

## 成型和表面处理工艺对 316L 不锈钢镍释放率的影响

袁军平 吴海超 卢焕洵 陈绍兴 薄海瑞 黄宇亨  
(广州番禺职业技术学院珠宝学院, 广州 511483)

**摘要** 采用人工汗液浸泡法及火焰原子吸收光谱仪测试了 316L 不锈钢(%) : 0.023C, 17.57Cr, 11.23Ni, 2.03Mo) 11 种成型和表面处理工艺条件下的镍释放率。试验结果表明, 50% 压下率冷轧、1 050 °C 固溶, 镜面抛光的 316L 不锈钢型材镍释放率只有 0.02 μg/cm<sup>2</sup>/周, 很好地满足了欧盟新标准 EN1811:2011 的要求。但是成型工艺(冷轧态, 铸态) 表面处理方式(粗糙度)、取样方式(纵、横向) 都会直接影响材料的镍释放率, 使其提高 3~26 倍。

**关键词** 316L 不锈钢 镍释放率 成型工艺 表面处理方式 取样方式

## Effect of Shaping and Surface Treatment Process on Release Rate of Nickel in Stainless Steel 316L

Yuan Junping, Wu Haichao, Lu Huanxun, Chen Shaoxing, Bo Hairui and Huang Yuheng  
(Jewelry Institute, Guangzhou Panyu Polytechnic Institute, Guangzhou 511483)

**Abstract** The release rate of nickel in stainless steel 316L (%) : 0.023C, 17.57Cr, 11.23Ni, 2.03Mo) processed with 11 kinds of shaping and surface treatment methods is measured by artificial sweat soaking method and flame atomic absorption spectroscopy. Test results show that the stainless steel 316L cold rolled with 50% reduction, solid solution treated at 1 050 °C and mirror polished is only 0.02 μg/cm<sup>2</sup>/week, finely to meet the European Union new standard EN1811:2011. But the release rate of nickel is directly affected by shaping process (cold rolled state, cast state), surface treatment method (roughness factor) and sampling method (longitudinal, cross section), which may increase by 3 to 26 times.

**Material Index** Stainless Steel 316L, Release Rate of Nickel, Shaping Process, Surface Treatment Method, Sampling Method

镍对人体皮肤存在潜在的过敏及危害, 已经成为最常见的皮肤接触过敏原之一<sup>[1-2]</sup>, 欧盟针对镍过敏的普遍性及危害性, 在 20 世纪 90 年代就制定了镍指令 94/27/EC 和镍释放测试标准 EN1811:1998<sup>[3-4]</sup>, 随后根据镍致敏率仍然处于较高水平的状况, 对标准进行了加严修正, 相继颁布了镍指令 2004/96/EC 和镍释放测试标准 EN1811:1998 + A1:2008<sup>[5-6]</sup>, 最近又推出了更为严格的镍释放测试标准 EN1811:2011, 取消了镍释放率的调整值<sup>[7]</sup>, 而采用不确定性来评价, 如表 1 和表 2 所示。

以往的一些研究表明, 316L 不锈钢在人工汗液中的镍释放率明显低于镍指令规定的阈值, 不会有致敏的风险<sup>[8]</sup>。但是未得出由于医疗配件或饰品生产工艺条件各有不同, 如成型方法有精密铸造、冲压、机械加工等; 取样方式有纵向、横向等; 表面处理方

式有镜面抛光、推砂、喷砂、镀膜等因素会在多大程度上对材料的镍释放率造成影响。本文试验了饰品用 316L 不锈钢材料在不同工艺条件下的镍释放率, 并对照 EN1811:2011 的要求评价其符合性。

表 1 用于穿刺饰品的镍释放率符合性评估

Table 1 Assessment of compliance for release rate nickel for all post assemblies inserted into pierced parts of human body

镍释放率(μg/cm <sup>2</sup> /周)		阈值 (μg/cm <sup>2</sup> /周)	符合性评估	
分析结果	调整值 (EN1811:1998 + A1:2008)		EN1811:1998 + A1:2008	EN1811:2011
<0.11	<0.011	0.2	合格	合格
0.11~0.35	0.011~0.035		合格	不确定
0.35~2.00	0.035~0.200		合格	不合格
>2.00	>0.200		不合格	不合格

