

高职高专规划教材

焊接结构生产

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 邓洪军

副主编 李 莉

参 编 王云鹏 董俊慧 刘 华

主 审 王宗杰



机械工业出版社

本书是根据国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会制定的高等职业学校焊接专业教学计划和“焊接结构生产”课程教学大纲编写的,适用于三年制高等教育焊接专业使用的规划教材。

本教材的主要内容包括焊接结构基础知识、焊接结构生产过程和焊接结构生产组织等三个部分共九章内容。具体介绍了焊接应力与变形、焊接接头及其静载强度、焊接结构强度的基本理论、焊接结构备料及成形加工、焊接结构的装配与焊接工艺、焊接结构生产的工艺规程编制、典型焊接结构的生产工艺、装配—焊接工艺装备、焊接结构生产的组织与安全技术。

本教材在编写过程中,从现代高职人才培养目标出发,注重教学内容的实用性。特别是结合焊接专业的技术岗位特点,尽量贴近生产实际组织教材内容,以达到使学生掌握焊接结构生产的基本知识和基本技能的目的。全书通俗易懂,实用性强,便于组织教学。同时,也可作为有关技术人员、管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构生产/邓洪军主编. —北京:机械工业出版社, 2004.1

高职高专规划教材

ISBN 7-111-13738-8

I. 焊... II. 邓... III. 焊接结构—高等学校:技术学校—教材 IV. TG403

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第122534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:张祖凤

责任编辑:何月秋 版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:陈沛 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年2月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·15.75印张·388千字

定价:22.00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)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

根据全国机械职业教育专业教学指导委员会关于“深化高等职业技术教育人才的改革，加强高职教材建设”的精神，结合市场需要，于2002年8月我们与机械工业出版社共同邀请了全国十几所开办焊接专业的高职高专院校召开了编写这套教材的启动会，在会上大家就焊接专业的课程体系、教材的编写目的和要求、教材书目，以及编写人员的分工进行了研讨，最终达成共识。

第二章 焊接接头及其静载强度

在焊件需连接的部位，用焊接方法制造而成的接头称为焊接接头，一般简称接头。

焊接接头是焊接结构的重要组成部分。通过对大量焊接结构失效事故的分析表明，焊接接头部位往往是结构破坏的起点。造成这种情况的原因是多方面的，归纳起来主要有两点：焊接接头本身的力学性能不均匀；焊接接头部位所受工作应力分布不均匀。因此，研究焊接接头的性能特征和应力分布规律，对提高焊接结构的使用可靠性具有十分重要的意义。

第一节 焊接接头的类型

一、焊接接头的组成

现代焊接技术发展迅速，新的焊接方法不断出现，接头类型更是繁多，但应用最广的焊接方法是熔焊。本章将以熔焊接头为重点进行分析。焊接接头是由焊缝金属、熔合区、热影响区组成的，如图 2-1 所示。

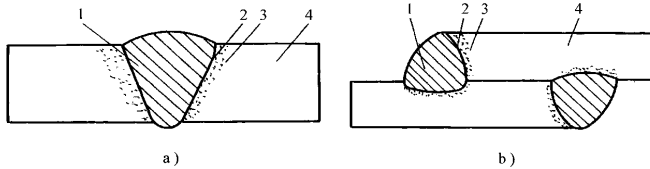


图 2-1 熔焊接头的组成

a) 对接接头断面图 b) 搭接接头断面图

1—焊缝金属 2—熔合区 3—热影响区 4—母材

焊缝金属是由焊接填充金属及部分母材金属熔化结晶后形成的，其组织和化学成分不同于母材金属。热影响区受焊接热循环的影响，组织和性能都发生变化，特别是熔合区的组织和性能变化更为明显。因此，焊接接头是一个成分、组织和性能都不均匀的连接体。此外，焊接接头因焊缝的形状和布置的不同，将会产生不同程度的应力集中。所以，不均匀性和应力集中是焊接接头的两个基本属性。

影响焊接接头性能的主要因素见图 2-2。这些因素可归纳为力学的和材质的两个方面。

力学方面影响焊接接头性能的因素有接头形状不连续性、焊接缺陷（如未焊透和焊接裂纹）、残余应力和残余变形等。接头形状的不连续性，如焊缝的余高和施焊过程中可能造成的接头错边等，都是应力集中的根源。

材质方面影响焊接接头性能的因素主要有焊接热循环所引起的组织变化、焊接材料引起的焊缝化学成分的变化、焊后热处理所引起的组织变化以及矫正变形引起的加工硬化等。

焊接接头是组成焊接结构的关键元件，它的性能与焊接结构的性能和安全有着直接的关系。因此，不断提高焊接接头的质量，是保证焊接结构安全可靠的重要方面。

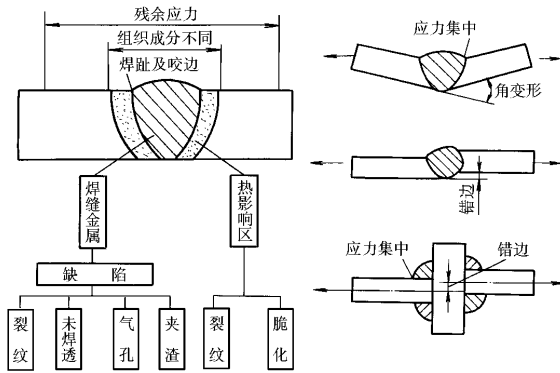


图 2-2 影响焊接接头性能的主要因素

二、焊缝及焊接接头的基本形式

焊缝及焊接接头的形式较多，应根据焊件的厚度、工作条件、受力情况等因素进行选择。

1. 焊缝的基本形式

焊缝是构成焊接接头的主体部分，对接焊缝和角焊缝是焊缝的基本形式。

(1) 对接焊缝 对接焊缝的焊接接头可采用卷边、平对接或加工成 V 形、U 形、X 形、K 形等坡口，如图 2-3 所示。各种坡口尺寸可根据国家标准 (GB/T985—1988 和 GB/T986—1988) 或根据具体情况确定。

