

# 硝酸工业用铂合金催化网的发展

胡新, 杨桂生, 张文莉

(昆明冶金高等专科学校 冶金材料学院, 昆明 650033)

**摘要:** 铂合金催化网是氨氧化法制备硝酸不可缺少的催化剂。生产中要求铂网氨转化率高、铂耗低、耐腐蚀性强、高温强度高、抗粘附和抗毒性强。围绕如何提高催化网的使用性能, 评述了铂合金催化网材料制造从一元金属到多元合金的发展, 以及织网方法从编织到针织的发展。

**关键词:** 金属材料; 铂合金; 催化网; 使用性能; 发展

**中图分类号:** TG146.3, TQ111.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2016)01-0076-06

## The Progresses of the Catalyst Gauze used in Nitric Acid Production

HU Xin, YANG Guisheng, ZHANG Wenli

(Faculty of Metallurgy and Material, Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China;

**Abstract:** The catalytic gauze of platinum alloys is indispensable in the oxidation of ammonia for the production of nitric acid. The gauze must possess of high conversion rate of ammonia, low platinum-loss rate, good corrosion-resistant, high strength at high-temperature, good adhesion-resistant and poisoning-resistant in the production process. Focusing on how to improve the service performance of the catalytic gauze, the development from pure platinum to multicomponent platinum alloys of the catalytic material and the development from weaving to knitting in the gauze weaving method were reviewed.

**Key words:** metal materials; platinum alloys; catalyst gauze; application property; progress

硝酸是重要的化工产品, 广泛用于制备化肥、炸药、人造纤维等。最早制造硝酸是用浓硫酸分解硝石而得, 此方法因原料来源有限而未广泛采用。随后出现了电弧法制备硝酸, 即在电弧作用下, 将空气中的氮气和氧气直接化合成 NO, 再进一步制成硝酸。这种方法耗电量大, 所得硝酸浓度低, 后被 20 世纪初 W. Ostwald 发明的氨氧化法所取代。目前, 世界各国均采用氨催化氧化法进行工业化生产硝酸。

在氨氧化制备硝酸过程中, 铂合金网被用作催化剂, 其作用是将氨气高效地、有选择性地迅速氧化为 NO, 再进一步制得硝酸。本文在介绍硝酸生产对铂合金催化剂的性能要求的基础上, 总结了铂合金材料和铂合金网编织技术两方面的发展。

## 1 铂合金催化网在硝酸生产中的应用

### 1.1 硝酸的工业生产方法

氨催化氧化法使用直径为 0.06~0.09 mm 的铂合金丝材编织而成的网作催化剂(故称催化网)。把多层催化网放置在氨氧化反应炉中(如图 1 所示), 在 780~950℃和 0.10~1.01 MPa 的条件下, 通入一定比例的氨气和空气的预热混合气体。在铂合金催化网的作用下, 氨被氧化为 NO, NO 进一步被氧化为 NO<sub>2</sub>, 然后用水吸收即得硝酸, 主反应式为:



收稿日期: 2015-10-13

第一作者: 胡新, 高级工程师, 副教授, 研究方向: 冶金及金属材料。E-mail: huxing2008@126.com

\*通讯作者: 杨桂生, 副教授, 研究方向: 冶金及金属材料。E-mail: 233234594@qq.com

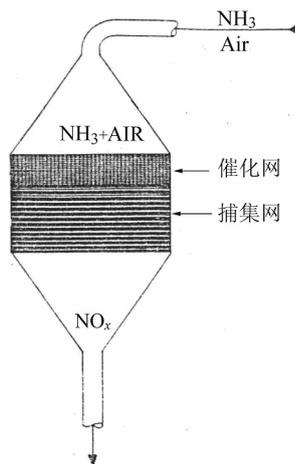


图 1 高压氨氧化装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of an ammonia oxidation reactor with high pressure

反应式(1)和(2)在氨氧化反应炉中进行,是放热反应。根据反应炉负载和压力的不同,反应所释放的热量足可以维持反应炉在 780~950℃温度范围内工作。根据压力高低,氨氧化炉一般分为常压炉、中压炉和高压炉。表 1<sup>[1]</sup>列出了我国常见的常压、中压和高压氨氧化反应炉的一些主要工作参数。

