

基于团簇线的 Mg-Ni-Y 三元非晶合金研究

张琦^{1,2}, 林万明², 董占民¹, 李双寿¹

(1. 清华大学, 北京 100084)

(2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

摘要: 采用团簇线方法设计并制备了 Mg-Ni-Y 三元非晶合金, 并对团簇结构的稳定性、表征非晶形成能力参数及耐腐蚀性能进行了研究。结果表明, 设计的 Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}、Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5} 和 Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0} 3 种非晶合金具有较高的原子尺寸差 σ 、电负性差 $\Delta\chi$ 、 τ 和 ϕ , 在合金结构及化学性能上具有较高的稳定性及良好的非晶形成能力, 且上述非晶合金在 NaOH 溶液中具有良好的耐腐蚀性能。

关键词: Mg-Ni-Y 非晶合金; 团簇线; 成分设计; 耐腐蚀性

中图分类号: TG139

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)06-1521-05

非晶合金(或金属玻璃)是近几十年来采用现代快速冷凝冶金技术获得的性能独特的新型材料。由于其独特的无序结构, 具有很多优异的力学、物理和化学性能, 在国防、航空航天等高技术及民用上有着广阔的应用前景。其中, 镁基非晶合金因其价格低廉、密度小、比强度高、合金元素储量丰富等优点, 更成为储氢合金和燃料电池电极的优秀候选材料^[1-8]。然而, 镁基非晶合金的形成能力较低, 如何制备高非晶形成能力的合金成为一项重要的研究课题。

随着 Miracle 团簇密堆模型^[9,10]理论的进一步发展, 对传统意义上非晶合金长程无序和短程有序结构^[11]的认知实现了突破, 这种以二十面体团簇或类二十面体团簇的球周期序为主导, 通过共点、共面、或共边连接成非晶的方式, 完整描述了非晶中程有序^[12]的结构特征。董闯^[13-18]等基于中程有序理论的研究基础上, 发展了共晶团簇理论, 并成功运用于 Zr 基、Cu 基及 RE 基块体非晶合金的成分设计。

本实验运用团簇线方法设计并制备了 Mg-Ni-Y 三元非晶合金, 通过对团簇结构的稳定性及表征非晶形成能力参数的研究, 分析了原子尺寸差 σ 、电负性差 $\Delta\chi$ 、 τ 和 ϕ 等合金元素固有属性对非晶形成能力、合金结构及化学性能的影响, 并对其耐腐蚀性能进行了研究, 这对进一步研究该类材料作为储氢合金负极有一定的指导意义。

1 成分设计

团簇线是连接二元团簇与第三组元的成分直线。

其中, 二元团簇以 Δ 和 R_{DAC} 作为拓扑密堆结构的评判标准, 在晶体相的局域结构中选择特定原子形成的最近邻配位多面体。

在 Mg-Ni-Y 三元体系中, 满足拓扑密堆、化学短程有序及动力学准则的团簇结构分别为以小原子 Mg 为中心的 Mg₇Y₈ 和以 Ni 为中心的 Ni₃Y₇、Ni₇Y₆ 及 Ni₈Y₅。分别连接 Ni₃Y₇、Ni₇Y₆、Ni₈Y₅ 和 Mg, 以及 Mg₇Y₈ 和 Ni, 建立 4 条团簇线 Ni₃Y₇-Mg、Ni₇Y₆-Mg、Ni₈Y₅-Mg 和 Mg₇Y₈-Ni, 如图 1 所示。4 条团簇线的交点成分分别为 Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}、Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5} 和 Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}。

