

# 45 钢弹性应力与超声纵波与横波声时比关系的分析

陶一军<sup>1</sup>,薛楚扬<sup>2</sup>,王 晨<sup>2</sup>,李德红<sup>1</sup>,王志武<sup>2</sup>

(1. 国网浙江紧水滩电厂,丽水 323000;2. 武汉大学 动力与机械学院,武汉 430072)

**摘要:**利用拉伸试验机和超声应力检测仪,对水电机组蜗壳螺栓 45 钢进行轴向拉伸,测定其在拉伸过程中的应力值和对应的超声波纵波和横波的传播时间,获得超声波纵波与横波的声时比,即超声纵波与横波的波速比,建立弹性应力与超声波纵波与横波声时比之间的定量关系,为利用超声波实时测定螺栓弹性应力提供依据。结果表明,在 45 钢所承受的轴向弹性应力处于钢的弹性变形范围内时,超声波纵波与横波声时比与弹性应力之间呈线性关系,为  $\sigma = -50249.8 S_l/S_t + 90536.1$ 。通过实际测定应力值对超声波纵波与横波声时-应力模型测定出的应力值进行验证,结果表明,利用超声波纵波与横波测定的应力值与实际应力值之间的最大误差为 2.36%,满足工程要求。

**关键词:**45 钢;轴向弹性应力;超声纵波与横波应力检测法

中图分类号: TG142.1; TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2023)11-0006-04

## Analysis of the relationship between elastic stress and ultrasonic longitudinal and transverse wave acoustic time ratio of 45 steel

TAO Yijun<sup>1</sup>, XUE Chuyang<sup>2</sup>, WANG Chen<sup>2</sup>, LI Dehong<sup>1</sup>, WANG Zhiwu<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Jinshuitan Power Plant, Lishui 323000, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Using tensile testing machine and ultrasonic stress detector, axial tensile was carried out on 45 steel of volute bolt of hydropower unit, and the stress value and the corresponding ultrasonic p-wave and s-wave propagation time were measured in the tensile process, so as to obtain the ultrasonic p-wave and s-wave acoustic ratio, i. e., the ultrasonic p-wave and s-wave velocity ratio. The quantitative relationship between elastic stress and ultrasonic p-wave and s-wave acoustic time ratio was established, which provided a basis for real-time determination of bolt elastic stress by ultrasonic wave. The results showed that the axial elastic stress of 45 steel was within the elastic deformation range of the steel, and the relationship between the acoustic time ratio of ultrasonic p-wave and s-wave and the elastic stress was linear,  $\sigma = -50249.8 S_l/S_t + 90536.1$ . The error between the stress measured by p-wave and s-wave and the actual stress was 2.36%, which meets the engineering requirements.

**Key words:**45 steel; axial elastic stress; ultrasonic longitudinal and transverse wave stress detection method

45 钢是中碳结构钢,冷热加工性能都不错,机械性能较好,具有较高的强度和较好的切削加工性<sup>[1]</sup>。同时,45 钢经适当的热处理后可获得一定的

韧性、塑性和耐磨性,材料来源方便,故广泛应用于各种重要的结构零件中,如在交变负荷下工作的连杆、螺栓、齿轮及轴类等零件。很多大型机械部件中会使用到 45 钢,比如水轮机上下机架的螺栓,其安全性直接关系到机组的安全运行。预紧力为轴向弹性应力,其应力大小是否合理,对于螺栓和其连接的零部件的安全性和使用寿命来说是至关重要的。因此,高强度螺栓在施拧时的预紧力必须严格控制在

收稿日期:2023-02-10

作者简介:陶一军(1971—),男,硕士,高级工程师,高级技师,主要从事水电设备检修管理,金属监督管理的研究工作

通信作者:薛楚扬,1500363395@qq.com

规定范围内。在螺栓紧固和拆卸过程中,由于工艺与方法的制约,其预紧力很难得到准确控制,常常存在预紧力不足或过盈的问题。预紧力不足会导致螺栓连接不充分,可能产生相对滑动和密封不严问题。紧固过盈,螺栓会产生塑性变形,难以起到紧固作用。螺栓在紧固和拆卸过程中,如果承受冲击作用,螺纹根部可能产生裂纹。在运行过程中,运行工况变化而产生的载荷变化,也会导致螺纹根部产生裂纹,严重时甚至会导致螺栓断裂,引起重大事故。这一问题的根源就在于,在螺栓紧固、拆卸和运行过程中不能准确判定螺栓的实际应力值。

