

耐热镁合金的研究现状与发展方向

闫蕴琪, 张廷杰, 邓 炬, 周 廉

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 介绍了耐热镁合金的研究现状。Cu, Ca, Sc, Sr 和稀土元素合金化可以改善镁合金的耐热性能。合金化、挤压和半固态加工等热塑性变形技术能促使镁晶胞中的棱柱面(10 $\bar{1}$ 0)和棱锥面(10 $\bar{1}$ 1)参与滑移, 提高该类镁合金的力学性能。超塑成型技术是制备高性能耐热镁合金部件的有效途径。

关键词: 耐热镁合金; 合金化; 变形行为

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2004)06-0561-05

1 引言

随着环保和节能意识的增强, 材料研究者和产品设计者愈来愈重视产品的轻量化和可回收等问题。作为目前最轻的工程金属材料, 被誉为“21世纪绿色工程材料”的镁合金应用成为材料研究和应用界的关注热点^[1-6]。目前, 中国兴起了一股镁合金的研究、生产和应用的开发热潮^[7]。从全球镁合金的研究方向看, 存在有3个研究趋势(如图1): (1) 以追求轻量化(高比强度)的室温用镁合金为研究目标, 从 Mg-Al-Mn 合金发展到 Mg-Li 系列合金^[8-10]。(2) 追求高模量和高强度的颗粒或短纤维增强镁基复合材料的研究^[11,12]。(3) 追求高温性能的耐热镁合金, 从 Mg-RE 合金到 Mg-Sc 系列合金的开发^[13]。

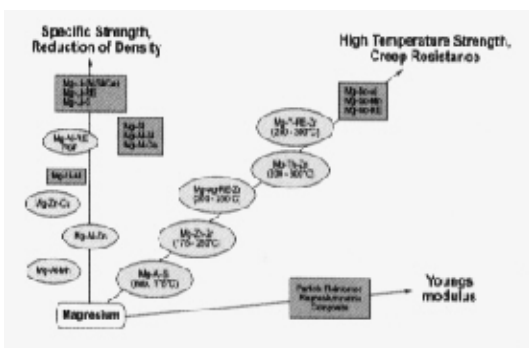


图1 镁合金的研究趋势

Fig.1 The research trend of Mg alloys

本文介绍了耐热镁合金的研究现状, 阐明该类镁合金的发展前景, 突出讨论合金元素的作用和耐热镁合金的变形行为。同时, 提出研究和开发高性能耐热镁合金及其变形加工技术具有重要意义。

2 耐热镁合金研究现状

镁合金耐热性差是限制其应用的主要问题之一, 提高耐热性可以扩大应用范围。为此, 世界各国开展了大量的研究工作^[13-16]。国内外耐热镁合金的应用对象, 主要是轿车/微型车的发动机及其传动机构零部件, 如变速箱壳体, 汽缸体, 汽缸盖, 进/排气管等。因此, 它们的使用性能要求满足: 工作温度高于120℃; 应力范围35 MPa~70 MPa; 室温延伸率>3%; 耐腐蚀和加工性能良好; 并且易回收。镁合金的高温变形特点是晶内位错运动与晶界滑移相结合。因此, 耐热镁合金的设计思路遵循强化基体与晶界、限制基体位错运动及阻止晶界滑移的原则。综合运用基体的固溶强化、时效强化和弥散强化, 同时, 弥散小颗粒对晶界的钉扎作用, 促使镁合金形成复合强化机制, 是研究和开发耐热镁合金的途径。耐热镁合金在汽车和电讯工业上的发展和应用步伐很快, 如美国的 Mg-Th 合金和俄罗斯的 Mg-Nd 合金^[3,13], 都是通过合金化可以改善合金的性能。

2.1 合金元素的作用

提高镁合金耐热性最基本的做法是合金化。比如, 在镁合金中添加适量的稀土元素, 可以增加合金的流动性, 降低微孔率, 提高气密性, 显著改善热裂

收到初稿日期: 2002-12-19; 收到修改稿日期: 2004-03-04

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2003033090)

作者简介: 闫蕴琪, 男, 1973生, 博士后, 西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231078,

E-mail: crosbyyan@hotmail.com

和疏松现象,使合金在 200℃~300℃ 高温下仍具有高的强度和抗蠕变性能。合金元素的其它作用已归纳如表 1, 往往通过 1 种或多种元素进行合金化, 取得理想的效果。

2.2 新合金的研制

应用最广泛的耐热镁合金是 Mg-Al 系列合金, 如 AS 合金和 AE 合金已经过几十年的深入研究, 相当成熟。刘正^[17]开展了向压铸 AM50 合金中添加铈元素来改善合金耐热性的研究工作; 加入铈后, 合金从室温

