

挤压变形对 Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr 合金 组织和性能的影响

李永军, 张 奎, 李兴刚, 马鸣龙, 王海珍, 何兰强

(北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘 要: 对 Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr(EW75M)合金在不同条件下挤压变形后的组织和性能进行测试。结果表明: 随着挤压比的增大, 合金的强度和塑性均大幅度提高, 当挤压比增大到 20 以后, 晶粒细化对合金的强化效果趋于稳定; 当挤压筒温度由 400 ℃ 升高到 450 ℃ 时, 合金强度和伸长率的降幅均在 5% 以内, 挤压筒温度在 400 ~ 450 ℃ 变化时对合金挤压变形后的性能影响较小; 将合金均匀化处理(535 ℃、24 h)后直接进行挤压变形(挤压比 20, 挤压筒温度 400 ℃, 挤压速度 1~2 m/min), 其极限抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 335 MPa、240 MPa 和 16.5%。

关键词: 镁合金; 挤压比; 挤压筒温度; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Influence of extrusion on microstructures and mechanical properties of Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr magnesium alloy

LI Yong-jun, ZHANG Kui, LI Xing-gang, MA Ming-long, WANG Hai-zhen, HE Lan-qiang

(State Key Laboratory for Fabrication and Processing of Nonferrous Metals,
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The microstructures and mechanical properties of Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr (EW75M) alloys extruded under different conditions were tested. The results indicate that both the strength and plasticity are improved with increasing extrusion ratio. When extrusion ratio is more than 20, the effect of grain refinement on strengthening has little improvement. When the extrusion tube temperature increases from 400 ℃ to 450 ℃, the average grain size has little increase, and both strength and elongation are decreased by less than 5%. After being hot treated at 535 ℃ for 24 h, EW75M alloy is directly extruded under conditions of extrusion ratio of 20, extrusion tube temperature of 400 ℃ and extrusion speed of 1~2 m/min. After being extruded, the ultimate tensile strength, yield strength and elongation of EW75M reach 335 MPa, 240 MPa and 16.5%, respectively.

Key words: magnesium alloy; extrusion ratio; extrusion tube temperature; microstructure; mechanical property

目前, 大多数镁合金产品主要通过铸造方式获得, 变形产品较少。这主要是因为大多数镁合金为密排六方结构, 在室温下可开动的滑移系少, 塑性变形性能较差, 从而限制了其在工业上的应用。与铸造镁合金产品相比, 变形镁合金产品(如挤压、锻造、轧制)由于在塑性变形过程中消除了铸造缺陷, 细化了合金晶

粒, 合金的综合性能得到大幅度提高^[1-4]。张新明等^[5]研究了挤压温度对 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金组织性能的影响, 通过降低挤压温度可以使合金的晶粒显著细化, 同时提高合金的强度和塑性, 并指出该合金适宜的挤压温度在 420~440 ℃^[5], 表明选择适宜的塑性变形参数对提高合金综合性能的至关重要。Mg-Y-RE 系合金

作为一类新型高强耐热变形镁合金具有广阔的应用前景,通过研究制定合适的变形加工工艺成为其推广应用的基础,而目前国内外相关的研究报道较少,开展相关的实验研究对尽快实现该类合金的工业应用具有重要的意义。

本文作者以 Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr(EW75M) 镁合金作为研究对象,通过调整合金挤压变形时的挤压比和挤压筒温度,对合金在不同挤压变形工艺条件下的微观组织和力学性能进行观察和分析,研究变形工艺条件对合金微观组织和力学性能的影响,并结合实验结果分析塑性变形对 EW75M 合金的强化机制,为 EW75M 合金制定适宜的塑性变形工艺提供依据。

