計算焊接时所产生变形的簡化方法 .....                     | 45  |
| 第三章 計算型截面构件的整体变形 .....                       | 53  |
| 10. 計算由縱向焊縫所引起的撓度及縱向变形 .....                 | 53  |
| 11. 确定簡單截面的几何特性 .....                        | 58  |
| 12. 計算由几条縱向焊縫所产生的变形 .....                    | 64  |
| 13. 当焊縫靠近时, 塑性变形区域部分遮住<br>对于最終变形的影响 .....    | 71  |
| 14. 縱向焊縫多層性及断續性的影响 .....                     | 79  |
| 15. 計算橫向焊縫所产生的縱向变形 .....                     | 83  |
| 16. 橫向焊縫所引起变形的特殊情况 .....                     | 89  |
| 第四章 計算局部变形 .....                             | 100 |
| 17. 引起局部变形的原因及其計算的理論前提 .....                 | 100 |
| 18. 在堆焊焊接时, 熔化区域的形状和深度与角变形<br>及橫向收縮的关系 ..... | 106 |
| 19. 計算堆焊焊波及对接焊縫时角变形的近似方法 .....               | 112 |
| 20. 計算堆焊焊波及对接焊时橫向收縮的近似方法 .....               | 121 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 21. 計算用單面角焊縫將翼板焊在丁字形及<br>工字形截面的腹板上時翼板的變形·····  | 124 |
| 22. 計算用雙面角焊縫將翼板焊在丁字形截面構件的<br>腹板上時翼板所產生的變形····· | 128 |
| 23. 計算板結構中的局部變形·····                           | 135 |
| 24. 計算焊接時薄板結構中的局部變形·····                       | 144 |
| <b>第五章 計算結構製造時所產生變形的例題</b> ·····               | 151 |
| 25. 計算製造焊接結構構件時的變形·····                        | 151 |
| 26. 計算梁架結構焊接時所產生的變形·····                       | 160 |
| 27. 計算焊接水力發電機定子外殼時所產生的變形·····                  | 168 |
| 28. 計算蒸汽過熱器汽室上焊了連接管後的變形·····                   | 176 |
| 29. 計算薄板結構的局部變形·····                           | 179 |
| <b>第六章 防止結構焊接時產生變形的措施</b> ·····                | 192 |
| 30. 結構裝配及焊接的次序對於整體變形的影響·····                   | 192 |
| 31. 裝配時零件的固定方法對於由焊接引起的<br>最終變形值的影響·····        | 196 |
| 32. 計算外力作用在焊接結構上後所產生的殘余變形·····                 | 201 |
| 33. 計算固定及反彎曲對於焊接構件整體變形的影響·····                 | 205 |
| 34. 固定對於局部變形值的影響·····                          | 209 |
| 35. 計算防止角變形所需的反彎曲值·····                        | 214 |
| <b>第七章 選擇結構裝配與焊接的合理工藝過程</b> ·····              | 221 |
| 36. 梁架結構裝配與焊接次序的方案·····                        | 221 |
| 37. 採用專門措施防止扭歪的方案及選擇梁架結構製造<br>工藝過程的最終方案·····   | 227 |

## 序 言

在制訂制造焊接結構的工艺过程时，主要的注意力應該集中在保証結構获得与設計尺寸最小偏差的措施上。这个要求的先决条件就是要考虑到强度、制造結構的最大方便性及最小劳动量。同时，那种非生产性工序如修正、鏟割、調整等的劳动量應該导至最小，目前消耗在这方面的劳动量却常常不次于主要装配焊接的工作量。

如果，尚在設計装配及焊接的工艺过程时，就已經評定出結構在各种装配与焊接次序方案下的变形值，并已經選擇出使焊接和采用防止变形措施（反弯曲、固定等）后的总变形接近于零的那种方案，那末，才能使制造結構时焊接所产生的变形不至于在已制好的結構中引起形状歪曲及与設計尺寸的偏差。

因为焊接时所产生的变形值与許多工艺和构造上的因素有关，所以在評價任何一种工艺过程的方案时，祇有采用求焊接变形的計算方法，才能足够完整地考虑到这些因素。

目前，虽然有着焊接变形及应力的一般理論，使我們能够用理論的方法来求出变形的性質及其值，但是在实际生产中，变形的性質及其值仅仅凭推測与現有的經驗来評定。这說明，理論上确定焊接变形的的方法需要極其繁重的計算工作。因此，我們極需要那种工程上实用的計算焊接变形的的方法，因这种方法使車間及設計与工艺科室能够很快求出在采用各种焊接工艺及規範时所产生的变形值。