超声波应力检测法是以声弹性原理为基础的一种简洁、快速、无损的应力测量方法<sup>[2]</sup>。根据超声弹性原理,超声波在弹性固体中的传播速度与应力大小、材料密度及弹性常数有关。超声波纵波、横波在金属拉伸过程中,对弹性应力有不同的反射特征,通过试验,可以建立弹性应力与超声波纵波和横波声速的数学关系,由此,可以定量测定弹性应力的大小。孙国峰<sup>[3]</sup>研究了桥梁上关键部位螺栓应力的超声波检测,并提出了温度影响标定曲线的修正方法,认为修正后的曲线测量精度满足现场要求。陈远林<sup>[4]</sup>提出了一种基于 sinc 函数内插的超声波检测模型,用于测量航空发动机上连接法兰孔小尺寸螺栓的应力,并经过试验验证了该模型的准确性。PAN 等<sup>[5]</sup>提出了新的影响因子修正轴向应力分布不均对测量结果产生的误差,并结合有限元仿真和标定试验实现了螺栓特性曲线的快速标定。

文章以某水电厂水电机组蜗壳 45 钢螺栓为研究对象,通过多个试件在弹性范围的拉伸试验,测定超声波纵波和横波的声速,建立超声波纵波和横波的传播声时与应力的关系,为利用超声波实时测定螺栓紧固力提供依据。

## 1 试验方法及内容

试验所用的材料为 45 钢,试件尺寸为 M24×138 mm(共 7 个),均经过 850 ℃油淬及 610 ℃回火的调质处理后,进行金相组织观察、拉伸试验和超声波测定。选取 2 个试件进行轴向拉伸,直至断裂,测定 45 钢的屈服极限和断裂强度及其对应的拉力值。达到屈服极限前,钢材处于弹性变形阶段,因此,将屈服强度对应的拉力值确定为超声波纵波、横波测定时的最大施加力。

利用武汉中科创新 HS 1020 超声波应力检测

仪,测定 7 个试件在未受轴向应力状态下的超声纵波与横波的声速之比,标定为  $R_0$ 。将专用探头固定于 45 钢试件顶端,并安装于拉力试验机上,在小于最大施加力范围内,从 0 kN 开始逐步增大施加力,每隔 50 kN 停留 2 min,测量超声波纵波、横波的传播时长,计算超声纵波与横波声速的比值。共计测定 5 个试件,取其平均值进行相关计算。选取相同的 4 个试件,进行实际应力值测定和超声测定,以分析超声测定应力的误差范围。

## 2 测量原理

钢材在轴向拉伸的弹性变形阶段,晶格会产生微量变形,对超声波纵波与横波的传播速度产生影响。通过测定不同弹性应力下的超声波纵波与横波声速比,依据如式(1)所示的声弹性公式<sup>[6]</sup>,可以计算出其所受的弹性应力,建立弹性应力与超声纵波与横波声速比的关系。

$$\frac{v_1}{v_t} = R_0 + C_R \sigma \quad (1)$$

式中: $v_1$ 、 $v_t$  分别为超声纵波与横波在螺栓内的传播速度; $R_0$  为未受轴向应力下超声纵波与横波的声速之比; $C_R$  为声速比声弹性系数; $\sigma$  为钢材的轴向应力。

超声波在钢材内部的传播速度不易准确测定,但是被测钢材的长度是确定的,那么超声波纵波与横波的声速比就等于超声波纵波与横波的传播时间之比,即声时比。测定时,可以获得超声波纵波与横波由试件一端发射经另一端反射回来的传播时长,则根据试件长度能计算得到超声纵波与横波的声速比,进而计算出轴向弹性应力<sup>[7]</sup>。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 金相组织结果

利用蔡司 Axio Lab. A1 金相显微镜对螺栓材料进行金相组织观察,观察结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,45 钢试件经过调制处理后,组织是常规的白色铁素体和回火索氏体。

