



电沉积镍和轧制镍显微组织和力学性能的对比

夏天东^{1,2}, 张晓宇^{1,2}, 徐仰涛^{1,2}, 丁万武^{1,2}, 赵文军^{1,2}

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 通过 X 射线衍射、扫描电镜、背散射电子衍射等多种材料分析方法对国内外不同商用电沉积镍和轧制纯镍进行显微组织表征, 并对其力学性能进行测试, 研究不同轧制工艺 N6 纯镍的强度和韧性。结果表明: 电沉积镍板的化学成分均优于国内外相关标准的, 国内电沉积镍板的杂质含量低。电沉积镍晶粒尺寸为 30~300 nm, 晶粒取向随机。国内电沉积镍板在水平和重力方向上抗拉强度分别为 479 MPa 和 581 MPa。国外电沉积镍板在水平和重力方向上抗拉强度分别为 681 MPa 和 687 MPa。冷轧冷加工态纯镍抗拉强度最高, 为 695 MPa; 热轧热加工态纯镍塑性韧性最好(伸长率最大, 为 47.1%; 冲击功最大, 为 33.59 J), 两种电沉积镍两个方向上的伸长率均高于 30%。几种纯镍的断口均由等轴韧窝、山脊纹和被拉长的韧窝组成, 属于韧性断裂。两种电沉积镍板适合作为制备镍箔的原料进行不经重熔的直接轧制。

关键词: 电沉积镍; 显微组织; 力学性能; 背散射电子衍射

中图分类号: TG146.1+5

文献标志码: A

Comparison for microstructure and mechanical properties of electrodeposited nickel and rolled nickel

XIA Tian-dong^{1,2}, ZHANG Xiao-yu^{1,2}, XU Yang-tao^{1,2}, DING Wan-wu^{1,2}, ZHAO Wen-jun^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The microstructure of commercially available industrial nickel was characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and electron backscatter diffraction. The mechanical properties of pure nickel plates were also tested at room temperature to investigate the strength and toughness of N6 nickel made in different processes. The results show that the grain sizes of the electrodeposited Nickels are 50–100 μm . The grain size of the electrodeposited nickel is in the range of 30–300 nm, and the grain orientations are random. While the domestic electrodeposited nickel plate tensile strength in horizontal and gravity direction are 479 MPa and 581 MPa, the foreign electrodeposited nickel plate tensile strength in horizontal and gravity direction are 681 MPa and 687 MPa, respectively. The grain sizes of the rolled pure nickel are 50–100 μm . In the three kinds of wrought nickels, the cold-rolled pure nickel plate in cold-worked state has the highest tensile strength (695 MPa). The hot rolled pure nickel in hot-worked state has a maximum elongation of 47.1% and maximum impact energy of 33.59 J. The elongation of two kinds of electrodeposited nickel along two directions is higher than 30%. The fracture morphology of each pure nickel is composed of equiaxed dimples, ridge lines and elongated dimple. All of the nickel plates fracture modes are ductile fracture. Two kinds of electrodeposited nickel plate performance are suitable to use as raw materials for industrial production of rolling nickel foil.

Key words: electrodeposited nickel; microstructure; mechanical property; electron back-scattered diffraction

金属镍以其优异的性能被广泛应用于航天、化工、电子、能源电池^[1-2]等各个领域。通过电化学方法制备的电沉积镍板,作为阳极原材料在电镀工业中被大量使用。电沉积镍板应用于电镀中所暴露的质量问题主要表现为电镀后有部分阳极残渣^[3],且牌号相同、产地不同的电沉积镍板用于电镀后阳极残渣量相差很大^[4],残渣会污染镀液,增加企业生产成本。以上现象说明电沉积镍作为原料应用于生产后,其自身品质对最终产品的出品率有一定作用,且国内电沉积镍板相关标准中对电沉积镍显微组织结构和力学性能没有明确要求,因此,人们对电沉积镍板除化学成分之外的性能了解不多。另外,目前市场上已经出现了一些新型镍箔、镍板带产品,这些产品采用电沉积镍板直接轧制得到。与原有镍箔生产工艺相比,这些产品生产时省去了重熔、刨面、热锻、热轧等工序。生产厂家认为采用直接轧制的工艺,可以避免在重熔过程中引入杂质,从而提高纯度、降低内阻和保证塑性。目前,该工艺只有少数厂家使用,并未大规模投入工业生产。为了探讨电沉积镍作为原料以及电沉积镍的显微组织结构和力学性能否满足镍箔直接轧制的要求,本文作者使用国内外最典型的两种电沉积镍板作为实验对象,使用多种分析方法进行分析表征,对其进行常温拉伸、夏比 V 型冲击试验,研究其作为工业原料的使用性能。由于采用直接轧制工艺生产的镍箔、镍板带产品的牌号大多为 N6,故加入轧制工艺不同但牌号均为 N6 的镍板作为比较对象,并进行分析对比。

