

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.016

电气设备GIS和GIL用不同材质波纹管性能研究

乔亚霞¹, 金焱², 张浩¹, 孙绍恒¹, 李洪伟³, 谢亿⁴, 罗宏建⁵

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031; 3. 沈阳汇博热能设备有限公司, 沈阳 110043; 4. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 长沙 410000; 5. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310014)

摘要:波纹管是电力设备GIS、GIL的重要结构,服役环境复杂,要求材料组织性能稳定,易加工成型,服役过程中温升小,满足不同地区的腐蚀要求。文中选取了304、304L、321、316L、Incoloy 825五种材料为研究对象,测试它们作为波纹管候选材料的性能。利用X射线衍射(XRD)观察了不同变形程度后的组织,发现在304、304L和321不锈钢中发生了塑性诱导相变相变诱导塑性(transformation induced plasticity, TRIP)效应,这3种材料中均出现了 α' 马氏体,316L不锈钢和825合金中没有发生相变。因此在硬度测试中304、304L、321合金的硬度增幅大于316L和825。采用静态磁性测量等方法研究了材料的磁性变化,发现经形变后 B_r 和 H_c 均出现不同程度增强,说明不锈钢材料均产生不同程度的磁性。利用电化学测试方法研究了不同材料抗腐蚀性,试验表明5种试验材料在C4以上重污染大气环境均有较好的抗腐蚀性。其中,316L不锈钢表现出最好的耐蚀性能。因此,在变形量较大,腐蚀环境恶劣的情况下推荐使用316L不锈钢。变形量小,腐蚀轻微的时候推荐使用304不锈钢。

关键词: GIS/GIL设备; 波纹管; 奥氏体不锈钢; 选材

Research on Performance of Different Bellows Materials for GIS/GIL

QIAO Yaxia¹, JIN Yan², ZHANG Hao¹, SUN Shaoheng¹, LI Hongwei³, XIE Yi⁴, LUO Hongjian⁵

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Shenyang Huibo Heat Energy Equipment Co., Ltd., Shenyang 110043, China; 4. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410000, China; 5. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Bellows is an important structure of GIS and GIL and, due to complicated service environment, requires stable microstructure performance, good formability, small temperature rise in service and meets excellent corrosion resistance of different regions. In this paper, 304 stainless steel, 304L stainless steel, 321 stainless steel, 316L stainless steel and Incoloy 825 are selected as the research objects to test their performance as candidate materials for bellows. The microstructure at specific strain levels is observed by optical microscope (OM) and X-ray diffraction (XRD). It is found that the transformation induced plasticity (TRIP) effect occurs and α' martensite is observed in 304, 304L and 321 stainless steel. No phase transformation in 316L stainless steel and 825 alloy are found. The hardness increase magnitude in 304, 304L and 321 stainless steel are bigger than that in 316L and 825 alloy during the hardness test. The magnetic variation of the material is studied by static magnetic measurement. It is found that both B_r and H_c increase in varying degrees after deformation, showing that all candidate materials produce different degrees of magnetism. The corrosion resistance of different materials is studied by electrochemical test, which shows that the five test materials have good corrosion resistance in heavy polluted atmospheric environment above C4, with 316L stainless steel in particular. Therefore, 316L stainless steel is recommended in the case of large deformation

收稿日期:2024-03-05; 修回日期:2024-05-18

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGZJ0000KXJS1800302)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(SGZJ0000KXJS1800302).

and harsh corrosive environment and 304 stainless steel is recommended in the case of small deformation and slight corrosion.

