

焊接变形的 控制与矫正

付荣柏 编著

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



焊接变形的控制与矫正

付荣柏 编著



机械工业出版社

本书主要讲述如何控制焊接变形,内容包括焊接变形的规律和梁、柱焊接弯曲变形的计算,焊接板结构箱形梁腹板预拱度计算,减小焊接变形的办法,焊接变形的机械矫正方法、火焰矫正的机理和火焰矫正的实际操作方法。

本书适合于从事焊接结构设计制造的技术人员和焊接工艺人员、铆焊技术工人阅读,并可作为高等学校、中等专业学校和技工学校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接变形的控制与矫正/付荣柏编著. —北京:机械工业出版社, 2006.6
ISBN 7-111-19198-6

I. 焊… II. 付… III. ①焊接结构—变形—控制
②焊接结构—变形—矫正 IV. TC404

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第051607号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:吕德齐
责任编辑:白刚 版式设计:张世琴 责任校对:吴美英
封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006年8月第1版·第1次印刷
148mm×210mm·12.375印张·365千字
0 001 4 000册
定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68326294
编辑热线电话(010) 68351729
封面无防伪标均为盗版

前 言

中国钢产量自 1996 年突破 1 亿 t 以后, 连续 9 年居世界第一。2003 年我国的钢产量已超过 2 亿 t。钢材的实际消费量也大, 如 40% 的钢材要经过焊接加工才能成为有用的构件和产品。焊接低碳钢和低合金结构钢的主要技术问题是焊接变形, 如何控制焊接变形或出现焊接变形怎样矫正是焊接结构生产的关键问题。本书主要是针对这两个问题, 根据作者从事焊接结构工艺工作四十多年的实际经验和理论研究成果, 并参考国内外书刊而编写的。

本书对焊接变形计算和火焰矫正理论方面在学术上都有创新和突破。本书中许多东西在国内外书刊等资料都是空白点, 其中有作者发表的获奖论文。书中列举的实例, 均是作者在生产实践中成功的创举, 是解决问题的极佳方法。

本书分两篇, 第一篇(第一~三章)主要介绍焊接变形的控制, 论述焊接残余应力的产生及分布和对焊接结构的影响, 并介绍焊接变形的种类。对典型件梁、柱, 从理论上阐述焊接变形的规律和焊接变形的计算方法, 总结出焊接变形的控制方法。如梁控制弯曲变形, 可根据焊接弯曲变形计算的大小, 在梁腹板下料时给出预拱度。本篇还介绍几种减小焊接变形的办法, 如退火消除焊接变形法、刚性固定法、反变形法、预应力法、减小焊接规范法等, 另外还介绍了手工机械矫正法和使用机械设备矫正法等。

本书第二篇(第四~九章)主要介绍火焰矫正法。火焰矫正焊接变形, 国内外很早就应用这种方法, 然而有关这方面的理论书刊却较少, 都是靠有经验的工人师傅摸索着去干。本书是在 1996 年作者编著的《钢结构变形火焰矫正》一书的基础上, 经作者近十年的生产实践经验和研究成果加以补充, 并列举一些生产实例。对火焰矫正的一些难题, 作者在书中都用较明确的实例加以说明。如梁的扭曲变形、薄板的波浪变形和桁架结构弯曲变形等火焰矫正方法, 这些在生产实

