

· 应用与服役 ·



## 690 合金显微组织演变对其导热性能的影响

丰 涵<sup>1</sup>, 朱永昌<sup>2</sup>, 宋志刚<sup>1</sup>, 顾 洋<sup>1</sup>, 刘 哲<sup>1</sup>, 杨德博<sup>2</sup>

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081;

2 中国建筑材料科学研究总院有限公司玻璃固化工程技术中心, 北京 100044)

**摘要:** 根据焦耳炉电极材料使用工况, 开展了 690 合金电极组织演变对其导热性能的影响。使用纯金属冶炼了典型成分的 690 合金, 并通过锻造、热轧、冷轧获得不同状态的 690 样品。通过 SEM、EBSD、XRD 和闪光法测量导热系数等手段, 测试了不同状态 690 样品的晶粒尺寸、晶界类型、晶界分布、位错密度、析出相种类, 明确了焦耳炉电极用 690 合金材料在不同加工状态下的显微组织演变及其对导热性能的影响规律。结果表明: 热轧态 690 合金的热导率最高, 锻态次之, 而冷轧态 690 合金的热导率最低。其原因为: (1) 不同变形工艺下的 690 合金晶粒尺寸和晶界总面积有显著变化, 冷轧态合金具有最小的晶粒尺寸和最高的晶界总面积; (2) 锻态、冷轧态 690 合金晶界以小角度晶界为主, 690 合金低  $\Sigma$ CSL 晶界均以  $\Sigma 3$  晶界为主; (3) 冷轧态 690 合金具有最高的位错密度; (4) 冷轧态 690 合金热导率大幅下降的主要原因在于高的晶界总面积比例和冷轧后的高位错密度。

**关键词:** 690 合金; 焦耳炉; 显微组织; 热导率

**DOI:** 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00200 **中图分类号:** TG141

## Effect of Microstructure Evolution on Thermal Conductivity of Alloy 690

Feng Han<sup>1</sup>, Zhu Yongchang<sup>2</sup>, Song Zhigang<sup>1</sup>, Gu Yang<sup>1</sup>, Liu Zhe<sup>1</sup>, Yang Debo<sup>2</sup>

(1 Special Steel Research Institute Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2 Glass Curing Engineering Technology Center China Building Materials Academy Co., Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** The effect of microstructure evolution on thermal conductivity of alloy 690 electrode was studied according to the working conditions of electrode materials in Joule furnace. Typical compositions of alloy 690 were smelted using pure metal and samples of 690 in different states were obtained by forging, hot rolling and cold rolling. The grain size, grain boundary type, grain boundary distribution, dislocation density, and precipitated phase species of the 690 samples in different states were tested by means of scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), electron back scatter diffraction (EBSD), X-ray diffraction (XRD), and the measurement of thermal conductivity by flash method. The microstructure evolution of alloy 690 materials for joule furnace electrodes in different processing states and its influence on thermal conductivity were clarified. The results show that, alloy 690 in the hot rolled state has the highest thermal conductivity, followed by the wrought state, while alloy 690 in the cold rolled state has the lowest thermal conductivity. The reasons for this are: (1) The grain size and total grain boundary area of 690 alloy change significantly under different deformation processes, and the cold-rolled state alloy has the smallest grain size and the highest total grain boundary area; (2) The grain boundaries of the forged and cold rolled state 690 alloys are dominated by small-angle grain boundaries, The low  $\Sigma$ CSL grain boundaries of the three states of alloy 690 are dominated by  $\Sigma 3$  grain boundaries; (3) The cold-rolled state 690 alloy has the highest dislocation density. (4) The main reason for the large decrease in thermal conductivity of alloy 690 in the cold rolled state is the high grain boundary total area ratio and the high dislocation density after cold rolling.

**Key Words:** Alloy 690; Joule furnace; Microstructure; Thermal Conductivity

玻璃固化是指将含有放射性废料与玻璃添加剂在高温下熔融, 形成玻璃固化体的过程<sup>[1]</sup>。焦耳炉可以实现连续加料高效生产玻璃固化体, 该熔炉采用金属电极 (通常采用 690 电极或钨电极) 加热实现熔融玻璃<sup>[2]</sup>, 导热性能是电极材料的重要性能之一。结合焦耳炉电极材料使用工况, 重点开展了 690 合金电极组织演变对其热导率的影响, 以研究

材料的导热性能。

690 合金中 C、N 固溶原子极限溶解度随温度下降而降低, 在冶炼凝固和热加工、热处理后的冷却过程中过饱和的间隙原子易结合基体中 Cr、Ni、Fe 原子形成相应的第二相析出<sup>[3-4]</sup>。针对合金元素含量及以上过程中显微组织变化对 690 合金耐腐蚀性、力学性能的影响已有较充分的研究工作<sup>[5-8]</sup>, 但

