

## 轻合金及其加工 ·

## 镁合金塑性成形技术研究进展

林金保,王渠东,陈勇军

(上海交通大学 轻合金精密成型国家工程研究中心,上海 200030)

摘要: 综述了镁合金塑性成形技术的研究现状,介绍了镁合金挤压、轧制、锻造、板料成形的成形特点及最新研究进展,探讨了关于镁合金塑性成形领域亟待解决的问题,展望了镁合金塑性成形技术的发展方向。

关键词: 镁;镁合金;塑性成形

中图分类号: TG146.22 文献标识码: A 文章编号: 1002-1752(2006)10-0076-05

## Research development of plastic forming technology for magnesium alloys

L IN Jin - bao ,WAND Qu - dong ,CHEN Yong - jun

*(Light Alloy Net Forming National Engineering Research**Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)*

**Abstract:** Technologies of plastic deformation for magnesium alloys are reviewed in this paper. The characteristic and new development of techniques of extrusion, rolling, forging, sheet deformation for magnesium alloys are introduced. Some individual opinions are put forward about the problem that must be solved urgently and development direction of magnesium alloys.

**Key words:** magnesium; magnesium alloys; plastic forming

近年来,随着汽车、航空航天等领域的快速发展,对材料的轻质高强度性能提出了越来越高的要求。镁合金在实用材料中密度最低(约  $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ),具有很高的比强度和比刚度,在汽车、航天器上应用可有效降低产品整体质量,具有很大的发展潜力<sup>[1]</sup>。目前,镁合金产品主要采用压铸技术加工,但由于压铸镁合金产品性能、可靠性、成品率及其设备吨位的限制,制约了镁合金的进一步发展<sup>[2]</sup>。与铸造镁合金相比,经过轧制、挤压、锻造等塑性成形技术生产的变形镁合金产品常具有更高的强度和塑韧性,并可通过调整成形工艺来控制镁合金的组织和性能,以满足多样化结构材料的需求,具有广阔的应用前景。然而,镁合金为密排六方结构,滑移系较少,在室温和低温条件下塑性较差,而且,迄今对镁合金塑性变形机理的认识还不够全面和深入,未能建立起完善的塑性变形理论体系。对于改进现有的镁合金塑性成形工艺及开发新的塑性成形技术缺乏理论指导<sup>[3]</sup>。因此,深入研究镁合金塑性成形机理,开发镁合金的塑性成形技术是目前亟待进行的工作。

## 1 镁合金塑性成形技术

镁合金的塑性成形方法与其他金属基本相同,主要有:轧制成形、挤压成形、锻造成形及板料冲压成形等。

## 1.1 轧制成形

镁合金的带材及板材一般采用轧制成形的方法生产。轧制过程可以细化晶粒,改善镁合金组织,显著提高镁合金的力学性能<sup>[4]</sup>。轧制温度是镁合金轧制过程中的关键参数。轧制温度过低时,高的应力集中可导致孪晶形核和切变断裂;轧制温度过高时,晶粒容易长大而使板材热脆倾向增大。Hosokawa等<sup>[5]</sup>对轧制AZ31镁合金的研究表明,轧制温度在225~400范围内时,轧制压下量可达85.7%以上而不出现裂纹;轧制温度在200以下时,成形性能则较差,易出现裂纹。最近研究表明<sup>[6]</sup>,在较低的轧制应变速率下( $0.01\text{s}^{-1}$ ),AZ31镁合金的轧制温度在180~260之间较合适;轧制温度为340时,动态再结晶晶粒已长大,成形性能变差。