表 2 用于长期与体表接触饰品的镍释放率符合性评估

Table 2 Assessment of compliance for release rate of nickel for products long term being in contact with skin

镍释放率(μg/cm <sup>2</sup> /周)		阈值 (μg/cm <sup>2</sup> /周)	符合性评估	
分析结果	调整值 (EN1811:1998 + A1:2008)		分析结果	调整值 (EN1811:1998 + A1:2008)
<0.28	<0.028	0.5	合格	合格
0.28~0.88	0.028~0.088		合格	不确定
0.88~5.00	0.088~0.500		合格	不合格
>5.0	>0.500		不合格	不合格

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料及试样制作

选择市场销售 316L 不锈钢型材(表 3)。用线切割截取 10 mm × 10 mm 试片。试样成型和处理见表 4。

### 1.2 试验内容及方法

#### 1.2.1 镍释放试验

金属本体试样依据 EN1811:2011 的规定进行镍释放试验,电镀试样按照 EN12472:2005 + A1:2009<sup>[9]</sup>的规定进行。人工汗液的配比及参数如下:

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (1.00 ± 0.01) g/L, NaCl (5.00 ± 0.05) g/L,  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$  (1.00 ± 0.01) g/L, 其余为新制备的去离子水,用 0.1% 的 NaOH 稀溶液调整 pH 值到 6.5 ± 0.05。

每个试样号各取 3 片试样,试样全部浸泡在 2 mL 的试验溶液中,密闭后放入(30 ± 2)℃ 的恒温水浴槽中静置(168 ± 2) h。将浸泡溶液稀释后,每个稀释液取 3 个平行样,用 PEAA400 型火焰原子吸收光谱仪测试溶液的镍含量。以同样的方法进行 3 个空白试验,按公式(1)计算样品的镍释放率:

$$d = V(C_1 - C_2) / 1000 a \quad (1)$$

式中: $d$ - 镍释放率/ $[\mu\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{周})^{-1}]$ ;  $V$ - 测试溶液的体积/mL;  $C_1$ - 一周后测试溶液中的镍含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ ;  $C_2$ - 一周后空白试验溶液中的镍含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ ;  $a$ - 测试样品表面积/ $\text{cm}^2$ 。

#### 1.2.2 电化学试验

将各试样测试面的背面用激光焊接铜导线,然后用硝基清漆将非测试面和导线裸露处密封,只暴露出测试面。用 LK2005A 电化学工作站检测试样在人工汗液中的极化行为,试样为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,铂片为对电极。先测量体系的开路电位,待开路电位稳定后,以 5 mV/s 的速度开始电位扫描,并测得极化曲线。

#### 1.2.3 显微分析

采用 Hitachi S3400N 型扫描电子显微镜观察镍释放试验后的样品表面,用 Bruker Quanta X200 型能谱仪检测微区成分及分布。用 MFT-4000 型多功能表面性能测试仪检测试样的表面粗糙度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 成型工艺对镍释放率的影响

由表 5 可见,与 EN1811:2011 的规

表 3 试验 316L 不锈钢的分析成分 /%

Table 3 Analysis of test stainless steel 316L /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.023	0.55	0.86	0.018	0.012	17.57	11.23	2.03

表 4 316L 不锈钢试样的成型和处理方式

Table 4 Shaping and treating methods of stainless steel 316L

试样号	钢种	成型和表面处理方式
1 <sup>#</sup>	316L	原始态(热轧、固溶),镜面抛光
2 <sup>#</sup>	316L-H0	冷轧 50% 后纵向取样,镜面抛光
3 <sup>#</sup>	316L-H4	冷轧 50% 后纵向取样,1 050 °C 保温 15 min 水冷,镜面抛光
4 <sup>#</sup>	316L-H5	冷轧 50% 后横向取样,镜面抛光
5 <sup>#</sup>	316L-C0	精密铸造试样,铸态,镜面抛光
6 <sup>#</sup>	316L-C1	精密铸造试样,1 050 °C 保温 15 min 水冷,镜面抛光
7 <sup>#</sup>	316L-P	原始态,镜面抛光,底镀镍,表面镀金
8 <sup>#</sup>	316L-S1	原始态,400 <sup>#</sup> 砂纸推砂
9 <sup>#</sup>	316L-S3	原始态,1200 <sup>#</sup> 砂纸推砂
10 <sup>#</sup>	316L-S4	原始态,100 目石英砂喷砂
11 <sup>#</sup>	316L-S5	冷轧 50% 后纵向取样,1200 <sup>#</sup> 砂纸推砂
12 <sup>#</sup>	316L-S6	冷轧 50% 后横向取样,1200 <sup>#</sup> 砂纸推砂

