文章编号: 1004-0609(2008)04-0614-06

铁基非晶合金的形成能力与力学性能

邱克强,塔 娜,索忠源,任英磊

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110023)

摘 要: 采用工业用原材料在铜模铸造条件下研究 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂M_x(M 为 Ni 和 Nb; *x*=0, 1, 2, 3)合金的非晶形成能力与力学性能。TEM 和 XRD 分析表明: 当 M 为 Nb 和 *x*=2 时,可获得直径为 7 mm 的块体非晶合金,而 *x*=0 合金形成非晶的直径小于 5 mm。DSC 分析表明: Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Ni_x(*x*=0, 1, 2, 3)非晶合金过冷液相区的温度分别为 38.1、43.7、46.0 和 35.8 ℃;而 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb_x (*x*=1, 2, 3)非晶合金过冷液相区的温度分别为 44.4、47.1 和 34.4 ℃,过冷液相区的大小与合金非晶形成能力具有良好的对应关系。压缩实验表明: Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Ni_x(*x*=1, 2, 3)和 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb_x(*x*=1, 2)合金的压缩断裂强度分别为 2 997.9、2 881.9、2 850.7、3 645.7 和 3 018.9 MPa。而 *x*=0 合金的压缩断裂强度为 2 518.5 MPa。**关键词:** Fe 基非晶合金; Ni; Nb; 非晶形成能力;压缩断裂强度

中图分类号: TB 139 文献标识码: A

Glass forming ability and mechanical properties of Fe-based amorphous alloys

QIU Ke-qiang, TA Na, SUO Zhong-yuan, REN Ying-lei

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The glass-forming abilities of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2M_x$ (M are Ni and Nb; *x*=0, 1, 2, 3) alloys prepared by copper mold casting and the raw industrial materials were investigated by XRD, TEM and DSC. The results show that the bulk metallic glass (BMG) with diameter of 7 mm is fabricated for $Fe_{46}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_2$ alloy. The glass-forming ability is much improved comparing to the alloy with *x*=0. The temperatures of supercooled liquid regions of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_x$ (*x*=0, 1, 2, 3) amorphous alloys are 38.1, 43.7, 46.0 and 35.8 °C while the temperature of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_x$ (*x*=1, 2, 3) amorphous alloys are 44.4, 47.1 and 34.4 °C, respectively, which corresponds to the glass-forming ability of those alloys. The compressive strengths of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_x$ (*x*=1, 2, 3) and $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_x$ (*x*=1, 2) are 2 997.9, 2 881.9, 2 850.7, 3 645.7 and 3 018.9 MPa, respectively, the compressive strength of $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2$ alloy is 2 518.5 MPa.

Key words: Fe base metallic glass alloy; Ni; Nb; glass forming ability; compressive strength

铁基非晶合金不仅具有一般非晶合金所具有的特 点,且大部分 Fe 基非晶合金还具有优异的软磁性能, 在磁性材料中获得了广泛的应用^[1-2]。同时,最重要的 是自然界铁的资源丰富、制备非晶时要求真空度低等 特点使得材料成本和制备成本低,容易获得推广使用。 过去的 Fe 基非晶合金主要为 Fe-TM-B(TM 为其它过 渡族金属)合金体系^[3],由于受非晶形成能力限制,大 多数 Fe 基非晶合金只能制备成条带,同时研究工作也 主要集中在条带的软磁性方面。而块体 Fe 基非晶合金 的直径不超过 2 mm^[4]。直到 2002 年,才相继发现了

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20031026)

