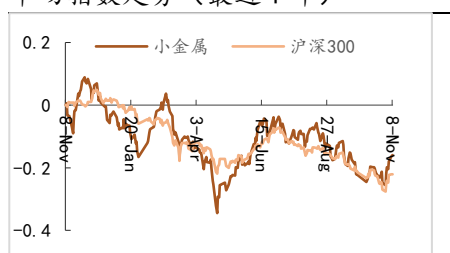


评级：看好

吴轩  
有色行业首席分析师  
SAC 执证编号：S0110521120001  
wuxuan123@sczq.com.cn  
电话：021-58820297

市场指数走势（最近1年）



资料来源：聚源数据

核心观点

- **电池容量大，低成本潜力，安全性强是镁离子电池关键优势点。**镁离子的二价特性使得其可以携带和存储更多的电荷，具有锂电池 1.5-2 倍的理论能量密度。同时镁具有易提取、分布广泛的特性，中国具有绝对资源禀赋优势，在制成镁电池后，其潜在成本优势及资源安全属性高于锂电池。在安全性方面，镁离子电池在充放电循环过程中负极不会出现镁枝晶，可避免出现锂电中的锂枝晶生长刺穿隔膜并导致电池短路起火爆炸的情况。以上三大优势使得镁电池具有较大的发展前景及潜力。
- **镁电池技术路线多元化，应用场景广阔。**除镁离子电池外，镁海水电池、镁空气电池同样应用场景广阔。镁海水电池采用海水作为电解质溶液，依靠金属的不断溶解提供电能，不需要额外携带电解质，具有能量密度高、安全性好、可全海深工作等优点，适合海洋作业。镁空气电池以金属为燃料，可以通过更换镁板实现能量的重新补充来实现“机械式再充电”，具有携带方便、使用安全、快速“充电”等优点，在户外、应急等情境下具有独一无二的优势。
- **我国镁资源+冶炼全球领先，为镁电池推广带来巨大成本优势。**自然界中镁资源主要以白云石、菱镁矿、盐湖镁盐等形式分布。我国含镁白云石矿储量丰富，现已探明储量达 200 亿吨以上；菱镁矿储量占全球总量的 21%，产量占总量的 70%；盐湖镁盐资源同样丰富，累计查明资源储量达 60 亿吨以上。镁电池一旦实现产业化，我国在新能源产业原料端的对外依存度将大幅下降，对电池企业降低制造成本，获得竞争优势有极大助益。
- **未来镁电池在储能电池、动力电池、电动工具等应用场景有望对锂电池和铅酸电池实现替代。**“双碳”背景下随着新能源发电占比持续提升，储能需求快速增长，预计到 2025 年全球储能市场规模将超过 300GWh。镁离子电池的特性与储能场景要求高度贴合，未来在储能领域的发展空间将随着技术进步不断扩大。预计我国 2022 年动力电池装机量将达 229.9GWh，镁电池有望凭借高能量密度在该领域逐步渗透。此外，在两轮车和电动工具等成本敏感和注重性价比的领域，镁电池有望凭借成本优势加速渗透，逐步取代锂电池和铅酸电池。
- **推荐云海金属：宝钢控股开启新纪元，镁资源整合与应用推广有望加速。**公司已布局完整的镁产业链，现有原镁产能 10 万吨/年，镁合金产能 20 万/年，均位列全球第一，青阳与巢湖项目 2023 年投产后原镁产能将增长至 50 万吨。公司在白云石资源端积极布局，巢湖云海和安徽宝镁分别拥有 8864.25 万吨和 131978.13 万吨的白云石的采矿权，原材料储备在满足未来产能扩张需要下，仍可外售部分骨料和熔剂增厚利润。公司积极布局镁电池研发，与重庆大学潘复生院士团队合作共同开发镁电池应用，该团队完成的“镁离子电池”项目荣获 2022 年国际“镁未来技术奖”。宝钢控股云海后有望进一步加速镁资源整合及镁下游应用推广，公司致力于成为镁行业整合者、技术创新者和产业引领者。

- 
- **风险提示：**镁电池商业化推广进度不及预期；镁电池在储能领域推广不及预期。

## 目录

<b>1 高能量密度、低成本潜力、安全性能高 镁离子电池三大优势潜力无限</b>	<b>1</b>
1.1 二价镁离子携带电荷更多，能量密度更高	1
1.2 不会产生枝晶，安全性能更好	1
1.3 我国镁资源充沛，自主可控性强	2
1.4 技术路线之争或成为镁离子电池商用最后障碍	3
<b>2 镁离子电池—锂离子电池的高潜力替代方案</b>	<b>3</b>
2.1 镁离子电池正极材料研究深入，种类繁多	4
2.1.1 嵌入脱出型正极材料	4
2.1.2 转换类型正极材料	5
2.1.3 有机正极材料	6
2.2 可均匀沉积的金属镁是理想的负极材料	7
2.3 连接阳极和阴极的桥梁，合适的电解质至关重要	8
2.3.1 液态电解质	8
2.3.2 固态电解质	9
2.4 未来可充镁电池的实际应用场景潜力巨大。	11
<b>3 镁电池技术路线多元化，应用场景广阔。</b>	<b>11</b>
3.1 镁一次电池—初代镁电池，纳米级材料有望带来新出路	11
3.2 镁海水电池—无需额外携带电解质，适合海洋作业	12
3.2.1 镁海水电池原理独特优点明显	13
3.2.2 镁海水电池种类繁多，但均以镁作为负极	13
3.2.3 镁海水电池优势独特，有望在海洋领域大放异彩	14
3.3 镁空气电池—安全可靠的新型燃料电池	15
3.3.1 镁空气电池以金属为原料，实现机械式再充	15
3.3.2 正负极材料是镁空气电池研究重点	16
3.3.3 镁空气电池优点显著，前景斐然	17
<b>4 镁资源储量丰富，中国资源禀赋优势显著</b>	<b>18</b>
4.1 我国镁资源丰富，原镁冶炼能力全球领先	18
4.1.1 白云石已探明储量高达 200 亿吨，菱镁矿产量占世界总量 70%	18
4.1.2 原镁冶炼技术成熟，我国镁锭产量全球领先	20
4.2 原镁下游应用广泛，需求爆发窗口临近	21
4.2.1 镁合金是最具前途的汽车轻量化材料之一，未来市场空间巨大	22
4.2.2 镁建筑模板优势明显前景广阔	24
4.3 近年来镁电池技术不断突破，有望实现商业应用	24
4.4 镁离子电池未来应用空间广阔	26
4.4.1 新能源配储是未来趋势，镁离子电池特性与储能场景需求高度贴合	26
4.4.2 镁离子电池或凭三大优势在动力电池领域快速替换锂电池和铅酸电池	27
4.4.3 镁离子电池在电动工具领域具有良好渗透潜力	28
<b>5 公司推荐</b>	<b>29</b>
<b>6 风险提示</b>	<b>30</b>

## 插图目录

图 1 锂枝晶生长过程.....	1
图 2 电池级碳酸锂价格走势（元/吨）.....	2
图 3 2021 年全球锂资源主要国家产量占比分布情况.....	2
图 4 2021 年全球镁锭产量占比.....	2
图 5 镁离子电池工作原理示意图.....	3
图 6 切弗里相化合物正极材料 $\text{Mo}_6\text{S}_8$ 的性能评价.....	5
图 7 层状化合物正极材料 $\text{V}_2\text{O}_5$ 的性能评价.....	5
图 8 过渡金属硫化物正极材料 $\text{TiS}_2$ 示意图.....	6
图 9 过渡金属硫化物正极材料 $\text{VS}_4$ 示意图.....	6
图 10 过渡金属氧化物正极材料 $\text{MoO}_3$ 的性能评价.....	6
图 11 过渡金属氧化物正极材料 $\text{MnO}_2$ 的性能评价.....	6
图 12 DMBQ 充放电曲线.....	7
图 13 合金法插入式负极材料的电化学反应机理示意图.....	8
图 14 电解质关键结构和设计原则.....	8
图 15 DMBQ 充放电曲线.....	9
图 16 无机固态电解质发展及不同温度下的性能.....	10
图 17 以 $\text{Mo}_6\text{S}_8$ 为正极组装的固态电池 $100^\circ\text{C}$ 循环 150 次后.....	11
图 18 镁离子电池应用场景.....	11
图 29 镁锰干电池示意图.....	12
图 20 海水电池开放结构示意图.....	12
图 21 镁海水电池工作原理.....	13
图 22 三种镁海水电池.....	14
图 23 深海着陆器工作场景.....	15
图 24 传统燃料电池原理.....	16
图 25 镁-空气电池原理.....	16
图 26 镁空气燃料电池应用场景.....	17
图 27 镁空气燃料电池应用.....	18
图 28 自然界中镁资源主要存在形式.....	19
图 29 菱镁矿产量（万吨）.....	19
图 30 镁冶炼技术发展历程.....	20
图 31 不同原材料对应的镁冶炼技术.....	20
图 32 2014-2021 我国原镁产量.....	21
图 33 2014-2021 全球原镁产量.....	21
图 34 镁行业产业示意图.....	22
图 35 原镁消费结构.....	22
图 36 镁合金消费结构.....	22
图 37 电池包结构示意图.....	23
图 38 主要建筑模板市占率情况.....	24
图 39 我国建筑模板发展历程.....	24
图 40 崔光磊团队研究成果.....	25
图 41 张跃钢团队研究成果.....	25
图 42 全球电化学储能新增装机统计（MW）.....	26

图 43 全球电化学储能需求测算 (GWh) .....	27
图 44 2017-2022 我国动力电池装机量.....	27
图 45 锂离子电池在两轮车市场渗透速度放缓 .....	28
图 46 云海金属 2016-2021 营业收入情况.....	29
图 47 云海金属 2016-2021 归母净利润情况.....	29

## 表格目录

表 1 镁与锂的比较.....	1
表 2 镁离子电池与锂离子电池材料体系对比 .....	3
表 3 镁海水电池的优点.....	13
表 4 不同镁海水电池的原理和结构.....	14
表 5 2016-2021 全球镁锭产量 (万吨) .....	21
表 6 单车用镁量趋势.....	22
表 7 镁合金电池包外壳需求预测.....	23
表 8 中国电动两轮车市场空间.....	28
表 9 全球电动工具市场空间测算 (十亿美元) .....	28

## 力无限

# 1 高能量密度、低成本潜力、安全性能高 镁离子电池三大优势潜力无限

## 1.1 二价镁离子携带电荷更多，能量密度更高

镁与锂化学相似，具有更高的理论能量密度。在元素周期表中，镁与锂处于对角线位置，两者有相似的化学性质。与金属锂相比，金属镁具有资源丰富、提纯工艺简单、成本更低廉等优点。同时，镁离子的二价特性使得其可以携带和存储更多的电荷，具有更高体积比容量（3833 mAh/cm<sup>3</sup>）和理论能量密度（150-200 Wh/kg）。

表 1 镁与锂的比较

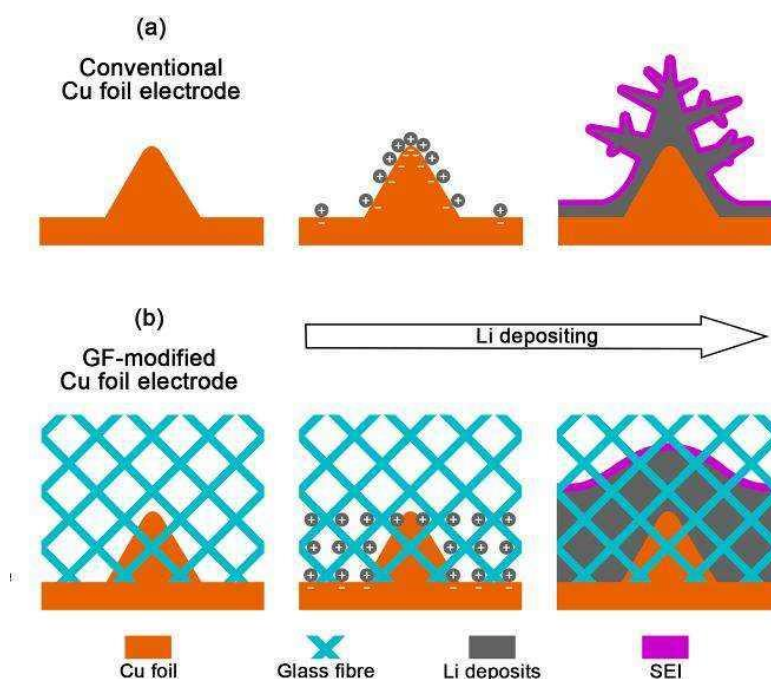
参数	锂 (Li)	镁 (Mg)
原子量	6.94	24.31
离子半径/nm	0.068	0.063
熔点/°C	180.5	648.8
电极电位/V (vs.SHE)	-3.03	-2.37 (酸性) / -2.69 (碱性)
理论比容/mAh×g <sup>-1</sup>	3862	2205
理论能量密度 /Wh/kg	100~150	150~200
金属价格/\$×t <sup>-1</sup>	420000	3500
安全性	隐患大	安全性更高
单位比容量价格/\$×Kwh <sup>-1</sup>	5.08	2.89

资料来源：《镁离子电池的研究进展》，首创证券

## 1.2 不会产生枝晶，安全性能更好

枝晶生长是影响锂离子电池安全性和稳定性的根本问题之一。枝晶生长是指锂电池在充电过程中锂离子还原时形成的树枝状金属锂。锂枝晶的生长会导致锂离子电池在循环过程中电极和电解液界面的不稳定，破坏生成的固体电解质界面膜，锂枝晶在生长过程中会不断消耗电解液并导致金属锂的不可逆沉积，形成死锂造成低库伦效率；锂枝晶的形成甚至还会刺穿隔膜导致锂离子电池内部短接，造成电池的热失控引发燃烧爆炸。

图 1 锂枝晶生长过程



资料来源：百度百科，首创证券

镁离子电池不会出现枝晶，安全性能更好。得益于镁良好的沉积性能，在充放电循环过程中负极表面不会出现镁枝晶，不会出现类似于锂电中的锂枝晶生长刺穿隔膜并导致电池短路起火、爆炸等现象。镁离子电池的发展有利于构建安全性高、可持续发展的新能源二次电池体系。

### 1.3 我国镁资源充沛，自主可控性强

锂资源自然储量低，我国本土供应能力差。随着储能设备的大规模应用和新能源汽车的大规模推广，锂资源低储量和低成本问题逐渐显露。据立鼎产业研究统计，地壳中锂储量仅为 0.0065%，根据 USGS 公布的 2021 年数据，锂资源静态可开采年限为 220 年。其中，我国锂资源储量仅为全球的 6%，而且我国多为提取难度大的盐湖锂，大部分锂矿依赖进口，现有锂资源供应体系对外依存度极高。受供应紧张、需求旺盛的影响，碳酸锂价格不断飙涨，锂电池生产成本大幅提升，已经成为制约下游新能源汽车和储能发展的重要原因。