定对比,1<sup>#</sup>试样(原始抛光态)的镍释放率非常低,满足 EN1811:2011 对两类饰品的要求,而经冷轧变形和重新铸造后,2<sup>#</sup>(冷变形抛光态)和 5<sup>#</sup>试样(铸造抛光态)的镍释放率都有较大幅度的增加,它们虽可满足用于与皮肤长时间直接接触的饰品中的镍释放要求,但是用于穿刺饰品时都出现了不确定的情况。当冷变形的试样经固溶处理后(3<sup>#</sup>),镍释放率恢复到原来的水平,而铸造试样经固溶处理后(6<sup>#</sup>),虽然镍释放率比铸态有一定程度下降,但是用于穿刺饰品时仍出现了不确定的情况。

材料在冷轧后,内部发生晶格畸变而导致残余内应力,会降低合金的电位,增加其发生腐蚀的倾向,使镍释放率提高。对于奥氏体不锈钢,在冷加工过程中会产生不同程度的形变诱发马氏体相变,使不锈钢的电化学活性增强,孔蚀敏感性增大,马氏体相的存在将有利于孔蚀的发展,含量越大,孔蚀的发

表 5 成型方法镜面抛光表面处理 316L 不锈钢对人工汗液镍释放率的影响  
Table 5 Effect of shaping process on release rate of nickel in mirror-polished stainless steel 316L in artificial sweat

试样号	成型方法	表面处理	平均实测 镍释放率( $d$ ), $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{周}$	对 EN1811:2011 的符合性	
				用于与皮肤长时间 直接接触的饰品	用于穿刺 饰品
1 <sup>#</sup>	原始态	镜面抛光	0.02	合格	合格
2 <sup>#</sup>	冷轧	镜面抛光	0.12	合格	不确定
3 <sup>#</sup>	冷轧、固溶	镜面抛光	0.02	合格	合格
5 <sup>#</sup>	铸造	镜面抛光	0.21	合格	不确定
6 <sup>#</sup>	铸造、固溶	镜面抛光	0.13	合格	不确定

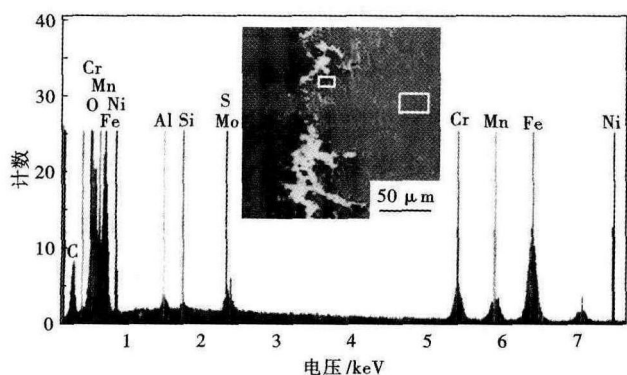


图1 316L 不锈钢精密铸造 5#试样中的铸造缺陷形貌和分析  
Fig.1 Morphology and analysis of casting defect in precision casting No5 specimen of stainless steel 316L

展速度越快<sup>[10-11]</sup>,因而材料在冷变形后的镍释放率高于原始态。

对于精密铸造不锈钢首饰,由于许多首饰生产企业均采用在大气下进行简单的重熔和浇铸,缺乏必要的精炼手段和保护措施,并且大都采用高温陶瓷型浇铸,因此铸件中容易出现显微疏松、气孔和夹杂物等缺陷<sup>[12]</sup>,图1是5#试样(铸造态)中出现的夹杂物,对该夹杂物区进行微区定性分析,结果表明,主要是氧化夹杂物和硫化夹杂物为诱发源引起不锈钢基体的点蚀或局部腐蚀。此外,在铸造过程中为避免出现铸造裂纹,首饰铸坯一般在陶瓷铸型中缓慢冷却到较低温度后才从铸型中清理出来,这使得铸件中不可避免会出现一些碳化物、σ相等的析出,在后续处理过程中又较少进行固溶处理,也必然会降低材料的耐蚀性能,引起镍释放率的增加。