表 1 不同氨氧化炉中铂合金催化网的主要参数<sup>[1]</sup>

Tab.1 Main parameters in different ammonia oxidation reactors

参数	常压炉	中压炉	高压炉
工作压力/MPa	0.1	0.3~0.5	0.7~1.0
混合气体中氨的体积分数/%	11.5~12.5	10.5~11.0	8.5~10.5
催化网张数	3	5~10	≤30
催化网温度/℃	780~850	850~900	900~950
每吨硝酸的铂耗率/g	0.042~0.1	0.1~0.2	0.2~0.4
氨转化率/%	96~99.5	95~98	94~96
正常工作时间/月	10~12	4~6	2~3

由表 1 可见,常压炉的特点是压力低(常压),一般装有 3 张催化网,催化网工作温度低,氨转化率高,使用时间长,每吨硝酸铂耗率小,但生产效率低。高压炉的特点是压力高(7~10 个大气压),最多装有 30 张催化网,催化网工作温度高,氨转化率稍低,使用时间短,每吨硝酸铂耗率大,但生产效

率高。中压炉的特点介于上述两者之间。

## 1.2 硝酸生产对铂合金催化网的性能要求

### 1.2.1 具有高的氨转化率

硝酸生产的实质是在催化网的催化作用下,将氨气氧化转变为 NO 的过程。因此,氨转化率是评价催化网最重要的性能指标和生产指标。由表 1 可见,在正常生产条件下,常压、中压和高压反应炉的氨转化率分别为 96%~99.5%、95%~98%和 94%~96%。影响氨转化率的因素很多,除氨氧化炉的压力、氨气浓度、生产装备和生产技术外,铂合金的成分和使用过程中其表面状态的变化也是影响氨转化率重要的因素。

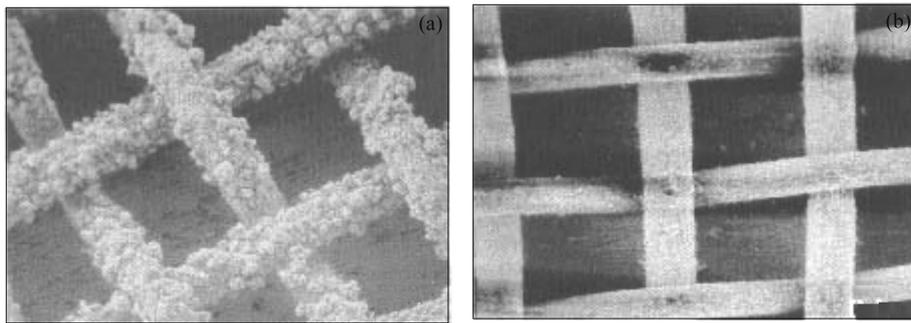
### 1.2.2 具有低的铂耗率

在氨氧化过程中,铂合金表面生成挥发性的气态  $PtO_2$ 、 $PdO$  和  $RhO_2$ ,它们被气流带走,导致催化网失重<sup>[2-3]</sup>。由于铂是铂合金的主体元素,加之在使用过程中铂的挥发速度高于钯和铑,因此催化网的失重主要是由  $PtO_2$  的挥发造成的,故称为铂耗。生产 1 吨硝酸产生的铂耗称为铂耗率,它在硝酸生产成本中所占比例仅次于氨气消耗量,排列在第 2 位<sup>[4]</sup>,因此,如何降低铂耗率对于提高硝酸企业的经济效益、降低生产成本具有重要的意义。降低铂耗的方向有两个,一是开发新合金,减小催化网使用时铂的氧化挥发速度,二是采用多种方法回收已氧化挥发的  $PtO_2$ <sup>[5]</sup>,其中最简单有效的方法是在催化网下直接安装钯合金捕集网(如图 1 所示)来回收  $PtO_2$ <sup>[5-6]</sup>。

