● 材料改性 Material Propertiest ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.025

热处理对 Mg–8Li–4Zn–3Y 合金组织和性能的影响

马 涛[1,2],徐春杰[2]
(1. 陕西铁路工程职业技术学院 质量管理中心，陕西 渭南 714000；2. 西安理工大学 材料科学与工程学院，陕西 西安 710048)

摘 要:采用锂盐熔剂保护法熔铸 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金,并对合金进行 T4 固溶和 T6 固溶+时效热处理,探讨了热处理对 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金组织及硬度的影响。结果表明,T4 固溶后,组织中的强化相减少,α-Mg 相晶粒尺寸增大,形貌亦变得不规则,合金的硬度下降;再经过 T5 时效后,组织中又析出一些强化相颗粒,合金的硬度有一定程度的提高。压缩过程中,Mg-8Li-4Zn-3Y 合金试样均呈鼓形后开裂,且均呈 45°的剪切断裂。

关键词:热处理;Mg-8Li-4Zn-3Y 合金;组织;性能
中图分类号: TG166 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)12-1332-05

Effects of Heat–treatment on the Microstructures and Properties of Mg–8Li–4Zn–3Y Alloy

MA Tao[1,2], XU Chunjie[2]
(1. Quality Management Centre, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: As-cast ingot of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy was prepared by fused salt protection in electric-resistance furnace. T4 solid solution and T6 solid solution + aging treatment were carried out on the alloy, and the effects of heat treatment on the microstructure and hardness of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy were discussed. The results show that after T4 solid solution, the strengthening phase in the structure decrease, the grain size of alpha-mg phase increase, the morphology become irregular, and the hardness of the alloy decrease. After T5 aging, some reinforced phase particles are precipitated in the structure, and the hardness of the alloy is improved to a certain extent. During the compression process, the Mg-8Li-4Zn-3Y alloy samples all cracked after being drum-shaped and show a shear fracture of 45°.

Key words: heat treatment; Mg-8Li-4Zn-3Y alloy; microstructure; properties

自 1942 年 A. C. Loonam[1]将 Li 元素添加到镁合金中得到 hcp 结构后，镁锂合金已成为最轻的金属结构材料[2,3]。在航空航天、汽车、3C 产业、医疗器械等领域都有着巨大的发展潜力,为众多新材料研究者所青睐。当 Li 含量在 5.5%~11.0%时,镁锂合金中存在 hcp 结构的富镁 α-Mg 相和 bcc 结构的富锂 β-Li 相[3]。当镁锂二元合金基体组织中的富镁 α 相和富锂 β 相体积分数接近 1:1 时，合金的伸长率可以达到 50%以上,并且在共晶成分范围内热机械加工和实验条件下可以产生超塑性[4,5]。然而,在室温条件下镁锂合金的强度极低,另外,合金的抗蠕变形能力随着锂含量的提高显著降低。尽管在剧烈变形过程中富锂 β 相塑性极好，但富锂 β 相强度极低,并且变形硬化强化效果更是非常有限[6-8]。因此,众多研究者尝试通过各种方法[9-11]或各种合金化[12,13]来提高镁锂合金的综合性能。

固溶处理可以同时提高合金的抗拉强度和塑性,且可获得较好的韧性和抗冲击性[14]。镁合金通过时效热处理来实现析出强化,时效处理后,可以获得较好的时效硬化效果,但会影响其塑韧性[15]。本文采用锂盐熔剂保护熔铸了 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金，并对合金进行了 T4 和 T6 热处理,对比分析了合金的组织和性能。

收稿日期:2019-09-18
基金项目:陕西省重点研发计划(一般项目–工业领域)项目(2017GY-135);陕西铁路工程职业技术学院 2018 年院级第一批科研项目(ky2018-25)
作者简介:马 涛(1987-),安徽宿州人,硕士,讲师.研究方向:Mg-Li 合金组织及强化.电话:15769282797,E-mail: mataoyaao@163.com
通讯作者:徐春杰(1971-),河南淅川人,博士,副教授.研究方向:高性能轻金属材料的组织与性能控制.电话:13119153059,E-mail: xuchunjie@gmail.com,xuchunjie@xaut.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　实验材料及方法

