

STUDY ON THE PREPARATION AND PROCESSING
TECHNOLOGY OF MAGNESIUM ALLOY WITH HIGH
STRENGTH AND HIGH DAMPING PERFORMANCE

高强高阻尼镁合金的 制备加工技术研究

陈洪美 著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

STUDY ON THE PREPARATION AND PROCESSING
TECHNOLOGY OF MAGNESIUM ALLOY WITH HIGH
STRENGTH AND HIGH DAMPING PERFORMANCE

高强高阻尼镁合金的 制备加工技术研究



陈洪美 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

高强高阻尼镁合金的制备加工技术研究 / 陈洪美著
— 镇江 : 江苏大学出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5684-0878-3

I. ①高… II. ①陈… III. ①镁合金—制备 IV.
①TG146.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 148584 号

高强高阻尼镁合金的制备加工技术研究

Gaoqiang Gaozuni Meihejin De Zhibei Jiagong Jishu YanJiu

著 者/陈洪美

责任编辑/王 晶 吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/句容市排印厂

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/6.625

字 数/184 千字

版 次/2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0878-3

定 价/39.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

镁及镁合金具有高的比强度、比刚度，良好的阻尼减震性，优良的机加工性能，易于回收利用等特性，已经成为有色金属材料中发展最为迅速的合金系。轻质镁合金在交通车辆、电器包装、电子通信、航空航天、国防科技等领域得到了广泛的应用，被誉为 21 世纪最具发展前途的金属结构材料。我国镁资源储量丰富，在镁工业方面拥有三项“世界冠军”，即储量、生产和出口；利用我国丰富的镁资源优势开展镁合金的研究显示出良好的前景。然而，镁合金自身具有的缺点，如强度较低、各向异性严重导致塑性加工困难等问题，使其作为某些结构件的应用受到限制。要进一步扩大镁合金的应用范围，满足其在高技术领域的应用，必须提高镁合金的塑性加工性能，并使其具有优良的综合力学性能。高阻尼材料的发展与应用是控制噪声与振动的有效途径之一，纯镁具有较好的阻尼性能，但其力学性能较差。因此，微合金化和塑性加工是制备高强高阻尼镁合金的有效途径之一。

本书综合国内外研究现状，阐述了镁合金的强化途径及镁合金的成形与应用现状、变形镁合金的研究进展及其应用、塑性加工技术；介绍了双辊铸轧镁合金的国内外研究动态，阐述了材料的阻尼及其表征测量方法和镁合金的阻尼原理，从而为高强高阻尼镁合金的制备加工提供了参考。

本书共分 6 章。第 1 章介绍了镁及镁合金的基本知识，包括镁合金的强化途径、成形方法及应用、变形镁合金的研究进展及其应用、变形镁合金的塑性加工技术、双辊铸轧镁合金工艺及国内外研究现状、材料的阻尼及表征和变形镁合金的阻尼原理及研究现状。第 2 章介绍了高强高阻尼镁合金的制备工艺和研究方

法,通过传统铸造+轧制和双辊铸轧+轧制两种工艺过程制备了变形镁合金,并分析了制备工艺对其组织和性能的影响。第3章介绍了双辊铸轧镁合金的组织形貌,分析了组织形成机理,研究了热处理对双辊铸轧镁合金组织和阻尼性能的影响,并分析其阻尼机理。第4章介绍了双辊铸轧镁合金的热轧变形工艺,系统介绍了轧制工艺参数:轧制温度、轧制变形量等对铸轧镁合金组织、织构、力学性能和阻尼性能的影响,对轧制变形后双辊铸轧镁合金的阻尼机理进行了分析,并与传统工艺方法进行了对比,以便使读者对镁合金薄板的制备加工工艺有较为全面的了解。第5章介绍了双辊铸轧+热轧镁合金薄板的热处理工艺,系统研究了热处理工艺参数对镁合金薄板组织和性能的影响,优化了镁合金薄板的热处理工艺参数。第6章对双辊铸轧镁合金的轧制工艺进行了进一步的优化,并对镁合金的强化机理进行了分析。

