

# 分段焊影响转轮焊接残余应力的试验分析

姬书得<sup>1</sup>, 张利国<sup>1</sup>, 方洪渊<sup>2</sup>, 李雅范<sup>2\*</sup>

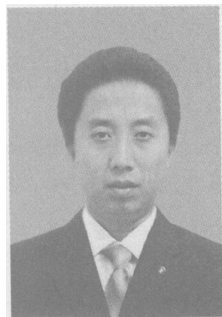
(1. 沈阳航空工业学院 航天技术研究所, 沈阳 110034;

2. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 在利用平板试验得到分段焊的合理段长的基础上, 对某水电站混流式水轮机转轮的焊接残余应力场进行了调控。结果表明, 对于尺寸为  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 16\text{ mm}$  的平板来说, 后焊的焊段可以起到降低先焊焊段的残余应力的作用, 且在到后焊部分端部为  $50\text{ mm}$  的范围内, 降低效果最明显; 分段焊可以降低叶片危险区域的残余拉应力峰值并产生残余压应力; 当叶片出水边焊段的长度在  $40\sim 90\text{ mm}$  的范围内, 残余应力的降低效果随着叶片出水边焊段长度的增加而减小。

**关键词:** 转轮; 叶片; 分段焊; 残余应力

中图分类号: TG156 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)03-101-04



姬书得

## 0 序 言

水轮机转轮在服役过程中出现疲劳裂纹是目前所有转轮的共性问题<sup>[1]</sup>, 这种现象的产生会大大降低水电站的工作效率, 造成巨大的经济损失。针对叶片的开裂问题, 国内外的科研工作者提出了一些解决转轮裂纹的方法, 如在下环焊缝中部安装楔子板、在下环焊缝外面增加加强板、在下环的上下端部先焊上搭块、焊前在上冠处装上假轴等<sup>[2-4]</sup>。但这些方法的实际效果不是很好, 且不能从根本上解决转轮叶片的裂纹问题。

对于一个具体的转轮结构来说, 由于它的材料选择是不变的, 因此转轮的受力状态是导致叶片出现疲劳裂纹的关键因素。在水轮机的工作运行中, 转轮叶片的应力来源主要有工作应力和焊接残余应力两种。研究发现, 工作应力峰值的出现位置与焊接残余拉应力峰值一致, 都是在叶片出水边的焊缝附近<sup>[5-7]</sup>。由于对于一个具体的转轮结构来说, 它的工作应力是固定不变的, 因此解决转轮的开裂问题只能利用焊接工艺的优化来改善转轮的焊接残余应力分布状态, 通过降低叶片危险区域的焊接残余拉应力从根本上解决转轮的开裂问题。

对于一个普通的焊接构件来说, 焊缝区的残余拉应力是由于残余压缩塑性变形产生的, 此区域的残余压缩塑性变形对周围区域产生影响, 使邻近焊缝的区域产生了较大的焊接残余压应力。针对这种情况, 作

者在进行平板试验的基础上, 利用分段焊的方法对叶片危险区域附近的焊接残余应力场进行了调控, 使转轮的叶片危险区域产生了焊接残余压应力。

## 1 分段焊对平板焊接残余应力的影响

### 1.1 平板试验结构的确定

由于转轮的结构非常庞大, 直接在转轮上进行分段焊的试验会使试验费用高以及生产周期长。因此作者首先研究了分段焊对平板焊接残余应力影响。这里进行平板的目的有两个, 一是验证分段焊的合理性; 二是确定适用于某水电站某型号转轮分段焊的段长。

平板试验中, 平板的尺寸为  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ , 同时在平板一组对边上开  $30^\circ$  的半 V 形坡口。另外, 为了增加平板试验过程中的刚度问题, 对平板固定架的结构进行了设计, 如图 1 所示。其中右侧图中的虚线位置表示在试验过程中平板的放置位置。

平板与固定架的材料都是  $0\text{Cr}13\text{Ni}5\text{Mo}$ , 两部分通过  $\text{CO}_2$  气体保护焊的方法进行连接。焊接电流是  $240\text{ A}$ , 电弧电压是  $30\text{ V}$ , 焊接速度是  $5\text{ mm/s}$ 。

为了研究分段焊对残余应力分布状态的影响, 在分段焊过程中, 将整个焊缝分成三段进行焊接, 两端的焊段长度分别是  $50\text{ mm}$  与  $100\text{ mm}$ 。

