



参加国际焊接年会

技术考察总结

哈尔滨焊接研究所

一九七五年二月

前 言

国际焊接学会 (IIW), 74年7月14~22日于匈牙利的首都布达佩斯举行了第二十七届年会。中国机械工程学会派出了由一机部、冶金部、交通部、燃化部、三机部及高等院校等组成的一行十三人的焊接代表团, 出席了会议。

代表团在人民外交和技术活动中, 受到了一次阶级斗争和路线斗争锻炼, 取得了一定的成绩。

年会上, 我国提出了两篇论文: 一篇是哈尔滨锅炉厂和哈尔滨焊接研究所的“锅炉省煤器蛇形管生产自动线上的摩擦焊”; 另一篇是沈阳金属研究所的“关于电子束焊接的工艺参数的研究”。有关技术委员会对这两篇论文进行了讨论, 对我国摩擦焊的发表反映较好, 并向我代表团表示祝贺。

这届年会中, 除十六个技术委员会举行了学术讨论外, 还举行了《石油天然气储罐焊接》的报告会。

我代表团通过这次会议并通过参观工厂和研究所等活动, 重点地了解了以下几方面的问题:

1. 铁路钢桥的焊接;
2. 热套压力容器的生产, 产生焊接缺陷的机理及检查技术;
3. 特种焊接技术的发展动向;
4. 气体保护焊工艺和设备。

代表团回国后就上述技术问题, 进行了专题总结。考虑到石油天然气储罐焊接, 年会有专题论文集 “Welding of Storage Tanks for Oil and Gas Industries”, 故在本总结中从略。

目 录

前 言

一、关于铁路钢桥的焊接问题	(1)
二、热套容器	(12)
三、断裂力学的应用	(15)
四、气体保护焊	(20)
五、特种焊接技术	(31)
1. 激光焊接和切割	
2. 电子束焊接	
3. 等离子焊接	
六、焊缝无损检验	(42)
七、直流弧焊电源	(47)
八、焊条生产	(49)

一、关于铁路钢桥的焊接问题

铁路钢桥的发展方向

在桥梁的发展史上,长期以来,一直采用铆钉结构。随着焊接技术的发展和高强度螺栓的制造成功,焊接和栓焊桥梁逐渐登上了历史舞台。

这次就桥梁的发展方向问题,和英国、西德、日本、匈牙利代表交换了看法。以上国家生产实践证明,长跨度铁路桥梁的发展方向,是采用栓焊结构。栓焊钢桥和铆接钢桥比较,具有节约钢材、加快工程速度、改善劳动条件、外形美观等优点。同时避免了全焊桥梁的安装定位困难、野外高空焊接质量不易保证、安装工干扰焊工工作等缺点。在上述国家里,30米以上的钢桥,用栓焊结构;30米以下的桥梁,用全焊结构,铆接基本已被淘汰。匈牙利甘兹马法格工厂介绍,在1964年以前,还生产铆焊钢桥,自1965年以后,该厂生产的钢梁就由过去的铆接或铆焊桥梁,全部改为栓焊桥梁了。现在厂内正在生产两座桥梁,一座是南斯拉夫多脑河公路桥钢梁,全长460米,主跨160米;另一座是铁路钢桥,四等跨连续桁架板梁结构,全部是栓焊的。日本也正是基于上述理由,本四桥上部结构决定采用栓焊结构。全长6600米,主跨1580米,材料用强度极限为80公斤/毫米²的HT-80钢,钢板厚度为75至100毫米。

高强度螺栓断裂问题

在年会举行期间,就高强度螺栓断裂问题,亦与一些国家的代表交换了看法。他们的实践证明,高强度螺栓在技术上是没有任何问题的。他们过去在应力用得太大时,也有个别螺栓产生延迟断裂。英国代表介绍,他们国家的螺栓断裂率约占1/10000,断裂原因是清楚的,改进的办法也是有的。但英国和日本工程技术人员提出,在他们国家里,没把它当作严重问题,因为对安全没有影响,发现断了就补上。他们认为断裂原因是氢脆或氢的应力腐蚀。从他们采取的措施来看,英国认为氢脆是主要的,日本认为氢的应力腐蚀是主要的。解决的办法,首先是限制高强度螺栓的极限强度,不要过高。日本常用的高强度螺栓有F-13T($\sigma_b=160\sim130$ 公斤/毫米²),和F-11T($\sigma_b=110\sim130$ 公斤/毫米²),F-13T常有断裂,而F-11T则很少断裂。所以在日本就限制高强度螺栓的最大极限强度不得大过110公斤/毫米²。西德原来的高强度螺栓有12K(极限强度130公斤/毫米²),和10K(极限强度110公斤/毫米²),1971年结构规范由于此原因,取消了12K。英国也是同样,限制高强度螺栓的最高极限强度约为105公斤/毫米²。其次,是采取去氢防氢办法,减少氢在钢体内所起的不利影响。英国主张采用保温去氢的办法,防止氢脆;日本主张用材料喷涂于螺栓表面,防止外部氢的侵入,减少其造成氢的应力

腐蚀可能。

从金属学来讲, 上述的氢脆现象, 一般发生在极限强度在170公斤/毫米²以上的钢材。这种钢材塑性差, 在受到强大的拉力后, 晶格变位。在晶格畸变位置, 氢原子积聚, 组成氢分子, 造成钢体内很大的应力; 当外力稍有变动时, 就失去平衡产生氢脆。氢的应力腐蚀是在钢材内产生很细小的裂纹时, 钢材外的氢在裂纹的尖端渗透积聚, 使钢材内部产生很大的内力; 当外力稍有变动时, 即产生脆断。综合上述情况不难得知, 氢脆是由钢体内的残余氢引起的, 而氢的应力腐蚀是由于钢体外部的氢侵入引起的。因此, 英国保温 (150~250℃保温8小时以上), 日本喷涂防氢的重点是防外部氢的影响。

关于铁路栓焊钢桥在设计、制造和研究工作中的一些具体问题

高强度钢在栓焊钢桥里的应用 桥梁向大的方向发展, 设法减轻自重, 节约钢材, 成为世界各国研究的问题。近年来, 日本对这方面也正在进行工作。日本生产的HT-60和HT-80钢都已经在桥梁上试用, 南港大桥K型连续梁, 跨度235+510+235米, 材料为HT-80, 最大板厚75毫米, 高强度螺栓直径为30毫米, 1973年建成。英国的设计规范里就规定有极限强度60公斤/毫米²及80公斤/毫米²钢的许用应力。美国的A-514钢 (极限强度80公斤/毫米²) 也已列入规定使用。西德钢结构协会, 也将StE70 (极限强度80~95公斤/毫米²) 正式列入使用规范。大跨度桥梁恒载大, 与小跨度桥梁比较, 疲劳影响小, 使用高强度钢, 经济效果好。