本书综合考虑了实践性和理论性,适于本科、研究生及相关工程师的应用。书中各章之间具有连贯性,又有一定的独立性,读者可根据需要挑选有关章节参阅。

本书的出版得到了国家自然科学基金(青年基金)资助项目(51301077)、江苏省自然科学基金(青年基金)资助项目(BK20130470)、江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB430010)、中国博士后科学基金资助项目(2017M611748)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏科技大学品牌专业建设项目等项目的资助和支持!本书编写过程中参考并引用了大量国内外学者的研究成果,在此向这些作者表示诚挚的谢意。作者指导的江苏科技大学材料科学与工程学院的硕士研究生臧千昊参与了部分试验的研究和数据分析,在此一并表示感谢。

由于新型高强高阻尼镁合金的制备加工技术发展的日新月异,加之作者水平有限,书中不足之处敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 镁及镁合金的基本知识	001
1.1 镁的性质	001
1.2 镁合金的强化途径	003
1.2.1 合金化强化	004
1.2.2 热处理强化	004
1.2.3 细晶强化	005
1.2.4 复合强化	007
1.3 镁合金的成形与应用	008
1.3.1 镁合金的成形	008
1.3.2 镁合金的应用	009
1.3.3 镁合金的发展	012
1.4 变形镁合金的研究进展及其应用	013
1.4.1 Mg-Al 系变形镁合金	015
1.4.2 Mg-Li 系变形镁合金	016
1.4.3 Mg-Zn 系变形镁合金	017
1.5 变形镁合金的塑性加工技术	019
1.5.1 镁合金的锻造	019
1.5.2 镁合金的挤压	020
1.5.3 镁合金的轧制	021
1.6 双辊铸轧镁合金工艺及其研究现状	025
1.6.1 国外镁合金铸轧工艺研究动态	026
1.6.2 国内镁合金铸轧工艺研究动态	028

1.7	材料的阻尼与表征	029
1.7.1	材料的阻尼	029
1.7.2	材料阻尼的表征	030
1.7.3	材料阻尼的测量	031
1.8	镁合金阻尼原理及研究现状	032
1.8.1	镁合金阻尼原理	032
1.8.2	镁合金阻尼性能研究现状	033
第2章 高强高阻尼镁合金的制备工艺及研究方法		036
2.1	研究思路	036
2.2	试验材料的选取	037
2.3	主要试验设备及检测仪器	037
2.4	熔炼、浇铸和铸轧工艺	038
2.4.1	常规熔炼、浇铸工艺	038
2.4.2	双辊铸轧工艺	039
2.4.3	预轧制和热轧工艺	039
2.4.4	热处理工艺	041
2.5	试验结果分析方法	042
2.5.1	显微组织观察	042
2.5.2	宏观织构分析	043
2.5.3	电子背散射衍射 (EBSD) 分析	043
2.5.4	显微硬度测试	044
2.5.5	拉伸性能测试	044
2.5.6	阻尼性能测试	045
2.6	本章小节	045
第3章 双辊铸轧镁合金的组织及阻尼机理研究		046
3.1	双辊铸轧镁合金的组织形貌	047
3.1.1	双辊铸轧镁合金的外观形貌	047
3.1.2	双辊铸轧镁合金条带的微观组织	049

3.2	铸轧镁合金条带组织形成机理分析	051
3.2.1	铸轧熔池结晶的特点	051
3.2.2	铸轧凝固组织的结晶热力学分析	052
3.2.3	双辊铸轧凝固变形过程分析及其组织特征	054
3.3	双辊铸轧镁合金的热处理工艺研究	057
3.3.1	退火处理工艺研究	057
3.3.2	T4 处理 (固溶处理) 工艺研究	062
3.3.3	T6 处理 (固溶处理后人工时效) 工艺研究	066
3.4	双辊铸轧镁合金的阻尼性能研究	074
3.4.1	ZK60 镁合金的温度 - 阻尼性能	075
3.4.2	人工时效对 ZK60 镁合金高温背底激活能的影响	080
3.4.3	ZK60 镁合金的应变 - 阻尼性能	082
3.4.4	ZK30 - Y 镁合金的温度 - 阻尼性能	083
3.4.5	人工时效对 ZK30 - Y 镁合金高温背底激活能的影响	087
3.4.6	ZK30 - Y 镁合金的应变 - 阻尼性能	089
3.4.7	双辊铸轧镁合金的阻尼机理分析	089
3.5	本章小结	094
第 4 章	双辊铸轧镁合金的热轧变形工艺研究	096
4.1	轧制工艺参数	096
4.2	轧制温度对 ZK60 镁合金薄带组织和力学性能的影响	098
4.2.1	轧制温度对组织的影响	098
4.2.2	轧制变形对显微硬度的影响	100
4.2.3	轧制温度对室温拉伸性能的影响	102
4.3	轧制道次间压下量对 ZK60 镁合金薄带组织和力学性能的影响	102