### 1.2 残余应力测量方案的确定

利用盲孔法在焊后的平板上进行应力的测量。应力测量装置采用郑州研究所生产的 YC-II 型应

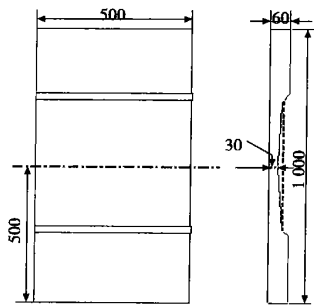


图 1 平板固定架结构与尺寸

Fig. 1 Structure and dimension of plane fixed device

力测量仪。

盲孔法属于残余应力测量的部分释放法。按小孔法测量残余应力时需先在各测点部位贴上应变片,然后在紧靠应变片的适当位置钻一小孔,根据应力释放前后应变片所测得的应变差,可借助弹性理论推算出试件内的残余应力。其计算公式为

$$R_1 = \frac{E}{4} \left\{ \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{A} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{90}}{B} \right\},$$
$$R_2 = \frac{E}{4} \left\{ \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{A} - \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{90}}{B} \right\},$$

式中:  $A$  表示应力释放系数,其值是 0.027 5;  $B$  表示应力释放系数,其值是 0.079 9;  $E$  表示材料的弹性模量。

图 2 是焊后平板的应力测量位置实物图。平板上沿焊接方向上点与点之间的距离是 30 mm。其中盲孔的直径为 2.0 mm。

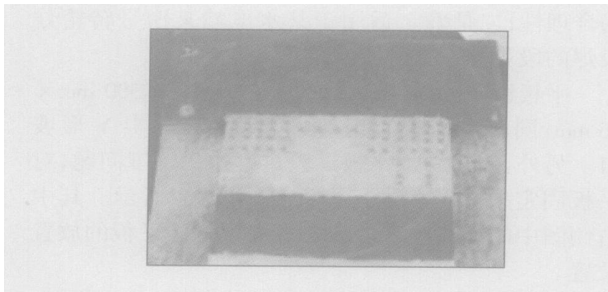


图 2 平板应力测量位置

Fig. 2 Measurement position of plane's residual stress

1.3 结果与讨论

图 3 是分段焊与非分段焊的横向残余应力沿焊缝方向的分布比较。图 4 是分段焊不同时刻横向残余应力的比较。

通过分析可知,分段焊可以增加焊缝整个接头的低残余应力区,同时采用先焊两端后焊中间的方法

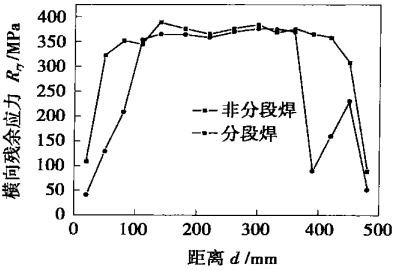


图 3 分段焊与非分段焊横向残余应力沿焊缝方向的比较

Fig. 3 Contrast of transverse residual stress between subsection welding and conventional welding

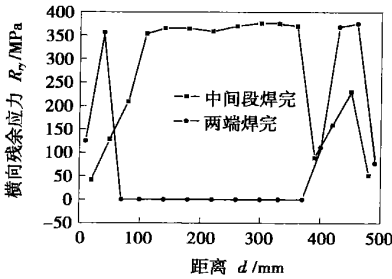


图 4 分段焊不同时刻横向残余应力沿焊缝方向的比较

Fig. 4 Contrast of transverse residual stress between different welding time

法进行焊接时,两边焊段的残余拉应力在中间焊段进行时得到了降低,其效果与到中间焊段端部的距离有关。对于板厚为 16 mm,材料为 0Cr13Ni5Mo 的平板来说,到中间焊段端部的距离为 50 mm 范围内,降低效果非常明显,随着距离的增加,降低效果逐渐减小。

2 转轮分段焊优化工艺的确定

根据叶片的危险区域是在叶片出水边的焊缝附近以及前面平板试验的结果,在转轮的分段焊焊接过程中,采用先焊两端后焊中间的方法,利用后焊焊段对叶片危险区域的残余拉应力造成影响,导致此区域的拉应力数值下降,甚至变成残余压应力。

分段焊的分段方式如图 5 所示。图中的①、②与③分别表示叶片焊缝区域焊段的编号,④与⑤分别表示叶片出水端与进水端的过渡圆角编号。

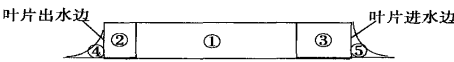


图 5 叶片焊缝的分段方式

Fig. 5 Subsection mode of blade's weld

具体的焊接工艺如下。

(1) 焊前预热: 100~120℃, 预热可根据实际情况, 采用履带式电加热器加热的方法。

(2) 焊接方法: 采用气体保护焊, 保护气体为 78%Ar+22%CO<sub>2</sub>。

(3) 焊接参数: 焊接电流为 240 A, 电弧电压为 30 V, 层间温度不高于 150℃。

(4) 焊段长度: 叶片出水边的焊段(图 5 中的②)控制在 40~90 mm 范围内, 焊段(图 5 中的③)控制在 90~110 mm 范围内, 焊段位置包括叶片与上冠之间以及叶片与下环之间两处。