Key words: GIS/GIL; bellows; Austenitic stainless steel; material selection

0 引言

气体绝缘金属封闭式开关设备(GIS)和输电线路(GIL)是以SF₆气体作为绝缘介质的设备,伸缩节是这类设备的重要结构,由波纹管、法兰及相关结构件组成,按照设计和使用要求,伸缩节可以实现轴向补偿、横向补偿、角向补偿或组合方式的补偿,用以补偿GIS/GIL在安装、拆卸、冷热变化、基础沉降等过程中产生的位移^[1-3]。作为外壳的一部分,伸缩节同时还要起到密封、隔离和屏蔽磁场的作用^[4]。目前比较常用的伸缩节是金属波纹管伸缩节,波纹管的选材,对伸缩节的使用性能有着重要影响^[5]。为了既能减小磁性材料因感应电流引起的涡流产生的发热,降低外壳损耗,又能保证材料具有良好的韧性和焊接性能,波纹管一般选用面心立方结构的无磁不锈钢或者铝合金材料。虽然铝合金材料具有优良的导热性和导电性^[6],但是与延伸率可达40%,强度可达900 MPa的无磁奥氏体不锈钢相比^[7-8],铝合金延伸率和强度都较低,如退火态5083铝合金的延伸率不到26%,抗拉强度也不足350 MPa,大变形时极易开裂^[9]。而且铝合金耐腐蚀性能也难以和不锈钢相比,因此无磁奥氏体不锈钢作为波纹管的材料被广泛采用^[10]。

大量研究表明,具有面心立方(face-centered cubic, FCC)结构的金属材料的变形机制和层错能密切相关。当层错能较低时,会发生塑性诱导相变相变诱导塑性(transformation induced plasticity, TRIP)效应,部分奥氏体会转变为马氏体^[11-13];随着层错能的升高,TRIP效应逐渐被抑制,变形机制逐渐转变为孪生诱导塑性(twinning induced plasticity, TWIP)效应,马氏体的体积分数逐渐减少,孪晶数量逐渐增加^[14];随着层错能的进一步升高,TWIP效应也逐渐被抑制,变形机制转变为位错滑移^[15]。各种变形机制之间没有明显确定的层错能界限,在某一层错能条件下可能TRIP效应和TWIP效应同时发生^[16-17],但是会以其中某一个为主。室温条件下,层错能高低主要由合金成分决定^[18]。C和Ni等元素可以提高层错能,Cr和Si等元素可以降低层错能^[17,19]。由于含有大量的Cr元素,具有FCC结构的奥氏体不锈钢具有较低的层错能,在室温条件下的变形过程中会发生TRIP效应,部分奥氏体会转变为马氏体,而马

氏体为铁磁性组织,会使感应电流产生的涡流发热更加明显,尤其是在特高压工程中,苏通综合管廊工程就出现因波纹管温升试验温度超过标准规定限值不通过的案例。除了马氏体之外,碳、氮等间隙原子含量的变化也能影响磁性能。此外,由于马氏体的硬度高于基体奥氏体的硬度,因此会在相界面处产生应力集中,导致变形开裂^[20-22]。而且,由于马氏体和奥氏体的腐蚀电位不同,二者之间会形成原电池,加快材料的腐蚀速度。因此,亟需对比常用的奥氏体不锈钢性能,选出适合用于波纹管制造的材料。文中主要选用304、304L、321、316L、Incoloy 825五种候选材料,分别研究不同变形程度后试验材料的组织、硬度、磁性能和耐腐蚀性能的变化。

1 试验条件

1.1 试验材料

文中选取304、304L、321、316L、Incoloy 825等5种材料取名义外径规格为 $\phi 660$ 、 $\phi 690$ 、 $\phi 720$ 、 $\phi 780$ 、 $\phi 840$ mm波纹管部件试样,其冷加工应变拉伸率分别为8.65%、14.64%、18.47%、28.95%、38.27%,每个条件下制备3组平行试样。

1.2 试验方法

试样取自波纹管部件试样的管端未形变部分和波峰形变最大处。分别采用蔡司光学显微镜进行金相分析,X射线衍射(XRD)进行定性、定量分析物相成分及其变化,显微硬度试验(取试验载荷为100 gf,加载时间5 s),静态磁性测量等方法研究了不同形变条件下材料的性能转变。