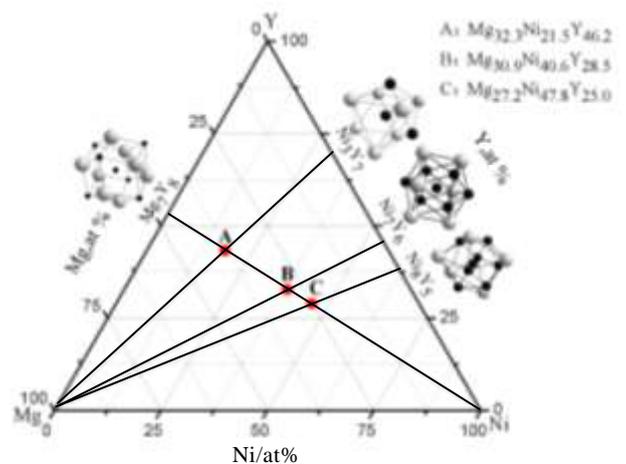


图 1 Mg-Ni-Y 体系团簇线及团簇线交点成分

Fig.1 Composition chart of the Mg-Ni-Y system

收稿日期: 2015-05-21

基金项目: 国家自然科学基金 (21153003)

作者简介: 张琦, 男, 1988 年生, 硕士生, 清华大学基础工业训练中心, 北京 100084, 电话: 010-62796605, E-mail: 357424037@qq.com

2 实验

采用纯度大于 99.9% 的金属 Mg、Ni、Y 原料，按照设计的 Mg-Ni-Y 合金配比方案，在氩气保护下，先用电弧熔炼制备 Ni-Y 中间合金，翻转熔炼不少于 4 次，以保证合金的均匀性。然后将中间合金和 Mg 放入坩锅中通过感应熔炼的方式制得成分为 Mg-Ni-Y 母合金锭；最后在保护气氛下，感应熔化母合金，采用实验室自行研制的差压压铸设备，利用高纯氩气把合金液压入圆柱形铜模铸型中，得到直径 3 mm 的非晶合金试棒。考虑到镁在熔炼过程中挥发造成的损失，需根据不同的配比方案反复试验确定镁损，预先添加超过一定量的纯镁。

采用 D8-advance X 射线衍射仪（Cu K α 辐射， $\lambda=0.15418$ nm）对试样的相结构进行分析，扫描范围 20°~70°，扫描速度 8°/min。试样的耐腐蚀性能则通过循环动电位极化法来测量。采用三电极体系，工作电极为制备的 Mg-Ni-Y 非晶试样，辅助电极及其参比电极分别为铂电极和饱和甘汞电极（SCE），配制 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液，试样的非工作面密封，工作面机械抛光。测试装置为上海辰华 CHI604E 电化学分析仪，整个测试过程在室温下进行，采用线性扫描，电位扫描范围为 2.33 到 -1.67 V，扫描速度为 5 mV/s。测试之前，三电极系统保持 5~10 min 以保证开路电位达到基本稳定。

3 结果和讨论

3.1 团簇结构的稳定性

非晶中的局域结构具有与晶态材料中非常相近的局部对称性^[19,20]， Δ 和 R_{DAC} 作为评判拓扑密堆结构的标准，可以反映出团簇结构的稳定性，也将直接影响非晶合金的微观组织结构和化学性能。Mg-Ni-Y 三元体系的团簇结构参数如表 1 所示。

