

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20160115

## 高熵合金的研究现状和应用前景

刘丘林<sup>1</sup>, 刘允中<sup>2</sup>, 王艳群<sup>1</sup>

(1. 广州城建职业学院建筑工程学院, 广东 广州 510925; 2. 华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术中心, 广东 广州 510640)

**摘 要:**综述了高熵合金的制备方法、特性及其应用前景。高熵合金是近年发展起来的新型合金, 通常包含 5 种以上的主要元素, 各主元的原子分数在 5%~35% 之间, 其组织和性能在许多方面有别于传统合金。随着对高熵合金研究的深入, 其应用会越来越广, 对各行各业的影响也会越来越大。

**关键词:**高熵合金; 制备方法; 特性; 应用

**文献标志码:**A **文章编号:**1006-6543-(2017)06-0064-06

### Research status and application prospect of high-entropy alloy

LIU Qiu-lin<sup>1</sup>, LIU Yun-zhong<sup>2</sup>, WANG Yan-qun<sup>1</sup>

(1. Institute of Architecture and Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, China;  
2. National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming Technology for Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The preparation methods, properties and application prospect of high-entropy alloys were summarized. High-entropy alloy is a new type of alloy developed in recent years, which usually contains more than five main elements, and the atom percent of each principal element is between 5% -35%. The microstructure and properties of high-entropy alloys are different from the traditional alloys in many aspects. With the deepening of the research on high entropy alloy, its application will be more and more wide, and the influence on all walks of life will be more and more.

**Key words:** high-entropy alloy; preparation method; property; application

以一至两种元素为主, 并辅以少量其他元素改善合金性能<sup>[1]</sup>, 是传统合金的设计思路。20 世纪 90 年代, 台湾国立清华大学叶均蔚教授<sup>[2]</sup>打破传统的合金设计理念, 提出了等物质的量多主元合金的概念, 并将其定义为高熵合金。Cantor 等<sup>[3]</sup>也在同一时间将其命名为等原子比多组元合金。高熵合金是一种超级固溶体, 无法区分溶质和溶剂, 一般由 5 种或 5 种以上金属或非金属元素组成, 以等物质的量比或近等物质的量比组合而成, 没有一种元素的含量超过 50% (原子分数), 因而高熵合金特性由各主

元共同决定<sup>[4]</sup>。

### 1 高熵合金的定义

在规则固溶体合金体系中,  $n$  元合金的混合熵  $\Delta S_{\text{mix}}$  可由式(1)获得<sup>[5]</sup>。

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n (c_i \ln c_i) \quad (1)$$

式中:  $R$  为气体常数, 取  $8.31 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$ ;  $c_i$  表示第  $i$  种元素在该合金体系中所占的原子分数。当合金

**基金项目:**广东省高等职业教育品牌专业建设项目(2016gzpp016)

**作者简介:**刘丘林(1983—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事粉末冶金技术的研究。

**收稿日期:**2016-10-12

中各组元原子比相等时,该  $n$  元合金体系的混合熵达到最大值,最大混合熵可表述为式(2)<sup>[5]</sup>。

$$\Delta S_{\text{mix}}^{\text{max}} = -R \left( \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} + \dots + \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} \right) = R \ln n \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)易知:随着合金组元数的增加,合金体系的混合熵不断增加,但熵的增加幅度则逐渐变小,并且当组元数  $n \geq 13$  时,组元数的增加对混合熵的增量贡献变得十分有限。

因此,大多学者把高熵合金定义为:以多种合金元素 ( $5 \leq n \leq 13$ ) 为主要组成基元,且每种主元的原子分数介于 5%~35% 之间而构成的新型合金。

## 2 高熵合金的4大效应

高熵合金作为一种新型的固溶体合金,具备一些与传统合金不同的特征,主要体现在以下4个方面。

### 2.1 高熵效应

由上述可知,多主元 ( $n \geq 5$ ) 的特性造成高熵合金的“混合熵”很高,从而形成“高熵效应”。而正是这种“高熵效应”促使各组成元素自由无序地分布,形成了简单的无基元固溶体,而不是结构复杂的物相或化合物<sup>[6]</sup>。

