

文章编号:1671-6833(2018)04-0007-05

考虑温度场的架空钢芯铝绞线线股应力研究

张 猛, 张玉莹, 赵桂峰, 肖 宇

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 准确了解钢芯铝绞线在温度场中各层线股的应力分布, 可为架空导线的安全设计和抗疲劳分析提供理论依据. 根据钢芯铝绞线材料性能和协同变形特点, 采用理论分析和有限元模拟研究导线线股应力和温度之间的关系, 分析了导线平均温度和径向温差对最外层铝股应力的影响. 结果表明, 不考虑径向温差时, 铝股应力随着温度的升高而减小, 钢芯应力随着温度的升高而增大; 考虑径向温差时, 外层铝股的应力随着温差的增大而增大, 内部铝股和钢芯的应力随着温差的增大而减小, 温差达到 20 ℃ 时, 外层铝股应力增加 49% 左右.

关键词: 钢芯铝绞线; 有限元; 温度场; 径向温差; 分层应力

中图分类号: TM751 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.031

0 引言

钢芯铝绞线是目前应用较多的架空导线形式, 由单层或多层铝线股绞合在镀锌钢绞线外加强组成<sup>[1]</sup>, 具有分层结构的特性. 架空导线正常运行时, 受自身载流产生的焦耳热的影响, 其温度往往高于环境温度. 在钢芯铝绞线内部, 由于各层线股之间存在空气间隙, 且钢芯、空气与铝线的导热系数各不相同, 使得导线内部存在径向温差. 研究表明, 导线径向温差可达 5~25 ℃<sup>[2-6]</sup>, 这势必会影响导线各层线股的应力分布, 进而影响导线的工作安全性和使用寿命. 因此, 考虑温度和应力的耦合作用, 精确计算导线工作状态时线股的分层应力, 对于架空导线的安全设计和抗疲劳分析具有重要意义.

针对架空导线的分层应力, 国内外已开展了相关的研究<sup>[7-11]</sup>. 但是, 上述研究工作均未考虑导线通电载流引起的温度变化(尤其是径向温差)对线股受力的影响, 使得分析结果与导线的实际工作条件有一定差异. 基于上述原因, 笔者拟采用理论分析和有限元模拟相结合的方式研究架空钢芯铝绞线线股应力和温度之间的关系, 以期导线的安全

设计和抗疲劳分析提供依据.

1 导线分层应力计算

架空输电导线在张力和温度的作用下会产生沿长度方向的轴向伸长. 架空导线的股状结构特点使得各层沿线股方向的伸长并不相同, 层间会发生相对滑动, 而且材料的泊松比对建立导线变形协调条件也有一定的影响, 但是已有研究表明<sup>[1,12]</sup>, 二者对导线分层应力的影响较小, 因此, 笔者在建立导线温度应力协调方程时采用如下假设<sup>[10,13]</sup>:

- (1) 同层线股受力状态相同, 且各线股的轴线线位于同一圆柱面内;
- (2) 正常工作条件下导线始终处于弹性阶段;
- (3) 各层间不考虑摩擦力.

基于以上假设, 这里给出导线和线股伸长示意图如图 1 所示, 图 1(a) 表示的是导线在制造温度的初始条件下, 在张力和温度的共同作用下从 OA 伸长到 OB, 伸长量为  $\Delta L$ ; 图 1(b) 表示的是第  $n$  层单股绞线的伸长展开图. 当导线伸长量为  $\Delta L$  时, 第  $n$  层线股的伸长量为  $\Delta l_n = l'_n - l_n$ , 其中  $l_n$  和  $D_n$  分别为第  $n$  层线股伸长前后的长度. 线股伸长

收稿日期:2017-07-24; 修订日期:2017-10-15  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578512); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2015GGJS-151)  
作者简介:张猛(1978—), 男, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力系统结构防灾减灾研究, E-mail: zhangmeng@zzu.edu.cn.  
通信作者:赵桂峰(1978—), 女, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电网基础设施防灾减灾研究, E-mail: gfzhao@zzu.edu.cn.