### 1.2.3 具有好的耐蚀性

催化网在高温强氧化气氛下长期工作,最初光滑的丝材表面逐渐变得粗糙不平,形成“菜花”状结构<sup>[7-8]</sup>(如图 2 所示)。

由于混合气体中的氧气优先沿合金丝材表面的晶界、划伤等缺陷向内部扩散,使铂氧化挥发,在合金表面形成大量的腐蚀坑,同时,挥发的  $PtO_2$  又被氨气还原为金属铂,沉积在腐蚀坑周围,这样在合金丝材表面形成了“菜花”状结构。这种结构虽然能增大催化网和混合气体的接触面积,对提高氨转化率有一定的作用<sup>[7]</sup>,但过分发达的“菜花”颗粒不仅在气流冲刷作用下极易脱落,使铂耗增大,而且使丝材的有效直径减小,降低了其高温强度,缩短了使用寿命。



(a). 使用过的催化网; (b). 新催化网

图 2 催化网的表面形貌

Fig.2 The structure on the surface of the gauzes: (a). The used gauzes; (b). The new gauzes

#### 1.2.4 具有高的的高温强度

由于铂合金催化网在高温、高压和强氧化气氛下工作, 要受到气体的强烈腐蚀作用和气流的剧烈冲刷作用, 因此, 要求铂合金不仅要有好的耐蚀性, 而且还应具有较高的高温强度, 以尽量延长其使用寿命。

高温下的金属材料中空位浓度高, 在低应力作用下会发生原子扩散, 进而产生晶粒长大和蠕变现象, 降低材料的强度, 增大材料的脆性。从合金化提高金属材料高温强度的角度考虑, 添加的合金元素要么是高熔点, 要么能在合金中形成稳定的第二相颗粒<sup>[9]</sup>。

#### 1.2.5 具有强的抗粘结和抗毒化能力

在氨氧化反应中, 催化网在高温高压下长期使用出现软化现象, 各层网发生粘结难于避免, 这在高压炉中尤为明显。合金的抗软化能力可以用再结晶温度来进行评价。同时, 如果氨空混合气体中氨浓度过高或含有油类等杂质, 可使催化网中毒, 导致氨氧化转化率降低。

## 2 铂合金催化网制造技术的发展

铂合金催化网制造技术可分为丝材的生产和网的编织, 从开始使用催化网以来, 材料生产和编织技术均经历了不断发展更新的过程。

### 2.1 铂合金催化材料的发展

#### 2.1.1 Pt-Rh 二元合金

铂族金属由于 d 电子层未充满, 作为催化剂使用具有活性大、选择性高等特点, 其中铂的催化性能最优<sup>[10]</sup>, 因此, 氨氧化法生产硝酸最初选择的催化材料是纯铂。随着硝酸生产规模的不断扩大和生产效率的不断提高, 要求反应炉内的温度和压力越来越高。由于纯铂的高温强度较低, 不能满足高温、

高压和长期使用的要求, 需要对纯铂进行强化。但在铂中添加任何一种非铂族金属都使氨转化率显著降低, 为此国家标准对氨氧化用铂合金中的杂质元素总量规定极为严格, Fe、Ni、Cu、Pb、Sn、Zn 等总杂质含量必须小于  $950 \times 10^{-6}$ <sup>[11]</sup>。

为了保证催化材料具有高的氨转化率, 铂的强化元素只能在铂族金属中选择。Os、Ir、Ru 虽然熔点高, 对铂有很强的固溶强化作用<sup>[12]</sup>, 但在高温下它们的氧化挥发速度快<sup>[13-14]</sup>, 这不仅造成合金失重增大, 而且由于形成大量的空位, 增大合金的脆断倾向, 降低了合金的高温持久强度和蠕变寿命, 因而将它们作为主要的强化元素是不可取的。而 Pd 的熔点和高温强度较铂低, 在铂中加入过量的钯将使合金晶界脆性倾向增大, 显著降低合金的高温强度<sup>[15-16]</sup>, 因此钯也不能作为高温强化铂的主要合金元素。虽然 Rh 的原子半径和铂的差异较小, 导致其在室温下固溶强化铂的作用不甚强, 但在 1000℃ 以下其氧化挥发失重小于铂, 且其熔点和高温强度比铂高, 它是铂最稳定的高温固溶强化元素, 因此选择了铑作为铂的主要强化元素。

