

基于专利分析的磁制冷技术应用研究

闫洪波¹, 杨泽中¹, 汪建新¹, 郝宏波²

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古包头 014010;
2. 包头稀土研究院, 内蒙古包头 014030)

摘要: 使用PatSnap平台对全球范围内磁制冷技术相关专利进行检索, 收集磁制冷技术应用领域专利数据并进行查全、查重处理后得到分析样本; 对样本专利进行整体概览分析、专利权人及发明人分析、技术分析、价值分析, 得到专利地图及专利高频关键词, 剖析磁制冷技术应用领域的发展现状、技术重点布局领域、专利价值等情况, 并预测其发展方向。

关键词: 磁制冷; 磁热效应; 稀土材料; 专利分析; 技术动态

中图分类号: G306; O482.6; G301 **文献标志码:** A

Research on Application of Magnetic Refrigeration Technology Based on Patent Analysis

Yan Hongbo¹, Yang Zezhong¹, Wang Jianxin¹, Hao Hongbo²

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;
2. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China)

Abstract: This paper uses the PatSnap platform to search the patents related to magnetic refrigeration technology worldwide, collects the patent data in the field of magnetic refrigeration technology and gets the analysis sample after re-processing; gives a general overview of the sample patent, the patent owner and inventor analysis, technical analysis, value analysis, patent map and patent high-frequency keywords, analyzes the present situation of the application of magnetic refrigeration technology, the key technical distribution field, the value of patent and so on, and forecasts its development direction.

Key words: magnetic refrigeration; magnetocaloric effect; rare earth material; patent analysis; dynamic of technology

1 磁制冷概念简介及研究目的

磁热效应 (magnetocaloric effect) 是指磁性材料在磁场增强或减弱时放热或吸热的物理现象。其原理为: 在无磁场情况下, 磁体内磁矩的方向是无序的, 磁熵较大, 体系绝热温度较低; 外加磁场后, 磁矩在磁场力矩作用下趋于与磁场平行, 磁熵减小, 绝热温度上升, 从而通过热交换向环境放热; 当磁场变小, 由于磁性原子或离子的热运动, 磁矩又趋于无序, 绝热温度降低, 从而通过热交换从环境中吸热^[1]。而其中磁场变小、温度降低的吸热过程就是磁制冷 (magnetic refrigeration), 它是以磁性材料为工质, 凭借其磁热效应来制冷的一种新型技术。与气体压缩制冷和半导体制冷等传统制冷技术相比, 磁制冷技术可以实现原理上的理想循环, 效率远高

于传统制冷方式, 节省能源; 且固态磁制冷材料的熵密度远大于气体, 制冷机体积较小, 无需对气体大幅度压缩, 运行安全可靠, 同时磁性材料工质对环境友好, 且噪声小、寿命长^[2]。在当今社会, 随着能源的日益紧缺、温室效应的日益加剧以及环境保护意识的不断增强, 传统制冷技术面临淘汰, 高效环保且安全可靠的磁制冷技术越来越被人们重视。

专利具有新颖性、创造性和实用性的特点, 充分反映了专利涉及技术领域的前景。据统计, 全世界发明创造成果的 90%~95% 都体现在专利技术上, 其中约 70% 最早体现在专利申请中^[3]。专利分析方法将专利文献中大量专利信息进行加工组合, 利用统计或数据处理方法使之具有纵览全局及预测功能, 由普通信息转变为有价值的情报^[4]。本文基于专利分析方法, 对全球磁制冷技术应用进行研究,

揭示其发展现状、技术方向及发展趋势，以期为中国磁制冷技术研究发展提供参考和趋势引导。

2 磁制冷相关专利概况

利用 PatSnap 智慧芽专利分析平台，以“磁制冷”“magnetic refrigeration”等作为检索关键词，在包括中国国家知识产权局、欧洲专利局、日本特许厅、美国专利局等全球专利数据库中，对磁制冷相关专利进行检索，并经过检全与检重处理，共得到专利 1 730 件（截至 2017 年 9 月）。其中，中国是持有专利最多的国家，共有专利 902 件，占比为 52.14%；其次分别是日本、美国及欧洲，占比分别为 14.66%、9.86% 和 4.54%。磁制冷相关专利持有的地域分布情况如图 1 所示。