量和导线伸长量有如下的关系<sup>[3]</sup>:

$$\Delta l_n = \Delta L \cos \beta_n, \quad (1)$$

式中:  $\beta_n$  为第  $n$  层线股的捻角。

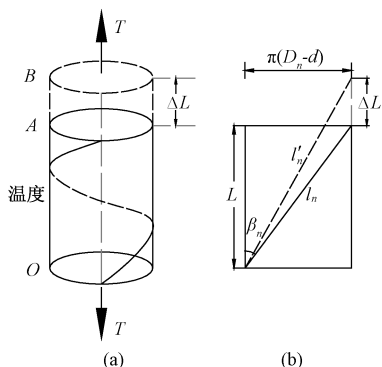


图1 导线和股线伸长示意图

Fig.1 Diagram of elongation of wire and strand

第  $n$  层线股的伸长率  $\varepsilon'_n$  可写为:

$$\varepsilon'_n = \frac{\Delta l_n}{l_n} = \left( \frac{\Delta L}{L} \right) \cdot \left( \frac{L}{l_n} \right) \cdot \cos \beta_n = \varepsilon \cdot \cos^2 \beta_n, \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$  为导线的轴向伸长率, 它比线股伸长率要大。

当只有弹性伸长时, 则线股截面上的股向应力  $\sigma'_{in}$  为第  $n$  层股线的弹性模量  $E_n$  和股向弹性伸长率之积, 可写为:

$$\sigma'_{in} = \varepsilon'_n \cdot E_n = \varepsilon \cdot \cos^2 \beta_n \cdot E_n. \quad (3)$$

在上述变形中, 有一部分变形是温度变化引起的, 所以在计算线股应力时应扣除这部分温度应力, 则第  $n$  层线股的股向应力  $\sigma'_n$  为:

$$\sigma'_n = (\varepsilon'_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) \cdot E_n = (\varepsilon \cos^2 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) \cdot E_n, \quad (4)$$

式中:  $\alpha_n$  为第  $n$  层的线股的线胀系数, 对于硬铝线为  $2.4 \times 10^{-5}$ , 镀锌钢线为  $1.2 \times 10^{-5}$ <sup>[1]</sup>;  $E_n$  为第  $n$  层的线股的弹性模量, 硬铝取 59 000 N/mm<sup>2</sup>, 镀锌钢取 196 000 N/mm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>;  $\Delta t_n$  为第  $n$  层线股温度变化量。

考虑到钢芯的线胀系数要小于铝股的线胀系数, 有可能会表现出导线的整体应变小于铝股的温度应变而使铝股出现压应力, 上式与这一实际情况并不会矛盾。

则第  $n$  层线股的轴向应力为:

$$\sigma_n = (\varepsilon'_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) \cdot E_n \cdot \cos \beta_n = (\varepsilon \cdot \cos^3 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n \cdot \cos \beta_n) \cdot E_n. \quad (5)$$

则整根导线各股轴向应力总和可以写为:

$$T' = \sum \sigma_n = \sum (\varepsilon \cdot \cos^3 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n \cdot \cos \beta_n) \cdot$$

$$E_n \cdot z_n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_n^2, \quad (6)$$

式中: 第  $n$  层线股的股径为  $d_n$ , 股数为  $z_n$ 。

因为不考虑导线线股间的摩擦, 因此可以得到:

$$T' = T. \quad (7)$$

对于各股层温度已知的情况下, 上式中仅有一个未知数  $\varepsilon$ , 求解比较容易。求出导线整体应变  $\varepsilon$  后, 再回代到式(5)中即可得到各股层在温度和张力作用下的各层轴向应力。

## 2 导线线股应力有限元分析

为了验证上述推导公式求解的正确性, 利用通用有限元分析软件 ANSYS 进行导线三维实体建模及力学加载, 并提取相关力学云图进行分析。

### 2.1 钢芯铝绞线结构参数

线股沿内层芯线轴缠绕与轴线方向所成的夹角称为捻角, 以  $\beta_n$  表示。当线股以  $\beta_n$  沿芯线外表缠绕一圈时, 其顺轴线方向所爬行的高度  $L$  (mm) 称为绞距节距。设该层线股的丝径为  $d$  (mm)、绕后该层外径为  $D_n$  (mm), 其展开平面图如图 1(b) 所示, 其捻角的计算公式为:

$$\tan \beta_n = \frac{\pi(D_n - d)}{L}. \quad (8)$$

该层节径比  $m$  为该节距与该层外径  $D_n$  之比值, 由上式可写为:

$$m = \frac{L}{D_n} = \frac{\pi(D_n - d)}{D_n \tan \beta_n}. \quad (9)$$

绞线一般节径比在 10 ~ 26 之间, 外层比内层小。

采用导线型号为 LGJ-240/30, 导线参数如表 1 所示。

表1 导线 LGJ-240/30 结构参数

Tab.1 LGJ-240/30 conductor parameter

导线	绞层/根	单根股线		节距/ mm	捻角/ (°)
		直径/ mm	节径比		
钢芯	1 层/1	2.4	—	—	—
	2 层/6	2.4	20	157.5	5.7
铝股	3 层/9	3.6	15	181.2	10.5
	4 层/15	3.6	14	244.5	12.4

### 2.2 钢芯铝绞线有限元模型的建立与分析

导线建模首先建立各股导线的横截面, 然后在柱坐标系下建立螺旋环绕的母线, 用拖拉生成体的方法生成各股线的实体模型。模型长度为 50 mm, 单元采用 Solid 45 单元, 划分网格采用扫

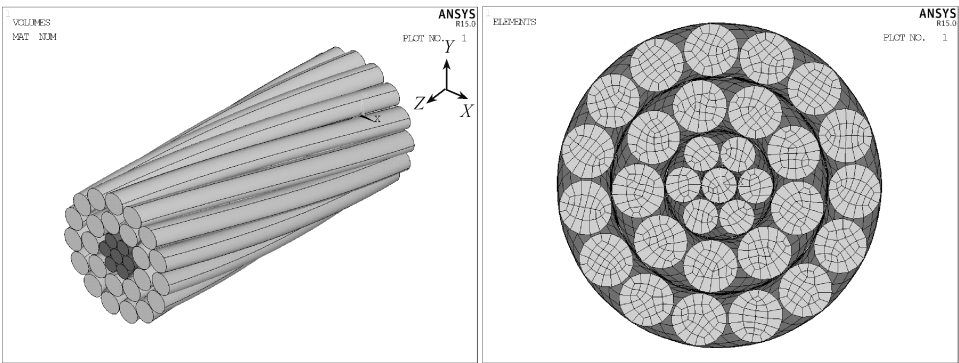


图 2 架空导线有限元模型及网格划分

Fig.2 Finite element model and mesh generation of overhead conductor

略网格划分有限元模型,划分后的网格如图 2 所示。

在边界条件的设置中,约束  $Z=0$  面上节点的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上的自由度. 考虑输电导线是对称轴向受拉结构,因此在  $Z=50$  平面外建立一个刚域点,然后和该面耦合成刚域,强制 50 mm 面的所有节点在导线轴向的位移相同. 最后在刚域点上施加拉力,目前我国架空输电线的运行张力一般为 15% ~ 25% RTS (导线额定拉断力)。

对模型的刚域节点施加 25% 额定拉断力 (在 20 ℃ 制造温度下) 得到的  $Z=25$  mm 截面的轴向应力云图如图 3 所示。

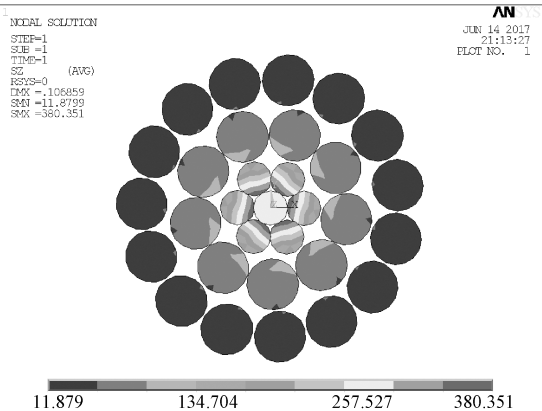


图 3 20 ℃ 下  $Z=25$  mm 处轴向应力云图

Fig.3 Nephogram of axial stress at  $Z=25$  mm at 20 ℃

由图 3 可知,导线每股线材的截面应力并不相同,这是由导线的旋绕特性决定的,导线线股截面上各点的应变各不相同. 而理论计算只能计算出线股截面的“平均应力”,因此对每股导线进行应力积分,得到沿轴向的张力后计算出“平均应力”. 计算出的各层的轴向应力 (即“平均应力”) 如表 2. 从表 2 可知,导线在仅承受拉力作用下有限元分析得到的各层应力与理论方法得到的应力