图 2 电池级碳酸锂价格走势（元/吨）

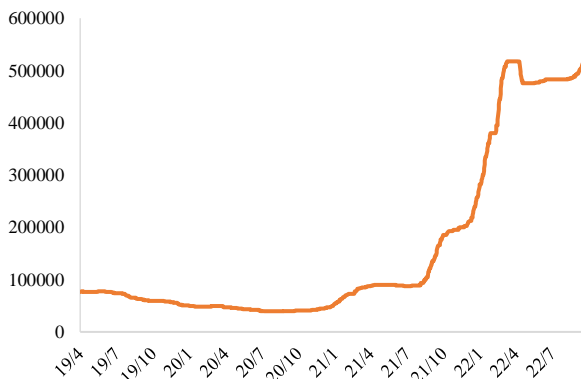
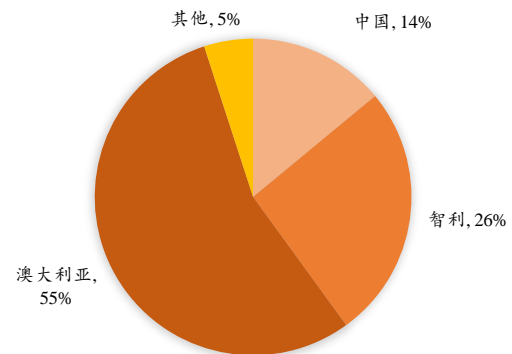


图 3 2021 年全球锂资源主要国家产量占比分布情况

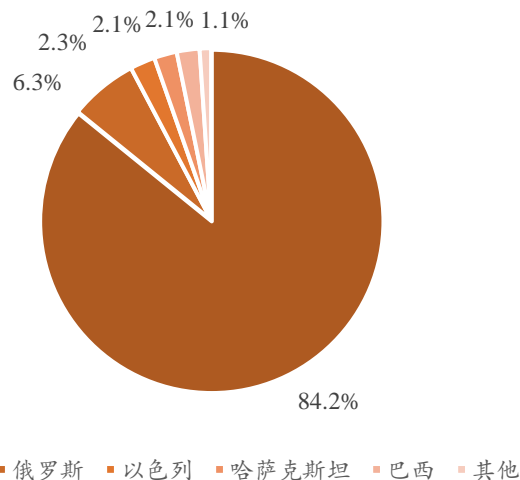


资料来源：Wind，首创证券

资料来源：华经产业研究院，首创证券

我国镁资源充沛，是最大的原镁生产国。我国镁资源充足，是世界上镁资源最为丰富的国家之一，镁资源矿石类型全，分布广。同时我国是世界上最大的原镁生产国，占全球总产量的 80% 以上。这意味着未来镁电池一旦实现产业化应用，我国在新能源领域所需锂资源对海外依存度将大幅下降，同时电池制造成本将显著降低。

图 4 2021 年全球镁锭产量占比



资料来源：Wind，首创证券

## 1.4 技术路线之争或成为镁离子电池商用最后障碍

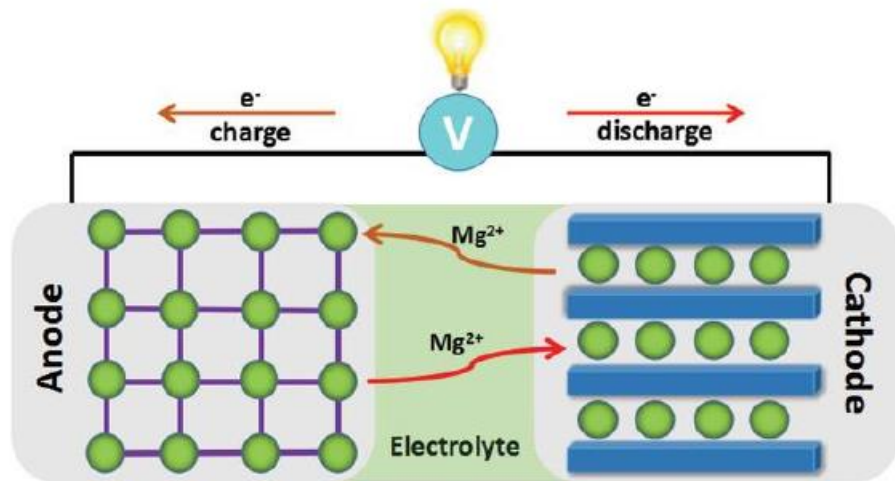
镁离子电池目前主要集中方向为正极材料和电解质。正极材料主要包括嵌入脱出型正极材料、转换类型正极材料、有机物正极材料等。而电解质主要包括液态电解质和固态电解质。不同正极材料和电解质各有特点，优点各异。目前，尚未确定明确的镁离子电池技术路线已经成为制约镁离子电池商业应用的主要障碍。

## 2 镁离子电池—锂离子电池的高潜力替代方案

镁电池是一种极具潜力的新型电池。相比于锂，镁是更理想的金属负极。1、镁金属能量密度高且电极电位低，有利于提高电池的能量密度；2、镁在地壳中储量丰富，价格远低于锂，有利于降低电池成本；3、镁沉积不易产生枝晶，因此镁电池安全性更高。镁电池目前仍处于初级研究阶段，距离商业化仍有很长的路要走。

镁二次电池是继一次电池以后，参照锂离子电池原理提出的新电池，被称为是具有良好发展前景的新型可充电电池。从以色列科学家多伦·奥尔巴赫(Doron Aurbach)在2000年首次提出镁金属二次电池模型至今，该电化学体系已发展二十余年。与当前已经大规模应用的可充电电池相比，可充镁电池具有安全性好、理论体积比容量高、环境友好性强等优点，且镁资源储量丰富，分布广泛。

图 5 镁离子电池工作原理示意图



资料来源：《Microstructure Characteristics of Cathode Materials for Rechargeable Magnesium Batteries》，首创证券

镁离子电池与锂离子电池工作原理相似。充电时，镁离子从正极活性物质中脱出，在外电压的驱使下经由电解液向负极迁移；同时，镁离子嵌入负极活性物质中；因电荷平衡，所以要求等量的电子在外电路的导线中从正极流向负极。充电的结果是使负极处于富镁态，正极处于贫镁态的高能量状态，放电时则相反。外电路的电子流动形成电流，实现化学能向电能的转换。同时，相较于锂离子电池，镁电池离子相对安全，在充放电循环过程中负极不会出现镁枝晶，不会出现类似于锂电中的锂枝晶生长刺穿隔膜并导致电池短路起火、爆炸等现象。

与一次电池类似，镁二次电池也由三个部分组成：镁负极、电解液、能嵌入镁的正极材料，镁二次电池的研究重点是电解液和正极材料。

表 2 镁离子电池与锂离子电池材料体系对比

	锂离子电池	镁离子电池
正极	磷酸铁锂、三元材料等	Chevrel 相化合物、尖晶石型氧化物等
负极	石墨	金属镁



电解液	六氟磷酸锂	醚类电解液或者高氯酸镁电解液
隔膜	PE、PP 等	玻璃纤维
集流体	铜箔、铝箔	不锈钢箔

资料来源:《镁离子电池正极材料结构设计及其储能机理的研究》, 首创证券

## 2.1 镁离子电池正极材料研究深入, 种类繁多

镁离子电池正极主要包括正极材料、导电助剂、集流体和粘结剂, 是电池的核心部件。理想的可充镁电池正极材料要满足容量大、电压平台高、可逆性好、循环效率高、安全稳定、资源丰富、易于制备等要求。目前镁二次电池正极材料的研究主要集中在过渡金属硫化物、过渡金属氧化物、聚阴离子型化合物、硫及硫族化合物、有机物以及复合材料等。集流体需具备耐腐蚀性、稳定性好等特性, 不会与其他物质发生化学反应。目前镁离子电池中常用的集流体为不锈钢箔。

正极材料是镁离子电池(MIBs)的关键材料之一, 直接影响电池的工作电压和充放电比容量。理想的镁离子电池正极材料要满足容量大、电压平台高、可逆性好、循环效率高、安全稳定、资源丰富、易于制备等要求。现阶段研究中所涉及的正极材料种类主要有嵌入脱出型正极材料、转换类型正极材料、有机物正极材料等。

### 2.1.1 嵌入脱出型正极材料

一般而言, 嵌入脱出型材料, 又称插层材料, 在循环过程中能够保持结构稳定, 可以实现稳定的循环, 是镁离子电池中最为广泛研究的正极材料。由于在锂离子电池体系的成功应用, 这些插层化合物也被认为是镁离子电池体系的潜在候选正极。

**(1) 切弗里相化合物。**切弗里相型正极材料在MIBs中的应用是最早且最成功的, 其结构通式为 $Mo_6T_8$  (T=S, Se 和 Te)。 $Mo_6S_8$  具有较快的嵌镁动力学, 优异的循环稳定性, 因此成为迄今最成功的镁电池正极材料之一。然而低电压(1.2 V)和低容量( $120 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ )导致其能量密度( $140 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ )很难满足实际需要。

**(2) 层状化合物。**层状结构材料具有独特的二维通道, 提供了丰富的化学活性插入位点, 使其具有快速嵌入/脱出的能力。层状化合物的高电子导电性有助于加快反应动力学, 因此在储能电池领域具有很大的应用潜力。由于层与层之间的范德华力较弱, 因此层状材料对于镁离子电池也具有有良好的应用前景。层状过渡金属氧化物由于其具有高工作电压、结构稳定且价格低廉等优点, 被认为是镁离子电池最有前景的一种正极材料。 $V_2O_5$  是最具有代表性的层状过渡金属氧化物, 在电池中有着优异的电化学性能。除了层状过渡金属氧化物外, 层状过渡金属硫化物/硒化物也是镁离子电池体系中具有吸引力的正极材料, 如 $MoS_2$ 。另外, 层状 $TiS_2$  和 $MoS_2$  也可发生镁离子的可逆脱嵌。用硒取代硫可降低镁与正极材料阴离子晶格之间的相互作用, 进一步提高镁离子嵌入的动力学, 并在层状 $TiSe_2$  中得到证明。

图 6 切弗里相化合物正极材料  $\text{Mo}_6\text{S}_8$  的性能评价

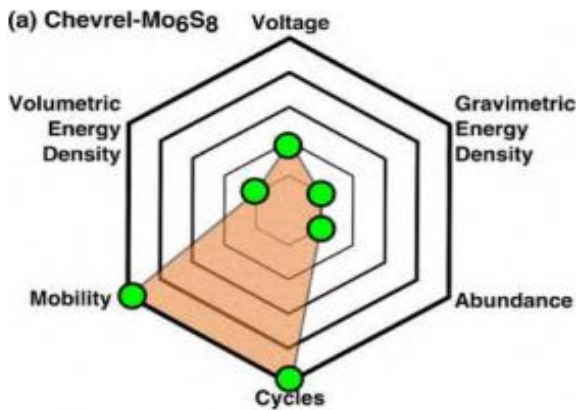
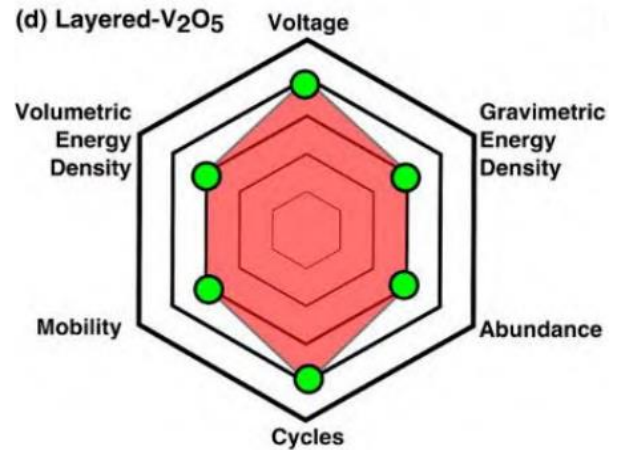


图 7 层状化合物正极材料  $\text{V}_2\text{O}_5$  的性能评价



资料来源：《二次电池研究进展》，首创证券

资料来源：《二次电池研究进展》，首创证券

(3) **聚阴离子型化合物**。聚阴离子化合物是建立在过渡金属和聚阴离子上的具有强共价键连接成的三维网络结构，该类材料种类丰富、电压高、结构稳定、聚阴离子间诱导效应强，因而成为潜在的镁离子电池正极材料。目前研究的聚阴离子化合物主要包括橄榄石结构的硅酸盐和钠超离子导体(NASICON)结构的磷酸盐。

(4) **尖晶石结构正极材料**。尖晶石结构的通式为  $\text{MgT}_2\text{X}_4$  (T = Ti, V 和 Mn 等; X = O, S 和 Se 等)，具有容量大、工作电压高等优点，以及三维扩散路径有望提高材料的能量密度。最近的研究表明，尖晶石结构  $\text{Ti}_2\text{S}_4$  的能量密度接近  $\text{Mo}_6\text{S}_8$  的两倍。另外，层状  $\text{TiS}_2$  和  $\text{MoS}_2$  也可发生镁离子的可逆脱嵌。

### 2.1.2 转换类型正极材料

与插层化合物相比，转换类型正极材料在镁离子电池中的研究相对较晚。转换类型正极材料具有较高的理论容量和能量密度，可以达到插层材料的数倍，这类材料主要包括一些过渡金属硫化物、氧化物等。

(1) **过渡金属硫化物及硫**。近年来，金属硫化物( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{TiS}_3$ ,  $\text{TiS}_2$ ,  $\text{VS}_4$ ,  $\text{NiS}_x$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{CoS}$ )和硒化物( $\text{Cu}_2\text{Se}$ ,  $\text{WSe}_2$ )因具备较高的理论容量受到人们的关注。而硫(S)作为二次电池正极材料，在 Li-S 以及 Na-S 电池领域引起了广泛关注。如果将 S 作为镁离子电池正极材料，结合 Mg 负极，发生两电子的转换反应 ( $\text{Mg}^{2+} + \text{S} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{MgS}$ ) 使得理论能量密度高达  $3200 \text{ Wh L}^{-1}$ 。但是相比于已经比较成熟的 Li-S 体系，Mg-S 电池的研究还处于初级阶段。主要的挑战是找到合适的电解液体系，能够同时兼容硫正极和镁金属负极。

图 8 过渡金属硫化物正极材料  $TiS_2$  示意图

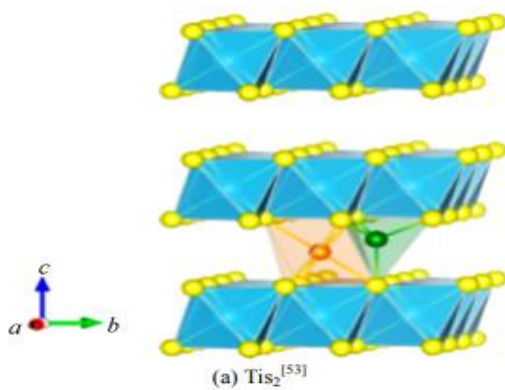
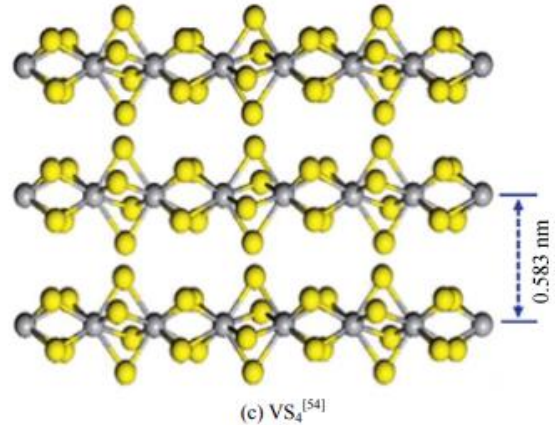