1 实验

实验铸锭经过锯切和车削加工后制备成端面平整的圆柱,其尺寸为 $d\ 93\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$ 。先将加工好的铸锭在 535 下均匀化处理 24 h,出炉后立即在 YH61-500G 型卧式挤压机上进行热挤压变形,实验的工艺参数分为两组:1) 挤压比分别为 10、15、20 和 30,挤压筒温度为 400 ;2) 挤压筒温度分别为 400、450 ,挤压比为 20。两组实验的挤压速度均为 1~2 m/min,并对挤压棒材进行在线水冷。从不同挤压条

件下的挤压棒材上分别取样,进行微观组织观察和力学性能测试。实验合金的化学成分如表 1 所列。

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of EM75M alloy (mass fraction, %)

Y	Gd	Nd	Zr	Mg
4.56	7.09	1.31	0.52	Bal.

2 结果与分析

2.1 不同挤压比下挤压后合金的微观组织和力学性能

图 1 所示为 EW75M 合金在不同挤压比下挤压后纵向微观组织。当挤压比为 10 时,合金动态再结晶不充分,晶粒比较粗大,平均晶粒尺寸在 35 μm 左右。当挤压比增大到 20 以后,合金的晶粒被明显细化,大尺寸晶粒的数量减少,晶粒大小较为均匀,平均晶粒尺寸在 20 μm 左右,表明变形程度增大后,合金的晶粒内位错密度增加,晶格畸变加剧,新晶粒形核数目增多而使晶粒细化;均匀化处理后残留的金属间化合物由于挤压变形的破碎作用,变成细小的点状颗粒相在晶界和晶粒内呈离散分布。当挤压比增大到 30

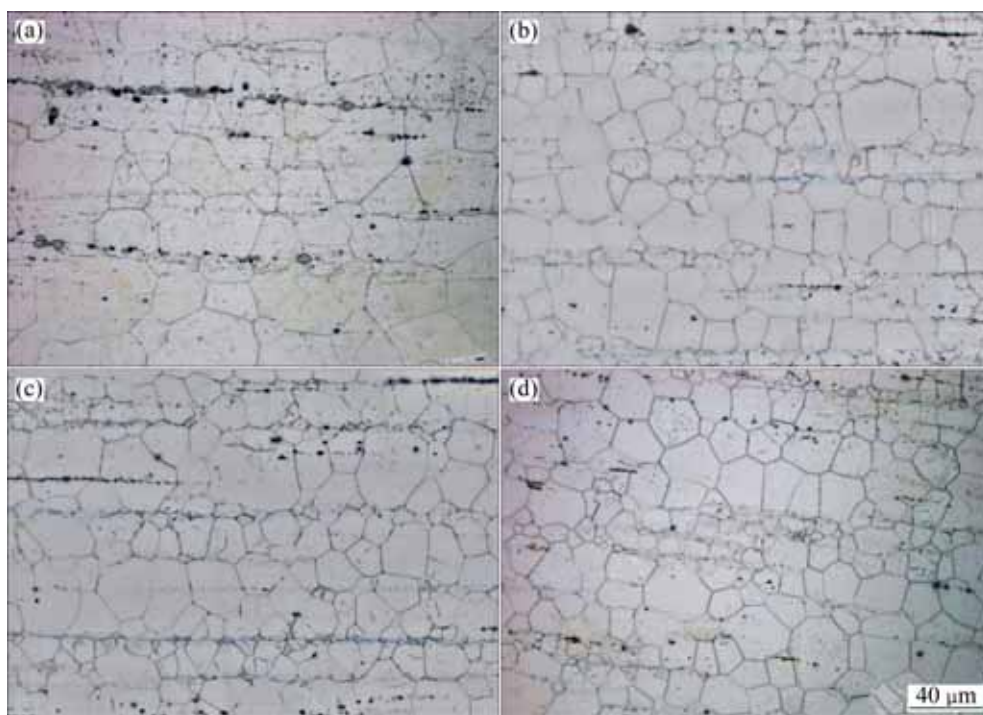


图 1 EW75M 合金在不同挤压比下挤压后纵向的微观组织

Fig.1 Longitudinal microstructures of EW75M alloys extruded at different extrusion ratios: (a) 10; (b) 15; (c) 20; (d) 30