本書叙述工程上計算制造各种金屬結構及构筑物时产生焊接变形的近似法。本書中所叙述的計算方法乃是作者及在列宁格勒工业大学（Ленинградский Политехнический институт）、企业建筑部的中央科学研究院（ЦНИИ МСП）、桥梁科学研究所（НИИ Мостов）及某些其他的机构中在他领导下进行多次研究的結果。同时还計

及了在列宁格勒造船学院（Ленинградский Кораблестроительный институт）所进行的研究成果以及已發表的与本書有关問題的著作。

所介紹的計算方法是根据作者制訂的焊接变形与应力的一般理論作出的，几乎沒有包含經驗公式。这就有可能来改进、發展并簡化所提出的方法，因为初次提出的方法不可能是完善的。由于上述目的，所以在本書中載有理論的根据及計算公式的結論。

为了便于掌握所提出的計算方法，作者在本書中列有計算各工业部門的焊接結構变形的例題。

作者希望本書将使設計焊接結構制造工艺过程的計算方法不断改进并运用到实际生产中去，以便提高焊接結構的質量、减少劳动量与縮短制造期限。

技术科学博士 奧凱尔勃朗姆教授

# 第一章 結構焊接時產生的變形及其計算

## 焊接時產生的變形值及其計算方法

由於制件在焊接時的不均勻加熱，產生了局部殘余變形，以至使制件扭歪，也就是改變了原有的尺寸並使其具有與原先不同的形狀。

例如，在軋制的工字梁上焊上肋板（圖 1a）後，梁原來直的中心綫發生彎曲，產生了撓度  $f$  和一些收縮  $\Delta$ 。如果在焊接以前梁具有設計的尺寸，那末在焊接以後，梁的尺寸和形狀就將與設計有所偏差。

這種在焊接過程中所引起的與設計尺寸的偏差，使結構的全部製造過程更加複雜，而且在很多情況下，可能會降低制成結構的工作能力。

例如，圖 1a 中所示的梁是結構的某一單獨構件，而且以後還要放在三根其他的梁上（圖 1b），那末，為了使梁能夠擱在所有的三根梁上，就必須預先將它校直，也就是使它具有設計的直綫外形。然而在校直以後，梁並未恢復它原有的尺寸，因為彎曲雖然被校直了，但是焊接時形成的收縮可能沒有消除。假使梁的收縮按結構性能來講是不允許的話，那末，就祇得增加梁的長度，或者預先給梁的長度留出一些裕量，這種裕量在焊接後可以全部或部分消除。在後面一種情況中，當結構進行整體焊接時就不得不割去裕量的剩餘部分。如果要求將兩種尺寸不同的構件沿縱向板邊對接起來，則由於產生的變形不同而使情況更為複雜。為了保證所要求的對接間距就只好切割對接板邊，並用特殊的裝配夾具將兩焊邊固定在一个平面上，以消除焊接構件的整体變形及板邊的局部波形彎曲。所有這些工序均要求耗費大量的勞動和採用特殊的夾具，並延長了結構的製造期限。在某些工業部門里，對制件尺寸及形狀的精確度要求特別高，焊接時的變形使得

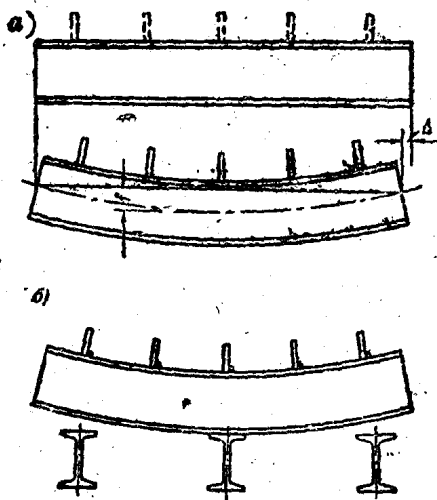


圖 1

那末当結構工作时，构件中就發生了在构件計算時不曾估計到的附加弯矩，因此，构件中的实际应力为

$$\sigma_1 = \frac{P}{F} \left( 1 + f \frac{F}{W} \right) = \sigma_{\text{pac}} \left( 1 + f \frac{F}{W} \right),$$

也就是增加到計算應力的  $\left( 1 + f \frac{F}{W} \right)$  倍。

組成构件計算截面各板材的局部波形弯曲，可能引起部分截面不能工作，而在构件中产生的应力大于計算的应力。例如，工字梁腹板按圖 2a 所示的方式对接时，由于腹板接头搭板的隆起就使該部分不能工作，而慣性矩降低 15~20%。同时，实际应力增加 18~25%。如果局部隆起發生在翼板中（圖 2b），那末，梁的受力截面就是長方形（腹板截面）代替了工字形，它的阻力力矩是全部梁計算阻力力矩的 15~20%。梁腹板中的应力相应地增加到 5~6.6 倍。