- 4.3.1 道次间压下量对组织的影响 102
- 4.3.2 道次间压下量对室温拉伸性能的影响 103
- 4.4 轧制总变形量对 ZK60 镁合金薄带组织和力学性能的影响 104
 - 4.4.1 总变形量对组织的影响 104
 - 4.4.2 总变形量对室温拉伸性能的影响 107
- 4.5 轧制工艺对 ZK60 镁合金薄带温度-阻尼性能的影响 108
 - 4.5.1 轧制道次对温度-阻尼性能的影响 108
 - 4.5.2 道次间压下量对温度-阻尼性能的影响 114
 - 4.5.3 轧制温度对温度-阻尼性能的影响 118
- 4.6 轧制工艺对 ZK60 镁合金薄带应变-阻尼性能的影响 122
 - 4.6.1 轧制道次对应变-阻尼性能的影响 122
 - 4.6.2 道次间压下量对应变-阻尼性能的影响 122
 - 4.6.3 轧制温度对应变-阻尼性能的影响 123
- 4.7 轧制变形后双辊铸轧镁合金阻尼机理分析 124
 - 4.7.1 轧制变形后镁合金温度-阻尼机理分析 124
 - 4.7.2 轧制变形后镁合金应变-阻尼的 G-L 分析 125
- 4.8 ZK60 镁合金薄带的织构分析 128
 - 4.8.1 轧制温度对宏观织构的影响 129
 - 4.8.2 变形量对宏观织构的影响 130
 - 4.8.3 退火薄带的 EBSD 分析 132
- 4.9 双辊铸轧 (TRC) 工艺与传统铸造 (CC) 工艺对比 134
 - 4.9.1 ZK60 镁合金的铸锭与铸轧条带的显微组织对比 134
 - 4.9.2 热轧 CC 镁合金薄带与 TRC 镁合金薄带的显微组织对比 135

4.9.3	热轧 CC 镁合金薄带与 TRC 镁合金薄带的拉伸性能对比	137
4.10	本章小结	139
第 5 章	ZK60 镁合金薄带的热处理工艺优化	141
5.1	轧制态 ZK60 镁合金薄带的显微组织	142
5.2	退火处理对 ZK60 镁合金薄带组织和性能的影响	142
5.2.1	退火温度对组织的影响	142
5.2.2	退火温度对室温力学性能的影响	146
5.2.3	退火保温时间对 ZK60 镁合金薄带组织和力学性能的影响	148
5.2.4	退火态 ZK60 镁合金薄带的相析出行为研究	150
5.3	T6 处理对 ZK60 镁合金薄带组织和力学性能的影响	153
5.3.1	固溶处理对 ZK60 镁合金薄带组织的影响	153
5.3.2	T6 处理对 ZK60 镁合金薄带室温拉伸性能的影响	154
5.3.3	T6 处理对 ZK60 镁合金薄带相析出行为的影响	155
5.4	T6 热处理对 ZK60 镁合金薄带各向异性的影响	157
5.5	本章小结	159
第 6 章	铸轧镁合金的热轧工艺优化及其强化机理研究	161
6.1	ZK60 镁合金的热轧工艺优化	161
6.1.1	中间退火制度对组织的影响	161
6.1.2	中间退火制度对室温拉伸性能的影响	163
6.1.3	混合温度轧制工艺研究	164
6.2	镁合金轧制过程中晶粒细化的影响因素	166
6.2.1	镁合金的晶体结构	166

6.2.2	轧制前合金的显微组织	168
6.2.3	轧制工艺参数	168
6.3	镁合金的晶粒细化机制	169
6.4	热轧 ZK60 镁合金的强化机理	171
6.4.1	细晶强化机理	172
6.4.2	第二相强化机理	173
6.4.3	位错强化机理	176
6.5	本章小结	177
第 7 章 结论与展望		178
7.1	结论	178
7.2	主要创新点	181
7.3	进一步研究的建议	182
参考文献		183