1 实验

2 种电沉积镍和 3 种 N6 轧制纯镍样品的制备工艺和性能如表 1 所列。使用直读光谱仪对 5 种样品进行化学成分分析。对 5 种电沉积镍板进行 X 射线衍射(铜靶 $\lambda=1.5406\text{ \AA}$,步长 0.02° ,扫描范围 $20^\circ\sim90^\circ$)。采用 Quanta FEG-450 型场发射环境扫描电镜观察样品与断

口形貌,采用附带的 Oxford HKLNordlys EBSD 探头进行 EBSD 分析。按 GB/T228.1-2010 将样品加工成标距为 15 mm 的拉伸试样(样品 4、5 需将始极板与沉积层分离,只选取电沉积层),以恒定拉伸速率 1 mm/min 进行常温拉伸实验。按 GB/T229-2007 将样品 1、3、4、5 加工成尺寸为 55 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2.5 mm 的夏比 V 型缺口试样进行常温冲击实验,由于样品 2 厚度为 1 mm,不满足标准所要求的厚度,暂不进行冲击实验。

2 结果与分析

2.1 化学成分分析

5 种样品的化学成分如表 2 所列。5 种样品均符合美国标准^[5]、中国标准^[6]及国际标准^[7]对于成品镍板化学成分的要求,几种镍板的杂质含量也远低于上述标准所规定的上限。国产电沉积镍板的杂质含量水平与进口电沉积镍板持平,某些杂质含量甚至低于进口电沉积镍板。电沉积镍制备过程中较难除去的杂质为钴、铁、铜、砷,国产电沉积镍中的杂质铁、钴含量较低,但是国产电沉积镍的含硫量和含铅量较大,这是由于近年来国内硫化镍矿石品质下降造成的。电沉积镍板的中的锰、磷、硫、铬等杂质元素含量远低于其他 3 种轧制镍板的,其他杂质含量也低于轧制镍板的,可见电沉积镍用于直接轧制制备镍箔时,有利于直接轧制镍箔产品的纯度提升。3 种轧制 N6 镍板的化学成分相差很大,样品 2、3 的镍含量稍低于样品 1 的,说明样品 2 和 3 生产过程中重熔和多道轧制工艺易引入新的杂质。以上结果说明,使用电沉积镍板直接轧制用于降低镍箔产品的杂质含量和提升纯度是可行的。

2.2 X 射线衍射分析

图 1 所示为 5 种纯镍的 XRD 谱。X 射线衍射结果显示,5 种样品都是面心立方纯镍相,衍射峰出现

表 1 纯镍样品的制备工艺与性能

Table 1 Preparation technology and performance of pure nickel samples

Sample No.	Name	Origin	Preparation process	Thickness/mm
1	Soft state N6 nickel (M)	China	Hot-rolled+Bright annealing	3
2	Cold-rolled N6 nickel (Y)	China	Hot-rolled+Cold-rolled	1
3	Hot-rolled N6 nickel (R)	China	Hot-rolled	3
4	Electrodeposited nickel	China	Electrodeposition	7-10
5	Electrodeposited nickel	Canada	Electrodeposition	13-16

表 2 5 种纯镍样品的化学成分

Table 2 Chemical composition of five kinds of pure nickel samples

Sample No.	Mass fraction/%								
	Ni	Co	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
1	>99.9	0.01230	0.00563	0.00322	0.00026	<0.0003	0.00039	0.00072	0.01760
2	>99.8	0.01310	0.00494	0.03820	0.04370	<0.0003	0.00074	0.000246	0.02370
3	>99.8	0.01230	0.00237	0.03660	0.03180	<0.0003	0.00065	0.00091	0.08290
4	>99.9	0.02410	0.01200	0.02980	<0.0001	<0.0003	<0.0003	<0.0003	0.00819
5	>99.9	0.01220	0.00296	0.01250	<0.0001	<0.0003	0.00039	<0.0003	0.00713

Sample No.	Mass fraction/%								
	V	Cu	Al	Ti	Zn	B	Mg	As	Pb
1	0.00031	0.00425	<0.0001	0.02380	0.00030	0.00076	0.00040	<0.0003	0.00019
2	0.00056	0.000502	0.000438	0.04270	0.00014	0.00046	0.00414	0.00105	0.00013
3	0.00071	0.00590	0.00572	0.00574	0.00045	0.00044	0.00139	0.00045	0.00040
4	0.00012	0.00332	<0.0001	0.00073	0.00016	0.00041	<0.0001	0.00094	0.00017
5	0.00011	0.00336	<0.0001	0.00062	0.00033	0.00026	<0.0001	<0.0003	0.00030