国外高强钢用在桥梁时, 往常根据结构的受力和要求不同, 与低强度钢混合使用。这次会上, 日本建议板梁里也这样做。简支板梁桥下翼缘受强大的拉力, 为了经济使用高强度HT-80钢, 为了上翼缘及腹板稳定, 分别用HT-60和SS41钢。强度计算时, 腹板和翼缘连接处, 超过屈服点时, 将超过部份扣除不计,

钢材的冲击韧性 各国弹性脆断力学的研究发展虽然很快, 但一些新的概念还没有应用到桥梁设计里来。各国为保证钢结构在低温条件下正常工作, 目前还是以低温冲击韧性值为标准。冲击韧性值的规定, 对中等强度的钢材规定比较一致。厚度大于19毫米时, 最低使用温度, V型试件的最小冲击值, 不得小于3.5公斤·米/厘米²。对高强度钢 (相当于50公斤/毫米²及以上的钢材) 要求就不一致了。荷兰要求在-10℃时, St-52号钢的V型缺口试件的最小冲击值, 不得小于6.9公斤·米/厘米²; 匈牙利要求St-52, 当厚度为16~28毫米, -20℃时, V型试件冲击值不得小于5公斤·米/厘米²; 而在28毫米以上时, -50℃, 不得小于3.5公斤·米/厘米²。美国规定, 按厚度分成三级: 厚度<16毫米时, 0℃, 冲击值≥4.8公斤·米/厘米²; 厚度16~18毫米, 冲击值≥4.8公斤·米/厘米²; 厚度>38毫米, 冲击值≥55公斤·米/厘米²。英国也按厚度不同分四级: 厚度<19毫米, 不做冲击试验; 19毫米≤t<32毫米, 0℃, 冲击值≥3.5公斤·米/厘米²; 32≤t≤50毫米, -15℃, 冲击值3.5公斤·米/厘米²; 50毫米<t, -15℃, 冲击值5公斤·米/厘米²。日本本四桥钢材的低温冲击值要求: HT-60, -17℃, 冲击值≥3.5公斤·米/厘米²; HT-80, -17℃, 冲击值≥4.8公斤·米/厘米²。本四桥地

区的最低温度约为 0°C 。西德1974年钢结构规范规定stE47 (极限强度 $54\sim 74$ 公斤/毫米²), -20°C , 冲击值 4.5 公斤·米/厘米²; 0°C , 冲击值 5.5 公斤·米/厘米²; $+20^{\circ}\text{C}$, 冲击值 6.5 公斤·米/厘米²。StE70 (极限强度 $80\sim 95$ 公斤/毫米²), -60°C , 冲击值 4 公斤·米/厘米²; -40°C , 冲击值 5 公斤·米/厘米²; -20°C , 冲击值 6 公斤·米/厘米²; 0°C , 冲击值 7 公斤·米/厘米²; $+20^{\circ}\text{C}$, 冲击值 7 公斤·米/厘米²。

从上面调查了解的数字看, 情况很乱, 这是自然现象, 因为各国都是根据自己的钢材条件和地区温度要求来决定这一数值的, 条件不同, 所定出的数值也就不一样了。但从这些凌乱的数值里, 可以总结出各国定冲击值的几条原则:

1. 为验证结构件在低温环境里安全工作, 目前世界各国还是以规定钢材的低温冲击值作为标准。弹性脆断力学终将代替这个指标, 但目前尚在试验研究中;
2. 中等强度钢材, V型缺口冲击试件, 低温冲击值, 不得小于 3.5 公斤·米/厘米²;
3. 强度高的钢材, 冲击值比强度低的钢材要求高;
4. 厚度大的钢材比厚度小的钢材, 冲击韧性要求高;
5. 最低温度的规定值, 可以根据地区而定, 如结构的使用地点, 不能固定时, 应考虑全国最低温度, 若结构根本不能改变位置时, 则可以考虑地区温度;
6. 各国对钢材的时效要求, 并不明确。

高强度钢的设计许用应力问题 钢材的屈服强度和抗拉强度, 由于钢材的强度等级的提高, 差距越来越小。设计许用应力采用多少最为合理, 是设计中遇到的问题。国际上对这个问题的处理也各不相同。欧洲主张一律以屈服强度为基础, 如英国认为, 钢材应保证最低屈服强度, 设计应力都以屈服强度为基础, 一律除以安全系数 1.7 , 作为设计许用应力。荷兰在油罐和压力容器设计中, 也考虑抗拉强度的问题, 认为在使用高强度钢材时, 由于屈服强度与抗拉强度之比值越来越大, 设计许用应力除考虑以屈服强度为基础的安全系数外, 应同时考虑以抗拉强度为基础的总安全度。油罐设计时, 许用应力的安全系数为 1.5 , 总安全度 $1.5 \times \frac{\text{抗拉强度}}{\text{屈服强度}}$ 不小于 2.0 。日本在南港大桥和川崎钢铁公司千页岛工厂的试验板梁桥, 在使用 HT-60 和 HT-80 级钢材时, 将许用应力安全系数提高到 $1.8\sim 1.9$, 保持安全度为 2.2 左右。

铁路钢桥的新型结构(IIW·DOC·XV—361—74) 由于世界上栓焊技术、炼钢技术和计算技术的发展, 桥梁结构的新型式越来越多。在公路钢桥方面, 大量发展箱型板梁桥结构, 目的是将桥面板、桥面系、主桁及其纵平联接系的重复传力系统, 合并到一起, 充分发挥材料的能力, 以节约钢材, 增大抗扭能力。近十年来, 铁路桥梁结构, 在欧洲也有一个新的动向, 是在钢箱型梁的基础上, 进一步发展桁架钢板梁联合结构。这就是将主桁架弦杆、桥面系和平联栓焊在一起, 把重的传力系统简化合并, 能节约钢材和增加横向刚度。匈牙利甘兹马法格工厂正在生产的四等跨连续铁路钢桥, 总长为 210 米, 就是这种结构的代表 (图1~4)。