IV

践中都是行之有效的方法。

本书适用于起重、重工、造船、机车车辆、铁路公路桥梁、石油化工机械、建筑机械、冶金机械和农业机械等行业。

本书内容深入浅出，适用于不同层次的读者，可供专家学者参考，也可供从事实际操作的铆焊工阅读。

付荣柏

2006.5

目 录

前言

第一篇 焊接变形控制

第一章 焊接残余应力	1
第一节 焊接残余应力产生及分布	1
第二节 焊接残余应力对焊接结构的影响	10
第三节 减小焊接残余应力的方法	22
第二章 焊接结构的变形规律	30
第一节 焊接变形种类	30
第二节 焊接方法和焊接参数对焊接变形的影响	34
第三节 焊接梁、柱弯曲变形计算	39
第四节 焊接收缩变形	52
第五节 焊接梁、柱盖板和腹板波浪变形	58
第六节 露天作业焊接箱形梁温度变位计算	62
第七节 板结构箱形梁腹板的预拱度曲线	72
第三章 减小焊接变形的的方法	81
第一节 退火消除焊接变形法	81
第二节 机械矫正法	84
第三节 刚性固定法	96
第四节 应力状态下焊接变形规律及预应力法	99
第五节 反变形法	102
第六节 工字梁、箱形梁焊接变形的控制	108
第七节 大型组合结构变形的控制	118

第二篇 火焰 矫 正

第四章 气体火焰加热冷却对金属材料性能的影响	142
第一节 钢加热冷却的金相组织变化	142
第二节 钢材加热冷却的内应力及变形	153
第三节 火焰加热对材料性能的影响	163
第四节 钢结构设计特点及火焰矫正加热位置的选择	175
第五节 火焰矫正加热特点及应用范围	184
第五章 火焰加热采用的气体及器具	188
第一节 火焰加热气体性质及燃烧比	188
第二节 乙炔发生器、回火防止器和气瓶	194
第三节 减压器和火焰加热烤炬	209
第四节 火焰矫正使用的机具和胎具	216
第六章 火焰矫正的基本理论	226
第一节 火焰矫正变形规律	226
第二节 加外力对火焰矫正的影响	239
第三节 火焰矫正基本参数选择	243
第四节 火焰矫正的加热方法	253
第五节 火焰矫正的注意事项	269
第七章 板件、型钢、圆管和半成品零件火焰矫正	276
第一节 板件、型钢和钢管弯曲及扭曲变形的矫正	276
第二节 板材及板格变形矫正	285
第三节 半成品结构件火焰矫正	291
第八章 梁、柱变形火焰矫正	302
第一节 箱形梁、工字梁和柱弯曲变形火焰矫正	302
第二节 箱形梁、工字梁扭曲变形火焰矫正	315
第三节 工字梁、箱形梁腹板波浪变形火焰矫正	320
第四节 工字梁、箱形梁翼缘板角变形火焰矫正	329
第五节 工字梁、箱形梁综合变形的火焰矫正	334
第六节 桁架结构火焰矫正	343

第七节 薄钢板焊接结构波浪变形火焰矫正	350
第九章 大型组合焊接结构火焰矫正	355
第一节 钢结构变形分析	355
第二节 火焰矫正施工方案和施工程序	359
第三节 钢结构变形火焰矫正实例	367
参考文献	387

第一篇 焊接变形控制

第一章 焊接残余应力

第一节 焊接残余应力产生及分布

一、焊接残余应力产生的原因

残余应力就是在撤去所有外载荷后仍存在于物体中的应力。金属结构中残余应力可由各个生产阶段中的各种原因产生，如板材、棒料以及型材在轧制、铸造、锻造和焊接等过程中均能产生残余应力。金属零件在加工成形的过程中，如剪切、弯曲、机械加工及组装焊接时都能产生残余应力、金属结构由焊接冷却后产生的残余应力称为焊接残余应力。

(一) 残余应力的形成

采用最简单的例子，如图 1-1 所示把不同长度的杆件强制地连接在一起就造成了残余应力。这时在较短的杆件 Q 中产生了拉应力，在较长的杆件 P 及 P' 中产生压应力。

图 1-2 表明一个加热和冷却循环是怎样造成残余应力的。该图表示三个同样长度同样截面的碳钢杆件用两个刚性钢块连接起来。钢块和中间杆件加热到 600°C ，然后冷却至室温，而两边的杆件