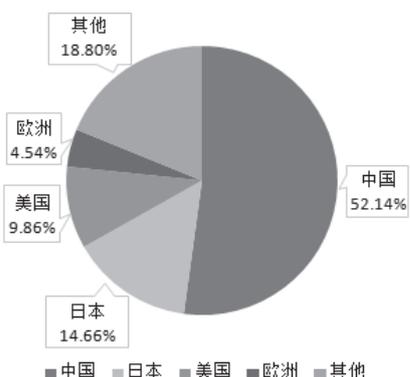


图 1 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利持有地域分布

图 2 是专利持有量最多的 4 个国家和地区近 20 年来的年申请量趋势。考虑到专利从申请到公开最多有 18 个月的时间，故 2017 年的专利未做统计，2016 年的专利数量可能不全。中国从 21 世纪开始，磁制冷技术开始有所发展，专利数量每年保持增长态势，近 10 年来始终处于年申请量第一的位置，呈现出极度活跃的态势。其他几个国家和地区的专利申请量则相对保持稳定。

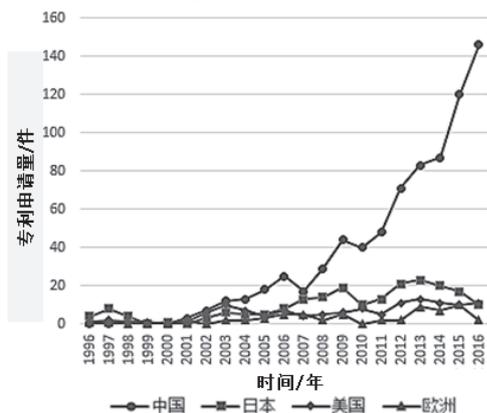


图 2 1996—2016 年 4 个主要国家和地区磁制冷相关专利年申请量

专利类型分布如图 3 所示。其中，发明专利占到了绝大多数，为 1 625 件，占比为 93.93%；其余均为实用新型专利，占比为 6.07%。磁制冷技术相关专利级别高，其技术应用仍属于新兴技术领域，专利集中在磁制冷技术原理及其材料的生产方法、实验方法等抽象概念，处于技术应用初始阶段，尚未形成广泛应用规模。随着未来的技术突破，更偏向于实际应用的实用新型专利将会逐渐增多。

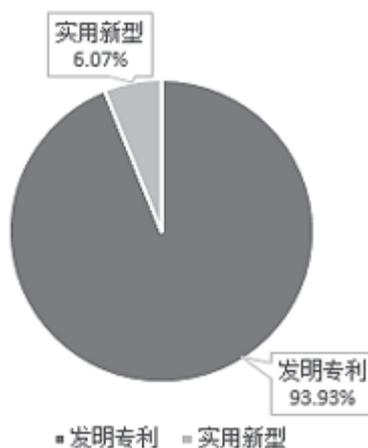


图 3 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利类型

3 磁制冷相关专利权人及发明人分析

表 1 和表 2 分别是磁制冷相关专利持有量最多的专利权人和主要发明人（专利权人名称已标准化处理，表中括号内为翻译说明）。

专利持有量较多的专利权人主要集中在日本和中国。日本主要专利持有人均为公司，其中东芝株式会社是世界上最早研究磁制冷技术的公司之一，专利持有量最多，几乎是持有量排名第二的两倍。而中国主要专利持有人多为高校及科研单位，如中国科学院、包头稀土研究院和北京科技大学等。海尔集团在国内对于磁制冷技术的研究颇有建树，多年来对于磁制冷、薄膜固态制冷等固态制冷技术有着深入的研究，目前已在制冷行业及其应用领域申请了包括国际专利在内的多项专利。在 2015CES（国际消费类电子产品展览会）上，海尔发布了全球第一台磁制冷酒柜的样机产品^[5]，并即将实现量产。同时海尔集团早在 2007 年就与包头稀土研究院接触与合作，并于 2011 年成立了磁制冷事业部，对包头稀土研究院投入了大量研究经费；包头稀土研究院围绕海尔集团项目进行研究，成功研制出两台钕铁硼磁制冷机样机，该样机钕铁硼用量约为 4 kg，在性能和成本之间达到了良好平衡^[6]。包头稀土研究院于 2001 年设计出了第一台磁液体磁制冷机，近十几