铑加入铂中提高了铂合金的高温持久强度, 降低了铂耗<sup>[4]</sup>。但 Pt-Rh 合金中的铑含量也不宜过高, 这是由于: 1) 过高的铑含量对合金高温持久强度提高不大<sup>[17]</sup>; 2) 催化网表面容易富集无催化活性的  $\text{Rh}_2\text{O}_3$ , 而降低氨转化率<sup>[18]</sup>; 3) 长期以来铑的价格高于铂, 不利于降低合金的成本。

在 Pt-Rh 合金系中, 用作氨氧化催化材料的先后有 Pt-5Rh、Pt-7Rh 和 Pt-10Rh 等。其中 Pt-10Rh 综合性能最优, 被称为“标准催化剂”, 主要用于温度较高的中、高压反应炉中。

#### 2.1.2 Pt-Pd-Rh 三元合金

钯比铂、铑廉价, 其催化活性仅次于铂<sup>[10]</sup>, 加之钯的密度约为铂的一半, 这意味着在 Pt-Rh 合金

中添加钼可降低合金的密度, 节约贵金属。因此, 从 1940 年代起, 为了降低氨氧化催化网的生产成本, 前苏联在 Pt-Rh 合金的基础上, 利用其丰富的钼资源, 开展了以钼代铂、铑的研究工作。研究表明<sup>[3]</sup>, 钼不仅对氨氧化反应具有很好的催化作用, 而且钼与氧的亲合力大于铂与氧的亲合力, 在氨氧化过程中能将气态  $\text{PtO}_2$  还原为固态铂单质, 沉积在丝材表面, 降低铂耗。但由于钼的熔点和高温强度较铂、铑低, 并且氧在钼中的溶解度高于在铂中的溶解度, 在 Pt-Rh 合金中过多地添加钼, 会导致晶界处 PdO 和  $\text{Rh}_2\text{O}_3$  的含量明显增加, 容易产生晶间脆断, 降低合金的高温持久强度。

在此基础上, 前苏联和杜邦公司以 Pt-7Rh 和 Pt-10Rh 合金为基础, 用钼取代部分铑相继成功地开发出 Pt-4Pd-3.5Rh 和 Pt-5Pd-5Rh 两个低钼低铑牌号的铂合金。虽然这两个合金的高温持久强度不如 Pt-10Rh, 但由于钼密度小、价格低, 合金成本较低, 且在温度较低的常压和中压炉中使用具有铂耗率低和氨转化率高的优点。

### 2.1.3 Pt-Pd-Rh-Me 四元合金

降低硝酸生产成本一直是企业追求的目标。如果在 Pt-Pd-Rh 三元合金中添加少量或微量的第四组元能提高合金的高温强度而又不降低氨转化率的话, 无疑为进一步用钼代替铂、铑创造有利条件, 并且能充分发挥钼降低铂耗的有益作用。

虽然钨氧化挥发速率大, 不宜作为高温使用的合金的主要添加元素, 但钨熔点高, 且晶体结构为密排六方结构<sup>[10]2</sup>, 和 Pt-Pd-Rh 合金的面心立方结

构差别大, 因此在 Pt-Pd-Rh 合金中添加少量的钨可在高温下产生很强的固溶强化作用, 提高合金的高温强度<sup>[19]</sup>, 而且其优先氧化挥发可以保护基体, 减少无催化活性的  $\text{Rh}_2\text{O}_3$  在合金表面的形成量<sup>[20]</sup>, 有助于氨氧化率和耐蚀性的提高。前苏联利用钨的这一特点研制并推广使用了 Pt-15Pd-3.5Rh-0.5Ru 四元合金<sup>[21]</sup>。

