

文章编号:1005-0523(2020)04-0131-05

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.020

水轮发电机组阻尼绕组连接片的包辛格效应

李金泽, 谢克非

(南昌工程学院机械与电气工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:研究了水轮发电机组阻尼绕组连接片材料在不同压缩变量和反向应变量下所导致的应变抗力减小的现象(称为包辛格效应,简称BE),并探讨了不同压缩应变量对阻尼绕组连接片BE的影响,通过不同压缩应变量压拉实验,找到阻尼绕组紫铜连接片的最优包辛格值。结果表明:较大压缩变量对BE存在影响,随预变形量的增加,包辛格效应值变化,预变形量为3%时,包辛格效应值达到极值。再增加变形量,包辛格效应值减小,3%为最优变形量,即阻尼绕组失效界限值。

关键词:阻尼绕组;包辛格效应;形变量;界限值

中图分类号:TM712 文献标志码:A

本文引用格式:李金泽,谢克非,等.水轮发电机组阻尼绕组连接片的包辛格效应[J].华东交通大学学报,2020,37(4):131-135.

Citation format:LI J Z, XIE K F. Bauschinger Effect of damping winding connector of hydro-generator set [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 131-135.

水轮发电机阻尼绕组主要是防止发电机在负载突变时对发电机绕组的冲击。发电机在负载变化时,其绕组内的电压和电流会形成一个震荡的过程。发电机阻尼绕组(紫铜材质)固定在磁极上受拉,运行一段时间后受热膨胀后相互挤压,常出现烧伤、因拉压导致强度损毁等现象^[1-6]。

因此,国内外对解决水轮发电机组阻尼绕组失效的研究一直持续不断,2019年陈国强^[1]对阻尼绕组阻尼条的故障进行了分析与探讨,结合宁钢近年来出现的几起同步电动机故障处理经验,对阻尼条断裂后探索了一种新型处理方法;Bauw G对带有阻尼绕组的发电机的噪声及振动问题进行了研究^[8]。阻尼绕组问题根本原因在于内部拉压应力的变化,导致材料发生形变。

对阻尼绕组拉压过程进行包辛格效应(Bauschinger Effect, BE)研究,有利于解决阻尼绕组出现的工程问题。阻尼绕组结构包括阻尼铜条、阻尼铜环、磁极、阻尼条和铜环的连接件阻尼连接片构成,见图1,整个结构中,阻尼绕组中阻尼连接片拉压应力最为明显。

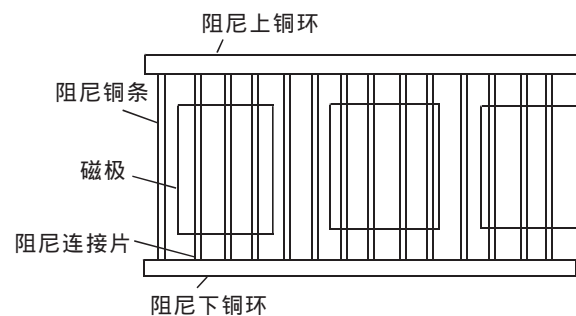


图1 阻尼绕组结构

Fig.1 Damping winding structure

1 试样制备及实验方法

1.1 试样制备

试验用阻尼绕组连接片为紫铜材质,其中加入少量脱氧元素或其他元素以改善材质和性能,也可称之为紫铜合金。阻尼绕组连接片紫铜合金^[9-11],化学成分为:Cu+Ag 99.90%,Bi 0.001%,Sb 0.004%,As 0.005%,Fe 0.001%,Pb 0.005%,S 0.001 5%,O 0.000 5%。

收稿日期:2019-11-14

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20132BAB206014)

作者简介:李金泽(1994—),男,硕士研究生,研究方向为水电动力工程。

通信作者:谢克非(1961—),男,教授,博士,研究方向为水电动力工程。

紫铜试样按国标 GB/T 26077-2010 金属材料-疲劳试验-轴向应变控制方法加工,将尺寸为 120 mm×120 mm×20 mm 的原材料分割成 5 份试样,每份试样的表面磨去 0.4~0.5 mm,以消除表面状态的影响。BE 轴向加载试样如图 2 所示,总长度为 120 mm,直径为 15 mm,中间加载部位长度为 20 mm,直径为 6 mm。在离最终尺寸还差 0.1 mm 时,以每道工序不超过 0.005 mm 速度进行研磨,研磨后对试样表面再沿试样轴向进行抛光处理。