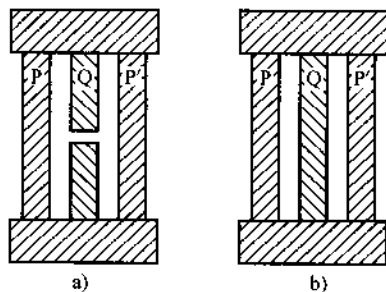


图 1-1 将不同长度的杆件强制连接形成残余应力

a) 自由状态 b) 受力状态

始终保持在室温。图 1-2 表示中间杆件的应力与温度的关系，表明残余应力是怎样产生的。因为两边杆件阻碍着中间杆件的变形，每一边杆件所受的应力始终等于中间杆件所受应力之半，而根据平衡条件两边杆件与中间杆件所受应力的符号应相反。

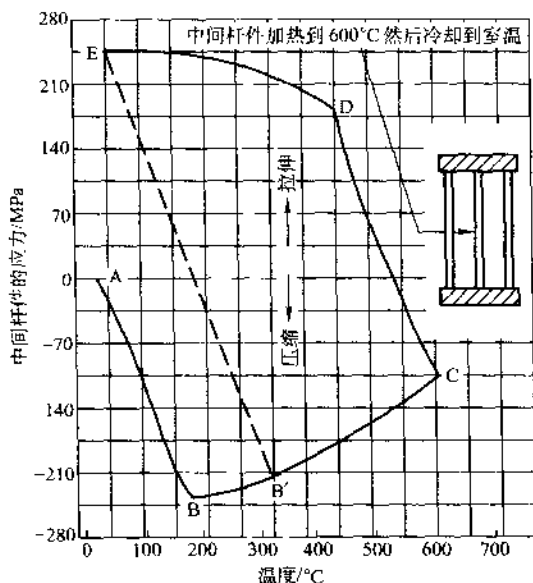


图 1-2 三杆件刚架中间杆件的应力-温度曲线

中间杆件在受热时，因其膨胀受到两边杆件的限制，产生了压应力。随着中间杆件温度升高，杆件上的应力变化如图上 AB 线所示，当温度约为 170°C 时即达到压缩屈服应力，如图上的 B 点。当温度超过 B 点继续上升时，中间杆件上应力不会超过各相应温度下的屈服应力，如图中 BC 曲线所示。

在冷却过程中当温度低于约 600°C 时，中间杆件又进入了弹性状态。这时中间杆件中压缩应力迅速减小，并且很快地达到了拉伸屈服应力，如图中所示的 D 点。随着温度进一步下降，中间杆件中的应力再一次受到各相应温度下的屈服应力限制，如图中曲线 DE 所示。这样在中间杆件中就产生了拉伸残余应力，其数值等于室温下的屈服

应力。两边杆件中残余应力是压缩应力，其数值为中间杆件拉应力之半。图中 B'E 线表示中间杆件加热到超过 315℃ 以上的任一温度时，其残余应力都将等于室温下的屈服应力。

(二) 不均匀分布的非弹性应变引起的残余应力

前面已经指出，金属材料在均匀加热时将均匀膨胀，不产生热应力。材料在不均匀加热时产生热应力。当存在不均匀分布的非弹性应变（例如塑性应变）时，也将产生残余应力。对于二维平面应力（ $\sigma_z = 0$ ）状态下的残余应力场将存在下列基本关系^①：

1. 应变由弹性及非弹性应变合成

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \epsilon'_x + \epsilon''_x \\ \epsilon_y &= \epsilon'_y + \epsilon''_y \\ \gamma_{xy} &= \gamma'_{xy} + \gamma''_{xy}\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中 ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} ——总应变的分量；