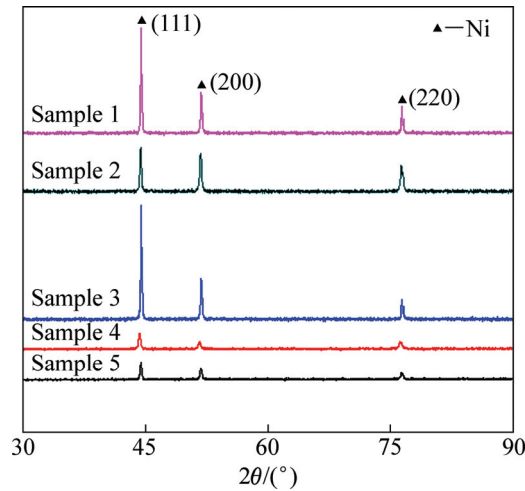


图 1 不同纯镍样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of different pure nickel samples

的角度与标准 PDF 卡片(04-0850)中纯镍相出现的角度相同。为了计算不同晶面的择优取向程度,引入择优取向系数 T_c (texture coefficient)^[8],利用参数 T_c 计算不同晶面择优取向度。

$$T_c = \frac{I_{(hkl)} / I_{0(hkl)}}{\sum I_{(hkl)} / I_{0(hkl)}} \times 100\%$$

(1)

式中: $I_{(hkl)}$ 为 (hkl) 晶面的 X 射线衍射强度; $I_{0(hkl)}$ 代表相对强度,此处为 PDF(04-0850)卡片中无择优取向的镍 (hkl) 晶面的 X 射线衍射相对强度。纯镍的晶面参数及 T_c 值如表 3 所列。当每个晶面的 T_c 值相同时,表现为各向同性。当某一晶面的 T_c 值大于平均值时,该面存在择优取向。本实验共取 3 个晶面进行了分析。故

其择优取向系数的平均值 $T_c=33.33\%$,当某一晶面择优取向系数大于 33.33% 时,表示该晶面有择优取向。

由表 3 可知,国产电沉积镍(200)面 $T_{c(200)}=35.5\%$,该晶面呈现出明显的择优取向。进口电沉积镍在(111)面具有最强衍射峰,3 个晶面的织构系数都接近 33.3% ,晶体取向较为随机,择优生长现象并不明显。面心立方(200)面原子面密度小于其密排面(111)面的原子面密度。根据布拉维法则^[9],面网密度小的面网优先生长,晶体生长结束后,实际晶体为面网密度大的晶面所包围,(200)面网密度小、面间距大,原子首先会在该面发生沉积,但最终(200)大部分会被(111)面淹没。居里-吴里夫原理指出,晶体生长的平衡态应具有最小的表面能,而面心立方(111)晶面具有最低表面能^[10],故两种电沉积镍晶粒生长都在(111)面形成优势,为其主要的生长方向,表现为该面衍射峰强度最高,这一结果与文献[11]的结果一致。但布拉维法则没有考虑温度、压力、浓度、环境等因素的影响,实际晶体也无法完全达居里-吴里夫平衡状态。所以,当体系内任一因素发生变化,就会改变其择优取向。李瑞乾等^[12]认为电沉积反应时,电流密度的增加会使(111)面的择优取向变弱;REN 等^[13]也通过尝试不同的电沉积条件,探究电沉积最优工艺;孙东来等^[14]发现具备(111)面择优的电沉积镍耐腐蚀性能最好。目前电沉积镍制造工艺处于严格保密阶段,暂时无法判断是哪些因素导致了进口电沉积镍取向较为随机,而国产电沉积镍的晶粒在(200)面发生择优生长。在 3 种轧制镍板中,冷态 N6 样品经由多次轧制,表现为(111)面衍射强度下降而(220)面衍射强度上升,其

$T_{c(220)}=49.7\%$ ，这说明轧制改变了原来镍板的晶粒取向，使大多数晶粒出现了(220)面的织构。同样的问题也出现在了软态 N6 镍板上。只有热加工态 N6 镍板的择优取向不明显。两种电沉积镍的晶粒尺寸较小，在纳米级别；轧制镍板的晶粒尺寸较大，在微米级别。闫海乐^[15]和钟立蓉^[16]认为，晶粒尺寸较小的面心立方镍在大幅度冷轧变形下，(220)晶面织构会消失。而晶粒尺寸大的面心立方镍在大幅度冷轧变形下，(220)晶面的织构会逐渐增多，并把这一现象归因为层错能和晶体滑移、孪生的共同作用结果。这 5 种纯镍的织构现象与上述结果一致。