2 试验结果及分析

2.1 组织演变

对所选奥氏体不锈钢(304、304L、316L、321、825)波纹管试样进行XRD分析,见图1。从图1可以看出,未变形的304不锈钢显微组织为奥氏体。发生塑性变形之后,部分奥氏体转变为 α' 马氏体。随着变形量的增大, α' 马氏体数量逐渐增多。304L不锈钢组织中的 α' 马氏体增加尤其明显。这是因为和304不锈钢相比,304L不锈钢中的碳质量分数降低,而碳元素含量对于层错能有重大影响,层错能随碳元素含量的降低而降低,所以304L不锈钢中更容易

发生TRIP效应,产生大量马氏体。316L不锈钢中由于添加了更多的Mo,因此层错能较高,变形机制以孪晶和位错滑移为主,因此 α' 马氏体没有出现。和304不锈钢相比,在321不锈钢中由于添加了强碳化物形成元素Ti,因此大量固溶碳元素形成碳化物固定下来,层错能也会降低,优化了TRIP效应的

热力学条件,但是添加的Ti元素会提高层错能;另一方面,析出的碳化物会阻碍层错的发展,因此会从动力学方面阻碍TRIP效应的发生。因此,最终还是会形成一部分马氏体,但是数量小于304不锈钢。825镍基合金经冷加工变形后,仍为奥氏体结构。