图1 铁路桥的侧视图

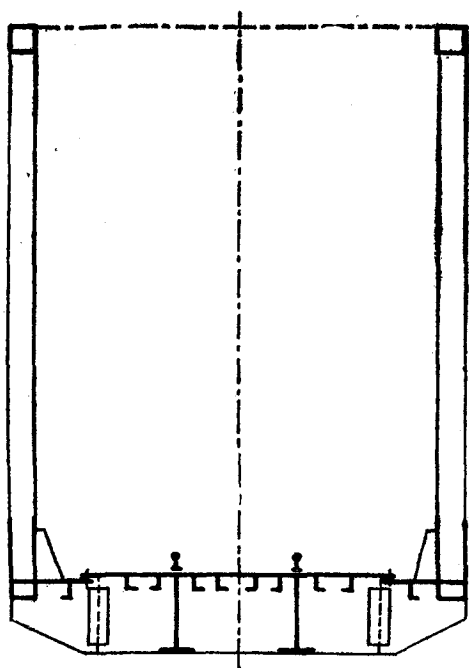


图2 桥的横断面图

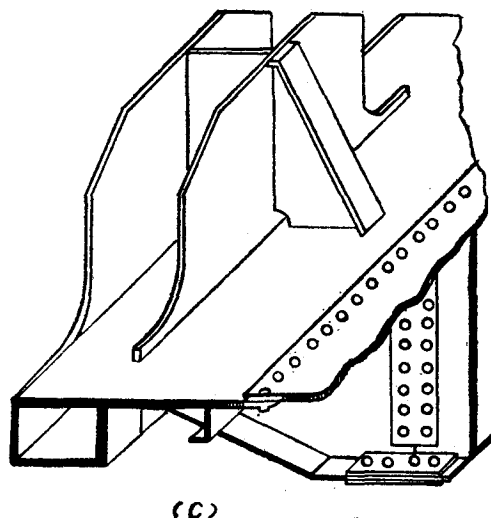
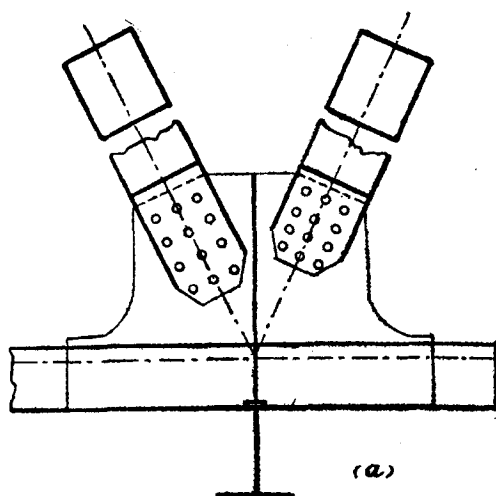
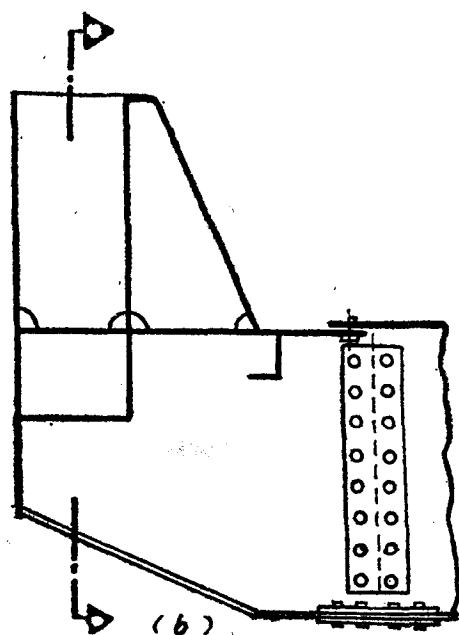


图3 正反异性桥面板连接

焊接箱型薄腹钢板梁的腹板厚度问题
(IIW.DOC.VII-734-74) 焊接箱型板梁桥的特点是腹板薄, 否则就达不到节约钢材的目的。薄腹板梁中有两个问题需要研究: 一是腹板的稳定问题; 另一个是由于钢板很薄, 焊后虽经整形, 腹板平面内, 仍有不可避免的凸凹不平现象, 以致在承受荷载时, 受压区板面往返挠曲, 产生受压区焊缝处的

疲劳裂缝。为了了解这个问题, 日本大阪大学和川崎钢铁公司, 建筑钢材研究所共同进行了六根8.3米梁的疲劳试验, 试验梁的腹板用SM41 ($\sigma_y 31.6$ 公斤/毫米², $\sigma_b 44.5$ 公斤/毫米²), 上翼缘受压板用SM58Q ($\sigma_y 59.4$ 公斤/毫米², $\sigma_b 63.2$ 公斤/毫米²), 下

受拉板用HT—80($\sigma_y 74.5$ 公斤/毫米², $\sigma_b 83.0$ 公斤/毫米²), 加劲肋用M50A($\sigma_y 38.8$ 公斤/毫米², $\sigma_b 55.0$ 公斤/毫米²)。试验梁的腹板高厚比, 分别为200、300、400。试验目的: ①受压受拉焊缝, 是否会由于腹板太薄不平整, 引起疲劳破坏; ②由于受拉选用了高强度钢, 而腹板选用的是中强度钢, 当受拉的应力用足

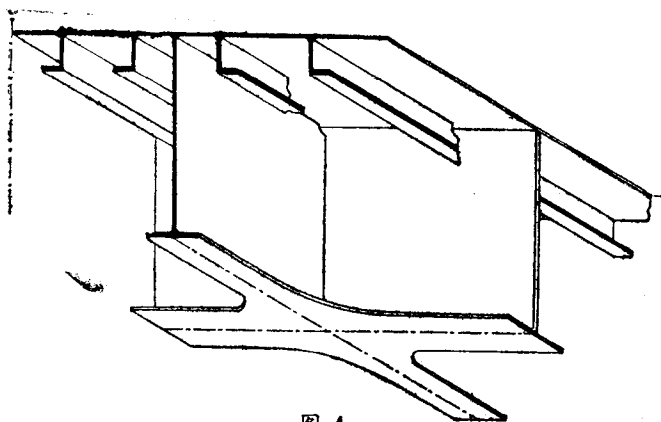


图 4

后, 靠近受拉的腹板将会产生屈服或接近屈服应变, 研究桥梁是否会由于这个原因, 承受动载能力下降。试验结果: ①梁的疲劳强度, 是横向加劲肋在受拉区端部控制; ②混合材料制成的板梁结构, 强度不受影响; ③为防止受压受拉角焊缝附近产生疲劳裂缝, 可以用规定高厚比(腹板)来保证; ④混合材料制成的板梁和单一材料制成的板梁, 高厚比的计算办法, 可以用下列同样公式:

