

机械合金化-热压制备 Nb/NbCr₂ 复合材料的组织与性能

肖璇^{1,2}, 鲁世强², 马燕青², 胡平², 黄铭刚², 聂小武²

(1. 南京航空航天大学 机电工程学院, 南京 210016;

2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘要: 采用机械合金化与热压工艺制备以 Nb 固溶体为软第二相的 Laves 相 Nb/NbCr₂ 复合材料。研究不同成分的 Nb、Cr 元素粉经 20 h 球磨后在 1 250 °C, 0.5 h 热压工艺下所获得的 Nb/NbCr₂ 复合材料的组织和性能。结果表明: 随着偏离 Laves 相化学配比的 Nb 含量的增大, 材料的致密度、抗压强度、塑性应变均增加, 而维氏硬度减小。Laves 相含量为 29% 的 Cr-77.5Nb 合金的组织均匀, Nb 固溶体与 Laves 相间隔分布, 晶粒尺寸达到亚微米级, 屈服强度为 2 790 MPa, 抗压强度为 3 174 MPa, 塑性应变达到 5.44%, 充分实现了细晶和软第二相综合增韧的效果。

关键词: Nb/NbCr₂ 复合材料; 机械合金化; 热压; Laves 相; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 132.3; TG 146.4

文献标识码: A

Microstructure and properties of Nb/NbCr₂ composites prepared by mechanical alloying followed by hot pressing

XIAO Xuan^{1,2}, LU Shi-qiang², MA Yan-qing², HU Ping², HUANG Ming-gang², NIE Xiao-wu²

(1. College of Electromechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautical and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The Nb/NbCr₂ composite materials with the soft second phase were prepared by mechanical alloying and hot pressing. The microstructure and mechanical properties were investigated on the Nb/NbCr₂ composite materials prepared from 20 h mechanically alloyed powders of elemental chromium and niobium powders by hot pressing at 1 250 °C for 0.5 h. The results indicate that with increasing Nb content of off-stoichiometry Laves phase, the alloys have higher relative density, compressive strength and strain, but have smaller Vickers hardness. The Cr-77.5Nb alloy with homogeneous microstructure and sub-micron-sized grains is obtained by hot pressing at 1 250 °C for 0.5 h. Furthermore, the alloy with the content of 29% Laves phase has a yield strength of 2 790 MPa, compressive strength 3 174 MPa and strain 5.44%. The effect of fine grain toughening and soft second phase toughening is fully realized.

Key words: Nb/NbCr₂ composite; mechanical alloying; hot pressing; Laves phase; microstructure; mechanical properties

航空发动机用镍基高温合金结构材料的使用温度已达到其熔点的 0.8~0.9 倍, 继续提高其使用温度的空间已很小^[1]。因此, 欲通过提高发动机的工作温度来增大其推重比就必须开发能耐受更高温度的新型结构材料。具有拓扑密排结构的 Laves 相金属间化合物

NbCr₂ 具有超过常规高温合金的使用温度, 以其高熔点(1 770 °C)、低密度(7.7 g/cm³)、高温下优良的蠕变抗力^[2-3]和潜在的抗腐蚀和抗氧化性能^[4-5], 成为航空发动机用候选结构材料之一, 近年来成为国际上的研究热点^[1-6]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474009); 航空科学基金资助项目(05G56003); 江西省自然科学基金资助项目(0350045); 江西省材料科学与工程研究中心基金资助项目(ZX200401001)

收稿日期: 2007-01-23; **修订日期:** 2007-09-20

通讯作者: 鲁世强, 教授, 博士; 电话: 0791-3863013; E-mail: x56781234@126.com

正如大多数金属间化合物一样, 单相 Laves 相 NbCr_2 尽管具有优异的高温性能, 但其室温脆性很大, 且为本征脆性, 其室温维氏硬度在 9.3~10.1 GPa 之间, 断裂韧度为 $1.0\sim 1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ [7~8]。一种保留 Laves 相高温性能而又能改善室温脆性的方法就是原位生成由良好的韧性相和高强而稳定的 Laves 相组成的复合材料, 这种采用外禀的增韧方法可能比那些改善 Laves 相 NbCr_2 内禀韧性的方法更有效[8]。Chan[9]对 Nb/NbCr₂ 复合材料的断裂研究表明, 断裂表面主要表现为解理断裂, 没有观察到裂纹尖端钝化或裂纹桥接现象。定向凝固制备的 Cr-50Nb 合金的室温断裂韧度仅为 $3.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。Davidson 等[10]采用熔铸工艺制备的 Laves 相体积分数为 45% 的两相 Nb/NbCr₂ 合金的断裂韧度相比于单相合金大约提高 4 倍, 达到 $5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 但室温脆性的改善仍不明显。因此, 除通过引入软第二相这种外禀的方法达到增塑增韧的目的外, 还要探索更加有效改善其组织和性能的新的制备工艺方法。