在某些情况中，由于合成构件的局部隆起，因而并非所有焊缝都参与受力，这样，就使个别焊缝大大地超应力。例如在采用端面焊缝的搭接接头中（圖 2r），由于焊接时产生变形（圖 2a），

在校直扭歪零件以及在修整和切割对接板边方面所耗費的劳动量很大，甚至在許多情况下，这种附加的消耗要超过主要装配焊接工序的劳动量。

然而，焊接时产生的变形不仅使焊接結構制造复杂，而且在个别情况下，还降低了它們的工作能力。例如，在制造直的拉杆时，如果最后得到撓度  $f$  的弯曲（圖 2a），

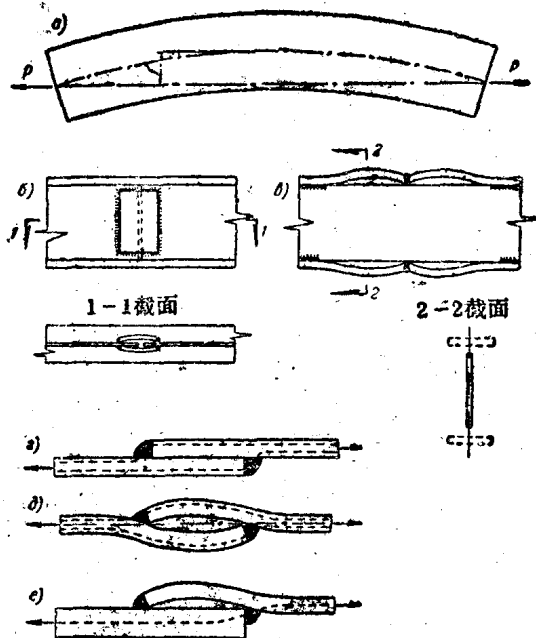


圖 2

焊縫受彎曲力而超应力。如果搭接板的厚度不同（圖 2e），則其中的一个焊縫將發生更大的超应力。在這種情況下，變形主要發生在比較薄的板上，以致其中一個焊縫不參加工作，而所有的力只由一個焊縫來傳遞，該焊縫就至少要超負荷一倍。

可見，焊接時產生的變形，無論是由於在保持橫截面尺寸不變的情況下改變構件的計算圖，或者由於在保持構件的計算圖不變的情況下減少它的受力截面，總要降低焊接結構的工作能力。

從上述可知，焊接時產生的變形嚴重地影響了焊接結構的質量及工作能力，並顯著地增加了結構製造的勞動量。所有這些，要求採取有效的措施來防止焊接變形。防止焊接時變形的困難，在於變形決定於許多不同的因素，要想根據一般概念將各因素作出足夠完整的考慮是不可能的。

焊接過程引起的結構變形決定於一系列工藝上與構造上的因

素。在同样一种結構上，在装配与焊接时采用不同的装配程序、焊接规范、焊缝施焊次序，以及构件与欲焊接板的不同的夹固方式，均会引起所获得的变形的性质和大小不一样。同时，用同一种工艺来制造类型相同而仅在次要零件尺寸上稍有改变，或者結構构件（这些构件不必計算就可决定）的形状上有少許改变的結構时，也会使結構所得到的变形有很大的区别。

显然，在計算焊接結構制造中所产生的变形时，要对全部构造上与工艺上的因素作出必要的考虑，这只有在每种因素的影响都能够由計算求出的情况下才有可能。

因此，为了有可能計算变形，就应该制訂出計算的方法。

任何尺寸与任何形状的結構在采用任何一种制造工艺时，都可能由計算方法来求出其变形。这就使我們可選擇出能保証結構获得最小变形的結構形状与制造工艺过程，而此种最小变形無論从結構强度条件或从其制造条件来看都是允許的。

因此，無論在設計結構或者拟訂其制造的工艺过程时，都应利用焊接变形的計算方法。通过計算可提高焊接結構的質量及工作能力，使結構更易于加工，因而减少了劳动量与制造工时和工具。

所有以上說明指出，在設計焊接結構及其制造工艺过程的实际工作中，运用确定焊接变形的計算方法就能为各个工业部門在生产焊接結構时提高它的質量与劳动生产率，也就是說，在頗大程度內完成了党和苏联政府摆在我們社会主义工业化面前的主要任务。