到 200℃ 时的力学性能均得到了改善。AM50-Nd 合金中形成了金属间化合物 Mg₉Nd, 并弥散分布于合金基体上, 对晶界的滑移起到了抑制作用, 从而产生了强化效果, 使合金的高温强度得到提高。丁文江^[18]课题组开发的改型 AZ 合金, 在降低 Al 含量的基础上, 添加 Si, Sc 等元素, 使 AZ 合金性能有了很大改善, 如表 2 所示。最近, 日本研究者研制出 1 种 ACM522 合金, 该合金采用 Ca 和 RE 双元合金化 Mg-Al 合金, 使合金使用温度达到 200℃^[19]。

表 1 合金元素对镁合金性能影响
Table 1 Effect of alloying elements on mechanical properties

Elements	Effects
Al	Solution strengthening, precipitation strengthening at low temperature(<120℃), big advantage of better castability, higher tendency for microporosity
RE	Advantage of better castability, solution and precipitation strengthening at high and low temperature, raising corrosion resistance
Th	Higher tendency for microporosity, the most effective element for increasing high temperature strength and creep resistance, but radioactive
Y	Grains refinement, increasing high temperature strength and creep resistance, raising corrosion resistance
Zn	Inducing better castability, solution, improving melting solid flow, tendency for microporosity, few effects on corrosion property
Zr	Grain refinement, increasing in tensile properties at room temperature, affinity for Fe, Al and Si elements
Mn	Precipitation as Fe-Mn compound, grain refinement, increasing creep resistance and corrosion resistance
Si	Lowering the castability, weak grain refinement, affinity with Al, Zn and Ag elements, increasing creep resistance, but degrading corrosion resistance

表 2 几种典型的耐热镁合金力学性能的比较
Table 2 Mechanical properties comparison of various typical alloys

Alloys	Mechanical properties at RT			Creep resistance		Others
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	150℃, 50 MPa		
				Creep ratio / s ⁻¹		
WE54	265	205	4			
WE43	252	190	7	Applied for long term at 200℃~250℃		Used in high performance missiles and automobiles; higher cost and bitter castability
AZ91	222	126	5.3	5.0×10 ⁻⁸		Better castability, better mechanical properties at HT
Alloy 1	265	166	4.4	9.6×10 ⁻⁹		Better castability, better mechanical properties at RT and HT
Alloy 2	264	164	4.5	4.6×10 ⁻⁹		Better castability, better mechanical properties at RT and HT
Alloy 3	259	168	3.3	3.1×10 ⁻⁹		Better castability, better mechanical properties at RT

Cu 是提高 Mg-Zn 系列合金力学性能的有效因素, 已研制出的 ZC63 合金(Mg-6Zn-3Cu-0.5Mn)具有代表性, 显示出较高的高温性能, 也许是 Cu 存在于共晶相 Mg(Cu, Zn)₂ 中的缘故^[20]。

各种稀土元素在镁中的溶解度不同, 增加的顺序

为镧、混合稀土、铈、镨、钕。它对常温、高温力学性能的良好影响也随之增加。以铈为主要添加元素的 ZM6 合金在热处理后不但具有高的室温力学性能, 而且还有良好的高温瞬时力学性能和抗蠕变性能, 可在室温下使用, 也可在 250℃ 下长期使用。随着含钆的

耐热新型铸造镁合金的出现，近年来铸造镁合金重新受到国内外航空工业的青睐。含 Th 的镁合金如 HZ32A 和 HK31A 具有 350℃ 的使用温度；但 Th 元素的放射性限制了其应用^[19]。英国开发最成功的含 Y 元素 WE54 和 WE43 合金，使用温度达到 250℃，性能如表 2 和表 3。在研究 Mg-Sc-Mn 系列合金时，Buch^[21]发现 Sc 和 Mn 原子结合生成 Mn₂Sc 化合物，具有强烈的退火硬化效应，在同等条件下，该系列合金的蠕变速率比 WE43 合金降低近 2 个数量级^[22]。

Noranda 公司和 Dead Sea 铝业公司分别开发了专利保护的耐热镁合金，代号分别为 Noranda A1, A2 和 N 系列合金，MRI15X 系列合金，分别为含 Sr 的 ASr 合金和 AZ91 合金的改进型，在 150℃ 时的高温性能优于商用 AZ91D 合金和 AE42 合金的性能^[23,24]，性能如表 3 和图 3。在 20 世纪 90 年代，开发含 Ca 镁