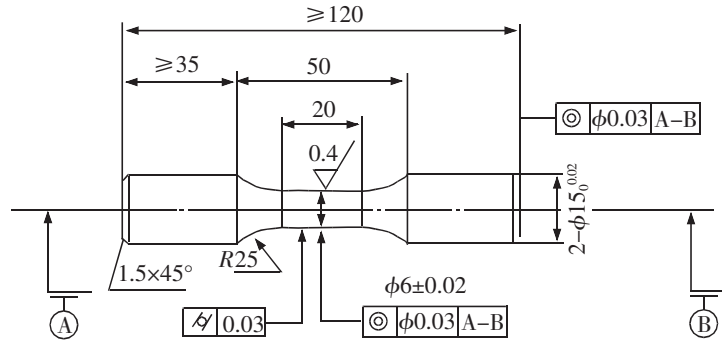


图 2 试样加工尺寸规格(单位:mm)

Fig.2 Processing dimensions and specifications of samples(Unit:mm)

1.2 实验方法

安排 5 组试验。其中一个试样进行单向拉伸试验,测量金属拉伸强度,作为紫铜“原始拉伸强度”,其余 4 个试验分别进行不同预压缩变形后的拉伸试验,测量拉伸屈服强度。试验在电液伺服疲劳试验机(INSTRON 8801)上进行^[12-13],拉伸速率为 0.5 mm/min,压缩速率为 0.2 mm/min,试验温度为室温。以固定速率(0.2 mm/min)进行 4 组压缩试验,分别按 1.0%,2.0%,3.0%,4.0%的压缩形变量进行,记录 4 组实验的压缩荷载值,以固定速率(0.5 mm/min)进行 4 组拉伸试验,拉伸形变量为 3%,4 组为上述压缩后试样,记录 4 组试验的拉伸荷载值。以固定速率(0.5 mm/min)进行 1 组拉伸试验,拉至试样失效,记录实验的拉伸荷载值。

2 试验过程

2.1 压缩试验

对加工好的 5 个试样,任取 4 个,编号分别为 1#,2#,3#,4#,以 0.2 mm/min 的速率进行压缩试验,1# 试样进行压缩 1%(2 mm)的形变量,2# 试样压缩 2%(4 mm)的形变量,3# 试样压缩 3%(6 mm)的形变量,4# 试样进行压缩 4%(8 mm)的形变量。提取部分试验数据绘制成表 1 及表 2。表 1 左表为 1# 试样压缩试验数据,右表为 2# 试样压缩试验数据;表 2 中左表为 3# 试样压缩试验数据,右表为 4# 试样压缩试验数据。

表 1 1# 和 2# 试样压缩

Tab.1 Sample1# and 2#compression

耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa	耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa
1	-0.000 25	-136.131 05	4.798 64	1	-0.000 25	-136.131 05	4.798 64
8	-0.023 08	-1 536.303 76	54.154 96	15	-0.045 34	-2 526.652 81	90.262 44
16	-0.050 61	-2 917.760 61	102.851 5	30	-0.096 18	-4 246.830 94	151.714 2
24	-0.077 1	-3 994.625 81	140.811 2	45	-0.146 18	-5 252.659 32	187.646 6
32	-0.101 74	-4 896.569 25	172.604 8	60	-0.196 77	-5 808.866 02	207.516 6
40	-0.129 95	-5 587.488 41	196.959 9	75	-0.245 27	-6 054.669 62	216.297 7
48	-0.156 86	-6 105.875 97	215.233 1	90	-0.296 22	-6 216.400 86	222.075 4
56	-0.182 21	-6 463.974 71	227.856 1	105	-0.345 24	-6 302.201 75	225.140 5
61	-0.202 39	-6 656.718 25	234.650 4	120	-0.394 82	-6 382.632 26	228.013 8