### 2.2 表面处理方式对镍释放率的影响

由表6可见,316L 不锈钢试样经砂面或电镀处理后,镍释放率均比镜面抛光态高,呈现如下顺序:表面电镀态 > 100 目石英砂喷砂态 > 400#砂纸推砂态 > 1200#砂纸推砂态 > 镜面抛光态。1200#砂纸推砂时(9#试样),镍释放率可以满足 EN1811:2011 对两类饰品的镍释放要求。400#砂纸推砂时(8#试样),用于穿刺饰品出现了镍释放率不确定的情况。100 目石英砂喷砂时(10#试样),用于与皮肤长时间直接接触的饰品出现了镍释放率不确定的情况,而用于穿刺饰品出现了镍释放率不合格的情况。当7#试样(底镀镍+表面镀金)在旋转磨损仪中研磨5h后,镍释放率均大幅升高,对 EN1811:2011 的符合性与100 目石英砂喷砂试样一致。

从图2可以看出,1#试样表面没有明显的腐蚀坑,9#试样表面的腐蚀坑也很少,8#和10#试样表面则出现了数量多、面积大、分布广的腐蚀坑。

从表7可以看出,4种表面处理方式的粗糙度按照从高到低的顺序为:喷砂态 > 400#砂纸 > 1200#砂纸 > 镜面抛光。

对比前面的镍释放试验结果,可以确定表面粗糙度越大,镍释放率越高:

(1)表面采用手工推砂或喷砂处理时,由于试样表面形成了大量沟槽或凹坑,实际与汗液接触的表面积比抛光面要大,而在计算镍释放率时均根据外形尺寸来确定表面积;

(2)金属表面形成局部腐蚀有两个条件<sup>[13]</sup>,一是在腐蚀体系中存在某种因素使表面不同部分遵循不同的阳极溶解动力学规律;二是腐蚀过程中不会减弱甚至还会加强不同表面区域的阳极溶解速度的差异。当表面为抛光态时,有利于腐蚀介质在表面各部位的分布均匀一致,使它们的阳极溶解动力学相同或相近,腐蚀坑在表面形核的难度加大,只有进一步提高电位才能发生。当采用喷砂或推砂处理时,表面形成了大量的凹坑(槽),其中有些凹坑(槽)具有一定的闭塞性,此处阳极溶解电流密度大,金属离子浓度较高,尤其是当凹坑内存在夹杂物或第二相时,金属离子浓度显著增加。为保持电荷平衡,氯离子不断迁入蚀孔,导致氯离子富集。高浓度的金属氯化物水解,产生氢离子,由此造成蚀坑(槽)内的强酸性环境,又会进一步加速蚀坑(槽)内

表6 试验316L 不锈钢表面处理工艺对人工汗液镍释放率的影响  
Table 6 Effect of surface treatment process on release rate of nickel in stainless steel 316L in artificial sweat

试样号	成型方式	表面处理	平均实测镍释放率( <i>d</i> ), μg/cm <sup>2</sup> /周	对 EN1811:2011 的符合性	
				用于与皮肤长时间直接接触的饰品	用于穿刺饰品
1#	原始态	镜面抛光	0.02	合格	合格
7#	原始态	镜面抛光,镀金	0.54	不确定	不合格
8#	原始态	400#砂纸	0.11	合格	不确定
9#	原始态	1200#砂纸	0.04	合格	合格
10#	原始态	100 目石英砂	0.36	不确定	不合格

表7 表面处理方式对316L 不锈钢平均表面粗糙度(*Ra*)的影响

Table 7 Effect of surface treatment process on average surface roughness factor *Ra* of stainless steel 316L