合金配制采用工业纯镁锭（ω_{Mg}＞99.9%），高纯锂（ω_{Li}＞99.9%），纯锌（ω_{Zn}＞99%）及 Mg-30%Y 中间合金。合金在井式电阻坩埚炉中熔配，熔配过程采用 75%LiCl+25%LiF 混合锂盐熔剂（钠、钾质量分数在 2.5×10^{-6} 以下）保护。首先，将电阻炉升温至 720 ℃，待纯镁锭在石墨坩埚中熔化后，依次把按照质量比称量好的 Mg-30%Y 中间合金及纯锌放入镁液中融化，在该温度将熔体搅拌并保温 10 min 以使合金液成分均匀；其次，取出坩埚并降温到 650~660 ℃用钛制压罩将铝箔包的高纯锂压入镁液中，待锂完全熔化后提出压罩；最后，将坩埚放回炉中升温至 720 ℃并保温 10 min，扒渣后将洁净的熔体浇入预热温度为 300 ℃的金属型中，获得 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金试棒。合金配置过程中采用钛搅拌棒搅拌熔体，以利于合金成分均匀。

在试棒相同部位截取试样，采用 Nikon Epiphot 光学显微镜分析合金组织，腐蚀剂采用 4%硝酸酒精。采用 HV-120 维氏硬度计（载荷力 50 N，加载时间 20 s）分别测试铸态及经 T4、T6 热处理的 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金的硬度，每个试样测试 3 个点，取平均值。

将铸态合金及经 T5 热处理的 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金加工成 ϕ10 mm×15 mm 的圆柱，按照 GB/T 7314-2005 进行室温压缩试验，压缩应变速率为 1.11×10^{-3} s^{-1}。其中，Mg-8Li-4Zn-3Y 合金 T4、T5、T6 热处理工艺参数如表 1、表 2 和表 3。

表1 Mg-8Li-4Zn-3Y合金固溶（T4）处理工艺
Tab.1 The solution heat treatment process (T4) of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy

试样编号	1#	2#	3#
固溶温度，T/℃	375	425	375
固溶时间，t/h	8	8	10

表 2 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金时效（T5）处理工艺
Tab.2 The aging process (T5) of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
时效温度，T/℃	125	150	175	200	175	175
时效时间，t/h	12	12	12	12	8	16

表3 Mg-8Li-4Zn-3Y合金固溶+时效（T6）处理工艺
Tab.3 The solution and aging heat treatment process (T6) of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#
固溶温度，T/℃	375	375	375	375	425
固溶时间，t/h	8	8	8	10	8
时效温度，T/℃	175	175	200	175	175
时效时间，t/h	8	12	8	8	8

2　实验结果与分析

2.1　显微组织

图 1 为铸态 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金显微组织。可知，Mg-8Li-4Zn-3Y 合金由 bcc 结构 β-Li 相包裹着岛状的 hcp 结构 α-Mg 组成，α 相与 β 相的体积分数接近 1:1。在 α-Mg 相晶界和 β-Li 相内均匀分布着化合物或颗粒强化相，这些化合物或强化相抑制了 α-Mg 相的长大，细化了 α-Mg 相。

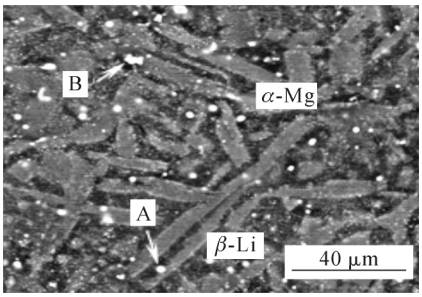
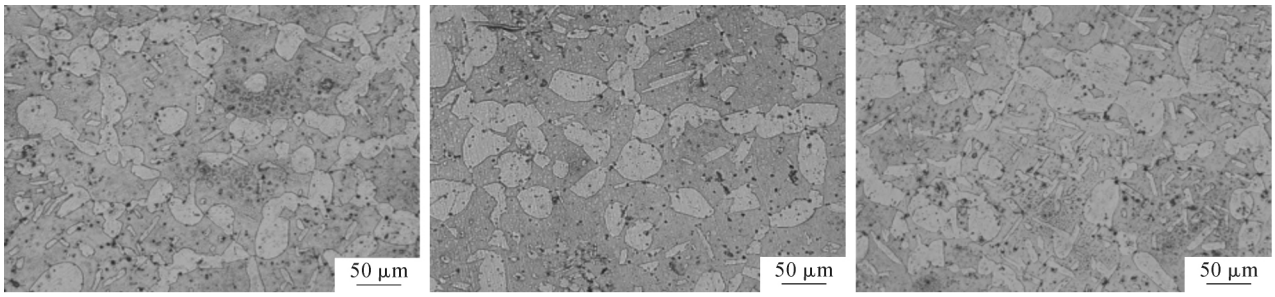