收稿日期:2006-01-10

近年来,针对镁合金轧板强烈的织构倾向和各向异性进行了大量研究。研究表明,在常规轧制过程中,镁合金板材内通常形成强烈的基面织构<sup>[6-8]</sup>,给材料的强度、塑性和深冲性能带来很不利的影响。Watanabe H 等人<sup>[9]</sup>对轧制 AZ31 镁合金板材的研究表明,采用异步轧制工艺可使基面织构有效减弱,但也仅使 c 轴向搓轧方向偏转了大约 5°,板材的性能提高不大。为了提高轧板的性能,基于等通道挤压(equal channel angular pressing, ECAP)提出了等通道轧制(equal channel angular rolling, ECAR)工艺<sup>[10-12]</sup>。图 1 为 Jae - Chul Lee 等人提出的一种等通道轧制装置示意图<sup>[11]</sup>。程永奇等人<sup>[13]</sup>利用等通道轧制工艺,对制备 AZ31 镁合金板材进行了研究。结果显示,经等通道轧制后基面织构减弱,晶粒取向由原来的(0002)基面取向转变为基面取向与非基面取向共存;板材强度明显提高,抗拉强度由等通道轧制前的 240N/mm<sup>2</sup> 增大到 275N/mm<sup>2</sup>,屈服强度由 193.8N/mm<sup>2</sup> 增大到 239.2N/mm<sup>2</sup>。张青来等<sup>[14]</sup>研究了轧制方式对 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响。结果表明,与单向轧制相比较,交叉轧制可减轻轧板的各向异性,为深冲变形提供良好的组织结构条件。

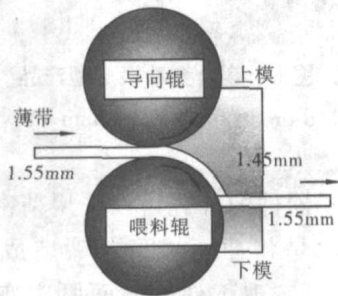


图 1 基于 ECAP 的等通道轧制装置示意图

Fig. 1 Sketch of equal angular rolling based on ECAP

为降低变形镁合金的生产成本,连续铸轧工艺是目前研究的热点之一。连续铸轧是冶金及材料领域的一项前沿技术,其特点是:可简化生产工艺,缩短生产周期,降低能耗,降低生产成本。在几种连续铸轧机中,双辊铸轧(原理图见图 2)较适宜于大规模、商业化生产,目前已成功应用于铝行业和钢铁行业<sup>[15]</sup>。在镁合金连续铸轧领域,澳大利亚 Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization(CSIRO)进行了系统研究<sup>[16,17]</sup>。目前 CSIRO 采用水平式双辊铸轧机成功铸轧了常规镁合金(AZ31、AZ61、AZ91、AM60)与一批新镁合金带材,

厚度为 2.3mm~5mm,并用特殊工艺轧制了厚 0.5mm~0.6mm 的薄板。最近有报道表明<sup>[18]</sup>,德国科研人员利用铸轧试生产线(见图 3)成功铸轧出了宽 700mm、厚 4.5mm~7mm,总重达 4t 的镁合金带材。并利用工业化轧制试验,成功生产了宽 2000mm,最小厚度为 0.55mm 的镁合金薄板。国内也已开始镁合金铸轧的研究工作,并在实验室条件下制备了 1mm~3mm 的带坯<sup>[15]</sup>。

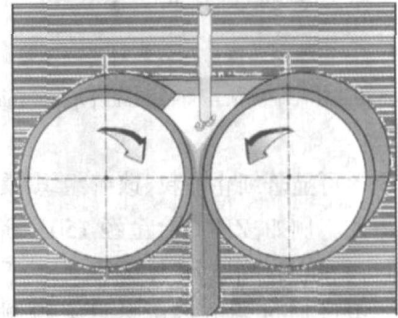


图 2 双辊铸轧薄带示意图

Fig. 2 Sketch of thin strip by double roller casting - rolling

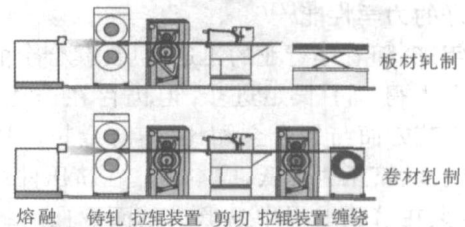


图 3 铸轧试生产作业线原理图

Fig. 3 Principle drawing of casting - rolling production line

## 1.2 挤压成形

目前,镁合金管材、棒材、型材、带材等产品主要采用挤压方法加工成形<sup>[2]</sup>。金属在挤压变形区中处于三向压应力状态,可以充分发挥其塑性,提高其变形能力,获得大变形量。因此,对于镁合金这类塑性较差的金属,挤压成形是最容易实现的塑性变形。