表面处理方式	<i>Ra</i> /μm
100 目石英砂喷砂态	0.68
400#砂纸推砂态	0.36
1200#砂纸推砂态	0.16
镜面抛光	0.06

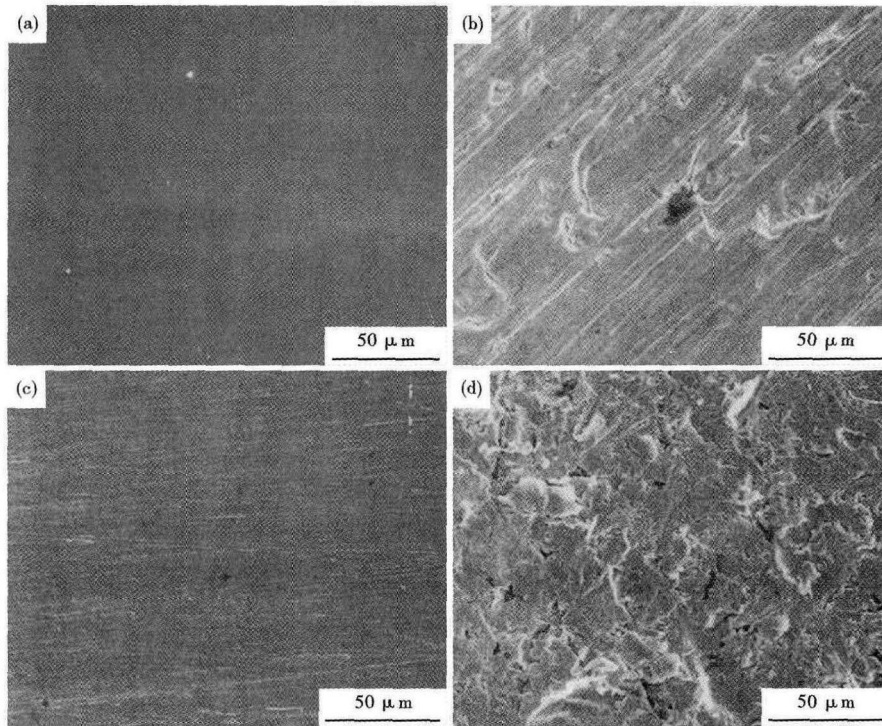


图 2 表面处理对人工汗液镍释放试验后的 316L 钢表面形貌的影响,原始态(热轧、固溶):1#镜面抛光(a);8# 400#砂纸推磨(b);9# 1200#砂纸推磨(c);100 目石英喷砂(d)

Fig. 2 Effect of surface treatment process on surface morphology of stainless steel 316L after nickel release test in artificial sweat, original state (hot-rolled and solution treatment): (a) No1- mirror polishing; (b) No 8- 400# sand paper grinding; (c) No9- 1200# sand paper grinding; (d) 100 mesh number quartz sand blasting

从表 8 可以看出,同样是固溶态 + 镜面抛光表面,4#试样(垂直冷轧方向的横向截面)的镍释放率将近是 2#试样(沿着冷轧方向的纵向截面)的 3 倍;而同样是冷轧变形态 + 1200#砂纸推砂表面,12#试样(横向截面)的镍释放率也将近是 11#试样(纵向截面)的 3 倍,体现了显著的各向异性,说明首饰在采用冲压、油压等冷形成型方式时,评价其镍释放率应该考虑取样方向,否则结果可能出现较大偏差。

图 3 是 2#(纵向取样)和 4#(横向取样)两个试样的极化曲线,4#样的腐蚀电位比 2#样低,腐蚀电流密度也更大一些。根据金属形变原理,金属在进行冷轧时,一方面基体晶粒会沿受力方向伸展,同时那些宏观偏析区、显微偏析区、异相晶粒或者夹杂物等也会发生

金属的溶解和溶液氯离子浓度的增高和酸化,促使这一区域的金属阳极溶解过程越来越容易进行<sup>[14-15]</sup>。而从表 5 可知,喷砂态试样的表面粗糙度最高,其表面形成的大量凹坑加速了腐蚀速度,使其镍释放率最高;当采用不同标号的砂纸推砂时,沟槽的宽度和深度不同。400#砂纸推出的沟槽比 1200#砂纸更深,溶液扩散较慢,更容易满足局部溶解所需的溶液条件,提高了蚀抗(槽)的形核几率和发展条件,使其镍释放率高于后者。

