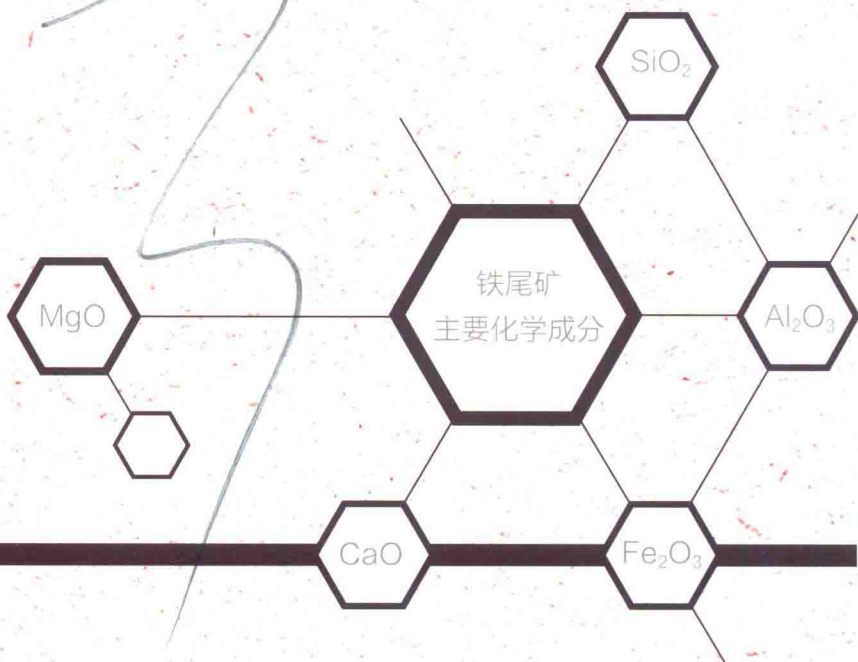


IRON TAILINGS POROUS CONCRETE
PREPARATION AND PERFORMANCE

铁尾矿 多孔混凝土制备与性能

丁向群 陈平 王凤池 康天蓓 著



中国建筑工业出版社

铁尾矿多孔混凝土制备与性能

丁向群 陈 平 王凤池 康天蓓 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

铁尾矿多孔混凝土制备与性能/丁向群等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2018.9
ISBN 978-7-112-22570-5

I. ①铁… II. ①丁… III. ①铁-尾矿砂-多孔性材料-轻质混凝土-制备②铁-尾矿砂-多孔性材料-轻质混凝土-性能 IV. ①TU528.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 188654 号

本书介绍了利用铁尾矿制备混凝土的性能与应用现状, 内容共有 5 章, 包括: 绪论、铁尾矿的基本性质、铁尾矿泡沫混凝土的制备工艺、铁尾矿加气混凝土的制备工艺、铁尾矿加气混凝土的耐久性能。

本书适用于建筑材料专业研究、应用人员使用, 也可供大中专院校建筑材料相关专业师生参考使用。

责任编辑: 万 李

责任设计: 李志立

责任校对: 刘梦然

铁尾矿多孔混凝土制备与性能

丁向群 陈 平 王凤池 康天蓓 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 246 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-22570-5

(32644)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

多孔混凝土中含有大量细小的封闭气孔，具有密度小、质量轻、保温、隔声、抗震等优点，可用于建筑墙体、屋面保温等建筑结构中，受到普遍关注。

铁尾矿是铁矿石经过选取铁精矿后剩余的固体废弃物，由于我国铁矿石品位低、共伴生矿多，在选矿过程中会排出大量尾矿，同时，随着矿产资源利用程度的提高，矿石的可开采品位相应降低，尾矿排出量也在逐渐增加。几十年产生的铁尾矿与每年新增的铁尾矿常年堆积，利用率不到10%。近年来，社会发展与环境保护的矛盾日益突出，国内外都极其注重在发展经济的同时减少对自然环境的损害，铁尾矿的综合利用备受关注。

我国铁尾矿的组成特点适合于作为水泥、混凝土的原料，但由于其常温下化学活性不足，阻碍了其应用。如果经过处理、采用合适工艺，铁尾矿粉取代部分水泥，或者取代部分砂，用于混凝土中是可能的，在实现铁尾矿再利用的同时，改善混凝土性能，有利于制备出利废、环保、节能、低廉且具有不燃性的建筑节能材料，既能综合利用工业废渣、治理环境污染，又能创造良好的社会效益和经济效益。

本书是在总结多年的铁尾矿多孔混凝土研究成果基础上形成的，共分为5章，着重介绍了铁尾矿的基本性质、铁尾矿泡沫混凝土的制备工艺及其性能、铁尾矿加气混凝土的制备及其耐久性，并从微观结构及孔结构进行了理论分析。