### 3.2 力学性能结果及拉力范围的确定

45 钢拉伸获得的拉力和强度指标结果如表 1 所示。

表 1 45 钢强度指标  $\text{kN} \cdot \text{MPa}^{-1}$

试件编号	拉力/屈服强度	拉力/断裂强度
1#	290.0/641	346.8/766
2#	249.9/552	315.2/698
平均值	269.9/597	331.0/732

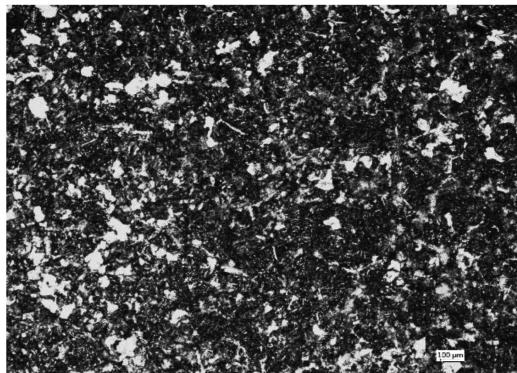


图 1 45 钢金相显微组织

由表 1 可知, 45 钢的最小屈服强度为 552 MPa,

对应的拉力为 249.9 kN。当拉力小于 249.9 kN 时, 钢材处于弹性变形范围内, 因此在超声波纵波和横波测定时, 试验加力范围为 0~250 kN。实际测定时, 选择在拉力分别为 0, 50, 100, 150, 200, 250 kN 时, 进行超声波纵波和横波传播时长的测定。

### 3.3 螺栓应力标定曲线建立及分析

45 钢试件在拉力分别为 0, 50, 100, 150, 200, 250 kN 时, 测定超声波纵波和横波的渡越时间, 其结果如表 2 所示。然后以此计算其声时比, 结果如表 3 所示。利用表 3 中的数据和对应的拉力, 进行单组数据和取平均值后的超声波纵波和横波声时比-应力关系拟合, 拟合结果如图 2, 图 3 所示。

表 2 45 钢超声波渡越时间测量结果

(试验力/kN)/(应力/MPa)	声时类型	试件编号			
		1#	2#	3#	4#
0/0	纵波声时	47.229 8	47.421 8	47.033 8	46.808 8
	横波声时	85.188 3	85.003 3	84.734 3	84.338 3
50/110.52	纵波声时	47.337 8	47.507 8	47.098 8	46.911 8
	横波声时	85.255 3	85.064 3	84.766 3	84.413 3
100/221.05	纵波声时	47.430 8	47.601 8	47.186 8	46.993 8
	横波声时	85.315 3	85.116 3	84.846 3	84.473 3
150/331.57	纵波声时	47.524 8	47.646 0	47.288 8	47.075 8
	横波声时	85.379 3	85.102 1	84.903 3	84.545 3
200/442.10	纵波声时	47.632 8	47.703 9	47.405 8	47.199 8
	横波声时	85.458 3	85.103 3	84.992 3	84.656 3
250/552.62	纵波声时	47.787 8	47.949 9	47.511 6	47.497 8
	横波声时	85.623 3	85.431 4	85.100 9	85.055 3

表 3 螺栓超声横波声时与纵波声时之比

试件编号	试验力/kN					
	0	50	100	150	200	250
1#	1.803 70	1.801 00	1.798 73	1.796 52	1.794 11	1.791 74
2#	1.792 49	1.790 53	1.788 09	1.786 13	1.783 99	1.781 68
3#	1.801 56	1.799 75	1.798 09	1.795 42	1.792 87	1.791 16
4#	1.801 76	1.799 40	1.797 54	1.795 94	1.793 57	1.790 72