收稿日期: 2007-06-17; 修订日期: 2007-12-18

通讯作者: 邱克强, 教授, 博士; 电话: 024-25691315; E-mail: kqqiu@yahoo.com.cn

大体积的Fe基块体非晶合金,如Fe_{75-x-y}Cr_xMo_yC₁₅B₁₀^[5] 和 Fe₄₃Cr₁₆Mo₁₆(C, B, P)₂₅^[6]等非晶合金系。最近,一 种被称为非晶钢的非晶合金,即(Fe_{44.3}Cr₁₀Mo_{13.8}-Mn_{11.2}C_{15.8}B_{5.9})_{98.5}Y_{1.5}^[7]和 Fe₄₈Cr₁₅Mo₁₄- Er₂C₁₅B₆^[8]合金 也被开发出来,使Fe基块体合金的研究出现了高潮。 SHEN 等^[9]在此基础上将Fe基非晶合金尺寸提高到直 径为16 mm。但是由于这类非晶合金中含有大量的B 和 C,容易使非晶合金脆性增加。目前发现,这类无 磁性 Fe 基非晶合金在耐磨与耐蚀涂层材料上具有良 好的应用前景^[10],因此降低 Fe 基非晶合金的制备成 本及提高其强度具有重要意义。

通过添加适量合金元素手段,提高现有非晶合金 形成能力也是目前非晶合金研究的一个重要方面。较 为普遍的观点认为稀土类合金元素具有净化合金液的 作用,从而往往选择活性较大的稀土元素,因此近年 来,稀土元素对 Zr^[11]、Cu^[12]和 Ni^[13]等非晶合金作用 的研究增多。本文作者采用低纯度的普通工业用原材 料,添加稳定性高的元素,如 Ni 和 Nb 等,在普通机 械泵真空条件下制备了非晶合金,研究了 Fe 基非晶合 金的形成能力,并探讨这种合金的力学性能。

1 实验

成分为 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂M_x(M 为 Ni 和 Nb; x=0、1、2、3)(摩尔分数,%)的多组元母合金,在电 弧炉中氩气保护下熔炼而成。实验所使用的原材料分 别为:工业纯铁(纯度为 99.5%),电解镍(99.9%)、金 属铬(99.0%)、钼铁(39.329%Fe+59.85%Mo+ 0.06%C+ 其它)、硼铁(81.17%Fe+18.48%B+0.35%C+其它)、石 墨粉(99.8%),金属钇(99.0%)和铌条(99.5%)(质量分数) 等。为了保证合金成分的均匀,在电磁搅拌下将母合 金熔炼 3 次。将熔炼好的母合金需破碎后,采用感应 熔炼铜模喷铸法制备直径分别为 2、3、5 和 7 mm, 长度为 70 mm 的样品。

采用 Perkin-Elmer 型差示扫描量热仪(DSC)对直 径为 2 mm 的非晶合金样品进行热分析,升温速率为 10 °C/min。采用 MODEL55100 型万能试验机对直径 为 3 mm 的样品进行压缩实验,样品的高度与直径之 比为 2,应变速率为 10⁻⁴ mm/s。为了能比较准确地反 映合金的强度,每一种成分的合金至少进行 5 次压缩 实验。采用扫描电镜(SEM)和日本理学 RIGAKU D/max-Ra X-ray 衍射仪(12 kW, Cu K_a 辐射,波长 λ =1.540 5 nm)分别观察样品的断口形貌和相组成。为 了对非晶形成的临界尺寸进行验证,进行了透射电镜

(TEM)分析。

2 结果与讨论

Ni 和 Nb 对 Fe-Cr-Mo-C-B-Y 系合金非晶形成能 力的影响

图 1 和 2 所示分别为 $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2M_x$ (M 为 Ni 和 Nb; x=0, 1, 2, 3) 合金浇铸成直径为 3、5 和 7 mm 圆柱样品的 X 射线衍射谱。由图 1 可看出,浇 注直径为 5 mm 的样品时,对于 x 为 0 和 3 的铸态合 金,除在衍射角 2 θ 约为 43°位置存在非晶的漫散射峰 外,还叠加晶态相的衍射峰,这说明合金 $Fe_{48-x}Cr_{15}$ - $Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_x$ (x=0, 3)的最大制备直径小于 5 mm。 而当 x 为 1 和 2 时,直径为 5 mm 的样品中没有发现 与晶态相对应的衍射峰,这说明可以制备出直径为 5 mm 的非晶态合金;但当将样品直径提高到 7 mm 时, 发现 x=1 的铸态样品中出现了大量的晶态相衍射峰, 说明 x=1 时,不能形成直径为 7 mm 的圆柱样品;而 对于 x=2 的样品,在非晶漫散射峰的位置上出现了比 较弱的晶态相衍射峰,说明该合金的非晶形成能力接 近直径为 7 mm 的圆柱样品。