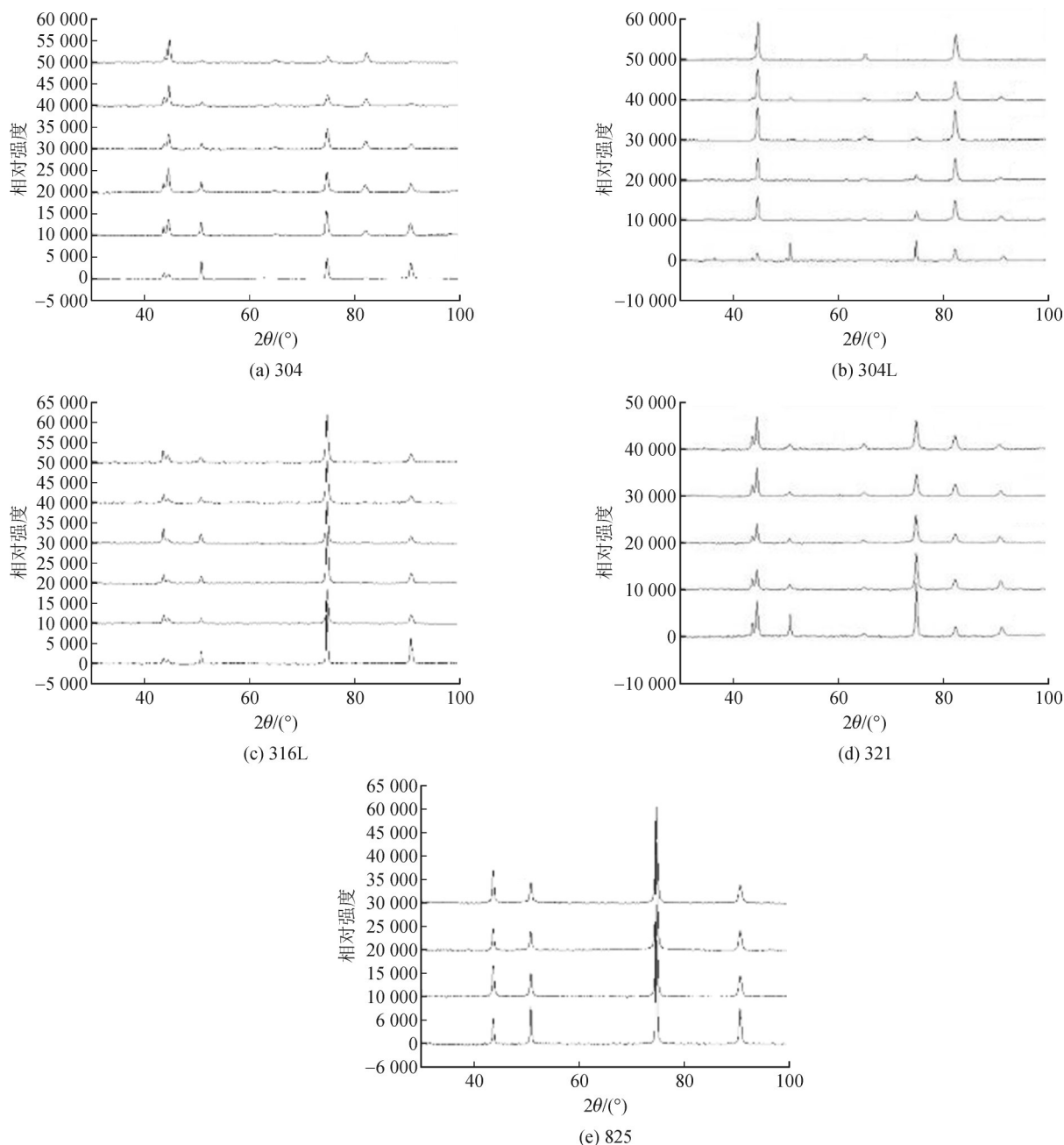


图1 不同变形量奥氏体不锈钢的XRD分析

Fig. 1 The XRD results at different strain levels

2.2 硬度

利用维氏硬度计对波纹管波峰波谷区域变形部位和波纹管管端未变形部位进行显微硬度检测,试验结果见表1。

依据上述硬度数据绘制显微硬度随应变量的变化见图2,5种试验材料经冷加工变形后,硬度值

均呈现出上升趋势,但是不同牌号材料硬度的上升程度不同,这主要和材料的成分及变形机理相关。304不锈钢由于存在TRIP效应,所以硬度随变形程度的增加而快速提高。而304L不锈钢由于碳含量低,而碳元素是一种强固溶强化原子,所以304L不锈钢的初始硬度较低,但是由于304L不锈钢具有较

表1 不同变形量奥氏体不锈钢硬度值

Table 1 The hardness at different strain levels

材料	厚度/mm	硬度/HV					
		平板	φ660 mm	φ690 mm	φ720 mm	φ780 mm	φ840 mm
304	0.5	166.0	277.4	280.9	300.3	326.7	404.8
304L	0.5	149.6	212.8	279.1	319.6	348.7	415.2
316L	0.5	149.0	232.0	261.2	275.5	281.8	344.4
321	0.8	153.1	259.3	279.4	293.2	370.0	—
825	0.6	163.5	251.3	256.8	265.6	—	—

低的层错能,因此更容易发生TRIP效应,所以硬度增长程度较大,超过了304不锈钢。316L不锈钢虽然碳含量低,但是添加了Mo元素,起到的固溶强化效果较弱,因此初始硬度和304L不锈钢差不多。但是Mo元素提高了层错能,因此TRIP效应几乎不发生,仅发生TWIP效应和位错滑移,所以变形一开始硬度提高较快,但是随着层错的消耗,强化机理转变为位错滑移,因此硬度的提高幅度逐渐降低。321不锈钢中由于碳化钛析出,因此初始硬度略高于304L不锈钢,但是低于304不锈钢,由于弱TRIP效应,所以初始硬度增加幅度不是很大,但是后期由于碳化钛缩短位错滑移距离,提高了位错塞积程度,因此硬度大幅提高。825合金由于没有TRIP和TWIP效应,因此只能靠位错塞积强化,硬度随变形程度增加的幅度较小。

2.3 静态磁性

将样品的变形部位用线切割机进行取样,试样外径18 mm、内径12 mm,厚度为0.6~0.8 mm。利用磁滞回线测量仪对样品进行静态磁性测量,以研究变形样品在不同磁场强度 H 下的磁感应强度 B ,并获得最大磁感应强度 B_m 、剩余磁感应强度 B_r 、最大磁场强度 H_m 、矫顽力 H_c 和饱和磁场强度 H_s 等特征参量。不同变形量不锈钢膨胀节在不同磁场强度下的磁性特征参量见表2。经过不同程度的拉伸变形