第1章 镁及镁合金的基本知识

镁在地壳中的含量达到 2.1%，在地球上存在的元素中居第八位，作为工业用金属，仅次于铝和铁（地壳中铝约占 8.1%，铁约占 5%）居第三位。镁合金具有高的比强度、比刚度，良好的阻尼减震性，优良的机加工性能，且易于回收利用等特性。因此，轻质镁合金已经成为有色金属材料中发展最为迅速的合金系，在交通车辆、电器包装、电子通信、航空航天、国防科技等领域得到了广泛的应用，被誉为 21 世纪最具发展前途的金属结构材料。我国镁资源储量丰富，在镁工业方面拥有三项“世界冠军”，即储量、生产和出口。因此，利用我国丰富的镁资源优势开展镁合金的研究显示出诱人的前景。然而，镁合金自身具有的缺点，如强度较低、各向异性严重导致塑性加工困难等问题，使其作为某些结构件的应用受到限制；要进一步扩大镁合金的应用范围，满足其在高技术领域的应用，必须提高镁合金的塑性加工性能，并使其具有优良的综合力学性能。

1.1 镁的性质

镁是目前最轻的金属结构材料，纯镁在室温（20℃）下的密度为 $1.738 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，是钢的 $1/4$ ，铝的 $2/3$ 。接近熔点（650℃）时，固态镁的密度大约为 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。金属镁凝固时体积收缩率为 4.2%，对应的凝固线收缩率为 1.5%。当金属镁从 650℃ 冷却到 20℃ 的过程中约有 5% 的体积收缩，对应的线收缩率为 1.7%。标准大气压下，纯镁是密排六方结构晶体，镁单胞内沿主要晶面

和晶轴方向的原子排布如图 1-1a 所示。在标准大气压和室温下，镁的晶格常数分别为 $a = 0.320\ 2\ \text{nm}$ ， $c = 0.519\ 9\ \text{nm}$ ， $c/a = 1.624$ 。其中 c/a 值非常接近由紧密堆积球体得到的理论比值 1.632，这种晶体结构是导致其塑性加工性能和使用性能较差的重要原因。

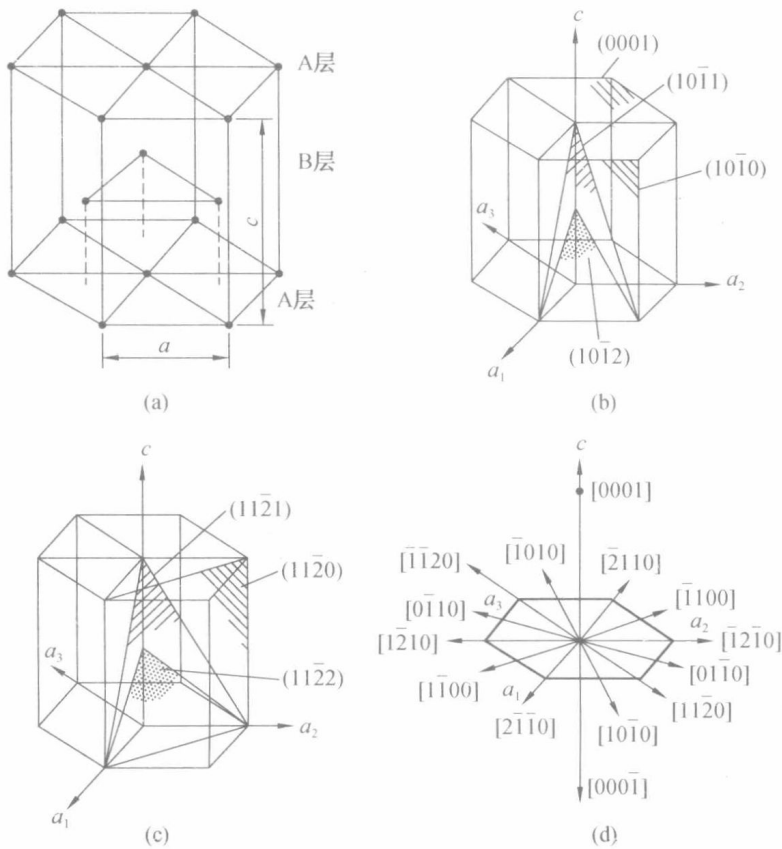


图 1-1 镁的晶胞

在常温下，密排六方结构镁的塑性变形限于基面 $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 滑移及锥面 $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$ 孪生(见图 1-1)。因此，在室温塑性变形过程中，镁晶体中只有 3 个几何滑移系和