### 2.2 严重的晶格畸变

在多主元高熵合金这种无基元的固溶体中,各原子周围都分布着其他不同种类的原子,而不同种类的原子具有不同的原子半径,导致晶格存在很大的应力而使得晶格发生严重的畸变。另外,不同种类原子间的结合能和晶体结构的差异也会导致晶体晶格畸变严重<sup>[2]</sup>。

### 2.3 迟缓扩散效应

要完成高熵合金中原子扩散的相变,就需要调动比传统合金中更多种类的原子;多种不同类型的原子扩散会造成晶格势能波动范围加大,从而产生很多可作为“陷阱”的低晶格势能的晶格间隙,这些“陷阱”能有效地阻碍原子运动。所以,产生了原子迟缓扩散效应<sup>[7]</sup>。

### 2.4 鸡尾酒效应

鸡尾酒效应,是基于主要组元本身特性及其交互作用相结合产生的一种复杂效应,并不是各组元本身特性的简单叠加。例如:加入 Fe、Ni、Co 等磁性元素能使合金获得磁性能,但合金的磁性能并不是各元素磁性的简单叠加<sup>[8]</sup>。

## 3 高熵合金的制备方法

### 3.1 真空熔炼法

真空熔炼法制备高熵合金的主要工艺为:将纯金属按一定的比例放入坩埚中,抽真空后充入氩气,在氩气保护下熔炼,待全部均匀熔化后浇铸成形。该方法是目前大多数研究者制备高熵合金所采用的方法。其熔炼温度较高,可熔炼熔点较高的合金,并且对于易挥发的杂质和某些气体的去除具有良好的效果<sup>[9]</sup>。

张华等<sup>[10]</sup>采用真空电弧炉制备了  $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ 、 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNiSi}_{0.2}$ 、 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNiTi}_{0.5}$  高熵合金,测定了合金的抗高温氧化性。发现3种高熵合金在 800 °C 和 900 °C 氧化增重均较少,具有优异的抗高温氧化性能。尹可心等<sup>[11]</sup>用真空电磁感应炉制备了一种以 Al、Mg、Zn、Cu、Ti 等5种元素作为主元素的高熵合金。发现制备的  $\text{Al}_7\text{Mg}_{3.6}\text{Cu}_{1.2}\text{Zn}_{7.2}\text{Ti}_{1.2}$  合金虽然脆性较大,但抗压强度较高,达到了 572.89 MPa。孙昭媛<sup>[12]</sup>利用 WK-II 型非自耗真空熔炼炉制备了  $\text{AlFeCoNiCrCuV}_x\text{-Cu}_{0.5}\text{FeAlNiCrMo}_x$  系列高熵合金,对合金的显微组织和力学性能进行了分析测试,研究了合金元素对高熵合金显微组织和力学性能的影响。发现随着 V 含量的增加,合金组织明显细化,硬度和强度逐渐增大,塑性逐渐降低;随着 Mo 含量的增加,bcc 和有序 bcc 结构的晶格常数逐渐增加,合金硬度逐渐增大,强度逐渐增加,塑性也得到一定的改善。

但是,用真空熔炼法制备的高熵合金中往往存在组织不均匀、孔隙、缩孔、内应力大、脆性大等缺陷,使得高熵合金的性能难以发挥到最优,限制了合金的进一步应用。

### 3.2 机械合金化法

采用机械合金化法制备高熵合金,就是将合金粉末混合,与磨球按适当的配比放入高能球磨机中进行球磨,经球磨机长时间运转而使粉末机械混合,并将机械能传递给粉末,使其承受冲击、剪切、压缩、摩擦等多种力的综合作用,发生塑性变形,最终得到成分均匀的纳米晶或非晶颗粒<sup>[13]</sup>。

方思聪<sup>[14]</sup>采用机械合金化-放电等离子烧结的方法,制备了  $\text{AlCoFeNiCu}$  系高熵合金,研究了不同 Al、Cu 含量下该系高熵合金的机械合金化行为、相形成规律、显微组织和力学性能。发现该系高熵合