对接焊缝开坡口的根本目的，是为了确保接头的质量，同时也从经济效益考虑。坡口形式的选择取决于板材厚度、焊接方法和工艺过程。通常必须考虑以下几个方面：

1) 可焊到性或便于施焊。这是选择坡口形式的重要依据之一，也是保证焊接质量的前提。一般而言，要根据构件能否翻转，翻转难易，或内外两侧的焊接条件而定。对不能翻转和内径较小的容器、转子及轴类的对接焊缝，为了避免大量的仰焊或不便从内侧施焊，宜采用 V 形或 U 形坡口。

2) 降低焊接材料的消耗量。对于同样厚度的焊接接头，采用 X 形坡口比 V 形坡口能节省较多的焊接材料、电能和工时。构件越厚，节省得越多，成本越低。

3) 坡口易加工。V 形和 X 形坡口可用气割或等离子弧切割，亦可用机械切削加工。对于 U 形或双 U 形坡口，一般需用刨边机加工。在圆筒体上应尽量少开 U 形坡口，因其加工困难。

4) 减少或控制焊接变形。采用不适当的坡口形状容易产生较大的变形。如平板对接的 V 形坡口，其角变形就大于 X 形坡口。因此，如果坡口形式合理，工艺正确，可以有效地减少或控

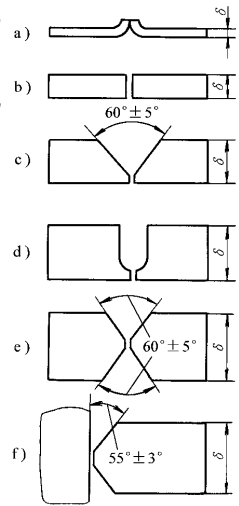


图 2-3 对接焊缝的典型坡口形式

- a) $\delta = 1 \sim 3\text{mm}$ b) $\delta = 3 \sim 8\text{mm}$
 c) $\delta = 3 \sim 26\text{mm}$ d) $\delta = 20 \sim 60\text{mm}$
 e) $\delta = 12 \sim 60\text{mm}$ f) $\delta > 12\text{mm}$

制焊接变形。

上面只是列举了选择坡口的一般规则，具体选择时，则需要根据具体情况综合考虑。例如，从节约焊接材料出发，U形坡口较V形坡口好，但加工费用高；双面坡口明显地优于单面坡口，同时焊接变形小。双面坡口焊接时需要翻转焊件，增加了辅助工时，所以在板厚小于25mm时，一般采用V形坡口。受力大而要求焊接变形小的部位应采用U形坡口。利用焊条电弧焊焊接6mm以下的钢板时，选用I形坡口就可得到优质焊缝；用埋弧焊焊接14mm以下的钢板，采用I形坡口也能焊透。

坡口角度的大小与板厚和焊接方法有关，其作用是使电弧能深入根部使根部焊透。坡口角度越大，焊缝金属量越多，焊接变形也会增大，一般坡口角度选 60° 左右。

焊前在接头根部之间预留的空隙称为根部间隙，采用根部间隙是为了保证焊缝根部能焊透。一般情况下，坡口角度小，需要同时增加根部间隙；而根部间隙较大时，又容易烧穿，为此，需要采用钝边防止烧穿。根部间隙过大时，还需要加垫板。

(2)角焊缝 角焊缝按其截面形状可分为平角焊缝、凹角焊缝、凸角焊缝和不等腰角焊缝四种，如图2-4所示。角焊缝的大小用焊脚尺寸 K 表示，应用最多的是截面为直角等腰的角焊缝。各种截面形状角焊缝的承载能力与载荷性质有关。静载时，如母材金属塑性良好，则角焊缝的截面形状对承载能力没有显著影响；动载时，凹角焊缝比平角焊缝的承载能力高，凸角焊缝的承载能力最低。不等腰角焊缝，长边平行于载荷方向时，承受动载效果较好。

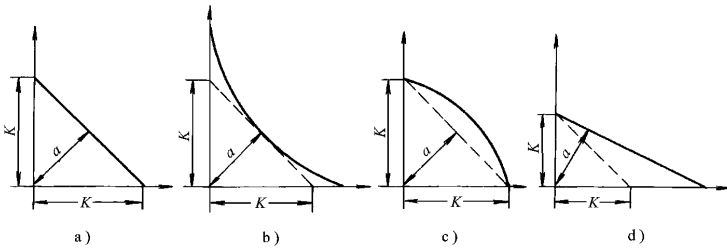


图2-4 角焊缝截面形状及其计算断面

a) 平角焊缝 b) 凹角焊缝 c) 凸角焊缝 d) 不等腰角焊缝

为了提高焊接效率、节约焊接材料、减小焊接变形，当板厚大于13mm时，可以采用开坡口的角焊缝。在等强度条件下，坡口角焊缝的焊接材料消耗量仅为普通角焊缝的60%。

2. 焊接接头的基本形式

焊接接头的基本形式有四种：对接接头、搭接接头、T形接头和角接接头（见图2-5）。选用接头形式时，应该熟悉各种接头的优缺点。

(1)对接接头 两焊件表面构成大于或等于 135° 、小于或等于 180° 夹角，即两板件相对端面焊接而形成的接头叫做对接接头。

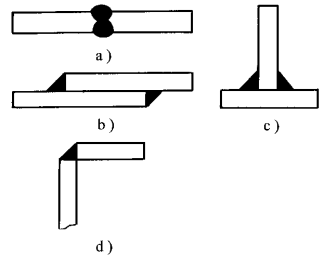


图2-5 焊接接头的基本形式

a) 对接接头 b) 搭接接头
c) T形接头 d) 角接接头

对接接头从强度角度看是比较理想的接头形式，也是广泛应用的接头形式之一。在焊接

结构上和焊接生产中,常见的对接接头的焊缝轴线与载荷方向相垂直,也有少数与载荷方向成斜角的斜焊缝对接接头(见图 2-6),这种接头的焊缝承受较低的正应力。过去由于焊接水平低,为了安全可靠,往往采用这种斜缝对接。但是,随着焊接技术的发展,焊缝金属具有了优良的性能,并不低于母材金属的性能,而斜缝对接因浪费材料和工时,所以一般不再采用。