2 个独立滑移系，这是镁塑性较差及有较大的 Hall - Petch 系数的主要原因，也是多晶镁及其合金不产生宏观屈服而在晶界产生应力集中的主要原因。

室温下镁的拉伸性能、压缩性能和硬度见表 1-1。金属镁在室温（20 ℃）下的弹性模量与其纯度有关，镁的最高纯度为 99.98% 时，金属镁的动态弹性模量为 44 GPa，其静态弹性模量为 40 GPa；而当镁的纯度为 99.8% 时，金属镁的动态弹性模量为 45 GPa，静态弹性模量为 43 GPa。随着温度的增加，镁的弹性模量下降。金属镁的泊松比为 0.35。

表 1-1 室温下（20 ℃）镁的典型力学性能

试样规格	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ （压缩） /MPa	δ /%	硬度	
					HRE	HB*
砂型铸件 $\phi 13$	90	21	21	2 ~ 6	16	30
挤压件 $\phi 13$	165 ~ 205	69 ~ 105	34 ~ 55	5 ~ 8	26	35
冷轧薄板	180 ~ 220	115 ~ 140	105 ~ 115	2 ~ 10	48 ~ 54	45 ~ 47
退火薄板	160 ~ 195	90 ~ 105	69 ~ 93	3 ~ 15	37 ~ 39	40 ~ 41

注：★载荷 500 kg，球面直径 10 mm。 σ_b 为抗拉强度， $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度。

1.2 镁合金的强化途径

工业纯镁的强度低，室温塑性差（表 1-1），如纯镁单晶体的临界切应力只有 4.8 ~ 4.9 MPa，不能直接作为结构材料。通过合金化、热处理、晶粒细化、引入陶瓷颗粒增强与镁合金复合等多种方法或这些方法的综合运用，镁的力学性能会得到大幅度提高。长期以来，人们对镁合金的强化机理进行了大量研究，镁合金的强化通常有以下几个途径，即合金化强化、热处理强化、细晶强化、形变强化及复合强化等。

1.2.1 合金化强化

在镁中添加合金元素对镁进行强化已成为镁合金强化的重要手段，镁合金的常用合金元素主要有铝、钙、锌、锰、稀土金属（混合稀土、钹、钇、钆等）、钍、锆、银等，添加微量元素铍，杂质元素铁、镍等。镁合金的合金化均是利用固溶强化、沉淀强化和弥散强化来提高合金的常温和高温力学性能，因此其合金化设计主要从晶体学、原子的相对大小、原子价及电化学因素等方面进行考虑。

固溶强化是合金化元素（溶质）完全溶入基体金属（溶剂）中，溶质原子在溶剂晶格点阵处取代溶剂原子，从而通过原子错排及溶质与溶剂原子之间弹性模量的不同而强化基体金属。当合金元素在基体合金中的固溶度随温度的下降而降低时，就可以在合金中产生沉淀强化，其强化机制是析出相阻碍位错运动和滑移，从而提高屈服强度。弥散强化的机制与沉淀强化类似，但析出相不同，弥散强化的颗粒在合金凝固过程中产生，一般具有较高的熔点，而且不溶于镁基体，具有良好的热力学稳定性。用于镁的合金强化元素主要有 Al, Zn, RE, Ag, Ca, Y 等。

1.2.2 热处理强化

多数镁合金都可以通过热处理来改善或调整材料的力学性能和加工性能，其热处理规范和应用范围与铝合金的基本相同。镁合金能否通过热处理强化完全取决于合金元素的固溶度是否随温度变化而变化。当合金元素的固溶度随温度变化时，镁合金可以进行热处理强化。根据合金元素的种类，可进行热处理强化的镁合金有三大系列，即 Mg-Al-Zn 系、Mg-Zn-Zr 系和 Mg-RE-Zr 系。镁合金的常见热处理方法包括退火处理、固溶处理和时效处理，镁合金的基本热处理种类及其符号列于表 1-2。热处理能够有效地改善镁合金的组织与性能。合适的热处理工艺可以对镁合金组织晶粒细化，进而改善镁合金的强度及塑性。此外，热处理可以显著地影响第二相的形态及分布形式，进而改善镁合金的综合性能。