利用我国丰富的稀土资源, 昆明贵金属研究所研制了增强型和节铂型 Pt-Pd-Rh-RE 四元合金, 并在全国硝酸企业推广使用<sup>[22-23]</sup>。稀土因为原子尺寸大而在室温下具有强的固溶强化作用和细晶强化作用, 虽然这些强化作用在高温下有所减弱<sup>[23-24]</sup>, 但含有稀土的 Pt-Pd-Rh 合金在高温下能发生内氧化, 氧原子沿晶界扩散, 与偏聚于晶界的稀土原子形成稀土氧化物, 它阻碍晶界运动, 极大地提高了合金的高温持久强度。而且, 稀土氧化物具有独特的助催化活性, 有助于增大催化网的活性, 提高氨转化率<sup>[25]</sup>。此外偏聚于晶界的稀土及内氧化形成的稀土氧化物有助于降低氧沿晶界的扩散, 提高合金的耐蚀性。

同三元铂合金相比, 虽然这两种四元铂合金的催化网最初使用时点火稍难, 达到最高催化效率的时间稍长, 但由于它们不仅有高的氨氧化转化率、低的密度、高的高温强度、低的铂耗、好的耐蚀性等优点, 而且这两种合金的再结晶温度较高<sup>[26]</sup>, 其催化网的抗粘结和抗毒化能力也强。目前, 这两种铂合金可取代或部分取代三元铂合金作为常压炉和中压炉的催化网。

表 2 硝酸工业用铂合金的主要性能

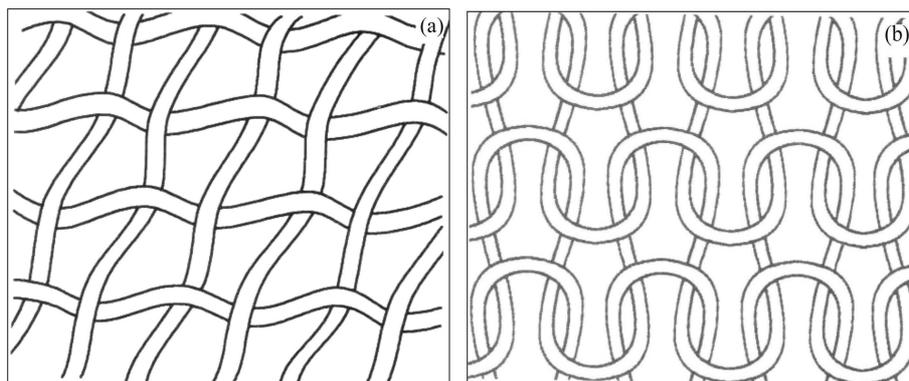
Tab.2 The properties of the platinum alloys used in nitric acid production

催化合金	氨转化率/%		高温(900℃)持久(100 h) 强度/MPa	铂耗率/(g/t)		密度/(g/cm <sup>3</sup> )
	常压炉	0.5 MPa 中压炉		常压炉	0.5 MPa 中压炉	
Pt	—	—	11.8	—	—	21.4
Pt-10Rh	96	94	20	0.1	0.15	19.9
Pt-4Pd-3.5Rh	97	96	15.3	0.06	0.14	20.3
Pt-12Pd-3.5R-RE	98.5	97	40	0.04	0.12	18.9
Pt-15Pd-3.5R-0.5Ru	—	—	19.4	—	—	18.9

## 2.2 铂合金催化网编织技术的发展

氨氧化用的铂合金催化材料之所以用细丝织成网状, 一是为了增大氨、空混合气体和催化材料之间的接触面积, 提高氨氧化转化率; 二是为了减小

气体通过催化剂的阻力。铂合金催化网编织技术的发展经历了两个阶段, 一是经线和纬线交叉法编织的平面结构的机织网, 二是针织法编织的三维结构的针织网, 如图 3 所示。



(a). 机织网; (b). 针织网

图 3 硝酸生产中使用的催化网的 2 种典型结构

Fig.3 The two typical structures of the gauzes used in nitric acid production: (a). The woven gauzes; (b). The knitted gauzes

传统催化网采用经线和纬线编织法,在有梭或无梭的织网机上,用直径 0.06~0.09 mm 的退火态铂合金丝材,编织成 1024 眼/cm<sup>2</sup> 的网(如图 3(a)所示),再根据反应炉的尺寸裁剪、焊接而成。这种催化网目前在硝酸工业的常压炉和中压炉中应用广泛。

