

镀钯 Cu 线力学性能对键合点形貌及强度的影响

范俊玲¹ 何 芳¹ 曹 军² 原东林¹ 吴雪峰² 杨雪梅¹ 姚巧玲¹
(1.焦作大学化工与环境工程学院; 2.河南理工大学机械与动力工程学院)

摘 要 利用扫描电镜、强度测试仪、拉力-剪切力测试仪等研究了镀钯 Cu 线力学性能对其球焊点和楔焊点形貌、键合强度的影响及影响机理。结果表明,当 $\phi 0.020$ mm 镀钯 Cu 线伸长率低于 6% 时,球焊点颈部产生裂纹,楔焊点变形量过小,键合面积缩小,球焊点和楔焊点拉力值均降低。当镀钯 Cu 线伸长率高于 16%,球焊点形貌不规则程度增大,楔焊点颈部出现微小裂纹,并出现塌丝现象。当镀钯 Cu 线伸长率为 12%~15% 时,球焊点/楔焊点形貌一致性好,键合强度及稳定性较好,满足使用要求。

关键词 镀钯 Cu 线;伸长率;拉断力;键合;键合强度

中图分类号 TG249.7;TG113.25 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Mechanical Properties of Pd-plated Copper Wire on Morphologies and Strength of Bonding Points

Fan Junling¹, He Fang¹, Cao Jun², Yuan Donglin¹, Wu Xuefeng², Yang Xuemei¹, Yao Qiaoling¹
(1.Chemical and Environmental Engineering, Jiaozuo University;
2.School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University)

Abstract: The effect and mechanism of mechanical properties of Pa-plated copper wire on morphology and bonding strength of ball-bonded and wedge-bonded points were investigated by SEM, strength tester and tension-shear force tester. The results indicate that when the elongation of $\phi 0.020$ mm Pa-plated copper wire is less than 6%, the neck of ball-bonded point is cracked, and the deformation and bonding area of wedge-bonded point are excessively small, so the tension value of ball-bonded and wedge-bonded point are reduced. When the elongation is higher than 16%, the irregularity degree of morphology is increased, and minor cracks appear at neck of wedge point, so bonged wire is collapsed. When the elongation range is 12%~15%, the morphology of ball- or wedge-bonded points is in good consistency, where the bonding strength and stability are desirable, meeting the requirements of industrial application.

Key Words: Pd-plated Copper Wire, Elongation, Tensile Strength, Bonding, Bonding Strength

键合引线是集成电路(IC)封装的关键材料,兼具信号传递和传热作用。超细间距引线键合需要线径更细、强度和可靠性更高的导线,通过对无空气焊球(Free Air Ball,FAB)及热影响区长度的控制,在超声、压力及温度共同作用下键合产生连接强度,以满足芯片互连需求^[1-2]。随着 IC 按摩尔定律持续发展,芯片更趋微型化、高密度化,这必然要求键合焊盘及其间距变得更小、可靠性更高。因此,芯片的超微引线超细间距键合既是必然发展趋势也是现实亟需。键合 Cu 线由于其低成本、优良的电学性能和力学性能,在微电子封装领域逐步替代金线应用于中低端半导体器件中,但键合 Cu 线

由于常温条件下极易氧化、硬度过高(键合过程中容易形成“弹坑”,损伤芯片)、键合工艺参数窗口小等因素,存在键合强度不稳定、键合过程的辅助平均间隔时间(Mean Time Between Assists,MTBA)较小,单位小时生产效率(Unit Per Hour,UPH)较低(只有键合金线的 60%~80%)等问题^[3-6],严重限制了键合 Cu 线在微电子领域的应用。镀钯 Cu 线是在 Cu 线表面形成一层纯钯,能有效提高 Cu 线的耐腐蚀性能及高湿环境下器件的可靠性,在大规模集成电路及 LED 中逐渐替代键合金线应用于芯片和引脚的连接^[7-15]。近年来研究者对微细 Cu 线镀钯进行了许多研究。DU Y H 等^[16]研