由于镁合金在低温下滑移系较少,塑性变形能力差,因而其塑性变形多在加热条件下进行。镁合金的典型挤压温度范围为 300~460<sup>[19]</sup>。同时,合理的挤压温度的选择还和特定的合金牌号和挤压形状有关。例如,在有背压的情况下,AZ31 合金在 150 以下即可挤压成形,而 AZ61 和 ZK60 合金的挤压温度则必须在 150 以上<sup>[20]</sup>。此外,镁合金的成形性还受挤压速度的影响,速度过高易导致表面热裂<sup>[21,22]</sup>。研究表明,镁合金的极限挤压速度主要取决于材料成分。一般而言,合金元素含量越

高则极限挤压速度越低。图 4 为极限挤压速度与材料种类的关系,其中 AM10、AZ11、M1 和 ZM21 镁合金挤压速度可达到 40mm/s 而不开裂<sup>[21]</sup>。

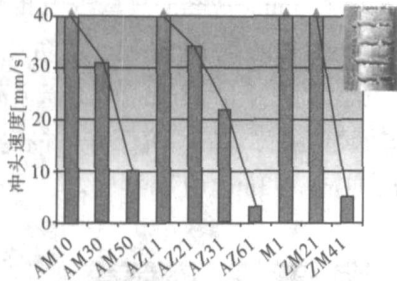


图 4 极限挤压速度与材料种类的关系

Fig. 4 Relation between ram speed and type of materials

挤压成形可显著细化晶粒,改善组织,提高材料的强度和塑性。例如,ZK60 合金经 150 挤压后抗拉强度上升到 500N/mm<sup>2</sup> 以上,这可归因于晶粒细化<sup>[3]</sup>。因此可以通过调节挤压参数来控制材料微观组织。通常,降低挤压温度和挤压速度,可获得更细小的晶粒;增加挤压比也能进一步细化晶粒,从而获得更好的力学性能<sup>[23]</sup>。

近年来,随着镁行业的迅速发展,镁合金的挤压成形技术也得到了长足进步,但仍存在一些不足。在挤压工艺方面与铝合金相比,镁合金挤压所需的挤压力较高、挤压速度低、成本高。在挤压件性能方面,镁合金在挤压过程中易形成基面取向的纤维组织,导致材料严重的各向异性。为解决这些问题,应优化挤压坯料组织,严格控制挤压工艺参数,并选择合适的后处理制度。

### 1.3 锻造成形

镁合金锻件具有组织致密、无孔隙、高性能等优点,可用于对气密性要求严格的场合<sup>[24]</sup>,在工业应用上得到了充分重视。适于锻造成形的镁合金有 Mg - Al - Zn、Mg - Zn - Zr 和 Mg - Y - RE 系合金<sup>[25]</sup>。镁合金锻件的力学性能通常取决于锻造过程中所产生的应变硬化程度。锻造温度越低,其应变硬化效果越显著,然而温度过低时锻件容易开裂,过高时则氧化严重。日本 Ogawa<sup>[26]</sup>等研究镁合金 ZK60 的锻造工艺得出:最佳锻造温度为 300 ~ 400,400 以上坯料发生严重氧化,200 ~ 400 温度下流动应力均表现出加工软化。张先宏等<sup>[27]</sup>通过研究 AZ31B 也得到了类似结果。Xing Jie 等<sup>[28]</sup>利用逐步降温多向锻造 (multi - directional forging, MDF) 技术,在  $3 \times 10^{-3} s^{-1}$  的应变速率条件下,锻造温度从 350 逐步降低到 150,使晶粒细

化到了 230nm,得到了组织均匀的高性能 AZ31 镁合金。

精密锻造是在传统的锻造工艺上发展起来的一项新技术<sup>[29]</sup>,可成形流线沿锻件几何外形分布的高精度、复杂形状锻件,同时能提高锻件的承载能力。吕炎、单德彬等<sup>[30,31]</sup>研究了复杂形状镁合金的成形工艺,采用等温精密锻造工艺成功地成形了复杂的镁合金飞机上机匣(见图 5),这是目前我国最大的镁合金模锻件。