年设计出往复式、旋转式、复合式等 10 多台室温磁制冷机，最大制冷温差 26℃，最低制冷温度 -6.5℃^[7]。

表 1 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利持有量较多的主要专利权人

排名 / 位	专利权人	专利数量 / 件	国别
1	TOSHIBA (东芝)	140	日本
2	中国科学院物理研究所	71	中国
3	ASTRONAUTICS CORPORATION OF AMERICA (美国宇航公司)	60	美国
4	华南理工大学	53	中国
5	北京科技大学	39	中国
6	DENSO (电装公司)	37	日本
7	海尔	37	中国
8	STICHTING VOOR DE TECHNISCHE WETENSCHAPPEN (科学技术基金会)	33	荷兰
9	南京大学	29	中国
10	SANTOKU CORPORATION (三德公司)	28	日本
11	CHUBU ELECTRIC POWER (中部电力公司)	25	日本
12	中国科学院理化技术研究所	25	中国
13	包头稀土研究院	25	中国
14	NISSAN (日产汽车公司)	24	日本

主要发明人中，占据前一二席位的仍是日本。齐藤明子、小林忠彦和加治志織均来自日本东芝株式会社的功能材料研发中心实验室，他们申请了多项有关磁制冷材料制备及磁制冷系统装置的专利，用于研发新型磁制冷空调、冰箱、冷柜等制冷设备，发现了具有更大磁热效应的 Mn 基室温磁制冷材料 $MnFeP_{1-x}As_x$ 和 $Mn(As_{1-x}Sb_x)$ ^[8-9]。而在专利平均被引用次数上中国与日本差距很大。中国被引用次数较多的是包头稀土研究院的黄焦宏和金培育的专利，他们主要研究稀土磁液体材料及其磁制冷设备、换热器、复合式室温磁制冷系统以及真空永磁磁热效应测量仪等。持有专利数较多的沈保根、孙继荣、胡凤霞均为中国科学院物理研究所研究员。沈保根院士为中科院磁学国家重点实验室主任，研究发现了多种新型大磁热效应材料，如 kg 级 $La(Fe,Si)_{13}$ 基磁制冷材料、粘结 $La(Fe,Si)_{13}$ 基磁热效应材料、氢化 NiMn 基合金磁制冷材料、大熵变 MnCoGe 基铁磁马氏体相变材料等，阐明了一级相变体系中磁热效应的物理机制^[10]。孙继荣为中科院磁学国家重点实验室副主任，主要研究金属间化合物的室温巨磁熵变等磁性材料。胡凤霞为中科院磁学国家重点实验室主任，在室温磁制冷材料和物理研究方面获得突破性进展，发现了新型室温磁致冷材料 $LaFeCoAl$ 和 $LaFeCoSi$ 系列金属间化合物，该化合物的磁熵变比 Gd 大，且居里点可调节；发现室温附近巨磁热效应材料 $NaZn_{13}$ 型 $La(Fe,Si)_{13}$ 基化合物，已成为国际公

认的最有应用前景的磁制冷材料之一^[11]。

表 2 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利主要发明人

排名 / 位	姓名	专利数量 / 件	平均被引用次数 / 次	国别
1	齐藤明子	70	7.23	日本
2	小林忠彦	65	8.18	日本
3	沈保根	55	0.79	中国
4	孙继荣	44	0.55	中国
5	胡凤霞	43	0.91	中国
6	龙毅	31	0.81	中国
7	黄焦宏	28	1.32	中国
8	沈俊	26	0.31	中国
9	金培育	26	1.42	中国
10	加治志織	25	2.22	日本
11	平野直樹	25	3.01	日本
12	唐林强	25	0	中国

4 磁制冷相关专利技术分析

目前国际通用的专利文献分类方法是国际专利分类 (IPC) 法，每项专利 (除外观设计) 对应一个或多个 IPC 分类号。通过统计专利的 IPC 分类号，能够掌握专利申请的技术领域分布情况。表 3 是基于 IPC 小类统计的磁制冷技术专利主要技术领域。可以看出，磁制冷专利主要集中在 F25B、H01F 和 C22C 等领域，在这些领域技术相对比较成熟，发展潜力较大。

表 3 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利主要技术领域

IPC 分类号	定义	专利数量 / 件	占比 / %
F25B	制冷机；加热和制冷的联合系统；热泵系统	961	55.55
H01F	磁体；电感；变压器；磁性材料的选择	463	26.76
C22C	合金	360	20.81
C09K	其他应用材料；其他材料的各种应用	186	10.75
B22F	金属粉末的加工；由金属粉末制造制品	112	6.47
C22F	改变有色金属或有合金的物理结构	63	3.64
F25D	冷柜；冷藏室；冰箱；其他冷却或冷冻装置	59	3.41
C21D	改变黑色金属的物理结构	43	2.49
B22D	金属铸造；用相同工艺的其他物质的铸造	42	2.43
H01L	半导体器件；其他类目中不包括的电固体器件	41	2.37