$$\text{有横向加劲肋时, } \beta = \frac{h}{\delta} = \frac{9680}{\sqrt{\sigma_y}};$$

$$\text{有纵向加劲肋时, } \beta = \frac{h}{\delta} = \frac{19400}{\sqrt{\sigma_y}}$$

式中: σ_y 为腹板钢材的屈服强度。

上式已为美国公路工程协会(AASHO)接受, 列入1971技术规程。按上式规定选用腹板, 既能满足腹板的受压稳定, 同时也不会发生受压焊缝的疲劳破坏。根据上式规定, 三号钢的最大腹板高厚比, 有横向加劲肋时 $\beta < 200$, 有纵横向加劲肋时 $\beta < 400$ 。16Mn钢桥的最大高厚比分别为165及335。截面不对称的板梁,

$$\beta = \frac{2yc}{\delta}, \text{ yc 是中立轴至受力最远一边的距离。}$$

据日本代表介绍, 从试验结果看, 用三号钢做腹板制造的板梁, 最大高厚比用到400是可以的。但日本过去采用最多的是 $\beta = 170$ 的板梁, 目前正试制 $\beta = 130$ 的。 $\beta = 400$ 的没有做过。腹板的焊后整形采用均匀加温的办法。

桥梁制造 从匈牙利桥梁厂所见和日本代表交谈, 了解国外焊接桥梁生产, 为了提高生产效率, 采用焊接转胎是措施之一, 转胎的构造很简单。专用工件有专用转胎, 可以减轻天车的工作量, 一个车间能同时展开多项工件的焊接。钻孔工艺, 日本工厂发展数学控制钻床, 焊前钻小孔, 焊后扩孔的工艺仍在采用。匈牙利工厂里未见用自动化的钻孔工艺, 绝大部份都是用扩孔工艺。国外整形多采用热矫形。匈牙利在车辆制造中, 使用电磁铁和加热结合使用的办法, 方法较新鲜, 它能适用范围仅限于1.5毫米的薄板, 但也为我们研究较厚板的整形提供了途径, 尤其是对薄腹板梁的腹板整形有参考价值。

桥梁焊接技术的发展, 质量检查手段很重要。这次参加会议的瑞典人介绍, 他们普遍采用气体绝缘的300~400千伏X光机, 它具有体积小、重量轻的特点, 灵敏度提高到0.7%。关于超声波探伤方法, 近年来国外已开始将部件的缺陷显示成可见的图像的办法, 所谓P扫描。丹麦介绍一种装置, 它可以把焊缝的缺陷显示在平面和断面两个图像上, 能更直观更准确地判断缺陷的位置和大小。除此之外, 各种自动化探伤方法, 记录方法, 也是国外发展较快的技术之一, 它可以排除操作者主观判断, 提高重现性和检查速度。

栓焊钢梁的节点处理 栓焊钢梁在工厂制造时, 要保证焊接质量, 同时还应保证对高强度螺栓节点的处理质量。匈牙利甘兹马法格工厂对节点的处理, 在各国中是效果最好的。所谓效果好, 主要是防锈能力好、摩擦系数高。他们的方法, 即文献中所介绍的Aufdronen方法。他们的工艺, 基本是用喷丸打毛除锈, 然后用喷涂铝或锌防锈。灰口铸铁丸的直径1.2~5.0毫米, 小于1.2的铁丸, 只用于除锈, 喷丸用的风压为6~7公斤/厘米², 经喷丸除锈打毛的钢板表面, 比用喷砂处理的钢板表面粗糙得多。钢板喷涂铝或锌的厚度是60~80μ。锌或铝均是用氧-乙炔熔化, 通过高压氧喷涂。铝丝直径3毫米, 锌丝直径2.0毫米。喷涂时送丝速度是: 铝丝为3.5米/分, 锌丝为5.0米/分。喷铝钢板摩擦系数用0.7, 喷锌用0.65。

由于摩擦系数能保证较高的数值, 因此铁路栓焊钢梁, 连接多设在桁架节点之外的杆件上, 用的螺栓很少。至于喷锌有毒的问题, 只要工厂注意安全保护, 将通风设备搞好, 是不会影响工人健康的。

刨边问题 (IIW.DOC.XIII-744-74) 在桥梁焊接工作中, 为了保证焊接质量, 对切割边规定需要刨去2~3毫米的硬层, 这是费工时的工作。所以各国都研究改进切割的方法, 以达到焊前可以取消刨边。目前日本、匈牙利等国的桥梁制造工艺里, 都没有了刨边工艺。瑞典、荷兰在这次年会上都发表了对火焰切割钢板边的研究报告。

用火焰切割St-52钢板时, 板面含C量增加, Mn、Si等元素大部分烧损, 在表面产生一层0.03~0.06毫米的马氏体组织硬层, 其硬度随切割速度的增加而加大。为了改善金相组织, 他们研究各种预热方法。最经济有效的方法, 是在切割嘴的前面增设一预热火焰, 距离根据板厚和切割速度不同而不同。如切割速度均为250毫米/分, 板厚20毫米时, 距离85毫米; 板厚25毫米时, 距离为100毫米; 板厚35毫米时, 距离为145毫米。经过预热后, 切割面的马氏体组织硬层, 得到了改善, 硬度降低。疲劳试验证明, 正常情况时, 预热与不预热的钢板试验结果没有区别, 不预热的疲劳强度反而高。但经过冷作变形后的钢板, 情况就不同了。未预热的钢板, 冷拉变形1.5%, 板面即产生裂纹; 预热的钢板, 冷拉变形2.5%, 板面才产生裂纹; 所以经过冷拉变形2%的试件, 未预热的钢板, 疲劳强度下降很多。

厚板焊接 大跨度桥梁, 不可避免地要遇到厚板焊接问题。现在用于焊接厚板的方法有电渣焊、电子束焊、窄间隙焊和多丝埋弧焊或气体保护焊。电渣焊要求焊后正火处理, 桥梁工件太大, 办不到, 所以用不上。电子束焊, 现在国外最大功率的电子束焊机达100千瓦, 一次可焊成厚200毫米的碳钢板。这种焊接方法, 设备太复杂, 目前用在桥梁上还有一定的困难。

今年年会上还介绍了惰性气体粗丝(2.4~4.8毫米)脉冲焊接、厚板单面焊,双面成型等新工艺。因此用窄间隙焊接方法,研究用以解决桥梁中厚板焊接,是一个很有前途的方法。但目前桥梁厂一贯采用的是埋弧自动焊,一下改为窄间隙气体保护焊,工艺和设备解决起来不是轻而易举的事。过渡的办法还是多丝埋弧焊。