图 1 铸态 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金 SEM 照片
Fig.1 SEM image of as-cast Mg-8Li-4Zn-3Y alloy

图 2 为 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金经 T4 固溶热处理后的显微组织。由图 2 可知，固溶热处理后，Mg-8Li-4Zn-3Y 合金中类似图 1 中 A，B 箭头所示，分布在 β-Li 相内及 α-Mg 相晶界处的弥散析出相



(a)375 ℃×8 h　　(b)375℃×10 h　　(c)425 ℃×8 h

图 2 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金 T4 处理组织
Fig.2 Microstructure of the Mg-8Li-4Zn-3Y alloy treated by T4

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

有所减少，且随着固溶时间延长和固溶温度的升高，强化相逐步消失。这是由于在固溶处理过程中，Zn 和 Y 原子固溶到了 Mg 中，使强化相数量减少；另外，经过固溶处理后合金组织中 α-Mg 相晶粒尺寸较铸态有一定长大趋势，并且固溶温度越高或保温时间越长，晶粒长大趋势越明显，如图 2(b)和图 2(c) 所示。与未经过固溶处理的铸态组织对比，α-Mg 相晶粒大小并不均匀，形态分化较明显，大部分呈不规则状，只有少部分为板条状。

图 3 是 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金经 T6 固溶+时效热处理后的显微组织。可见，T6 热处理后，组织中析出了大量的强化相，这些强化相弥散分布在 β-Li 相中及 α-Mg 相晶界处，有效地强化了合金，而 α-Mg 相晶粒大小不均匀，形态也不尽相同。由图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)可得，相同的固溶处理工艺，但随着时效时间增长及时效温度的升高，析出的强化相数量明显增加，α-Mg 相数量也有所增多，但不是很明显，且晶粒大小有一定的减小。特别是经过 200 ℃×8 h 时效处理后，α-Mg 相形态大多转变为板条状，晶粒细化明显，如图 3(c)所示。不同的固溶处理和相同的时效后，合金组织中析出相也有一定的规律，即：固溶时间越长，固溶温度越高，析出相也越多，而 α-Mg 相数量及晶粒大小均变化不明显，如图 3(a)，图 3(d)和图 3(e)。

2.2 力学性能

2.2.1 硬度

为了研究固溶处理和固溶 + 时效热处理及由此引起的显微组织的不同对 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金硬度的影响，对比分析了铸态、固溶热处理后和固溶+时效热处理后 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金的维氏硬度，见表 3 和表 4。由表 3 可知，与铸态 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金相比，固溶热处理不仅没提高合金的硬度，反而使得其硬度降低很多。随着固溶时间的延长或固溶温度的升高，合金硬度有一定程度的提高，但 375 ℃×10 h 和 425 ℃×8 h 固溶处理后合金硬度变化不明显。从表 4 得出，固溶+时效热处理后合金硬度高于单一固溶处理的，但仍低于铸态 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金。相同固溶热处理的合金随着时效温度的升高和时效时间的延长，合金的硬度随之增加，如表 4 所示；而由表 4 可见，经过表 3 所示的固溶处理后再经过时效处理，合金硬度有提高，且第 4 组和第 5 组实验合金硬度几乎相同，这与表 3 的 375 ℃×10 h 和 425 ℃×8 h 实验硬度结果相符合。

表4 铸态及T4处理后Mg–8Li–4Zn–3Y合金硬度
Tab.4 Hardness of as–cast and T5 treated Mg–8Li–4Zn–3Y alloy