金为单一 fcc 相或 (fcc+bcc) 相组成; 并且随着 Al 元素的增加和 Cu 元素的减少, 该系合金的强度、硬度提高, 塑性降低。袁尹明月等<sup>[15]</sup>采用机械合金化和真空热压烧结方法制备了  $\text{Al}_x\text{CoCrCu}_{0.5}\text{FeNi}$  高熵合金, 研究 Al 含量对合金系的晶体结构、显微组织、硬度、压缩性能以及摩擦磨损行为的影响。发现合金晶体结构均为 fcc 和 bcc 双相结构, Al 含量的增加使合金塑性降低, 硬度和强度增大。许世红等<sup>[16]</sup>通过机械合金化球磨反应制备了不同组元数和等物质的量组成的合金体系 Mg-Ti-V-Cr-Ni, 研究了组元数及热处理对合金球磨产物显微组织和相形成规律的影响。发现高熵合金 MgTiVCrNi 球磨产物可形成富 Mg 的非晶相与贫 Mg 的纳米晶 bcc 相, 该 bcc 型固溶体结构具有较高的热稳定性。

采用机械合金化法制备的高熵合金, 没有成分偏析和消极共晶等现象, 具有稳定的微观结构, 优异的室温加工性和化学均质性。此外, 该方法还具有能制备原材料熔点相差较大的产品的优点。不过, 用机械合金化法制备的产品都为粉末状态, 还必须采用其他方法使其固结为块状材料, 才具有更高的应用价值。

### 3.3 粉末冶金法

粉末冶金法就是用金属或非金属粉末作原料, 将其压制成形, 然后烧结成具有一定强度制品的方法<sup>[17]</sup>。

GUAN 等<sup>[18]</sup>采用粉末冶金法制备了  $\text{AlNiCrFe-CuMo}_x$  ( $x=0\sim0.2$ ) 高熵合金, 研究了 Mo 元素对该合金显微组织和力学性能的影响。发现合金由简单的 fcc 相和 bcc 相组成, Mo 的增加可以促进 fcc 相的形成, 当  $x=0.1$  时合金具有较高的硬度和强度。赵瑞锋等<sup>[19]</sup>采用粉末冶金工艺制备了  $\text{AlCrMn-MoNiZr}$ 、 $\text{AlCrMnMoNiZrB}_{0.1}$  高熵合金, 发现两种合金的组织均为富 Cr、Mo 的 bcc 相和金属间化合物的混合组织, 同时合金的高温稳定性较好, 硬度较高。邵霞等<sup>[20]</sup>采用粉末冶金技术制备了  $\text{AlCrFeNi}_x\text{CoCuTi}$  ( $x=0.5, 1.0, 1.5$ ) 高熵合金, 研究了 Ni 元素对合金组织和性能的影响。发现合金的硬度均随着 Ni 含量的增加而降低, 合金具有较好的塑性, 同时强度较高。

粉末冶金法可用于制备一些熔点较高的金属和合金, 且能避免成分偏析; 与其他方法相比具有材料利用率高, 对设备的要求不高, 且烧结温度、时

间和气氛可以控制等优点。

### 3.4 激光熔覆法

激光熔覆是一种表面改性技术, 它通过在基材表面添加熔覆材料, 并利用高能量密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝, 在基材表面形成与其冶金结合的熔覆层<sup>[21]</sup>。

邹朋津等<sup>[22]</sup>利用激光熔覆法在 45 钢基体上制备了成形质量良好的  $\text{CrNiAlCoMoB}_x$  系高熵合金涂层, 并研究了激光熔覆工艺参数和 B 含量对涂层成形质量、微观组织结构和硬度的影响。发现合金涂层与基体结合良好, 均匀致密, 硬度较高, 摩擦磨损性能优异, 耐腐蚀性良好。安旭龙<sup>[23]</sup>运用激光熔覆技术在 45 钢表面制备了  $\text{Ti}_x\text{FeCoCrWSi}$  系高熵合金涂层, 研究了涂层的微观结构、物相、组织成分、硬度、磨损性能及腐蚀性能。发现高熵合金  $\text{Ti}_x\text{FeCoCrWSi}$  涂层主要由树枝晶组成, 合金涂层平均硬度在 500~800 HV; 随着 Ti 含量的增大磨损率增大, 耐磨性变差。李栋梁等<sup>[24]</sup>采用激光熔覆法在 Q235 钢基体上制备了不同 Mo 含量的  $\text{FeCoNiMnMoB}_{0.5}$  系高熵合金涂层, 着重探究了 Mo 对高熵合金组织与性能的影响。发现该系高熵合金的组织为树枝晶, 主要由 fcc 相和少量金属间化合物构成; 另外, 随着 Mo 含量的增加, 合金涂层的硬度增加。温立哲等<sup>[25]</sup>通过真空激光熔覆制备了  $\text{AlCoCrCu}_{0.5}\text{FeMoNiTi}$  高熵合金涂层, 合金具有很好的热稳定性, 熔覆态合金的硬度达到 1 080 HV, 经 500 °C 退火后, 涂层硬度下降, 但再升高退火温度, 硬度变化极小, 在 900 °C 退火后, 硬度仍然达到 943 HV。