ϵ'_x 、 ϵ'_y 、 γ'_{xy} ——弹性应变分量；

ϵ''_x 、 ϵ''_y 、 γ''_{xy} ——非弹性应变分量。

非弹性应变可以是塑性应变、热应变以及其他形式的应变^②。

2. 应力与弹性应变之间存在着胡克定律的关系

$$\begin{aligned}\epsilon'_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \gamma \sigma_y) \\ \epsilon'_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \gamma \sigma_x) \\ \gamma'_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}\end{aligned}\quad (1-2)$$

3. 应力应满足下列平衡条件

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0\end{aligned}\quad (1-3)$$

① 在一般三维应力场中有六个应力分量，场 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 。

② 在热应力的情况下， $\epsilon''_x = \epsilon''_y = \alpha \Delta T$ ， $\gamma''_{xy} = 0$ ，其中 α 为线膨胀系数； ΔT 为原始温度至加热温度差。

4. 总的应变满足相容条件

$$\left(\frac{\partial^2 \epsilon'_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon'_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma'_{xy}}{\partial x \partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 \epsilon''_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon''_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma''_{xy}}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (1-4)$$

式 (1-3) 及式 (1-4) 表明, 当根据非弹性应变用下列式确定的 R 值不等于零时, 存在残余应力[○]

$$R = - \left(\frac{\partial^2 \epsilon''_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon''_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma''_{xy}}{\partial x \partial y} \right) \quad (1-5)$$

R 称为“不相容性”, 是引起残余应力的原因。

许多研究工作者对残余应力进行了数学分析, 已经提出了一些公式以便根据已知的非弹性应变 ϵ''_x 、 ϵ''_y , 以及 γ''_{xy} 来计算分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 。从这些数学分析中得出的重要结论包括以下各点:

(1) 物体中的残余应力不可能通过测量该物体承受外载时产生的应力变化来确定。因此, 为了确定残余应力, 必须将该物体切割成若干部分。

(2) 当各弹性应变分量已经确定时, 可以根据公式 (1-2) 计算出残余应力 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 。但是, 如果不知道残余应力形成的历史, 引起残余应力的非弹性应变变量 ϵ''_x 、 ϵ''_y 、 γ''_{xy} 是无法确定的。

(三) 残余应力平衡条件

因为残余应力是在没有外力的条件下存在的, 所以由残余应力产生的合力及合力矩必须等于零, 即

$$\text{在任一截面上} \quad \int \sigma dA = 0 \quad (1-6)$$

$$\text{同时} \quad \int dM = 0 \quad (1-7)$$

(四) 焊接时的热应力以及引起的残余应力

图 1-3 简要地表示焊接时温度及应力的变化。图中表示了在平板上沿 x 轴堆敷单道焊缝金属时的情况。焊接电弧正位于图中原点 O 处, 并以速度 v 向前移动, 见图 1-3a。

图 1-3a 中画有阴影线的区域 $M-M'$ 表示在焊接热循环中产生塑

○ 如果非弹性应变的分量是位置的线性函数, 即 $\epsilon''_x = a + bx + cy$, $\epsilon''_y = c + fx + gy$, $\gamma''_{xy} = k + lx + my$ 则 $R = 0$, 因此, 将不产生残余应力。

性变形的区域。靠近坐标原点 O 处的椭圆表示金属熔化区。阴影线以外的区域在整个热循环中始终保持弹性状态。

图 1-3b 表示几个横截面上的温度分布情况。在焊接电弧前面的 $A-A$ 截面上，由于焊接引起的温度变化 ΔT 几乎为零。在焊接电弧所在的 $B-B$ 截面上，温度的分布是非常陡峭的。在焊接电弧后面离开一段距离的 $C-C$ 截面处，温度的分布已趋向和缓。在远离焊接电弧的 $D-D$ 截面上，因焊接面引起的温度变化又减少到接近于零。