表 2 3# 和 4# 试样压缩
Tab.2 Compression of Sample 3# and 4#

耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa	耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa
1	-0.001 48	-97.233 06	3.473 56	1	-0.001 12	-148.659 94	5.293
30	-0.098 84	-4 470.622 54	159.709 0	30	-0.098 44	-4 292.845 73	152.845 6
60	-0.198 18	-6 133.842 47	219.126 0	60	-0.198 68	-5 802.828 07	206.608 1
80	-0.266 63	-6 499.842 45	230.414 9	90	-0.298 71	-6 201.279 16	220.794 9
100	-0.333 37	-6 574.511 53	234.868 5	120	-0.396 96	-6 371.688 84	226.862 2
120	-0.400 4	-6 660.765 41	237.949 9	150	-0.498 15	-6 492.120 03	231.150 2
140	-0.467 6	-6 737.947 46	240.707 2	180	-0.597 82	-6 582.933 66	234.383 6
160	-0.532 41	-6 784.719 23	242.378 0	210	-0.698 48	-6 626.534 46	235.936
180	-0.597 78	-6 805.038 45	243.103 9	240	-0.798 24	-6 692.069 77	238.269 3

通过表 1 及表 2 可以看出,耗时为 30 s 时,2# 试样的载荷为 4 546 N,压缩应力为 151 MPa,3# 试样的载荷为 4 470 N,压缩应力为 159 MPa,4# 试样的载荷为 4 292 N,压缩应力为 152 MPa。在不同压缩应变实验下,同时间段的载荷值与压缩应力值基本相同。

1# 试样在压缩 1%(2 mm)时,载荷值为 6 656 N,压缩应力为 234 MPa;2# 试样在压缩 2%(4 mm)时,载荷值为 6 382 N,压缩应力为 228 MPa;3# 试样在压缩 3%(6 mm)时,载荷值为 6 805 N,压缩应力为 243 MPa;4# 试样在压缩 4%(8 mm)时,载荷值为 6 692 N,压缩应力为 238 MPa。不同压缩应变试验下,在达到最终压缩形变量时,不同试验的施压荷载值,压缩应力值相差不同,形变量的最终大小与荷载值、压缩应力无明显相关性。

将 4 组压缩试验数据绘制成图,如图 3 所示。横坐标表示压缩变量,从 1%(2 mm)增加到 4%(8 mm),纵坐标为压缩荷载值,以 kN 为单位。从图中可以看出,水轮发电机组阻尼绕组紫铜连接片的载荷/应变曲线基本都处于相同的变化趋势,但也有细微的不同,1#、2# 和 3# 试样的变化趋势基本一致,最终荷载值趋向于 6 500 N 左右,但 4# 试样在最终形变时,载荷需求增大,随着压缩形变量的激增,4# 试样的载荷需求增大明显。

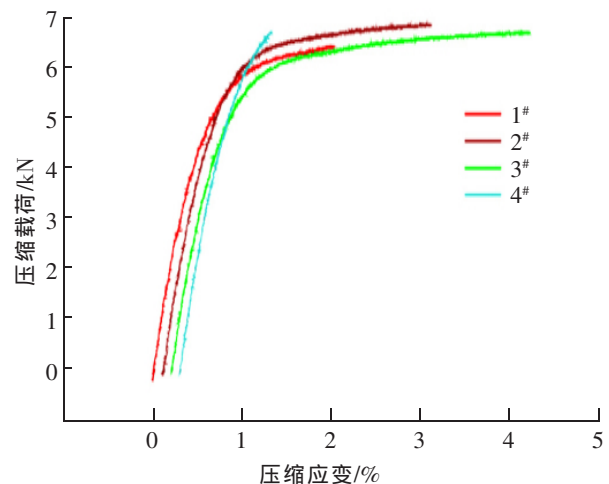


图 3 紫铜连接片压缩试验
Fig.3 Compression test of copper joint

2.2 拉伸试验

取未压缩的试样,及上述压缩后的 4 个试样,进行拉伸试验,编号分别为 1',2',3',4',5',以 0.5 mm/min 的速率进行拉伸试验,1' 试样为原始拉伸试样,拉伸至丧失屈服强度,可截取任意段作为对比数据,其余 4 个试样拉伸量均为 3%(6 mm);2' 试样为压缩 1%(2 mm)的形变量下拉伸试验,3' 试样为压缩 2%(4 mm)的形变量下拉伸试验,4' 试样为压缩 3%(6 mm)的形变量下拉伸实验,5' 试样为压缩 4%(8 mm)的形变量下拉伸实验。提取部分试验数据绘制成表 3,表 4。表 3 左表为 2' 试样拉伸试验数据,右表为 3' 试样拉伸试验数据;表 4 中左表为 4' 试样拉伸试验数据,右表为 5' 试样拉伸试验数据。