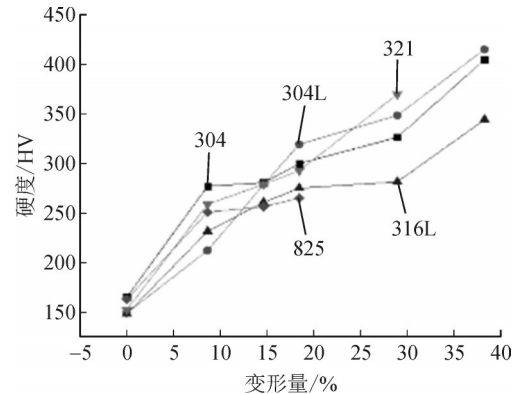


图2 不锈钢未变形及不同程度变形后硬度变化图

Fig. 2 Hardness change diagram after deformation

后,不锈钢的 B_r 和 H_c 均出现不同程度增强。当变形量小于8.65%时,321不锈钢有轻微磁性,其他材料表现不明显;在变形量为14.64%时,304不锈钢有明显磁性;在变形量为18.47%时,304L不锈钢的磁性较为明显。和304L不锈钢相比,由于304不锈钢固溶了碳元素,造成晶格膨胀,增大了Fe-Fe原子间距,减少了3d轨道的重叠,从而增大了Fe原子磁矩,使铁磁性显著增强^[23-24]。316L不锈钢的矫顽力和剩余磁感应强度在变形量为28.95%时有磁性较为明显。根据变形量排序,易磁化性能从大到小为:321>304>304L>316L>825。

表2 不同变形量奥氏体不锈钢的磁性特征参量

Table 2 Magnetic characteristic parameter at different strain levels

变形量/%	304		304L		316L		321		825	
	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$
8.65	0.002 5	0.400	0.005 1	0.810	0.004 8	1.460	0.011 1	5.090	0.000 1	0.445
14.64	0.029 3	14.690	0.006 8	0.480	0.010 2	1.670	0.016 1	5.640	0.003 4	0.377
18.47	0.045 5	56.550	0.013 1	2.720	0.024 2	13.130	0.023 0	42.580	0.007 8	2.778
28.95	0.133 5	173.860	0.124 9	67.780	0.044 3	16.300	0.060 9	61.850	—	—
38.27	0.191 3	278.770	0.149 7	142.820	0.116 7	98.580	—	—	—	—

2.4 腐蚀试验

为研究C4及以上重腐蚀环境下Cl⁻对波纹管不锈钢耐蚀性的影响,选取0.012 mol/L NaCl和

0.02 mol/L NaHSO₃试验介质配置模拟实际环境的腐蚀溶液体系进行电化学实验,实验腐蚀溶液体系pH为3,试验温度为20℃。

5种不锈钢在模拟溶液中的电化学阻抗谱见图3。从图3可以看出,模拟溶液中5种不锈钢阻抗值都大于 $105\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,表现出较高的阻抗值,说明5种不锈钢对C4以上重污染大气环境均有较好抗性。对比5种不锈钢阻抗可知,316L不锈钢和304不锈钢阻抗更高,825不锈钢阻抗次之。从Bode图可以看出,316L不锈钢和304不锈钢低频区相位角较大,说明其在模拟环境中具有较高的耐腐蚀性能。