将专利技术领域与主要专利权持有人进行匹配，可以得出研究机构的主要研究领域 (如表 4)。日本企业在 F25B，即制冷机应用的领域研究较多。而中国的研究机构则主要在 C22C、H01F 等磁制冷原理及材料领域进行研究，如南京大学的陈伟、钟伟等采用溶胶-凝胶法，通过柠檬酸的络合，制备出钙钛型多晶纳米材料，这种多晶纳米颗粒在室温附近、低磁场下具有较大的磁热效应，且电阻率高、性能稳定，是比较理想的磁制冷材料^[12]。

表 4 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利技术分类与主要专利权人

排名 / 位	专利权人	IPC 分类号
1	TOSHIBA (东芝)	F25B
2	中国科学院物理研究所	C22CH01F
3	ASTRONAUTICS CORPORATION OF AMERICA (美国宇航公司)	F25B
4	华南理工大学	F25BC22C
5	北京科技大学	C22CH01F
6	DENSO (电装公司)	F25B
7	海尔	F25B
8	STICHTING VOOR DE TECHNISCHE WETENSCHAPPEN (科学技术基金会)	H01FF25B
9	南京大学	C09KF25B
10	SANTOKU CORPORATION (三德公司)	F25BC22C
11	CHUBU ELECTRIC POWER (中部电力公司)	F25B
12	中国科学院理化技术研究所	F25BH01F
13	包头稀土研究院	F25BH01F
14	NISSAN (日产汽车公司)	F25B

高被引专利是指被引用次数较多的专利，在一定程度上说明这些专利对技术发展的影响较大。表 5 为被引用次数最多的 10 项专利，这些专利均由美国专利局受理，申请人多为美国机构（如美国宇航公司、美国能源部）及少量日本公司（如东芝、住友金属）。

表 5 截至 2017 年 9 月高被引磁制冷相关专利

专利号	专利名称	被引量 / 次
US6526759	Rotating bed magnetic refrigeration apparatus (旋转床磁制冷装置)	91
US6826915	Magnetic refrigerant material, regenerator and magnetic refrigerator (磁性制冷剂材料、再生器和磁制冷机)	82
US6668560	Rotating magnet magnetic refrigerator (旋转磁铁磁制冷机)	80
US4107935	High temperature refrigerator (高温冰箱)	76
US5743095	Active magnetic refrigerants based on Gd-Si-Ge material and refrigeration apparatus and process (Gd-Si-Ge 材料的活性磁制冷剂及制冷装置和工艺)	76
US6595004	Apparatus and methods for performing switching in magnetic refrigeration systems using thermoelectric switches (用热电开关在磁制冷系统中进行开关的装置和方法)	67
US20040093877A1	Magnetic refrigerant material, regenerator and magnetic refrigerator (磁性制冷剂材料、再生器和磁制冷机)	63
US6676772	Magnetic material (磁性材料)	63
US3841107	MAGNETIC REFRIGERATION (磁(致)热的制冷装置)	62
US20040182086A1	Magnetocaloric refrigeration device (磁(致)热的制冷装置)	60

同族专利是基于同一优先权文件，向不同国家或地区专利组织递交申请，从而公开或批准的内容相同或基本相同的一组专利文献。同族专利组成专利家族。拥有较大专利家族的专利，通常意味着申请人认为其具有较高价值而在全球范围内申请授权。

表 6 为专利家族较大的专利。

表 6 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利家族规模排名

专利号	专利名称	家族规模 / 件
CN102549679A	由磁热材料级联构成的换热器床	33
CN102016452A	用磁热材料产生热流的设备	20
ES2284683T3	Aparato de refrigeracion magnetica de sustrato rotativo. (磁还原磁触角)	20
CN105444458A	用于主动再生磁热或电热热力发动机的多材料叶片	19
WO2009133049A1	Method for producing metal-based materials for magnetic cooling or heat pumps (磁性冷却或热泵用金属基材料的生产方法)	19
DK1599884T3	Magnetiskmateriale med köleevne, fremgangsmådetil fremstilling deraf og anvendelse af et sådant material	18
CN102227604A	饮料冷却器、包括此类饮料冷却器的冰箱和用于冷却饮料的方法	15
CN105849477A	磁热式热装置	12
CN101115962A	磁蓄冷器、制造磁蓄冷器的方法、制造活性磁制冷机的方法和活性磁制冷机	12
EP2107575A1	New intermetallic compounds, their use and a process for preparing the same (新型金属间化合物及其用途及制备工艺)	11