从表 3 及表 4 中可以看出,开始拉伸(1 s)时,3' 试样的起始载荷为 369 N,2',4' 和 5' 试样的起始载荷都在 500~550 N 之间,3' 试样的起始载荷远远小于其他的 3 个试样,表明 3' 试样的初始拉伸试样的需求载荷(力)最小,在几个试样试验中荷载处于极小值。随着耗时、拉伸量的增加,最终拉伸量为 3%(6 mm)时,2' 试样的最终载荷为 6 230 N,拉伸应力值为 225 MPa;3' 试样的最终载荷为 6 609 N,拉伸应力为 225 MPa;4' 试

样的最终载荷为 6 383 N, 拉伸应力为 227 MPa; 5' 试样的最终载荷为 7 413 N, 拉伸应力为 261 MPa。在拉伸量终值时, 3' 试样的载荷值远远大于 2' 和 4' 试样, 在前 3 组试样中, 处于荷载极大值。

表 3 2' 和 3' 试样压缩
Tab.3 Compression of Specimen 2' and 3'

耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa	耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa
1	0.009 66	544.607 64	19.455 63	1	0.006 42	369.143 49	13.187 32
8	0.064 86	3 154.742 72	112.700 3	8	0.064 18	3 187.704 09	113.877 9
16	0.135 76	4 836.297 04	172.772 4	16	0.130 61	5 006.480 22	178.852 0
24	0.201 41	5 614.328 38	200.566 9	24	0.197 42	5 796.861 65	207.087 7
32	0.269 88	5 983.198 28	213.755 5	32	0.264 83	6 158.828 74	220.018 6
40	0.355 84	6 159.198 28	220.031 9	40	0.332 62	6 375.575 07	227.761 7
48	0.400 86	6 215.906 14	222.057 7	48	0.398 08	6 482.064 72	231.566 0
56	0.468 19	6 281.614 3	224.405 1	56	0.464 71	6 531.202 79	233.321 4
64	0.533 56	6 293.237 21	224.820 3	64	0.532 17	6 584.739 69	235.233 9
72	0.599 07	6 320.643 42	225.799 4	72	0.599 51	6 609.916 69	236.133 4

表 4 4' 和 5' 试样压缩
Tab.4 Sample 4' and 5' compression

耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa	耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa
1	0.006 79	548.112 39	19.515 4	1	0.008 2	501.406 19	17.674 65
8	0.068 29	2 878.463 27	102.486 9	8	0.064 96	3 564.584 26	125.652 1
16	0.135 06	4 362.213 61	155.315 4	16	0.132 5	5 848.681 93	206.167 0
24	0.200 2	5 193.102 36	184.899 0	24	0.200 82	6 988.692 28	246.352 5
32	0.269 14	5 708.255 3	203.241 2	32	0.267 97	7 308.328 15	257.619 7
40	0.335 86	6 006.359 82	213.856 1	40	0.332 25	7 376.801 97	260.033 5
48	0.399 95	6 156.313 42	219.193 9	48	0.400 45	7 393.229 01	260.612 5
56	0.467 89	6 272.077 56	223.315 6	56	0.465 43	7 398.371 56	260.790 3
64	0.535 01	6 317.627 43	224.937 4	64	0.534 51	7 404.232 03	264.000 4
72	0.601 24	6 383.943 56	227.298 6	72	0.599 71	7 413.172 72	261.315 5

将 1' 试样, 进行拉伸试验, 拉伸至试样失去屈服强度, 提取部分数据绘制成表 5。在表 5 中可以看出, 初始拉伸(1s)时, 试样 1' 的初始载荷为 502 N, 拉伸应力为 19 MPa, 随着耗时、拉伸量的增加, 在拉伸量为 3% (6 mm) 时, 试样 1' 的载荷为 6 283 N, 拉伸应力为 238 MPa。