表 3 不同纯镍样品的择优取向

Table 3 Preferred orientation of different pure nickel samples			
Sample	$T_c/\%$		
No.	(111)	(200)	(220)
1	29.5	29.2	41.2
2	16.3	33.9	49.7
3	35.2	31.6	33.1
4	35.8	32.3	31.8
5	37.2	35.5	27.3

2.3 EBSD 及 SEM 分析

图 2 所示为 5 种纯镍 EBSD 晶粒取向成像(OIM)图。通过使用 EBSD 的手段，首次看到电沉积纯镍的晶界。由图 2 可以看出，两种电沉积纯镍晶粒细小，平均晶粒尺寸在纳米级别。3 种轧制纯镍的晶粒较为粗大，大于两种电沉积镍样品的，平均晶粒尺寸为几十微米。在 3 种轧制镍中，样品 1 和 2 都经历冷轧工艺，轧制次数多，故它们的晶粒尺寸明显大于样品 3 的，且晶粒的取向性也更加明显。特别是板厚最小，轧制次数最多的样品 2 具有最为粗大的晶粒，并出现了沿轧制方向的织构。两种电沉积镍板的晶粒尺寸较为细小，其中样品 4 的晶粒尺寸小于样品 5 的，样品 4 的晶粒与样品 5 的相比取向更加随机、分布更加均匀。图 3 和 4 所示为 5 种纯镍的 SEM 像。图 3 中两种电沉积镍的表面形貌差别较大：进口样品的显微组织更为密实，表面凹凸起伏较大；国产样品表面平整但很疏松，有许多孔洞弥散分布其中。图 4 中 3 种轧制纯镍都呈平面晶分布，可以看见明显的晶界，晶粒尺寸与 EBSD 中观察到的一致。

2.4 力学性能分析

将纯镍样品中样品 1、2、3 沿其轧制方向取样，将样品 4、5 分别沿水平和重力方向取样，分别进行常

温力学拉伸后结果如表 4 所列。表 5 所列为纯镍常温夏比 V 型冲击功的平均值。

3 种轧制镍板中最薄的样品 2 的抗拉强度最大 $\sigma=695\text{ MPa}$ ，伸长率最小 $\delta=7.3\%$ ，这是轧制后加工硬化导致的。没有经过冷轧的样品 3 经过退火处理后，抗拉强度在 3 种轧制纯镍中最低， $\sigma=378\text{ MPa}$ ，但其拥有最高的伸长率 $\delta=47.7\%$ ，表现出良好的塑性。经过冷轧处于软冷状态样品 1 的力学性能处于样品 2 和 3 的之间($\sigma=512\text{ MPa}$ ， $\delta=32.8\%$)。电沉积镍中样品 4 在水平、重力两个方向的抗拉强度分别为 681 MPa 和 687 MPa，两个方向上抗拉强度差别不大；样品 5 在

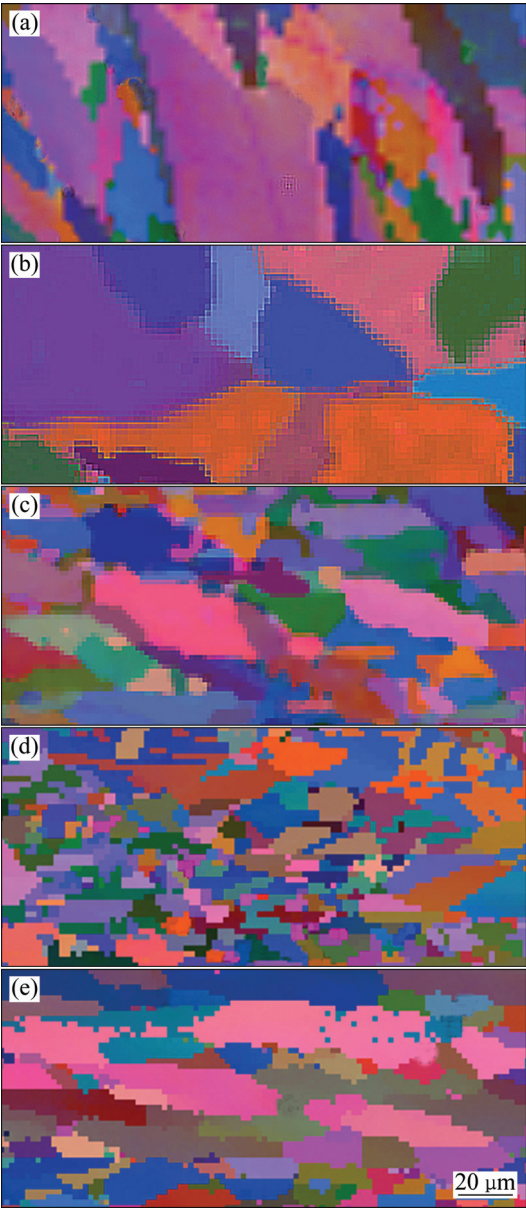


图 2 不同纯镍样品板材的 EBSD 晶粒取向成像图

Fig. 2 EBSD grain oriented images of different pure nickel plate samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4; (e) Sample 5