(5) 叶片圆角: 叶片出水端与进水端的过渡圆角(图 5 中的④与⑤)在进行叶片中间焊段(图 5 中的①)焊前全部完成。

3 转轮的焊接残余应力

利用盲孔法在焊后的转轮上进行应力的测量。应力测量装置是郑州研究所生产的 YC—II 型应力测量仪。

图 6 是贴有应变花的转轮局部放大图。图 7 是应力测量位置的示意图。其中沿叶片出水边且垂直焊缝方向共测 5 个点; 在离熔合线 20 mm 与 40 mm 的位置上, 沿焊缝方向上共测 5 个点, 每点的距离是 30 mm。

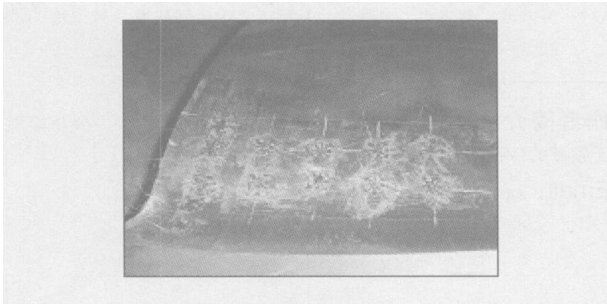


图 6 贴有应变花的转轮实物局部放大图  
Fig 6 Local enlarged diagram of turbine runner

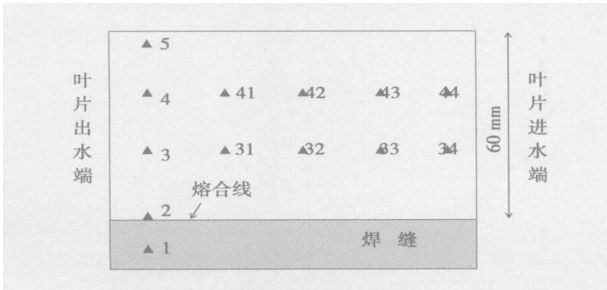


图 7 叶片上的应力测量位置分布  
Fig. 7 Distribution of stress measurement's position

图 8 是当叶片出水边焊段长度是 60 mm 时, 叶片出水边附近横向残余应力沿垂直于焊缝方向的分布, 图中的距离表示点到下环的最近距离。从图中可以看出, 按普通焊接工艺(非分段焊)进行焊接时, 转轮叶片的横向残余拉应力出现在焊缝及其热影响区的近缝区, 残余压应力出现在远离焊缝的区域, 并且在熔合线附近出现残余拉应力的峰值。按分段焊工艺进行焊接时, 叶片出水边附近沿垂直于焊缝方向的残余应力全部为残余压应力。这一结果有效地证明了分段焊可以降低叶片危险区域的残余拉应力峰值, 并且如果在焊段长度选择合理的情况下, 甚至可以将叶片危险区域的横向残余应力变成压应力。

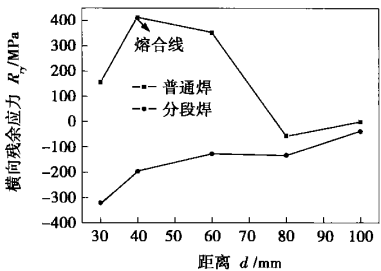


图 8 横向残余应力沿垂直焊缝方向上的分布  
Fig 8 Distribution of transverse residual stress perpendicular to weld

图 9 是当叶片出水边焊段长度是 60 mm 时, 横向残余应力沿平行于焊缝方向的应力分布情况, 其中距离表示点到叶片出水边的距离, 同时所有点距离焊缝熔合线的距离都是 20 mm。

通过分析可以看出, 在平行于焊缝的方向上, 分段焊的残余应力在距离叶片出水边为 80 mm 的范围内, 与普通焊相比, 残余应力得到明显的降低, 并且变成压应力; 而在距离超过 80 mm 时, 分段焊与非分段焊的残余应力值的差距越来越小。在分段焊过程中, 当焊缝两端完成进行中间段的焊接时, 中间焊段的残余压缩塑性变形对邻近区域产生影响, 增加了邻近区域的残余拉伸塑性变形, 造成此区域的应力值下降。