激光熔覆法制备高熵合金涂层具有以下优点: (1)理论上, 由任何元素组成的高熵合金都可用该方法制备; (2)能随意改变合金的组成成分, 得到不同的涂层; (3)能制备基体金属跟熔覆层合金熔点差异较大的涂层, 而其他方法很难做到。因此, 激光熔覆技术是一种非常好的制备高熵合金涂层的方法。

### 3.5 电化学沉积法

电化学沉积是一种化学过程, 也是一种氧化还原过程, 是指在外加电压的电解液中, 金属阳离子在阴极还原成原子, 而形成沉积层的过程。主要用于制备各种金属或合金镀层<sup>[26]</sup>。

童叶翔<sup>[27]</sup>采用电化学沉积法在 Ti 基体上制备了稀土-过渡金属纳米有序非晶高熵合金薄膜, 探讨了

电化学沉积条件对薄膜形貌的影响。发现在有机溶剂体系中,过渡金属离子对稀土离子具有诱导共沉积作用,在Ti基体上可得到纳米有序且分布均匀的颗粒薄膜,所制备的合金材料为无定型结构。姚陈忠等<sup>[28]</sup>通过电化学沉积在室温下制备了具有纳米结构组织的Nd-Fe-Co-Ni-Mn高熵合金磁性薄膜,发现该薄膜是无定形态的,在室温下具有良好的软磁性能。

简单快捷是用电化学沉积法制备高熵合金薄膜材料的最大优点。但是,其对于基体表面上晶核生长和长大的速度不能控制,制得的化合物薄膜性能不高。

除上述制备方法外,利用真空熔体快淬法制备高熵合金非晶薄带,用磁控溅射法、热喷涂法、微波辅助燃烧合成等<sup>[29]</sup>制备高熵合金薄膜等在文献中也有报道。

## 4 高熵合金的特性

### 4.1 组织结构特性

#### 4.1.1 相结构简单

根据吉布斯自由能公式,合金系统的自由能 $\Delta G_{\text{mix}}$ 可表述为式(3)<sup>[30]</sup>。

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (3)$$

式中: $\Delta H_{\text{mix}}$ 为合金系统的混合焓; $T$ 为绝对温度。显然,在一个固定的合金系统中,当温度一定时,混合熵 $\Delta S_{\text{mix}}$ 越大,则越有利于自由能 $\Delta G_{\text{mix}}$ 的降低,从而使得合金系统趋于稳定。因此,尽管高熵合金拥有多个主元,具有形成复杂相的趋势;但是,“高熵效应”导致合金实际上形成的是具有简单fcc或bcc或两者复合结构的固溶体相,而不是形成金属间化合物等复杂相。

#### 4.1.2 纳米化与非晶化

高熵合金不仅相结构简单,而且在铸态、均匀化退火甚至完全退火态下均存在大量的纳米相和非晶相,但传统合金只有在特殊的热处理条件下才可以获得纳米化结构。从动力学上可以解释高熵合金纳米化倾向的主要原因。当高熵合金熔炼时,所有元素金属杂乱无章地熔化排列成无序的液体,凝固时,由于多元素原子的扩散及分配,使得析出物的形核长大延迟,这样有助于纳米相的形成。另外,由于高熵合金的元素配比为等物质的量比或近等物质的量比,所以其相分离的长程扩散非常缓慢,元素之间的