合金是耐热镁合金研究的主要目标之一^[25]。

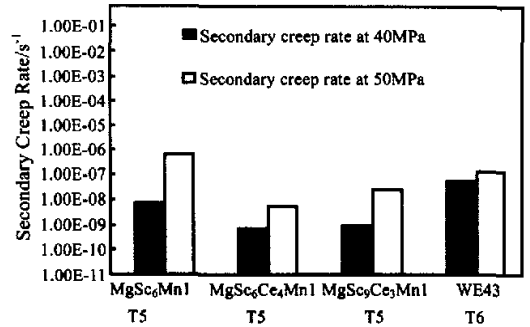


图 2 含 Sc 耐热镁合金的蠕变性能比较
Fig.2 Comparison of creeping rate for heat resistance Mg alloys with Sc

表 3 Noranda 公司耐热镁合金力学性能的比较
Table 3 Mechanical properties comparison of various typical alloys in Noranda company

Alloys	σ_1 /MPa			$\sigma_{0.2}$ /MPa			δ /%			Creep resistance/% (35 MPa, 200 h)		Corrosion ratio /mg·cm ⁻² ·d ⁻¹
	RT	150℃	175℃	RT	150℃	175℃	RT	150℃	175℃	150℃	175℃	
AZ91	239	170	138	157	105	89	4.7	18.0	20.5	1.21	1.84	0.10
AE42	226	142	121	135	87	81	9.2	22.5	23.1	0.07	0.14	0.21
A380	290	255	248	155	149	154	3.2	6.4	7.1	0.18	0.15	0.34
AS41	249	153	127	132	94	85	8.9	16.8	18.0	0.13	0.5	0.16
A1	202	164	148	145	108	103	4.0	13.6	14.8	0.03	0.09	0.09
A2	233	149	133	138	102	97	8.8	16.4	21.4	0.07	0.05	0.14
N	236	152	137	133	101	98	10.3	16.4	20.1	0.12	0.06	0.13

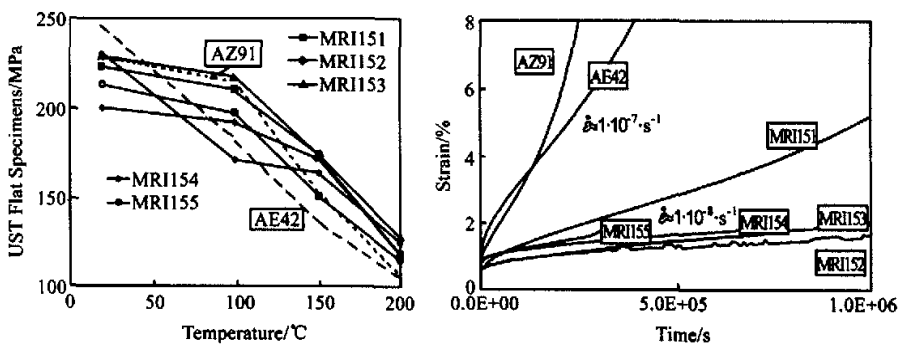


图 3 MRI 合金的力学性能
Fig.3 Mechanical properties of MRI alloys

3 耐热镁合金的塑性变形

全世界每年生产镁材约 30 万吨，其中压铸材料占 90%，变形材料仅占 0.5%，用量甚微。但是，经过挤压、锻造、轧制等工艺制备的镁合金能够提供更多样

化的力学性能及可后续热处理，进一步提高韧性、焊接性能等，可以满足更多样化的结构件需求^[26,27]。因此，研究耐热镁合金的塑性变形非常有意义。

根据 Von Mises 准则，当晶体材料产生塑性变形时，每个晶粒必须至少有 5 个独立滑移系，由于镁晶

胞的晶轴比 c/a 为 1.63, 因此除了(0001)基面和(10 $\bar{1}$ 0)棱柱面 4 个滑移系, 很显然难以满足变形要求, 如图 4。尽管镁单晶在取向有利时, 伸长率可达 100%, 但对于多晶镁, 室温和低温塑性仍很低, 容易脆断。而当温度提高到 150℃~225℃时, 棱柱面(10 $\bar{1}$ 0)和棱锥面(10 $\bar{1}$ 1)也参加滑移, 高温塑性有所提高。合金化可以减小镁的晶轴比 (c/a)和基面滑移的分切应力。晶轴比的降低, 可促使棱柱面(10 $\bar{1}$ 0)和棱锥面(10 $\bar{1}$ 1)参与滑移; 使基面分切应力接近于非基面分切应力时, 可促使位错在此 2 种面上交滑移, 对塑性变形有利。