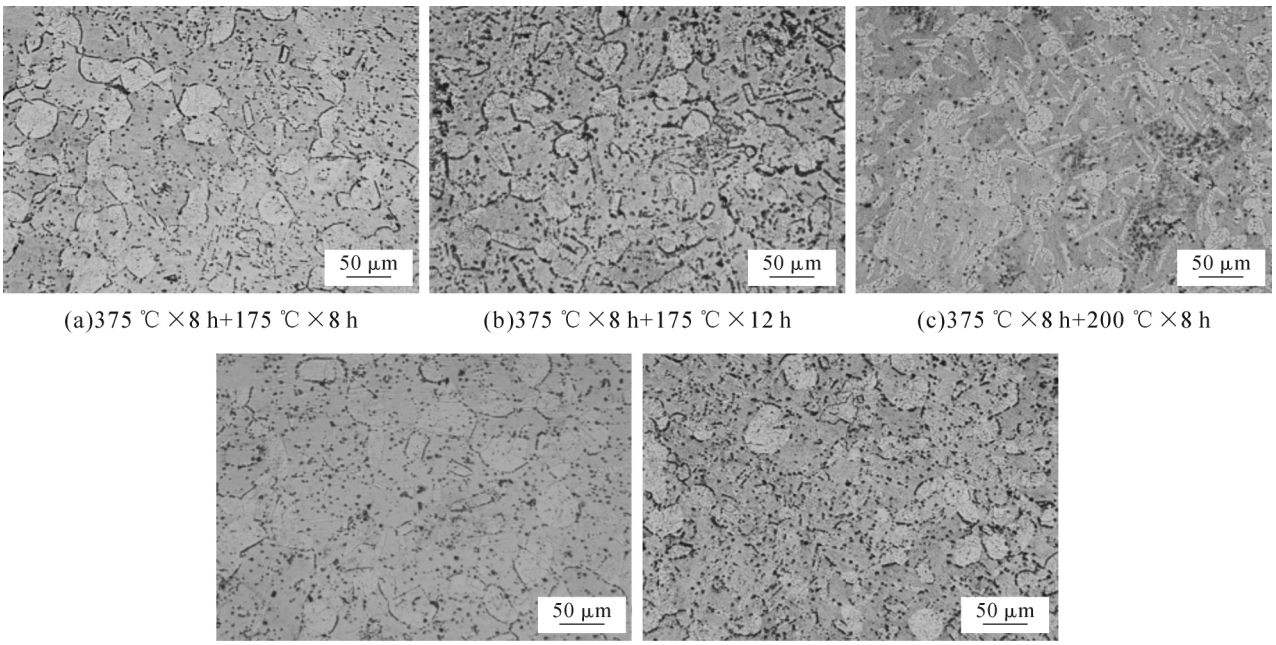
试样编号	0#(as-cast)	1#	2#	3#
硬度(HV_{50})	69.6	48.1	51.9	52.4

表5 T6处理后Mg–8Li–4Zn–3Y合金硬度
Tab.5 Hardness of T6 treated Mg–8Li–4Zn–3Y alloy

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#
硬度(HV_{50})	51.3	56.1	53.7	54.7	54.3

2.2.2 压缩实验

图 4 是 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金铸态及不同条件下 T5 时效热处理后压缩应力 - 应变曲线。由图 4 可



(a)375 ℃ ×8 h+175 ℃ ×8 h (b)375 ℃ ×8 h+175 ℃ ×12 h (c)375 ℃ ×8 h+200 ℃ ×8 h

(d)375 ℃ ×10 h+175 ℃ ×8 h (e)425 ℃ ×8 h+175 ℃ ×8 h

图 3 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金 T6 处理组织
Fig.3 Microstructure of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy treated by T6