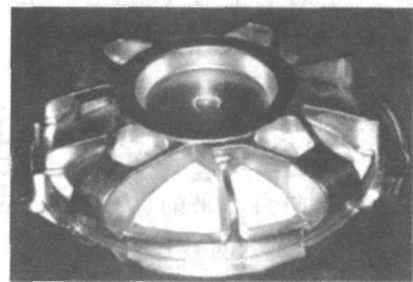


图 5 上机匣锻件照片

Fig. 5 Photo of casing forging

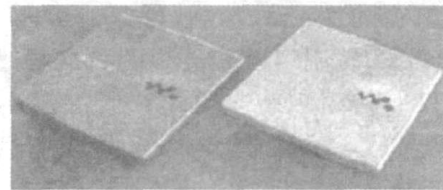


图 6 镁合金冲锻成型产品

Fig. 6 Finished products of magnesium alloy drop - forge

很多电子器件的外壳可以采用精密冲锻技术成形<sup>[2]</sup>。该技术是将冲压成型与锻造成型相结合产生的新技术,可实现工件的截面厚度变化和局部变形,具有生产效率高、成品率高和成本低等优点。镁合金冲锻成型技术 (Press Forging) 由日本索尼、日立金属和东京精锻所于 1999 年共同开发成功<sup>[32]</sup>,当年就得到了工业应用,达到了月产 20 万套的生产规模,图 6 是镁合金冲锻成型产品。其生产设备采用普通机械式锻压机床即可,其技术关键在于成形模具与成形工艺,包括模具设计、模具温度控制、变形率与变形速度等参数控制。

### 1.4 板料冲压成形

板料冲压成形一般应用于塑性较好的材料(如钢板,铝板等)。镁合金室温塑性较差,其拉深、胀形等成形工艺都在 150 以上进行。小坂田等人<sup>[33]</sup>的研究发现,镁合金板材在 250 左右拉深时其拉深比超过铝合金和低碳钢板的常温拉深成形极限。

最近,王忠堂等<sup>[34]</sup>研究表明,镁合金筒形件拉深成形温度应在 200 ~ 400 范围内。成形温度低于 200 时,拉深件易产生断裂;高于 400 时,将产生氧化现象,且易起皱。当在 300 ~ 350 范围内,镁合金板材极限拉深比可达 2.2。

镁合金薄板的拉深性能与板材的各向异性比、加工硬化率以及成形温度、速度、工件形状及摩擦润滑等工艺条件有很大关系<sup>[34,35]</sup>。一般来说,随着温度的升高,镁合金薄板的深拉伸性能可得到明显改善。对大多数工件而言,拉深深度并不是主要因素,关键是如何使带有圆角或异形的工件在拉深时不产生皱褶。因此,拉深温度通常高于最大可拉深性所要求的温度。对于特殊的难拉深零件,必须改变工艺流程降低废品率<sup>[3]</sup>。

差温拉深工艺能显著提高镁合金板料的拉深性能,得到了广泛关注<sup>[36-38]</sup>。该技术利用温度对材料性能的影响,通过实现温度的不均匀分布而实现不同部位强度的均匀分布,减小断裂倾向,提高成形极限。Yoshihara 等<sup>[36,37]</sup>利用差温技术对 0.5mm 厚的 AZ31 薄板进行拉深,在适当的动态压边力条件下,极限拉深比达到了 5.0 以上。而采用非差温拉深时,极限拉深比最大值仅为 2.14。尹德良等人<sup>[38]</sup>利用加热模具,控制冲头温度等方法在 AZ31 板料上实现差温拉深。研究表明,当板料温度为 200 时,AZ31 镁合金板的极限拉深比达到最大值 2.65。研究还发现 AZ31 板料的拉深工艺对变形速度有显著的敏感性。当拉深速度增至 1.2mm/s 时,拉深力迅速增大,致使板料在凹模入口处被拉断。因此,镁合金的差温拉深成形宜在工作速度较低的液压机上进行。