(2) 搭接接头 两板件部分重叠起来进行焊接所形成的接头称为搭接接头。

搭接接头的应力分布极不均匀,疲劳强度较低,不是理想的接头形式。但是,搭接接头的焊前准备和装配工作比对接接头简单得多,其横向收缩量也比对接接头小,所以在受力较小的焊接结构中仍能得到广泛的应用。

搭接接头中,最常见的是角焊缝组成的搭接接头,一般用于 12mm 以下的钢板焊接。除此之外,还有开槽焊、塞焊、锯齿状搭接等多种形式。

开槽焊搭接接头的结构形式见图 2-7。先将被连接件加工成槽形孔,然后用焊缝金属填满该槽,开槽焊焊缝断面为矩形,其宽度为被连接件厚度的 2 倍,开槽长度应比搭接长度稍短一些。当被连接件的厚度不大时,可采用大功率的埋弧焊或 CO_2 气体保护焊,不开槽也有可能熔透,使两个焊件连接起来。

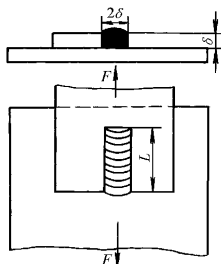


图 2-7 开槽焊搭接接头

塞焊是在被连接的钢板上钻孔,用来代替开槽焊的槽形孔,用焊缝金属将孔填满使两板连接起来,见图 2-8。当被连接板厚小于 5mm 时,可以采用大功率的埋弧焊或 CO_2 气体保护焊直接将钢板熔透而不必钻孔。这种接头施焊简单,特别是对于一薄一厚的两焊件连接最为方便,生产效率较高。

锯齿缝搭接接头形式见图 2-9,这是单面搭接接头的一种形式。直缝单面搭接接头的强度和刚度比双面搭接接头低得多,所以只能用在

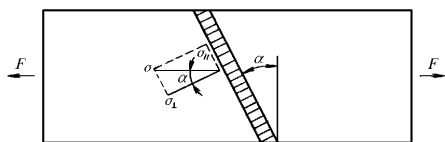


图 2-6 斜缝对接接头

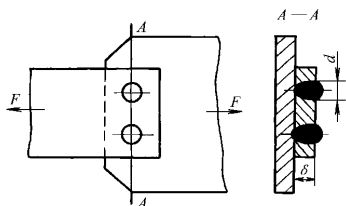


图 2-8 塞焊接头

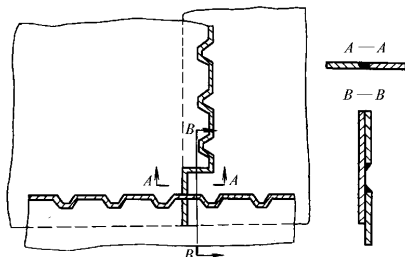


图 2-9 锯齿缝搭接接头

受力很小的次要部位。对背面不能施焊的接头，可用锯齿形焊缝搭接，这样能提高焊接接头的强度和刚度。若在背面施焊困难，用这种接头形式比较合理。

(3) T形(十字)接头 T形(十字)接头是将相互垂直的被连接件，用角焊缝连接起来的接头，此接头一个焊件的端面与另一焊件的表面构成直角或近似直角，见图 2-10。这种接头是典型的电弧焊接头，能承受各种方向的力和力矩，见图 2-11。这类接头应避免采用单面角焊缝，因为这种接头的根部有很深的缺口(见图 2-10a)，其承载能力低。

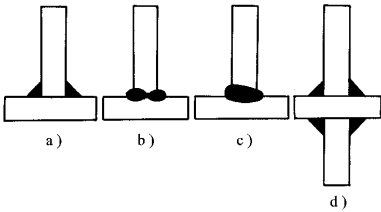


图 2-10 T形(十字)接头

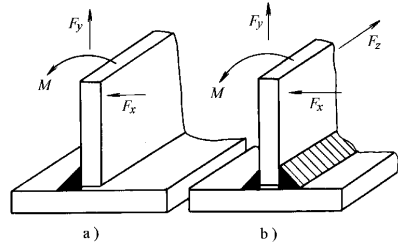


图 2-11 T形接头的承载能力

对较厚的钢板，可采用 K 形坡口(见图 2-10b)，根据受力状况决定是否需要焊透。对要求完全焊透的 T 形接头，采用单边 V 形坡口(见图 2-10c)从一面焊，焊后在背面清根焊满，比采用 K 形坡口施焊可靠。

(4) 角接接头 两板件端面构成 $30^\circ \sim 135^\circ$ 夹角的接头称做角接接头。

角接接头多用于箱形构件，常用的形式见图 2-12。其中图 2-12a 是最简单的角接接头，但承载能力差；图 2-12b 采用双面焊缝从内部加强角接接头，承载能力较大；图 2-12c 和图 2-12d 开坡口易焊透，有较高的强度，而且在外观上具有良好的棱角，但应注意层状撕裂问题；图 2-12e、f 易装配，省工时，是最经济的角接接头；图 2-12g 是保证接头具有准确直角的角接接头，并且刚度高，但角钢厚度应大于板厚；图 2-12h 是最不合理的角接接头，焊缝多且不易施焊。