置换也比较困难,晶体的形核率和生长速度因此降低,从而极大地细化了合金的晶粒。

### 4.2 力学性能特性

#### 4.2.1 高硬度及高强度

高熵合金的强度、硬度比一般的常规合金要高,硬度多在600~900 HV。原因在于:(1)高熵合金由于其主元数目较多,并且各个主元之间的原子半径存在差异,在凝固过程中熵值非常高,原子的扩散运动变得非常困难,影响了位错的移动。(2)高熵合金内大块第二相的形成非常困难,析出相很难大面积地连续在一起,大部分尺寸非常细小,只有纳米尺寸,纳米相的弥散强化作用使得合金的强度、硬度进一步提高。(3)高熵合金在生成纳米相的同时,非晶态的组织也易于形成,由于非晶相中没有位错,滑移变形更困难,所以合金的强度、硬度有了更大程度的提高。

#### 4.2.2 高耐磨性

材料的硬度越高,往往耐磨性也越好<sup>[31]</sup>。因此高熵合金具有较高的耐磨性。这使其在模具、刀具等方面有很好的应用前景。

#### 4.2.3 良好的耐腐蚀性

高熵合金具有单一稳定的相结构,不存在相与相之间的界面,因此结构上和能量上都不具备形成原电池的条件,抗腐蚀性很强。此外,高熵合金中还常有Co、Cr、Cu、Ni和Ti等元素,而这些元素是极易形成氧化膜的元素,氧化膜的保护使高熵合金的耐腐蚀性进一步增强。

#### 4.2.4 良好的热稳定性

传统合金在高温环境下容易发生软化和不稳定现象,高温回火时也会出现回火软化的现象。与传统合金相比,高熵合金具有很好的热稳定性。因为高熵合金由多个主元组成,原子尺寸差异等因素导致其晶格发生很大畸变,使固溶强化作用加强,热稳定性提高。

此外,高电阻率及软磁特性也是高熵合金的显著特性。含有Al和Cr的高熵合金还具有高达1 100 °C的优异抗氧化性<sup>[32]</sup>。

## 5 高熵合金的应用

高熵合金优异的性能决定了其广阔的应用空间<sup>[33]</sup>。其潜在的应用领域包括:模具与刀具、电子元器件、发动机、耐磨涂层、高频交流材料、核结构材

料、光传输材料、生物医用材料、热阻隔材料、储氢材料、船舶与海洋工程材料、化工材料、耐腐蚀材料、耐磨材料、热电材料、超导材料和电磁材料等。

(1) 传统的高速钢硬度高但塑性和韧性较差, 作为刀具时容易出现折断现象, 而高熵合金能够同时具备多种优异性能, 因此高熵合金可用于制造对材料要求较高的模具和刀具。当前, 生产塑料模和挤压模的普通模具钢正逐渐被高熵合金替代。

(2) 很好的耐高温性能和较高的抗压强度使得高熵合金可用作焊接材料、涡轮叶片、热交换器及高温炉的耐热材料, 也可用作超高大楼的耐火骨架、微电机材料等。

(3) 高熵合金优异的耐蚀性可使其在易产生腐蚀的环境下工作, 例如可应用到化学工厂、航海船舶的建设及生产中。

(4) 高熵合金不仅具有高硬度和高耐磨性, 还具有较低的弹性模量, 这使其非常适合制作高尔夫球头的打击面、油压气压杆、钢管及辊压筒的硬面。

(5) 软磁性及高电阻率也是高熵合金的特性之一, 因此高熵合金在高频通讯器件方面也具有很大的应用潜力, 可以替代其他材料用以制作高频变压器、马达的磁心、磁头、磁盘、高频软磁薄膜等。

(6) 除此之外, 在很多其他领域, 例如电热材料、储氢材料、IC扩散阻绝层等工业领域, 高熵合金也具有广阔的发展前景。

## 6 结束语

高熵合金是一个不同于传统合金的新合金, 其显现出与传统合金不同的特性, 具有很高的研究价值和开发应用意义。但至今还需进一步研究高熵合金的微观结构, 进行相图、热力学分析, 物理、化学及力学性能的测定, 建立科学的选择合金元素理论、高熵合金的熔铸理论、凝固结晶理论、压力加工理论与热处理理论等<sup>[33]</sup>。随着对高熵合金研究的深入, 高熵合金的应用会越来越广, 对各行各业的影响也会越来越大。