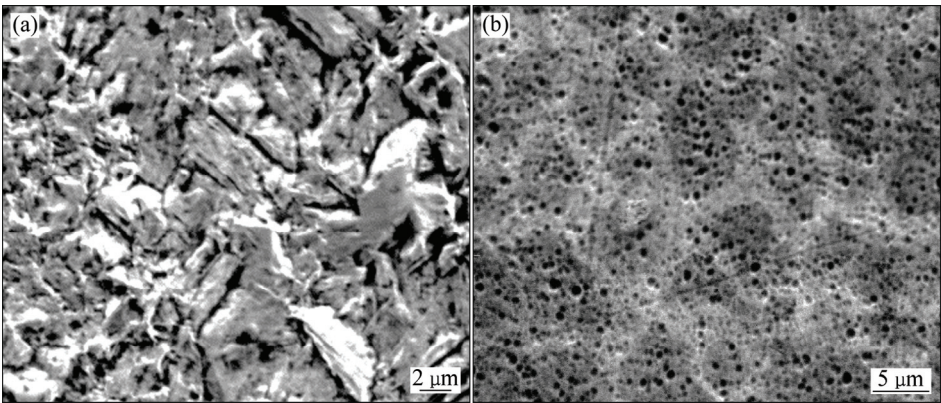


图 3 不同电沉积镍板的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of different electrodeposited nickel plates: (a) Foreign electrodeposited nickel; (b) Domestic electrodeposited nickel

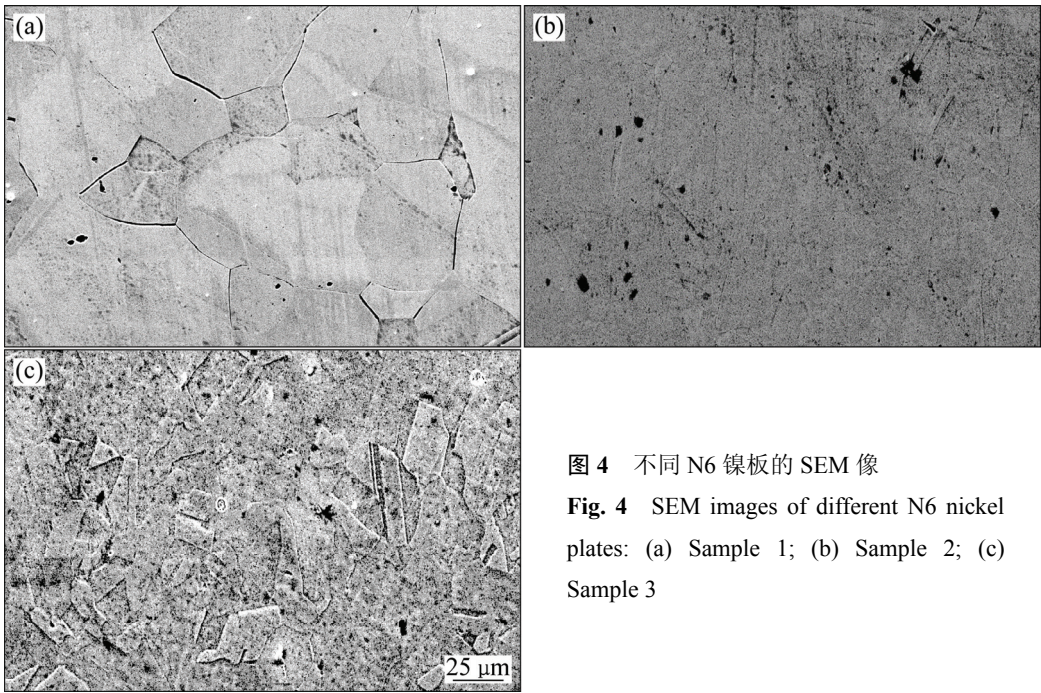


图 4 不同 N6 镍板的 SEM 像

Fig. 4 SEM images of different N6 nickel plates: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

表 4 不同纯镍样品的常温拉伸性能

Table 4 Tensile properties of different nickel samples at room temperature

Sample No.	Direction	Tensile strength, σ /MPa	Elongation, δ /%	Break energy/J
1		512	32.8	56.97
2		695	7.3	23.32
3		378	47.1	69.34
4	Horizontal	681	34.7	52.32
4	Gravity	687	32.0	48.29
5	Horizontal	479	32.8	43.30
5	Gravity	581	31.6	39.52