疲劳强度的研究 从今年第13委员会讨论研究的论文看,针对建筑结构的特点,疲劳试验方面的工作可以分四类:①根据结构对象,研究最佳焊接接头,这种接头受力情况最好,疲劳强度最高;②研究寻找优良的焊接方法,以提高钢材的焊后疲劳强度,如高强度钢在各国建筑结构中,逐步得到广泛应用,但高强度钢在焊接应力集中的地方,疲劳强度降低。为改善这种现象,从焊接上研究可以采用的措施。日本研究用钨极气体保护焊在手工焊的角焊缝焊趾加焊一次,改善焊缝的成型,可以提高横向角焊缝处的疲劳强度。这个方法目前应用于生产,尚存在一定问题,但这种改善疲劳强度的研究动向,值得我们注意;③为提高生产效率,改变工艺,对新工艺的产品进行疲劳强度鉴定。如荷兰、瑞典对取消焊接刨边的研究;④国外在进行的有累积损伤理论和疲劳裂缝启裂寿命和引裂寿命新的疲劳理论的研究:

(A)累积损伤理论,铁路桥梁和大多数结构,在正常运营时,都是承受的随机荷载,和试验室的常幅循环疲劳试验结果,差距很大。为解决这一问题,迈因纳首先提出直线累积损伤理论,这个理论提出的很早,但在具体应用中存在一定困难,所以扩广并不是那么快。这假说认为根据疲劳曲线,钢材在应力 S_1 单独作用下,破坏循环次数是 N_1 ,结构在一定的使用期间内,实际受到应力 S_1 循环数是 n_1 ,则结构受到应力 S_1 的损伤率为 $\frac{n_1}{N_1}$,每个应力对结构的损伤率总和为 $\sum \frac{n_i}{N_i}$ ($\sum \frac{n_i}{N_i}$ 不应大于1)。英国在铁路桥梁设计中,自1963年起已开始试用,日本尚在研究之中。他们采用程序试验,对一特定试件,进行多种等级的应力试验,证明这个理论近似的正确。应用这个理论设计,最终目的,是希望导致减轻结构的重量。

(B)疲劳裂缝的启裂寿命和裂缝扩展寿命,这个理论,主要是来自断裂力学。一个焊接结构里有缺陷裂纹时,应力达到一定数值,就会发生脆断;在应力没有达到这一一定数值时,就不会产生脆断。如果这个外力是动载,对这个结构的裂缝,就有一个启裂和裂缝扩展寿命问题。所谓疲劳启裂,就是一个结构里的缺陷,在承受某一重复荷载下,由原来静止不发展的状态,到开始活动有闭合的状态,这段时间,叫做启裂寿命。从启裂时开始,裂缝将逐渐发展长大,直至脆断,叫做裂缝扩展寿命。这方面的研究虽较复杂,但对实际工程很有实际意义。从这些研究可以进一步补充完善累积损伤理论;在设计中所引用的疲劳许用应力,采用若干是最合理的,可以进一步研究;根据缺陷大小,可以鉴定结构的使用年限;据使用年限的要求,可以定缺陷的标准。他们试验的步骤是:设一个有拉脉冲的杆件,在杆件内有一个缺陷,杆件宽为 $2b$,缺陷宽为 $2a$ (图5)。在一定荷载下启裂寿命,用射线检查测定。启裂后继续试验,记录裂缝发展长度和循环次数的关系。裂缝扩展速度可以用公式 $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ 表



图 5

示。式中： a = 裂缝尺寸大小； N = 循环次数； ΔK = 裂缝尖端应力场强度因子； C 与 m = 材料性质，受力状态及工作温度有关的系数。裂缝尖端应力强度因子可以写成与应力、试件尺寸及缺陷尺寸有关的方程式。如图 6 未焊透的裂缝尖端应力强度因子 ΔK 为：

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left(\text{Sec} \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$\sqrt{\text{厘米}^2}$$

$$0 < a < 0.86$$

$$\left[\text{或 } \Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \right]$$

式中： $\Delta \sigma$ = 疲劳试验时应力差数。

在一定的变荷载情况下，作出裂缝长度与循环次数的关系曲线，根据裂缝长度和 $\Delta \sigma$ ，可以求 ΔK ，将 ΔK 和 $\frac{da}{dN}$ 在座标纸上点上，用算术学统计，找出方程式里的 C 和 m 。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

$$\frac{da}{(\Delta K)^m} = C dN$$

$$\left[\frac{da}{\Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2}} \right]^m = C dN$$

$$\int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{\left[\Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \right]^m} = C \int_0^{N_1} dN$$

从上式可以求得裂缝由长度 a_0 至 a_1 ，引裂寿命多少。

断裂力学在桥梁方面应开展试验研究 由于高强度钢和焊接结构的发展，各国对弹性断裂力学的研究，越来越深入。但据了解，各国在焊接钢桥的设计里，还没有正式应用，而试验研究工作却在大量开展。用弹性断裂力学进行焊接钢桥的受拉部件设计，与目前的许用应力设计相比，要好得多。

弹性断裂力学的发展 第二次世界大战时焊接船的脆断事故，揭开了脆断力学在钢结构里研究发展的序幕。钢结构脆断的特点，是指结构在低应力状态下，没有塑性变形，突然速度很快地断裂。美国焊接船，由于脆断事故，受到的损失很大。美国试验人员从脆断的船中，采集了试样，根据试样在船的脆断位置，分为三类：裂源板、引裂板和止裂板。试件做成 V-型缺口冲击试件，在出事近似的温度下，进行冲击试验。所得