收稿日期:2023-06-27;修改稿收到日期:2023-07-27

基金项目:河南省科技计划资助项目(222102230014);河南省高等职业学校青年骨干教师培养项目(2020GZGG057)

第一作者简介:范俊玲,女,1981 年出生,副教授,河南焦作(454000),E-mail:37967531@qq.com

引用格式:范俊玲,何芳,曹军,等. 镀钯 Cu 线力学性能对键合点形貌及强度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 261-1 265.
FAN J L, HE F, CAO J, et al. Effects of mechanical properties of Pd-plated copper wire on morphologies and strength of bonding points[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 261-1 265.

究了在微细 Cu 线上直接涂镀金属钯,可使裸铜丝的球抗剪强度提高 50%左右。QIN W 等^[17]在镀钯 Cu 线中加入 Ni,可提高镀钯 Cu 线的键合可靠性。但多集中于镀钯 Cu 线制备技术,而对于镀钯 Cu 线力学性能对键合点形貌及键合强度的影响研究报道很少。本研究通过分析不同力学性能的镀钯 Cu 线对键合点形貌及键合强度的影响,进一步探究镀钯 Cu 线力学性能对键合点形貌及键合强度的影响因素,为镀钯 Cu 线的生产及在电子封装领域的应用提供参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为通过不同热处理工艺获得不同力学性能的 $\phi 0.020\text{ mm}$ 镀钯铜线,其中铜线质量分数 $\geq 99.999\%$,镀钯层厚度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$;Pd 在镀钯铜线中的质量分数为 2.7%,规格分类为 CuPd₁、CuPd₂ 和 CuPd₃,其性能见表 1。采用电加热管式炉退火,其中退火管长度为 1 000 mm,退火过程采用体积分数为 95%的 N₂+5%的 H₂混合气体保护。

表 1 镀钯 Cu 线热处理参数及力学性能指标

Tab.1 Heat treatment parameters and mechanical properties of Pa-plated copper wire				
序号	热处理温度/℃	热处理时间/h	伸长率/%	抗拉强度/MPa
CuPd ₁	240	2.0	4.0~6.0	509.5~573.0
CuPd ₂	360	2.0	12.0~15.0	254.7~318.5
CuPd ₃	480	2.0	>16.0	222.9~286.6

1.2 试验方法

分别采用镀钯 CuPd₁、CuPd₂ 和 CuPd₃ 线在 KAI-JO FB-988 自动键合设备上上进行键合试验,封装形式:2835 LED,劈刀类型:SPT SU-25140-415E-ZU36-E,键合参数见表 2,键合过程中采用体积分数为 95%的 N₂+5%的 H₂混合气体保护,气体流量为 0.6 L/min,采用 Dage Series 4000-BS250 测试仪对键合点的拉力、力剪切进行测试,并对测试数据进行统计分析,采用

JEOL JSM-6700F扫描电镜(EDS)对不同性能镀钯 Cu 线试样的键合形貌进行分析。

表 2 镀钯 Cu 线键合参数

Tab.2 Bonding parameters of Pa-plated copper wire								
参数	冲击力/ N	键合力/ N	超声功率/ mW	键合时间/ ms	预打火电 压/V	烧球电 流/A	烧球时 间/ms	尾丝长 度/ μm
球焊点	0.85	0.45	160	9	-	-	-	-
楔焊点	-	0.90	400	3	-	-	-	-
	-	0.85	130	4	-	-	-	-
无空气焊球	-	-	-	-	5 000	0.52	0.45	180