中心原子半径 R_0 与第 1 壳层平均原子半径 R_1 的比值 $R_{0/1}$ 与相同配位数下的理想临界半径比 R^* 值间普遍存在一定的偏差 Δ ， $\Delta=(R_{0/1}-R^*)/R^*$ 。以 CN9 附八面体的三棱柱 Ni_3Y_7 为例，Ni 为中心原子，其 $R_0=0.125$ nm，第 1 壳层被 2 个 Ni 和 7 个 Y 原子占据，其平均原子尺寸 $R_1=(0.125 \times 2 + 0.182 \times 7)/9=0.169$ nm，则 $R_{0/1}=R_0/R_1=0.744$ ，它与理想 R^* 值（为 0.71）相差 4.175%。这表明 Ni_3Y_7 团簇结构中存在 R_0 过大或 R_1 过小的情况，反映出第 1 壳层上的原子不能完全覆盖中心原子的边界或与中心原子间存在高于理想状态下强烈的键合作用，但 Wang Qing^[21] 等也指出， Δ 的偏差在 11% 范围内即可以满足密堆结构的要求。因而， Ni_3Y_7 团簇具有稳定的结构特征。除 Ni_3Y_7 之外，其余团簇结构的 Δ 均为负，即 $R_{0/1} < R^*$ ，其存在 R_0 过小或 R_1 过大的情况。此时，中心原子对第 1 壳层原子的键合作用较弱，易受到团簇外连接原子的吸引而破坏原有结构，特别是当连接原子对第 1 壳层原子的吸引作用远大于中心原子的键合作用时，这种影响就尤为突出。CN12 的二十面体 Ni_7Y_6 和 Ni_8Y_5 团簇的 Δ 分别为 -9.72% 和 -6.87%，虽然从结构角度上中心 Ni 原子对第 1 壳层原子的键合作用相对较弱，但由于 Ni-Y（为 -31 kJ/mol）的混合焓明显负于 Mg-Ni（为 -4 kJ/mol）和 Mg-Y（为 -6 kJ/mol）， Ni_7Y_6 和 Ni_8Y_5 团簇也可以形成稳定的结构特征。而 CN14 的 Mg_7Y_8 团簇 Δ 为 -3.03%，中心 Mg 原子对第 1 壳层的键合作用较弱，加之 Ni-Y 原子易优先团聚。因而， Mg_7Y_8 团簇的稳定性较其他 3 个团簇结构差，以 Mg_7Y_8 团簇为基础设计的合金也存在稳定性较差的情况。

R_{DAC} 则是从化学短程上反映团簇结构的稳定性，而这种稳定性同时受制于 R_{DAC}^0 和 R_{DAC}^1 。 R_{DAC}^0 值越大， R_{DAC}^1 越小，团簇结构的内部越容易形成化学短程有序结构。同样以 Ni_3Y_7 为例，第 1 壳层上的原子数 9，其

表 1 Mg-Ni-Y 体系的团簇结构参数

Table 1 Parameters related to cluster structure of Mg-Ni-Y system

Cluster structure	Crystal structure	R_0/R_1	R^*	Δ	R_{DAC}^0	R_{DAC}^1	R_{DAC}
Ni_3Y_7	BFe	0.74	0.71	4.175	0.778	0.48	0.405
Ni_3Y_7	NiY	0.74	0.71	4.175	0.778	0.48	0.405
Ni_7Y_6	Be_3Nb	0.814	0.902	-9.72	0.5	0.167	0.417
Ni_7Y_6	Co_7Er_2	0.814	0.902	-9.72	0.5	0.167	0.417
Ni_7Y_6	Ce_2Ni_7	0.814	0.902	-9.72	0.5	0.167	0.417
Ni_7Y_6	Cu_2Mg	0.814	0.902	-9.72	0.5	0.167	0.417
Ni_7Y_6	Ni_2Tm	0.814	0.902	-9.72	0.5	0.167	0.417
Ni_8Y_5	Be_3Nb	0.84	0.902	-6.87	0.417	0.167	0.347
Ni_8Y_5	Co_7Er_2	0.84	0.902	-6.87	0.417	0.167	0.347
Ni_8Y_5	Ce_2Ni_7	0.84	0.902	-6.87	0.417	0.167	0.347
Mg_7Y_8	ClCs	1.015	1.047	-3.03	0.571	0.5	0.286

中异类 Y 原子的原子数为 7, $R_{DAC}^0=7/9=0.778$; 最近邻壳层上异类 Y 原子对的数目为 12, 最近邻壳层上所有的原子对数目为 25, $R_{DAC}^0=12/25=0.48$, $R_{DAC}=0.778 \times (1 - 0.48)=0.405$, Dong C^[22]等人认为 R_{DAC} 大于 0.167 的团簇结构具有稳定的化学性能, 因而 Ni₃Y₇ 团簇具有稳定的化学短程特征。设计的 4 种团簇结构的化学稳定性从大到小依次为 Ni₇Y₆、Ni₃Y₇、Ni₈Y₅ 和 Mg₇Y₈, 这与团簇在结构上的稳定性一致。