在 690 合金显微组织对其导热性能的影响研究方面却鲜见报道。

根据金属传热学原理,凡是破坏金属晶体周期完整性、引起基体组织晶格畸变的因素都会对声子和电子的扩散起散射作用,降低声子和电子的平均自由程,进而导致合金热导率降低。Wang C、Wang C M 等<sup>[9-10]</sup>在对 Mg-3Zn 合金导热性能的研究中发现,随着 Sn 含量升高而引起合金中异质 Sn 固溶原子数量增多,增强了热传导过程中对声子和电子的散射作用,合金热导率下降;而对合金中 Ca 的影响研究中进一步发现,这种固溶原子数量的变化还受到合金中第二相析出的影响。Pan H C、Li B C 等<sup>[11-12]</sup>对不同状态 Mg-Zn 合金和 Mg-Al 合金研究中也发现了基于相同机制下的合金热导率变化;其进一步的研究发现热挤压后合金热导率较铸态合金热导率降低,其主要原因为挤压过程中合金发生了动态再结晶,晶粒细化,晶界总面积增加使得自由电子的散射作用增强,合金热导率降低。Xie T C 等<sup>[13]</sup>在对 Mg-Zn-La/Ce 体系热导率的研究中发现溶质原子和第二相可以改善机械性能,但会降低热导率。

目前焦耳炉电极、蒸汽发生器传热管、爆破阀剪切盖等部件用的 690 合金材料,制造过程一般包括真空感应、电渣重熔、锻造、热挤压、热轧、冷轧、热处理等工艺环节。在锻造、热挤压、热轧、冷轧等工艺过程中,690 合金组织经历加工硬化与动态(静态)回复、再结晶过程,不同变形工艺下合金的显微组织有较大差异,进而对合金导热性能产生影响<sup>[14-15]</sup>。因此,对锻态、热轧态、冷轧态三种不同加工状态下 690 合金的显微组织演变分别进行了研究,并分析了组织变化对导热性能的影响规律,探讨了其影响机制。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

采用纯金属料,经真空感应炉熔炼 25 kg 690 合金锭,合金实测化学成分(质量分数)为 C 0.023%、Cr 30.34%、Fe 9.66%、Ti 0.26%、Mn 0.24%、Al 0.30%、Si 0.26%,其余为 Ni。合金锭经锻造成 30 mm 厚锻坯,开锻温度 1 100 °C、终锻温度 ≥950 °C,获得锻态 690 合金试样。继续将锻坯酸洗、打磨后经三道次热轧变形,轧制成 13 mm 厚热轧板,轧制温度 1 160 °C、终轧温度 ≥800 °C,获得热轧态 690 合金试样。继续将热轧坯酸洗、打磨后经多道次冷轧变形,轧制成 4 mm 厚冷轧板,最后道次变形量

50%,获得冷轧态 690 合金试样。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 显微组织观察

将经磨抛处理的金相试样在 50 °C 高锰酸钾-硫酸溶液中浸蚀 3 h,再经草酸浸蚀后,采用 LEICA MEF-4M 型金相显微镜下观察 690 合金晶粒尺寸。采用德国布鲁克 D8 ADVANCE X 射线衍射仪进行 XRD 图谱并计算得到合金位错密度,主要参数:Co 靶,管电流为 40 mA,管电压为 40 mV,2θ 为 45°~115°,步长为 0.016 7°。利用 FEI Quanta 650 FEG 热场发射扫描电镜及其配备牛津能谱 EBSD 一体化系统进行试样的晶粒尺寸、晶界分布、抗塑性变形能力、位错密度及分布等 EBSD 分析,步长 1.25 μm。

#### 1.2.2 热导率测量

按照 GB 22588—2008《闪光法测量热扩散系数或导热系数》,采用德国驰耐 LFA-457 激光热导仪进行合金 350 °C 热扩散系数及比热容测量,并计算获得热导率。试样尺寸为 φ12.5 mm×2.5 mm,测量前,试样经抛光以保持高的光洁度,并在抛光后表面喷碳涂层以提高光脉冲吸收。试样用不锈钢夹头夹紧,光脉冲由油气闪光灯提供,试样的背面温度由 Insb IR 探测器测量。每组试样测量两个平行试样,对平行试样间数据波动 ≥10% 的数据重新进行测量。

热扩散系数  $\alpha$  可通过式 1 进行试验和计算得到:

$$\alpha = 1.37 \frac{l^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (1)$$

式中, $l$  为试样的厚度, $t_{1/2}$  为试样背面温度上升到最高温度一半时所需的时间。当系统检测到温度稳定在 ±0.3° 时记录数据,然后再保温,记录第二个值,以此类推,在每个温度下得到三个比热容和热扩散系数的数据。最终结果为三个数值的平均值。