图 9 过渡金属硫化物正极材料  $VS_4$  示意图



资料来源：《锂离子电池关键材料研究进展》，首创证券

资料来源：《锂离子电池关键材料研究进展》，首创证券

(2) **过渡金属氧化物**。过渡金属氧化物，尤其是锰氧化物，由于其成分丰富、晶体结构丰富，是目前研究最多的转换类型锂离子电池正极材料。将正极材料中的硫替换为氧来提高嵌入电压和理论容量，有望取得更高的能量密度。

图 10 过渡金属氧化物正极材料  $MoO_3$  的性能评价

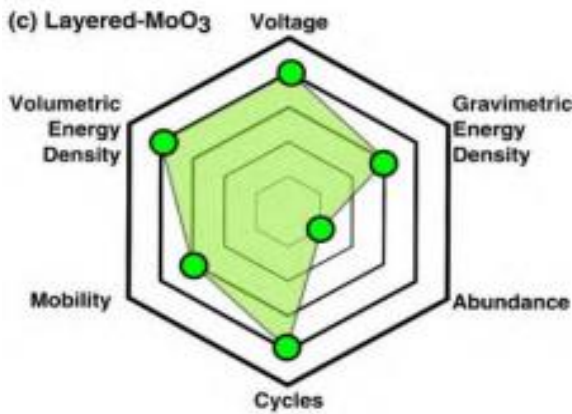
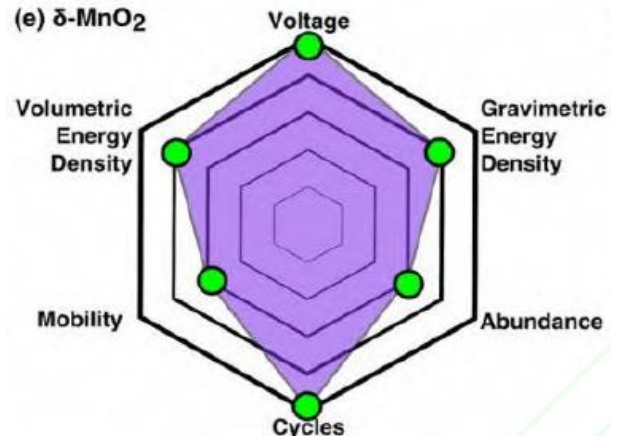


图 11 过渡金属氧化物正极材料  $MnO_2$  的性能评价



资料来源：《二次电池研究进展》，首创证券

资料来源：《二次电池研究进展》，首创证券

### 2.1.3 有机正极材料

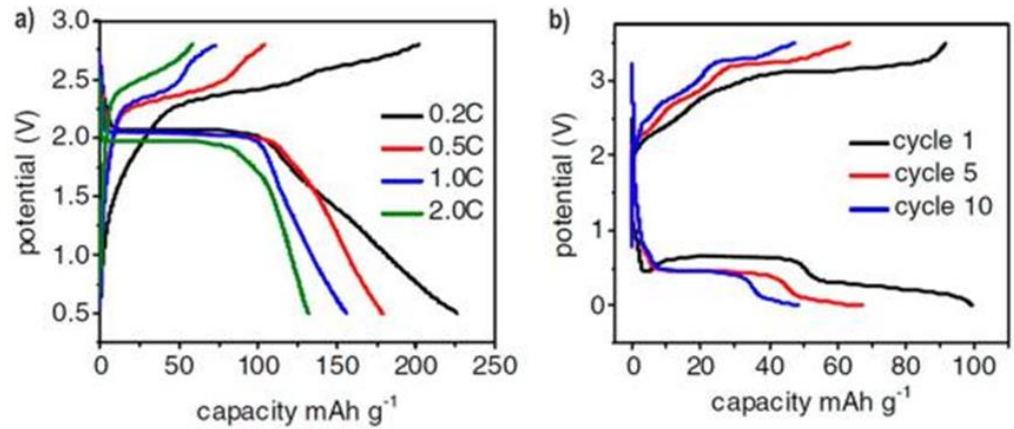
有机材料具有丰富性、多样性、结构灵活性和可调性等优点逐渐受到关注。具有氧化还原活性的有机材料由于分子间力较弱， $Mg^{2+}$ 能够实现快速扩散。有机正极材料的开发，为锂离子电池正极材料的发展提供了新的机遇。

(1) **羰基化合物**。羰基化合物的化学式通式为  $2R-C=O$  ( $R=H$ 、 $CH_2$  和苯环等)，它具有理论容量高、分子结构灵活、原料丰富等优点。其中，基于苯醌的羰基化合物是 MIBs 中一类极具应用潜力的正极材料，例如 DMBQ，其室温放电容量高于大多数的无机正极材料。

(2) **有机自由基**。除了羰基化合物，具有氧化还原活性的有机自由基也可用作 MIBs 的正极材料，其化学式通式为  $N-3R$  ( $R=H$ 、 $O$  和苯环等)。聚 4-甲基丙烯酸-2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氮氧自由基酯 (PTMA) 最早应用于锂离子电池，由于它具备快速的电子传输特性，因此被人们寄予厚望以解决  $Mg^{2+}$  离子扩散迟缓的问题。

(3) **有机硫化物**。有机硫化物是一种 n 型有机材料，化学式通式为 R—S—S—R (R=苯环和五元环等)，其储镁机理是基于二硫键(S—S)的可逆断裂和生成。到目前为止，有机硫化物正极仍受限于较差的循环性能，其在 MIBs 中研究进展缓慢。

图 12 DMBQ 充放电曲线



资料来源：《镁离子电池正极材料的结构设计及其储能机理的研究》，首创证券

## 2.2 可均匀沉积的金属镁是理想的负极材料

负极材料的要求是镁离子能进行可逆沉积和溶解。根据电解液的选择一般为金属镁或者活性炭/碳布，相应的电解液通常为醚类电解液或者高氯酸镁电解液。

金属镁在循环过程中的均匀沉积行为，这使其本身就是一种很好的负极材料。目前研究主要致力于如何避免一些传统的极性有机电解液或者含水电解液中使 Mg 负极表面生成钝化膜，致使 Mg<sup>2+</sup>被钝化膜绝缘。目前主要研究方向为纳米结构的 Mg 和合金法合成的插入式负极材料。将直径为 2.5nm 镁负极应用在镁氧电池体系中，可以有效降低钝化膜厚度。

合金法插入式负极材料主要包括铋、锑、锡等合金负极。纳米团簇的 Mg<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub> 作为负极，在 LiCl-APC 电解液中能够获得 360 mAhg<sup>-1</sup> 的电化学性能，而且在 200 次循环过程中仍能保持着比较稳定的性能。在 Mg 插入脱出过程中，Bi 纳米管演化为相互连接的纳米孔，表现出很好的循环稳定性和倍率性能。这说明纳米结构的负极材料不仅能有效的支撑体积膨胀，而且还能保持有效的电接触。

合成合金法插入式负极材料的反应方程式为：

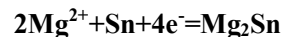
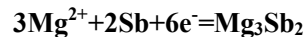
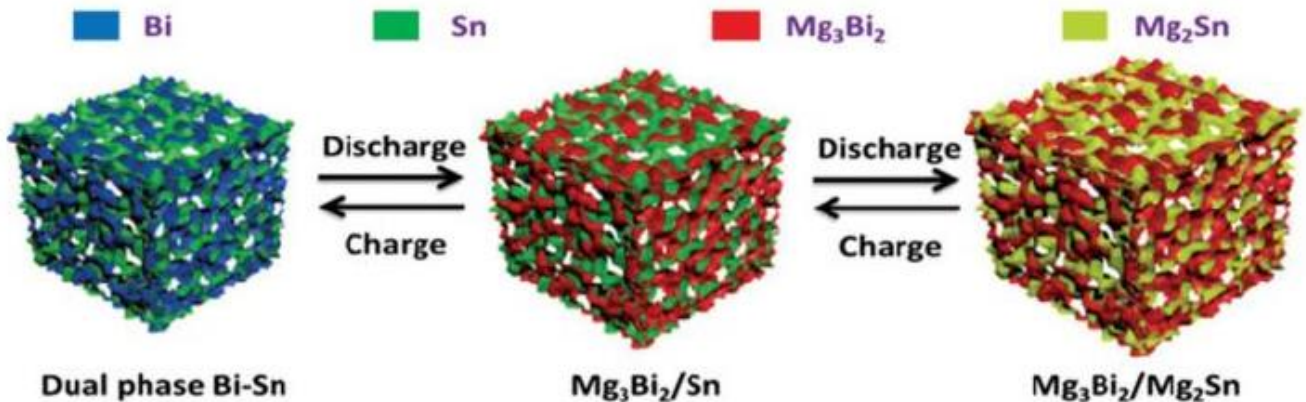


图 13 合金法插入式负极材料的电化学反应机理示意图

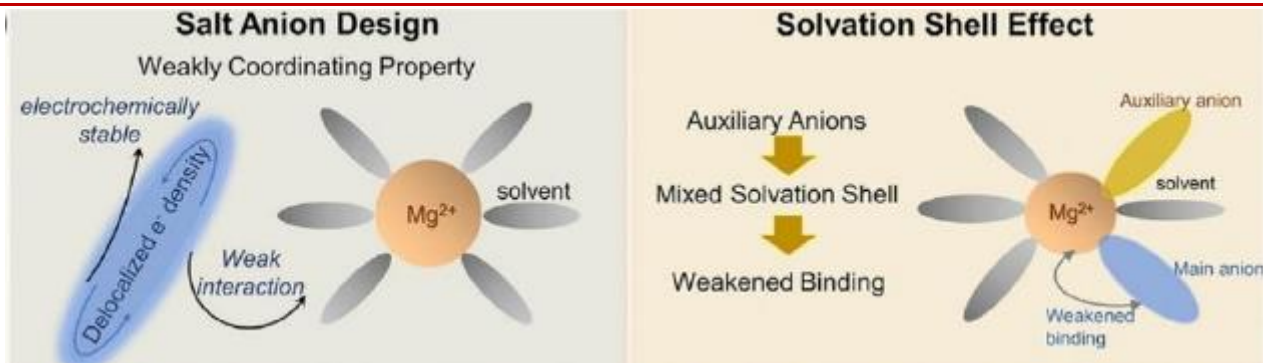


资料来源：《镁离子电池正极材料的结构设计及其储能机理的研究》，首创证券

## 2.3 连接阳极和阴极的桥梁，合适的电解质至关重要

电解质是可充镁电池中镁离子传输的载体，通过电子转移或者离子转移提供电化学性能。电解质的电压窗口会影响正极材料的选择，而且电解液对电池的电化学性能也有着显著的影响。理想的电解质能提供稳定且较宽的电化学窗口，保证镁离子进行可逆地溶解和沉积，使镁离子具有较高的扩散迁移效率。因此通过设计合适的电解质对于电池的开发以及商业化过程具有极其重要的作用。

图 14 电解质关键结构和设计原则



资料来源：《可充电镁电池关键材料开发以及相关机理研究》，首创证券

镁电池电解液体系不同于锂离子电池。对于锂电池，电解质溶液通常是通过溶解简单的盐与阴离子（如高氯酸盐（ $\text{ClO}_4$ ）和六氟磷酸盐（ $\text{PF}_6$ ））在碳酸盐/非质子溶剂中制备的，锂可以从这些溶剂中可逆脱嵌。然而，镁金属在非质子溶剂中会在负极表面形成钝化层，这对镁离子的电化学迁移和可逆的沉积、溶解是不利的。因此，开发一种既可以实现镁的可逆沉积又不会产生钝化层的电解液对于镁离子电池的发展十分重要。目前，镁离子电池电解质材料按照相态可分为：液态电解质和固态电解质。

### 2.3.1 液态电解质

液态电解液是当前镁离子电池体系最适合的电解液之一。与固态电解质相比，液态电解液的离子电导率更高、可逆性以及循环性能更好，更容易制备且粘度更低。镁离子电池体系的液态电解液主要包括无机电解液、硼基电解液、镁有机卤铝酸盐基电解液、酚盐或醇盐基电解液和非亲核电解液。

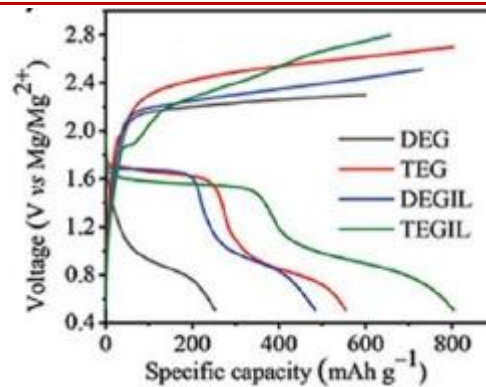
(1) 格林试剂。格林试剂是一种亲核试剂，也被认为是最早观察到镁可逆沉积的电解液。早在 20 世纪 20 年代，有人发现镁在格林试剂电解液中能够实现可逆的沉积，这一重要发现开启了镁离子电池的发展之门。然而该试剂存在电化学窗口窄、容易氧化、

离子电导率低、稳定性差等问题，此外，格林试剂很容易氧化导致阳极稳定性较低，因此被认为不适合未来镁电池的发展。

**(2) 有机镁氯铝酸盐电解液。**与格林试剂相比，有机镁氯铝酸盐电解液的镁溶解和沉积效率更高，几乎达到了 100%，并且具有更高的阳极稳定性。以无机盐氯化镁 ( $MgCl_2$ ) 和氯化铝 ( $AlCl_3$ ) 作为反应物，合成的氯化镁铝络合物电解液 (MACC) 是最早被报道的性能优于格林试剂的电解液。MACC 电解液的库伦效率为 100%，具有更宽的电化学窗口 (2-3V) 以及更低的 Mg 沉积电位。

**(3) 非亲核电解液 (HMDSMgCl)。**非亲核电解液具有高的阳极稳定性、高溶解度、高库伦效率等优点，进一步拓宽了正极材料的选择，使得硫也可以作为正极材料，开拓了 Mg-S 电池新体系。由于非亲核电解液与硫的兼容性，使得它成为镁离子电池非常有前景的一种电解液，且使得大容量镁电池成为可能。如果可以合理的实现商业化应用，将会创造巨大的商业效益。

图 15 DMBQ 充放电曲线



资料来源：《镁离子电池正极材料的结构设计及其储能机理的研究》，首创证券

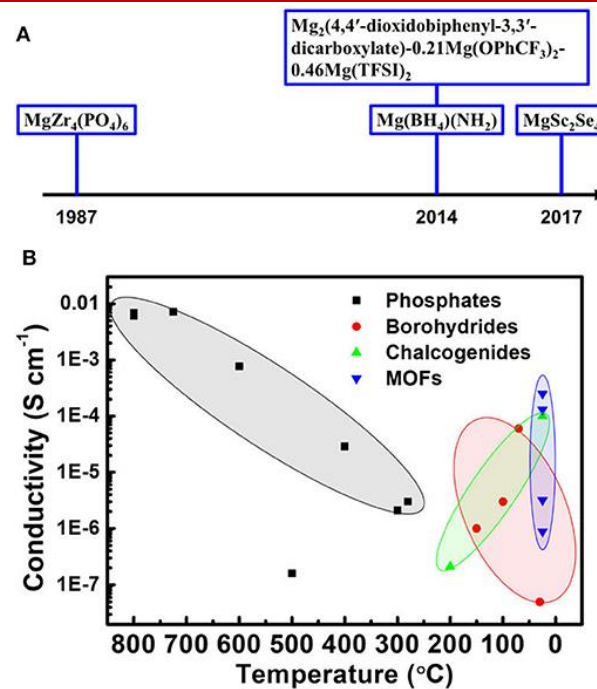
**(4) 硼基电解液。**硼基电解液的发展可以追溯到 1957 年，近几年研究人员发现硼基电解液在不同集流体上都具有良好的稳定性、防腐蚀性、高沉积可逆性，因此引起了人们的关注。因此，硼基电解质尤其是  $Mg(BH_4)_2$  被认为是最有前途的电解液之一。