图 1-3c 表示这些截面上 x 方向的应力 σ_x 的分布情况。在两维应力场中同时也存在着切应力 τ_{xy} 和 y 方向的应力 σ_y 。

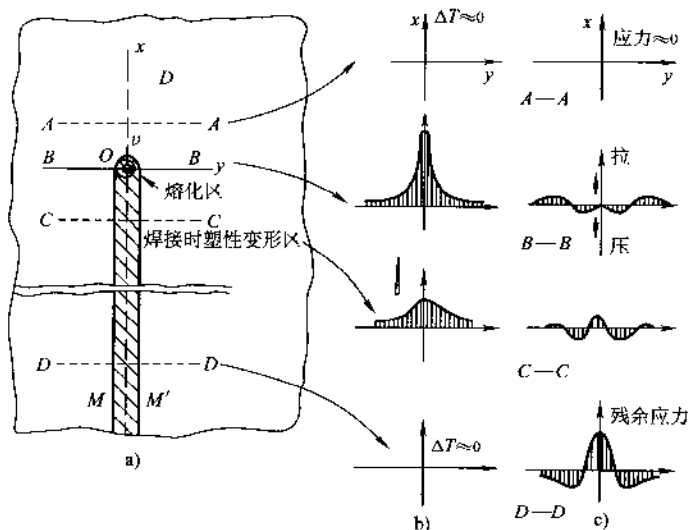


图 1-3 焊接时温度及应力的变化示意图

a) 焊缝 b) 温度变化 c) 残余应力 σ_x

$A-A$ 截面上，因焊接引起的应力几乎等于零。 $B-B$ 截面上的应力分布表示于图 1-3c。因为熔化金属不能承受外载，所以位于焊接电弧下面区域中的应力接近于零。离开电弧一段距离处为压应力，这是因为这些区域的膨胀受到温度较低的周围金属约束的原故。这些区域的温度相当高，所以材料的屈服应力很低。这些区域的应力与母材在相应温度下屈服应力相等。随着离焊缝距离的增加或者随着温度

降低，压应力逐步达到极大值。在离焊缝更远的区域承受着拉应力，它与焊缝附近区域的压应力相平衡，因此， $B-B$ 截面上应力分布如图 1-3c 所示。

图 1-3c 表明，在 $C-C$ 截面上焊缝金属和附近的母材已经冷却，并力图收缩，从而在接近焊缝中心的区域引起拉应力。

随着离开焊缝距离的增加，应力先是变为压应力，然后又变为拉应力。

在 $D-D$ 截面上，邻近焊缝的区域产生了很高的拉应力，但是离焊缝较远的区域则为压应力。

从前面的讨论中可以得出结论：焊接过程中的热应力是由复杂的机理引起的，它包括了从室温到熔化温度的很宽范围中的塑性变形。因为对塑性变形，尤其是对高温下的塑性变形的分析十分困难，所以目前只能对一些最简单的情况进行数学分析。