3.2 块体非晶合金的形成能力

采用差压压铸法制备的直径为 3 mm 的 Mg-Ni-Y 合金的 XRD 图谱如图 2 所示。由图可以看出, 基于团簇线设计的 Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}、Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5} 和 Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0} 三元合金图谱中, 并未观察到任何对应于特定晶相的衍射峰, 证明制备的合金组织具有典型的非晶结构。

在 Mg-Ni-Y 三元相图中, 团簇线除了可以看作是二元团簇与第 3 组元的成分连线, 也可视为从二元团簇向三元相的生长路径。以 Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2} 非晶合金为例, 该成分点可描述为团簇 Mg₇Y₈ 加连接原子 Ni, 或者团簇 Ni₃Y₇ 加连接原子 Mg, 即团簇式 Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}=(Mg₇Y₈)_{5.78}Ni_{21.5}=(Ni₃Y₇)_{6.6}Mg_{32.3}。因而, 通过团簇线设计的非晶合金成分在结构及化学性质上同时受到 Mg₇Y₈ 和 Ni₃Y₇ 两种团簇结构的影响。这里需要说明的是, 受到团簇结构的影响, Ni₃Y₇ 团簇中心 Ni 原子对第 1 壳层的键合作用强于 Mg₇Y₈ 团簇中心 Mg 原子对第 1 壳层的键合作用, 加之 Ni-Y 原子易优先团聚, 合金在结构上倾向于 Ni-Y 方向的发展; 同时, Ni₃Y₇ 团簇的 R_{DAC} 也高于 Mg₇Y₈ 团簇, 这也使得合金在化学性能上也同样倾向于 Ni-Y 方向的发展。此外, 从原子分数角度考量, Mg、Ni 原子的含量都达到一定的数量级, 不存在成分偏析的问题, 这也是团簇线在成分设计上的优势。同理, Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}、

Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0} 也可采用上述方式描述。由于液体、非晶合金和晶体相之间存在结构遗传性, 这种描述方式易于获得亚组元体系的信息, 反映出非晶合金最易晶化方向或受到腐蚀作用时变形的机制, 将微观的原子团簇与宏观的相图特征联系起来, 显示其基本结构特点^[23]。简化多组元体系的复杂性, 因而是一种比较实用的成分设计方法^[24-26]。

课题组曾以镁基非晶合金为研究对象, 在非晶中程有序理论的基础上, 分析了原子尺寸差 σ 、电负性差 Δx 、 τ 和 φ 等合金元素固有属性对非晶形成能力的影响, 并从合金成分整体角度评价了合金的结构与化学性能。针对上述设计的 Mg-Ni-Y 非晶成分, 计算结果如表 2 所示。

由表 2 分析可知, 基于团簇线设计的 Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}、Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5} 和 Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0} 非晶成分的原子尺寸差 σ 、电负性差 Δx 都远高于目前已制备的 Mg 基非晶^[27-29]。根据 Hume-Rothery 原则^[30-32], 随着组元元素之间电负性差的提高, 冷却结晶过程中形成某种原子对(即原子簇), 元素在竞争晶相中的固溶度受到限制, 提高了非晶形成能力。同时, 高的电负性差也抑制了非晶合金的晶化, 因而具有较高的稳定性。采用团簇线方法设计的非晶合金用于储氢合金或燃料电池负极时, 可有效避免晶化过程导致的放电容量快速下降。

原子尺寸差 σ 也能很好地描述团簇与连接原子组成方式, 原子尺寸差越大, 原子间的堆垛程度越高。在原子构造液体快速冷却的过程中, 高的随机堆垛密度易使液体的主要组元之间产生强烈的化学作用, 液体的粘滞性提高, 液/固界面的界面能增大, 晶体相的形核难度增大; 另一方面, 高的原子随机堆垛密度抑制了原子的重新排布, 难以形成长程有序的晶体相结构, 即使出现无热形核也难以生长。