时,挤压变形对晶粒细化的效果明显,但与挤压比为20时相比,平均晶粒尺寸没有明显减小,表明当挤压比达到20以后,挤压变形对合金的晶粒细化效果趋于稳定。在不同挤压比挤压后的合金中,都同时存在着大量细小的等轴晶粒和大尺寸晶粒,从而造成合金变形的不均匀性。这是由于镁合金的层错能较低,在热变形过程中,加工软化本应以动态回复为主,但因其晶体结构的对称性低,滑移系少,位错交滑移难以进行,因而在热变形时,镁合金的加工软化以动态再结晶为主^[6-8]。

图2所示为EW75M合金在不同挤压比下挤压棒材纵向的拉伸力学性能。与铸态合金相比,不同挤压比下挤压变形后合金的极限抗拉强度、屈服强度和伸长率均有大幅度提高。随着挤压比的增大,合金的变形程度增大,晶粒更加细小、均匀,合金的极限抗拉强度、屈服强度和伸长率都有不同程度的增加。挤压比从10增大到20,合金强度的提高幅度在20%左右,而合金伸长率从8%提高到16%,增加幅度达100%,表明挤压比增大后,合金晶粒的进一步细化对提高合金塑性的作用比提高强度的作用更大,晶粒尺寸对合金塑性的影响比对强度更明显。当挤压比从20增大到30后,合金的强度和伸长率与挤压比为20时相比没有进一步提高,表明当挤压比达到20以后,挤压变形对合金的细晶强化效果趋于稳定。挤压变形后,合金铸态组织中的缩松、气孔等缺陷被焊合,合金内部缺陷数量减少,合金的晶粒细化后相邻晶粒间更容易协

调变形,晶界数量增加从而延迟了裂纹的产生和扩展,同时提高了合金的强度和塑性^[9-10]。

图3所示为EW75M合金在不同挤压比下挤压后拉伸试样的断口组织和形貌。从断口的微观组织中可以看出,当挤压比从10增加到20后,合金中大晶粒的数量明显减少,动态再结晶形成了大量细小的等轴晶粒,合金断口中的解离平台和二次裂纹减少,断口中有较多的撕裂棱和韧窝,表现出韧性断裂的特征。镁合金在单向拉伸载荷作用下发生断裂时,初始裂纹一般起源于粗大的第二相,特别是晶界处的第二相,第二相周围产生裂纹是因为其本身的脆性以及外加载

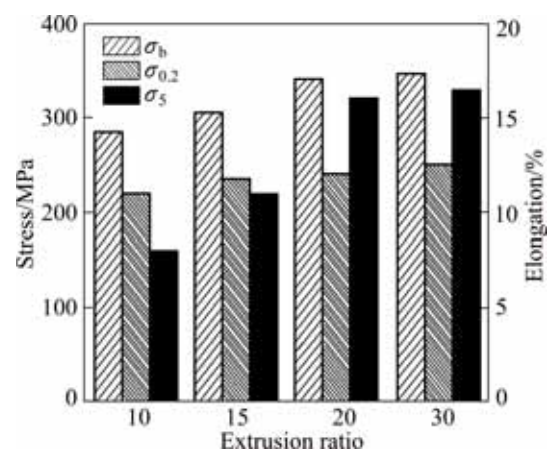


图2 EW75M合金在不同挤压比下挤压后的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of EW75M alloys extruded at different extrusion ratios