热导率  $k$  可通过式(2)计算得到。

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (2)$$

式中, $k$  为热导率, W/(m·K);  $\alpha$  为热扩散系数, mm<sup>2</sup>/s;  $\rho$  为合金密度, g/cm<sup>3</sup>;  $C_p$  为合金比热容, J/(g·K)。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 不同变形工艺 690 合金显微组织

图 1 分别为锻态、热轧态和冷轧态 690 合金的金相组织照片。可以发现,690 合金基体组织为奥氏体( $\gamma$ )相,其中,锻态和热轧态 690 合金热变形过程中发生了动态再结晶,分别如图 1(a)、图 1(b)所

示,显微组织以等轴 $\gamma$ 晶粒为主,并伴随大量平直的退火孪晶,如图1(a)中箭头所指。690合金中大量存在的退火孪晶和Ni基合金的低层错能相关。而冷轧态690合金组织显示,大变形冷轧处理后晶粒破碎明显,如图1(c)所示,冷轧组织沿轧面拉伸,原有退火孪晶界发生弯曲,如图1(c)中箭头所指。

进一步研究了三种变形工艺下的合金晶粒尺寸情况,锻态、热轧态、冷轧态690合金的平均晶粒尺寸分别为24.8、16.6、5.2  $\mu\text{m}$ ,平均晶粒尺寸逐渐减小。其中,锻态合金中存在一定程度的混晶,经热轧、冷轧后,晶粒尺寸均匀性有所改善,但没有完全消除。另外,在晶粒形态方面,热轧态和锻态合金的晶粒以等轴的再结晶晶粒为主,而冷态合金的晶粒主要为沿轧向拉长的非等轴晶粒。

组织晶粒尺寸的变化带来晶界总面积和单位体积内的晶界密度变化。从图1可以看出,冷轧态合金组织中晶界总面积最大,热轧态晶界总面积次之,锻态合金晶界总面积最小,尤其是冷轧态合金与锻态、热轧态合金的晶界总面积和晶界密度之间差值极大。

## 2.2 不同变形工艺690合金的晶界特征演变

通过EBSD技术进一步研究了不同变形工艺条件下690合金的晶界构成和特征分布。图2分别显示了锻态、热轧态、冷轧态690合金基体组织的IPF图和晶界分布图,相邻晶界间倾角介于 $2^\circ\sim 10^\circ$ 之间的晶界定义为小角度晶界(黑色线条表示),倾角 $\geq 10^\circ$ 的晶界定义为大角度晶界(红色线条表示)。从IPF图可以看出,三种工艺合金的晶粒间存在不同的相位差,如图2(a)、(c)、(e)所示。从晶界分布图中可以看出,锻态合金和冷轧态合金以小角度晶界为主,如图2(b)、(f)所示,小角度晶界体积分数分别达到6.47%和5.03%,而热轧态合金的小角

度晶界体积分数仅为2.17%,还存在一定量的大角度晶界,如图2(d)所示。

重合点阵(CSL)晶界分布也影响材料的性能。采用EBSD技术获得的晶界分布特征(Grain Boundary Character Distribution, GBSD)图,研究了锻态、热轧态、冷轧态690合金的低CSL晶界分布和晶界特征分布分别如图3、图4所示,其中,红色代表 $\Sigma 3$ 晶界、绿色代表 $\Sigma 9$ 晶界、蓝色代表 $\Sigma 27$ 晶界。从图4中可以看出,690合金中低CSL的晶界主要由 $\Sigma 3$ 孪晶界构成, $\Sigma 9$ 孪晶界和 $\Sigma 27$ 孪晶界数量远低于 $\Sigma 3$ 孪晶界。

从图4(a)中可以看出, $\Sigma 3$ 晶界体积分数热轧态 $>$ 冷轧态 $\approx$ 锻态合金。孪晶界作为晶体缺陷的一种,其存在会在合金中产生相应的晶体畸变。690合金中的 $\Sigma 3n$ ( $n=1, 2, 3$ )晶界产生的畸变主要由 $\Sigma 3$ 晶界引起,并取决于 $\Sigma 3$ 晶界体积分数。因此,热轧态合金低CSL晶界产生的晶格畸变程度高于锻态合金和冷轧态合金。

## 2.3 不同变形工艺690合金的择优取向与位错密度

### 2.3.1 不同变形工艺690合金的XRD测试结果

锻态、热轧态、冷轧态三种不同变形工艺690合金的XRD图谱如图5所示。从图5中可以看出,690合金经不同变形工艺后,合金衍射峰 $2\theta$ 角及峰宽未发生明显转变,但不同变形工艺的690合金 $\gamma$ 相基体的衍射峰强弱发生了一定程度的转变。

相比于锻态合金,热轧态690合金的(111)面衍射峰强度略有升高,(220)面及(311)面峰值差异不大,但(200)面衍射峰值明显升高。对比热轧态与冷轧态合金的XRD图谱可以发现合金在冷轧过程中出现了比较明显的择优取向现象:原峰值较高的(111)面衍射峰值降低显著,(220)面及(311)面衍