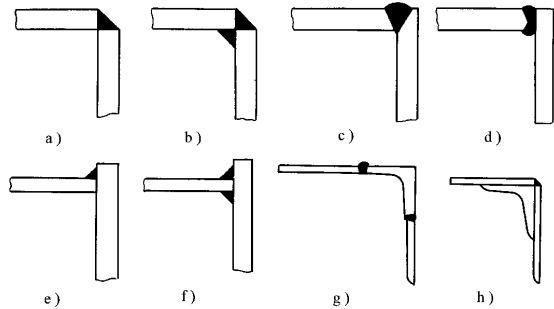


图 2-12 角接接头形式

第二节 电弧焊接头的工作应力

一、应力集中的概念

为了表示焊接接头工作应力分布的不均匀程度，这里引入应力集中的概念。

所谓应力集中，是指接头局部区域的最大应力值 (σ_{\max}) 较平均应力值 (σ_{av}) 高的现象。而应力集中的大小，常以应力集中系数 K_T 表示。

$$K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{av}}}$$

在焊接接头中产生应力集中的原因是：

- 1) 焊缝中有工艺缺陷。焊缝中经常产生的缺陷，如气孔、夹杂、裂纹和未焊透等，都会在其周围引起应力集中，其中尤以裂纹和未焊透引起的应力集中最严重。
- 2) 焊缝外形不合理。如对接焊缝的余高过大，角焊缝为凸出形等（见图 2-4c），在焊趾处都会形成较大的应力集中。
- 3) 焊接接头设计不合理。如接头截面的突变、加盖板的对接接头等，均会造成严重的应力集中。焊缝布置不合理，如只有单侧焊缝的 T 形接头，也会引起应力集中。

二、电弧焊接头的工作应力分布

不同的焊接接头在外力作用下，其工作应力分布都不一样。

1. 对接接头

在焊接结构生产中，对接接头的焊缝略高于母材金属板面，超出母材表面连线上方的那部分焊缝金属的最大高度称为余高。由于余高造成了构件表面不平滑，在焊缝与母材金属的过渡处引起应力集中，如图 2-13 所示。在焊缝余高向母材金属过渡的焊趾处，应力集中系数 K_T 为 1.6，在焊缝背面与母材金属的过渡处，应力集中系数 K_T 为 1.5。 K_T 的大小与余高 h 和焊缝向母材金属过渡的半径 r 有关，如图 2-14 所示。减小 r 和增大 h ，均使 K_T 增加。当余高 h 为零时， $K_T=1$ ，应力集中消失。如果余高太大，虽然使焊缝截面增厚，但却使应力集中程度也增加，因此生产中应适当控制余高，不应当以增加余高的方法来增加焊缝的承载能力。余高不得超过国家有关标准规定的 0~3mm。

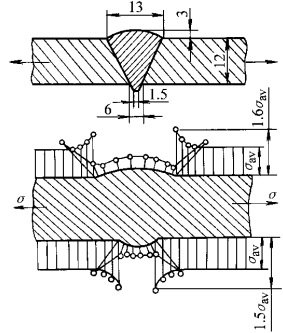


图 2-13 接头的应力分布
(σ_{av} 为平均应力)

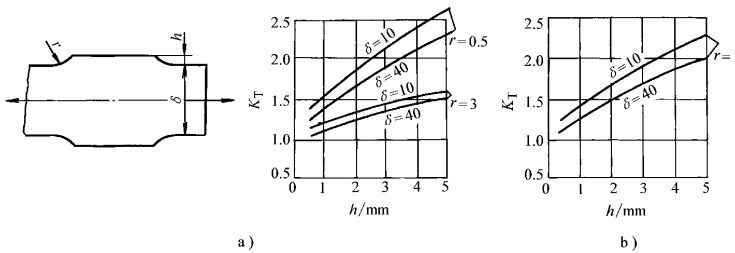


图 2-14 余高和过渡半径与应力集中系数的关系

由余高带来的应力集中，对动载结构的疲劳强度是十分不利的，所以此时要求它越小越好，国家标准规定：在承受动载荷情况下，焊接接头的焊缝余高应趋于零。因此，对重要的动载结构，可采用削平余高或增大过渡圆弧的措施来降低应力集中，以提高接头的疲劳强度。

对接接头外形的变化与其他形式的接头相比是不大的，所以它的应力集中较小，而且易于降低和消除。因此，对接接头是最好的接头形式，不但静载可靠，而且疲劳强度也较高。

2. T形（十字）接头

由于 T 形（十字）接头焊缝向母材金属过渡较急剧，接头在外力作用下力线扭曲很大，造成应力分布极不均匀，在角焊缝的根部和过渡处，易产生很大的应力集中，如图 2-15 所示。

图 2-15a 是 I 形坡口 T 形（十字）接头中正面焊缝的应力分布状况。由于整个厚度没有焊透，焊缝根部应力集中很大。在焊趾截面 B—B 上应力分布也不均匀，B 点的应力集中系数 K_T 值随角焊缝的形状而变， K_T 随 θ 角减小而减小，也随焊脚尺寸 K 的增大而减小。

图 2-15b 是 K 形坡口并焊透的 T 形（十字）接头，这种接头使应力集中程度大大降低，应力集中系数 $K_T < 1$ ，事实上已经不存在应力集中问题了。这是因为：由于 θ 角大幅度降低而使焊缝向母材金属过渡平缓，消除了焊趾截面的应力集中；由于开坡口并焊透而消除了焊趾根部的应力集中。由此可见，保证焊透是降低 T 形（十字）接头应力集中的重要措施之一。因此，在焊接结构生产中，对重要的 T 形（十字）接头必须开坡口焊透或采用深熔法进行焊接。