表 5 不同纯镍样品的夏比 V 型冲击功

Table 5 Charpy V-notch impact toughness of different pure nickel samples

Sample No.	Impact energy/J
1	31.95
3	33.57
4	32.05
5	26.14

水平方向的抗拉强度($\sigma=479$ MPa)明显小于重力方向的抗拉强度($\sigma=581$ MPa), 低于样品 4 同方向上的抗拉强度。这很可能是由于电沉积工艺使得电结晶过程中重力因素对样品 4 镍离子的沉积过程影响不大, 镍原子在水平竖直两个方向沉积的紧实程度接近, 两个方向的抗拉强度无明显差别。样品 5 在电沉积制备过程中, 工艺未能很好地消除重力因素的影响, 镍离子在沉积过程中受重力的影响显著, 表现在重力方向上沉积得较为密实, 故重力方向上抗拉强度大于水平方向上的抗拉强度。位移-载荷曲线下包围的面积表示材料在变形-断裂过程中所吸收的能量 E (其量纲为力 $\times$ 位移=能量), 由于所有拉伸试样的尺寸均相同, 故 E 值越大, 说明裂纹扩展需要消耗的能量越大, 材料抗裂纹扩展的能力越强、韧性越好。3 种轧制样品中拉伸所需能量最大的是样品 3 (56.97 J), 最小的是样品 2 (23.32 J), 样品 3 的强度低、塑性好, 适合进一步压力加工。在两种电沉积镍板中, 样品 4 不同方向的拉伸所需能量也大于样品 5 的, 表明样品 4 的塑性韧性好于样品 5 的。根据霍尔-佩奇公式, 晶粒的尺寸越小, 其塑性、韧性和强度硬度越高, 两种电沉积镍的

晶粒尺寸较小, 表现出较高强度硬度的同时, 拥有较好的塑性韧性, 适用于镍箔、镍板带材的直接轧制。表 5 所列的纯镍样品夏比 V 型常温冲击功也印证了以上讨论: 夏比 V 型冲击试验是材料塑性、韧性的另一个指标, 冲击功反映了材料脆断的趋势。两种电沉积镍的冲击功数值说明其不易脆断、延展性好, 适合作为镍箔、镍板带材的原料直接轧制。

2.5 断口形貌分析

图 5 和 6 所示分别为 5 种纯镍拉伸断口的 SEM 像。5 种镍的断口都由两个部分组成: 中间部分是大小不一且相互嵌套的等轴韧窝, 边缘及四周由被拉长了的韧窝和类似“山脊”的突起纹路组成, 由此判断 5 种断口的断裂形式均属于塑性断裂。断裂时形成了山脊状有高低起伏的裂纹的原因是试样首先在主作用力垂直方向上部分断裂, 余下部分又在拉力作用下晶粒发生了滑移。

不同纯镍中间部分的韧窝占整个断口的比例和周围山脊纹凹凸分布各不相同。3 种轧制镍中, 样品 1、2 中韧窝较为不规则, 且韧窝占整个断口的比例较小。样品 3 的中心处较为光滑、平整, 韧窝都被拉长, 山脊纹起伏不大。两种电沉积镍断口的最大差别是样品 4 进口电沉积镍韧窝区域非常宽, 几乎占到了整个断口面积的 90%以上。河流状纹路只是在断口的横截面四周很窄的区域内出现。样品 5 国产电沉积镍在两个方向上韧窝区域都很窄, 集中在中间部分呈束状。样品 4 进口电沉积镍在两个方向上的断口韧窝面积占整个断口的密度远远大于样品 5 纯镍样品的且样品 4 的韧窝大小更加均匀, 分布更为弥散。通常情况下, 韧