### 参考文献:

- [1] 阳隽飏, 周云军, 张勇, 等. 多组元高熵合金的研究现状及前景展望[J]. 中国材料科技与设备, 2007, 4(6): 16.
- [2] Yeh J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299.
- [3] Cantor B, CHANG I T H, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375/377(1): 213.
- [4] 李忠丽, 孙宏飞, 高鹏, 等. 新型多主元高熵合金的研究进展[J]. 新技术新工艺, 2010(8): 62.
- [5] ZHANG Y, ZHOU Y J. Solid solution formation criteria for high entropy alloys[J]. Materials Science Forum, 2007, 561/565: 1337.
- [6] 叶钧蔚, 陈瑞凯. 高熵合金[J]. 科学发展, 2004, 377(5): 16.
- [7] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Progress in Materials Science, 2014, 61(8): 1.
- [8] 张勇. 非晶和高熵合金[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] 郭卫凡. 多主元高熵合金的研究进展[J]. 金属功能材料, 2009, 16(1): 49.
- [10] 张华. 高熵合金的高温氧化与高温腐蚀[D]. 福州: 福州大学, 2013.
- [11] 尹可心, 武保林, 王大鹏, 等. 高熵合金  $\text{Al}_7\text{Mg}_{16}\text{Cu}_{12}\text{Zn}_7\text{Ti}_{12}$  的制备与组织结构分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(3): 25.
- [12] 孙昭媛. 高熵合金的制备及其组织和力学性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [13] 张恒, 张邦维, 吴力军. 机械合金化致二元过渡金属非晶态合金形成规律的探讨[J]. 物理学报, 1994, 43(10): 1638.
- [14] 方思聪. 机械合金化  $\text{AlCoFeNiCu}$  系高熵合金组织与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [15] 袁尹明月, 彭坤, 王海鹏. 机械合金化方法制备  $\text{Al}_1\text{CoCr-Cu}_{0.5}\text{FeNi}$  高熵合金组织结构和性能研究[J]. 材料导报, 2016, 30(8): 69.
- [16] 许世红, 邱建平, 常国华. 机械合金化和热处理对高熵合金  $\text{MgTiVCrNi}$  微观组织演化和相结构的影响[J]. 甘肃高师学报, 2015, 20(2): 44.
- [17] 沈元勋, 肖志瑜, 温利平, 等. 粉末冶金高速压制技术的原理、特点及其研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2006, 16(3): 19.
- [18] GUAN Hongyan, ZHANG Yunpeng, FAN Yuhu, et al. Microstructure and properties of sintered  $\text{AlNiCrFeCuMo}_x$  alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 532.
- [19] 赵瑞锋, 李红菊, 任波, 等. 粉末冶金制备  $\text{AlCrMnMoNiZr}(\text{B}_{0.1})$  合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(3): 288.
- [20] 邵霞, 张云鹏, 周航. 粉末冶金制备  $\text{AlCrFeNi}_x\text{CoCuTi}$  高熵合金的组织及性能研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(3): 283.
- [21] 李国英. 材料及其制品表面加工新技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- [22] 邹朋津, 董刚, 姚建华. 激光熔覆制备  $\text{CrNiAlCoMoB}_x$  系高熵合金涂层的组织与性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(1): 1.
- [23] 安旭龙. 激光熔覆制备  $\text{Ti}_x\text{FeCoCrWSi}$  高熵合金组织与性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

## • 行业动态 •

## 粉末冶金产业技术创新战略联盟二届三次理事会扩大会议在京召开

2017年9月22日,粉末冶金产业技术创新战略联盟第二届第三次理事会扩大会议在北京顺利召开。会议由粉末冶金产业技术创新战略联盟(以下简称“联盟”)理事长才让主持,联盟98家理事单位(含新加入的11家)百余名代表,共聚一堂商议行业发展大事。