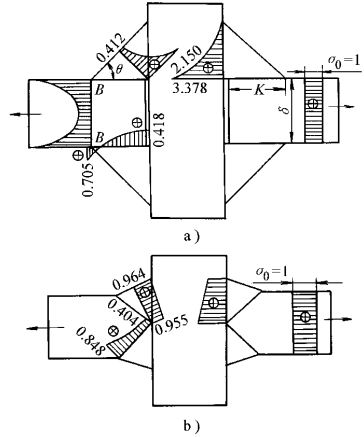


图 2-15 T 形（十字）接头的应力分布

3. 搭接接头

搭接接头使构件形状发生了较大的变化，其应力集中比对接接头的情况要复杂得多。在搭接接头中，根据搭接角焊缝受力的方向，可以将搭接角焊缝分为正面角焊缝、侧面角焊缝和斜向角焊缝三种，见图 2-16。焊缝与力的作用方向相垂直的角焊缝称为正面角焊缝 (l_3 段)；而相平行的称为侧面角焊缝 (l_1 、 l_5 段)；介于两者之间的称为斜向角焊缝 (l_2 、 l_4 段)。

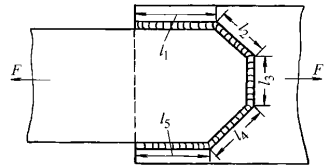


图 2-16 搭接接头角焊缝

(1) 正面角焊缝的工作应力分布 在正面角焊缝的搭接接头中，应力分布很不均匀，见图 2-17。在角焊缝的焊根 A 点和焊趾 B 点，都有较大的应力集中。焊趾 B 点的应力集中系数随角焊缝的斜边与水平边的夹角 θ 而改变。减小 θ 角和增大熔深，焊透根部，可以降低焊趾处和焊根处的应力集中系数。

(2) 侧面角焊缝的工作应力分布 侧面角焊缝的工作应力分布见图 2-18。其特点是最大应力在两端，中部应力最小，而且焊缝较短时应力分布较均匀，焊缝较长时应力分布不均匀的程度就增加。因此，采用过长的侧面角焊缝是不合理的，通常规定侧面角焊缝的长度不得大于 $50K$ (K 为焊脚尺寸)。

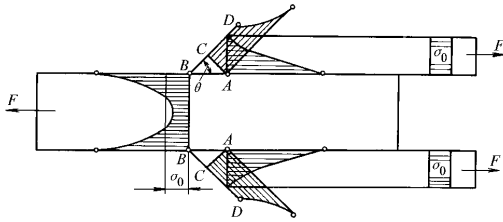


图 2-17 正面搭接角焊缝的应力分布

(3) 联合角焊缝的工作应力分布 既有侧面角焊缝又有正面角焊缝的搭接接头称为联合角焊缝搭接接头。在只有侧面角焊缝焊成的搭接接头中，母材金属断面上的应力分布不均匀（见图 2-18），例如，横截面 A—A 的焊缝附近就有最大的正应力 σ_{\max} 分布，其应力集中非常严重。增添正面角焊缝后的应力分布见图 2-19。在 A—A 截面上正应力分布较为均匀，最大切应力 τ_{\max} 降低，致使在 A—A 截面两端点上的应力集中得到改善。由于正面角焊缝承担一部分外力，以及正面角焊缝比侧面角焊缝刚度大、变形小，所以侧面角焊缝的切应力也得到改善。为此在设计搭接接头时，如增添正面角焊缝，不但可以改善应力分布，还可以缩短搭接长度，图 2-19 为联合角焊缝的应力分布。

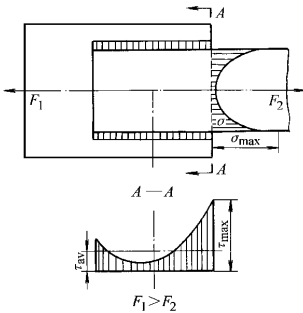


图 2-18 侧面角焊缝的工作应力分布

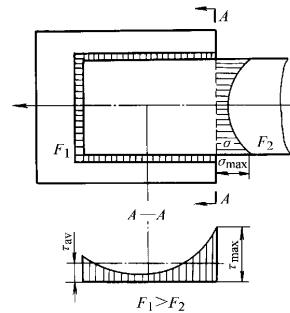


图 2-19 联合角焊缝的应力分布

(4) 盖板接头中的工作应力分布 盖板接头有双盖板搭接和单盖板搭接两种。仅用侧面角焊缝连接的盖板接头见图 2-20a，在盖板范围内各横截面正应力 σ 的分布极不均匀，靠近侧面角焊缝的部位应力最大，远离焊缝并在构件的轴线位置上应力最小。增添正面角焊缝连接的盖板接头见图 2-20b，其各横截面正应力的分布得到明显改善，应力集中大大降低。但是，这种接头在承受动载荷的结构中疲劳强度极低，因而盖板接头还是少用为好。

在各种角焊缝构成的搭接接头中，实验证明，在相同的焊脚尺寸条件下，单位长度正面角焊缝的强度较侧面角焊缝高，而单位长度斜向角焊缝的强度介于二者之间。

综上所述，各种电弧焊接头，都有不同程度的应力集中。实践证明，并不是在所有情况下应力集中都将影响强度。当材料具有足够的塑性时，结构在静载破坏之前就有显著的塑性变形，应力集中对其强度无影响。例如侧面搭接接头在加载时，如果母材和焊缝金属都有较

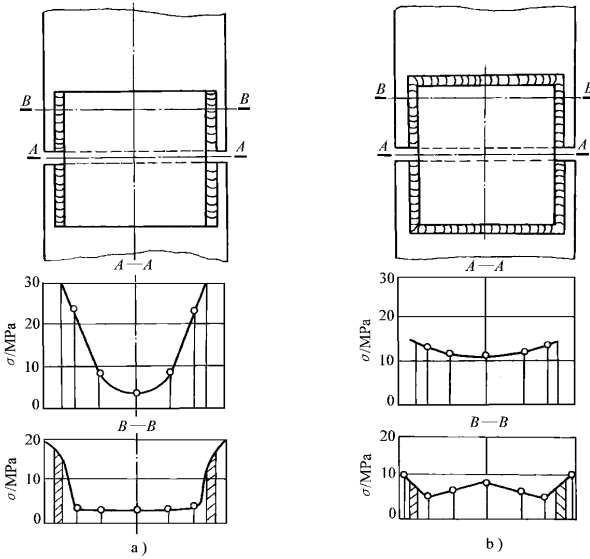


图 2-20 加盖板接头的应力分布

好的塑性，开始焊缝工作于弹性极限内，其切应力的分布是不均匀的，如图 2-21 所示。继续加载，焊缝的两端点达到屈服点 (τ_s)，则该处应力停止上升，而焊缝中段各点的应力尚未达到 τ_s ，故应力随着加载继续上升，到达屈服点的区域逐渐扩大，应力分布曲线变平，最后各点都达到 τ_s 。如再加载，直至使焊缝全长同时达到强度极限，最后导致破坏。这说明接头在塑性变形的过程中能发生应力均匀化，只要接头材料具有足够的塑性，应力集中对静载强度就没有影响。