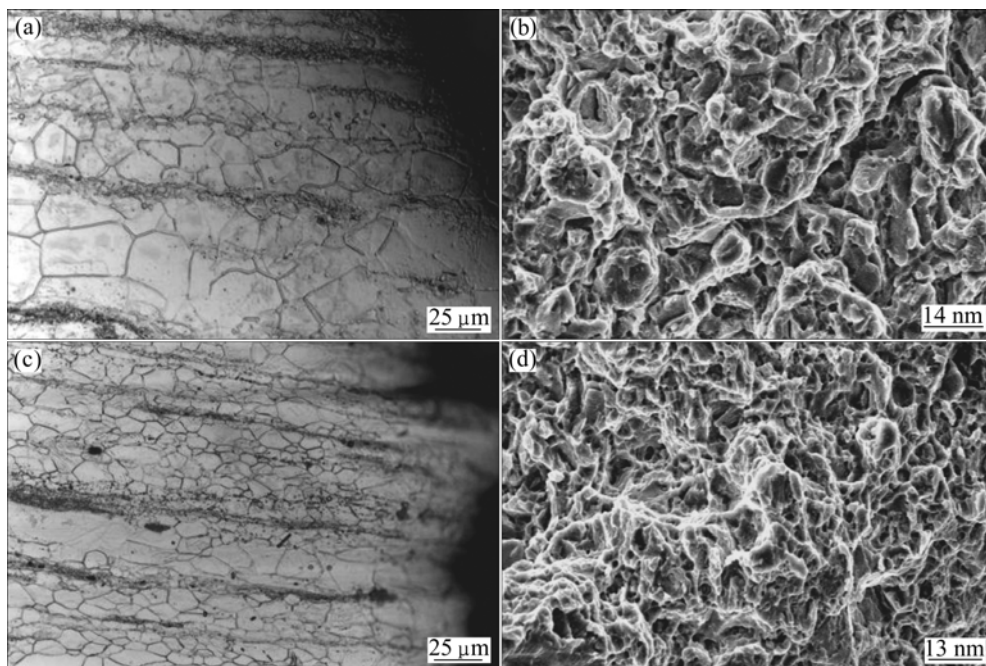


图3 EW75M合金在不同挤压比下挤压后的拉伸断口组织及形貌

Fig.3 Microstructures and tensile fractures of EW75M alloys extruded at different extrusion ratios: (a), (b) 10; (c), (d) 20

荷在局部导致的应力集中所致。第二相的尺寸决定合金中裂纹产生和扩展的能力,第二相颗粒越粗大,裂纹越容易产生和扩展。当挤压比从 10 增大到 20 时,变形程度增大,不但合金晶粒更加细小,对均匀化处理后残留第二相的破碎作用也更剧烈,第二相颗粒的尺寸更加细小,分布更加均匀。这是 EW75M 合金挤压比增大后,合金塑性提高的重要原因。

2.2 在不同挤压筒温度下挤压后合金的微观组织和力学性能

图 4 所示为挤压筒温度分别为 400 和 450 时 EW75M 合金挤压变形后纵向的微观组织。挤压变形后,两种条件下合金坯料的内部组织都发生了完全动态再结晶,合金晶粒得到充分细化,晶粒大小都较为均匀。当挤压筒温度从 400 升高到 450 后,合金中出现晶粒长大的现象,但整体上合金的晶粒仍然非常细小、均匀,平均晶粒尺寸在 20 μm 左右。

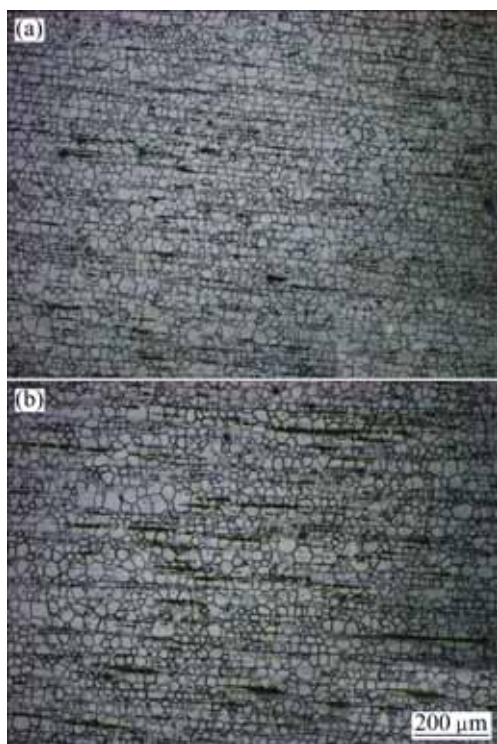


图 4 EW75M 合金在不同挤压筒温度下挤压后纵向的微观组织

Fig.4 Microstructures of EW75M alloys extruded at different extrusion tube temperatures: (a) 400 ; (b) 450