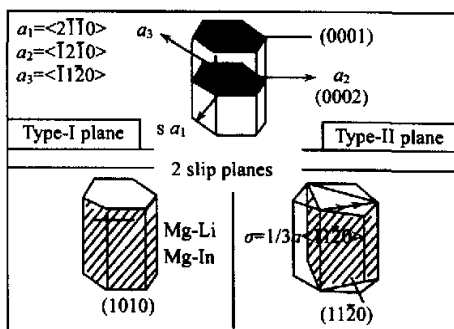


图 4 镁的滑移系

Fig.4 Sliding systems of Mg

挤压和半固态加工技术是提高镁合金制件性能的有效途径, 这类技术的应用是当前的研究热点。李峰^[28]对挤压 AZ61 镁合金板热处理工艺和力学性能进行了研究, 具体做法是在 200℃下对合金进行不同时间的失效处理。合金的抗拉强度、屈服强度总体上是随失效时间的延长而提高, 延伸率则下降; 与铸态相比, 屈服强度提高幅度较大, 纵向提高幅度优于横向。合金的晶粒并未出现拉长现象, 说明在挤压过程中已发生了再结晶, 产生各向异性的原因可能是挤压过程中形成的变形组织所致。这项研究为利用热处理改善变形镁合金力学性能提供了一定的借鉴。张奎^[29]对 AZ91D 镁合金挤压坯料二次加热中的组织演变和半固态挤压成形工艺的优化。其研究表明, 半固态挤压过程中, 合金组织不发生再结晶现象, 挤压后组织二次加热到 420℃时发生完全再结晶, 形成细小的等轴晶; 半固态挤压成形可避免铸件中产生皮下气孔、疏松等缺陷, 还允许进行热处理。

超塑性成型技术是加工耐热镁合金部件的可行方法之一。目前, 镁合金超塑性研究开展比较广泛, 从细晶、低速率超塑性发展到大晶粒、高速变形条件下的超塑性研究(见图 5), 已经有一些成果应用到成型技术中^[30,31]。

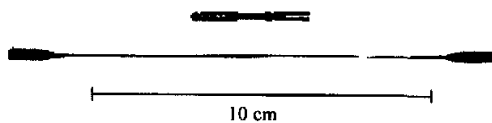


图 5 细晶 Mg-RE-Zr 合金的超塑性

Fig.5 Superplasticity of Mg-RE-Zr magnesium alloy with ultra-fine grains

4 应用与开发

采用镁合金制造汽车零部件, 可显著减轻汽车整车重量, 而汽车所用燃料的 60%消耗于汽车自重, 车重每减轻 10%, 可节约燃料 5.5%, 因此, 国外近年来镁合金在汽车制造中的应用逐步增长。但我国在这方面的开发刚刚起步。国内一些镁合金生产厂家强烈要求开发镁合金型材的成型加工技术, 国家科技部也加快开发这方面的高新技术, 并列为国家“十五”攻关项目。虽然中国是镁材料大国, 但在开发高性能耐热镁合金上仍很欠缺, 开发具有自主知识产权的高性能耐热镁合金是镁合金研究者的努力方向。

5 结束语

开发和研究镁合金已成为 1 种趋势, 在突破镁合金熔炼技术和价格等瓶颈因素后, 发挥镁合金作为“21 世纪绿色工程材料”的优势, 应努力扩大其应用范围, 提高其使用温度。在开发镁合金型材的塑性加工技术和具有自主知识产权的高性能耐热镁合金方面应加大力度, 使我国尽快从镁大国转变为镁强国。

参考文献 References

- [1] Kim N J, Lee C S, Eylon D. *LiMAT-2001*[C]. Pusan: Center for Advanced Aerospace Materials, POSTECH, 2001: 175
- [2] Aghion E, Eliezer D. *Magnesium 2000* [C]. Dead Sea: Dead Sea Magnesium Company, 2000: 43
- [3] Kainer K V. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 3
- [4] Aghion E, Eliezer D. *Magnesium 2000*[C]. Dead Sea: Dead Sea Magnesium Company, 2000: 1
- [5] Kojima Y. *Materials Transactions*[J], 2001, 42(7): 1 154~1 159
- [6] Aghion E, Eliezer D. *Magnesium 2000*[C]. Dead Sea: Dead Sea Magnesium Company, 2000: 478~485
- [7] Robaert E. *Light Metal Age*[J], 2002, 2: 58
- [8] Kainer K V. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 280~284
- [9] Haferkamp H. *Materials Transactions*[J], 2001, 42(7): 1 192~1 198