(五) 焊件中的残余应力及反作用应力

焊接结构制造过程中产生的残余应力可分为：未紧面的部件焊接时产生的焊接残余应力和由外部约束引起的反作用应力。

图 1-4 为对接接头中典型的纵向及横向残余应力分布情况。此处研究的是平行于焊接方向的应力 σ_x 和垂直于焊接方向的应力 σ_y 。

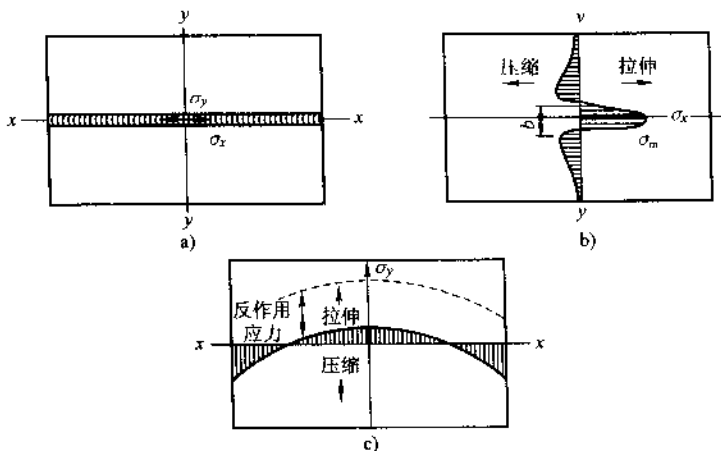


图 1-4 双对接接头中典型的残余应力分布
 a) 对接接头 b) σ_x 沿 yy 轴的分布 c) σ_y 沿 xx 轴的分布

图 1-4b 为纵向残余应力 σ_x 的分布情况。近缝区产生了很高的拉应力，这一应力向焊缝两边迅速减小，在距离几倍于焊缝宽度以外就变成了压应力。这一应力分布的特征可以用两个参数来表示：其一焊缝区的最大应力 σ_m ；其二拉伸残余应力区的宽度 b 。对于低碳钢焊件最大残余应力 σ_m 通常就等于焊缝金属的屈服应力。

图 1-4c 中曲线表示横向残余应力 σ_y 沿焊缝长度方向的分布情况。接头中部为较低的拉应力，接头的两端则为压缩应力。

如果接头的横向收缩受到外部的限制，沿焊缝方向大体均匀的拉应力就要作为反作用应力叠加上去。但是外部约束对残余应力 σ_x 分布的影响则很小。

对于厚板焊件，例如板厚超过 25mm，在厚度方向的残余应力 σ_z 可能很大。

二、焊接残余应力场

现今已有了许多测量焊接残余应力的方法，如盲孔应力释放法、X 射线衍射法、利用对应力敏感性能的方法、裂纹法等。通过对典型焊接接头中的残余应力的测量得出焊接残余应力分布情况，即焊接残余应力场。

(一) 典型的残余应力场

板件对接接头焊接残余应力分布形状已经在前面讨论过，并已在图 1-4 中给出。

焊接 T 形构件中的残余应力分布如图 1-5a 所示，在离开 T 形构件一端稍远的某一截面，如 X—X 截面的近缝区产生了很高的平行于轴线方向的拉伸残余应力。右图是 X—X 截面上平行于轴线方向的残余应力分布。在翼缘板中，近缝区存在拉应力，这离焊缝的区域则存在压应力。由于焊缝纵向收缩引起的型钢纵向弯曲变形，使腹板靠近上边的区域具有拉应力。