表 1-2 镁合金基本热处理种类及其符号

符号	意义	符号	意义
F	加工状态	T4	固溶处理（然后自然时效）
O	完全退火	T5	人工时效
H1	加工硬化	T6	固溶处理后人工时效
H2	加工硬化后退火	T7	固溶处理后稳定化处理
T2	去应力退火	T8	固溶处理后冷加工、人工时效
T3	固溶处理后冷加工	T9	固溶处理、人工时效后冷加工

镁合金的退火处理主要有完全退火、去应力退火和均匀化退火。完全退火要求的退火温度较高，且退火时间较长。完全退火可以有效消除塑性加工后产生的冷作硬化，恢复镁合金的塑性，为镁合金下一步塑性变形做准备。去应力退火要求的退火温度较低，且退火时间较短。去应力退火处理后可以有效消除镁合金铸锭或镁合金在冷变形、焊接等过程中产生的残余应力。均匀化退火一般安排在塑性变形之前，可以有效消除铸态合金的成分偏析，减小在后续变形过程中的应力集中，提高镁合金的塑性变形能力，也为后续产生析出相做准备。

镁合金在实际的结晶过程中常出现组织不均匀现象，为了减少这种现象，镁合金常进行固溶处理（T4 处理）。通过固溶处理（T4 处理）后，合金元素溶入镁合金基体中产生晶格畸变，进而产生的应力场将阻碍位错的运动，可以提高镁合金的力学性能。固溶处理后进行人工时效处理（T6 处理）可以产生析出强化的效果，通过人工时效处理后可以消除镁合金中的应力，提高镁合金的力学性能。

1.2.3 细晶强化

镁合金室温下低的韧性和成形性与其密排六方结构和高度的各向异性的位错滑移有关。晶粒细化，可以细化基体上的颗粒相并使其均匀分布于基体，从而提高镁合金的力学性能、成形性能和可加工性能。因此，对于铸造用镁合金零部件，细化晶粒就显得非常重

要；同时，细晶对于半成品的最终性能也有很大的影响。一般来讲，拥有极大冷却速度的高压压铸镁合金具有细小的晶粒，在凝固过程中不需要晶粒细化剂来细化晶粒。然而，对于砂型铸造、金属型铸造和连续铸造来说，它们的凝固速度相对较慢，只有在浇注之前加入晶粒细化剂，才能得到细小、均匀的组织。

镁合金的细晶强化主要通过控制镁合金晶粒度的方法来实现。合金的屈服强度和晶粒尺寸的关系可用 Hall - Petch 公式来表示，即：

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}} \tag{1-1}$$

式中， σ_s —材料的屈服强度，MPa； σ_0 —单晶体的屈服强度，MPa； K —常数， $\text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{\frac{1}{2}}$ ； d —晶粒大小， μm 。

K 值随着 Taylor 指数的增加而增加，而 Taylor 指数又与合金中滑移系的数目有关，滑移系数目越少，Taylor 指数越大。由于密排六方 (HCP) 金属的滑移系数目比面心立方 (FCC) 和体心立方 (BCC) 金属的要少，因此其 Taylor 指数较大，这就使得 HCP 金属的晶粒尺寸对其屈服强度的影响更大 (K_{Mg} 为 $280 \sim 320 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$ ，而 K_{Al} 为 $68 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$)。因此，细晶镁合金具有更高的屈服强度。图 1-2 给出了 AZ91 镁合金和 5083 铝合金的晶粒尺寸与屈服强度的关系。

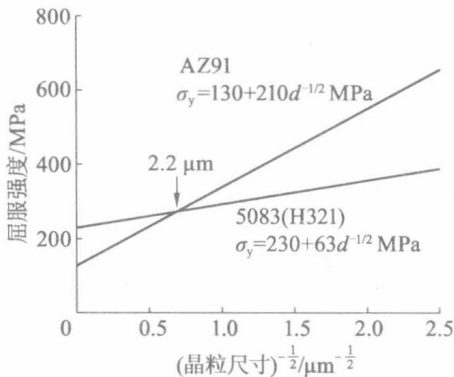


图 1-2 AZ91 镁合金和 5083 铝合金中屈服强度和晶粒尺寸的关系