- [10] Kim N J, Lee C S, Eylon D. *LiMAT-2001*[C]. Pusan: Center for Advanced Aerospace Materials, 2001:411~416
- [11] Kainer K V. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 207~214
- [12] Kainer K V. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 221
- [13] Kainer K V. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 14~22
- [14] Kaplan H, Hryn J, Clow B. *Magnesium Technology 2000*[C]. Nashville: TMS, 2000: 279~284
- [15] Luo A, Shinoda T. *Magnesium Alloy Having Superior Elevated-Temperature Properties and Diecastability*[P]. IMRA America Inc, US Patent: US5855697, 1997
- [16] Mordike B L. Magnesium and Magnesium Alloys[J]. *轻金属*, 2001, 1: 51
- [17] Li R D. *FICMES 2002*[C]. Shanghai: Northeastern University Press, 2002: 71
- [18] Jing W J, Yuan G Y. *Nonferrous Metal Processing*(有色金属加工)[J], 2002, 31(3): 27~36
- [19] Pekguleryuz M O. *Journal of Japan Institute of Light Metals*[J], 1992, 42(12): 679
- [20] Polmear I J. *Materials Science and Technology*[J], 1994, 1: 1~16
- [21] Aghion E, Eliezer D. *Magnesium 97*[C]. Beer-Sheva: MRI, 1997: 163
- [22] Kainer K V ed. *Magnesium Alloys and their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 35~40
- [23] Pekguleryuz M O, Luo A. *Creep Resistant Magnesium Alloys for Diecasting Applications*[P]. ITM Inc, International Patent Application: WO 96/25529, 1996
- [24] Mordike B L, Kainer K U. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Wolsburg:Verkstoff-Informatio, 1998: 37~47
- [25] Chang S Y. *Materials Transactions*[J], 2000, 41(10): 1 337~1 341
- [26] Robert E B. *Light Metal Age*[J], 2002, 2: 80
- [27] Ogawa N, Shiomi M, Osakada K. *Machine Tools & Manufacture*[J], 2002, 42: 607~614
- [28] Li R D. *FICMES 2002*[C]. Shenyang: Northeastern University Press, 2002: 98
- [29] Li R D. *FICMES 2002*[C]. Shenyang: Northeastern University Press, 2002: 78
- [30] Kainer K V. *Magnesium Alloys and Their Applications*[C]. Munich: DGM, 2000: 342~348
- [31] Watanabe H, Mukai T, Ishikawa K. *Materials Transactions* [J], 2001, 42(1): 157

Research and Development of Heat Resistant Mg Alloys

Yan Yunqi, Zhang Tingjie, Deng Ju, Zhou Lian

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The research and development of heat resistant Mg alloys were reviewed and alloying these alloys was mentioned as the basic method improving the properties as well as Cu, Ca, Sc and Sr, rare-earth elements. Alloying, extrusion and semi-solid process were highlighted to introduce the slipping of prismatic plane (10 $\bar{1}$ 0) and pyramidal plane (10 $\bar{1}$ 1) which can benefit the mechanical properties. Superplastic process was the effective method to fabricate the heat resistant Mg alloys parts.

Key words: heat resistant Mg alloys; alloying; deformation behaviors

Biography: Yan Yunqi, Postdoctor, Titanium Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P.R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: crosbyyan@hotmail.com

耐热镁合金的研究现状与发展方向

作者: [闫蕴琪](#), [张廷杰](#), [邓炬](#), [周廉](#)
作者单位: [西北有色金属研究院, 陕西, 西安, 710016](#)
刊名: [稀有金属材料与工程](#) [ISTIC](#) [EI](#) [SCI](#) [PKU](#)
英文刊名: [RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2004, 33(6)
被引用次数: 59次

参考文献(31条)