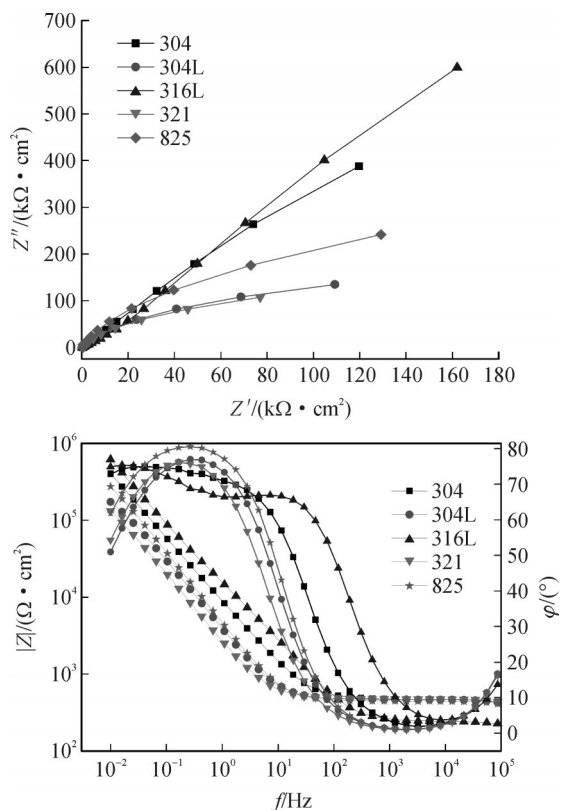


图3 5种不锈钢在模拟溶液中的电化学阻抗谱图
Fig. 3 Electrochemical impedance spectroscopy of five materials in simulated solution

不同不锈钢在模拟溶液中的极化曲线见图4,拟合结果见表3。304、316L和321三种不锈钢表现出典型的钝化现象,304L和825两种不锈钢表现出近似钝化现象。对比5种不锈钢的极化曲线,316L不锈钢自腐蚀电位最高、腐蚀电流密度最小、钝化电位区间较大,表现出最好的耐蚀性能;由于镍含量较高,因此825不锈钢耐蚀性好,腐蚀电流与316L相近;304、304L、321耐蚀性不如316L和825。

3 结论

对各种不锈钢制波纹管的不同拉伸率试样进行了硬度、磁性和显微组织、XRD物相分析以及腐蚀试验,形成主要结论如下:

1)塑性变形之后,通过组织分析和XRD检测可以发现,304、304L、321不锈钢中发生了TRIP效应,

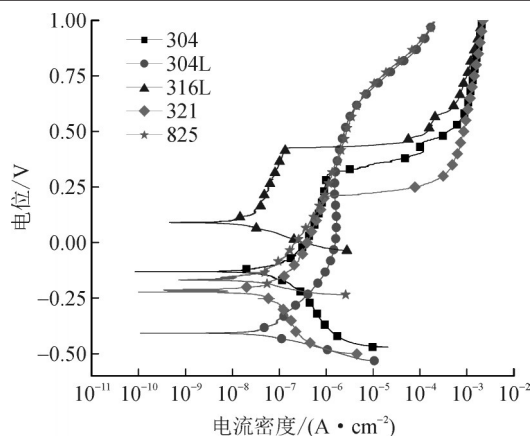


图4 5种不锈钢在模拟溶液中的极化行为
Fig. 4 Polarization behavior of five materials in simulated solution

表3 5种不锈钢极化曲线拟合结果

Table 3 Polarization curve fitting results

材料	E_{corr}/V	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	E_{pit}/V	E'_{pit}/V
304	-0.136	0.163 5	0.311	—
304L	-0.411	0.056 7	—	0.573
316L	0.086	0.017 5	0.422	—
321	-0.223	0.058 3	0.207	—
825	-0.169	0.024 1	—	0.585

出现了 α' 马氏体组织,而316L不锈钢和825合金没有发生相变。因此,经形变后各试样均存在加工硬化现象,但是304、304L、321合金受加工硬化大于316L和825。

2)经形变后 B_t 和 H_c 均出现不同程度增强,说明不锈钢材料均产生不同程度的磁性。但是发生磁化的临界变形量不同,根据变形量排序,易磁化性能从大到小为:321>304>304L>316L>825。易磁化顺序不仅与马氏体含量密切相关,而且与碳含量相关,这是因为碳元素造成晶格膨胀,从而增大了Fe原子磁矩,使铁磁性显著增强。