2 试验结果与分析

2.1 镀钯 Cu 线对球焊点键合强度的影响

图 1 为 CuPd₂ 镀钯 Cu 线键合后的芯片整体形貌。图 2 为 CuPd₁ 镀钯 Cu 线的球焊点形貌。可以看出,球键合点颈根部(球键合点与镀钯 Cu 线联结处)出现裂纹,同时球焊点颈部折弯处出现微小裂纹。图 3 为镀钯 Cu 线球焊点拉力值。可以看出,3 种铜线球焊点拉力值均较低。

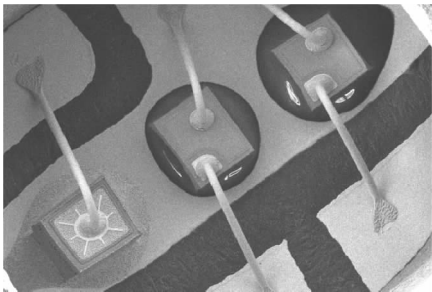
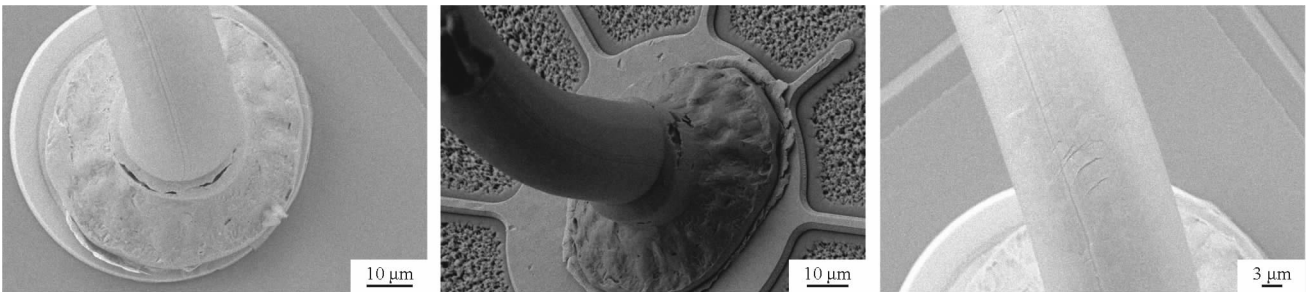


图 1 CuPd₂ 镀钯 Cu 线键合点形貌图
Fig.1 Morphology of bonded points of CuPd₂ Pa-plated copper wire

图 4 为 CuPd₃ 镀钯 Cu 线的球焊点形貌。图 5 为镀钯 Cu 线球焊点剪切力值统计图。由图 4 可知,CuPd₃ 镀钯 Cu 线球焊点形貌不均匀,圆度较低,球焊点周围存在部分凸出现象,球焊点剪切力值波动较大,见图 5。图 6 为 CuPd₂ 镀钯 Cu 线的球焊点颈部形貌及热循环后的断裂形貌。由图 6a 可知,球焊点较均匀,圆度高,球键合点颈部没有裂纹,且球焊点颈部折弯



(a) 球焊点颈根部外侧裂纹 (b) 球焊点颈根部内侧裂纹 (c) 球焊点颈部微小裂纹

图 2 CuPd₁ 镀钯 Cu 线裂纹形貌

Fig.2 Crack of CuPd₁ Pa-plated copper wire

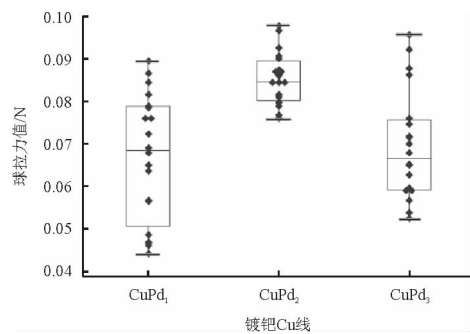


图 3 镀钯 Cu 线球焊点拉力值统计

Fig.3 Statistics of tensile values of Pa-plated copper wire ball-bonded points

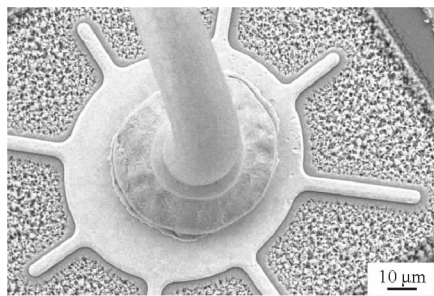


图 4 CuPd₃ 镀钯 Cu 线的球焊点形貌(球焊点不规则)