1. [Kim N J;Lee C S;Eylon D LiMAT-2001](#) 2001
2. [Aghion E;Eliezer D Magnesium 2000](#) 2000
3. [Kainer K V Magnesium Alloys and Their Applications](#) 2000
4. [Aghion E;Eliezer D Magnesium 2000](#) 2000
5. [Kojima Y Project of Platform Science and Technology for Advanced Magnesium Alloys](#)[外文期刊] 2001(07)
6. [Aghion E;Eliezer D Magnesium 2000](#) 2000
7. [Robaert E 查看详情](#) 2002
8. [Kainer K V Magnesium Alloys and Their Applications](#) 2000
9. [Haferkamp H Alloy Development, Processing and Applications in Magnesium Lithium Alloys](#)[外文期刊] 2001(07)
10. [Kim N J;Lee C S;Eylon D LiMAT-2001](#) 2001
11. [Kainer K V Magnesium Alloys and Their Applications](#) 2000
12. [Kainer K V Magnesium Alloys and Their Applications](#) 2000
13. [Kainer K V Magnesium Alloys and Their Applications](#) 2000
14. [Kaplan H;Hryn J;Clow B Magnesium Technology 2000](#) 2000
15. [Luo A;Shinoda T Magnesium Alloy Having Superior Elevated-Temperature Properties and Diecastability](#) 1997
16. [Mordike B L Magnesium and Magnesium Alloys](#)[外文期刊] 2001(4)
17. [Li R D FICMES 2002](#) 2002
18. [Jing W J;Yuan G Y 新型镁合金的研究开发与应用](#)[期刊论文]-[有色金属加工](#) 2002(03)
19. [Pekguleryuz M O 查看详情](#) 1992(12)
20. [Polmear I J 查看详情](#) 1994
21. [Aghion E;Eliezer D Magnesium 97](#) 1997
22. [Kainer K V Magnesium Alloys and their Applications](#) 2000
23. [Pekguleryuz M O;Luo A Creep Resistant Magnesium Alloys for Diecasting Applications](#) 1996
24. [Mordike B L;Kainer K U Magnesium Alloys and Their Applications](#) 1998
25. [Chang S Y 查看详情](#)[外文期刊] 2000(10)
26. [Robert E B 查看详情](#) 2002
27. [Ogawa N;Shiomi M;Osakada K 查看详情](#) 2002
28. [Li R D FICMES 2002](#) 2002

29. [Li R D FICMES 2002](#) 2002
30. [Kainer K V Magnesium Alloys and Their Applications](#) 2000
31. [Watanabe H;Mukai T;Ishikawa K 查看详情](#) 2001(01)

本文读者也读过(4条)

1. [梁维中, 吉泽升, 左锋, 洪艳, 刘洪汇, 李军, 刘洪德](#) 耐热镁合金的研究现状及发展趋势[期刊论文]-[特种铸造及有色合金](#)2003(2)
2. [余琨, 黎文献, 王日初, 马正青](#) 变形镁合金的研究、开发及应用[期刊论文]-[中国有色金属学报](#)2003, 13(2)
3. [张新明, 彭卓凯, 陈健美, 邓运来](#) 耐热镁合金及其研究进展[期刊论文]-[中国有色金属学报](#)2004, 14(9)
4. [谢建昌, 李全安, 李建弘, 张兴渊, XIE Jian-chang, LI Qua-nan, LI Jian-hong, ZHANG Xing-yuan](#) 耐热镁合金及其开发思路[期刊论文]-[铸造技术](#)2008, 29(1)

引证文献(61条)

1. [王铁旦, 刘洪喜, 林波, 孟春蕾, 蒋业华, 周荣锋](#) 复合改性处理对AZ91镁合金表面结构和耐蚀性能的影响[期刊论文]-[材料热处理学报](#) 2011(5)
2. [王瑞权, 张大华, 刘二勇, 李向威, 黄海军](#) MgCO₃对AM60B镁合金组织形貌及性能的影响[期刊论文]-[铸造工程](#) 2010(1)
3. [沙桂英, 吕勤云, 于涛, 孙晓光, 王洪顺](#) 搅拌摩擦加工对Mg-2.67%Nd-0.5%Zn-0.5%Zr合金动态变形行为的影响[期刊论文]-[航空材料学报](#) 2010(2)
4. [林波, 刘洪喜, 曾维华, 董旭刚](#) 离子注入AZ91镁合金表面结构和耐蚀性能研究[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2010(12)
5. [钱佳, 朱丽娟, 刘瑞华, 刘越](#) Mg-6Al-0.5Y-1.0Ce合金固溶处理工艺的研究[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2009(4)
6. [李萍](#) 稀土对镁合金AZ81耐腐蚀性能的影响[期刊论文]-[腐蚀与防护](#) 2008(3)
7. [张清, 李全安, 文九巴, 张兴渊](#) Gd对镁合金AZ81耐腐蚀性能的影响[期刊论文]-[全面腐蚀控制](#) 2007(6)
8. [刘年春, 谢卫东, 彭晓东](#) Mg-Sr合金制备技术新进展[期刊论文]-[轻金属](#) 2007(11)
9. [李洪洋, 赵瑞海, 曾攀, 李培杰](#) 超大型镁合金压铸机定型板温度场及热应力的有限元分析[期刊论文]-[铸造](#) 2006(1)
10. [李萍](#) Sn对Mg-6Al合金力学性能的影响[期刊论文]-[有色金属](#) 2010(4)
11. [曾兵, 戈晓岚, 陈志超](#) 镁合金表面Ni-P-纳米SiC复合化学镀层的耐腐蚀性能[期刊论文]-[材料保护](#) 2010(7)
12. [李萍, 张东晓](#) Sb对Mg-6Al合金力学性能的影响[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2009(6)
13. [李萍, 宁怀明](#) Ca对Mg-6Al合金力学性能的影响[期刊论文]-[轻合金加工技术](#) 2009(4)
14. [李萍, 张东晓](#) Sb对Mg-6Al合金力学性能的影响[期刊论文]-[铸造技术](#) 2009(5)
15. [李永军, 张奎, 李兴刚, 马鸣龙, 张康, 徐玉磊](#) 均匀化处理和挤压对Mg-Y-RE-Zr合金组织性能的影响[期刊论文]-[特种铸造及有色合金](#) 2009(7)
16. [张大华, 王瑞权, 吴召刚, 张丽婷, 周恩俊](#) Y含量对Mg-Zn-Y合金显微组织及力学性能的影响[期刊论文]-[上海有色金属](#) 2009(3)
17. [李萍](#) Nd对镁合金AZ91力学性能的影响[期刊论文]-[有色金属](#) 2008(1)
18. [谢建昌, 李全安, 李建弘, 张兴渊](#) 时效时间对Mg-8Al-1Zn-3Ca合金组织及力学性能的影响[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2008(2)
19. [吕正玲, 许春香, 刘方政](#) Mg-Al-Zn-Y合金的制备及钇对合金性能的影响[期刊论文]-[铸造技术](#) 2008(10)