才让理事长首先对在座的各位理事及专家表示热烈欢迎,并作了简短致辞。接着,韩伟秘书长汇报了联盟2017年上半年的工作总结、下半年的工作计划以及成立联盟标准化工作委员会的提案。韩伟秘书长介绍到,联盟自2010年成立以来,在相关领导和广大理事单位的支持和帮助下,组织行业广大企、事业单位积极开展技术创新、海内外学术研讨、技术交流、展览展示,在组织策划和承担实施国家重大科技计划项目、推动联盟内外合作与交流以及联盟自身建设方面开展了一系列具有创造性的工作,取得了显著运行成效,在海内外粉末冶金产业领域形成了一定的品牌影响力。2017年,联盟通过不断加强组织建设、整合创新资源、促进产学研紧密合作、开展两岸和国际合作、积极促进成果转化以及推进 World PM2018 筹备工作等,继续发挥桥梁纽带和创新服务平台的作用,有力推动了中国粉末冶金行业的发展。

王莹副秘书长代表秘书处提请第二届第三次理事会增补11家单位为联盟理事单位,并详细介绍了这11家单位的基本情况。随后,韩伟秘书长汇报了关于联盟拟新聘任的专家委员会顾问人选情况。

联盟理事会经过讨论,集体表决,一致通过了《增补后的专家委员会顾问》、《关于联盟增补理事单位建议》以及《成立粉末冶金产业技术创新战略联盟标准化工作委员会的提案》。随后,才让理事长为正、副秘书长,联盟专家委员会副主任及顾问颁发了聘书。

最后联盟秘书处详细汇报了将于2018年9月16—20日在北京主办的 World PM2018 世界粉末冶金大会的筹备工作情况,包括赞助落实情况、场地情况;组织委员会、国际联络委员会和技术委员会的人员分工及职责;大会秘书处分工、具体工作安排(时间轴);大会特邀报告、特殊兴趣分会建议、各分会场及负责人;论文集出版情况、会议的奖项设置、会议日程安排;下一步的工作重点等等。现场各位与会代表热烈讨论,献言献策并踊跃表示在人力物力等方面支持大会的筹备。大家一致认为每一届世界粉末冶金大会都是一次世界性的盛会,对于中国粉末冶金行业来说,World PM2018 更将是一次实现质的飞跃的契机,大家都将积极筹备、共同迎接 World PM2018 的到来。

才让理事长发表总结讲话,他指出 World PM2018 是中国粉末冶金行业一次前所未有的盛会,办好这次会不仅能体现大国形象,体现行业进步,同时也能把全球的技术、装备、上下游吸引来,这将是联盟下一步工作的重中之重,希望大家进一步明确责任细节,齐心协力共同办好这次盛会。

当天下午,联盟召开了 World PM2018 世界粉末冶金大会第9次筹备工作会(技术),由筹备工作组全体成员及大会15个分领域负责专家出席参加。会议就各分领域的论文组织、征集、邀请报告、审稿筛选等事宜进行了讨论。

(粉末冶金产业技术创新战略联盟秘书处)

- [24] 李栋梁,周芳,余师豪.激光熔覆 FeCoNiMnMo<sub>x</sub>B<sub>0.5</sub> 高熵合金涂层组织与耐蚀性能[J]. 强激光与粒子束,2016,28(2): 1.
- [25] 温立哲,黄元盛.激光熔覆 AlCoCrCu<sub>0.3</sub>FeMoNiTi 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 粉末冶金技术,2016,34(4): 268.
- [26] 杨防祖,姚士冰,周绍民.电化学沉积研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版,2001,40(2): 418.
- [27] 童叶翔. 含稀土的纳米有序非晶高熵合金的电化学制备及磁性研究[C]// 中国材料研讨会论文集. 北京: 2011.
- [28] 姚陈忠,马会宣,童叶翔. 非晶纳米高熵合金薄膜 Nd-Fe-Co-Ni-Mn 的电化学制备及磁学性能[J]. 应用化学,2011,28(10): 1189.

- [29] 王腾,孔见,巢昂轩.微波辅助燃烧合成 FeCoNiCuAl 高熵合金的组织与性能[J]. 粉末冶金技术,2011,29(6): 435.
- [30] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132(2/3): 233.
- [31] Khrushchovand M M, Babichev M A. Friction and wear in machinery[J]. ASME, 1956, 11(9): 36.
- [32] 高家诚,李锐.高熵合金研究的新进展[J]. 功能材料,2008,39(7): 52.
- [33] 李文虎,艾桃桃.多主元高熵合金成相研究进展[J]. 粉末冶金工业,2016,26(1): 64.