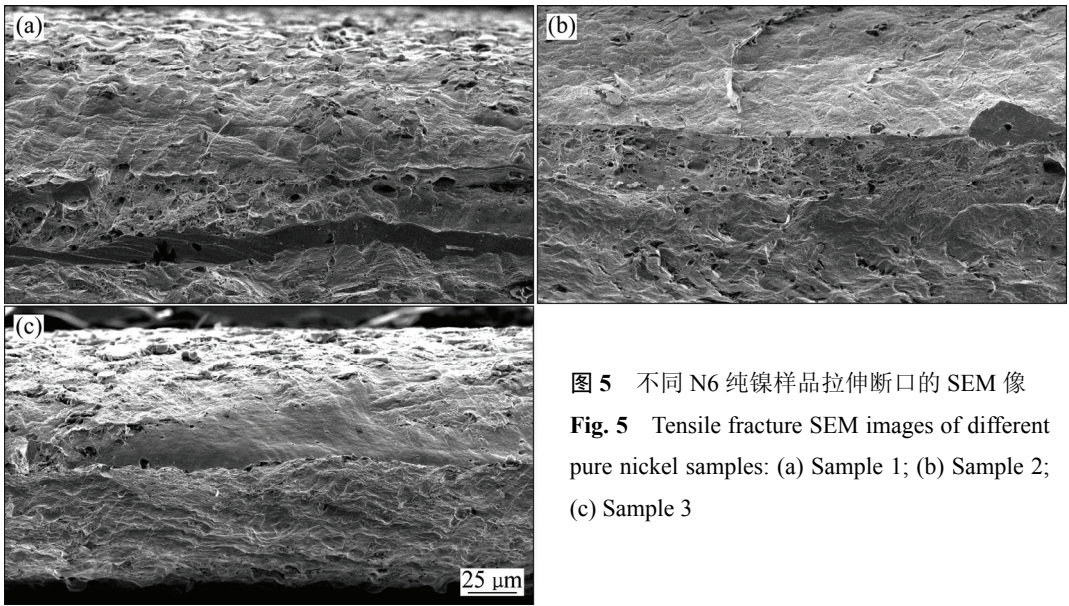


图 5 不同 N6 纯镍样品拉伸断口的 SEM 像
Fig. 5 Tensile fracture SEM images of different pure nickel samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

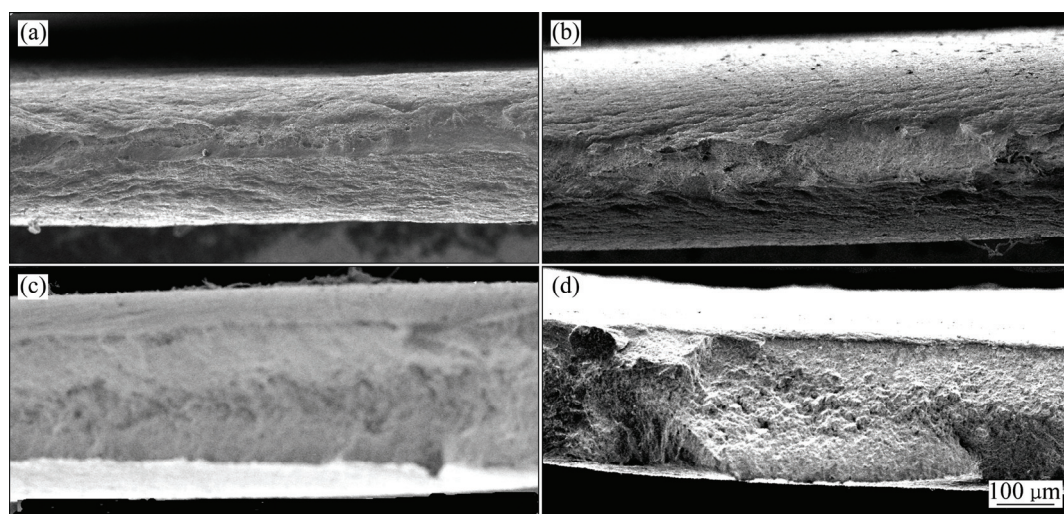


图 6 不同电沉积纯镍样品断口的形貌

Fig. 6 Fracture morphologies of different electrodeposited nickel samples: (a) Sample 4, in horizontal direction; (b) Sample 4, in gravity direction; (c) Sample 5, in horizontal direction; (d) Sample 5, in gravity direction

窝区域占断口面积的比例越大, 塑性韧性就越好, 表明其断裂类型为塑性断裂。

镍板带材的原材料进行直接轧制使用。

3 结论

1) 5 种纯镍化学成分符合国内外相关标准, 国内电沉积镍板成分优于国外电沉积镍板, 轧制纯镍样品杂质含量高于电沉积镍样品的。

2) XRD 显示 5 种纯镍均只有面心立方镍相, 电沉积纯镍晶粒取向随机, 轧制纯镍随着轧制次数增加由 (111) 面择优转变成 (200) 面择优。EBSD-取向成像图显示轧制纯镍晶粒尺寸为 60~100 μm , 而电沉积镍晶粒尺寸为 30~300 nm, 且国外电解镍晶粒尺寸小于国内电解镍的, 大小分布更加均匀。

3) 在 3 种轧制镍中, 国内冷轧冷加工态纯镍抗拉强度最高为 695 MPa, 国内热轧热加工态纯镍塑性韧性最好(伸长率最大, 为 47.1%; 冲击功最大, 为 33.59 J)。国内电沉积镍不同方向上抗拉强度差别较大(水平方向), 国外电沉积镍不同方向上抗拉强度没有差别, 且力学性能整体优于国内电沉积镍的。冲击韧性结果也验证了上述结论, 断口显示 5 种纯镍都由等轴韧窝和山脊纹组成, 属于韧性断裂, 不同纯镍的韧窝区域占整个断口面积的比例差别很大。