20 世纪 90 年代,英国的 Johnson Matthey 公司发明了针织催化网<sup>[27]</sup>。它是在针织机上用多根聚酯纱作为载体,载着 Ph-10Rh 合金丝材一齐编织。聚酯纱的作用是防止在编织过程中编织针损伤丝材表面,对催化网起保护作用,在编织成网后,才被清除。典型的针织网如图 3(b)所示。我国在 21 世纪初也实现了 Pt-Rh 合金和 Pt-Pd-Rh 合金针织催化网的工业化生产,并在全国范围内推广使用<sup>[28]</sup>。

两种不同网型的催化网多年的工业应用的结果表明,针织催化网具有更高的氨转化率、更低的铂耗率和更长的使用寿命,尤其适合于在中、高压炉中应用。

实际上,机织网和针织网所用丝材直径相同,两者的差别仅在于网型结构不同。机织网是平面结构,经线和纬线交叉处的丝材面积紧紧靠压在一起,难于参与催化反应,是反应的“死区”。由此造成的影响是,一方面减小了氨空混合气体和催化材料接触的有效面积,另一反面“死区”处不参与催化反应,温度可能比其它地方低,或导致催化网温度偏低,造成 Rh<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 形成量相对较多,这两方面的原因降低了氨氧化转化率。而针织网是三维结构,使用时受高温气流作用会松散,“死区”面积减小,催化网温度较高且均匀,惰性的 Rh<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 形成量较少,这不仅增大了氨氧化转化率,而且相应降低了铂耗率。此外,三维结构的针织网具有较高的结构强度和较

大的伸长率,且在使用过程中受气流的冲击振动作用较小,延长了催化网的使用寿命。

### 3 结语

综上所述,硝酸工业用铂合金催化网材料经历了从纯铂到 Pt-Rh 二元合金,再到 Pt-Pd-Rh 三元合金、Pt-Pd-Rh-Ru 和 Pt-Pd-Rh-RE 四元合金的发展。而编织技术经历了平面型机织和三维结构针织 2 个阶段。

不论是铂合金材料的发展,还是催化网编织技术的发展,都是围绕着硝酸生产对铂合金催化网提出的性能要求进行的,其目的是在保证催化网具有高的氨转化率的基础上,不断提高其高温强度和耐腐蚀性,降低铂耗,延长使用寿命,以降低催化网的成本和硝酸的生产成本。

### 参考文献:

- [1] 宁远涛. 氨氧化装置非稳态瞬间反应的高热效应与催化网失活[J]. 贵金属, 2003, 24(2): 42-48.  
NING Y T. High heat effect and deactivation of catalyst gauzes caused by non-steady-state transient reaction in ammonia oxidation equipment[J]. Precious metals, 2003, 24(2): 42-48.
- [2] RUBEL M, PSZONIKA M. The effects of oxygen interaction with Pt-Rh catalytic alloys[J]. J Mater Sci, 1985(20): 3639-3648.
- [3] RUBEL M, PSZONIKA M. Oxygen with Pt-Pd-Rh catalytic alloys[J]. J Mater Sci, 1986(21): 241-245.