## 2 焊接时产生的变形种类

为了便于研究及求出焊接时所产生的变形，将变形合理地分为两大类，即整体变形和局部变形。

所謂整体变形就是整个构件的形状或尺寸起了变化。

所謂局部变形就仅仅是构件某部分横截面的尺寸和形状起了

变化，这种变化对整个构件并不發生显著的影响。

例如，在制造丁字形截面的构件(圖 3a)时，翼板焊缝焊好后，构件就收縮及弯曲。弯曲及縱向收縮就是整体变形，因为它們使整个构件的長度及形状發生变化。

然而，在上述构件中，除了已經談到的整体变形外，还存在着翼板橫向弯曲的局部变形，这种变形仅屬

于构件截面的一个組成部分，实际上并不影响整体变形。

在具有加勁板时，翼板就产生波形弯曲，由于翼板不可能在肋板位置上發生弯曲，因而全部弯曲祇能在肋板之間(圖 3b)。

可見在上述情况中，不仅要观察整体变形而且也要注意局部变形。

在大型結構中，整体变形以三种形式出現：縱向变形、橫向变形及弯曲变形。

局部变形是由于下列原因所引起的：角变形及薄板在縱向和橫向收縮的作用下失去穩定性。

焊接时产生的变形根据制造結構的材料不同而具有不同的性質及变形值。根据材料热力物理性質，同一热源能引起各种不同的加热温度場，因而制件的焊接变形也就不同。同时，变形可由不均匀加热来計算，或者由材料中因加热引起組織变化而發生的体积改变来計算。焊接鋼結構时，只有在采用有淬火傾向的合金鋼的情况下才考虑因組織改变所引起的变形。若采用低碳鋼，它的組織变化(奥氏体分解)在極高温下当材料已处于塑性状态时才会發生，这种組織变化并不影响結構物的变形，因而祇須考虑不均匀加热所引起的变形。

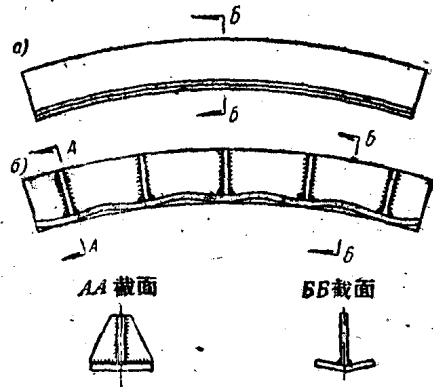


圖 3

### 3 現有的計算焊接變形的近似法

各个时期內提出的計算焊接變形的近似法可以歸納為三大類。

第一類近似法，是根據假定可能用附加某些虛力的力所引起的變形來代替焊接時變形的實際發展過程。這種虛力應如此選擇，就是使它所引起的變形，等於焊接時產生的實際變形。不同的作者在確定虛力上有不同的看法。還在 1932 年，本書作者已進行了專門的實驗研究，在 1935 年發表了計算虛力  $P$  的公式。1934 年，作者根據實驗研究在論文中曾提出計算力  $P$  的精確公式，此力與焊着焊波的尺寸有關。列伊金（Н.С.Лейкин）在 1934 年為了計算虛力，在焊縫中心綫兩邊各取 15~30 公厘作為加熱區的寬度。尼古拉也夫（Г.А.Николаев）在 1934 年發表的部分學位論文提出以有效區內呈三角形分布的應力的和來計算“收縮力”。同時，在所有的情況下，尼古拉也夫均得出在焊波下面總和的壓應力。此後，沃洛金（В.П.Вологдин）在 1945 及 1948 年發表的文章中提出了按加熱區橫截面面積來計算虛力，為此，在實際觀察的基礎上定出了虛力與焊縫尺寸及焊縫型式的某些關係。此後，發表了特羅春（И.П.Трочун）的論文，文中根據經驗數據確定了塑性及彈性-塑性變形區域與單位能的关系（單位能以卡/公分<sup>3</sup>表示）。然而，這一類所有提出的計算方法都不可能滿足生產中提出的全部要求，因為，它們通常沒有考慮到加熱時所產生的變形，加熱區域的範圍是單憑經驗決定的，它們不可能確定所有焊接接頭的變形並使人們感到在許多情況中簡直與實際相矛盾。這樣，就要求將焊縫區域內在焊接及焊後冷卻時由於加熱過程所產生的實際總變形，來代替十分近似地求出的虛力。

第二類計算方法的特征在於它們均基於利用彈性原理的基礎上。為了在所研究的構件上有可能採用彈性原理，就去掉了彈性-塑性變形部分，並在剩下的構件彈性部分的邊界上加上剪應力