## 2 结语

近几年在镁合金塑性成形技术的研究方面,主要集中在成形工艺参数优化和技术因素对材料组织、结构和性能的影响上。各种塑性成形技术都不同程度地获得了发展。但与其他金属和合金材料相比,镁合金的塑性成形技术还有很大的研究空间,笔者认为应该加强的研究方向有如下几个方面:

(1) 加强对镁及镁合金的塑性变形机理的研究,建立完善的塑性变形理论体系,以指导现有塑性变形工艺的改进及新的塑性成形技术的开发。

(2) 继续开发新的适合于工业化、产业化生产的塑性成形技术,加大应用开发力度。

(3) 开发适于塑性加工的高性能变形镁合金。

(4) 采用计算机辅助设计技术,将计算机模拟和塑性成形技术相结合,缩短新技术的开发周期,降低试验成本。

### 参考文献:

- [1] 王渠东,丁文江. 镁合金及其成形技术的最新发展 [M]// 柳百成. 21 世纪材料成形加工技术与科学. 北京:机械工业出版社. 2003: 12.
- [2] 张士宏,王忠堂,许沂,等. 镁合金的塑性加工技术 [J]. 金属成形工艺,2002,20(5): 1-3.
- [3] 陈振华,夏伟军,严红革,等. 镁合金材料的塑性变形理论及其技术 [J]. 化工进展,2004,23(2): 127-131.
- [4] 曾荣昌,韩恩厚,刘路,等. 轧制组织对镁合金 AM60 疲劳性能的影响 [J]. 材料研究学报,2003,17(3): 241-245.
- [5] Hosokawa H, Chino Y, Shimojima K, et al. Mechanical properties and blow forming of rolled AZ31 Mg alloy sheet [J]. Materials Transactions, 2003, 44 (4): 484-489.
- [6] 杨平,孟利,毛卫民,等. 利用道次间退火改善镁合金轧制成形性的研究 [J]. 材料热处理学报,2005(2): 34-38.
- [7] Kalidindi S R. Modeling anisotropic strain hardening and deformation textures in low stacking fault energy materials [J]. International Journal of Plasticity, 2001, 17: 837-860.
- [8] Perez-Prado M T, Valle J A, Contreras J M, et al. Microstructural evolution during large strain hot rolling of an AM60 Mg alloy [J]. Scripta Materialia, 2004, 50: 661-665.
- [9] Watanabe H, Mukai T, Ishikawa K. Differential speed rolling of an AZ31 magnesium alloy and the resulting mechanical properties [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 1477-1480.
- [10] Saito Y, Utsumomiya H, Suzuki H. Improvement in the r-value of aluminum strip by a continuous shear deformation process [J]. Scripta Materialia, 2000, 42: 1139-1144.
- [11] Lee J C, Seok H K, Suh J Y. Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing [J]. Acta Materialia, 2002, 50: 4005-4019.
- [12] Lee J C, Seok H K, Han J H, et al. Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process [J]. Materials Research Bulletin, 2001, 36: 997-1004.
- [13] 程永奇,陈振华,夏伟军,等. 等径角轧制 AZ31 镁合金板材的组织与性能 [J]. 中国有色金属学报,2005,15(9): 1369-1377.
- [14] 张青来,卢晨,朱燕萍,等. 轧制方式对 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报,2004,14(3): 391-396.
- [15] 李铮,赵凯,邱洪双,等. 双辊铸轧法生产变形镁合金薄带新工艺研究 [J]. 轻金属,2003,12: 35-37.
- [16] Ian Porter. Partners put the squeeze on thin-sheet magnesium costs [J]. Light Metals News, 2003,17(4): 1.
- [17] Cowley B. New production-ready magnesium sheet [J]. Materials Australia, 2003,35(6): 11.
- [18] Bernhard Engl. Future aspects of magnesium sheet materials using a new production technology. Proceedings of 62nd IMA Conference, 2005: 29-36.
- [19] 刘正,张奎,曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用 [M]. 北