τ 和 φ 在对结构及化学性能研究的基础上, 进一步增加了对合金元素分数等因素的考量, 因而更能准确的反映出设计的非晶成分具有较高的非晶形成能

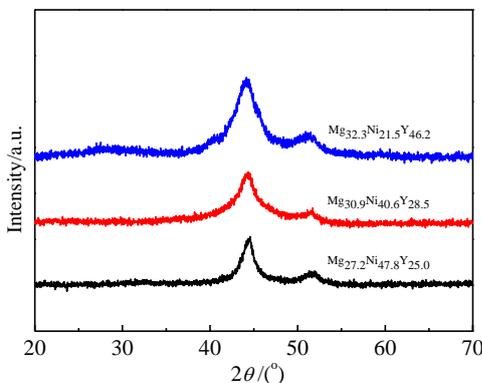


图 2 Mg-Ni-Y 非晶合金的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of Mg-Ni-Y amorphous alloy

表 2 表征 Mg-Ni-Y 非晶合金形成能力的各参数计算值
Table 2 Calculated parameters related to glass-forming ability of Mg-Ni-Y bulk metallic glasses

Sample	Δx	σ	$\tau(\Delta x \sigma)$	$\varphi(\sigma/\Delta x)$
Mg _{32.3} Ni _{21.5} Y _{46.2}	0.27	0.13	0.04	0.50
Mg _{30.9} Ni _{40.6} Y _{28.5}	0.32	0.16	0.05	0.50
Mg _{27.2} Ni _{47.8} Y _{25.0}	0.32	0.16	0.05	0.50

力。依据计算获得的公式 $\lg D_{\max} = 3765.3\tau^2 - 167.96\tau + 2.31$ 可进一步得出, 当 τ 的取值大于 0.02 时, 随着 τ 值的增大, $\lg D_{\max}$ 与 τ 呈现二次增长趋势, τ 值越大, Mg-Ni-Y 的结构及化学性能的稳定性及非晶的形成能力就越高。

3.3 块体非晶合金的耐腐蚀性能

Mg-Ni-Y 非晶合金在 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液中的极化曲线如图 3 所示, 拟合结果如表 3 所示。

材料的耐腐蚀性是由表面膜的稳定性、成分和均匀性决定的, 非晶合金结构和成分均匀的特点, 避免了晶界、位错等的结构缺陷和偏析、异相等成分缺陷, 使得非晶在腐蚀过程中不易形成腐蚀成核中心, 使腐蚀液不能浸入。同时, 非晶较高的活性使得其在腐蚀过程中能够在表面迅速形成钝化膜, 即使钝化膜局部破裂也会及时的修复, 再一次在表面形成完整均匀的钝化膜。

动电位极化法所测得的极化电位表明, 自腐蚀电流越小, 自腐蚀电位越正, 极化电阻越大则发生钝化越容易, 那么材料的耐腐蚀性能就越好^[33,34]。以 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 非晶合金为例, 自腐蚀电流密度为 $0.92 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 比纯 Mg 的自腐蚀电流密度 (为 $1.51 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$) 至少小 1 个数量级; 同时, 自腐蚀

电位为 -0.212 V , 远正于纯 Mg (为 -1.38 V), 且极化电阻密度 ($23.04 \times 10^4 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$) 也大于纯 Mg ($9.14 \times 10^4 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$), 这都说明 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 非晶合金具有较高的耐腐蚀性能。而 $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ 和 $Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}$ 非晶合金的极化曲线与 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 相似, 因而在充放电过程中具有相同的耐腐蚀机理。 $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ 非晶合金的自腐蚀点位 (为 -0.358 V) 虽负于 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$, 但自腐蚀电流密度 ($0.92 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) 却低于 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$, 且极化电阻密度 (为 $9.14 \times 10^4 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$) 也高于 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$, 这说明 $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ 非晶合金的耐腐蚀性能要高于 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 。由此可以判定耐腐蚀性能从大到小依次为 $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ 、 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 和 $Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}$ 。