4) 综合比较发现两种电沉积镍的成分、显微组织结构、力学性能都优于 N6 镍板的, 适合作为镍箔、

REFERENCES

- [1] 余德超, 谈定生, 王松泰. 化学镀镍技术在电子工业的应用[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(4): 42-45.
YU De-chao, TAN Ding-sheng, WANG Song-tai. Applications of electroless nickel plating in electronics industry[J]. Electroplating & Finishing, 2007, 26(4): 42-45.
- [2] 刘洪涛, 邓长城. 钛合金镀镍在航空航天工业应用的可行性研究[J]. 功能材料, 2010, 41(2): 249-252.
LIU Hong-tao, DENG Chang-cheng. Feasibility of Ti alloy plating Ni used in the air industry[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(2): 249-252.
- [3] 候晓川, 彭俊. 电解镍应用于电镀中存在的质量问题及改进措施[J]. 稀有金属及硬质合金, 2012, 40(10): 70-72.
HOU Xiao-chuan, PENG Jun. Quality problems and improvement measures of electrolytic nickel in electroplating industry[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2012, 40(10): 70-72.
- [4] WHITTINGTON C M, YEUNG K L K, LO W Y. Refined nickel anodes: Pointers to industrial best practice[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 2011, 89(3): 122-131.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM B162-99 standard specification for nickel plate, sheet, and strip 1[S].
- [6] 国家标准化管理委员会. GB/T5235-2007 加工镍及镍合金—化学成分和产品形状标准[S].
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T5235-2007 Wrought nickel and nickel alloys—Chemical composition and forms of wrought products[S].

- [7] International Organization for Standardization. ISO6283 1995 Refine Nickel[S].
- [8] 刘天成, 卢志超, 李德仁, 孙克, 周少雄, 卢燕平. 电沉积铁镍纳米合金薄膜的结构和性能研究[J]. 功能材料, 2007, 38(1): 138–141.
LIU Tian-cheng, LU Zhi-chao, LI De-ren, SUN Ke, ZHOU Shao-xiong, LU Yan-ping. Investigation on the microstructure and properties of electrodeposited iron-nickel alloy film with nano-structure[J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(1): 138–141.
- [9] 王萍, 李国昌. 结晶学教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 19–20.
WANG Ping, LI Guo-chang. Crystallography tutorials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 19–20.
- [10] 王博, 张建民, 路彦冬, 甘秀英, 殷保祥, 徐可为. FCC金属表面能的各向异性分析及表面偏析的预测[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 016601.
WANG Bo, ZHANG Jian-min, LU Yan-dong, GAN Xiu-ying, YIN Bao-xiang, XU Ke-wei. Anisotropy analysis of surface energy and prediction of surface segregation for FCC metals[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 016601.
- [11] 吕镖, 胡振峰, 汪笑鹤, 徐滨士. 相对运动速度对柔性摩擦辅助电沉积镍镀层构的影响[J]. 材料研究学报, 2014, 28(4): 255–261.
LÜ Biao, HU Zhen-feng, WANG Xiao-he, XU Bing-shi. Effect of relative moving speed on microstructure of flexible friction assisted electrodeposited Ni coating[J]. Journal of Materials Research, 2014, 28(4): 255–261.
- [12] 李瑞乾, 梁军, 初青伟. 氯化胆碱-乙二醇低共熔溶剂中电沉积纳米晶镍[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1839–1845.
LI Rui-qian, LIANG Jun, CHU Qing-wei. Electrodeposition of nanocrystalline Ni from choline chloride and ethylene glycol deep eutectic solvent[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(7): 1839–1845.
- [13] REN Xiu-lian, WEI Qi-feng, LIU Zhe, LIU Jun. Electrodeposition conditions of metallic nickel in electrolytic membrane reactor[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 467–475.
- [14] 孙冬来, 陈吉, 史艳华, 梁平. 织构对纳米晶纯镍镀层耐腐蚀性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(5): 620–624.
SUN Dong-lai, CHENG Ji, SHI Yan-hua, LIANG Ping. Effect of textures on the corrosion resistance of nanocrystalline Ni coatings[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2013, 35(5): 620–624.
- [15] 闫海乐. 大形变下低层错能面心立方金属力行为和织构演化的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
YAN Hai-le. Mechanical behavior and texture evolution of low stacking fault energy FCC metals at large deformation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [16] 钟立蓉. 大形变下低层错能面心立方金属织构演化的实验和数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
ZHONG Li-rong. Texture evolution of low stacking fault energy FCC metals at large deformation studied by experiment and modeling[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

(编辑 李艳红)