鲁世强等[11]研究了机械合金化(MA)对 Laves 相 NbCr_2 固相热反应合成的影响效果, 证明了 MA 不仅可以获得具有微/纳米晶结构的球磨粉, 而且可以使 NbCr_2 的固相反应温度从原始粉的 1 200 °C 降低到 MA 粉的 900 °C。这为采用 MA 和热压技术制备具有高强高韧的细晶 Nb/NbCr₂ 两相合金奠定了基础。选择 Nb 固溶体作为韧化相的原因是由于其在室温下的韧性比 Cr 固溶体好[12]。

本文作者采用 MA 和热压技术制备了 Nb/NbCr₂ 复合材料, 并对 MA 和热压过程中的相转变以及复合材料的显微组织、致密度、维氏硬度、室温压缩强度和应变进行了测试和分析, 获得了 Laves 相含量较多的具有良好组织与性能的复合材料成分和制备工艺。

1 实验

实验原料为纯度大于 99%(质量分数)Cr 粉($<165 \mu\text{m}$)和 Nb 粉($<165 \mu\text{m}$), 按 Nb 含量(摩尔分数)为 33%、50%、65%、75%、77.5%、80%配料。各组分对应的 Laves 相 NbCr_2 的含量(体积比)分别约为 100%、71%、46%、32%、29%、25%。MA 在 QM-ISP2-CL 型行星式高能球磨机上进行。球磨罐容积为 500 mL, 材质为不锈钢, 球料质量比为 13:1, 转速为 400 r/min, 球磨介质为不锈钢圆球。将称量后的粉末混合均匀后与球磨介质装入球磨罐中并密封, 抽真空后充入高纯氩气, 再抽真空, 反复三次, 使球磨

罐处于真空状态, 以防止粉末在球磨过程中被氧化。根据文献[11]的研究结果, 球磨时间定为 20 h。

热压在真空热压炉中进行, 采用单向压制, 压力为 45 MPa。根据文献[13~14]的研究结果, 热压温度和保压时间分别定为 1 250 °C 和 0.5 h。保压结束后炉冷时, 为防止热压试样高温下氧化, 200 °C 以下再关闭真空系统。

用排水法测量试样密度并计算致密度。在 HV-10 型小型维氏硬度计上测定维氏硬度(载荷 10 N), 取 5 个测试点的平均值。采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对合金进行物相分析; 用 QUANTA200 型扫描电子显微镜对显微组织进行观察; 采用 INCA 能谱仪对复合材料成分进行分析; 显微组织的透射电镜观察在日立 H800 型电镜上进行, 加速电压为 175 kV; 室温压缩实验在 WDW-100 型电子式万能材料试验机上进行。

2 实验结果

2.1 XRD 结果

图 1 所示为化学配比为 Cr-33Nb 混合粉在球磨 0、10 和 20 h 后球磨粉及经 1 250 °C、0.5 h 热压后试样的 X 射线衍射谱。从图 1 可以看出, 原始 Nb 和 Cr 元素粉的衍射峰尖锐(图 1(a)), 但在球磨过程中衍射峰开始宽化, 强度也显著下降, 同时衍射峰有少许向低角度偏移(图 1(b))。经球磨 20 h 后, 只存在 Nb 和 Cr 的最强衍射峰, 同时衍射峰进一步宽化, 而其它衍射峰基本消失(图 1(c))。衍射峰向低角度方向偏移说明点阵常数在增加, 即 Nb、Cr 原子相互扩散, 形成了 Nb(Cr) 和 Cr(Nb) 的非平衡过饱和固溶体。衍射峰的宽化说明 MA 细化了球磨粉的晶粒, 增加了点阵应变。MA 20 h 的试样中没有出现 Laves 相 NbCr_2 的衍射峰, 说明 Laves 相 NbCr_2 在 MA 过程中未能合成。XRD 结果由 TOPS P 软件分析检测出混合粉 MA 20 h 后 Nb 的晶粒尺寸为 21.8 nm, Cr 的晶粒尺寸为 11.1 nm。从图 1(d) 可以看出, 经 MA 20 h 处理的 Cr-33Nb 粉经 1 250 °C、0.5 h 热压后, 其衍射谱中第一、二、三强峰皆为 Laves 相的衍射峰, 衍射谱中 Nb、Cr 的最强衍射峰基本消失。这说明热压过程中通过固相合成反应生成了 Laves 相 NbCr_2 且反应进行得较充分。