4 结 论

- 1) 采用团簇线方法设计了 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 、 $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ 和 $Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}$ 3 种非晶合金成分。
- 2) 在 Mg-Ni-Y 三元相图中, 满足 Δ 和 R_{DAC} 的团簇结构分别为以 Ni 原子为中心的 Ni_7Y_6 、 Ni_3Y_7 和 Ni_8Y_5 , 及以 Mg 原子为中心的 Mg_7Y_8 , 在结构和化学性能上具有较高的稳定性。
- 3) 上述设计的合金成分具有较高的原子尺寸差 σ 、电负性差 Δx 、 τ 和 ϕ , 在合金结构及化学性能上具有较高的稳定性及良好的非晶形成能力。
- 4) 上述制备的非晶合金都具较正的自腐蚀电位、较低的自腐蚀电流密度和较高的极化电阻密度, 因而具有良好的耐腐蚀性能, 而上述合金的耐腐蚀性能从大到小依次为 $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ 、 $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$ 和 $Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}$ 。

参考文献 References

[1] Gonzalez S, Figueroa I A, Zhao H *et al.* *Intermetallics*[J], 2009, 17(11): 968

[2] Gonzalez S, Figueroa I A, Todd I. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 484(1-2): 612

[3] Shi Lingling, Xu Jian. *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2011, 357(15): 2926

[4] Yang Guanglin(杨广林), Lin Wanming(林万明), Li Shuangshou(李双寿) *et al.* *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2013, 19(44): 2764

[5] Peng Hao(彭浩), Zhao Ping(赵平), Li Shuangshou(李双寿) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 366

[6] Peng Hao(彭浩), Li Shuangshou(李双寿), Huang Tianyou(黄天佑) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属

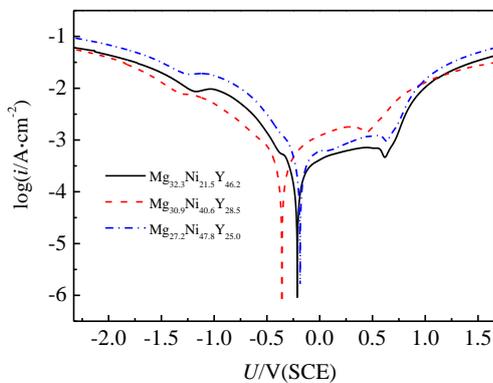


图 3 Mg-Ni-Y 非晶合金的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of Mg-Ni-Y bulk metallic glasses

表 3 Mg-Ni-Y 非晶合金的极化曲线拟合结果

Table 3 Fitting results of polarization curves of Mg-Ni-Y bulk metallic glasses

Sample	$i_{\text{corr}}/\times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$	E_{corr}/V	$R_p/\times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$
Pure Mg	15.1	-1.380	9.14
$Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$	0.92	-0.212	23.04
$Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$	0.70	-0.358	51.14
$Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}$	1.50	-0.186	12.4