### 2.3.2 固态电解质

固态电解质具有安全性能好、机械性能优、电压窗口宽及能量密度高等优点。根据不同的组成可将电解质分为无机固态电解质、有机固态电解质和有机无机复合固态电解质。目前，对镁固态电解质的研究处于初步阶段。镁固态电池所使用的固体电解质基本分为无机体系（磷酸盐、硼氢化物、硫族化合物、金属有机框架材料）有机聚合物体系（添加镁盐，可能添加无机填料）和有机无机复合固态电解质等。

**(1) 无机固态电解质。**采用溶胶-凝胶法合成的无机固态电解质  $MgZr_4(PO_4)_6$  (MZP) 在  $725^\circ C$  的电导率为  $7.23 \times 10^{-3} s/cm$ 。将乙二胺与  $Mg(BH_4)_2$  混合合成  $Mg(BH_4)(NH_2)$  电解质， $70^\circ C$  电导率为  $6.00 \times 10^{-5} s/cm$ 。通过冷压的方法制备了三元尖晶石 Se 化物 ( $MgSc_2Se_4$ ) 作固态电解质，室温下离子电导率约  $1.00 \times 10^{-4} s/cm$ 。

图 16 无机固态电解质发展及不同温度下的性能

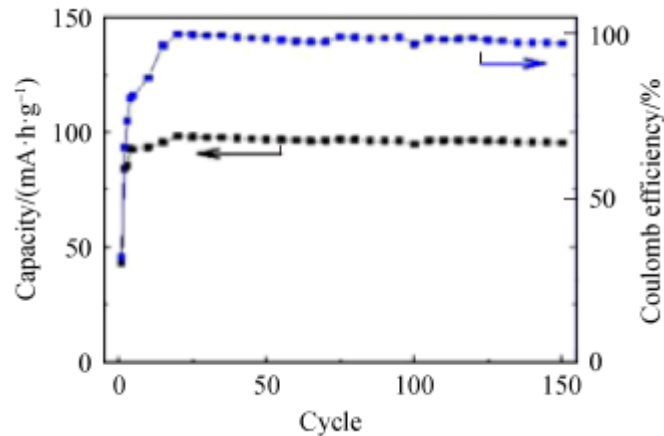


资料来源:《Recent Development of Mg Ion Solid Electrolyte》, 首创证券

(2) 有机固态电解质。有机固态电解质也可称为聚合物固态电解质(SPE), 该类电解质拥有高的安全性和良好的机械性等优点, 是最具应用潜力之一的电解质, 主要由有机聚合物和镁盐络合而成。常用的有机聚合物基体和镁盐包括聚氧乙烯(PEO)、聚偏二氟乙烯(PVDF)、聚偏氟乙烯-六氟丙烯类(P(VDF-HFP))、聚丙烯腈(PAN)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙二醇(PEG)及聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ 、三氟甲基磺酸镁( $\text{Mg}(\text{Tf})_2$ )、 $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ 。为了提升 SPE 的电导率, 往往采用聚合物共聚、添加增塑剂等方法进行改性处理。

(3) 有机无机复合固态电解质。有机无机复合固态电解质由聚合物电解质和无机填料( $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )复合而成。将不同尺寸的  $\text{MgO}$  颗粒分散到 PVDF-HFP 基聚合物电解质中,  $\text{MgO}$  纳米颗粒的存在增加了聚合物可蠕动链段的比例, 促进  $\text{Mg}^{2+}$  的传输, 加入 3%(质量分数)的  $\text{MgO}$  纳米颗粒时, 其电导率可达  $8 \times 10^{-3} \text{ s/cm}$ 。同样地, 添加了  $\text{MgO}$  纳米颗粒的复合聚合物电解质 PEO/ $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ / $\text{MgO}$  对  $\text{Mg}^{2+}$  的沉积/溶解效率达 98%, 以  $\text{Mo}_6\text{S}_8$  为正极组装的固态电池  $100^\circ\text{C}$  循环 150 次后容量几乎不变。

图 17 以  $\text{Mo}_6\text{S}_8$  为正极组装的固态电池 100°C 循环 150 次后

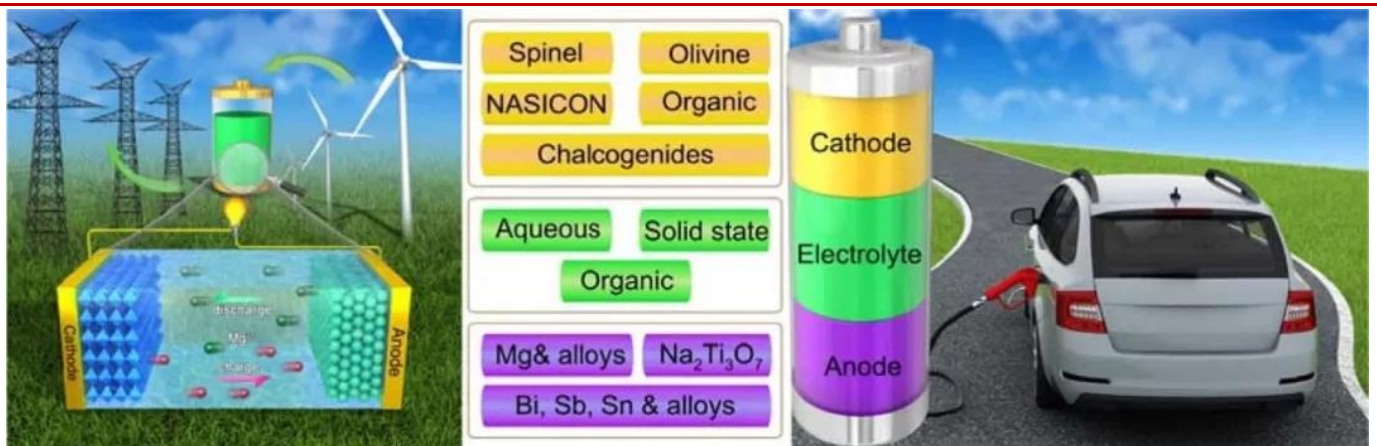


资料来源：《镁离子电池关键材料研究进展》，首创证券

## 2.4 未来可充镁电池的实际应用场景潜力巨大。

虽然镁二次电池的大规模应用还处于初期探索阶段，不过其在提升二次电池的安全性、降低二次电池的成本、缓解二次电池的污染等方面都有重要潜力，有望在多个领域部分替代锂电池或铅酸电池，例如动力电池领域、储能领域和消费电子领域等。欧盟早在其“展望 2020”科研计划下的镁电池项目（E-MAGIC）投资即已超过 650 万欧元，以期替代锂离子电池。

图 18 镁离子电池应用场景



资料来源：华算科技，首创证券

## 3 镁电池技术路线多元化，应用场景广阔。

镁电池技术路线多样化。除镁离子电池外，目前研究较多的电池分为镁一次电池，燃料电池和镁海水电池。

### 3.1 镁一次电池—初代镁电池，纳米级材料有望带来新出路

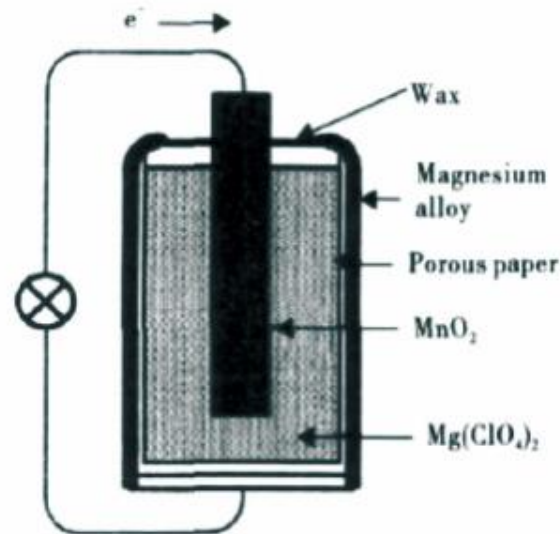
1928 年，美国镁业公司首先发现以镁或镁合金作为一次电池具有相对高的电压，并申请了镁电池专利。之后又出现以镁作为负极材料，高氯酸镁作为电解质，二氧化锰作为正极材料，设计组装了镁锰干电池。镁锰干电池不仅有良好的温度适应性，能在 -20~60°C 条件下使用，而且在储存期中其电荷量下降率每年仅 3% 左右，因此其储存寿命可长达 5 年。同体积的镁锰干电池的电荷量比锌锰干电池大一倍左右。得益于以上优点，



镁锰干电池曾多次用于军事无线电收发报机。后来镁一次电池的市场越来越小，逐渐被性能优良的新型电源替代，目前应用领域很小，已经不再商品化。

**镁一次电池逐渐退出市场。**由于镁一次电池存在诸多问题，逐步退出市场。例如，镁锰干电池刚开始使用时有电压滞后现象，使用完毕时电池体积会膨胀。镁锰干电池在使用过程中存在钝化和自蚀问题。由于镁的性质活泼，所以镁在空气中很容易被氧化成氧化镁，导致镁电极表面会生成钝化膜，阻碍电池反应的进行，产生滞后现象，不能满足高倍率放电要求；同时镁也容易和水发生反应，产生氢气和热量，促使钝化膜脱落，造成阳极腐蚀反应继续进行。所以镁电池经过放电后存储能力下降，不能满足间歇使用。

图 29 镁锰干电池示意图



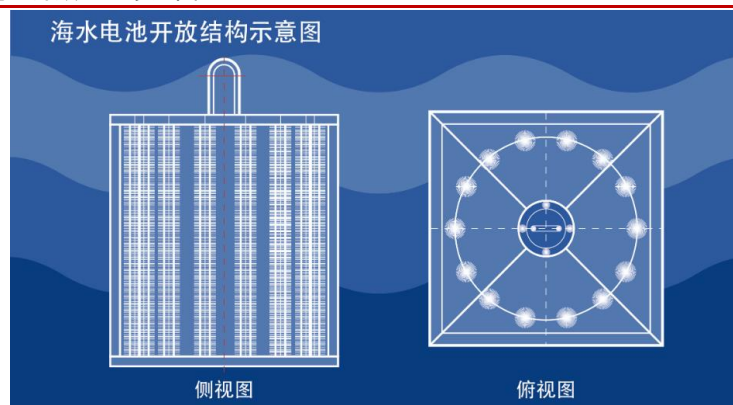
资料来源：《镁电池研究进展》，首创证券

纳米材料有望带领镁一次电池走向曙光。2013年，Srither等人制备并表征了用于镁/二氧化锰原电池的纳米级二氧化锰基正极材料，其放电容量较普通镁/二氧化锰原电池有明显提高，纳米级二氧化锰用于正极材料是未来镁一次电池值得尝试的一个发展方向。

### 3.2 镁海水电池—无需额外携带电解质，适合海洋作业

镁海水电池优点明显，原理独特。镁海水电池在20世纪40年代开始出现，通常指在海洋环境中工作并以海水作为电解质的化学电源，其特点是不需要额外携带电解质。

图 20 海水电池开放结构示意图

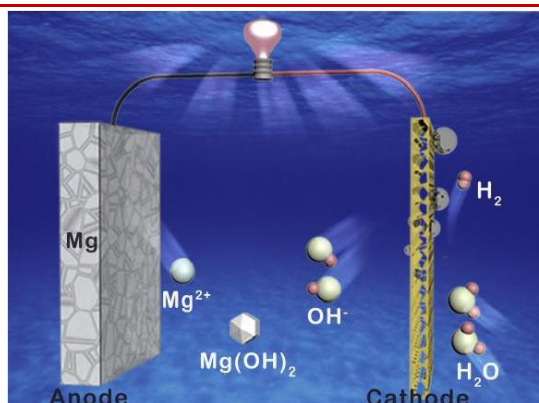


资料来源：科普中国，首创证券

### 3.2.1 镁海水电池原理独特优点明显

镁海水电池通常采用活泼金属或合金为阳极，金属氯化物（CuCl、AgCl、PbCl<sub>2</sub>）、过氧化氢或海水中溶解的氧气为阴极活性物质，采用海水作为电解质溶液，接入负载形成回路，依靠金属的不断溶解提供电能。放电过程中，海水作为电解液注入电池系统，激活镁阳极释放电子。在阴极处，活性物质以还原反应的形式接受电子，整体的电池反应由此建立。

图 21 镁海水电池工作原理



资料来源：《海水电池用高性能镁合金阳极材料的研究》，首创证券

镁海水电池优点明显。不同类型电池的结构和原理不尽相同，但部分或全部以海水为电解液，因此无需携带电解质，使电池结构简化、质量减少、单位能量密度提高。同时，在一定程度上消除了反应物对电极产生的极化，使电极放电性能平稳，电极效率提高。以上特点使得镁海水电池在海洋勘探、资源利用、军事防御等领域能发挥重要作用。

表 3 镁海水电池的优点

优点	
1	无需携带电解质溶液及特殊的储存及耐压装置，直接减少了电池总重量，从而提高电池的能量密度。
2	有效避免了携带液态电解质引起的贮存稳定性问题，设备得到简化。
3	以流动的海水为电解质，能够较大程度地消除极化反应，使电池放电性能平稳。
4	开放体系，一般与外部大气压平衡，可通过海水流动进行热交换，控制了体系温度，提高安全性能。
5	采用储量丰富的金属镁作为阳极材料，不存在镉、汞等重金属污染，从生产过程到使用完后变废弃物不会造成环境污染，是环保型产品。
6	放电性能基本不受海水深度变化的影响，适合应用于不同深度的海洋环境中。
7	阴极材料可供选择的种类多样，通过电极材料的选配能够开发出不同种类的电池，应用于不同的领域，适用面广。

资料来源：《海水电池用高性能镁合金阳极材料的研究》，首创证券

### 3.2.2 镁海水电池种类繁多，但均以镁作为负极

镁海水电池根据应用情况不同，可分为小功率镁海水电池、半燃料镁海水电池和大功率镁海水电池。其中小功率镁海水电池以镁为阳极，炭材料为阴极，海水作电解质，海水中溶解的氧气为氧化剂，一般也为开放式结构。该电池由于电解质和氧气直接取自海水，唯一消耗的是镁，因而具有很高的比能量，且结构简单、造价低廉、安全可靠、干存储时间无限长。半燃料镁海水电池主要以镁/双氧水半燃料海水电池为主。与铝电极相比，采用镁电极可不添加氢氧化钠等碱性电解质，能较大幅度提高比能量。但其能承载的电流密度较铝/双氧水低，一般在 50mA/cm<sup>2</sup>以下。大功率镁海水电池根据其正极材料的不同，还可细分为 Mg/CuCl 和 Mg/AgCl 两种，其中，后者目前被广泛应用于鱼雷中。