以上结果表明, Nb、Cr 元素粉末经 20 h 高能球磨活化后, 虽然没有合成出 Laves 相 NbCr_2 , 但形成了非平衡的过饱和固溶体, 粉末产生了严重的晶格畸变、高密度的晶体缺陷, 以及晶粒细化到纳米级, 粉

末颗粒表面及晶界上的原子排列紊乱等^[11, 15]。所有这些结构变化都有利于在随后的热压反应中缩短原子的扩散距离, 增加原子的扩散通道, 提高原子的扩散速度, 从而使 MA 粉产生活化反应的作用, 使 Laves 相 NbCr₂ 的合成易于进行, 同时还避免了 Nb、Cr 元素粉直接混合进行热压烧结时因 Nb、Cr 的扩散能力较差导致无法制备较高致密度试样的缺点^[16-17]。

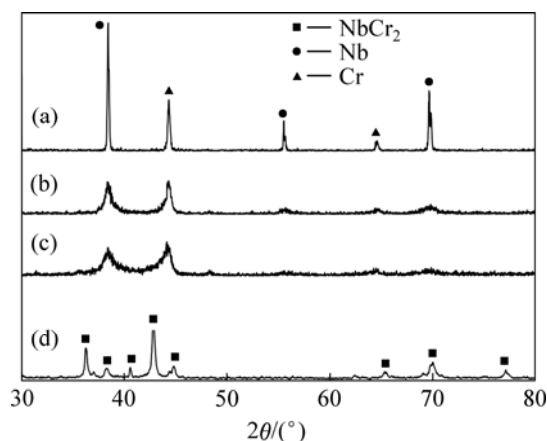


图 1 化学配比的 Nb-Cr 混合粉在不同 MA 时间及热压后的 X 射线衍射谱

Fig.1 XRD patterns of original Nb-Cr elemental powders(a), MA 10 h(b), MA 20 h(c) and samples hot-pressed at 1 250 °C for 0.5 h(d)

2.2 致密度

图 2 所示为经 1 250 °C, 0.5 h 热压试样的致密度与 Nb 含量的关系。从图 2 可以看出, 随着成分接近 Laves 相 NbCr₂ 的化学配比, 试样的致密度逐步降低。Cr-80Nb 压坯的致密度最大, 达到 99.8%, 几乎完全致密, 即使是化学配比成分为 Cr-33Nb 试样的致密度也高达 97.1%。这说明在 1 250 °C, 0.5 h 的热压工艺下能够制备出高致密度的含 Laves 相的 Nb/NbCr₂ 复合材料。

Ohta 等^[18]采用机械研磨化学配比成分的 Cr-33.3Nb 的铸锭制粉, 在 50 MPa 和 1 500 °C, 2 h 的热压工艺下才制备出较高致密度的粉末冶金试样。图 2 表明不同配比成分的 Nb、Cr 元素粉经 MA 20 h 后, 在 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压工艺下都制备出高致密度的含 Laves 相的 Nb/NbCr₂ 复合材料, 热压温度和时间大大降低, 显然这与机械活化作用的贡献有关。图 2 表明, 随 Nb 含量由 80%降低到化学配比成分的 33% 时, 试样的致密度逐渐减小。这是因为随 Nb 含量的降低, 热压时合成的 Laves 相 NbCr₂ 逐渐增多, 而拓扑密排结构的 Laves 相 NbCr₂ 原子空间占有率高, 原