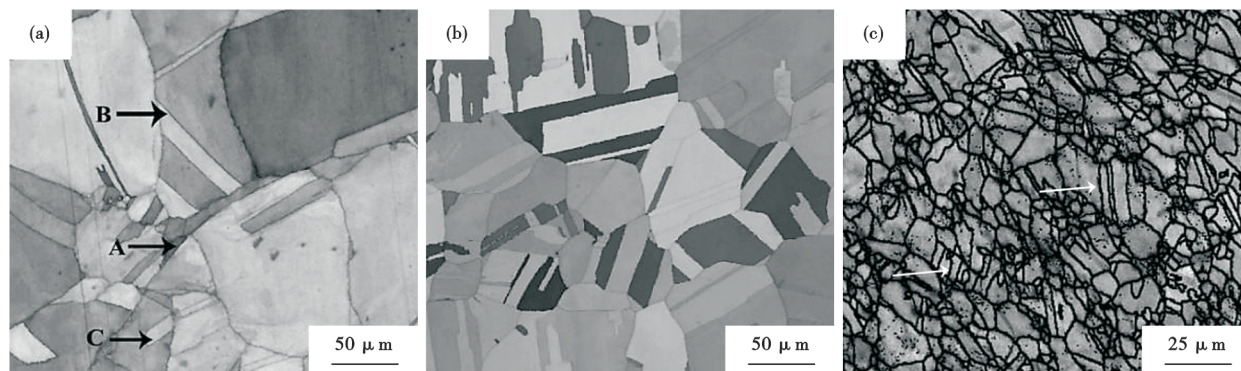


图1 不同状态690合金金相组织:(a)锻态,(b)热轧态,(c)冷轧态

Fig. 1 Microstructure of alloy 690 in different states : (a) forged, (b) hot rolled, (c) cold rolled

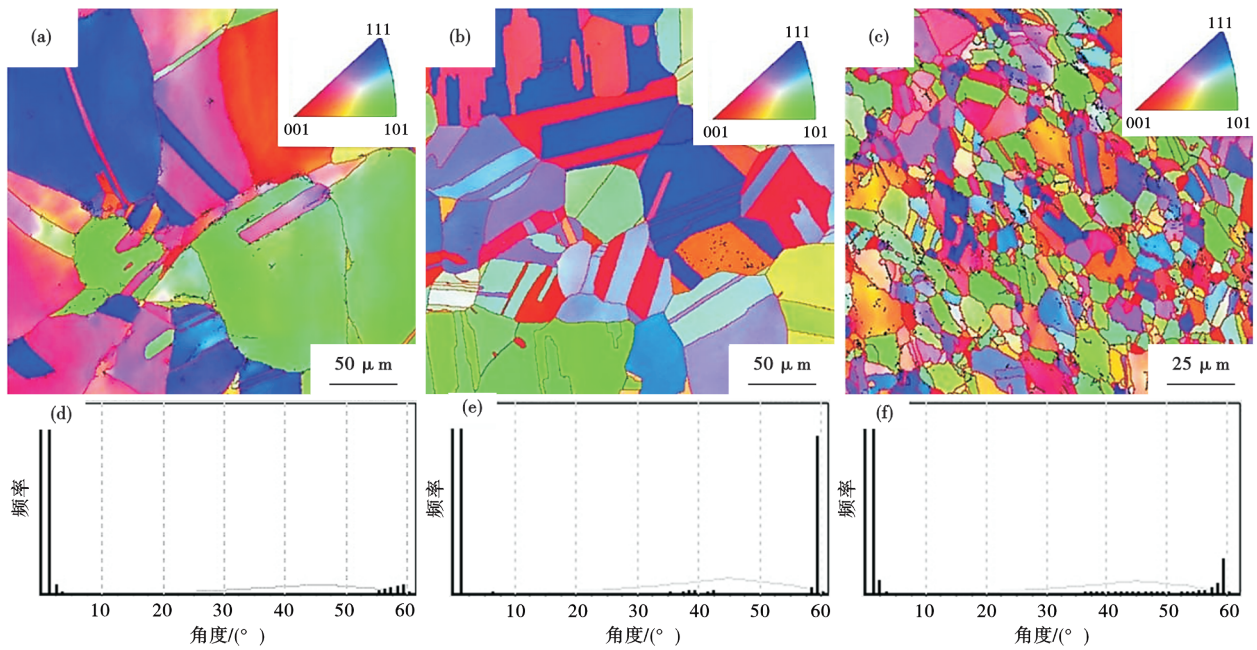


图2 不同变形工艺 690 合金晶界构成:(a) 锻态反极图, (b) 锻态晶界分布图, (c) 热轧态反极图, (d) 热轧态晶界分布图, (e) 冷轧态反极图, (f) 冷轧态晶界分布图