(3) 首饰贵金属装饰镀常采用镍作为底镀层,再在它上面镀覆金、银、铑等贵金属镀层,表面贵金属镀层一般都极薄,有些甚至只有 0.05 ~ 0.10 μm,耐磨性差,很容易被磨损掉,暴露出底镀镍层或者金属基底,处于这种状态的表面为两种性质不同的金属,更容易满足腐蚀电化学反应的条件,尤其是在镍镀层质量不好,存在针孔、晶粒粗大等情况时更是如此。因而 7#试样(底镀镍、表面镀金)在经过研磨后出现了镍释放率大幅增加的情况。

2.3 取样方式对镍释放率的影响

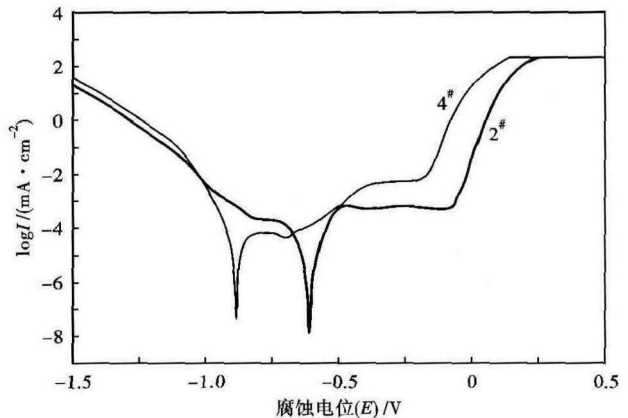


图 3 不同取样方向对极化行为的影响:2#- 纵向;4#- 横向  
Fig. 3 Influence of different sampling direction on polarization behavior; No2- longitudinal; No4- transversal

表 8 纵、横向取样方式对 316L 不锈钢在人工汗液中镍释放率的影响  
Table 8 Effect of longitudinal and transversal sampling method on release rate of nickel in stainless steel 316L in artificial sweat

成型	表面处理	试样号 (取样方式)	平均实测 镍释放率(d), μg/cm <sup>2</sup> /周	对 EN1811:2011 的符合性	
				用于与皮肤长时间 直接接触的饰品	用于穿刺 饰品
冷轧	镜面抛光	2#(纵向)	0.12	合格	不确定
		4#(横向)	0.35	不确定	不合格
	1200#砂纸推磨	11#(纵向)	0.46	不确定	不合格
		12#(横向)	1.24	不合格	不合格

方向性的分布,形成组织的方向性;另一方面由于晶粒取向的转动还会产生形变织构,出现晶体结构的择优取向。这都将使得纵向与横向的耐蚀性出现差别,尤其是像硫化锰之类的塑性夹杂物,在冷轧时将随基体一起变形,在纵向截面以少数的长条(片)形状出现,而在横向截面则呈现大量的颗粒形状<sup>[16]</sup>,使得横向截面的点蚀源数量明显多于纵向截面,相应地横向取样的镍释放率也高于纵向取样。

综合前面的结果看,当不锈钢试样处于冷轧变形态、铸态、砂面态、底镀镍或者横向取样等条件,其释放率有不同程度的增加,尤其是当出现两种或数种促进镍释放的因素叠加在一起时,镍释放率增加比较明显,不能满足 EN1811:2011 的镍释放要求,也就不排除有镍致敏的风险。

### 3 结论

(1) 固溶抛光态的 316L 不锈钢型材在人工汗液中的镍释放率只有  $0.02 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{周}$ ,很好地满足

了 EN1811:2011 的要求。

(2) 316L 不锈钢处于铸造和冷轧变形抛光态,镍释放率可分别达  $0.21, 0.12 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{周}$ ,冷轧变形态镍释放率与取样方式关系密切,横向截面的镍释放率可达到纵向截面的 3 倍。

(3) 316L 不锈钢在不同表面处理方式下的镍释放率呈现“底镀镍 + 表面镀金 > 100 目石英砂喷砂 > 400#砂纸推砂 > 1200#砂纸推砂 > 镜面抛光”的顺序。金属基底表面越粗糙,镍释放率越高。100 目石英砂喷砂试样的镍释放率比固溶抛光态型材提高 17 倍,底镀镍 + 表面镀金的试样经磨损后可提高 26 倍。