子在 Laves 相中难于扩散, 降低了材料的烧结性。另外, 试样的致密化过程还与材料的屈服强度有关, 在相同的热压工艺下硬脆的 Laves 相含量较多的复合材料的致密化过程较慢, 进而导致 Laves 相含量较高试样的致密度略微降低。

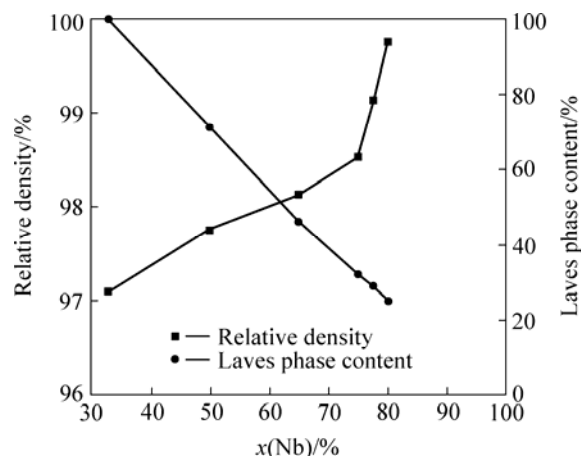


图 2 Nb 含量对 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压试样致密度的影响

Fig.2 Effects of Nb content on relative density of samples hot pressed at 1 250 °C for 0.5 h

2.3 室温力学性能

图 3 所示为 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压试样的维氏硬度与 Nb 含量的关系。从图 3 可以看出, 化学配比成分的 Cr-33Nb 试样的维氏硬度最大, 达到 9.8 GPa, 不同成分的 Nb/NbCr₂ 复合材料的硬度随 Nb 含量的增多而逐渐减小, 但即使是 Laves 相含量最少的 Cr-80Nb 试样的维氏硬度仍然高达 7.9 GPa。

表 1 为 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压试样的屈服强度、抗压强度和塑性应变与 Nb 含量的关系。从表 1 可以看出, 随着试样成分接近 Laves 相 NbCr₂ 的化学配比, 材料的抗压强度逐渐下降, 塑性变形量减小, Cr-77.5Nb 是复合材料具有塑性变形的临界点。单相 Cr-33Nb 没有产生塑性变形就已破碎, 其抗压强度仍高达 1 891 MPa。Cr-80Nb 的抗压强度不仅达到 3 481 MPa, 其塑性应变还达到 10.32%, 在这 6 种成分合金中塑性最好。Cr-77.5Nb(Laves 相含量 29%)是具有塑性应变且 Laves 相含量较多的 Nb/NbCr₂ 复合材料, 其屈服强度为 2 790 MPa, 抗压强度为 3 174 MPa, 塑性应变达到 5.44%。因此, 采用 MA+热压工艺制备的 Nb/NbCr₂ 复合材料具有相当高的室温强度, 且在 Nb 含量超过 77.5%时具有较大的塑性应变。

图 3 和表 1 反映出随 Nb 含量由化学配比成分的 33%提高到 80%, 经 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压后试

样的维氏硬度逐渐减小。这是由于随 Nb 含量增加, 复合材料中的 Laves 相 NbCr_2 脆性相的数量减少所致。而屈服强度、抗压强度和应变逐渐增大, 这可能与试样的致密度相关。因为随 Nb 含量提高, 试样致密度增大, 孔隙的减少增强了试样的有效承载断面且使应力分布均匀一致, 从而导致强度逐渐增大。

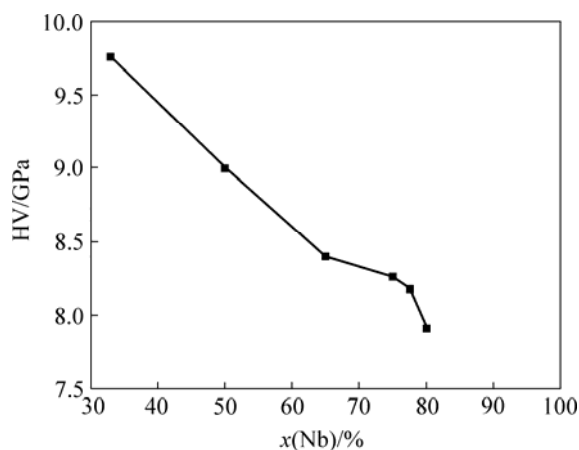


图 3 Nb 含量对 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压试样维氏硬度的影响

Fig.3 Effect of Nb content on Vickers hardness of samples hot pressed at 1 250 °C for 0.5 h