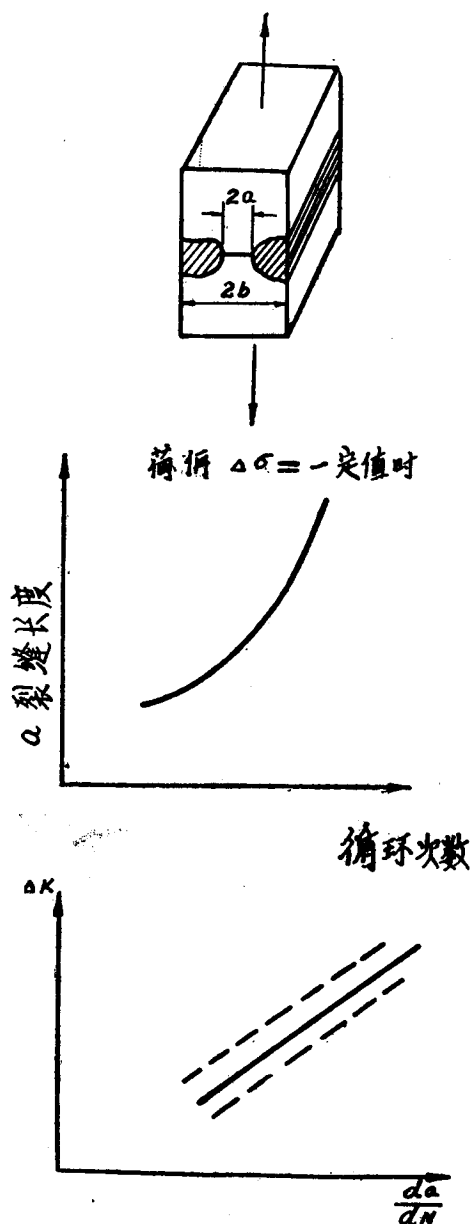


图 6

结果为：裂源板 $1.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2$ 、引裂板 $< 3.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2$ 、止裂板 $> 3.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2$ 。钢材的冲击韧性对温度有敏感，所以很多试验，都是研究钢材冲击能水平和温度的关系，得出冲击值与温度的关系曲线。冲击值 $3.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2$ 的对应温度为 T_{20} ，冲击值 $1.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2$ 的对应温度为 T_{10} 。在这个阶段，提出一个钢材的脆性转变温度的概念，就是选定某一个冲击能数值为钢材的韧性转脆指标，与其相对应的温度称为脆性转变温度，即结构的最低工作温度高于钢材的脆性转变温度，就不会发生脆断事故(图7)

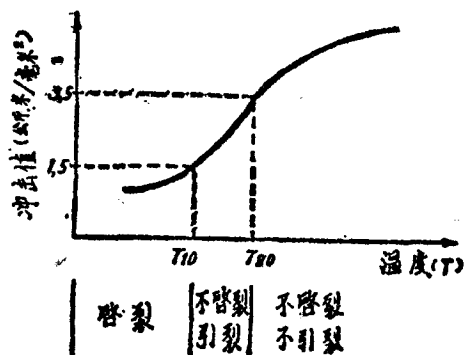


图 7

直到现在，长期以来，各国都沿用这个观念。为了保证桥梁在低温环境中工作，不

发生脆断，要求焊接的钢梁基材、焊缝及热影响区的 V-型缺口冲击试件的相应低温冲击值，不得小于一定数值，如 $3.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2$ 。后来发现冲击试件的冲击值中，当有塑性断裂时，其中包括弯曲压缩变形所做的功，为了把这部分功去掉，在 V-型缺口冲击试件的一侧加一个硬钢销子(图8)。



图 8

到五十年代初期，美国试验人员，提出 V-型缺口冲击试件的试验，有以下缺点：①在钢结构突然脆断时，天然的裂口比冲击试件的缺口要尖锐得多；②脆化区新生裂缝的冲击所产生的应变速度，将比一般荷载加力所产生的效果要严重得多；③尺寸太小不能代表结构的实际情况；④脆性转变的冲击韧性标准不好定。因此提出了新的试验方法。把脆性金属堆焊在试件的表面。先开好人工裂纹，用落锤或爆炸为荷载，在不同温度下进行试验，并以裂纹是否裂到试件边缘为标准，定出失塑温度，这就称之为失塑试验。试验证明，失塑试验是能较好地反映钢材韧性在温度上的转折点。从使用脆性转变温度到改用失塑温度，是一个进步。

以上研究，仅限于钢材的韧性和温度的关系；但应力、韧性及温度之间又有什么关系呢？为解决这个问题，就有了1953年的罗伯森试验，试件形式如图9所示。

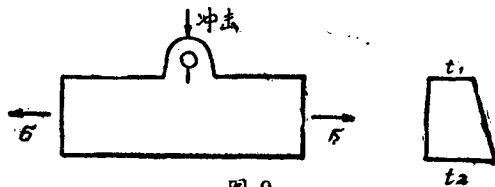


图 9

试验时在圆孔处，先设一个锯口，作为启裂，在试件上加一个温度梯度，试件

在受拉状态下，对其突出部分冲击，让裂纹引伸至受拉区，裂纹扩展至一定温度位置，韧性高到一定水平，裂纹止裂。按不同应力做试验，得出止裂时，应力和温度的关系。在试验曲线中，发现一个明显的转折点，这个转折点的温度，和落锤试验时的失塑温度一致。将止裂的应力和温度关系测定出来，在科学技术发展史上是一个很大的成就。日本的双拉试验、美国的埃索试验，都是属于这一类。上述试验比以往的试验，是有了进步，但试验复杂，费材料和人力，同时测得的是止裂时的温度和应力的关系，所以得出的结果是偏保守的。

后来,人们逐渐理解到结构里的裂纹的发生、发展和停止,和功能有关系,而功和能又与荷载有关系。一个焊接结构里,如果有一个裂缝,在荷载作用下,裂缝前端将在应力—应变状态上出现严重情况,该处的材料将对此进行抵抗,材料的抵抗能力就是材料的韧性。若荷载所造成的应力—应变状态是材料韧性所能承受的时候,就是安全的,否则就发生脆断,在这些认识的基础上,就出现了断裂力学。

弹性断裂力学,主要是研究和试验钢材单位新生裂缝断口上的能量问题。葛里费斯认识到,脆性材料在产生新生裂缝断口时,材料由于裂缝的开展,释放能量,这些能量转变为断口的表面能,脆断不产生的边界条件,是释放能和表面能相等,如释放能过大,则将脆断。根据这个理论得出葛里费斯方程式。

根据计算分析,表面能 $W_2 = 4\alpha a$

式中: α = 单位面积的表面能。

$$\text{释放能} = W_1 = \frac{\pi\sigma^2 a^2}{2E}$$

式中: E = 弹性模量。

$$\frac{dw_1}{da} = \frac{dw_2}{da}, 4\alpha = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}, \sigma^2 a = \frac{4E}{\pi} \alpha$$

当材料一定时,单位面积的表面能 α 是一定值。所以 $\sigma^2 a$ 是一个常数。令 $\frac{4\alpha}{\pi} = \gamma$, 则 $\sigma^2 a = \gamma E$ 。