Fig. 2 Grain boundary composition of alloy 690 with different deformation processes : (a) IPF diagram at forged condition, (b) grain boundary distribution map at forged condition, (c) IPF diagram at hot rolled condition, (d) grain boundary distribution map at hot rolled condition, (e) IPF diagram at cold rolled condition, (f) distribution map of grain boundaries at cold rolled condition

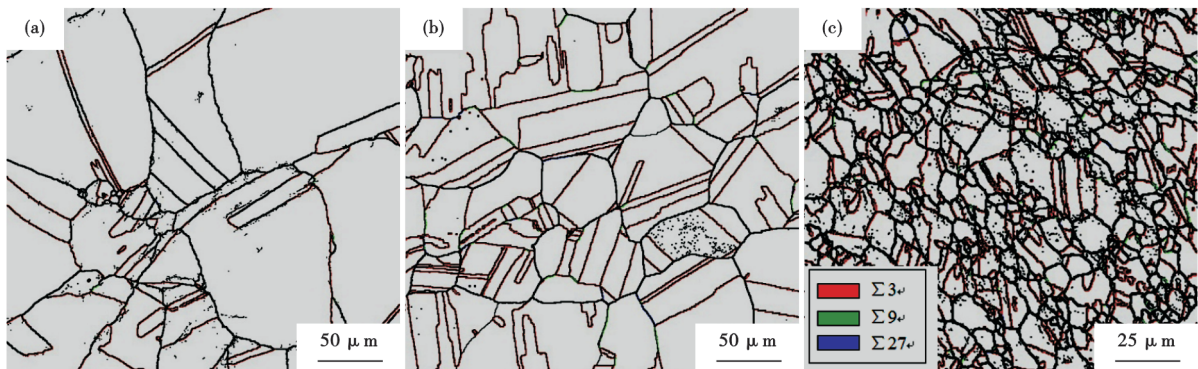


图3 不同变形工艺 690 合金低 CSL 晶界分布图: (a) 锻态, (b) 热轧态, (c) 冷轧态

Fig. 3 Distribution of low CSL grain boundaries of alloy 690 with different deformation processes : (a) forged, (b) hot rolled, (c) cold rolled

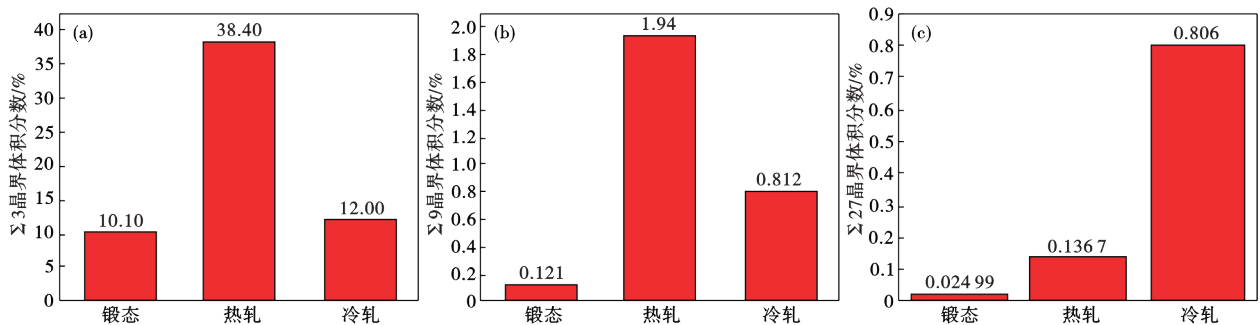


图4 不同变形工艺 690 合金晶界特征分布图: (a)  $\Sigma 3$ , (b)  $\Sigma 9$ , (c)  $\Sigma 27$

Fig. 4 Distribution of grain boundary features of alloy 690 with different deformation processes : (a)  $\Sigma 3$ , (b)  $\Sigma 9$ , (c)  $\Sigma 27$

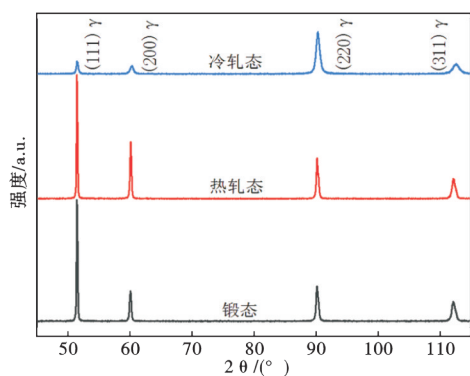


图5 690合金的XRD图谱

Fig. 5 XRD diagram of alloy 690

射峰强度也发生了一定程度上的减弱。其(111)面、(200)面及(311)面衍射峰都比较接近,衍射峰强度都趋近于零,而(220)面的衍射峰强度上升明显,因此,在冷轧过程中690合金试样表现出(220)面择优取向。