表 1 1250 °C, 0.5 h 条件下热压试样的室温屈服强度、抗压强度与塑性应变

Table 1 Room temperature yield strength, ultimate strength and strains of samples hot pressed at 1 250 °C for 0.5 h

Composition	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Strain/%
Cr-33Nb	—	1 891	0
Cr-50Nb	—	2 218	0
Cr-65Nb	—	2 414	0
Cr-75Nb	—	2 473	0
Cr-77.5Nb	2 790	3 174	5.44
Cr-80Nb	3 065	3 481	10.32

2.4 微观组织

图 4 所示为经 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压后 Cr-77.5Nb 试样的光学显微照片、SEM 二次电子像和 TEM 明场像。从图 4 可以看出, Cr-77.5Nb 试样几乎看不到空隙, 接近全致密, 并且组织细小, 分布均匀, Laves 相和软第二相间隔分布。其它热压不同成分的试样显微组织与该试样的显微组织类似。能谱分析表明图 4(b)中 A 处凸起的灰亮块为 Nb 固溶体, B 处凹坑黑区为 Laves 相 NbCr_2 。从图 4(c)的 TEM 明场像中

可以看出, 最小晶粒尺寸约为 160 nm, 用划线法测得平均晶粒尺寸约为 268 nm, 晶粒已十分细小。

具有均匀细小的显微组织是合金获得良好室温强度和塑性综合性能的前提。首先, 均匀细小的晶粒改善了变形过程中产生的应力分布, 较容易满足多晶体的 Von Mises 塑性变形条件, 在改善材料塑性的同时提高了强度^[19]。其次, 细小的晶粒可有效地使裂纹分叉和转向, 与 Laves 相间隔分布的具有较好塑性的 Nb 固溶体抑制了裂纹扩展, 吸收了断裂前的变形能, 相较于单相 Laves 相 NbCr_2 提高了试样的室温塑性。另外, 细晶组织产生了高密度的晶界, 而在晶界区域合金元素的扩散系数较大, 存在着大量的短程快捷扩散路径, 这些快捷扩散过程使得变形过程中一些初发

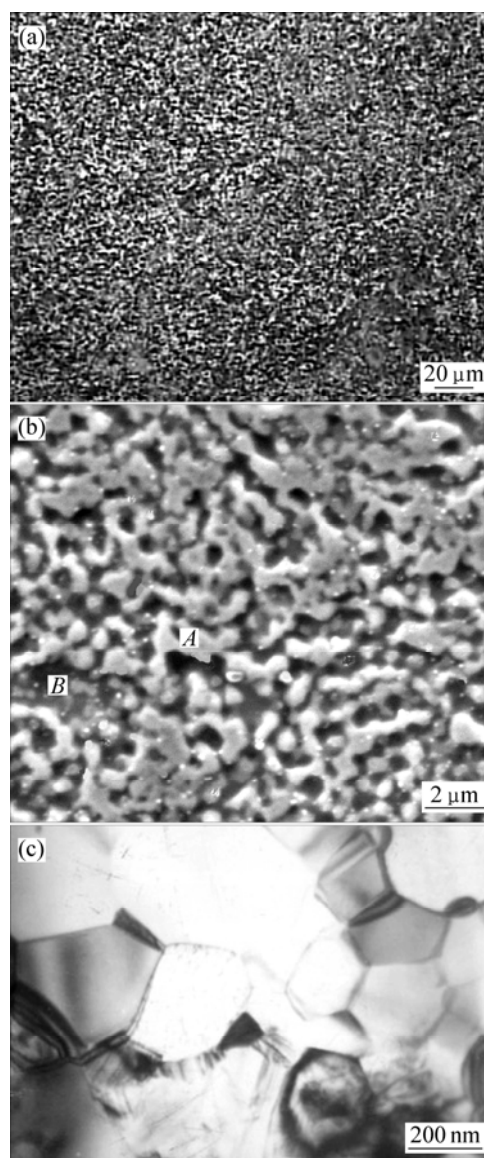


图 4 Cr-77.5Nb 热压试样的显微组织

Fig.4 Microstructures of Cr-77.5Nb sample hot pressed at 1 250 °C for 0.5 h: (a) OM; (b) SEM; (c) TEM