图 22 三种镁海水电池



资料来源：科普中国，首创证券

镁海水电池根据阴极活性物质的类型不同，可以分为镁海水激活电池和镁海水溶解氧电池。通常，镁海水激活电池采用金属氯化物作为阴极活性物质，主要包括镁/氯化银电池（Mg/AgCl）、镁/氯化亚铜电池（Mg/CuCl）和镁/氯化铅（Mg/PbCl<sub>2</sub>）电池等，它们可以提供大的阴极电流密度和较高的功率，但一般使用周期较短，属于大功率动力电池。镁海水溶解氧电池的阴极活性物质氧气一般来源于海水，由于海水中溶解的氧气浓度较低，造成阴极电流密度较小，故其输出功率较低，多适用于小功率长期使用水下设备。

表 4 不同镁海水电池的原理和结构

	镁海水激活电池	镁海水溶解氧电池
结构		
阳极（负极）	金属镁	金属镁
阳极反应	$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^{-}$	$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^{-}$
阴极（正极）	金属氯化物	碳纤维或石墨等惰性电极
阴极反应	$XCl_n + ne^{-} \rightarrow X + nCl^{-}$	$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$
总反应	$nMg + 2XCl_n \rightarrow nMgCl_2 + 2X$	$Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$
电解质	海水	海水

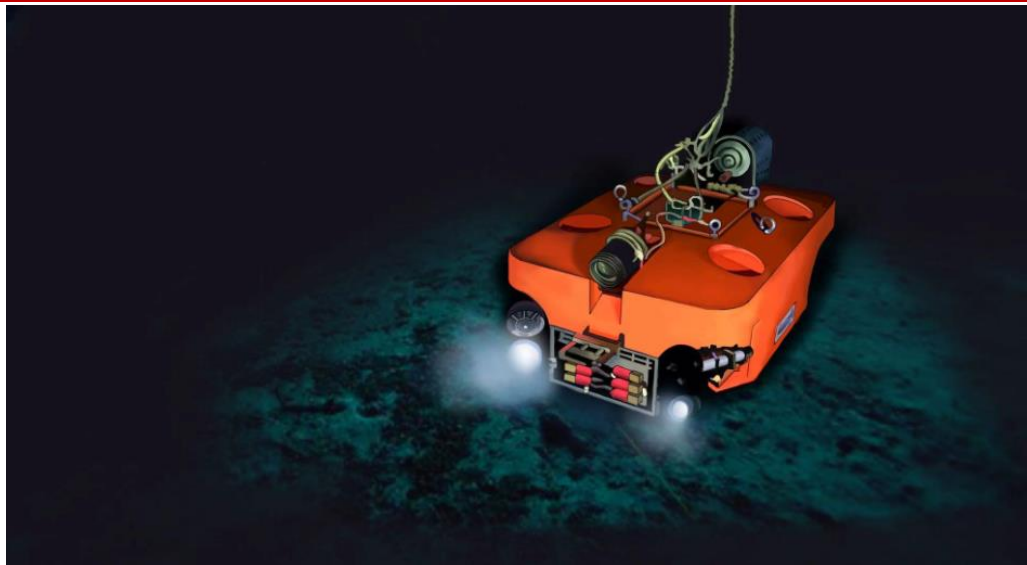
资料来源：《海水电池用高性能镁合金阳极材料的研究》，首创证券

### 3.2.3 镁海水电池优势独特，有望在海洋领域大放异彩

镁海水电池凭借其自身优势，已经实际应用于海洋装备领域。镁海水电池最突出的特点就是不需要携带电解质，可以利用天然海水作为电解液。此外通过对电池结构的简

化，电极材料的改变，以及工作环境海水本身具有压力和流动性等，镁海水电池还具有能量密度高、安全性好、可全海深工作等优点。此外，镁海水溶解氧电池的电解质和氧气直接来自海水，唯一消耗的是金属镁，因此被认为在深海着陆器、深海原位实验站等海洋装备领域具有很好的应用前景。2020年12月3日，中国科学院大连化学物理研究所发布消息称，由大连化物所研制的镁海水燃料电池系统顺利完成了3000米水深海上试验，实现了新型镁海水燃料电池在深海装备上的首次实际应用。

图 23 深海着陆器工作场景



资料来源：科普中国，首创证券

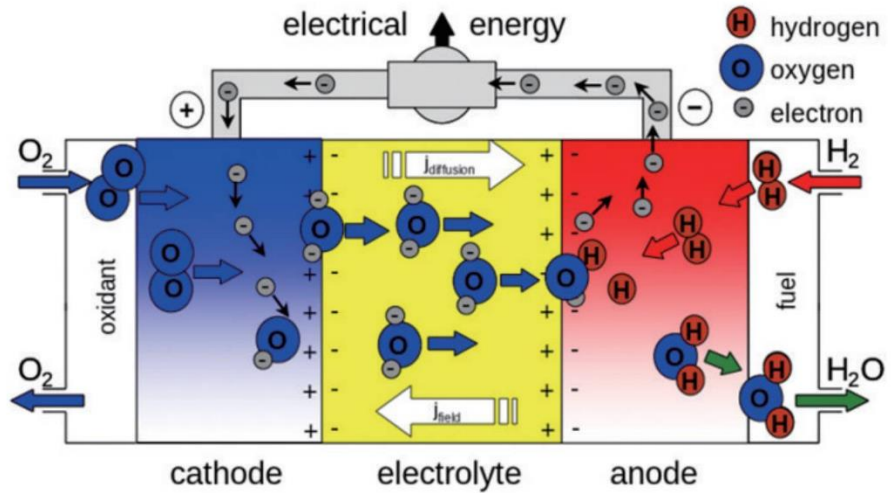
镁海水电池对于人类开发和利用海洋资源意义深远。人类社会的发展，离不开对各种资源的开发和利用。在陆地资源逐渐枯竭的今天，人们开始加速对海洋的开发和利用。而在进行深海探测时，为保证测试和监控设备能够长期稳定的工作，需要长期提供大量电能。镁海水电池的出现很好地满足了人们对于开发高性能、低成本、安全环保的大型充电电池的需求。

### 3.3 镁空气电池—安全可靠的新型燃料电池

#### 3.3.1 镁空气电池以金属为原料，实现机械式再充

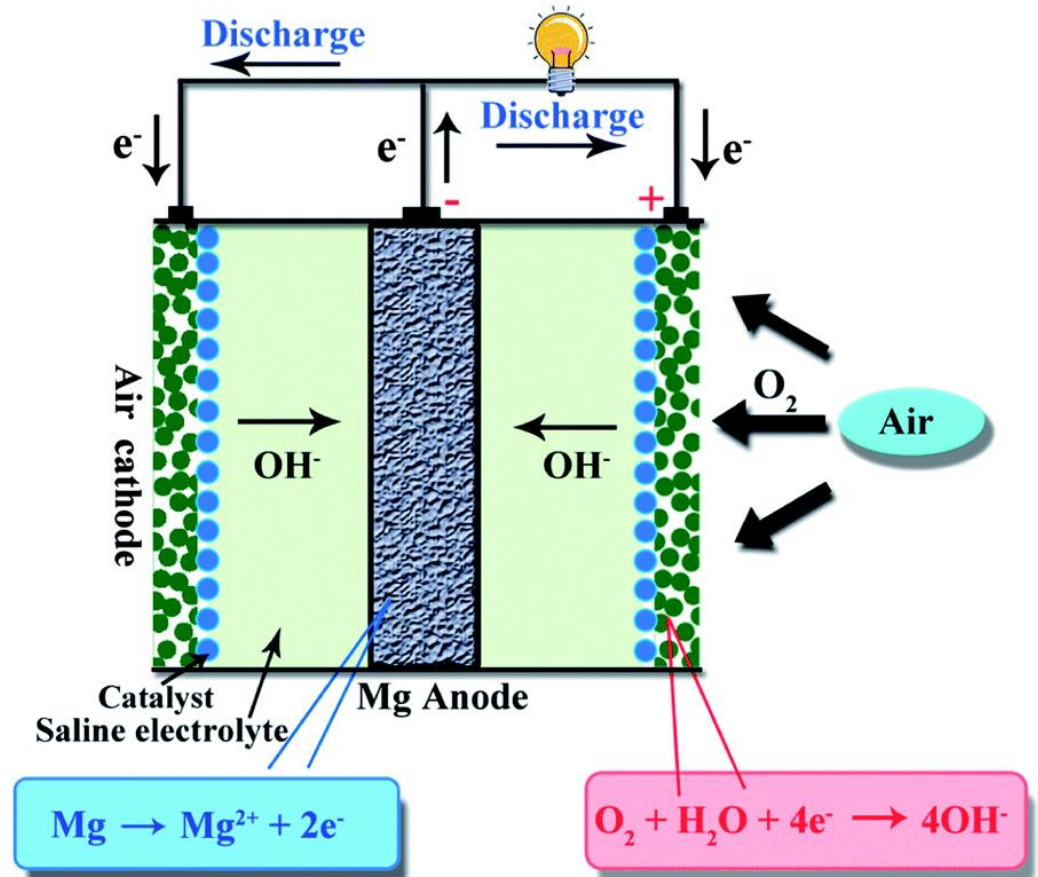
镁-空气电池也称镁金属燃料电池，以镁或镁合金作负极，空气作正极，电解液一般为无机盐溶液。传统燃料电池以氢气或碳氢化合物为燃料，镁-空气电池是一种新型燃料电池，以金属为燃料，合理利用了空气中的氧气，具有安全可靠、成本低、无污染、放电稳定、比能量高等优点。镁空气电池电量用完后，可以通过更换镁板实现能量的重新补充，即可设计成“机械式再充电的”二次电池，被誉为未来最具发展和应用前景的新能源。

图 24 传统燃料电池原理



资料来源:《燃料电池驱动未来》, 首创证券

图 25 镁-空气电池原理

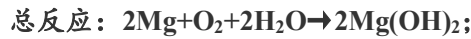
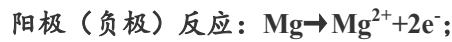


资料来源:《Magnesium-air batteries: from principle to application》, 首创证券

### 3.3.2 正负极材料是镁空气电池研究重点

镁空气电池主要由镁合金作为阳极(负极)、空气中的氧气作为阴极(正极)以及电解液组成。在镁空气电池体系中,通常以中性的盐溶液作为电解液。空气阴极是由催化

层、集流层以及疏水扩散层经过辊压、冷压合成的。在镁空气电池的放电过程中，阳极发生镁合金的氧化反应，而阴极上则是空气渗透通过空气阴极的疏水扩散层与集流网到达催化层表面，氧气在固液相界面发生还原反应，镁空气电池反应方程式如下：



镁合金板材是镁空气电池镁阳极的常用材料，但缺点是易受腐蚀程度高。因此，提高镁合金的耐蚀性成为镁合金阳极的首要研究方向。向镁合金中添加其他金属元素，如 Al、Ca、Mn、Sm、Ga、La、Y 等元素，可以提升镁合金的耐腐蚀性能与镁空气电池的电化学性能。除此之外还有合金化、挤压、轧制、固溶、时效等工艺。

空气阴极中最值得研究的两个方面分别是催化剂和粘结剂的使用，催化剂能够使氧还原（ORR）效率显著提高；粘结剂的作用主要表现在改善空气阴极中催化层和疏水扩散层的多层结构，增加氧气、电解液和催化层中的催化剂三相间的接触，进而促进空气阴极氧还原反应的高效进行。

### 3.3.3 镁空气电池优点显著，前景斐然

镁空气电池拥有诸多优点：1) 携带方便：镁及镁合金的密度较小，采用镁金属燃料电池不仅能量高，而且重量轻，非常适宜便携式电源、野外作业电源等使用；2) 使用安全：镁空气电池用中性盐水作为电解液进行反应，反应物为金属镁合金、水和氧气，产物绝大部分为氢氧化镁沉淀物，不反应物和产物都无毒无污染。回收后的氢氧化镁经过烧还原，可重新制成镁锭循环利用；3) 应用领域广：中功率的照明、通讯设备、小家电等耗能产品、固定式户外照明、车载或小型船舶携带的紧急备用电源等，有效降低用电成本，解决缺电区域用电问题和紧急备用电源稳定电流；4) 可二次充电：镁空气电池电量用完后，可以通过更换镁板实现能量的重新补充，即可设计成“机械式再充电的”二次电池，被誉为未来最具发展和应用前景的新能源。

图 26 镁空气燃料电池应用场景



资料来源：《燃料电池驱动未来》，首创证券

全球多款镁空气电池研发成功。韩国研发的一辆搭载完整镁空气电池的电动汽车能成功行驶 800 公里，是当前锂电池动力汽车平均续航里程的 4 倍；日本多家机构包括古河电池、尼康、日产汽车、日本东北大学、宫城县日向市等，正积极推进镁空气电池的

大容量化研究；日本 Agua Power 公司已经成功开发制造和商业化镁空气电池，并已注册专利十多项。2015 年，宁波材料所动力锂电池工程实验室成功研制出 1000Wh 镁空气电池样机，该镁空气电池的重量为 2.3 kg，能量密度可达 430 Wh/kg，最大输出功率可达 80W；2016 年 7 月，南开大学电子信息与光学工程学院王卫超教授、美国休斯敦大学姚彦教授联合研究团队，成功将锰基莫来石材料作为催化剂应用于镁空气电池，大幅降低了成本，可在中性电解液中稳定工作，其优越的催化活性极大提高了镁/空气电池的效率。迈格镁业的空气燃料电池重量不到 300 克，但却可以为 10 部普通手机充满电，也可以带动 1w 的照明灯连续工作一星期。

图 27 镁空气燃料电池应用



资料来源：迈格镁业公司官网，首创证券

## 4 镁资源储量丰富，中国资源禀赋优势显著

**镁储量丰富，远高于锂资源。**镁作为地球上储量最丰富的轻金属之一，在地壳中的含量达到了 2%，是锂资源储量的 300 倍以上。同时，地球上还存有含镁的大量蒸发型矿物资源，如海水，盐湖，卤水等，其中天然卤水属于可回收资源。镁丰富的储量和部分可再生性，意味着镁资源的开采成本也远低于锂。

### 4.1 我国镁资源丰富，原镁冶炼能力全球领先

**我国镁资源充沛，是最大的原镁生产国。**我国镁资源充足，是世界上镁资源最为丰富的国家之一，镁资源矿石类型全，分布广。同时我国是世界上最大的原镁生产国，占全球总产量的 80% 以上。这意味着未来镁电池一旦实现产业化应用，我国在新能源领域所需锂资源对海外依存度将大幅下降，同时电池制造成本将显著降低。

#### 4.1.1 白云石已探明储量高达 200 亿吨，菱镁矿产量占世界总量 70%

**全球镁资源丰富，在自然界分布广泛，主要以固体矿和液体矿的形式存在。**固体矿主要有菱镁矿、白云石等，其中根据亚洲金属网数据统计，全球的菱镁矿储量达 240 亿吨，多分布于中国、朝鲜、俄罗斯等地；液体矿主要来自海水、天然盐湖水、地下卤水等。虽然逾 60 种矿物中均蕴含镁，但是全球所利用的镁资源主要是白云石，菱镁矿，