### 2.3.2 不同变形工艺690合金的位错密度

通过XRD图谱可计算得到690合金经不同变形工艺后位错密度,锻态、热轧态、冷轧态690合金组织的位错密度分别为 $1.20 \times 10^{11}$ 、 $0.84 \times 10^{11}$ 、 $4.20 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。

通过EBSD中的局域取向错配角图(KAM图)对合金中的位错密度进一步研究,图6为经不同变形工艺后KAM图,图中颜色越深其对应位置位错密度越高。

从图6(a)可以看出,沿着锻态合金 $\gamma$ 相晶界及退火孪晶界附近有一定量的位错塞积,但其位错密度较低。从图6(c)看出,热轧态690合金位错密度与锻态较为接近,位错密度较低。从图6(e)冷轧态690合金KAM图可以看出,冷轧态合金位错密度远高于锻态及热轧态,这是由于在冷轧过程中合金冷变形过

程中的形变储能以位错的形式储存于基体中,冷轧态合金体系能量较热轧态高。从图6中可以看出,合金存在一定程度的混晶,尺寸较大的晶粒多呈蓝色,尺寸较小的晶粒多呈绿色,同时尺寸较小的晶粒取向趋于一致,说明冷轧过程中合金出现了择优取向,而锻压及热轧过程中没出现择优取向现象。根据XRD结果可知,其择优取向面为(220)面。

结合XRD图谱和KAM图结果,可以看出不同变形工艺的位错密度相对关系为:冷轧态>锻态>热轧态。冷轧态690合金高的位错密度,主要由于冷轧过程中合金发生的大量变形,晶界及滑移面产生了大量的位错塞积,合金位错迅速增殖。

位错作为线缺陷的一种,破坏了合金晶体完整性,导致发生晶格畸变。位错密度越高,合金中位错造成的晶格畸变就越严重。从图6中可以看出冷轧态合金位错密度最高,远远大于热轧态合金与锻态合金位错密度,因此,合金经冷轧后其位错产生的晶格畸变最大,合金经锻压后其位错产生的晶格畸变次之,但远远小于冷轧态合金;合金经热轧后其位错产生的晶格畸变最小,但与锻态合金位错产生的晶格相差不大。

### 2.4 不同变形工艺690合金的析出相及溶质原子浓度变化

图7分别为锻态、热轧态、冷轧态690合金显微组织,从图7(a,b)中可以看出锻态和热轧态690合金中出现粗大且弥散分布于基体中的析出相(箭头所指),且锻态合金中析出相数量少于热轧态合金析出相数量。随着热加工温度的降低,690合金中C原子极限溶解度降低,碳化物析出倾向加大。冷轧态690合金的析出相总量较热轧态合金无变化,但在冷变形过程中热轧残留的析出相发生变形、破

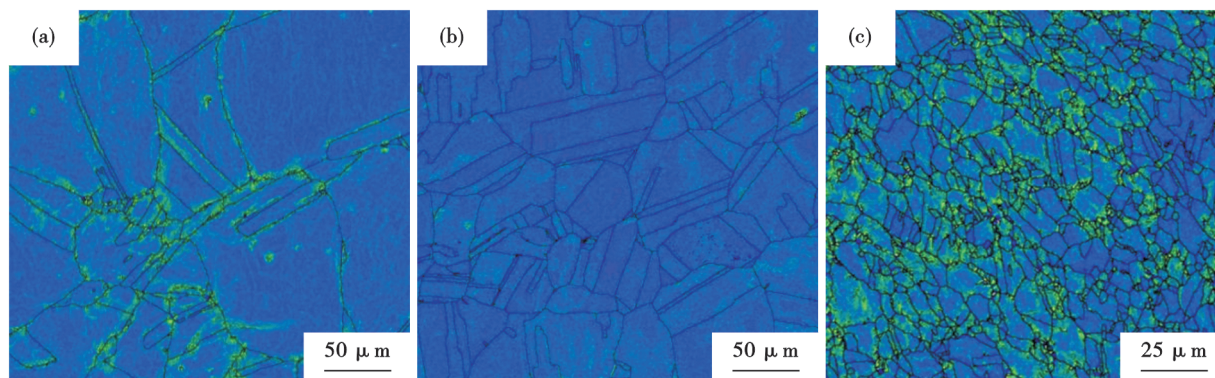


图6 不同变形工艺690合金的KAM图:(a) 锻态,(b) 热轧态,(c) 冷轧态

Fig. 6 KAM map of alloy 690 with different deformation processes : (a) forged, (b) hot rolled, (c) cold rolled