(4) 当 316L 不锈钢处于冷轧变形态、铸态、砂面态、底镀镍或者横向取样等促进镍释放的条件,尤其是当两种或数种因素叠加在一起时,其镍释放率不能完全满足 EN1811:2011 的要求,因此不应脱离具体的工艺条件来评价它对新标准的符合性。

### 参考文献

- [1] Razvigor Darlenski, Jana Kazandjieva, Kyrill Pramatarov. The Many Faces of Nickel Allergy [J]. *International Journal of Dermatology*, 2012, 51(5): 523-530.
- [2] Menné Torkil JP. Metal Allergy-A Review on Exposures, Penetration, Genetics, Prevalence, and Clinical Implications [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2010, 23: 309-318.
- [3] European Communities. European Directive 94/27/EC of 30 June 1994 Amending for the 12th Time Directive 76/769/EEC on the Approximation of the Laws, Regulations and Administrative Provisions of the Member States Relating to Restrictions on the Marketing and Use of Dangerous Substances [J]. *Official Journal of the European Communities*, 1994, 37: 1-2.
- [4] EN1811: 1998. Reference Test Method for Release of Nickel from Products Intended to Come Into Direct Prolonged Contact with the Skin [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1998.
- [5] The Commission of European Communities. Commission Directive 2004/96/EC of 27 September 2004 Amending Council Directive 76/769/EEC as Regards Restrictions on the Marketing and Use of Nickel for Piercing Post Assemblies for the Purpose of Adapting its Annex I to Technical Progress [J]. *Official Journal of the European Union*, 2004, 301: 51-52.
- [6] EN1811: 1998 + a1; 2008. Reference Test Method for Release of Nickel from Products Intended to Come Into Direct and Prolonged Contact with the Skin [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2008.
- [7] EN1811: 2011. Reference Test Method for Release of Nickel from All Post Assemblies Which Are Inserted Into Pierced Parts of the Human Body and Article Intended to Come Into Direct and Prolonged Contact with the Skin [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2011.
- [8] Haudrechy P, Mantout B, Frappaz A, et al. Nickel Release from Stainless Steels [J]. *Contact Dermatitis*, 1997, 37(3): 113-117.
- [9] EN12472: 2005. Method for the Simulation of Wear and Corrosion for the Detection of Nickel Release from Coated Items [J]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [10] Wood R J K, Walker J C, Harvey T J, et al. Influence of Microstructure on the Erosion and Erosion-corrosion Characteristics of 316 Stainless Steel [J]. *Wear*, 2013, 306(1-2): 254-262.
- [11] Hincapie Ramirez, Alexander, Hincapie Ramirez. Cold Rolling Effect on the Microstructure and Pitting Resistance of the NBR ISO 5832-1 Austenitic Stainless Steel [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, 8(12): 12801-12815.
- [12] Yuan Junping, Li Wei, Wang Chang, et al. Appraisal About Stainless Steels for Piercing Jewelry [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 399-401: 1540-1546.
- [13] Laycock NJ, Newman RC. Localised Dissolution Kinetics, Salt Films and Pitting Potentials [J]. *Corrosion Science*, 1997, 39(10-11): 1771-1790.
- [14] Aya Chiba, Izumi Muto, Yu Sugawara, et al. Pit Initiation Mechanism at MnS Inclusions in Stainless Steel: Synergistic Effect of Elemental Sulfur and Chloride Ions [J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2013, 160(10): 511-520.
- [15] Jia Zhi-jun, Du Cui-wei, Li Cheng-tao, et al. Study on Pitting Process of 316L Stainless Steel by Means of Staircase Potential Electrochemical Impedance Spectroscopy [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2011, 18(1): 48-52.
- [16] Pessard E, Morel F, Morel A, et al. Modelling the Role of Non-metallic Inclusions on the Anisotropic Fatigue Behaviour of Forged Steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(4): 568-577.

袁军平(1969-),男,博士(2009年暨南大学),教授级高级工程师,1992年北京科技大学(本科)毕业,金属材料及成型工艺研究。E-mail: yuanjp@gzpp.edu.cn

收稿日期: 2015-05-06