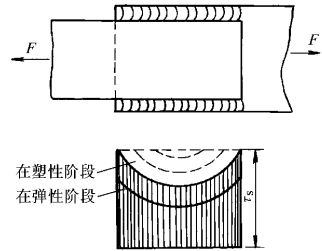


图 2-21 侧面搭接接头的工作应力均匀化

第三节 焊接接头的静载强度计算

一、工作焊缝和联系焊缝

任何一个焊接结构上都有若干条焊缝，根据其传递载荷的方式和重要程度，一般可分为两种：一种焊缝与被连接的元件是串联的，它承担着传递全部载荷的作用，即焊缝一旦断裂，结构就立即失效，这种焊缝称为工作焊缝，见图 2-22a、b，其应力称为工作应力；另一种焊缝与被连接的元件是并联的，它仅传递很小的载荷，主要起元件之间相互联系的作用，焊缝一旦断裂，结构不会立即失效，这种焊缝称为联系焊缝，见图 2-22c、d，其应力称为联系应力。在结构设计时无需计算联系焊缝的强度，只需计算工作焊缝的强度。对于具有双重性的焊缝，它既有工作应力又有联系应力，则只计算工作应力，而不考虑联系应力。

二、焊接接头强度计算的假设

焊接接头的强度计算和其他结构的强度计算相同，均需要计算在一定载荷作用下产生的应力值。但是焊接接头的应力分布，尤其是角焊缝构成的 T 形接头和搭接接头等的应力分布非常复杂，精确计算接头的强度是困难的，常用的计算方法都是在一些假设的前提下进行的，称之为简化算法。在静载条件下为了计算方便常作如下假设：

1) 残余应力对接头强度没有影响。

2) 焊趾处和余高处的应力集中对接头强度没有影响。

3) 接头的工作应力是均布的，以平均应力计算。

4) 正面角焊缝与侧面角焊缝的强度没有差别。

5) 焊脚尺寸的大小对角焊缝的强度没有影响。

6) 角焊缝都是在切应力的作用下被破坏，故按切应力计算强度。

7) 角焊缝的破断面（计算断面）在角焊缝截面的最小高度上，其值等于内接三角形高 a ，见图 2-23， a 称为计算高度，直角等腰角焊缝的计算高度：

$$a = \frac{K}{\sqrt{2}} \approx 0.7K$$

8) 余高和少量的熔深对接头的强度没有影响，但是，在采用熔深较大的埋弧焊和 CO_2 气体保护焊时，应予以考虑，见图 2-23。角焊缝计算断面高度 a 为：

$$a = (K + p) \cos 45^\circ$$

当 $K \leq 8\text{mm}$ 时，可取 a 等于 K ；当 $K > 8\text{mm}$ 时，可取 $p = 3\text{mm}$ 。

三、电弧焊接头的静载强度计算

静载强度计算方法目前仍然采用许用应力法，而接头的强度计算实际上是计算焊缝的强度。因此，强度计算时的许用应力值均为焊缝的许用应力。

电弧焊接头静载强度计算的一般表达式为：

$$\sigma \leq [\sigma'] \text{ 或 } \tau \leq [\tau']$$

式中， σ 、 τ 为平均工作应力； $[\sigma']$ 、 $[\tau']$ 为焊缝的许用应力。下面分析各类接头的静载强度计算式及其应用。

1. 对接接头的静载强度计算

计算对接接头的强度时，可不考虑焊缝余高，所以计算基本金属强度的公式完全适用于计算这种接头。焊缝计算长度取实际长度，计算厚度取两板中较薄者。如果焊缝金属的许用应力与基本金属相等，则可不进行强度计算。

全部焊透的对接接头的各种受力情况见图 2-24。图中 F 为接头所受的拉（或压）力， F_s 为切力， M_1 为平面内弯矩， M_2 为垂直平面的弯矩。

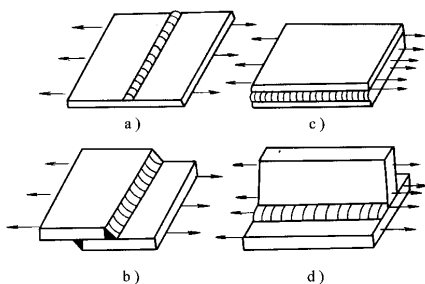


图 2-22 工作焊缝和联系焊缝

a)、b) 工作焊缝 c)、d) 联系焊缝

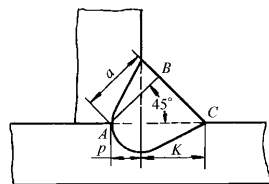


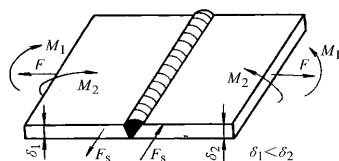
图 2-23 深熔焊的角焊缝

对接接头在各种受力情况下的静载强度计算公式如下：

(1) 受拉或受压对接接头的静载强度计算

受拉时

$$\sigma_t = \frac{F}{L\delta_1} \leq [\sigma'_t] \quad (2-1)$$



受压时

$$\sigma_p = \frac{F}{L\delta_1} \leq [\sigma'_p]$$

式中 σ_t 、 σ_p ——接头受拉或受压时焊缝中所承受的工作应力 (MPa)；

F ——接头所受的拉力或压力 (N)；

L ——焊缝长度 (mm)；

δ_1 ——接头中较薄板的厚度 (mm)；

$[\sigma'_t]$ ——焊缝受拉或受弯时的许用应力 (MPa)；

$[\sigma'_p]$ ——焊缝受压时的许用应力 (MPa)。

图 2-24 对接接头受力情况

例 1 两块板厚为 5mm、宽为 500mm 的钢板对接在一起，两端受 284000N 的拉力，材料为 Q235-A 钢， $[\sigma'_t] = 142\text{MPa}$ ，试校核其焊缝强度。