将试样 1', 2', 3', 4', 5' 的拉伸试验数据绘制成图, 如图 4 所示。在图 4 中可以看出, 试样 2', 3', 4', 5' 经过压缩试验后, 再进行拉伸试样, 最终曲线趋向荷载值均小于试样 1' 的曲线趋向荷载值。说明, 包辛格效应在水轮发电机组阻尼绕组紫铜连接片中存在明显。

在 2', 3', 4' 组试样曲线中可以看出, 3' 试样在其中属于极值, 最终拉伸应力值远高于 2' 试样和 4' 试样。但 5' 试样最终拉伸应力值远超于 2', 3', 4' 组试样, 并且也远超于试样 1' 的最终拉伸应力, 试样 5' 的现象说明, 水轮发电机组阻尼绕组紫铜连接片的包辛格效应在压缩量 4% (8 mm) 以下再拉伸时, 现象明显, 超过压缩量 4% (8 mm) 再拉伸时, 包辛格效应不再突出。

此外, 通过试样 1' 的完全拉伸试验可以看出, 阻尼绕组连接片的最终拉伸应力值趋近于 240 N 左右, 不在发生明显变化, 阻尼绕组连接片的最终拉伸应变量值在 43% 左右时, 材料发生断裂, 彻底损毁, 进一步验证了阻尼绕组紫铜连接片的伸长率在 45% 左右的物性参数。

表5 1 试样压缩
Tab.5 Compression of Sample 1

耗时/s	位移/mm	载荷/N	压缩应力/MPa
1	0.008 76	502.336 03	19.078 64
8	0.068 57	3 612.399 1	137.198 3
16	0.134 59	5 986.320 97	227.359 4
24	0.201 77	6 206.655 5	235.727 7
32	0.267 1	6 223.988 53	236.386 0
40	0.334 78	6 261.038 78	237.793 1
48	0.403 25	6 254.267 69	237.536 0
56	0.469 77	6 273.782 25	238.277 1
64	0.536 48	6 292.080 88	238.972 1
72	0.602 83	6 283.319	238.639 3

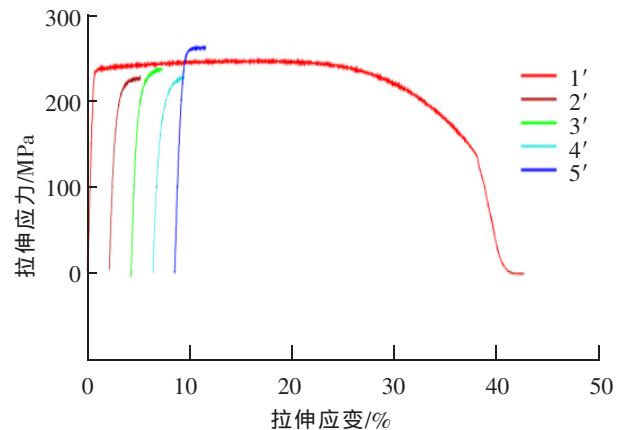


图4 紫铜连接片拉伸试验
Fig.4 Tensile test of red copper connection sheet

4 结论

通过对阻尼绕组紫铜连接片进行1组极限拉伸试验,4组不同压缩形变量下拉伸试验,可以得到以下几项结论:

- 1)通过对试样1'的极限拉伸试验可知,阻尼绕组紫铜连接片的拉伸应力在240 N左右,极限拉伸应变率在43%左右,极限应变率值也符合紫铜连接片的伸长率;
- 2)通过对4组试样进行不同压缩形变量试验可知,不同微小形变量下,紫铜连接片的需求载荷,压缩应力值变化不大,形变量发生巨大变化时,紫铜连接片的需求载荷、压缩应力值可能发生巨大变化;
- 3)通过2',3',4',5'试样拉伸试验与试样1'拉伸试验可知,经过压缩再拉伸,拉伸应力普遍小于原始拉伸应力值,水轮发电机组阻尼绕组连接片的包辛格效应存在较为明显,水轮发电机组阻尼绕组连接片的包辛格效应极值在压缩形变量为2%时出现。