从所有专利的标题和摘要中提取语义关键词，按照关键词出现的次数绘制圆形图（如图 4）。外层的关键词是内层关键词的进一步分解，关键词所在扇形面积大小表示该词出现的频率大小。可见磁制冷专利技术研究集中的 6 个核心领域：磁制冷材料（306 件）、heat exchanger（热交换器，201 件）、magnetic refrigeration system（磁制冷系统，173 件）、magnetic refrigerating device（磁制冷设备，158 件）、magnetocaloric material（磁热材料，154 件）及磁性材料（138 件）。

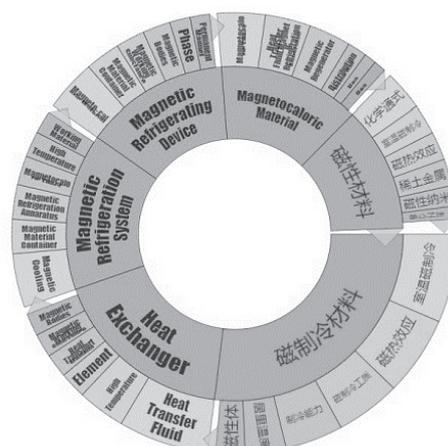


图 4 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利高频关键词圆形图

综合以上分析，并结合专利技术领域与高频关键词，绘制专利地图，如图 5 所示。专利地图直观地展现出该领域的技术布局，高峰代表技术热点领域，低谷则说明存在技术盲点，同时也是潜在的机会或待开发的领域。从专利地图分析得出，磁制冷

技术应用聚焦的技术领域主要有：磁制冷、制冷机、合金、稀土、磁性材料。设备、材料、室温；磁制冷机、流体、旋转、机器；

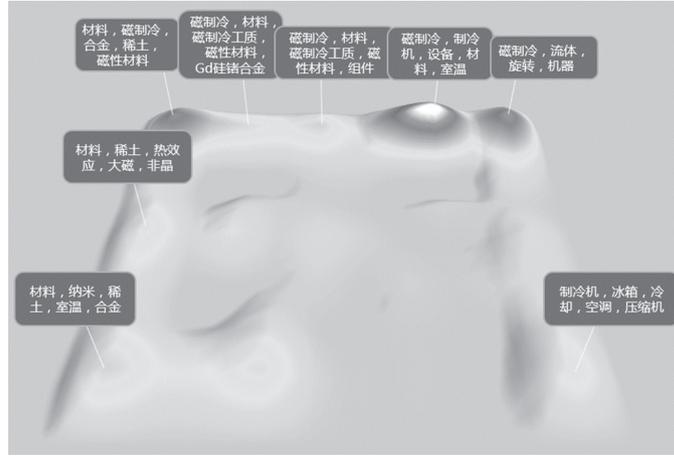


图5 截至2017年9月磁制冷相关专利地图

基于专利技术分析，在磁制冷技术的发展过程中，磁制冷材料的研究始终属于主导地位。根据磁制冷材料工作温度的不同，磁制冷材料分为3种：热力学温度低于20 K为低温区，20~77 K为中温区，77 K以上为高温区。低温区材料主要是顺磁盐和稀土金属间化合物，如 Gd_3GaO_{12} 、 $Dy_3Al_5O_{12}$ 、 $Tb_xY_{1-x}Al_2$ 及硝酸铈镁等；中温区材料主要有 $HoCo_2$ 、 $RAlNi$ 、 $(R_{1-x}R_x)Al_2$ 等复合材料，实现了更宽的居里温度变化区间；高温区主要以稀土金属Gd及Gd基化合物为主^[13]。一般来说，磁制冷材料主要利用磁性材料在居里温度附近的二级磁相变产生的磁熵来实现制冷的^[14]。