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

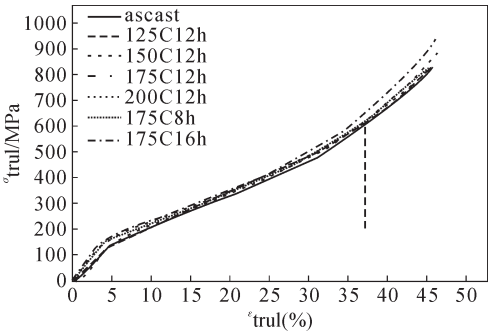


图 4 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金 T5 处理后压缩应力-应变曲线
Fig.4 Compression stress-strain curve of Mg-8Li-4Zn-3Y alloy by T5

知，铸态 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金压缩变形能力最差，而经 T5 时效处理后，Mg-8Li-4Zn-3Y 合金塑性有明显改善。T5 时效热处理后 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金的抗压屈服强度大致相同，说明 T5 处理工艺对抗压屈服强度影响不大，而塑性变化却有提升也有降低。从塑性方面和强度方面综合看，175 ℃×12 h 工艺可以获得高强度和高塑性。另外，铸态及时效 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金试样压缩后，试样中部直径均变粗，试样被压成鼓形，这说明合金在压缩变形开裂失效前均发生了不同程度的塑性变形，且断口形貌既有与试样轴向大致呈 45° 的剪切断裂，又有与试样轴向平行的正断劈裂，剪切面起始于上端面，中止于下端面。铸态 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金试样压缩后的断裂特征为沿轴向从中部竖直开裂，起始于上端面，而中止于距上端面 4 厘米处，试样中部直径变化不明显，塑性变形量较小。而 T5 时效热处理后 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金压缩宏观形貌均被压缩成鼓形，表现出优良的塑性变形特征，但不同时效条件下，合金的压缩量不尽相同，塑性变形程度不同。

对镁合金采取固溶处理的工艺的目的是促使对合金起强化作用的溶质尽可能的溶入合金基体中，起到固溶强化效果。在 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金中 Y 元素和 Zn 元素都起到了强化作用。尽可能保证不发生过烧的条件下提高溶质最大限度溶入基体中形成过饱和固溶体，在随后的时效热处理中，析出强化相。固溶组织分析可知，铸态合金组织中的点状强化相，在经过固溶处理后逐渐溶入基体中，且固溶处理温度较高导致 MgZn 相发生了熔化，使合金中弥散分布于 β-Li 相内的强化相颗粒大量消失。由于富锂 β 相自身强度非常低，固溶强化作用体现不出来，相反，沉淀强化作用会占主导作用，会抑制位错运动，提高强化，而固溶对位错运动的限制非常有限。因此，固溶热处理不仅没能起到强化作用，反而降低了合金硬度。随着固溶时间和固溶温度的提升，固溶程度也逐渐充分，合金硬度随之增加。时效热处理过程中析出了强化相，使得合金硬度较固溶后有所增加。随着时效温度提高和时效时间的延长，强化相析出数量和速度增加，合金硬度逐渐提高。时效温度的提高，提升了过饱和固溶体的的分解速度，但相应析出相的粗化也越来越快[16]。

3 结论

（1）Mg-8Li-4Zn-3Y 合金在 T4 固溶热处理过程中，随固溶温度和固溶时间的增加，组织中弥散分布的强化相减少，而 α-Mg 相晶粒大小却比铸态时大，形貌亦变得不规则，固溶热处理后合金的硬度下降很多；而在接下来的 T5 时效热处理过程中，组织中又逐渐析出大量强化相颗粒，合金的硬度也有一定程度的提高，但与铸态相比仍有一些差距。

（2）铸态及经 T5 时效热处理后 Mg-8Li-4Zn-3Y 合金压缩实验中试样均被压成鼓形，合金表现出优良的塑性变形特征，在不同时效条件下，合金开裂前的压缩量不同，且断口均为与试样轴向大致呈 45° 的剪切断裂，其中 175 ℃×12 h 可以使该合金既保持较高抗压强度，同时又保持较好的塑性变形能力。

参考文献：

[1] Jackson J H, Frost P D, Loonam A C, et al. Magnesium-lithium base alloys-preparation, fabrication, and general characteristics-discussion [J]. Metals Transactions, 1949, 185(2):149-168.

[2] 李劲风，郑子樵，陶光勇. 超轻 Mg-Li 合金[J]. 轻合金加工技术，2004，10(32)：35-38.