水镁石，光卤石，和橄榄石这几种矿物。其次为海水苦卤、盐湖卤水及地下卤水。

图 28 自然界中镁资源主要存在形式

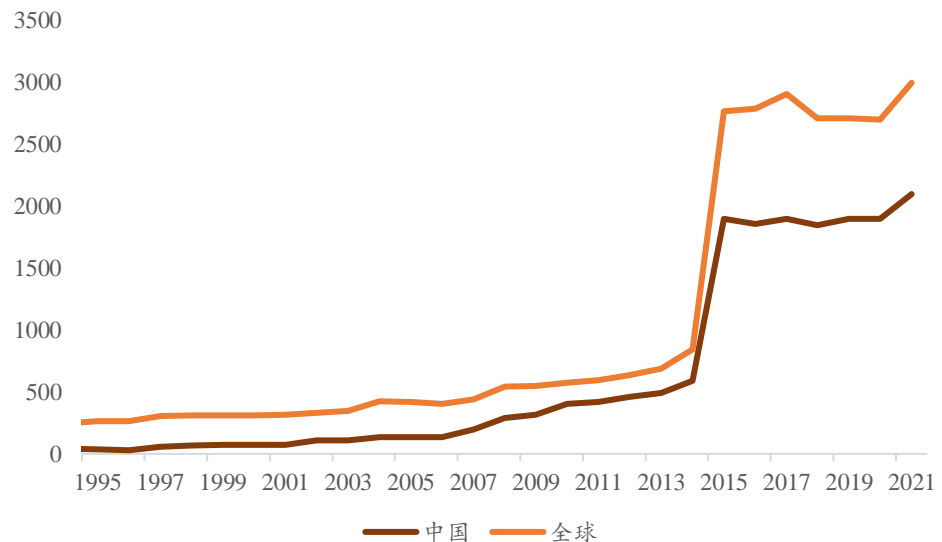


资料来源：亚洲金属网，首创证券

**白云石矿储量丰富，分布广泛。**我国含镁白云石矿储量很丰富，现已探明储量在 200 亿吨以上，白云石资源遍及我国各省区，特别是山西、宁夏、河南、吉林、青海、贵州等省区。白云岩矿床按性质分，主要有热液型和沉积型两种。热液矿主要在辽东、胶东地区广泛发育；沉积型主要分布于山西、河南、湖南、湖北、广西、贵州、宁夏、吉林、青海、云南、四川等省区。

**我国菱镁矿资源储量位居全球第二，产量全球第一。**中国菱镁矿资源位居全球第二，储量分布相对集中，且大型矿床多。我国菱镁矿探明储量的矿区有 27 处，分布于 9 个省(区)，以辽宁菱镁矿储量最为丰富，占全国的 85.6%，此外，山东、西藏、新疆、甘肃等地区菱镁矿也较丰富。过去近三十年中国以及全球的菱镁矿产量呈现震荡上升趋势，并在 2015 年加速增长，中国贡献主要增量。2021 年中国菱镁矿产量达到 21000 吨，占全球总产量的 70%。

图 29 菱镁矿产量（万吨）



资料来源：Wind，首创证券

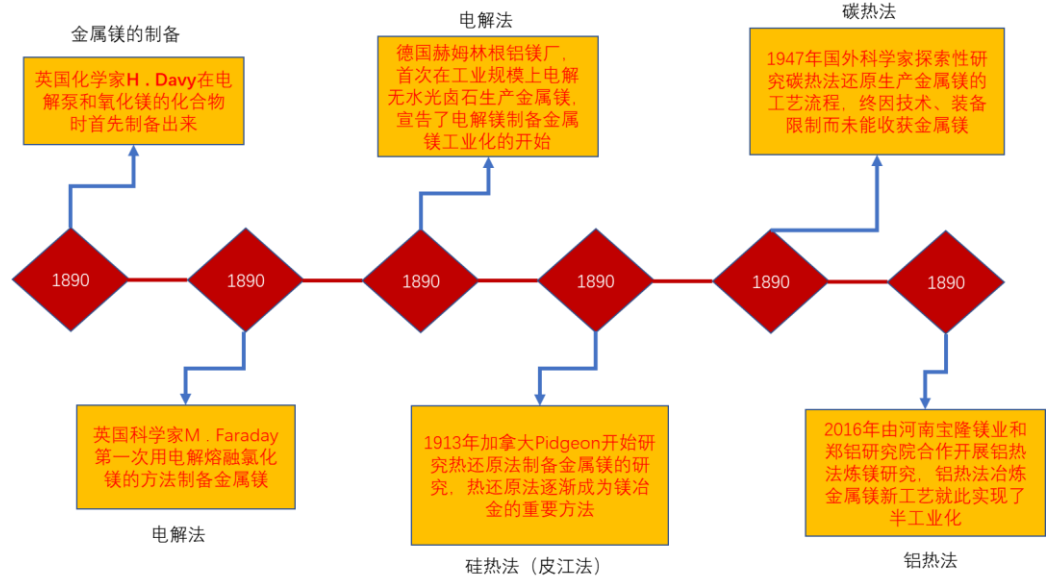
**盐湖资源主要集中于青海西藏等地。**我国的盐湖镁盐主要分布于西藏自治区的北部和青海省柴达木盆地，柴达木盆地内的镁盐储量占全国已查明镁盐总量的 99%，居全国第一位。盆地内的镁盐主要分布在察尔汗、一里坪、东、西台吉乃尔湖、大浪滩、昆特依、马海等盐湖。察尔汗、一里坪、东、西台吉乃尔湖为氯化镁，大浪滩、昆特依、马海、大柴旦等矿区氯化镁、硫酸镁均有，两种类型的镁储量基本相当，其中：氯化镁累



计查明资源储量 42.81 亿吨，其中基础储量 19.08 亿吨；保有资源储量 40.70 亿吨，其中基础储量 17.98 亿吨。硫酸镁累计查明资源储量 17.22 亿吨，其中基础储量 12.29 亿吨。

#### 4.1.2 原镁冶炼技术成熟，我国镁锭产量全球领先

图 30 镁冶炼技术发展历程



资料来源：天宇镁业，首创证券

原镁冶炼技术历经迭代，发展成熟。20 世纪初全球约 80% 的原镁产量采用电解法生产，约 20% 由热还原法生产。90 年代后热还原法原镁产量迅速增长，加之电解法的生产成本较高，国内外的电解法生产设备纷纷关闭。而后世界原镁 80% 由热还原法生产，其中 90% 以上由热还原法中的皮江法生产。但皮江法镁冶炼技术存在的问题及挑战还有很多，例如“三废”排放多、废渣仍未得到较好的处理，环保压力大；能耗高、成本高；自动化、智能化水平低；无法连续化、规模化；资源综合利用低等。随着镁冶炼技术的不断发展与环保要求的不断提高，行业内出现了比皮江法冶炼更加环保低碳的铝热法、真空碳热还原法等。

图 31 不同原材料对应的镁冶炼技术

镁冶炼技术		原材料
电解法	埃奇法 (IG法)	菱镁矿
	光卤石法	光卤石
	道乌法 (DOW法)	海水卤水
	AMC法	盐湖卤水
	诺斯克法	海水卤水
金属热还原法	皮江法	白云石
	半连续热还原法	白云石
	博尔扎诺法	白云石
碳热法	碳化物还原法	菱镁矿

资料来源：华经产业研究院，首创证券

原镁生产是镁行业上游重要的组成部分，我国作为原镁产量第一的大国，在镁资源储量上占据行业领头的优势。

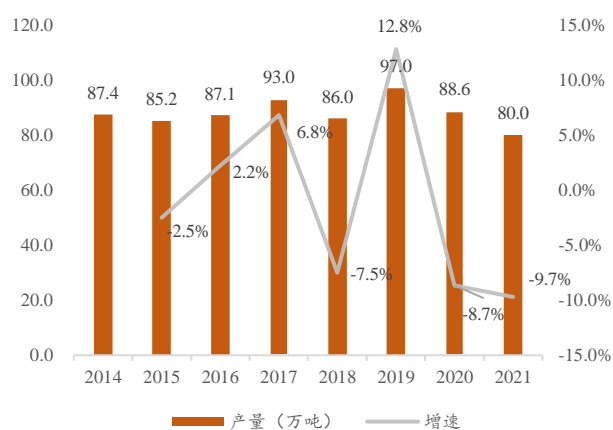
表 5 2016-2021 全球镁锭产量（万吨）

	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
中国	87.1	93	86	97	88	80
俄罗斯	5.8	4	7	6.7	4.8	6
以色列	2.3	2.3	2.1	2.1	1.9	2.2
哈萨克斯坦	1	0.9	1.7	2.5	1.6	2
巴西	1.6	1.5	1.5	2.2	1.8	2
乌克兰	0.5	0.8	0.8	0.8	0.6	1
全球总计	98.3	102.5	99.1	111.3	98.7	93.2
中国市场份额	88.61%	90.73%	86.78%	87.15%	89.16%	85.84%

资料来源: Wind, 首创证券

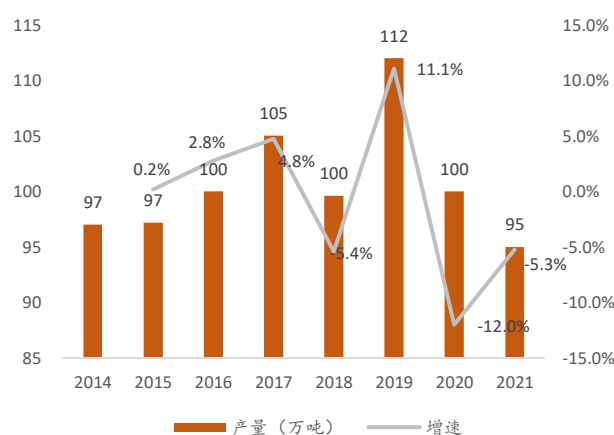
我国镁锭产量常年处于世界领先地位。2021 年中国镁锭产量略有下降 80 万吨，占总市场份额的 85.84%，俄罗斯镁锭产量占全球总产量的 6.4%，以色列、哈萨克斯坦、巴西的镁锭产量占据全球总产量的 2%，乌克兰镁锭产量仅占全球总产量的 1%。

图 32 2014-2021 我国原镁产量



资料来源: Wind, 首创证券

图 33 2014-2021 全球原镁产量

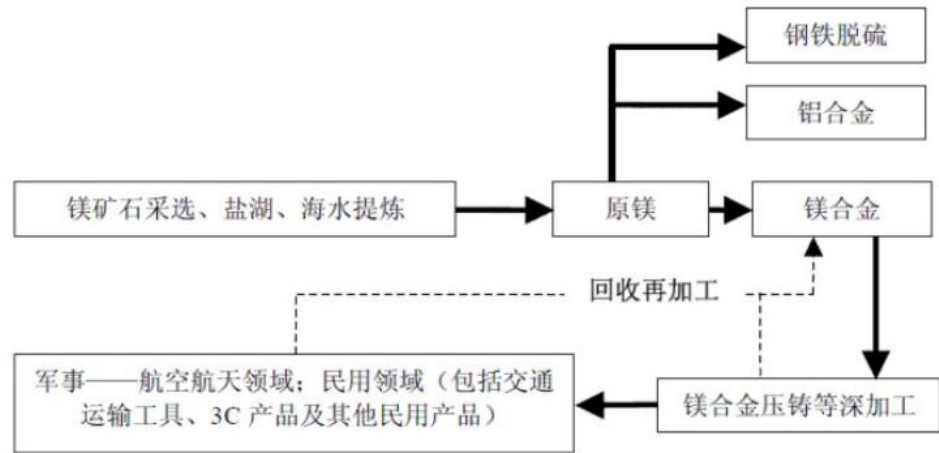


资料来源: Wind, 首创证券

## 4.2 原镁下游应用广泛，需求爆发窗口临近

原镁的应用主要集中在镁合金生产，炼钢脱硫，还用在稀土合金、金属还原、腐蚀保护及其他领域。很多钢厂都采用镁脱硫，使用镁粒的脱硫效果比碳化钙好；使用镁牺牲阳极进行阴极保护，是一种有效的防止金属腐蚀的方法，镁牺牲阳极广泛用于石油管道、天然气、煤气管道和储罐、冶炼厂、加油站的腐蚀防护以及热水器、换热器、蒸发器、锅炉等设备。

图 34 镁行业产业示意图



资料来源：亚洲金属网，首创证券

图 35 2021 年我国原镁消费结构

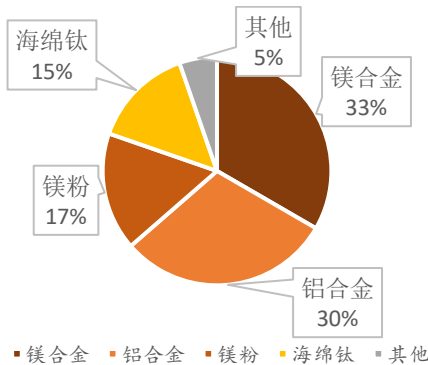
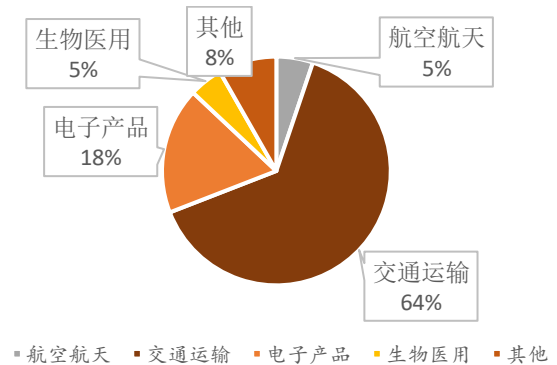


图 36 2021 年我国镁合金消费结构



资料来源：百川盈孚，首创证券

资料来源：百川盈孚，首创证券

#### 4.2.1 镁合金是最具前途的汽车轻量化材料之一，未来市场空间巨大

在全球气候变化倒逼绿色转型提速的背景下，汽车轻量化趋势是镁合金需求较高速增长的主要驱动力。目前新能源汽车受限于续航里程的技术问题，而电池数量及能量密度的提升短期内较难实现，因此对车身轻量化的需求更加迫切。轻量化材料是汽车轻量化化的重要研究方向之一，由于镁合金具有比强度和比刚度高、表面加工性能和铸造精度较高等优点，在降低汽车整车重量，提升整车性能方面，具有巨大的开发潜力和竞争力。

表 6 单车用镁量趋势

相较 2015 年	2020	2025	2030
整车质量	减重 10%	减重 20%	减重 35%
高强度钢	强度 600MPa 以上的 AHSS 钢应用达 50%	第三代汽车钢在车身上的应用比例达 30%	应用 2000MPa 以上钢材
铝合金（单车用量）	190KG	250KG	350KG
镁合金（单车用量）	15KG	25KG	45KG