参考文献:

- [1] 连军, 仲崇健, 林晓晖, 等. 同步发电机阻尼绕组制造工艺[J]. 焊接, 2014(6): 66-69.
- [2] 孙群. 弹性阻尼环连接片的制造新工艺[J]. 大电机技术, 1990(4): 11-13.
- [3] 范镇南, 韩力, 廖勇, 等. 贯流式水轮发电机空载电压波形畸变与阻尼条损耗发热抑制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 17-26.
- [4] 孙洋, 林文娟, 杨作鹏, 等. 不同装机容量水轮发电机阻尼绕组涡流损耗影响因素分析[J]. 黑龙江电力, 2015, 37(3): 192-195.
- [5] 白太贵. 贯流式发电机阻尼绕组烧伤现象、处理及防范[J]. 技术与市场, 2013, 20(8): 28-30.
- [6] 牟玉壮, 沈润杰, 王青华, 等. 抽水蓄能发电机组转子阻尼环连接片强度及寿命评估[J]. 中国工程机械学报, 2016, 14(1): 83-86.
- [7] 陈国强, 闫建坡, 张保忠, 等. 大型凸极式同步电机阻尼条故障的新型处理方法[J]. 冶金设备, 2019(S1): 35-37.
- [8] BAUW G, CASSORET B, NINET O, et al. Design of an induction machine with damper windings for noise and vibrations reduction[J]. *Compel*, 2019, 38(4): 1253-1262.
- [9] 赵伯蔚. 电机阻尼环端头铝青铜与紫铜钎焊工艺试验研究[J]. 上海电机厂科技情报, 2001(2): 38-41.
- [10] 陈家傲. 用锌做脱氧剂熔炼紫铜[J]. 铸造, 1988(11): 26.
- [11] 紫铜及脱氧铜的焊接[J]. 焊接, 1975(4): 42-45.
- [12] 周宏宇, 刘亚南, 王利辉, 等. 电液伺服脉动疲劳试验加载系统及其应用[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(3): 205-212.
- [13] 宋学东, 程永全. 电液伺服动态试验技术与电液伺服动态试验机[J]. 理化检验(物理分册), 2008(5): 247-249.

The Spectral Method of Eigenvalue Problem of Maxwell's Equation

Chen Yafei¹, Mao Jinjin²

(1. School of Mathematical Science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China;

2. School of Mathematics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In the traditional differential equation solution, the multi-region spectral method only constructs the approximation scheme of the equation independently in the local element, and different elements exchange information by penalizing the boundary or the numerical flow function on the boundary, which has good flexibility and high precision in the selection of the basis function and the generation of the grid. In this paper, the numerical solution of Maxwell Differential Equation is studied based on multi-region spectral method. In order to further reduce the computational cost of solving the equation, various difference numerical flux formats are introduced. By use of the upwind flux, the scale of the hybrid model supported by the format is reduced. The non-physical eigenvalues cannot be removed and the spectra are clearly separated, which makes it possible to separate the physical mode from the mixed mode. The algorithm is suitable for arbitrary mesh generation with high precision and high efficiency, and the effectiveness of the algorithm is verified by numerical examples.

Key words: Maxwell Equation; multi-domain Galerkin spectral method; convergence order

(上接第 135 页)

Bauschinger Effect of Damping Winding Connector of Hydro-Generator Set

Li Jinze, Xie Kefei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: The reduction of strain resistance caused by different compression variables and reverse strain of damping winding coupling material of hydro-generator set is studied, which is called Bauschinger effect, abbreviated as BE. The influence of different compression strain variables on damping winding connector BE was discussed. Through different compression strain compression and tension experiments, the optimal Bauschinger extremum of damping winding copper connector was obtained. The results show that large compression variables have an effect on BE. With the increase of pre-deformation, the Bauschinger effect value changes. When the pre-deformation is 3%, the Bauschinger effect value reaches the extreme value. In addition, when the deformation is increased, the Bauschinger effect value decreases, and 3% is the optimal shape variable, namely, the failure limit value of damping winding.

Key words: damping winding; Bauschinger effect; shape variable; limit value