在 Nb 含量不同时,不同直径的 $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}$ -B₆Y₂Nb_x(x=1, 2, 3)合金的 XRD 曲线如图 2 所示。由 图 2 可看出,当 x=1 时,直径为 5 mm 的铸态合金出 现了少量的晶化相;而当 x=2 时,直径为 5 和 7 mm



图1 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Ni_x(*x*=0, 1, 2, 3)合金直径为5和7mm 试样的X射线衍射谱

Fig.1 XRD patterns of as-cast $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_x$ (*x*=0, 1, 2, 3) alloys with diameters of 5 and 7 mm: (a) *d*5 mm, *x*=3; (b) *d*5 mm, *x*=2; (c) *d*5 mm, *x*=1; (d) *d*5 mm, *x*=0; (e) *d*7 mm, *x*=2; (f) *d*7 mm, *x*=1



图 2 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb_x(x=1, 2, 3)合金直径为 3、5 和 7 mm 试样的 X 射线衍射谱

Fig.2 XRD patterns of as-cast $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_x$ (*x*=1, 2, 3) alloys with diameter of 3, 5 and 7 mm

样品的 XRD 曲线在测精度范围内都没发现晶态相衍 射峰。故合金 Fe₄₆Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₂ 的非晶形成能 力可以达到直径为 7 mm 的圆柱样品。图 3 所示为 *d* 7 mm 铸态样品的 TEM 形貌和对应的衍射花样。由 TEM 像和环状衍射花样可以判断,该合金由单一的非 晶相组成。

比较图 1 和 2 的结果可知, Fe₄₆Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆-Y₂Ni₂合金的非晶形成能力接近*d*7 mm的,而Fe₄₆Cr₁₅-Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₂可以形成直径大于 7 mm 的非晶合



图 3 直径为 7 mm 的 Fe₄₆Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₂ 非晶合金的 TEM 像

Fig.3 TEM image of as-cast $Fe_{46}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_2$ allow with diameter of 7 mm

金,相对于 *x*=0 合金非晶形成能力提高了 40%以上。 这说明当 *x*=2 时,Nb 提高合金非晶形成能力的效果优 于 Ni 的。对于含 Nb 的合金;当 *x*=3 时,即使浇铸的 样品直径只有 3 mm,也出现了明显的晶态相对应的 衍射峰(见图 2(a)),说明 Nb 含量的进一步提高,会引 起合金的非晶形成能力急剧降低。

由此可看出,Ni 和Nb 合金元素对原合金的非晶 形成能力具有很大的影响,在Nb 含量相差只有 1%(如 Nb 含量由 2% 提高到 3%)时,合金的非晶形成能力相 差超过 1 倍(从直径不小于 7 mm 的降低到小于 3 mm 的)。同时添加的合金元素的种类和含量变化所引起的 对合金非晶形成能力的影响也是不同的。以临界尺寸 *D*c表示合金的非晶形成能力如表 1 所列。

为了进一步分析元素 Ni 和 Nb 对 Fe-Cr-Mo-C-B-Y 系合金非晶形成能力的影响,图4和5所示分 别为直径为2 mm 的 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆ Y₂M_x (M 为 Ni 和 Nb; *x*=0, 1, 2, 3) 非晶合金在 10 ℃/min 的加 热速度下的 DSC 曲线。图中每个 DSC 曲线都出现了 熔化峰和两个晶化放热峰,都具有明显的玻璃转变和 晶化过程。合金的两个晶化放热峰中第一个放热峰的 强度较弱且温度较低,第二个放热峰的强度较高且温 度较高,它对应着剩余非晶相转变为晶态相的放热过 程。说明这几种非晶合金的晶化分两阶段完成。