Fig. 4 Morphology of ball-bonded points of CuPd₃ Pa-plated copper wire

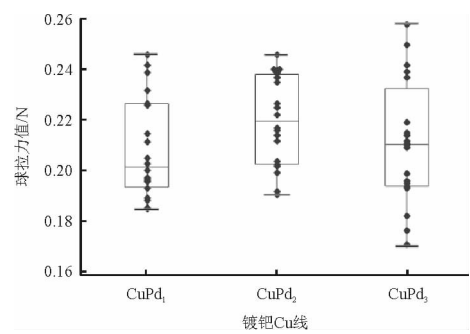
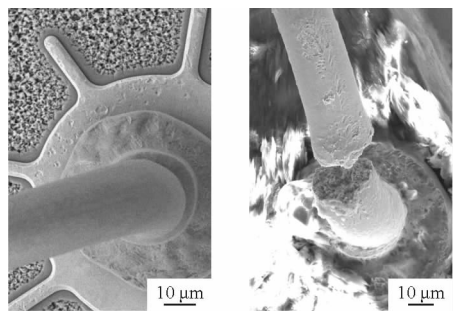


图 5 镀钯 Cu 线球焊点剪切力值统计图

Fig.5 Statistics of ball-bonded points shear force values of Pa-plated copper wire



(a) CuPd₂ 镀钯 Cu 线的球焊点颈部形貌 (b) 球焊点颈部微裂纹导致热循环后颈部断裂

图 6 CuPd₂ 镀钯 Cu 线的球焊点颈部形貌及热循环后的断裂形貌

处较平滑,球拉力值和球剪切力值较高且波动范围小。

镀钯 Cu 线通过电子灭火(Electronic Flame Off)形成无空气焊球(Free Air Ball),在超声、压力和温度作用下与铝基板通过原子扩散实现键合。球键合过程中,无空气焊球在陶瓷劈刀作用下发生大形变率变形,同时为了确保球焊点上部分键合线与球垂直,在成弧过程中镀钯 Cu 线需随劈刀先反向运动,然后正向运动,从而形成线弧,即镀钯 Cu 线在球键合后,经过反复弯折成弧。对于 CuPd₁ 镀钯 Cu 线,由于其热处理温度较低,镀钯 Cu 线未能完全回复,镀钯 Cu 线伸长率低(4%~6%),线材内部存在较大的加工应力,在无空气焊球成球过程中,由于其内部存在较大的加工应力,致使其热影响区较大,在热影响区范围内线材力学性能大幅度降低,颈部强度降低更为明显,在球焊点颈根部外侧(球焊点与线材连接处)发生大形变率变形时产生裂纹,见图 2a。在反向运动时,球焊点颈根部内侧发生大形变率变形,进而在球焊点颈根部另一侧产生裂纹,见图 2b。再者,在成弧过程中同样由于线材力学性能降低,颈部形变率经过反复变形后,颈部出现微小裂纹,见图 2c,此时,球焊点键合拉力降低较多,见图 3。引线键合后球焊点颈根部或颈部出现裂纹,塑封后经过热循环,微小裂纹将进一步扩展,最终导致断裂,造成器件失效,见图 6b。CuPd₃ 镀钯 Cu 线三维热处理温度较高,镀钯 Cu 线经过热处理后完全再结晶,其伸长率较高(16%~18%),楔焊点键合后,通过陶瓷劈刀与线夹的配合将镀钯 Cu 线拉断,形成下一个球焊点的尾丝,由于镀钯 Cu 线伸长率高,拉断过程中主要产生韧性断裂,断口平整度较差,进而导致尾丝长度不均匀,不均匀的尾丝长度致使下一个球焊点球形波动较大,产生球焊点形状不均匀现象,球焊点剪切力波动较大。