5 磁制冷相关专利价值分析

专利价值分析是从多方面分析专利的价值度（PVD），主要有技术价值度、法律价值度、经济价值度和学术价值度^[15]。其中，技术价值度主要评估和分析专利的技术领先程度，将先进性、行业发展趋势、适用范围、可替代性、技术配套依存度指标分为5个等级，从高到低分别赋分10、8、6、4、2分，成熟度分为10个等级，从高到低赋分10分到1分；其他价值维度按类似的方法赋分，通过定量统计进行价值分析。专利价值分析体系如图6所示。

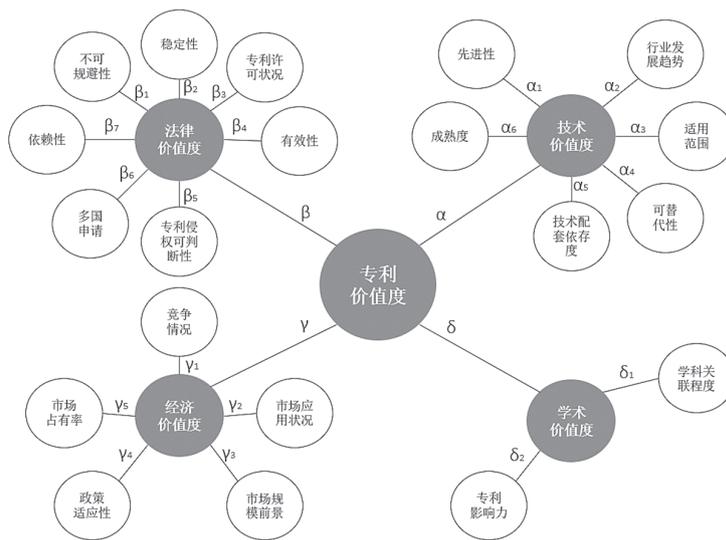


图6 专利价值分析体系

由于本文的专利样本数量较大，直接开展价值分析存在一定困难，因此，首先对专利家族、法律状态、诉讼等客观指标进行筛选，得出前100个专

利样本，然后对其进行人工赋分、权重定量分析，得到磁制冷技术应用专利价值度排名前10位的专利，如表7所示。专利价值排名前10位的专利都存

在中国同族专利，说明国外企业重视包括中国市场在内的海外市场；而其中没有出现中国专利权人，

专利权人主要是日本和美国的机构，可见中国在这方面与国外差距仍有较大差距。

表 7 截至 2017 年 9 月磁制冷相关专利技术价值前 10 位排名

专利号	专利名称	专利权人	专利价值 / 美元
CN102639266B	磁石用粉末	住友电气工业株式会社	4 402 000
CN100519807C	磁性合金以及制备该磁性合金的方法	日立金属株式会社	4 267 000
US7914628	Magnetic refrigeration material and method of manufacturing thereof (磁性制冷材料及其制造方法)	TOSHIBA (株式会社东芝)	3 685 000
JP4413804B2	磁制冷材料及びその製造方法 (磁制冷材料及其制造方法)	株式会社东芝	3 351 000
CA2702793C	Thermal generator with magneto-caloric material (磁热材料热发生器)	科泰电源应用股份有限公司 (Cooltech Applications S.A.S.)	3 077 000
CN101842647B	带有磁热材料的热发生器	法国制冷技术应用股份有限公司	2 970 000
US9383125	Magnetic Material For Magnetic Refrigeration	TOSHIBA (株式会社东芝)	2 384 000
JP4481949B2	磁制冷用磁性材料	株式会社东芝	2 333 000
CN105627015A	从导热金属管道撤出热能的方法、装置和系统	美国生物膜 IP 有限责任公司	2 201 000
US20090019860A1	Magnetic material for magnetic refrigeration (磁性制冷材料)	TOSHIBA (株式会社东芝)	2 111 000