根据图 4 和 5,上述 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂M_x (M 为 Ni 和 Nb; x=0, 1, 2, 3)等 7 种合金的部分热力学 参数(包括玻璃转变温度 θ_g 、晶化开始温度 θ_x 、熔化开 始温度 θ_m 、熔化结束温度 θ_1 和过冷液相区 $\Delta \theta_x$ 值)如表 1 所列。由表 1 可以看出,在合金 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅-B₆Y₂M_x (M 为 Ni 和 Nb; x=0, 1, 2, 3)中,随着 M (M 为



图 4 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Ni_x(x=0, 1, 2, 3)非晶合金直径为 2 mm 圆柱试样的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_x(x=0, 1, 2, 3)$ amorphous alloys with diameter of 2 mm

Exothermic

0

200

400



800

1 0 0 0

1 2 0 0

图 5 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb_x (*x*=1, 2, 3)非晶合金直径为 2 mm 圆柱试样的 DSC 曲线

600

Temperature/°C

Fig.5 DSC curves of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Nb_x$ (*x*=1, 2, 3) amorphous alloys with diameter of 2 mm

Ni 和 Nb)含量的增加(从 0 到 3%),合金的液相线温度 变化不大,而过冷液相区Δθ_x变化相对加大,当 *x*=2 时,加入 Ni 和 Nb 的两种非晶合金都出现了极大值, 这与这两类合金在 *x*=2 时具有最佳的非晶形成能力是 一致的。当合金元素 Nb 提高到 3%时,Δθ_x已经低于 原非晶合金的Δθ_x,相应地,其非晶形成能力也低于原 合金的非晶形成能力,这说明较大的过冷液相区对应 较大的非晶形成能力。

过冷液相区的宽度是衡量非晶合金非晶形成能力 的一个重要参数之一[14]。过冷液相区越宽,则过冷液 体能在较宽的温度区间内不发生结晶形核,它不仅对 应非晶合金在加热过程中稳定性好,不易发生结晶形 核。同时也表明合金在凝固过程中,熔体的粘度随温 度变化的波动小,凝固界面稳定,特别是对于易析出 晶态相的稳定性增强,使液态金属更容易进入深过冷 状态,即合金的非晶形成能力提高,因此较高的 $\Delta \theta_{x}^{[15]}$ 对应较大的非晶形成能力。合金元素的添加,如果能 使不同团簇之间的化学势相近,优先析出的晶态相也 就不存在了。相对于原合金,可以认为合金元素改变 了晶态相的稳定性,因此,晶态相析出的迟钝或稳定 化被认为是提高合金非晶形成能力的重要方法,相当 于非晶转变的 TTT 曲线向右移动^[16-17]。值得指出的 是,目前还没有统一的判定标准来说明合金的非晶形 成能力,所有的解释都是根据具体实验结果而做出的, 这说明影响合金的非晶形成能力的因素是复杂的。

杨元政等^[18]在 Cu 基非晶合金中通过添加 Mo 提 高了合金的非晶形成能力,而 Nb 在不同成分的 Cu 基 非晶合金中具有不同的影响,说明不同合金成分,添 加元素对析出相的稳定性影响是不同的。本研究同样 证明 Nb 在 Fe 基非晶合金中的作用也是随成分的不同 而不同。

表 1 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂M_x(M 为 Ni 和 Nb; *x*=0, 1, 2, 3)非晶合金临界尺寸(*D*_c)及试样的部分热力学参数

Table 1 Critical diameter (D_c) and partial thermal parameters of Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂M_x (M are Ni and Nb; *x*=0, 1, 2, 3) amorphous alloys

М	x	$\theta_{\rm g}/{\rm °C}$	$\Delta \theta_{\rm x}/^{\circ} {\rm C}$	$\theta_{\rm m}/{}^\circ\!{\rm C}$	$\theta_{\rm l}/^{\circ}{\rm C}$	D _c /mm
Ni	0	581.4	38.1	1 116.9	1 188.2	<5
	1	565.9	43.7	1 107.5	1 190.5	$5 \leq D_c < 7$
	2	568.1	46.0	1 113.1	1 176.3	<7
	3	585.6	35.8	1 117.1	1 191.1	<5
Nb	1	566.2	44.4	1 115.8	1 194.6	<5
	2	568.5	47.1	1 107.7	1 191.8	>7
	3	577.3	34.4	1 124.5	1 194.5	<3