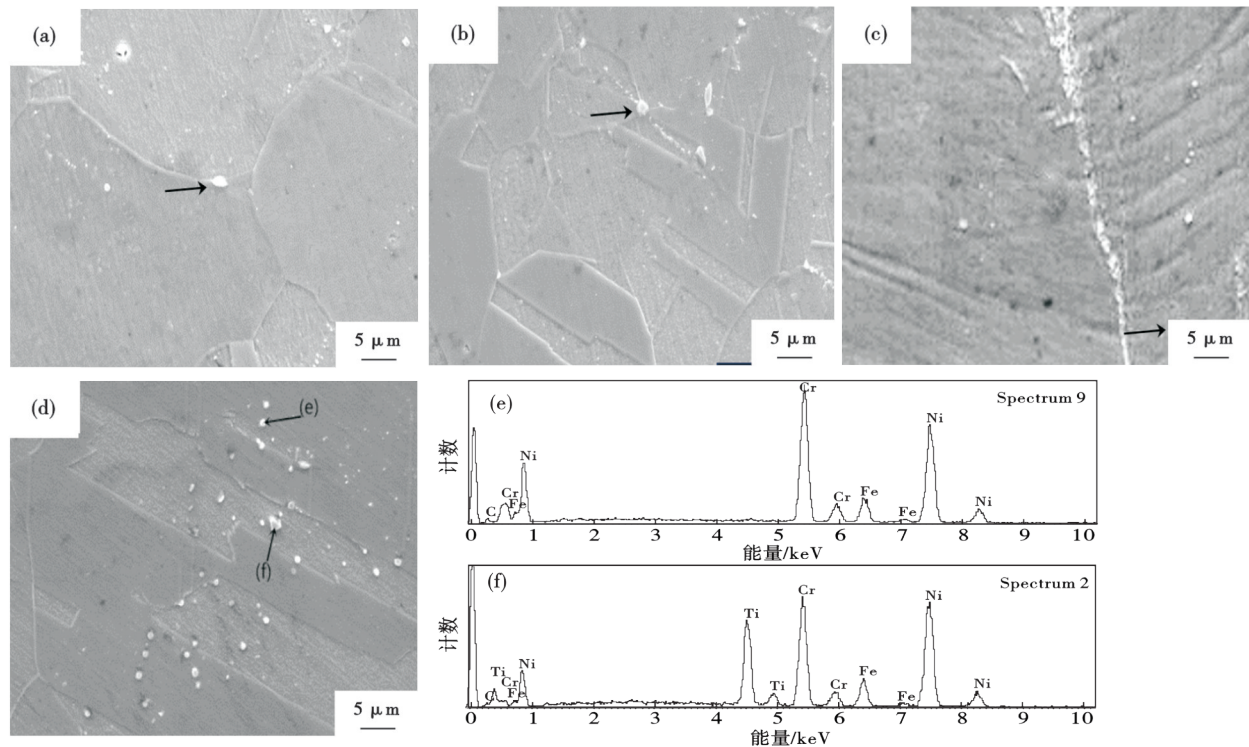


图 7 不同变形工艺下 690 合金 SEM 及 EDS 结果: (a) 锻态, (b) 热轧态, (c) 冷轧态, (d) 热轧态, (e)  $M_{23}C_6$  相, (f)  $M(CN)$  相  
 Fig. 7 SEM and EDS results of alloy 690 under different deformation processes : (a) forged state, (b) hot rolled, (c) cold rolled, (d) hot rolled, (e)  $M_{23}C_6$  phase, (f)  $M(CN)$  phase

碎,析出相尺寸更加细小弥散(图 7c)。对图 7(b)热轧态 690 合金中的碳化物进行 EDS 能谱分析,并结合前人工作<sup>[2]</sup>可判定为富 Cr 的  $M_{23}C_6$  型碳化物和富 Ti 的  $M(CN)$  型碳化物。

690 合金析出  $M_{23}C_6$  或  $M(CN)$  相的同时,伴随的是 Cr、Ti、C、N 等溶质原子从基体中的析出。溶质原子固溶于基体中时,由于溶质原子与溶剂原子尺寸差异,导致合金产生点阵畸变。因此,第二相析出的过程也是基体溶质原子产生的点阵畸变程度降低的过程。

### 2.5 不同变形工艺 690 合金的热导率

表 1 列出了锻态、热轧态、冷轧态 690 合金在 350 °C 时的热扩散系数及比热容测量数据。690 合

金的密度统一选用  $8.19 \text{ g/cm}^3$ , 采用式(2)计算得到 690 合金试样的热导率。可以看出,不同变形工艺下的 690 合金 350 °C 热导率有较大差异:热轧态 690 合金的热导率最高,锻态次之,而冷轧态 690 合金的热导率最低。

在合金中凡是破坏晶体周期完整性的晶格畸变,都会对声子和电子的能量传递过程其阻碍和散射作用,降低了声子和电子的平均自由程,从而导致了合金热导率的下降。前面的研究表明,晶界、孪晶界、位错密度及溶质原子水平影响 690 合金晶格畸变程度,进而对合金热导率产生影响。多晶体材料中的组织缺陷主要由晶界(包括大角度晶界、小角度晶界)、孪晶界等面缺陷,位错等线缺陷以及