6 结论

磁制冷技术的关键是解决磁制冷材料问题。目前多数磁制冷机采用 Gd 合金 (Gd-Er、Gd-Dy、Gd-Tb 等) 二级相变，变相温度宽但磁熵变略低。磁热效应高、应用前景好的磁制冷材料主要是 $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ 、 $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}\text{H}_x$ 、 $\text{La}(\text{FeCoSi})_{13}$ 以及 $\text{MnFeP}_{1-x}\text{As}_x(\text{Si})$ 。磁制冷技术得到国内外研究机构和研究人员的认可，但目前尚未得到实际应用，有专家学者推测磁制冷机进入市场还需 3 年左右的时间。目前实验室磁制冷需要进一步探讨的问题主要有：磁制冷材料磁热效应问题 (绝热温变与磁熵变)；巨磁熵变的计算与测量问题；一级相变材料相变点及相变温区问题 (相变温区窄)；较低磁场下磁热效应材料磁制冷效率问题。在超低温领域中，利用原子核去磁制冷原理制取液化氨、氮、氢目前已得到广泛应用；在室温制冷方面，磁制冷有望在冰箱、空调等方面获得商业应用，成为未来最有发展前景的新型制冷技术。磁制冷技术的应用前景应得到各国研究机构的重视，进一步开展磁制冷研究与开发，逐步完善实验室设计研究。

磁制冷技术作为一个新兴技术领域，中国近 10 多年来在该领域的研究力度较大，专利数量逐年快速增长，已位居全球第一，但在其他方面与日本、美国等传统磁制冷研究大国有一定差距：在个人专利被引用数量方面，中国远低于日本，而被引用量较多的前 10 项专利均在美国申请；中国专利数量很多，但是存在相当一部分专利是由外国公司在华申请的，国内专利权人专利的价值有限，且主要是科研单位和高等院校对磁体材料及合金的研究，更多的是停留在理论研究方面，而日本则主要是企业研究如何将磁制冷技术更广泛地应用到制冷机等实际应用中去。磁制冷技术目前正向着室温磁制冷方向发展，将来会在现代工业、农业、交通、医疗、国防、科学研究和人民生活等领域广泛应用，中国应努力

推进室温磁制冷技术应用研究，加强企业与科研单位及高等院校的合作，早日让室温磁制冷技术从实验室走出来，应用到实际生活中，将专利实现产业化。

参考文献：

- [1] 吴殿震, 郑红星, 翟启杰. 磁制冷材料研究进展 [J]. 材料导报, 2011, 25(15): 9-14.
- [2] 龙毅, 付松, 叶荣昌. 磁制冷材料实用化研究进展 [J]. 中国稀土学报, 2012, 30(6): 641-649.
- [3] 张俐, 余丽娜. 基于专利分析的磷酸铵盐灭火剂发展态势研究 [J]. 消防科学与技术, 2017, 36(5): 686-689.
- [4] 马天旗. 专利分析: 方法、图表解读与情报挖掘 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2015: 1.
- [5] 黄焦宏, 刘翠兰. 室温磁制冷技术实用化最新进展 [J]. 稀土信息, 2015(8): 14-17.
- [6] 制冷快报. 包头稀土研究院钕铁硼磁制冷机研制顺利 [J]. 稀土信息, 2013(12): 17.
- [7] 孔繁清, 郭咏梅. 包头稀土研究院磁制冷机研发取得突破 [J]. 稀土信息, 2015(1): 7.
- [8] HIRANO N, NAGAYA S, TAKAHASHI M. Development of magnetic refrigerator for room temperature application [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 613(1): 1027-1034.
- [9] KITANOVSKI A, TUSEK J, TOMC U, et al. Overview of existing magnetocaloric prototype devices [M]//KITANOVSKI A, TUSEK J, TOMC U, et al. Magnetocaloric energy conversion. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 269-330.
- [10] 马峥. 稀土基多相合金磁热效应研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [11] 胡洁. $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ 基磁制冷材料的腐蚀行为和磁性能研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [12] 鲍雨梅, 张康达. 磁制冷技术的纳米制冷工质的研究进展 [J]. 杭州师范学院学报, 2003, 2(1): 56-59.
- [13] 张恩耀. 磁制冷材料的研究现状 [J]. 建材与装饰, 2016(35): 199-200.
- [14] BALLI M, SARI O, MAHMED C, et al. A pre-industrial magnetic cooling system for room temperature application [J]. Applied Energy, 2012, 98: 556-561.
- [15] 肖国华, 牛茜茜. 专利价值分析指标体系改进研究 [J]. 科技进步与对策, 2015, 32(5): 117-121.

作者简介：闫洪波 (1981—)，男，河南洛阳人，副教授，主要研究方向为知识创新及工程应用；杨泽中 (1993—)，男，江苏常州人，硕士研究生，主要研究方向为创新设计；汪建新 (1962—)，男，内蒙古包头人，博士，教授，主要研究方向为机械创新设计；郝宏波 (1981—)，男，内蒙古包头人，高级工程师，主要研究方向为稀土功能材料。