的微裂纹能够迅速弥合, 从而在一定程度上避免了脆性裂纹的形成和扩展, 这对细晶增韧也产生了贡献作用^[16]。这些因素导致了机械合金化+热压工艺制备的 Nb/NbCr₂ 复合材料不仅具有相当高的室温强度, 而且 Nb 含量超过 77.5% 的 Nb/NbCr₂ 复合材料还具有较大的塑性应变。因此, 采用机械合金化+热压技术来制备含 Laves 相的 Nb/NbCr₂ 复合材料可较好地改善合金的室温脆性。

Laves 相 NbCr₂ 具有非常的高温强度和良好的高温抗蠕变及抗氧化性能^[7, 20]。因此, 在保证合金具有一定的塑韧性前提下, Nb/NbCr₂ 复合材料中的 Laves 相含量越多, 越有利于发挥 NbCr₂ 优异的高温性能。6 种不同成分的合金在此工艺热压后均得到高致密度且室温强度相当高的 Nb/NbCr₂ 复合材料, 其中成分为 Cr-77.5Nb 的试样是 Nb/NbCr₂ 复合材料具有塑性应变的临界点, 该试样的致密度达到了 98.3%, 屈服强度和抗压强度分别达到了 2 790 MPa 和 3 174 MPa, 塑性应变为 5.44%, 充分实现了细晶和软第二相 Nb 固溶体综合增韧的效果。

3 结论

1) Nb、Cr 元素粉末在 20 h 的机械合金化过程中未能合成出 Laves 相 NbCr₂, 而在随后的 1 250 °C, 0.5 h 条件下热压过程中, 通过固相热反应合成出了 NbCr₂ 金属间化合物。

2) 试样的致密度随 Nb 含量增加而逐渐提高, 由化学配比成分的 Cr-33Nb 的 97.1% 提高到 Cr-80Nb 的 99.8%, 几乎接近全致密。

3) 随着试样成分接近 Laves 相 NbCr₂ 的化学配比, 材料的抗压强度和屈服强度逐渐下降, 塑性变形量逐渐减小。Cr-77.5Nb 成分是 6 种 Nb/NbCr₂ 复合材料中具有塑性应变的临界点。

4) Cr-77.5Nb 试样的平均晶粒尺寸约为 268 nm, 且组织细小均匀, Laves 相和软第二相间隔分布。其屈服强度为 2 790 MPa, 抗压强度为 3 174 MPa, 塑性应变达到了 5.44%, 实现了细晶和软第二相综合增韧的效果。

REFERENCES

[1] Chan K S, Davidson D L. The fracture resistance and crack-tip micromechanics of in-situ intermetallic composites[J]. JOM, 1996(9): 62-67.

[2] Takeyama M, Liu C T. Microstructure and mechanical properties of Laves-phase alloys based on Cr₂Nb[J]. Mater Sci Eng A, 1991, 132: 61-66.

[3] Thoma D J, Nibur K A, Chen K C, Cooley J C, Dauelsberg L B, Hults W L, Kotula P G. The effect of alloying on the properties of (Nb,Ti)Cr₂ C15 Laves phases[J]. Mater Sci Eng A, 2002, 329/331: 408-415.

[4] 鲁世强, 黄伯云, 贺跃辉, 邓意达, 何双珍. Laves 相合金的物理冶金特性[J]. 材料导报, 2003, 17(1): 11-13.

LU Shi-qiang, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, DENG Yi-da, HE Shuang-zhen. Physical metallurgy of Laves phase alloys[J]. Materials Review, 2003, 17(1): 11-13.

[5] Takasugi T, Hanada S, Yoshida M. High temperature mechanical properties of C15 Laves phase Cr₂Nb intermetallics[J]. Mater Sci Eng A, 1995, 192/193: 805-810.

[6] Yoshida M, Takasugi T. TEM observation for deformation microstructures of two C15 NbCr₂ intermetallic compounds[J]. Intermetallics, 2002, 10: 85-93.

[7] 鲁世强, 黄伯云, 贺跃辉, 何双珍, 邓意达. Laves 相的力学性能[J]. 材料工程, 2003(5): 43-47.

LU Shi-qiang, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, HE Shuang-zhen, DENG Yi-da. Mechanical properties of Laves phase alloys[J]. Materials Engineering, 2003(5): 43-47.