Ni 和 Nb 元素对 Fe-Cr-Mo-C-B-Y 系合金压缩断 裂强度的影响

图 6 和 7 所示分别为直径为 3 mm 的 Fe48-xCr15-Mo₁₄C₁₅B₆Y₂M_r(M 为 Ni 和 Nb; x=0, 1, 2, 3) 合金 样品在 10⁻⁴ mm/s 的压缩速率下应力一应变曲线。从 图 6 和 7 可看出, 非晶合金 Fe48-xCr15Mo14C15B6Y2Nix (x=1, 2, 3) 和 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb_x(x=1, 2)的压 缩断裂强度均高于原非晶合金 $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2$ 的 压缩强度。其中, Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Ni_x(x=1, 2, 3) 非晶合金的压缩断裂强度为 2.8~3.0 GPa, 而 Fe₄₇Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₁ 和Fe₄₆Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₂非 晶合金的压缩强度分别为 3 645.7 和 3 018.9 MPa。由 此可见,1%的 Nb 使原非晶合金的强度提高了 44.7%。 然而, 非晶合金 Fe45Cr15Mo14C15B6 Y2Nb3 的压缩断裂 强度只有1 608 MPa,这与合金中含有一定量的晶态 相有关(见图 2(a))。 与含 Ni 的非晶合金相比, 可见 Nb 的添加无论对合金的非晶形成能力还是对合金的力学 性能,其作用效果均明显高于合金元素 Ni 的作用效 果。由于合金元素 Nb 比 Ni 具有更高的熔点,具有比 其它元素更大的结合键强度,含 Nb 的非晶合金强度 较高。图 8 所示为 Fe₄₇Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₁ 非晶合金 直径为 3 mm 圆柱试样的典型断口形貌。在这两类合 金的断口中,没有发现类似于 Zr 基等非晶合金的脉状 纹,合金的破坏方式仍为脆性断裂。但强度的提高对 改善合金的耐磨性是有利的。



图 6 直径为 3 mm 的 Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Ni_x(x=0, 1, 2, 3) 合金应力一应变曲线





图 7 直径为 3 mm Fe_{48-x}Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb_x (*x*=1, 2, 3)合 金应力一应变曲线

Fig.7 Compressive stress—strain curves of $Fe_{48-x}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}$ -B₆Y₂Nb_x(x=1, 2, 3) alloys with diameter of 3 mm



图 8 直径为 3 mm 非晶合金 Fe₄₇Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂Nb₁的断 口形貌

Fig.8 Fractograph of amorphous alloy $Fe_{47}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}$ -B₆Y₂Nb₁ with diameter of 3 mm

3 结论

1) 分别以 2%Ni 或 2%Nb 替代 Fe 时获得了最佳的非晶形成能力,其中含 2%Nb 的合金可以浇铸成直径为 7 mm 的非晶合金棒。

 Ni 和 Nb 元素的添加改善了合金的力学性 能,其中含 1%Nb 的非晶合金具有最高的压缩断裂强 度,为 3 645.7 MPa,与原合金 Fe₄₈Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂ 相比,强度提高了 1 127 MPa。