20. [万迪庆, 杨根仓, 朱满, 程素玲, 周尧和](#) Mg70Zn28Y2合金凝固过程、凝固组织及包晶反应初生相研究[期刊论文]-[稀有金属材料与工程](#) 2007(10)
21. [谢建昌, 李全安, 李建弘, 张兴渊](#) Ca对AZ81镁合金高温性能的影响[期刊论文]-[轻金属](#) 2007(12)
22. [张清, 李全安, 文九巴, 张兴渊](#) 镁合金AZ51直接化学镀镍研究[期刊论文]-[轻金属](#) 2007(12)
23. [张赞龙, 刘六法, 卫中山, 卢晨](#) 压铸Mg-5Al-xSi合金的组织与性能研究[期刊论文]-[稀有金属材料与工程](#) 2006(11)
24. [张清, 李全安, 文九巴, 张兴渊](#) Y对镁合金AZ91力学性能的影响[期刊论文]-[新技术新工艺](#) 2006(6)
25. [白亮](#) Mg-Al-Si系和Mg-Zn-Al系镁合金组织控制的基础研究[学位论文]硕士 2006
26. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) 钇在耐热镁合金中的应用[期刊论文]-[稀土](#) 2011(2)
27. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) Sm对Mg-10Y合金组织的细化作用[期刊论文]-[材料工程](#) 2011(3)
28. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) Sb对Mg-6Al合金腐蚀行为的影响[期刊论文]-[兵器材料科学与工程](#) 2011(1)
29. [张清, 李全安, 张兴渊, 周伟](#) Mg-Gd系耐热镁合金的研究进展[期刊论文]-[铸造](#) 2011(11)
30. [张清, 李全安, 张兴渊, 周伟](#) Bi合金化在耐热镁合金中的应用[期刊论文]-[铸造](#) 2011(9)
31. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) Mg-10Y-1.5Sm合金的组织学和力学性能[期刊论文]-[材料热处理学报](#) 2011(1)
32. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) 稀土Sm在耐热镁合金中的应用[期刊论文]-[铸造](#) 2010(3)
33. [马宏, 彭晓东, 周伟](#) Sr、Y复合添加AZ31镁合金高温力学性能的研究[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2010(24)
34. [李长青, 李全安, 张兴渊, 李克杰](#) Ca在耐热镁合金中的应用[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2010(16)
35. [孟凡岩, 鞠育平, 杨洁, 吴耀明, 王立民](#) 热处理工艺对Mg-RE-Zn-Zr系合金显微组织及力学性能的影响[期刊论文]-[长春工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)
36. [张青辉, 谭静, 郑天群, 黄维刚](#) 铝含量对Mg-Al-Zn-Si-Sb-RE合金的组织与强度与塑性的影响[期刊论文]-[四川冶金](#) 2007(3)
37. [翁康荣, 李永刚, 王松杰, 赵红亮, 关绍康](#) Mg-1.6Mn-1.5Si-0.3Ca合金的显微组织与力学性能[期刊论文]-[轻合金加工技术](#) 2007(5)
38. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) Mg-10Y-1.5Sm合金的组织学和力学性能[期刊论文]-[材料热处理学报](#) 2011(1)
39. [徐宋兵](#) 镁铝铈合金的制备与研究[学位论文]硕士 2006
40. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) Sb对Mg-6Al合金腐蚀行为的影响[期刊论文]-[兵器材料科学与工程](#) 2011(1)
41. [张清, 李全安, 井晓天, 张兴渊](#) Sb合金化在耐热镁合金中的应用[期刊论文]-[材料工程](#) 2009(12)
42. [王耀贵, 李全安, 张清, 张兴渊](#) Sn在耐热镁合金中的应用[期刊论文]-[轻金属](#) 2011(12)
43. [杨光昱, 介万奇, 郝启堂](#) Mg-xCa-5Zn-3Al-0.2Mn镁合金砂型铸造组织和力学性能研究[期刊论文]-[稀有金属材料与工程](#) 2006(2)
44. [任政, 张兴国, 庞磊, 张涛, 隋里, 金俊泽](#) 微钙合金化和电磁场对AZ31镁合金复合作用的研究[期刊论文]-[稀有金属材料与工程](#) 2009(9)
45. [张剑平, 艾云龙, 陈乐平](#) AZ91镁合金的抗高温蠕变性能和腐蚀性能的研究近况[期刊论文]-[铸造](#) 2007(8)
46. [陈广森, 吴国华, 黄玉光, 王玮, 卢晨](#) 高强高韧耐热镁合金的研究现状与展望[期刊论文]-[铸造工程](#) 2007(4)
47. [闫蕴琪, 张廷杰, 邓炬, 周廉, 陈昌麒, 刘培英](#) 变态Mg-Nd合金的组织转变和拉伸性能特征[期刊论文]-[稀有金属材料与工程](#) 2005(6)
48. [王小红, 张丁非, 彭建, 戴庆伟](#) AZ31棒材拉伸矫直工艺参数关系模型研究[期刊论文]-[系统仿真学报](#) 2011(12)
49. [刘滨, 张密林](#) Ce对Mg-Li-Al合金组织及力学性能的影响[期刊论文]-[特种铸造及有色合金](#) 2007(5)