2.2 镀钯 Cu 线对楔焊点键合强度的影响研究

图 7 为镀钯 Cu 线键合后楔焊点的拉力值。可以看出,CuPd₁ 镀钯 Cu 线楔焊点拉力值较低,且存在个别极低的情况(个别楔焊点拉力值<0.03 N);CuPd₃ 镀钯 Cu 线拉力值满足要求,但波动较大,稳定性差;

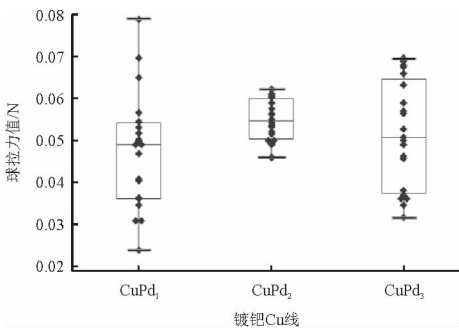


图 7 镀钯 Cu 线楔焊点拉力值统计

Fig.7 Statistics of tensile values of palladium plated copper wire wedge-bonded points

Fig.6 Morphology of the neck of ball-bonded point and fracture morphology after thermal cycling of CuPd₂ palladium plated Cu wire

CuPd₂ 镀钯 Cu 线,楔焊点拉力值较高,且稳定性好。

图 8 为 3 种镀钯 Cu 线第二焊点的键合形貌。对于 CuPd₁ 镀钯铜线,由于其伸长率较低,且存在加工硬化现象,楔焊点键合过程中,镀钯 Cu 线在超声、压力和温度等多场作用下形成鱼尾形状,但由于其塑性较差,键合过程中镀钯 Cu 线在劈刀作用下形变程度较低,进而导致键合面积降低。此外,由于 CuPd₁ 镀钯 Cu 线形变性能较差,键合过程中在楔焊点颈部产生裂纹,从而出现楔焊点拉力值极低的现象;该类键合点塑封后,经过冷、热循环后,会产生楔焊点颈部断裂,从而导致器件

失效,见图 9。对于 CuPd₃ 镀钯 Cu 线,伸长率较高,塑性较好,键合过程中易于形变,但键合条件的微小差异将导致楔焊点形貌差异较大,进而产生不规则的鱼尾形貌,导致楔焊点键合面积波动较大,其楔焊点拉力值波动也较大。此外,由于其较易于形变,楔焊点鱼尾不规则,楔焊点键合完成后,在劈刀和线夹共同作用下镀钯 Cu 线拉断位置波动较大,尾丝留取过程中出现尾丝长度不一致现象,进而影响下一个球焊点形貌,造成球剪切力波动程度增加。CuPd₂ 镀钯 Cu 线楔焊点鱼尾形貌较为规则,其楔焊点拉力值较好,且一致性高。