[8] Liu C T, Zhu J H, Brady M P, McKamey C G, Pike L M. Physical metallurgy and mechanical properties of transition-metal Laves phase alloys[J]. Intermetallics, 2000, 8: 1119-1129.

[9] Chan K S. The fracture toughness of niobium-based in situ composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27: 2518-2531.

[10] Davidson D L, Chan K S, Anton D L. The effects on fracture toughness of ductile-phase composition and morphology in Nb-Cr-Ti and Nb-Si in-situ composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27: 3007-3018.

[11] 鲁世强, 黄伯云, 贺跃辉. 机械合金化对 Laves 相 Cr₂Nb 固相热反应合成的影响[J]. 航空学报, 2003, 24(6): 568-571.

LU Shi-qiang, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui. Effect of mechanical alloying on synthesizing of Laves phase Cr₂Nb by solid phase thermal reaction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(6): 568-571.

[12] Liu C T, Tortorelli P F, Horton J A, Carmichael C A. Effects of alloy additions on the microstructure and properties of Cr-Cr₂Nb alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1996, 214: 23-32.

[13] 鲁世强, 肖 璇, 李 鑫, 董显娟, 王克鲁, 贺跃辉. 低温退火温度对 Laves 相 Cr₂Nb 固相热反应合成的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10): 1535-1538.

LU Shi-qiang, XIAO Xuan, LI Xin, DONG Xian-juan, WANG Ke-lu, HE Yue-hui. Effects of low annealing temperature on Laves phase Cr₂Nb synthesized by thermal solid phase reaction[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(10): 1535-1538.

- 1535-1538.
- [14] 肖 璇, 鲁世强, 马燕青, 晏建武, 胡 平. 机械合金化+热压制备 Laves 相 NbCr_2 合金及其组织性能研究[J]. 航空材料学报, 2007, 27(5): 7-11.
- XIAO Xuan, LU Shi-qiang, MA Yan-qing, YAN Jian-wu, HU Ping. Investigation on microstructures and properties of NbCr_2 Laves phase alloys prepared by mechanical alloying followed by hot pressing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(5): 7-11.
- [15] Suryanayana C. Mechanical alloying[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 1-184.
- [16] 尹衍升, 李 嘉, 谭训彦, 张金升. 机械合金化-加压烧结制备 Fe_3Al 金属间化合物[J]. 粉末冶金技术, 2004, 22(3): 151-155.
- YIN Yan-sheng, LI Jia, TAN Xun-yan, ZHANG Jin-sheng. Synthesis of Fe_3Al intermetallics by mechanical alloying and pressing sintering[J]. Powder Metallurgy Technology, 2004, 22(3): 151-155.
- [17] 鲁世强, 肖 璇, 李 鑫, 郑海忠, 董显娟, 王克鲁. 低温退火时间对 Laves 相 Cr_2Nb 固相热反应合成的影响[J]. 粉末冶金技术, 2006, 24(5): 359-363.
- LU Shi-qiang, XIAO Xuan, LI Xin, ZHENG Hai-zhong, DONG Xian-juan, WANG Ke-lu. Effects of annealing times at low temperature on Laves phase Cr_2Nb synthesized by thermal solid phase reaction[J]. Powder Metallurgy Technology, 2006, 24(5): 359-363.
- [18] Ohta T, Nakagawa Y, Kaneno Y, Inoue H, Takasugi T. Microstructures and mechanical properties of NbCr_2 and ZrCr_2 Laves phase alloys prepared by powder metallurgy[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38: 657-665.
- [19] 何玉定, 曲选辉, 黄伯云. 机械活化热压合成 Laves 相 TiCr_2 及其力学性能的研究[J]. 稀有金属, 2003, 27(2): 303-306.
- HE Yu-ding, QU Xuan-hui, HUANG Bai-yun. Mechanical property of Laves phase TiCr_2 synthesized by mechanically activating and hot pressing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(2): 303-306.
- [20] Kellou A, Grosdidier T, Coddet C, Aourag H. Theoretical study of structural, electronic, and thermal properties of $\text{Cr}_2(\text{Zr}, \text{Nb})$ Laves alloys[J]. Acta Materialia, 2005, 53: 1459-1466.

(编辑 袁赛前)