[3] Nayeb-Hashemi A A, Clark J B (Eds). Phase Diagrams of Binary Magnesium alloys[M]. ASM International, Metals Park, OH, 1988: 184-194.

[4] Dong Shangli, Imai T, Lim S W, et al. Superplasticity evaluation in an extruded Mg-8.5Li alloy [J]. Journal Institute of Metals, 2007, 42(13):5296-5298.

[5] Mitsuaki Furui, Cheng Xu, Teteuo Aida, et al. Langdon. Improving the superplatic properties of a two-phase Mg-8%Li alloy through processing by ECAP [J]. Materials Science and Engineering A, 2005(410-411): 439-442.

[6] Liu T, Zhang W, Wu S D, et al. Mechanical properties of a two-phase alloy Mg-8%Li-1%Al processed by equal channel angular pressing [J]. Materials Science and Engineering A, 2003 (360): 345-349.

[7] Lin YingNan, Wu HorngYu, Zhou GengZhong, et al. Mechanical and anisotropic behavior of Mg-Li-Zn alloy thin sheets[J]. Materials and Design, 2008 (29): 2061-2065.

[8] Chang TienChan, Wang JianYih, Chu ChunLen, et al. Mechanical properties and microstructure of various Mg-Li alloys[J]. Materials Letters, 2006 (60): 3272-3276.

[9] 赵亮，赵平. 热处理对 Mg-7.28Li-8.02Y 合金显微组织和力学性

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能的影响[J]. 金属热处理, 2008(8): 37-40.

[10] Trojanová Z, Drozd Z, Kúdela S, et al. Strengthening in Mg-Li matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67 (9):1965-1973.

[11] 乐启识, 崔建忠. Zr 对 Mg-Li 合金力学性能的影响 [J]. 材料导报, 1997, 11(1): 26-28.

[12] Li H B, Yao G C, Guo Z Q, et al. Microstructure and Mechanical properties of Mg-Li alloy with Ca addition [J]. Acta Materialia, 2006, 19(5):355-361.

[13] 张津, 章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[14] 王慧敏, 陈振华, 严红革, 等. 镁合金的热处理[J]. 金属热处理, 2005, 30(11): 49-54.

[15] IE J F, MUDDLE B C. Characterisation of strengthing precipitate phase in a Mg-Y-Nd alloy [J]. Acta mater, 2000, 48(8): 1691-1703.

[16] 方玲, 张小联, 谭爱花, 等. Mg-Gd-Y-Zr 镁合金时效硬化研究[J]. 江西有色金属, 2008, 22(3): 29-31.

河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂

冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区，紧靠全国大动脉京九、石梅铁路，交通十分便利。我厂是生产铸顶（泥芯撑)、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来,技术设备先进，产品销往全国各地,深受用户欢迎。本厂始终承诺：诚信至上，守信誉,质高价低，实行三包，交货及时，代办发运，可供图订做。热情欢迎国内外来人来电选购。

四同

同类产品比质量　同等质量比价格
同样价格比服务　同等服务比速度

两免

免费为客户提供产品技术咨询
免费为客户提供初期试用产品

一、常用修造工具规格（材质为不锈钢或弹簧钢）

/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔：20～120 mm 10个品种； 圆水笔：12～17 mm 3个品种；
三、铸顶（芯撑）有圆、方、长方形，单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F，表面镀锌、镀锡等；
四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。

图中从左至右依次为：1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勺 4.单齐压勺 5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩 11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

诚征各地代理商

厂址：河北省冀州市城南白庄工业区（053200） 联系人：白英韩 13831863803 白其水 13582484193（中国农行金穗卡，户名：白英韩 卡号：9559982130332490310)
电话/传真：0318-8682135 网址：www.hbzhz.com E-mail:hbbyh@hbzhz.com 银行汇款：冀州市华北铸钉铸造工具总厂 开户行：市中行 帐号：100148643069

经销处
哈尔滨市铸材门市部 13831863803　包头市铸材经销处 13633184318
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882　贵阳市忠信铸材公司 13831888322
长沙市铸材办事处 13831823340　西宁市铸材办事处 13931810511
上海市铸材办事处 13932894585　南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人，增值发票税率17%。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net