值的最大误差为 9.6%,这是由于理论计算没有考虑各线股之间的接触和导线的泊松比的影响. 该误差符合工程要求,说明该方法能够计算各线股的分层应力。

表 2 有限元模型各层轴向应力与理论值对比

Tab.2 Comparison of axial stress and theoretical values of each layer in finite element model MPa

层数	钢芯层		铝股层	
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
理论值	188.30	185.5	54.0	52.90
ANSYS 计算值	197.30	190.5	59.2	49.60
误差/%	4.78	2.7	9.6	-6.24

注:本表理论值为式 (5) 中取  $\Delta t_n = 0$  计算出的各层应力。

3 温度对线股应力的影响

3.1 不同平均温度下各线股的受力分布

当导线处于自然对流条件 (风速小于 0.5 m/s) 下,整个导线的温度分布均匀,近似等温体,温度与电流之间呈线性关系<sup>[13]</sup>. 由导线稳态热平衡方程<sup>[6]</sup>可知,当导线内电流产生的焦耳热较小时,导线吸热基本来源于太阳照射产生的热量,则此时导线温度与环境温度接近且相对较低,我国现行设计规程规定导线的允许工作温度为 70 ℃<sup>[2]</sup>. 据此,笔者设定导线制造温度为 20 ℃,运行时的初始张力为 15% RTS,导线整体温度从 30 ℃ 到 70 ℃ 每 10 ℃ 变化时 ANSYS 计算所得的导线  $Z=25$  mm 处各层应力分布如图 4 和表 3 所示。

由图 4 可知,导线在张力和平均温度的作用下,内部钢芯的应力随温度的增加而增加,外部铝股的应力随温度的升高缓慢降低,这是由于钢芯和铝股的线胀系数不同,温度升高后,铝股的应变比钢芯的大,而二者的协同变形限制了

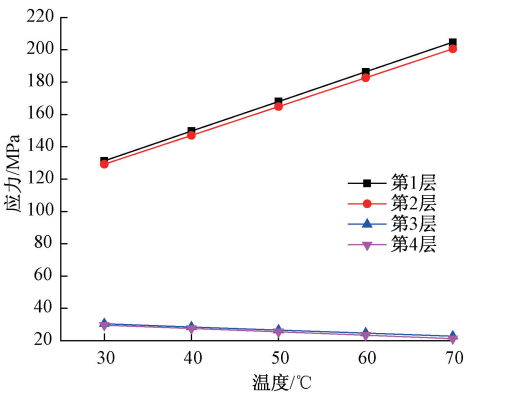


图 4 各层股线应力和温度之间的关系

Fig. 4 The relation between stress and temperature of ply strands

表 3 15%RTS 作用下各层轴向应力

Tab.3 Axial stress of each layer under the action of 15% RTS MPa

温度/ ℃	不同计 算法	钢芯层		铝股层	
		第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
30	理论值	131.3	129.2	30.5	29.6
	ANSYS 值	132.2	124.0	30.3	30.3
40	理论值	149.7	147.0	28.5	27.6
	ANSYS 值	142.0	141.7	27.7	27.5
50	理论值	168.0	164.9	26.6	25.5
	ANSYS 值	160.9	159.4	25.0	24.6
60	理论值	186.4	182.7	24.7	23.4
	ANSYS 值	179.8	177.1	22.4	21.8
70	理论值	204.7	200.6	22.8	21.3
	ANSYS 值	198.6	194.8	19.8	18.9

铝股的变形,表现为铝股因温度受压,使拉力减小引起的拉应力,同时,减小的拉力全部由钢芯承担.

考虑到实际中导线最先发生破坏的是最外层铝股,因此主要关注最外层铝股的应力变化情况.

由表 3 可知,理论值与 ANSYS 计算值相差并不大,图 5 直观地表示最外层铝股应力理论值与 ANSYS 计算值之间的误差.

由图 5 可知,ANSYS 和理论计算的最外层铝股的应力比不考虑温度的最外层铝股的应力小,且二者都是随着温度的升高而线性下降的,但是二者的下降速度不尽相同,这可能是因为理论计算中采用的假定引起的. 二者的计算差值并不大,最大误差为 6.8%,再次说明理论公式的正确性.