资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》，首创证券

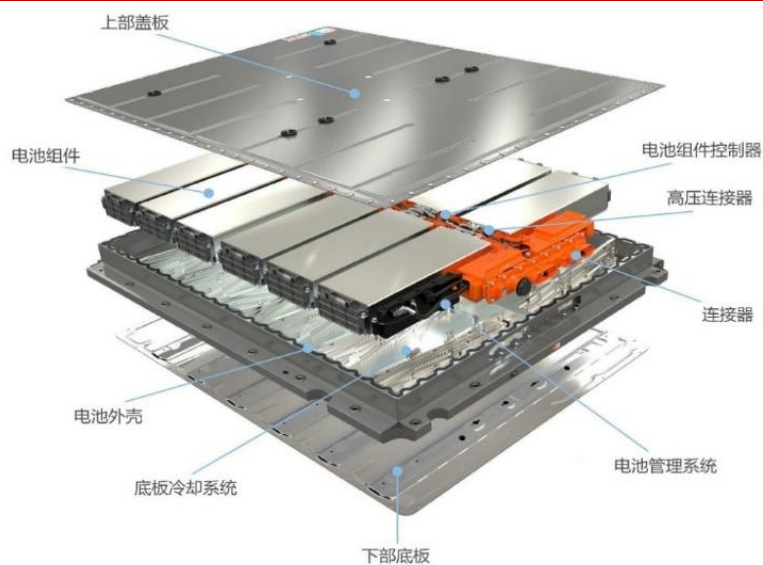
汽车用镁合金替代铝合金空间可观。镁合金主要用在壳体类与支架类等零部件上，

包括仪表盘支架、显示屏支架、中控支架、座椅支架、方向盘、转向件等部件;铝合金主要应用在车身结构材料。随着镁合金压铸技术的提升,镁铝价格比走低,镁合金结构件将逐步替代铝合金结构件。

我国单车用镁量存在较大的提升空间。据中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》,2026 年-2030 年为第三阶段,重点发展镁合金和碳纤维复合材料技术,解决镁合金及复合材料循环再利用问题,实现碳纤维复合材料混合车身及碳纤维零部件的大范围应用,突破复杂零件成型技术和异种零件连接技术。单车用镁量的具体目标是:2020 年达到 15kg,2025 年达到 25kg,2030 年达到 45kg。假设 2030 年汽车销量达到 3800 万辆,届时汽车领域镁需求量将达 171 万吨。

电池结构件或成为未来镁合金重要应用领域。电池包是新能源汽车核心能量源,主要包括动力电池模组、结构系统、电气系统等;其中,结构系统由壳体(包括上、下壳体两部分)、各种金属支架、端板等组成,目前普遍使用钢板或者铝合金作为结构件材料。镁合金结构件不仅性能优良,而且密度小,可有效减轻车重;以特斯拉 MODEL S 为例,其电池包所使用的铝合金结构件总重量约 125 公斤,若全部采用镁合金,重量有望减少至 80kg 左右,减重效果达 30%。

图 37 电池包结构示意图



资料来源:大众汽车,首创证券

镁加工企业深化与下游企业合作,镁电池包结构件需求有望放量。目前,镁加工企业正在大力推广镁合金材料实现电池包结构系统的轻量化,如三祥新材子公司-宁德文达镁铝已为宁德时代成功开发镁合金电池端板,并已导入宁德时代多个牌号产品。据中国有色网,镁加工企业也正在积极向车企推广,或与车企合作开发镁合金电池支架以及镁合金电池包壳体。以镁合金电池包外壳为例,其平均重量为 60 公斤,到 2025 年,悲观预测电动车镁合金电池包外壳将增加镁合金需求量 32.4 万吨;乐观预测将增加镁合金需求量 54 万吨。

表 7 镁合金电池包外壳需求预测

	悲观预测						
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
全球新能源汽车销量(万辆)	221	240	614	800	1086	1429	1800

悲观预测							
镁合金电池包 (kg)	-	-	60	60	60	60	60
新能源汽车渗透率	-	-	5%	10%	20%	30%	30%
镁合金用量 (万吨)	-	-	2.4	6.5	17.1	32.4	32.4
乐观预测							
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
全球新能源汽车销量 (万辆)	221	240	614	800	1086	1429	1800
镁合金电池包 (kg)	-	-	-	60	60	60	60
新能源汽车渗透率	-	-	-	10%	30%	30%	50%
镁合金用量 (万吨)	-	-	-	4.8	19.5	25.7	54

资料来源：拓璞产业研究院，LMC，HIS，GGH，EV Sales，中商产业研究院，首创证券

#### 4.2.2 镁建筑模板优势明显前景广阔

截止 2021 年底，全国铝合金模板市场保有量约 7950 万平方米，全国共有约 850 家铝合金建筑模板相关企业。铝建筑模板相对于木模板优势显著，但是铝合金材料模板存在耐酸不耐碱的缺点。为了保护钢筋提高建筑混凝土的强度，混凝土的化学性质通常为弱碱性，然而市面上流行的铝合金模板都会被碱性物质所腐蚀。模板表面易与混凝土产生亲和反应，不仅影响成型混凝土的表面质量，而且水泥容易沾粘在模板上，后期清洗难度大。

图 38 2021 年主要建筑模板市占率情况

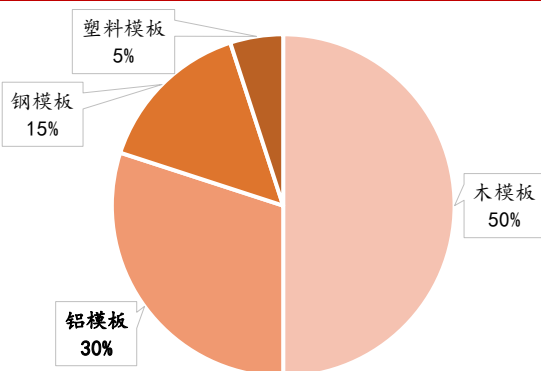
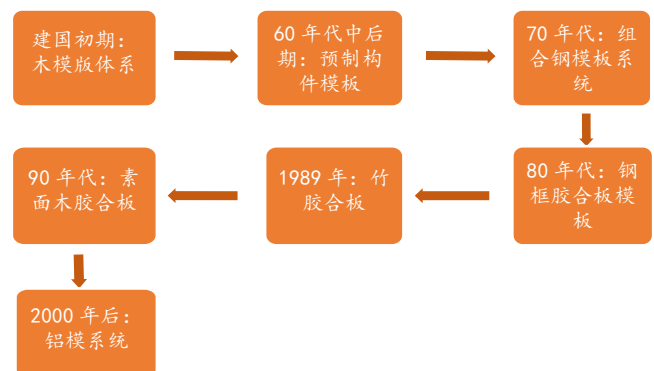


图 39 我国建筑模板发展历程



资料来源：中国基建物资租赁承包协会，首创证券

资料来源：志特新材招股书，首创证券

**镁合金模板优势显著。**在保留铝合金模板优点的基础上，镁合金模板还有以下四点优势：**1、具有较强的耐碱腐蚀性，不易粘水泥。**即使粘上，用高压水枪基本都可清理干净，弥补了铝合金模板的缺陷。**2、密度低，轻质量。**镁合金模板与铝合金模板相比重量更轻，方便搬运与拼装，有效降低了工人的工作强度，减轻清理建筑垃圾的负担。**3、回收效率更高。**镁合金模板可以多次重复利用，可回收重新冶炼制作成镁锭或者镁棒后，并再次应用于其他产品，在这过程中其原有的物理特性不变。这是铝合金和其他金属材料所无法实现的。**4、使用效率高。**使用镁合金模板还能够减少抹灰，缩短建筑施工时间，节省土建总包成本。

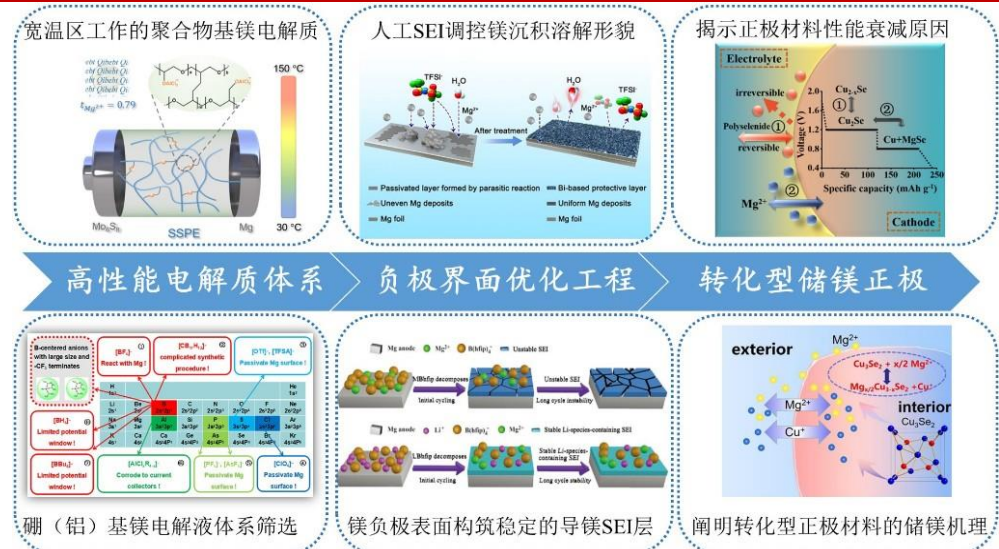
如今镁合金模板的市场还处于刚起步阶段。镁合金建筑模板的市场占有率较低。2022 年国内仅有 5-6 家企业生产镁合金建筑模板。虽然性能比其他材料的模板更佳，但是因为镁价贵，在价格上呈现出劣势。然而随着镁价下行，当镁合金与铝合金的材料成本相近时，镁合金模板规模替代铝合金模板是未来可期的。

#### 4.3 近年来镁电池技术不断突破，有望实现商业应用

崔光磊带领的青岛能源所科研团队多年来开展了大量研究工作。目前，研究团队及合作伙伴们已经在镁金属二次电池领域发表高影响力 SCI 论文三十余篇，申请相关专利

十余项，基本具有完全自主知识产权的镁金属电池核心技术。在实际应用场景方面，该团队以中国科学院深海智能技术先导专项为牵引，已突破了镁金属二次电池制作工艺上的关键技术瓶颈，开发出能量密度 560 瓦时/千克的单体电池。基于该单体电池设计组装的镁硫电池系统，不仅顺利通过了深海高压环境的模拟打压测试，而且已经跟随中国科学院深海所科考船，在南海实现了深海环境下连续 30 小时的稳定工作，成功实现了镁金属二次电池的示范应用。

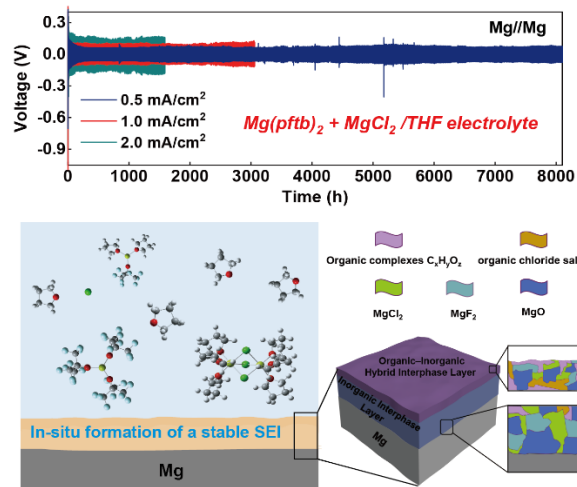
图 40 崔光磊团队研究成果



资料来源：固态能源系统技术中心，首创证券

今年六月，清华大学张跃钢教授课题组利用甲醇镁和全氟叔丁醇在四氢呋喃 (THF) 中反应合成出了一种新型镁盐：全氟叔丁醇镁 ( $Mg(pftb)_2$ )。  $Mg(pftb)_2$  不仅具有很高的氧化稳定性，而且能够有效助溶  $MgCl_2$ ，从而制备出全氟化醇基全镁盐电解液  $Mg(pftb)_2 + MgCl_2/THF$ 。利用  $Mg(pftb)_2 + MgCl_2/THF$  电解液组装的  $Mg//Cu$  半电池能够稳定循环超过 3000 圈，平均库伦效率高达 99.7%；  $Mg//Mg$  对称电池能够在  $0.5mA/cm^2$ 、 $1.0mA/cm^2$ 、 $2.0mA/cm^2$  电流密度下稳定沉积-溶解分别超过 8100、3000、1500 小时；  $Mg//Mo_6S_8$  电池在 1.0 C 倍率下可以稳定工作 800 圈。这一研究作为进一步优化镁电池电解液设计和构筑稳定的负极界面提供了重要指导。

图 41 张跃钢团队研究成果



资料来源：《Stable Solid Electrolyte Interphase In-situ Formed on Magnesium Metal Anode by Using a

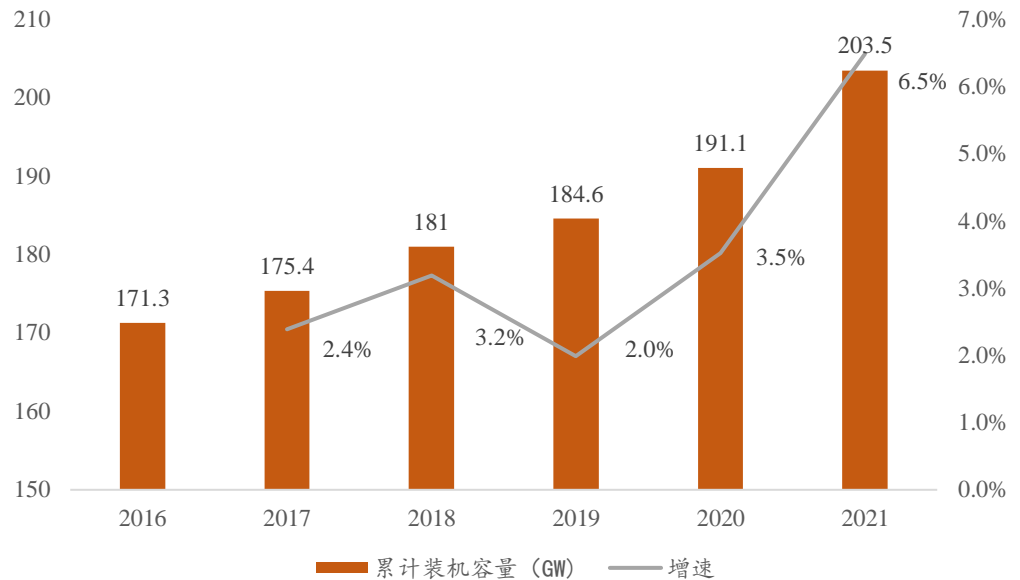
《Perfluorinated Alkoxide-based All-magnesium Salt Electrolyte》，首创证券

## 4.4 镁离子电池未来应用空间广阔

### 4.4.1 新能源配储是未来趋势，镁离子电池特性与储能场景需求高度贴合

全球范围内可再生能源战略地位提高，不断提升储能潜在市场。2021年COP26全球气候峰会举行，碳中和成为全球目标，可再生能源战略地位提高。由于风光发电的输出功率具有时间上的不确定性，以可再生能源为主的能源远景必须依靠储能来完成发电与用电的匹配。