图 5 所示为在挤压筒温度分别为 400 和 450 时 EW75M 合金挤压变形后纵向的拉伸力学性能。从测试结果可以看出,在两种挤压筒温度条件下,合金经过挤压后强度和伸长率都得到大幅度的提高,合金

的极限抗拉强度和屈服强度都分别达到 340 MPa 和 240 MPa 左右,伸长率达到 15% 左右。挤压筒温度从 400 升高到 450 后,合金强度和伸长率的降低幅度均在 5% 以内。表明挤压筒温度在 400 到 450 之间变化时,对合金挤压变形后的性能影响不大。

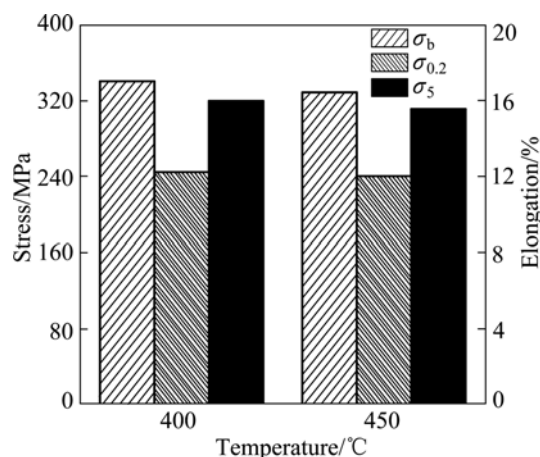


图 5 EW75M 合金在不同挤压筒温度下挤压后的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of EW75M alloys extruded at different extrusion tube temperatures

2.3 合金挤压变形后的微观组织分析

图 6 所示为 EW75M 合金挤压变形后位错在第二相颗粒附近形成塞积的形貌。经过挤压变形,合金的晶粒得到细化,均匀化处理后残留的块状第二相被破碎成细小的颗粒相。这些细小的颗粒相均匀分布在合金的晶界和晶粒内部,在颗粒相周围的基体中存在大量位错,位错在这些细小颗粒相的周围形成塞积,提高了基体的变形抗力,产生第二相强化作用,提高了合金的强度,但是当颗粒相尺寸太大时,容易产生较大的应力集中,反而会降低合金的塑性。当金属的晶粒尺寸大时,位错在晶界上堆集的数目很多,在晶界处应力集中现象严重,故只需施加较小的外力便可以使相邻晶粒内的位错诱发而运动,即容易使邻近晶粒中发生滑移。当晶粒尺寸小时,其晶界上堆集的位错数目少,应力集中程度小,这时需要施加较大的外力才能使邻近晶粒中的位错启动^[10-13]。这是 EW75M 合金晶粒细化后屈服强度提高的主要原因。

图 7 所示为 EW75M 合金挤压变形后合金中的高密度位错和晶界处位错塞积的形貌。由于镁合金基体的滑移系少,位错在变形过程中很容易互相缠结或受到晶界阻碍形成塞积(图 7(a)) 这有利于提高合金的强度,也容易造成应力集中,降低合金的塑性。从图 7(b) 可以看到,晶界处有较高密度的位错,这个现象表明在挤压变形中,在部分晶粒内存在较大的应力集中,