3.2 导线径向温差对股线应力的影响

导线内部径向温度分布一般为最外层的铝

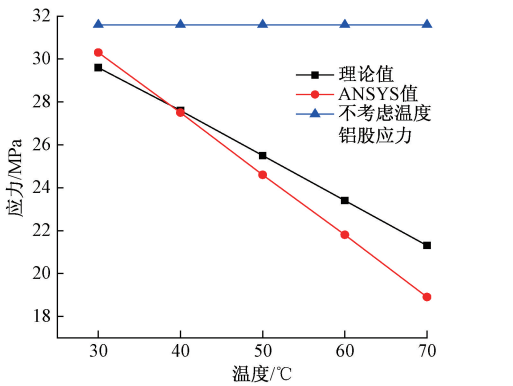


图 5 ANSYS 和理论计算的最外层铝股应力

Fig.5 ANSYS and theoretical calculations are applied to the outer layer of aluminum strand stress

股温度最低,邻内层铝股及内部钢芯的温度差别不大<sup>[14]</sup>. 因此本节对导线施加温度荷载时仅对最外层铝股施加逐级变化荷载,级差 5℃. 为了对比,内部温度选择了 60℃和 70℃两种情况,初始张力为 20% RTS,具体的工况及结果如表 4 和表 5 所示.

表 4 20%RTS、内层温度 70℃时各层应力值

Tab.4 Stress value of each layer at 20%RTS and 70℃ MPa

内层温 度/℃	外层铝股 温度/℃	钢芯层		铝股层	
		第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
70	70	242.4	237.7	33.6	31.9
70	65	231.6	227.1	30.5	35.8
70	60	220.9	216.4	27.4	39.7
70	55	210.1	205.8	24.3	43.6
70	50	199.3	195.2	21.2	47.5

表 5 20%RTS、内层温度 60℃时各层应力值

Tab.5 Stress value of each layer at 20%RTS and 60℃ MPa

内层温 度/℃	外层铝股 温度/℃	钢芯层		铝股层	
		第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
60	60	224.0	219.8	35.5	34.0
60	55	213.3	209.2	32.4	37.9
60	50	202.5	198.6	29.3	41.8
60	45	191.7	188.0	26.2	45.7
60	40	181.0	177.4	23.1	49.5

由表 4 和表 5 可知,随着径向温差的增大,导线的最外层铝股的应力也随之增大,邻内层和内部钢芯的应力减小. 这是由于外层铝股温度升高的幅度小于内层线股,相当于外层铝股相对收缩,在张力的作用下应力增大. 当内部温度分别为 60℃和 70℃,温差在 20℃时,最外层铝股的应



力分别增加了 45.6% 和 48.9%,径向温差所带来的应力变化已不可忽略。

60℃和70℃下最外层铝线应力随温度级差的变化如图6所示,可知最外层铝股的应力大小和钢芯的温度有关,但应力变化却仅和径向温差的大小有关,和内部钢芯温度无关。

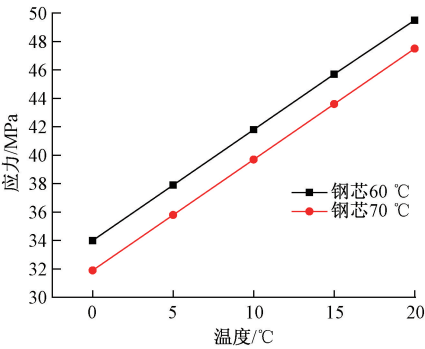


图 6 最外层铝股应力随径向温差的变化

Fig.6 The variation of the stress of the outer aluminum stock with the radial temperature difference

4 结论

(1)导线各层的张力分布并不均匀,外层铝股的张力虽大,但其应力却小于平均应力,因此用平均应力来进行线路设计并不准确。

(2)不考虑径向温差时,铝股应力随着温度的升高而减小,且最外层铝股张力减小的速度大于邻内层,钢芯应力随着温度的升高而增大。

(3)考虑径向温差时,外层铝股的应力值随着温差的增大而增大,内部铝股和钢芯的应力随着温差的增大而减小,减小的部分全部由外部铝股承担,温差达到 20℃时,外层铝股所承担的张力值增加 49%左右,而且增加的幅度和内部温度没有关系,只与径向温差有关。

参考文献:

[1] 邵晓天. 架空送电线路的电力力学计算[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2003.

[2] 梁任. 架空导线运行温度及载流量的数值模拟分析[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院,2017.