解 已知 $F = 284000\text{N}$ ， $L = 500\text{mm}$ ， $\delta_1 = 5\text{mm}$ ， $[\sigma'_t] = 142\text{MPa}$ ，代入式 (2-1) 得

$$\sigma_t = \frac{F}{L\delta_1} = \frac{284000\text{N}}{500\text{mm} \times 5\text{mm}} = 113.6\text{MPa} < [\sigma'_t]$$

所以该对接接头焊缝强度满足要求，结构工作时是安全的。

(2) 受剪切对接接头的静载强度计算

$$\tau = \frac{F_s}{L\delta_1} \leq [\tau'] \quad (2-2)$$

式中 F_s ——接头所受的切力 (N)；

L ——焊缝长度 (mm)；

δ_1 ——接头中较薄板的厚度 (mm)；

τ ——接头焊缝中所承受的切应力 (MPa)；

$[\tau']$ ——焊缝许用切应力 (MPa)。

例 2 两块板厚为 10mm 的钢板对接，焊缝受 29300N 的切力，材料为 Q235-A 钢，试设计焊缝的长度 (钢板宽度)。

解 由式 (2-2) 可得

$$L \geq \frac{F_s}{\delta_1 [\tau']}$$

由已知条件知 $F_s = 29300\text{N}$ ， $\delta_1 = 10\text{mm}$ ；由表 2-3 中查得 $[\tau'] = 93\text{MPa}$ ，代入上式得

$$L \geq \frac{29300\text{N}}{10 \times 93\text{MPa}} = 29.9\text{mm}$$

取 $L = 32\text{mm}$ 。即当焊缝长度 (板宽) 为 32mm 时，该对接接头焊缝强度能满足要求。

(3) 受弯矩对接接头的静载强度计算

1) 受板平面内弯矩 M_1

$$\sigma = \frac{6M_1}{\delta_1 L^2} \leq [\sigma'_t] \quad (2-3)$$

2) 受垂直板面弯矩 M_2

$$\sigma = \frac{6M_2}{\delta_1^2 L} \leq [\sigma'_t] \quad (2-4)$$

式中 M_1 ——板平面内弯矩 (N·mm);

M_2 ——垂直板面弯矩 (N·mm);

L ——焊缝长度 (mm);

δ_1 ——接头中较薄板的厚度 (mm);

σ ——接头受弯矩作用时焊缝中所承受的工作应力 (MPa);

$[\sigma'_t]$ ——焊缝受拉或受弯时的许用应力 (MPa)。

例3 两块相同厚度的钢板对接接头, 材料为 Q345, 钢板宽度为 300mm, 焊缝质量用普通方法检查, 受垂直板面弯矩 3000000N·mm, 试计算焊缝所需的厚度 (板厚)。

解 由式 (2-4) 可得

$$\delta_1 \geq \sqrt{\frac{6M_2}{L[\sigma'_t]}}$$

由已知条件 $M_2 = 3000000\text{N}\cdot\text{mm}$, $L = 300\text{mm}$, 由表 2-3 中查得 $[\sigma'_t] = 201\text{MPa}$ 。代入上式得

$$\delta_1 \geq \sqrt{\frac{6 \times 3000000}{300 \times 201}} \text{mm} = 17.2\text{mm}$$

取 $\delta_1 = 18\text{mm}$, 即当焊缝厚度 (板厚) 为 18mm 时, 该对接接头焊缝强度能满足要求。

2. 搭接接头的静载强度计算

(1) 受拉、压的搭接接头静载强度计算 各种搭接接头的受力情况见图 2-25。由于焊缝和受力方向相对位置的不同, 可分成正面搭接受拉或压、侧面搭接受拉或压和联合搭接受拉或压三种焊缝。

三种焊缝强度的计算公式如下:

1) 正面搭接受拉或压

$$\tau = \frac{F}{1.4KL} \leq [\tau']$$

2) 侧面搭接受拉或压

$$\tau = \frac{F}{1.4KL} \leq [\tau']$$

3) 联合搭接受拉或压

$$\tau = \frac{F}{0.7K\Sigma L} \leq [\tau']$$

式中 F ——搭接接头所受的拉力或压力 (N);

K ——焊脚尺寸 (mm);

L ——焊缝长度 (mm);

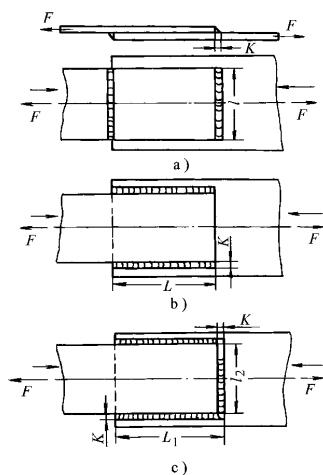


图 2-25 各种搭接接头受力情况
a) 正面搭接受拉或压 b) 侧面搭接受拉或压 c) 联合搭接受拉或压

ΣL ——正、侧面焊缝总长度 (mm);

τ ——搭接接头角焊缝所承受的切应力 (MPa);

$[\tau']$ ——焊缝金属的许用切应力 (MPa)。

例 4 将 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的角钢用角焊缝搭接在一块钢板上, 见图 2-26。受拉伸时要求与角钢等强度, 试计算接头的合理尺寸 K 和 L 应该是多少?