50. [廖锬](#) [Sn、Ca合金化对ZA62镁合金显微组织和力学性能的影响](#)[学位论文]硕士 2006
51. [宋佩维](#) [往复挤压Mg-4Al-2Si合金的显微组织与高温力学性能](#)[期刊论文]-[金属热处理](#) 2010(2)
52. [宋佩维](#) [铸态Mg-4Al-2Si合金的显微组织与高温力学性能](#)[期刊论文]-[铸造技术](#) 2011(2)
53. [郭学锋](#).[杨文朋](#).[宋佩维](#) [往复挤压Mg-4Al-2Si合金的高温拉伸性能](#)[期刊论文]-[中国有色金属学报](#) 2010(6)
54. [黄明丽](#) [Mg-Zn-La三元系富镁角350℃等温截面相图的研究](#)[学位论文]硕士 2006
55. [马刚](#).[郭胜利](#) [稀土在镁合金中的应用](#)[期刊论文]-[宁夏工程技术](#) 2005(3)
56. [陈建波](#).[黄晓锋](#) [Mg-Zn-Al系镁合金研究现状与发展](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2011(22)
57. [李克杰](#).[李全安](#).[李建弘](#).[谢建昌](#) [含稀土Mg-Al系耐热镁合金的研究进展](#)[期刊论文]-[铸造技术](#) 2008(9)
58. [姚素娟](#).[易丹青](#).[李旺兴](#).[褚丙武](#) [高温镁合金的成分、组织设计与制备加工技术进展](#)[期刊论文]-[轻金属](#) 2007(9)
59. [黄德明](#).[刘红梅](#).[陈云贵](#).[唐永柏](#).[涂铭旌](#) [耐热铸造镁合金的研究应用进展](#)[期刊论文]-[轻金属](#) 2005(8)
60. [石雅静](#).[李全安](#).[任文亮](#).[张兴渊](#) [耐热镁合金的开发与研究现状](#)[期刊论文]-[轻合金加工技术](#) 2009(5)
61. [卫中山](#) [耐热压铸镁合金及其产业化技术研究](#)[学位论文]博士后 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xyjsclyc200406001.aspx