[3] BUSH R A, BLACK W Z, CHAMPION T C, et al. Experimental verification of a real-time program for the determination of temperature and SAG of overhead lines[J]. IEEE transactions on power apparatus & systems, 1983, 102(7):2284-2288.

[4] HALL J F, DEB A K, SAVOULLIS J. Wind tunnel studies of transmission line conductor temperatures[J]. IEEE transactions on power delivery, 1988, 3(2):801-812.

[5] DOUGLASS D A, KIRKPATRICK L A, RATHBUN L S. AC resistance of ACSR-Magnetic and temperature effects[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1985, 104(6):1578-1584.

[6] DOUGLASS D A. Radial and axial temperate gradients in bare stranded condctor[J]. IEEE transactions on power delivery, 1986, 2(1):7-15.

[7] 林建华,曾伟. 架空导线用钢芯铝绞线张力分层特性研究[J]. 电线电缆, 2015(4):30-33.

[8] FOTI F, MARTINELLI L. An analytical approach to model the hysteretic bending behavior of spiral strands[J]. Applied mathematical modelling, 2016, 40(13/14):6451-6467.

[9] 郑黎阳,孙祖志. 铝绞线和钢芯铝绞线的应力分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 1997, 30(3):65-68.

[10] 蔡斯特,芮晓明,倪海云. 架空线路导线分层力学模型及应用研究[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(10):8-12.

[11] 黄欲成,陈池,汪峰,等. 大跨越架空输电导线钢芯铝股应力分布特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4):76-81.

[12] 肖凯,刘永斗,李鹏云,等. 架空导线温度应力场耦合数值分析[J]. 广东电力, 2015, 28(11):97-102.

[13] 何整杰,李震彪,梁盼望. 输电线温度及载流量的 ANSYS 计算方法[J]. 浙江电力, 2010, 29(8):1-5.

[14] 高琦. 架空导线温度场的数值模拟与分析[D]. 北京:华北电力大学能源动力与机械工程学院,2016.

the principle of protein-dye binding [J]. Analytical

biochemistry, 1976,25 (1): 248 – 254.

Study on Immobilization of Lipase with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Magnetic Chitosan Microspheres

HAN Xiuli<sup>1,2</sup>, GU Pengju<sup>1</sup>, FANG Shuqi<sup>1,2</sup>, CHEN Junying<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemical And Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Biomass Refining Technology and Equipment Engineering Laboratory of Henan Province Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to increase the utilization rate of lipase, the immobilization of lipase by azidation magnetic chitosan was investigated. The magnetic chitosan microspheres with particle size of 40 ~ 60 μm were prepared by suspension crosslinking method. The microspheres were modified by grafting and azide. Response surface methodology was used to investigate the effect of reaction conditions on the immobilized enzyme, and the optimum conditions for lipase immobilization were concentration of enzyme 4 mg/mL, reaction time 8.4 h, reaction temperature 39.3 °C and the pH 7.0. In the optimum conditions, the immobilized enzyme amount of magnetic chitosan microspheres was 64.4 mg/g, with the actual value showing a good fit to the predicted value. The results suggested that this method could be used to immobilized lipase.

**Key words:** magnetic chitosan microsphere;azidation;lipase

(上接第 11 页)

Study on Stress of Overhead Steel Core Aluminum Wire Strand Considering the Effect of Temperature Field

ZHANG Meng, ZHANG Yuying, ZHAO Guifeng, XIAO Yu

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** An accurate understanding of the stress distribution of each layer of ACSR in the temperature field can provide theoretical basis for the safety design and fatigue analysis of overhead conductors. Based on the properties of ACSR materials and its collaborative deformation characteristics, the relationship between stress and temperature of wire strands is studied by theoretical analysis and finite element simulation. And the effects of average temperature and radial temperature difference on the stress of outermost aluminum strands were analyzed. The results showed that when the radial temperature difference was not considered, the stress of aluminum strand decreased with the increase of temperature. While the stress of steel core increases with the increase of temperature; when the radial temperature difference was considered, the outer aluminum strand stress increased with the increase of temperature difference, and steel core aluminum strand internal stress decreased with the increase of temperature difference. When the temperature reached 20°C, the outer layer of aluminum stress increased about 49%.

**Key words:** steel core aluminum wire; finite element; temperature field; radial temperature difference; layered stress