解 从材料手册查得角钢断面面积 $A = 19.2\text{cm}^2$;
许用拉应力 $[\sigma'_t] = 160\text{MPa} = 160\text{N/mm}^2$, 焊缝许用切应力 $[\tau'] = 100\text{MPa} = 100\text{N/mm}^2$

角钢的允许载荷 $[F] = A[\sigma'_t] = 1920\text{mm}^2 \times 160\text{N/mm}^2 = 307200\text{N}$ 。

假定接头上各段焊缝中切应力都达到焊缝许用切应力值, 即 $\tau = [\tau']$, 若取 $K = 10\text{mm}$, 用焊条电弧焊, 则所需的焊缝总长度为

$$\Sigma L = \frac{[F]}{0.7K[\tau']} = \frac{307200\text{N}}{0.7 \times 10\text{mm} \times 100\text{N/mm}^2} = 439\text{mm}$$

角钢一端的正面角焊缝 $L_3 = 100\text{mm}$, 则两侧焊缝总长度为 339mm 。根据材料手册查得角钢的拉力作用线位置 $e = 28.3\text{mm}$, 按杠杆原理, 则侧面角焊缝 L_2 应承受全部侧面角焊缝应该承受载荷的 28.3%。故

$$L_2 = 339 \times \frac{28.3}{100}\text{mm} = 96\text{mm}$$

另外一侧的侧面角焊缝长度应该是:

$$L_1 = 339 \times \frac{100 - 28.3}{100}\text{mm} = 243\text{mm}$$

取 $L_1 = 250\text{mm}$, $L_2 = 100\text{mm}$

(2) 受弯矩的搭接接头静载强度计算

1) 分段算法 分段算法的示意图见图 2-27, 外加力矩 M 必须与水平焊缝产生的内力矩 M_H 和垂直焊缝产生的内力矩 M_V 之和相平衡, 即: $M = M_H + M_V$

当焊缝不是深熔焊缝, 其应力值达到 τ 时

水平焊缝中的力矩

$$M_H = \tau \times 0.7KL(h + K)$$

垂直焊缝中的力矩

$$M_V = \tau \times \frac{0.7Kh^2}{6}$$

$$M = M_H + M_V = \tau \left[0.7KL(h + K) + \frac{0.7Kh^2}{6} \right]$$

$$\tau = \frac{M}{0.7KL(h + K) + \frac{0.7Kh^2}{6}} \leq [\tau']$$

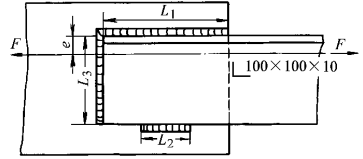


图 2-26 角钢与钢板组成搭接接头

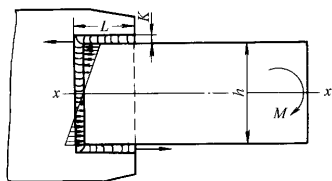


图 2-27 分段计算法示意图

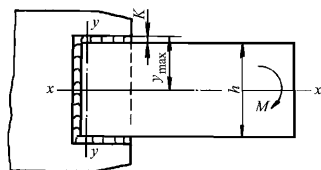


图 2-28 轴惯性矩计算法示意图

2) 轴惯性矩计算法 轴惯性矩计算法的示意图见图 2-28。计算的基本假设是焊缝中某点的应力值与其至中性轴的距离成正比, 因此, 最大应力值将出现在离中性轴最远的 y_{\max} 处。计算公式为

$$\tau_{\max} = \frac{M}{I_x} y_{\max} \leq [\tau']$$

式中 M ——作用在接头上的外加弯矩 ($\text{N}\cdot\text{mm}$);

y_{\max} ——焊缝至 x 轴的最大距离 (mm);

I_x ——焊缝对 x 轴的计算惯性矩 (mm^4);

τ_{\max} ——焊缝受到的最大切应力 (MPa);

$[\tau']$ ——焊缝的许用切应力 (MPa)。

例 5 由三面角焊缝组成的悬臂搭接接头见图 2-29。当焊缝总长为 500mm 、 $h = 300\text{mm}$ 、 $K = 10\text{mm}$ 时, 在梁的端头作用一弯矩 $M = 28000000\text{N}\cdot\text{mm}$, 试计算接头是否安全经济, 并比较两种计算方法的结果。焊缝金属的许用切应力 $[\tau'] = 100\text{MPa}$ 。

解 (1) 分段计算法 由计算公式

$$\tau = \frac{M}{0.7KL(h+K) + \frac{0.7Kh^2}{6}} \leq [\tau']$$

根据原始数据 $M = 28000000\text{N}\cdot\text{mm}$, $K = 10\text{mm}$, $h = 300\text{mm}$, $L = \frac{500 - 300}{2}\text{mm} = 100\text{mm}$ 。

将这些数据代入上式得

$$\tau = \frac{28000000}{0.7 \times 10 \times 100(300 + 10) + \frac{0.7 \times 10 \times 300^2}{6}} \text{N/mm}^2 = 86.96\text{N/mm}^2 = 86.96\text{MPa}$$

$$86.96\text{MPa} < 100\text{MPa} \text{ 即 } \tau < [\tau']$$

所以接头是安全的。

(2) 轴惯性矩计算法 由计算公式 $\tau_{\max} = \frac{M}{I_x} y_{\max}$

根据原始数据 $y_{\max} = \frac{h}{2} + K = \left(\frac{300}{2} + 10\right)\text{mm} = 160\text{mm}$, $M = 28000000\text{N}\cdot\text{mm}$

I_x 的计算

$$I_x = I_{x_1} + 2I_{x_2}$$

$$I_{x_1} = \frac{hK^3}{12} = \frac{300 \times 10^3}{12} = 2.5 \times 10^4 \text{mm}^4$$