表 1 690 合金在 350 °C 下的热导率  
 Table 1 Thermal conductivity of alloy 690 at 350 °C

试样状态	热扩散系数/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	比热容/ [ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	热导率/ [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	热导率平均值/ [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	标准偏差
锻态	4.025	0.593	19.361	19.349	0.018
	4.028	0.595	19.336		
热轧态	3.939	0.637	20.311	20.322	0.016
	3.940	0.637	20.333		
冷轧态	4.059	0.535	17.599	17.632	0.033
	4.074	0.536	17.664		

空位、溶质原子等点缺陷构成。

从三种状态690合金的晶粒尺寸和晶界总面积来看,和冷轧态相比,热轧态、锻态690合金晶粒尺寸更大,晶界总面积大幅下降,晶界引起的畸变程度较弱,提高了合金的热导率。但是,具有更高比例 $\Sigma 3$ 晶界体积分数的热轧态690合金,并未表现出更高的热导率,也就是说,相比于晶界,作为另一种面缺陷,当相邻两点阵在晶界附近的重合程度越高时(即晶界对应的重位因子 $\Sigma$ 越低时),晶界的结构畸变程度更低。而对比大、小角度晶界,锻态合金和冷轧态合金主要以小角度晶界为主(图2),研究认为小角度晶界比大角度晶界具有更低的能<sup>[16]</sup>,因此,可以推断小角度晶界对690合金的影响不大。

从线缺陷考虑,冷轧态690合金的位错密度更高,晶体结构畸变程度大幅增高,导致合金热导率下降<sup>[17]</sup>。从点缺陷考虑,三种状态析出的 $M_{23}C_6$ 相数量几乎相当,但冷变形后析出相尺寸更加细小弥散,加剧了基体组织的点阵畸变程度。

### 参考文献

- [1] 张克乾,张 华,李 扬,等. 焦耳陶瓷电熔炉中电极材料腐蚀问题的研究现状[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 458-463.
- [2] 凡思军,钱 敏,薛天锋,等. Joule加热陶瓷炉玻璃固化技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(12): 2736-2750.
- [3] Zhao X, Wang M, Hao X C, et al. Precipitation of dendritic  $M_{23}C_6$  carbides in alloy 690 during continuous cooling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 851: 156694.
- [4] 丰 涵. 热处理工艺对Inconel690合金组织和性能的影响研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2008.
- [5] Betova I, Bojinov M, Ikäläinen T, et al. Corrosion of alloy 690 in simulated steam generator crevices: Effect of applied potential, pH and Pb addition[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(2): 021502.
- [6] Kuang W J, Was G S. The effect of grain boundary structure on the intergranular degradation behavior of solution annealed alloy 690 in high temperature, hydrogenated water[J]. Acta Materialia, 2020, 182: 120-130.
- [7] Sourabh K, Singh J B. Tensile behavior of alloy 690 in the dynamic strain aging regime[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(7): 2932-2949.
- [8] Moss T, Kuang W J, Was G S. Stress corrosion crack initiation in Alloy 690 in high temperature water[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2018, 22(1): 16-25.
- [9] Wang C, Liu Z, Xiao S, et al. Effects of Sn, Ca additions on thermal conductivity of Mg matrix alloys [J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(6): 581-587.
- [10] Wang C M, Chen Y G, Xiao S F, et al. Thermal conductivity and mechanical properties of as-cast Mg-3Zn-(0.5~3.5) Sn alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10): 2019-2022.
- [11] Pan H C, Pan F S, Peng J, et al. High-conductivity binary Mg-Zn sheet processed by cold rolling and subsequent aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 578: 493-500.
- [12] Li B C, Hou L G, Wu R Z, et al. Microstructure and thermal conductivity of Mg-2Zn-Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 722: 772-777.
- [13] Xie T C, Shi H, Wang H B, et al. Thermodynamic prediction of thermal diffusivity and thermal conductivity in Mg-Zn-La/Ce system [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 97: 147-155.
- [14] 杨树峰,贾 雷,鄢宇灿,等. 镍基变形高温合金裂纹形成及控制研究进展[J]. 特殊钢, 2024, 45(4): 13-25.
- [15] 秦兴文,王 坤,蔡 珑,等. 固溶处理温度对冷轧Inconel 601镍基合金管材组织及性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 90-95.
- [16] Olmsted D L, Foiles S M, Holm E A. Survey of computed grain boundary properties in face-centered cubic metals: I. Grain boundary energy [J]. Acta Materialia, 2009, 57(13): 3694-3703.
- [17] Zhang Q W, Wang X T, Qin Y, et al. Improving thermal conductivity of a nickel-based alloy through advanced electromagnetic coupling treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 4708-4723.