欧文和奥罗门为将上述方程式应用于完全脆性材料,乃将上式加以修改为 $\sigma^2 E = (\gamma + \gamma_p) E$ 。式中 γ_p 是裂缝前端,在裂缝开展前,由于塑性变形所作的功(图10)。

$$\text{令 } \gamma + \gamma_p = G, \sigma^2 a = K, K^2 = GE$$

K 叫做应力强度因子。当 K 的值超过材料的极限值时,裂缝就不稳定,材料就要断裂。材料的极限应力强度因子,叫做临界应力强度因子 K_{Ic} 。

G 是材料裂缝扩张时所需要的功,在裂缝不稳定时, G 的极限值,叫做 G_c 。 $K_c^2 \sim G_c E$ 。

当断裂完全垂直于试件受力方向,所谓平面应变断裂(脆断)时,经分析得 $K_{Ic}^2 = G_{Ic} E / (1 - \nu^2)$ 。 ν 是波桑系数。

目前各国进行的试验工作 K_{Ic} 就是各国试验研究钢材的指标,试件可以做成梁式或受拉杆件式。在匈牙利黑色金属研究所见到的试件,是梁式。试件截面尺寸为 10×10 毫米、 20×20 毫米和 30×30 毫米。在梁的中部开一缺口,用疲劳加载的办法,使沿缺口产生一定深度的疲劳裂缝。然后将试件放在静载试验机上进行加载。通过试验,找出荷载与变形的关系曲线,由曲线定出脆断破坏时荷载,因而可以得到名义应力 σ , 裂缝长度 a 是事先知道的,所以脆断时,临界应力因子 $K_{Ic}^2 = \sigma \sqrt{a}$ 可以计算得出来。有了 K_{Ic} 即可找到裂缝大小和应力的关系。



图10

$$K_{Ic}^2 \sim \sigma^2 a$$

$$\therefore a = A \frac{K_{Ic}^2}{\sigma^2}$$

$$\text{当应力为 } \sigma_y \text{ 时, } a(\text{最大}) = A \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_y^2}.$$

A是与缺陷、实际应力有关的系数。

对塑性较大的钢来说，在试验中很难实现平面应变断裂。断裂前一般发生相当大的塑性变形。英国人最早提出来研究测量结构钢，在启裂前，所能经受的塑性位移。这叫做COD试验。如图11所示受拉试件，在靠近其缺口的部分，发生塑化区，在开裂前，裂缝缺口深度为a，缺口宽=2r，塑化区宽度=2γ，张移量为δ，试验证明，δ是一个钢材指标，不因a及η而变的，但随温度而变，而且变化关系和V-型缺口试件冲击能随温度变化情况相似。

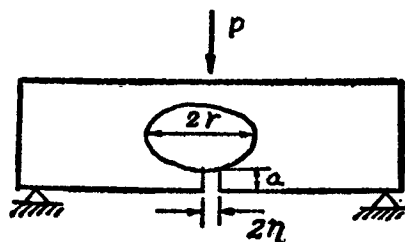


图11

经推导，可以粗略得 $GC \cong \sigma_y \delta$ ， σ_y 是钢材屈服强度。 $K_{Ic} = G_{Ic} E$ 。

$$\therefore \sigma^2 a = \delta \sigma_y E$$

$$\text{当 } \sigma = \sigma_y \text{ 时, } a(\text{最大}) = A \frac{\delta}{\epsilon_M}$$

(上接第49页)

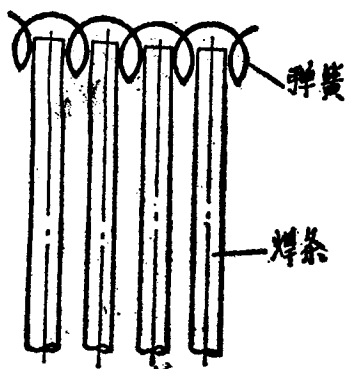


图88 弹簧压紧焊条示意图

4. 热风加热烘干，温度逐步上升，而且分布均匀，能保证焊条的质量。伊莎公司生产线上热风烘干设备尺寸约为1.5米(宽)×1.0米(高)×30米(长)。

二、热套容器

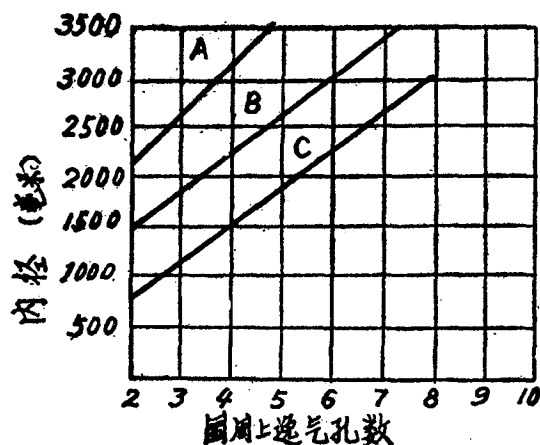
IIW第Ⅱ委员会B分委员会曾经讨论过西德鲁博(Rubo)教授起草的“多层压力容器法规”。比利时金属制作工业科技研究中心及IIW的有关文件上美、日和欧洲各国认为：

1. 如果在制造过程中，热套容器能够保证紧密贴合，在承担薄膜应力方面，和整体厚壁容器应该是一样的。所以，在选用设计公式、安全系数上并无差别。但是，如果容器上有相当大的弯曲力矩时，情况和整体壁厚很不相同，因为多层结构承担剪切载荷的能力是很小的，除非层与层之间做成能连锁的结构。如果某一个区域里，弯曲力矩是主导时，甚至有必要在这个部位采用整体的环。

2. 由于层间不可避免有间隙存在，传热的情况要比整体厚壁的容器差，在同样工作条件下，内外温差要比整体厚壁的大。同时，套合容器的传热性能沿全长也是不一致的，贴合得好的部位以及环焊缝的部位和整体厚壁容器相近或一样。因此，温度应力场会比整体厚壁容器复杂。有人做过试验，当内外壁温差 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ 时，容器是安全的。目前他们推荐，当 $\leq 85^{\circ}\text{C}$ ，容器可以完全使用。但是允许温差、允许温度梯度以及持续的久暂，目前还是争论的问题。关键还在于层间间隙的部位、数量和面积大小，因为它们对温度应力起决定性的影响。

3. 目前允许使用范围，西德规定为 $-10\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，法国规定为 $-30\sim 450^{\circ}\text{C}$ 。这是实际的做法，而不是有严格科学根据的限制。

4. 竣工的容器中，层间不可避免会裹进空气和水分。在运行过程中，它们会在未能预知的部位引起无法控制的压力升高。因此，所有层间间隙要保持和大气相连通。这就要在容器直径、板厚和工作压力、各层的表面粗糙程度来布置逸气孔的数目和位置。他们做了一些试验，确定了如图12所示的设计导则。