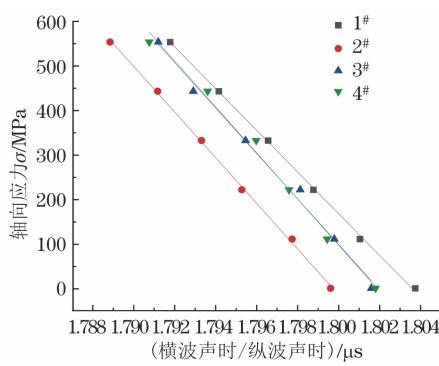


图 2 45 钢螺栓的声时-应力标定结果

由图 2,3 可知, 在弹性变形范围内, 45 钢的超声波声时比值会随着弹性应力的增加而下降。同一个试件所受到的轴向弹性应力与声时比值满足

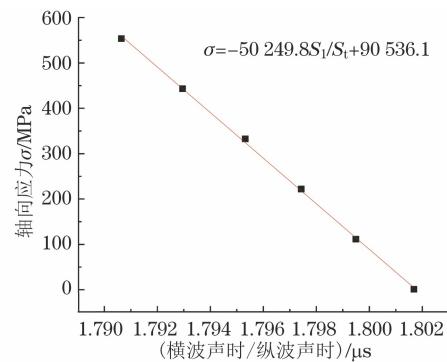


图 3 取平均后 45 钢的声时-应力关系曲线

式(1)中的线性关系; 图 2 中不同螺栓获得的直线斜率和截距有所差异, 3# 和 4# 螺栓相近, 这可能与螺栓材料内部晶粒度大小有关<sup>[8]</sup>。取平均值后, 获得

45 钢声时-应力关系曲线, 为

$$\sigma = -49943.118S_l/S_t + 90393.469 \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为轴向弹性应力;  $S_l/S_t$  为横波声时与纵波声时比; 曲线斜率值表示声速比声弹性系数的倒数  $1/C_R$ ; 截距表示未受轴向应力时超声横波与纵波的声速比与声速比声弹性系数的比值  $R_0/C_R$ 。

### 3.4 实际螺栓应力验证及误差分析

为了验证所得出的弹性应力-声时关系模型的准确性, 选取同一批次 2 组试件, 随机选择试验力大小, 进行实际应力测定和超声波应力测定, 并计算相对误差, 结果如表 4 所示。

表 4 螺栓应力检测值及误差

被测螺栓	实际应力值/ MPa	检测应力值/ MPa	误差/ %
45 钢-1	67	68	+1.49
	127	130	+2.36
	164	165	+0.61
	189	191	+1.06
45 钢-2	88	90	+2.27
	119	121	+1.68
	165	166	+0.61
	192	189	-1.59
45 钢-3	76	77	+1.32
	132	133	+0.76
	156	158	+1.28
	182	183	+0.55
45 钢-4	276	274	-0.73
	301	302	+0.33
	336	340	+1.19
	365	360	-1.39
45 钢-5	380	383	+0.79
	396	403	+1.77
	415	419	+0.96
	441	433	-1.84

工程上螺栓实际所受的轴向预紧力一般为材料弹性变形阶段的 50%~80%。由表 4 可知, 利用超声波纵波与横波测定的应力值与实际应力值之间的最大误差为 2.36%, 因此, 采用超声纵波与横波来测量螺栓轴向预紧力, 其误差可满足工程施工要求。

试验时的温度为 20 °C~25 °C, 水轮机组在正

常运行时机组内的水温不会出现太大的变化, 不会对螺栓的应力测量产生影响。

### 4 结论

(1) 在弹性变形范围内, 45 钢超声纵波和横波声时比与弹性应力之间呈线性关系, 为  $\sigma = -50249.8 S_l/S_t + 90536.1$ 。

(2) 根据标定结果, 利用超声纵波与横波测定的应力值与实际应力值之间的最大误差为 2.36%, 满足工程要求。

### 参考文献:

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册-1-结构钢 不锈钢 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1988: 133-145.
- [2] 骆国防. 电网设备超声检测技术与应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2021.
- [3] 孙国峰. 基于超声波技术的螺栓紧固轴力测量应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [4] 陈远林. 基于声弹性效应的航空发动机螺栓连接装配应力测量方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] PAN Q X, PAN R P, CHANG M L, et al. A shape factor based ultrasonic measurement method for determination of bolt preload [J]. NDT & E International, 2020, 111: 102210.
- [6] 贺玲凤, 刘军. 声弹性技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] ZHAO X X, LI Y M, LIU X G, et al. Ultrasonic measurement on axial force of high-strength bolt in service [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2020, 39(3): 596-603.
- [8] LIU E X, LIU Y M, WANG X M, et al. Ultrasonic measurement method of bolt axial stress based on time difference compensation of coupling layer thickness change [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告