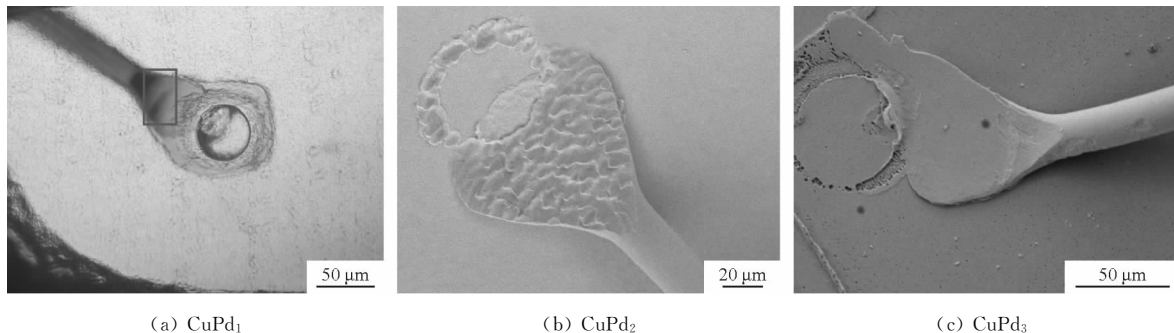


图 8 3 种镀钯 Cu 线第二焊点的键合形貌

Fig.8 Bonding morphologies of CuPd₁, CuPd₂, CuPd₃ wedge-bonded point

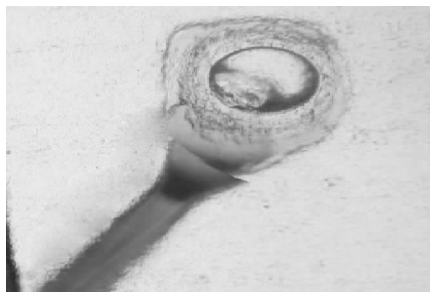


图 9 热循环后 CuPd₁ 楔焊点形貌

Fig.9 Morphology of CuPd₁ wedge-bonded point after thermal cycle

3 结 论

(1)伸长率为 4%~6% 的镀钯 Cu 线(CuPd₁)球键合点颈根部及颈部出现微小裂纹,楔键合点键合面积较小,球焊点拉力值、楔焊点拉力值较低。

(2)对于伸长率高于 16% 的镀钯 Cu 线(CuPd₃)球焊点形貌圆度差,球焊点形状波动较大;楔焊点鱼尾不规则,球剪切力值和楔焊点拉力值波动范围较大。

(2)伸长率为 12%~15% 的镀钯 Cu 线具有较好的力学性能,球焊点形貌、楔焊点鱼尾形貌较规则,球拉力值、球剪切力值和楔焊点拉力值较高,一致性好。

参 考 文 献

[1] PREETI C H, ZHONG Z W, MICHAEL P. Copper wire bonding

concerns and best practices[J]. Journal of Eletronic Materials, 2013, 42(8): 2 415-2 434.

[2] MÄRZ B, GRAFF A, KLENGEL R, et al. Interface microstructure effects in Au thermosonic ball bonding contacts by high reliability wire materials[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 2 000-2 005.

[3] 王小钰,张茹,李海新.DBC 铜线键合工艺参数研究[J].电子与封装, 2023, 23(6): 31-37.

[4] 李明茂,汪建华,袁静.超细铜线拉制过程中断线原因分析与对策[J].特种铸造及有色合金, 2012, 32(6): 583-586.

[5] DAVID G, SABINE H MANFRED R, et al. Heavy copper wire-bonding on silicon chips with aluminum-passivated Cu bond-pads[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 156(1): 41-45.

[6] CHEN I, LAI Y S, WANG Y W, et al. Investigation of growth behavior of Al-Cu intermetallic compounds in Cu wire bonding[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(1): 125-129.

[7] TEPPEI K, MASAFUMI K, SATORU O, et al. Ultra thermal stability of LED die-attach achieved by pressureless Ag stress-migration bonding at low temperature[J]. Acta Materialia, 2015, 89 (1): 133-140.

[8] MARTIN S R, CHRISTIAN E. The reliability of wire bonding using Ag and Al[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 63(1): 336-341.

[9] MOTOKI E, NORITOSHI A, TAKASHI Y, et al. Microstructural characterization of alloyed palladium coated copper wire under high temperature[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 120: 114 125.

[10] TSENG Y W, HUNG F Y, LUI T S. Microstructure, tensile and electrical properties of gold-coated silver bonding wire[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55 (3): 608-612.