图 10 是分段焊叶片出水边上的残余应力与出水边焊段长度的关系, 其中图中点 1, 2 与点 3 的位置分别在焊缝、熔合线以及距离熔合线 20 mm 的位置。通过分析可知, 当叶片出水边焊段的长度是 40 mm 时, 叶片出水边附近的残余应力最小, 随着长度的增加, 残余应力逐渐增加。此结果与平板焊的结果基本相同, 从而进一步说明了平板试验设计的合理性。

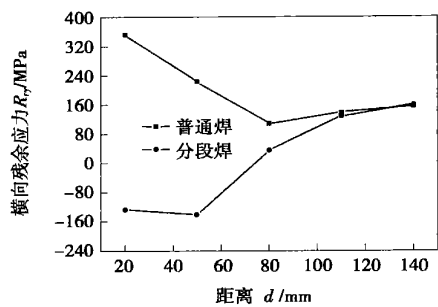


图 9 横向残余应力沿平行焊缝方向上的分布  
Fig. 9 Distribution of transverse residual stress along direction of weld

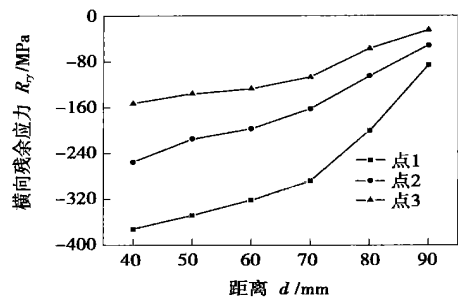


图 10 横向残余应力与叶片出水边焊段长度的关系  
Fig 10 Relation between transverse residual stress and weld length of blade's outlet

4 结 论

(1) 平板分段焊的试验研究发现, 对于尺寸为 500 mm×500 mm×16 mm 的平板来说, 后焊的中间部分可以起到降低先焊两端的残余应力的作用, 且

在到后焊部分端部为 50 mm 的范围内, 降低效果最明显。

(2) 采用先焊叶片出水边焊段, 后焊中间焊段的分段焊方法降低叶片危险区域附近的残余拉应力峰值的效果非常明显, 并产生了焊接残余压应力; 在垂直于焊缝方向上, 随着到焊缝熔合线距离的加大, 降低效果逐渐减小。

(3) 当叶片出水边焊段的长度在 40 mm ~ 90 mm 的范围内, 残余应力的降低效果随着叶片出水边焊段长度的增加而减小; 当叶片出水边焊段的长度为 40 mm, 危险区域产生了约为 -350 MPa 的焊接残余压应力。

参考文献:

[ 1 ] 樊世英. 混流式水轮机转轮裂纹原因分析及预防措施[ J ]. 水力发电, 2002, 18(5): 38—41.  
[ 2 ] 王远江. 岩滩与李家峡水电站水轮机转轮裂纹的原因和处理[ J ]. 水力发电, 1999, 15(5): 43—45.  
[ 3 ] Schweigert F. The development tendency of francis hydraulic turbine [ J ]. Journal of Hydraulic Research, 1986(3): 18—22.  
[ 4 ] 李连贵. 解决岩滩水轮机转轮叶片裂纹技术攻关取得突破性进展[ J ]. 水力发电, 2001, 17(2): 16.  
[ 5 ] 姬书得, 方洪渊, 刘雪松, 等. 叶片应力状态对混流式水轮机转轮失效的影响[ J ]. 焊接学报, 2005 26(2): 52—55.  
[ 6 ] 黄 文. 水轮机转轮叶片的应力分布及其裂纹成因[ J ]. 实用测试技术, 1999 25(3): 33—34.  
[ 7 ] 黄振峰, 温洁明, 沈炜良. 混流式水轮机转轮叶片残余应力测试[ J ]. 广西工学院学报, 1999 10(3): 78—80.

作者简介: 姬书得, 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要从事航天领域的特种连接技术的研究工作。发表论文 20 余篇。

Email: superjsd@163.com

metallurgical bonding besides mechanical bond, and there are not any cracks in the weld and the bonding strength is higher than that of arc welding with cast iron electrode.