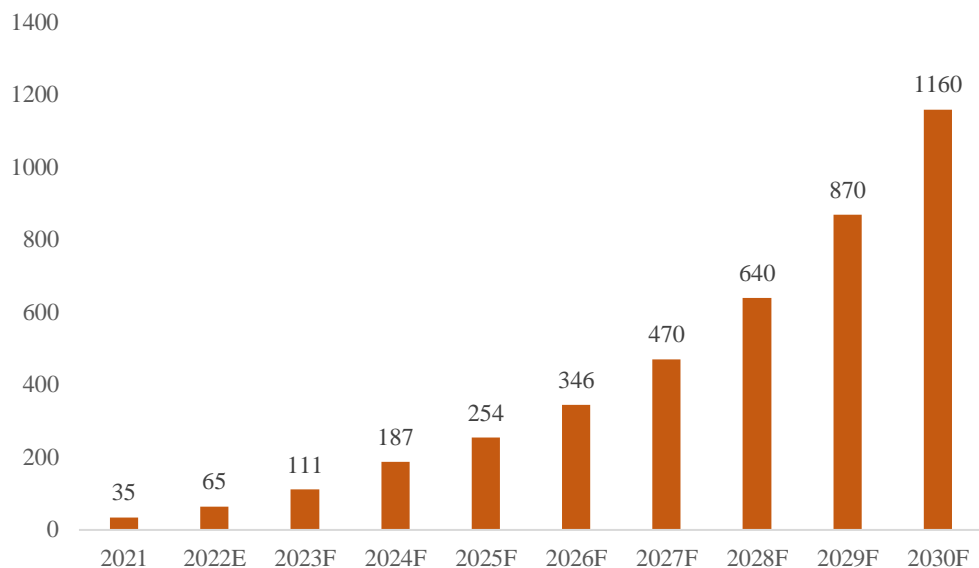
图 42 全球电化学储能新增装机统计 (MW)



资料来源：华经产业研究院，首创证券

随着新能源发电占比持续提升，储能发展的迫切性同步提升。2021年中国的可再生能源占比已经达到 14%，以风力和光伏发电为主。在当前新能源发电占比显著提升的情况下，可再生能源的消纳问题凸显，需要储能协同发展。发电侧和电网侧对储能的关注点主要在于经济性、安全性和寿命。镁离子电池的特性与储能场景要求高度贴合，未来在储能领域的发展空间将随着技术进步不断扩大。预计到 2025 年全球储能的潜在市场规模预计将超过 250GWh。

图 43 全球电化学储能需求测算 (GWh)

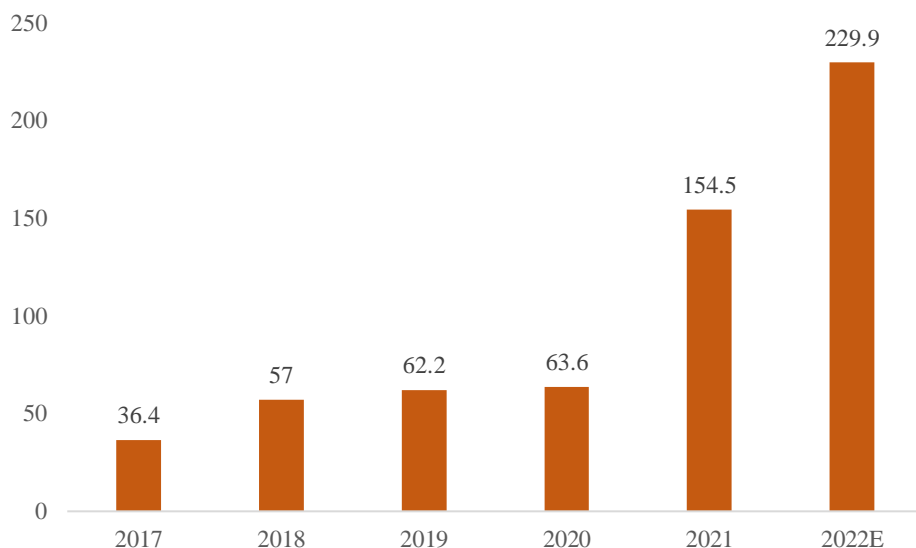


资料来源: Trendforce, 首创证券

#### 4.4.2 镁离子电池或凭三大优势在动力电池领域快速替换锂电池和铅酸电池

镁离子电池具有高能量密度和低成本的优势,技术成熟后可在新能源电动汽车领域部分替代锂电池。我国是全球最大的动力电池市场。2017年至2021年间中国动力电池装机量以43.5%的复合年增长率增长,2021年达到154.5GWh。2022年1-3月,我国动力电池装车量累计51.3GWh,同比累计上升120.7%。随着新能源车渗透率快速增长,产业链的健康发展以及疫情的有效控制,中国动力电池市场将会持续成长。预计2022年动力电池装机量将达229.9GWh。镁离子电池具有高能量密度和低成本的优势,技术成熟后可在新能源电动汽车动力电池领域部分替代锂电池。

图 44 2017-2022 我国动力电池装机量



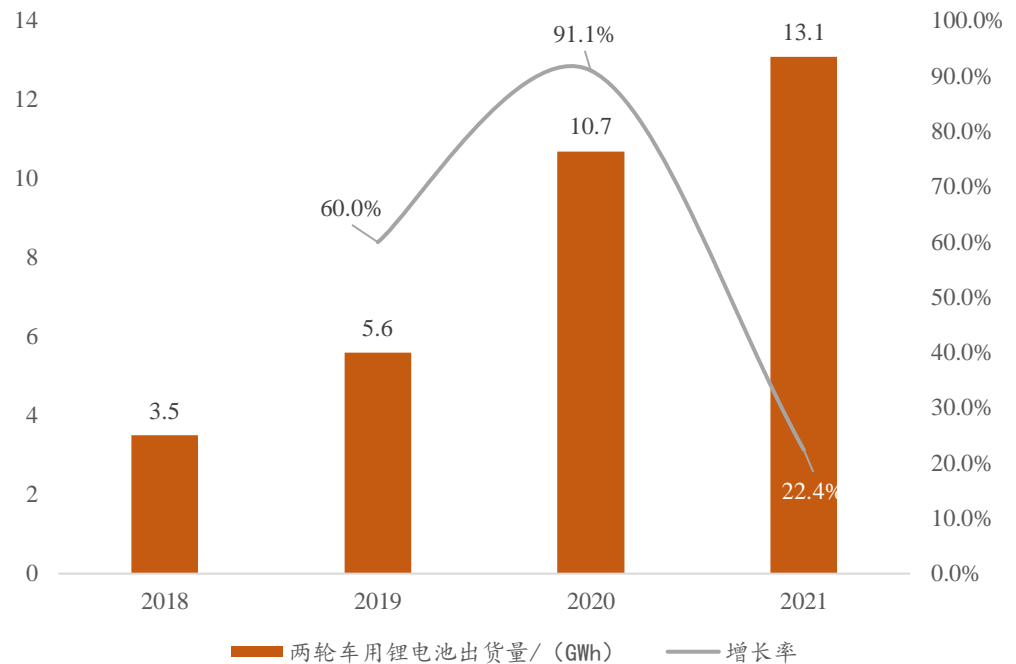
资料来源: 中国汽车动力电池产业创新联盟, 中商产业研究院, 首创证券

镁离子电池或凭成本优势在两轮电动车领域快速替换铅酸电池。两轮电动车市场面向中低消费人群,对价格十分敏感。锂离子电池原材料价格大幅上涨,锂电池竞争优势锐减,而镁离子电池是铅酸电池更好的替代品。镁离子电池具有低成本、安全性强,环



保等特性。未来镁离子电池在电动两轮车市场上前景广阔。根据中国自行车协会的数据，我们预测 2025 年电动两轮车市场规模为 43.2GWh。

图 45 锂离子电池在两轮车市场渗透速度放缓



资料来源：《中国电动两轮车行业发展白皮书》，首创证券

表 8 中国电动两轮车市场空间

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
国内电动两轮销量 (万辆)	3680	4760	4100	4510	4961	5457.1	6002.8
平均单车带电 (KWh)	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
总带电量 (GWh)	26.5	34.3	29.5	32.5	35.7	39.3	43.2

资料来源：中国自行车协会，首创证券

#### 4.4.3 镁离子电池在电动工具领域具有良好渗透潜力

消费级产品注重性价比。电动工具主要包括钻孔机、冲击扳手类、角磨机、锯类、砂光机等，工业、专业级产品注重高功率、稳定耐用，镁离子电池有稳定的高功率输出能力、良好的循环特性、性价比潜力，并且工作范围较广，能适应冷天、长时间作业，在该领域有良好的渗透潜力。未来电动工具有着需求持续提升、无绳化率提升、容量提升、国产电芯价格提升向国际产品价格看齐等多重趋势，根据弗若斯特沙利文预测，2020-2025 年全球电动工具市场复合增长率为 9.9%。

表 9 全球电动工具市场空间测算 (十亿美元)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
电动工具	9.4	10.3	11.3	12.5	13.7	15	16.4
Yoy	5.6%	9.6%	9.7%	10.6%	9.6%	9.5%	9.3%

资料来源：弗若斯特沙利文，首创证券

## 5 公司推荐

**云海金属：宝钢控股开启新纪元，镁资源整合与应用推广有望加速。**

**镁行业一体化龙头，未来布局有望实现跨越式发展。**公司已构建“白云石开采-原镁冶炼-镁合金熔炼-镁合金精密铸造、变形加工-镁合金再生回收”的完整镁产业链，现有原镁产能 10 万吨/年，镁合金产能 18 万/年，均位列全球第一，另有压铸产能 3.3 万吨。公司上下游扩张加速，青阳项目建成后，原镁、镁合金产能将实现翻倍式增长。青阳项目按 100% 权益计算，投产后公司产能可达 50 万吨/年，将深度掌握原镁定价权，进一步巩固行业龙头地位。

**实控权拟变更为宝钢金属，公司有望开启新纪元。**10 月 17 日云海金属向宝钢金属非公开发行股票 6200 万股，发行价格为 17.91 元/股，宝钢金属拟以现金方式全部认购。此次非公开发行完成后，宝钢金属持股比例将由 14% 提升至 21.53%，公司控股股东将变更为宝钢金属，成为宝武集团二级控股子公司。宝钢金属以成为“轻量化解决方案领军者”为愿景，聚焦发展轻量化材料与制品，致力于成为全球最具竞争力的镁基材料供应商，打造全镁产业链，成为镁行业整合者、技术创新者和产业引领者。云海金属一直致力于镁下游应用的引导与培育，双方战略方向一致，随着技术、客户及资源的共享，强强联合有望加速镁合金材料在汽车轻量化、镁建筑模板等多领域的渗透，有利于做大镁行业，促进行业长期健康发展。

**竖罐法铸就成本优势，上游资源布局步伐加快。**公司自主研发“粗镁一步法”、“竖罐蓄热技术”，劳动生产率提高 1 倍，吨镁耗煤仅 3 吨，大幅低于行业平均煤耗（5.5 吨）；与同行业相比，原镁单吨成本低 18%。公司在白云石资源端积极布局，巢湖云海和安徽宝镁分别拥有 8864.25 万吨和 131978.13 万吨的白云石的采矿权，原材料储备在满足未来产能扩张需要下，仍可外售部分骨料和熔剂增厚利润。

**产研融合，与重庆大学潘复生院士团队合作共同开发镁电池应用。**潘复生院士所在的重庆大学团队目前正在开发一种低成本、高电压、长寿命的镁电池正极材料。该产品循环寿命可以达到 1 万次，能量密度超过 500 Wh/kg，而成本只有磷酸铁锂的一半。在西班牙巴塞罗那举行的第 79 届世界镁业大会上，潘复生院士所在团队合作完成的“镁离子电池”项目荣获 2022 年国际“镁未来技术奖”。

**公司盈利状况良好，多项目打造高成长性。**2022 年前三季度公司实现营业收入 71.08 亿元，同比增长 25.76%；归属于母公司净利润 5.79 亿元，同比增长 119.6%。扣非净利润 5.55 亿元，同比增长 150.17%。未来，随着多个新项目的逐步建成投产，公司业绩有望实现跨越式增长。

图 46 云海金属 2016-2021 营业收入情况

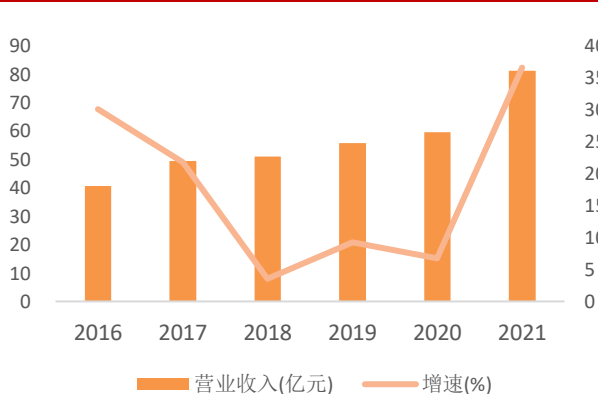
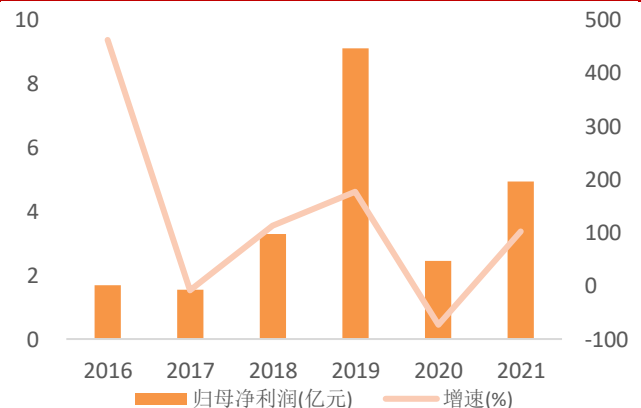


图 47 云海金属 2016-2021 归母净利润情况



资料来源：Wind，首创证券

资料来源：Wind，首创证券

## 6 风险提示

镁电池商业化推广进度不及预期：镁离子电子受制于目前电解液技术仍不成熟，未来大规模商业化时间点存在不确定性。

镁电池在储能领域推广不及预期：储能技术日新月异，未来镁电池商业化后的相对优势存在一定风险。

## 分析师简介

金融硕士，曾就职于长城证券。2021年12月加入首创证券，负责有色金属板块研究。

## 分析师声明

本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响，作者将对报告的内容和观点负责。

## 免责声明

本报告由首创证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）制作。本报告所在资料的来源及观点的出处皆被首创证券认为可靠，但首创证券不保证其准确性或完整性。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专业财务顾问的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，首创证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。投资者需自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本报告所载的信息、材料或分析工具仅提供给阁下作参考用，不是也不应被视为出售、购买或认购证券或其他金融工具的要约或要约邀请。该等信息、材料及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，首创证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

首创证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。首创证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。首创证券的自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

在法律许可的情况下，首创证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务服务。因此，投资者应当考虑到首创证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一信赖依据。

本报告的版权仅为首创证券所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式转发、翻版、复制、刊登、发表或引用。

## 评级说明

	评级	说明
1. 投资建议的比较标准 投资评级分为股票评级和行业评级  以报告发布后的6个月内的市场表现为比较标准，报告发布日后的6个月内的公司股价（或行业指数）的涨跌幅相对同期的沪深300指数的涨跌幅为基准	股票投资评级	买入 相对沪深300指数涨幅15%以上
		增持 相对沪深300指数涨幅5%-15%之间
		中性 相对沪深300指数涨幅-5%-5%之间
		减持 相对沪深300指数跌幅5%以上
2. 投资建议的评级标准 报告发布日后的6个月内的公司股价（或行业指数）的涨跌幅相对同期的沪深300指数的涨跌幅为基准	行业投资评级	看好 行业超越整体市场表现
		中性 行业与整体市场表现基本持平
		看淡 行业弱于整体市场表现