Gd 含量对 Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr 合金的凝固组织及力学性能的影响

潘俊霖 陈乐平 周 全 袁源平
(南昌航空大学 航空制造工程学院)

摘 要 以 Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr 合金为对象,采用 SEM、XRD、EDS 及万能拉伸试验机等手段,研究了 0.5%~5% (质量分数)的 Gd 含量对合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,在 0.5%~5% 范围内,随着 Gd 含量增加,合金的晶粒尺寸呈先减小后增大、抗拉强度先增大后减小的趋势。当 Gd 含量为 2% 时,合金的晶粒尺寸和抗拉强度分别为 37.72 μm 和 276.99 MPa,相较于 Gd 含量为 0.5% 时分别减小了 42.6% 和提高了 37.5%。另外,伸长率则随 Gd 含量增加呈逐渐减小的趋势。

关键词 Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr 合金;Gd 合金化;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Gd on the Solidification Microstructure and Mechanical Properties of Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr Alloy

Pan Junlin, Chen Leping, Zhou Quan, Yuan Yuanping
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of Gd content of 0.5%~5% (mass fraction) on the solidification structure and mechanical properties of the Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr alloy were analyzed by SEM, XRD, EDS and universal tensile testing machine. The results reveal that in the range of 0.5%~5%, with the increase of Gd content, the grain size of the alloy is firstly decreased and then increased, while the tensile strength is increased firstly and then decreased. When the Gd content is 2%, the grain size and tensile strength of the alloy reach up to 37.72 μm and 276.99 MPa, respectively, which are reduced by 42.6% and increased by 37.5% compared to that with Gd content of 0.5%. The elongation of the alloy is gradually decreased with the increase of Gd content.

Key Words: Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr Alloy, Gd Alloying, Solidification Structrue, Mechanical Properties

收稿日期:2023-04-12;修改稿收到日期:2023-05-22
基金项目:江西省科技重点研发计划资助项目(20212BBE53018);南昌航空大学研究生创新专项资金资助项目(YC2023-S720)
第一作者简介:潘俊霖,男,2000 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1264847169@qq.com
通信作者:陈乐平,男,1964 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:jnnclp@163.com
引用格式:潘俊霖,陈乐平,周全,等. Gd 含量对 Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr 合金的凝固组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9): 1 265-1 269.
PAN J L, CHEN L P, ZHOU Q, et al. Effects of Gd on the solidification microstructure and mechanical properties of Mg-4Y-2.5Nd-xGd-0.5Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 265-1 269.

[11] HSUEH H W, HUNG F Y, LUI T S, et al. Microstructure, electric flame off (EFO) characteristics and tensile properties of silver-lanthanum alloy wire[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54 (2): 2 564-2 569.

[12] LIA B H, YEA J T, LIAO J K, et al. Effect of pretreatments on the metal-ceramic bonding strength of a Pd-Ag alloy[J]. Journal of Dentistry, 2014, 42(3): 319-328.

[13] HUANG W H, LIN K L, LIN Y W, et al. The intermetallic compound formation for the wire bond between an Al pad and Ag-xPd alloy wire[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45 (12): 6 130-6 136.

[14] CHUANG T H, CHEN C H. Mechanism of the electromigration in Ag-Pd alloy bonding wires[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2018, A49: 5 904-5 910.

[15] 丁雨田,胡立杰,胡勇,等.单晶铜键合丝的球键合性能研究[J].特种铸造及有色合金,2009,29(6): 582-584.

[16] DU Y H, LIU Z Q, JI H J, et al. The mechanism of Pd distribution in the process of FAB formation during Pd-coated Cu wire bonding[J].Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29: 13 774-13 781.

[17] QIN W, ANDERSON T, CHANG G. Mechanism to improve the reliability of copper wire bonding with palladium-coating of the wire [J]. Microelectronics Reliability, 2019(8): 239-244.

(编辑:刘晨辉)