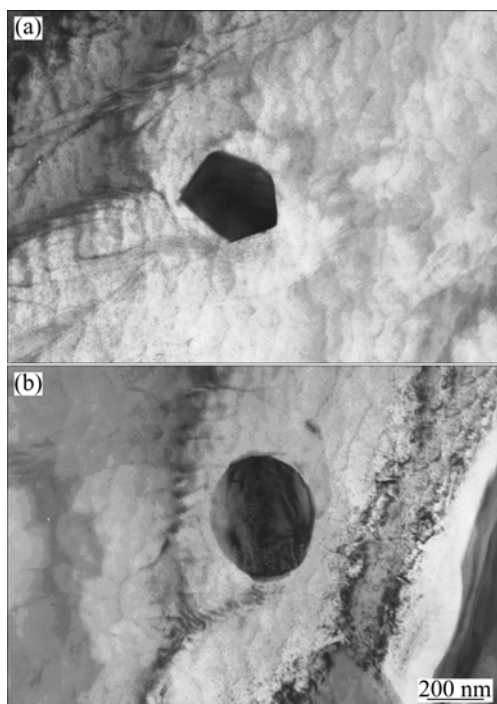


图6 挤压态 EW75M 合金中位错在第二相颗粒附近形成塞积的 TEM 像

Fig.6 TEM images of dislocations blocked by second phase particles in extruded EW75M alloy: (a) Blocked by square particles; (b) Blocked by round particles

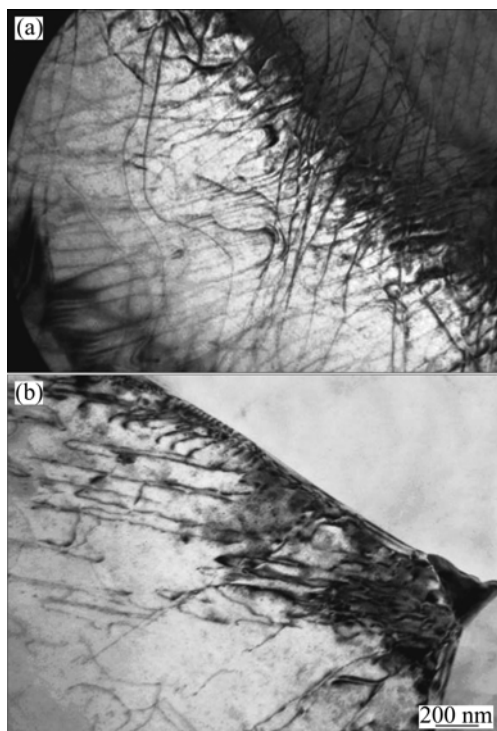


图7 EW75M 合金挤压变形后的位错及其塞积

Fig.7 TEM images of dislocations and blocked by boundaries of extruded EW75M alloy: (a) Dislocations; (b) Block at boundaries

细小的等轴晶通过不断产生位错和位错交滑移到晶内的方式使晶界应力得到释放，同时在晶粒内部产生较高密度的位错，从而提高合金的强度^[14-16]。

3 结论

1) EW75M 合金经过挤压变形后，合金的平均晶粒尺寸在 20 μm 左右，合金的强度和塑性都大幅度提高。当挤压比从 10 增加到 20 后，动态再结晶比较充分，合金中大晶粒的数量明显减少，晶粒大小更加均匀。当挤压比达到 20 后，合金断口中解离平台和二次裂纹的数量减少，断口中出现了较多的撕裂棱和韧窝，表现出韧性断裂的特征。

2) 随着挤压比的增大，EW75M 合金的强度和塑性不断提高，当挤压比达到 20 以后，晶粒细化对合金的强化效果趋于稳定；当挤压筒温度由 400 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 450 $^{\circ}\text{C}$ 时，合金的晶粒尺寸有所增大，对合金的力学性能影响不大。

3) EW75M 合金均匀化处理后残留的块状第二相在挤压过程中被破碎成细小的颗粒相，在晶粒内及晶界上离散分布，在挤压变形中产生的高密度位错在晶界和细小的第二相颗粒附近形成塞积是合金的强度和塑性提高的主要原因。