- 材料与工程[J], 2010, 39(09): 1655
- [7] Zhang Yangchuan(张羊换), Cai Ying(蔡颖), Yang Tai(杨泰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2013, 42(11): 2201
- [8] Wang Yijian(王毅坚), Suo Zhongyuan(索忠源), Qiu Keqiang(邱克强). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(1): 96
- [9] Miracle D B, Sanders W S, Senkov O N. *Philosophical Magazine* [J], 2003, 83: 2409
- [10] Miracle D B. *Nature Materials*[J], 2004(3): 697
- [11] Inoue A, Takeuchi A. *International Journal of Applied Science and Technology*[J], 2010, 6: 1
- [12] Sheng H W, Luo W K, Alamgir F M et al. *Nature*[J], 2006, 439: 419
- [13] Zhou Xuyang, Ma Yanping, Gong Faquan et al. *Surface & Coatings Technology*[J], 2014, 242: 14
- [14] Li Feiwei, Qiang Jianbing, Wang Qing et al. *Intermetallics*[J], 2012, 30: 86
- [15] Zhang Jie, Wang Qing, Wang Yingmin et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 505: 179
- [16] Li Zhen, Zhang Ruiqian, Zha Qianfeng et al. *Progress in Natural Science:Materials International*[J], 2014, 24: 35
- [17] Chen Weirong(陈伟荣), Han Guang(韩光), Chen Jixiang(陈季香) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(2): 236
- [18] Chen Jixiang(陈季香), Wang Qing(王清), Dong Chuang(董闯). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(1): 69
- [19] Panissod P, Aliaga G D, Amamou A et al. *Physical Review Letters*[J], 1980, 44: 1465
- [20] Eifert H J, Elschner B, Buschow K H J. *Physical Review B*[J], 1982, 25: 7441
- [21] Wang Qing, Qiang Jianbing, Wang Yingmin et al. *Journal of Non-crystalline Solids*[J], 2007, 353: 3425
- [22] Cheng X, Wang Q, Dong C. *China Science*[J], 2008, 51(4): 421
- [23] Dong C, Wang Q, Qiang J B et al. *Journal of Physics D: Applied Physics* [J], 2007, 40: R273
- [24] Qiang J B, Wang Y M, Wang D H et al. *Journal of Non-crystalline Solids*[J], 2004, 334-335(1): 223
- [25] Dong C, Wang Y M, Qiang J B et al. *Materials Transactions Jim* [J], 2004, 45(4): 1
- [26] Wang Y M, Zhang X F, Qiang J B et al. *Scripta Mater*[J], 2004, 50(6): 829
- [27] Zheng Q, Ma H, Ma E et al. *Scripta Materialia*[J], 2006, 55(6): 541
- [28] Ma H, Zheng Q, Xu J et al. *Journal of Materials Research*[J], 2005, 20(9): 2252
- [29] Men H, Kim W T, Kim D H. *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2004, 337(1): 29
- [30] Lu Z P, Liu C T, Dong Y D. *Journal of Non-Crystalline Solids* [J], 2004, 341(1-3): 93
- [31] Liu W Y, Zhang H F, Wang A M et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 459(1-2): 196
- [32] Peng Hao(彭浩), Li Shuangshou(李双寿), Huang Tianyou(黄天佑). *Journal of Tsinghua University*(清华大学学报)[J], 2010, 50(8): 1188
- [33] Chen Qingjun(陈庆军), Hu Linli(胡林丽), Zhou Xianliang(周贤良) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(01): 152
- [34] Lv Junxia(吕俊霞), Zhang Jiliang(张吉亮), Shi Canhong(石灿鸿). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 447

Mg-Ni-Y Ternary Bulk Metallic Glasses Using Cluster Line Criterion

Zhang Qi^{1, 2}, Lin Wanming², Dong Zhanmin¹, Li Shuangshou¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Bulk metallic glass formation in Mg-Ni-Y alloy systems was investigated using a cluster line approach in combination, and the cluster formulae stability, glass-forming ability (GFA), corrosion resistance properties of the sample were investigated by Δ , R_{DAC} , σ , Δx , τ , φ and i_{corr} . The results show that $Mg_{32.3}Ni_{21.5}Y_{46.2}$, $Mg_{30.9}Ni_{40.6}Y_{28.5}$ and $Mg_{27.2}Ni_{47.8}Y_{25.0}$ bulk metallic glasses using cluster line criterion have high Δ , R_{DAC} , σ , Δx , τ and φ , which are advantageous for the cluster formulae stability and the increase of glass-forming ability (GFA). All the samples have a low i_{corr} , which indicates that the Mg-Ni-Y alloys designed show good corrosion resistance in NaOH solution.

Key words: Mg-Ni-Y bulk metallic glasses; cluster line; composition design; corrosion resistant property