- 京:机械工业出版社,2002.
- [20] Margam Chandrasekaran, Yong Ming Shyan John. Effect of materials and temperature on the forward extrusion of magnesium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 381: 308 - 319.
- [21] Lass J F, Bach F W, Schaper M. Adapted extrusion technology for magnesium alloys [J]. Magnesium Technology 2005: 159 - 164.
- [22] Letzig D, Swiostek J, Bohlen J, et al. Magnesium wrought alloy properties of the AZ - Series [J]. Magnesium Technology 2005: 55 - 60.
- [23] Tsutomu Murai, Shinichi Matsuoka, Susumu Miyamoto, et al. Effects of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy extrusions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141: 207 - 212.
- [24] Kainer K U, Kaiser F(trans.). Magnesium alloys and technology [M]. Weinheim: WILEY- VCH Verlag GmbH, 2003.
- [25] Michael M Avedesian, Hugh Bakerk. ASM Specialty Handbook - Magnesium and Magnesium Alloys [M]. Ohio: ASM International, Materials Park, 1999.
- [26] Ogawa N, Shiomi M, Osakada K. Forming limit of magnesium alloy at elevated temperature for precision forging [J]. Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 607 - 614.
- [27] 张先宏, 崔振山, 阮雪榆. 镁合金塑性成形技术 - AZ31B 成形性能及流变应力 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1874 - 1877.
- [28] Xing J, Soda H, Yang X Y, et al. Formation of fine grained structure in a magnesium alloy AZ31 during multi - directional forging with decreasing deformation temperature [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2004, 54(11): 527 - 531.
- [29] Yoshimura H, Tanaka K. Precision forging of aluminum and steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2): 196 - 204.
- [30] Shan D B, Xu W C, Lu Y. Study on precision forging technology for a complex - shaped light alloy forging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151: 289 - 293.
- [31] 吕炎, 徐福昌, 薛克敏, 等. 镁合金上机匣等温精锻工艺的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 127 - 129.
- [32] 滨葆夫. 变形镁合金精密冲锻成型 [J]. 素形材, 2001, 8: 6 - 12.
- [33] Ogawa N, Shiomi M, Osakada K. Forming limit of magnesium alloy at elevated temperature for precision forging [J]. Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 607 - 614.
- [34] 王忠堂, 张士宏, 徐永超, 等. 镁合金板材冲压成形工艺及极限拉延比研究 [J]. 沈阳工业学院学报, 2004, 23(4): 1 - 3.
- [35] 卢志文, 张洪峰, 汪凌云. 镁合金的冲压成形工艺研究 [J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(6): 45 - 48.
- [36] Yoshihara S, Nishimura H, Yamamoto H, et al. Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process [J]. Materials Processing Technology, 2003, 142: 609 - 613.
- [37] Yoshihara S, Yamamoto H, Manable K, et al. Formability enhancement in magnesium alloy deep drawing by local heating and cooling technique [J]. Materials Processing Technology, 2003, 143 - 144: 612 - 615.
- [38] 尹德良, 张凯锋, 吴德忠. AZ31 镁合金非等温拉深性能的研究 [J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(1): 87 - 90.

(责任编辑 武红林)

## 书 讯

为纪念《轻金属》杂志创刊 40 周年,《轻金属》编辑部从创刊 40 年来已发表过的 400 多篇铝土矿论文中精选出有重要学术价值和当前发展我国铝工业有指导意义的论文 180 余篇,编辑出版了《轻金属》40 年文选精华本——铝土矿专辑。

本专辑分地质、采矿、选矿三篇十七章依次编排。论文选取原则是:紧紧围绕“全国新一轮找矿”、“开发地下矿”(占全国铝土矿资源总量 60% 的地下矿基本尚未利用)、“利用国外资源”三大战略措施,重点突出了:铝土矿成因及预测科研成果;在主要研究具有我国特色的一水硬铝石沉积型和堆积型矿床的基础上,适当选择了国内外三水铝石红土型矿床;在总结山东、贵州两省地采经验的同时介绍了国外一些国家地下开采技术;选矿突出了近几年选矿 - 拜耳法科研及产业化成果。全书约 160 万字,采取 18 开精装本。

该书对于从事铝工业的广大科技工作者、管理人员及生产操作人员有一定指导和借鉴作用。需要订阅的单位及个人请直接与《轻金属》编辑部联系。

电话(传真):024 - 23261062

地址:沈阳市和平区和北大街 184 号 邮编:110001

(本刊编辑部)