图 1-5b 和 c 分别为工字形构件和箱形构件中典型的残余应力分布。平行于轴线的残余应力在近缝区是拉应力，在远离焊缝的区域是压应力。

(二) 实测板结构箱形梁焊接残余应力场

1985 年大连起重机器厂与大连铁道学院合作，对起重机主梁焊

接后的残余应力进行了测量，测量采用盲孔应力释放法。

试验采用 15t28m 跨度抓斗桥式起重机主梁其截面尺寸如图 1-6 所示。在梁上取二个截面：

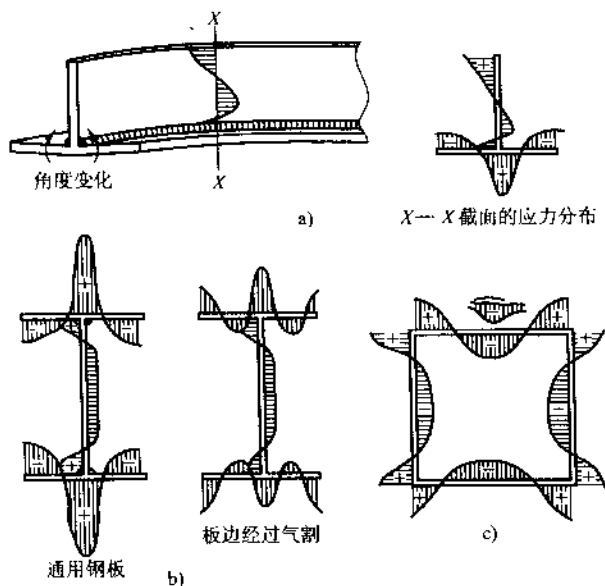


图 1-5 焊接型钢中典型残余应力场

- a) T 形构件的残余应力场 b) T 字形构件残余应力场
c) 箱形构件的残余应力场

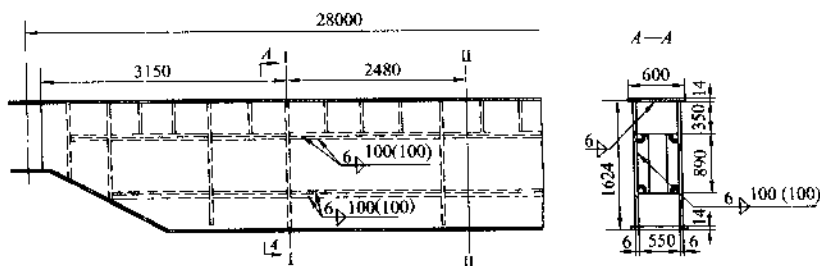


图 1-6 15t28m 抓斗桥式起重机主梁

I—I 截面位于主梁大筋板的腹板处，测得应力沿主梁纵向（X—X）方向应力以 σ_x 表示，与纵向方向垂直的应力以 σ_y 表示。测得结果应力分布如图 1-7a 所示。

II—II 截面位于主梁大筋板与小筋板之间，测得的结果应力分布如图 1-7b 所示。

测量结果情况，测量箱形主梁的截面焊接残余应力，共同的规律是主梁上下盖板的应力分布为：上盖板沿两边纵向焊缝处应力为拉应力 σ_x ，其中筋板截面处最大的拉应力为 250MPa；在同一截面上盖板的中间为压应力，最大压应力为 146MPa。下盖板拉、压应力数值比上盖板小。有筋板处的拉压应力峰值比无筋板处小。

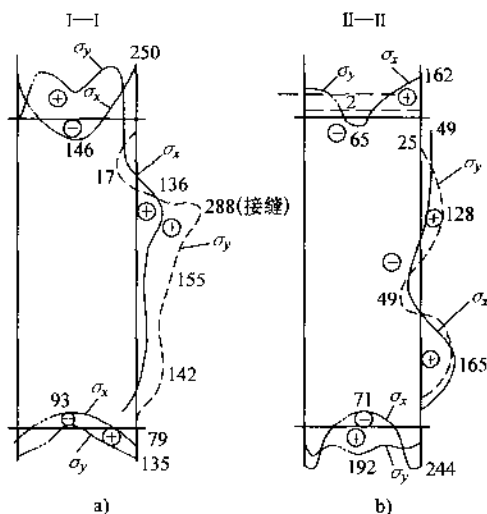


图 1-7 主梁截面应力分布

a) 有筋板处 I—I b) 无筋板处 II—II

垂直于梁纵向的残余应力 σ_y 在两截面的分布几乎都为拉应力，有筋板截面的 σ_y 值大于无筋板截面的 σ_y 值，最大应力峰值为 250MPa。

腹板的应力分布是：腹板两边纵向焊缝处和对接焊缝处的应力 σ_y 为 288MPa，其他地方沿截面高分布有拉应力 σ_y 和压应力 σ_x ，最大压应力为 49MPa，最大拉应力为 165MPa。一般是应力分布不规律，大部分应力在 9.8~29MPa 范围内变动。这主要是由轧制板本身表面应力状态的影响，同时又存在仪器允许测量误差 ± 20 MPa。另外，腹板的局部压应力超过临界应力值时出现腹板失稳，产生波浪变形。

垂直于梁纵向的应力 σ_y ，在腹板上的分布几乎都是拉应力，最大应力在有筋板截面的腹板拼接处。