3)经电化学试验分析可知,5种试验材料在C4以上重污染大气环境均有较好的抗腐蚀性。其中,316L不锈钢自腐蚀电位最高、腐蚀电流密度最小、钝化电位区间较大,表现出最好的耐蚀性能;825不锈钢腐蚀电流与316L相近,耐蚀性好。

4)波纹管选材要综合考虑变形量和服役环境的腐蚀情况,当变形量较小,服役环境腐蚀程度较弱时可选用304不锈钢;变形量增大、重腐蚀环境下,宜选用316L不锈钢。

参考文献:

[1] 沈小军,许海伟,杜勇,等. GIS波纹管温度补偿能力影响因素研究[J]. 高压电器,2021,57(5):58-66.

- SHEN Xiaojun, XU Haiwei, DU Yong, et al. Study on the factors influencing the temperature compensation ability of GIS bellows[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 58-66.
- [2] 王浩, 许海伟, 杜勇, 等. 基于数字孪生模型的GIS筒体关键部件温变行为研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1584-1594.
- WANG Hao, XU Haiwei, DU Yong, et al. Research on temperature change behavior of key components of GIS barrel based on digital twin model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1584-1594.
- [3] 刘云鹏, 费焱, 陈江波, 等. 特高压GIL伸缩节温度分布的测量与分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 1-6.
- LIU Yunpeng, FEI Ye, CHEN Jiangbo, et al. Measurement and analysis of temperature distribution of UHV GIL expansion joints[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 1-6.
- [4] 阮全荣, 谢小平. 气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- RUAN Quanrong, XIE Xiaoping. Research and practice on engineering design of gas insulated metal enclosed transmission lines[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2011.
- [5] 刘丽岚, 田汇冬, 吴泽华, 等. 特高压交流GIL伸缩节损耗分析及结构改进[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3183-3189.
- LIU Lilan, TIAN Huidong, WU Zehua, et al. Loss analysis and structure improvement of expansion joint for UHV AC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3183-3189.
- [6] 王文刚. ASME 5083铝合金膨胀节开发、试验及分析[C]//第十四届全国膨胀节学术会议论文集. 扬州: 中国机械工程学会, 2016: 217-221.
- WANG Wengang. Development Test and analysis of ASME 5083 aluminum alloy expansion joint[C]//Proceedings of the 14th National Inflation Festival Academic Conference. Yangzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2016: 217-221.
- [7] 张梅, 孙国胜, 秦崇烺, 等. 冷轧304不锈钢的马氏体逆相变及奥氏体再结晶行为[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 51-55.
- ZHANG Mei, SUN Guosheng, QIN Dongyang, et al. Behavior of martensite reverse transformation and austenite recrystallization of cold-rolled 304 stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(7): 51-55.
- [8] 杨晓莹, 孙文伟, 赵亚军, 等. 终锻温度对核电用316L奥氏体不锈钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(3): 135-141.
- YANG Xiaoxuan, SUN Wenwei, ZHAO Yajun, et al. Effect of final forging temperature on microstructure and properties of 316L Austenitic stainless steel for nuclear power[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(3): 135-141.
- [9] 肖政兵, 申振宇, 黄元春, 等. 退火制度对热轧态5083铝合金性能和组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6): 37-44.
- XIAO Zhengbing, SHEN Zhenyu, HUANG Yuanchun, et al. Effect of annealing process on properties and microstructure of hot-rolled 5083 Aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6): 37-44.
- [10] 彭斌, 张华东, 卜文烽. 波纹管在GIS组合电器上的应用及问题防范[J]. 低碳世界, 2016(32): 53-54.
- PENG Bin, ZHANG Huadong, BU Wenfeng. Application and problem prevention of bellows in GIS integrated appliances[J]. Low Carbon World, 2016(32): 53-54.
- [11] SAEED A A, SCHWEDT A, BLECK W. Low stacking fault energy steels in the context of manganese-rich iron-based alloys[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(12): 1024-1029.
- [12] ZHAO Jiaqi, TIAN Hua, WANG Zhong, et al. FCC-to-HCP phase transformation in CoCrNi medium-entropy alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2020, 33(8): 1151-1158.
- [13] ONDICHIO I, ALUNDA B, OWINO D, et al. Revealing a Transformation-Induced plasticity (TRIP) phenomenon in a medium-entropy alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2020, 33(8): 1159-1165.
- [14] XIONG R, PENG H, SI H, et al. Thermodynamic calculation of stacking fault energy of the Fe - Mn - Si - C high manganese steels[J]. Materials Science & Engineering A, 2014(598): 376-386.
- [15] PIERCE D T, JIMENEZ J A, BENTLEY J, et al. The influence of stacking fault energy on the microstructural and strainhardening evolution of Fe-Mn-Al-Si steels during tensile deformation[J]. Acta Materialia, 2015(100): 178-190.
- [16] ALLAIN S, CHATEAU J P, BOUAZIZ O, et al. Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004(387-389): 158-162.
- [17] DE COOMAN B C, ESTRIN Y, KIM S K. Twinning-induced plasticity(TWIP) steels[J]. Acta Materialia, 2018(142): 283-362.
- [18] 曾泽瑶, 杨钢, 杨银辉, 等. TWIP不锈钢层错能计算、塑韧性和耐蚀性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(5): 443-451.
- ZENG Zeyao, YANG Gang, YANG Yinwei, et al. Study on stacking fault energy calculation, plastic toughness and corrosion resistance properties of TWIP stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(5): 443-451.
- [19] DUMAY A, CHATEAU J P, ALLAIN S, et al. Influence of addition elements on the stacking-fault energy and mechan-