**Key words:** cast iron; spray-welding; arc welding

#### **A interpolation algorithm for saddle-shaped curve auto-welding based on angle approaching**

QI Huazhen, TIAN Xincheng, ZHANG Xueyi, PENG Bo (School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China). p93–96

**Abstract:** The paper introduces operational principle, interpolation algorithm and software implementation design of saddle-shaped auto-welding system. By  $x$ ,  $y$ ,  $z$  three axis interconnected, the system controls welding torch completing auto-welding of saddle welding seam. Based on two dimensional circular interpolation of angle approaching, the geometrical characteristic of saddle-shaped curve was analyzed, and a interpolation algorithm by geometrical relation of  $x$ ,  $y$ ,  $z$  three coordinate was designed. Algorithm makes use of the whirligig for the projected footprint in the  $xz$  plane of saddle-shaped curve to fit saddle-shaped curve, which solves the problem of auto-welding for saddle welding seam consequently. The algorithm is so sample that it can be easily realized by programme with minor error and high efficiency.

**Key words:** saddle-shaped curve; angle approaching method; circular interpolation; auto-welding

#### **Diffusion bonding of hydrogenated Ti6Al4V alloy containing 0.15 wt. % hydrogen**

LIU Hong, FENG Jicai, HE Peng (National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p97–100

**Abstract:** The diffusion bonding of hydrogenated Ti6Al4V alloy containing 0.15 wt. % hydrogen was carried out, and the phase component of before and after welding, interface structure and the diffusion holes were investigated by means of scanning electron microscope, electron probe microanalysis and X-ray diffraction. The results showed the phase component of before welding was black strip  $\alpha$  plus lamellar ( $\alpha + \beta_H$ ), and the after was equiaxed  $\alpha$  plus the coarse lamellar ( $\alpha + \beta$ ) plus hexagonal close packed  $\alpha'$  in the  $\beta$  phase. The diffusion of Al and V in  $\alpha$  and  $\beta_H$  took place during bonding. With the diffusion bonding parameters increasing, the diffusion holes gradually decreased. When bonded at 850 °C for 60 min under a pressure of 12 MPa, the diffusion holes disappeared and the shear strength of the joint was up to 543 MPa.

**Key words:** hydrogenated Ti6Al4V alloy containing 0.15 wt. % hydrogen; diffusion bonding; phase component; shear strength

#### **Experimental research on subsection welding effect on runner welding residual stress**

JI Shude<sup>1</sup>, ZHANG Ligo<sup>1</sup>, FANG Hongyuan<sup>2</sup>, LI Yafan<sup>2</sup> (1. Institute of Astronautical Technology, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Welding Production

Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p101–104

**Abstract:** On basis of subsection welding's reasonable section length attained by plane plate experiment, regulating and controlling on some hydroelectric station runner welding residual stress field is researched by means of subsection welding. The result shows for the plane plate whose dimension is 500 mm × 500 mm × 16 mm, the latter welding part can decrease welding residual stress of the prior welding part and the decreasing effect is obvious when the distance is less than 50 mm away from the end of latter welding part; subsection welding can effectively decrease welding tensile stress and then engenders residual transverse stress in the blade dangerous area. Moreover, when the welding section length of blade outlet is from 40 mm to 90 mm, the decreasing effect of residual stress is reducing with the welding section length's increasing of blade outlet.

**Key words:** runner; blade; subsection welding; residual stress

#### **Microstructure and properties of over-heated zone and fine-grained zone of 10Ni8CrMoV steel**

PENG Jixiang, ZHANG Tianhong, DENG Wanping, ZHANG Junxu (Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471039, Henan, China). p105–108

**Abstract:** Thermal simulation technique is adopted to investigate the microstructure and properties of over-heated zone and fine-grained zone of 10Ni8CrMoV steel. The results show that the toughness of over-heated zone increased greatly because of austenite film lying in lathy martensite and a few ferrite. The toughness of fine-grained zone decreased due to many factors, such as acicular martensite, a small quantity of austenite film, carbide separation and so on. Then fine-grained zone might become the weak zone in welded joint.

**Key words:** 10Ni8CrMoV steel; over-heated zone; fine-grained zone; austenite film; toughness

#### **Application of nanotechnology in welding technology**

YAO Shangwei<sup>1,2</sup> (1. Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471039, Henan, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). p109–112

**Abstract:** The paper presents a short review on research and application of nanomaterials and nanotechnology in welding field. According to its special properties, it is discussed that the application mechanism and probabilities of nanomaterials and nanotechnology in welding consumables, welded structure, hard welding materials, welding protection and other aspects. The article describes the application of nanomaterials and nanotechnology in welding consumables such as the coating of wires and welding rods, fluxes, electrode materials, as well as in the improvement of uneven structure, resistance to wear, fatigue and stress corrosion of welded joint. The question about raw materials, cost, entering mode and reactive mechanism are put forward. The application prospects of nanomaterials and nanotechnology in the welding field are forecasted.

**Key words:** nanomaterials; nanotechnology; welding