3) Nb 含量对合金的非晶形成能力与强度的影响 比 Ni 的显著,这两类合金的非晶形成能力与其过冷液 相区的大小具有良好的对应关系。

REFERENCES

- 王一禾,杨膺善.非晶态合金[M].北京:冶金出版社,1989.
 WANG Yi-he, YANG Ying-shan. Amorphous alloys[M].
 Beijing: Metallurgical Press, 1989.
- [2] MIZUSHIMA T, IKARASHI K, INOUE A. Soft magnetic properties of ring shape bulk glassy Fe-Al-Ca-P-C-B-Si alloy prepared by copper mold casting[J]. Journal of Materials Transaction JIM, 1999, 40(9): 1019–1022.
- [3] INOUE A, ZHANG T, TAKEUCHI A. Bulk amorphous alloys with high mechanical strength and good soft magnetic properties in Fe-TM-B(TM=IV-VIII group transition metal)system[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(4): 464–466.
- [4] MIZUSHIMA T, IKARASHI K, YOSHIDA S, MAKINO A, INOUE A. Soft magnetic properties of ring shape bulk glassy Fe-Al-Ca-P-C-B-Si alloy prepared by copper mold casting[J]. Materials Transactions JIM, 1999, 40(9): 1019–1022.
- [5] PANG S J, ZHANG T, ASAMI K, INOUE A. Formation of bulk glassy Fe_{75-x-y}Cr_xMo_yC₁₅B₁₀ alloys and their corrosion behavior[J]. Journal of Materials Research, 2001, 17(3): 701–704.
- [6] PANG S J, ZHANG T, ASAMI K, INOUE A. Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance[J]. Acta Materialia, 2002, 50(3): 489–497.
- [7] LU Z P, LIU C T, THOMPSON J R, PORTER W D. Structural amorphous steels[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(24): 245503.
- [8] PONNAMBALAM V, POON S J, SHIFLET G J. Fe-based bulk metallic glasses with diameter thickness larger than one centimeter[J]. Journal of Materials Research, 2004, 19(5): 1320–1326.
- [9] SHEN J, CHEN Q J, SUN J F, FAN H B, WANG G. Exceptionally high glass-forming ability of an FeCoCrMoCBY

alloy[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(15): 151907.

- [10] KISHITAKE K, ERA H, OTSUBO F. Thermal sprayed Fe-10Cr-13P-7C amorphous coatings possessing excellent corrosion resistance[J]. Journal of Thermal Spraying Technology, 1996, 5(4): 476–482.
- [11] IQBAL M, SUN W S, ZHANG H F, AKHTER J I, HU Z Q. Effect of additional elements on mechanical properties of a specially constituted Zr-based alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 447(1/2): 167–173.
- [12] XU D H, DUAN G, JOHNSON W L. Unusual glass-forming ability of bulk amorphous alloys based on ordinary metal copper[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(24): 245504.
- [13] YI S, JANG J S, KIM W T, KIM D H. Ni-based amorphous alloys in the Ni-Zr-Al-Y system that have high glass forming ability and large undercooled liquid regions[J]. Materials Letters, 2001, 48(5): 258–262.
- [14] INOUE A. High strength bulk amorphous alloys with low critical cooling rates[J]. Materials Transactions JIM, 1995, 36(7): 866–875.

- [15] FANG S S, XIAO X S, XIA L, WANG Q, LI WEI H, DONG Y D. Effects of bond parameters on the widths of supercooled liquid regions of ferrous BMGs[J]. Intermetallics, 2004, 12(10/11): 1069–1072.
- [16] ZHANG Y, CHEN J, CHEN G L, LIU X J. Glass formation mechanism of minor yttrium addition in CuZrAl alloys[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 131904.
- [17] CHEN J, ZHANG Y, HE J P, YAO K F, WEI B C CHEN G L. Metallographic analysis of Cu-Zr-Al bulk amorphous alloys with yttrium addition[J]. Scripta Materialia: 2006, 54(7): 1351–1355.
- [18] 杨元政, 董振江, 仇在宏, 陈小祝, 谢致薇, 白晓军. 块体非 晶合金 Cu₅₈Zr₂₀Ti₂₀Mo₂ 的形成与力学性能[J]. 中国有色金属 学报, 2007, 17(7): 1090-1095.

YANG Yuan-zheng, DONG Zhen-jiang, QIU Zai-hong, CHEN Xiao-zhu, XIE Zhi-wei, BAI Xiao-jun. Formation and mechanical properties of Cu₅₈Zr₂₀Ti₂₀Mo₂ bulk metallic glass[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1090–1095.

(编辑 李艳红)