- ical properties of an austenitic Fe-Mn-C steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2008(483-484): 184-187.
- [20] 邱木生, 朱浩, 韩赞, 等. 退火工艺对780 MPa冷轧多相钢组织及性能影响[J]. 钢铁, 2021, 56(7): 139-144.
- QIU Musheng, ZHU Hao, HAN Yun, et al. Effect of annealing process on microstructure and properties of 780 MPa cold rolled multiphase steel[J]. Iron & Steel, 2021, 56(7): 139-144.
- [21] GRAJCAR A, SKOWRONEK A, RADWAŃSKI K. Mechanical behavior and stability of dispersed retained austenite in thermomechanically rolled and isothermally-treated TRIP-aided multiphase steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2022(830): 142300.
- [22] ZHANG Xiliang, TENG Rui, LIU Tao, et al. Improving strength-ductility synergy in medium Mn steel by combining heterogeneous structure and TRIP effect[J]. Materials Characterization, 2022(184): 111661.
- [23] 罗建东, 杨颖仪, 林育周. 离子扩渗工艺对316L不锈钢表层组织及磁性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 207-211.
- LUO Jiandong, YANG Yingyi, LIN Yuzhou. Effect of plasma diffusion process on surface microstructure and magnetic properties of 316L stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(7): 207-211.
- [24] WEI Bingqing, SHIMA M, PATI R, et al. Room-temperature ferromagnetism in doped face-centered cubic nanoparticles[J]. Small, 2006, 2(6): 804-809.
- 乔亚霞(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电网设备金属材料研究(E-mail: qyx@epri.sgcc.com.cn)。

《高压电器》2024年7期广告单位

彩色广告

封一: 西安西电高压开关有限责任公司

封二: 厦门海普锐科技股份有限公司

封三: 西安高压电器研究院股份有限公司(认证)

封四: 上海乐研电气有限公司

前插1: 西安西开电力装备智慧服务有限公司

前插2: 正泰电气股份有限公司

前插3: 厦门宏发电气有限公司

前插4: 西安华伟电力电子技术有限责任公司

前插5: 陕西龙翔电器有限公司

前插6: 陕西泰普瑞电工技术有限公司

前插7: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插8: 青岛海洋电气设备检测有限公司

前插9-12: 特约主编寄语