逸气孔间隙(毫米)		工 作 条 件
A	3500	正常多层套合容器
B	2500	严重有氢
C	1200	内壁有衬里

排气孔间最大轴向距离3500毫米

图12

5. 和单层容器相比, 有着“固有”的止裂特性。但是, 在环焊缝上自然失去了这种特点。这就要求, 设计时考虑防止扩展的可能。一种做法, 是有意识地把环焊缝选用软得多的材料。虽然环缝是贯串容器全周长的, 仍是很小的一个局部区间, 尽管机械性能较低, 但受力也仅约纵缝的一半, 所以对容器的整体强度是无妨碍的。

6. 在套合容器上, 采用的焊接细部结构形式如图13和图14所示。

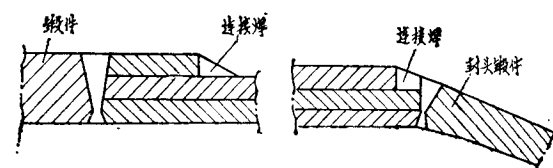
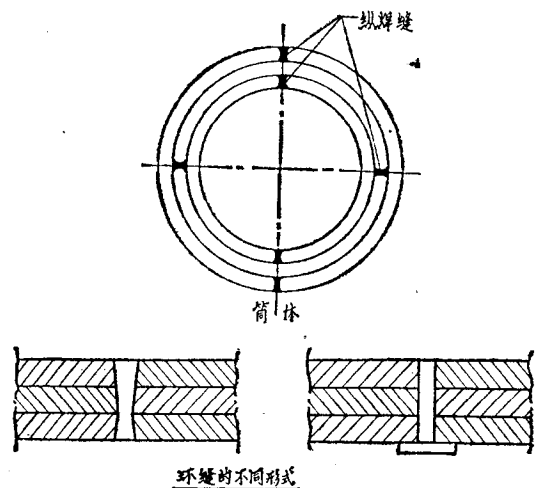
7. 从现有经验来看, 最大的外径与内径之比是1.5。理论上, 自然还可以提高。但是, 由于套合容器上有层间间隙存在, 因此这个数值, 显得更为关键。

8. 环焊缝的质量检验, 是个问题。他们认为一般的无损探伤是难以胜任的。因为, 近热影响区, 人为地造成的分层, 会“掩护”真正的焊接缺陷。

9. 内筒和封头锻件可以在总装配以前进行热处理。套合的筒节, 在套合以前也可以分别进行热处理。但是, 容器整体, 虽然它的环缝厚度一般都超出法规所要求热处理的数值, 却是不进行热处理的。目前, 这尚有争论。为什么单层容器必须热处理, 而有着同样环焊缝的套合容器却可以免去这样的热处理呢? 有人主张环缝在采取特种焊接技术(如低热输入的窄间隙气体保护焊方法)时, 完全不需热处理。有人认为多层结构的柔性比较大, 所以一部分应力已经松弛。如果进行热处理, 则有益的预应力也消失了。

10. 对于水压试验压力的倍数, 意见很分歧。有些人主张水压试验应力尽可能高些, 使层间贴合得更好, 造成对工作有利的预应力, 也能提高对疲劳的抵抗能力。有些人则认为过高的超压会造成过分的塑性变形, 损坏最内层的衬里, 因为只有所有的层间间隙都被压贴合了, 外层的钢板才能对内筒起到“垫板”的作用。

11. 最近几年来西德所制造的多层容器(包括套合和层板包扎的两种), 在厂内第一次水压试验时, 都在最外层进行应变测量, 并与同样几何尺寸的单层容器的计算应变值作了对比, 如图15所示。



和锻件或封头锻件的连结

图13

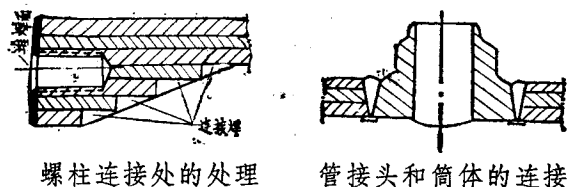


图14

由图15可见,分散度愈来愈小和实测值与计算值近似,这说明制造技术上的进步,也就是说,层间间隙愈来愈小。

12. 据文件报道,已知有两个套合容器发生过损坏。一起是环焊缝中的裂纹扩展,造成漏泄;另一起是不严重的小事故,详情不悉。

从狄柯克的谈话中,他们不主张采用应力消除热处理,不仅仅是因为套红所产生的预应力,虽然在设计中未加利用,但对容器的工作是有利的;还因为消除应力处理,往往在焊缝熔合线附近的热影响区中造成晶间裂纹。所谓应力消除裂纹,是再热裂纹的一种。低合金高强度钢尤为敏感。

为此,IIW自从1970年瑞士洛桑年会以来,就在第X委员会下设“再热裂纹”工作组,对此进行国际性的合作研究。已经发表过三个中间报告。认为,钢材的应力消除裂纹的敏感性,可根据下式计算:

$$P_{RE} = \{ \%Cr \} + \{ \%Cu \} + 2 \{ \%Mo \} + 10 \{ \%V \} + 7 \{ \%Nb \} + 5 \{ \%Ni \} - 2$$

当 $P_{RE} \geq 0$ 时,这种钢材在应力消除热处理中就易于产生裂纹。这个公式适用于下述范围成分(%)的钢材:

$$\begin{aligned} 0.10 < C &< 0.25 \\ 0 < Cr &< 1.5 \\ 0 < V, Nb, Ti &< 0.15 \\ 0 < Mo &< 2 \\ 0 < Cu &< 1.0 \end{aligned}$$

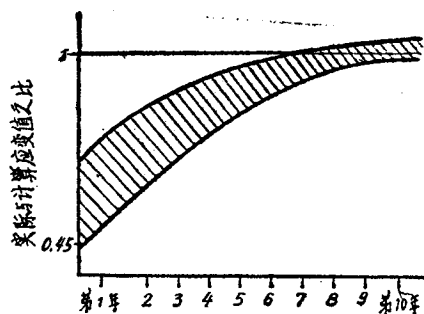


图15

(上接第46页)

在超声波探伤中允许有限长度的未焊透等,这时调整校准块和解剖对照实际缺陷的过程是重要的。更圆些的夹渣气孔等可以更松些。

表11中允许的缺陷远离引起不稳定破裂的临界尺寸。当考虑疲劳时应有不同的考虑。

作为一般的原则,在规定的规定中如有个别超过界限的缺陷存在,应有分别处理的余地,其基础是修复是否改善了整体质量,这时要做些断裂力学的分析和专门的探伤。

在这个标准里安全界限是存在的,即使偶尔有个别不允许缺陷存在也是这样。