- [4] NING Y T, YANG Z F. Platinum loss from alloy catalyst gauzes in nitric acid plants[J]. *Platinum metals review*, 1999, 43(2): 63-72.
- [5] Holzmann H. Platinum recovery by palladium in ammonia oxidations [J]. *Platinum metals review*, 1969, 13(1): 2-8.
- [6] 宁远涛. 硝酸工厂回收铂的原理和方法[J]. *贵金属*, 1996, 17(1): 43-50.  
NING Y T. Principles and methods of platinum recovery in nitric acid plant[J]. *Precious metals*, 1996, 17(1): 43-50.
- [7] NING Y T. Research on surface of catalyst and catchment used in nitric acid industry[J]. *Science foundation in China*, 1998, 6(1): 28-31.
- [8] MECADE A R, SMITH G D W, Pratt A S. The mechanism of reconstruction of rhodium-platinum catalyst gauzes[J]. *Platinum metals review*, 1986, 30(2): 54-62.
- [9] 吴承建, 陈国良, 强文江. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 89
- [10] 黎鼎鑫. 贵金属材料学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991: 42-43.
- [11] 太原化肥厂. S20 型硝酸工业用铂催化剂: HG2271.1-92 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [12] 宁远涛, 杨正芬, 文飞. 铂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 270.
- [13] 《贵金属材料加工手册》编写组. 贵金属材料加工手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
- [14] 宁远涛, 王永立. 几种合金元素对 Pt 高温蠕变激活能的影响[J]. *金属学报*, 1979, 15(4): 548-556.  
NING Y T, WANG Y L. Influence of certain alloying elements on the creep activation energy of platinum[J]. *Acta metallurgica sinica*, 1979, 15(4): 548-556.
- [15] DARLING A S. The search for alternative to rhodium-platinum alloys[J]. *Platinum metals review*, 1973, 17(4): 130-136.
- [16] MCGILL I R. Some ternary and higher order platinum group metal alloys[J]. *Platinum metals review*, 1987, 31(2): 74-90.
- [17] 宁远涛, 王永立. Pt 和 Pt-Rh 合金的高温强化. *贵金属*, 1984, 5(2): 39-45.  
NING Y T, WANG Y L. Strengthening of Pt and Pt-Rh alloy at high temperature[J]. *Precious metals*, 1984, 5(2): 39-45.
- [18] CONTOUR J P, MOUVIER G. X-ray photoelectron spectroscopy and electron microscopy of Pt-Rh gauzes used for catalytic oxidation[J]. *Journal of catalysis*, 1977, 48, 217-228.
- [19] NING YUANTAO, HU XIN. Strengthening Pt-Pd-Rh alloys by ruthenium and cerium addition[J]. *Platinum metals review*, 2003, 47(3): 111-119.
- [20] 胡新. Pt-Pd-Rh 合金的高温氧化[J]. *贵金属*, 1999, 20(4): 12-16.  
HU X. Oxidation of Pt-Pd-Rh alloys at high temperature [J]. *Precious metals*, 1999, 20(4): 12-16.
- [21] CHERNYSHOV V I, KISIL I M. Platinum metals catalytic systems in nitric acid[J]. *Platinum metals review*, 1993, 37(3): 136-142
- [22] 宁远涛, 文飞, 戴红, 等. 新型氨氧化催化合金的工业应用[J]. *贵金属*, 1997, 18(3): 1-7.  
NING Y T, WEN F, DAI H, et al. The industrial application of a new catalyst based on platinum alloy for ammonia oxidation[J]. *Precious metals* 1997, 18(3): 1-7.
- [23] HU X, NING Y T. Physical properties and application performance of Pt-Pd-Rh alloys modified with cerium[J]. *Platinum metals review*, 2012, 56(1): 40-46.
- [24] 胡新, 张文莉, 杨桂生, 等. Pd, Ru, Ce 溶质对 Pt-Pd-Rh 合金晶粒长大的影响[J]. *贵金属*, 2009, 30(1): 22-25.  
HU X, ZHANG W L, YANG G S, et al. Influence of Pd, Ru, Ce solutes on grain growth of Pt-Pd-Rh alloy[J]. *Precious metals*, 2009, 30(1): 22-25.
- [25] 宁远涛, 杨正芬, 文飞. 铂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 404.
- [26] 杨桂生, 胡新. Pd、Ru、Ce 元素对 Pt-Pd-Rh 合金再结晶温度的影响[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2007, 23(3): 6-9.  
YANG G S, HU X. Influence of Pd, Ru, Ce on the recrystallization of Pt-Pd-Rh alloy[J]. *Journal of Kunming metallurgy college*, 2007, 23(3): 6-9.
- [27] HORNER B T. Knitted platinum alloys gauzes[J]. *Platinum metals review*, 1993, 37(2): 76-85.
- [28] 赛兴鹏. 稀土强化 Pt-Pd-Rh 合金针织催化网在硝酸生产常压炉中的应用研究[J]. *贵金属*, 2007, 28(2): 11-19.  
SAI X P. Application research of intensified rare earth Pt-Pd-Rh alloys knitted catalytic gauzes in atmospheric pressure furnace for nitric acid production[J]. *Precious metals*, 2007, 28(2): 11-19.