REFERENCES

- [1] 余 琨, 黎文献, 王日初. 变形镁合金的研究开发及应用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 277-288.
YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu. The research and application of wrought magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277-288.
- [2] 卢志文, 汪凌云, 潘复生, 陈 林. 变形镁合金及其成形工艺[J]. 材料导报, 2004, 18(9): 39-42.
LU Zhi-wen, WANG Ling-yun, PAN Fu-sheng, CHEN Lin. Wrought magnesium alloys and their forming processes[J]. Material Review, 2004, 18(9): 39-42.
- [3] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CHEN Zhen-hua. Wrought Magnesium Alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [4] ZHANG Ya, ZENG Xiao-qin, LIU Liu-fa, LU Chen, ZHOU Han-tao, LI Qiang, ZHU Yan-ping. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of hot-extruded Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 373: 320-327.
- [5] 张新明, 肖 阳, 陈健美, 将 浩. 挤压温度对 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3): 518-524.

- ZHANG Xin-ming, XIAO Yang, CHEN Jian-mei, JIANG Hao. Influence of extrusion temperature on microstructures and mechanical properties of Mg-9Gd-4Y-0.6Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(3): 518-524.
- [6] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- XIE Jian-xin, LIU Jing-an. Metal extrusion theory and technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [7] MA Ming-long, ZHANG Kui, LI Xing-gang, LI Yong-jun, ZHANG Kang. The hot deformation behavior of as-cast Mg-7Gd-5Y-1.2Nd-Zr magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(s1): 132-139.
- [8] 毛卫民, 赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- MAO Wei-min, ZHAO Xin-bing. Metal recrystallization and grain growth[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
- [9] 肖阳, 张新明, 陈健美, 蒋浩. Mg-9Gd-4Y-0.6Zr合金挤压T5态的高温组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 709-714.
- XIAO Yang, ZHANG Xin-ming, CHEN Jian-mei, JIANG Hao. Microstructures and mechanical properties of extruded Mg-9Gd-4Y-0.6Zr-T5 at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(4): 709-714.
- [10] 马志新, 李德富, 李彦利. Mg-Y-Nd-Zr合金加工工艺与组织演化的研究[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 719-723.
- MA Zhi-xin, LI De-fu, LI Yan-li. Processing technology and structure evolution of Mg-Y-Nd-Zr alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 719-723.
- [11] LI Yong-jun, ZHANG Kui, LI Xing-gang, MI Xu-jun, XIONG Bai-qing, HU Chun-li. Effects of heat treatment and plastic deformation on structure and properties of Mg-9Al-1.2Nd-0.45Y-0.7Zn Mg alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(s1): 363-367.
- [12] BAI Jing, SUN Yang-shan, XUE Feng, XUE Shan, QIANG Jing, TAO Wei-jian. Effect of extrusion on microstructures, and mechanical and creep properties of Mg-Al-Sr and Mg-Al-Sr-Ca alloys[J]. Scripta Materialia, 2006, 55: 1163-1166.
- [13] 马志新, 李德富, 张奎. WE54镁合金中析出相的特点[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(9): 539-541.
- MA Zhi-xin, LI De-fu, ZHANG Kui. Characteristics of strengthening precipitate phase in WE54 alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2006, 26(9): 539-541.
- [14] ZHANG Kui, LI Xing-gang, LI Yong-jun, MA Ming-long. Effects of Gd contents on microstructure and mechanical properties of Mg-Y-RE-Zr magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(s1): 12-15.
- [15] APPS P J, KARIMZADEH H, KING J F, LORIMER G W. Precipitation reaction in magnesium-rare earth alloys containing yttrium, gadolinium or dysprosium[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(8): 1023-1028.
- [16] SUZUKI M, SATO H, MARUYAMA K, OIKAWA H. Creep deformation behavior and dislocation substructures of Mg-Y binary alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 319/321: 751-755.

(编辑 杨华)