感谢一起参与铁尾矿多孔混凝土相关研究的课题组同仁们及研究生们，特别感谢沈阳市科技计划项目（17-209-9-00）的支持。

由于笔者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者指教，以便完善。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 铁尾矿的现状	1
1.1.1 铁尾矿的产生	1
1.1.2 铁尾矿的分布及特点	1
1.1.3 铁尾矿的危害	2
1.2 铁尾矿的利用	3
1.2.1 国外综合利用现状	3
1.2.2 国内综合利用现状	5
1.2.3 铁尾矿利用存在的问题	10
1.3 铁尾矿泡沫混凝土	11
1.3.1 国内泡沫混凝土的发展及现状	11
1.3.2 影响泡沫混凝土性能的因素	13
1.3.3 泡沫混凝土微观结构的研究	14
1.3.4 泡沫混凝土性能研究现状	14
1.3.5 泡沫混凝土的应用	15
1.3.6 泡沫混凝土存在的问题及改进措施	15
1.3.7 铁尾矿在泡沫混凝土中的应用	16
1.4 铁尾矿加气混凝土	17
1.4.1 加气混凝土的发展	17
1.4.2 加气混凝土材料技术特性	17
1.4.3 铁尾矿在加气混凝土中的应用	18
本章参考文献	18
第 2 章 铁尾矿的基本性质	22
2.1 铁尾矿的组成及结构特点	22
2.1.1 铁尾矿的形成	22
2.1.2 铁尾矿的组成	22
2.1.3 铁尾矿的结构特点	24
2.2 铁尾矿的物理及化学性能	24
2.2.1 铁尾矿的物理性能	24
2.2.2 铁尾矿的化学性能	26
本章参考文献	30
第 3 章 铁尾矿泡沫混凝土的制备工艺	32
3.1 概述	32

3.2	原材料	33
3.2.1	原材料	33
3.2.2	试验仪器及设备	34
3.3	试验方法	34
3.3.1	表观密度和吸水率测试	34
3.3.2	抗压强度及抗折强度测试	35
3.3.3	凝结时间和流动度测试	35
3.3.4	收缩性能测试	35
3.3.5	孔结构	35
3.3.6	微观结构观察	35
3.4	铁尾矿泡沫混凝土基本性能研究	35
3.4.1	铁尾矿粉对泡沫混凝土物理力学性能的影响	36
3.4.2	双氧水对铁尾矿泡沫混凝土物理力学性能的影响	38
3.4.3	水灰比对铁尾矿泡沫混凝土物理力学性能的影响	40
3.4.4	改性组分对铁尾矿泡沫混凝土物理力学性能的影响	42
3.4.5	表观密度对铁尾矿泡沫混凝土性能的影响	50
3.4.6	小结	51
3.5	铁尾矿泡沫混凝土收缩性能研究	52
3.5.1	铁尾矿粉对收缩性能的影响	52
3.5.2	双氧水对收缩性能的影响	52
3.5.3	水灰比对收缩性能的影响	53
3.5.4	改性组分对收缩性能的影响	53
3.5.5	表观密度对铁尾矿泡沫混凝土收缩性能的影响	55
3.5.6	小结	56
3.6	铁尾矿泡沫混凝土的微观结构和孔结构研究	56
3.6.1	铁尾矿泡沫混凝土的微观结构分析	56
3.6.2	铁尾矿泡沫混凝土的孔结构	58
3.7	小结	64
	本章参考文献	65
第4章	铁尾矿加气混凝土的制备工艺	68
4.1	概述	68
4.1.1	加气混凝土的结构及强度形成原理	68
4.1.2	加气混凝土的优点	69
4.1.3	加气混凝土的国内外研究现状	70
4.2	试验材料及方法	72
4.2.1	试验原材料	72
4.2.2	仪器	75
4.2.3	测试方法	76
4.2.4	实验方案	77

4.3	物料配比对加气混凝土力学性能的影响	78
4.3.1	水泥掺量对加气混凝土力学性能的影响	78
4.3.2	石灰掺量对铁尾矿加气混凝土力学性能的影响	80
4.3.3	石膏掺量对铁尾矿加气混凝土力学性能的影响	82
4.3.4	钙硅比对加气混凝土力学性能的影响	83
4.3.5	物料配比的正交设计	85
4.3.6	XRD 分析	86
4.3.7	SEM 分析	88
4.3.8	小结	90
4.4	工艺制度对加气混凝土力学性能的影响	92
4.4.1	工艺制度正交设计	92
4.4.2	蒸养温度对加气混凝土力学性能的影响	94
4.4.3	蒸养时间对加气混凝土力学性能的影响	95
4.4.4	XRD 分析	97
4.4.5	SEM 分析	97
4.4.6	小结	99
4.5	发气性能研究	100
4.5.1	水料比试验	100
4.5.2	铝粉发泡试验	101
4.5.3	稳泡剂试验	102
4.5.4	正交分析试验	104
4.5.5	小结	105
4.6	总结	106
	本章参考文献	107
第 5 章	铁尾矿加气混凝土的耐久性能	109
5.1	概述	109
5.1.1	国内外铁尾矿综合利用现状	109
5.1.2	加气混凝土概述	112
5.1.3	加气混凝土抗冻性的研究现状及评价方法	114
5.1.4	主要内容和意义	115
5.2	实验原材料及方法	116
5.2.1	原材料	116
5.2.2	仪器	120
5.2.3	测试方法	120
5.2.4	技术路线	122
5.3	石灰掺量对力学性能及抗冻性的影响	122
5.3.1	石灰掺量对试样力学性能的影响	122
5.3.2	石灰掺量对试样抗冻性能的影响	125
5.3.3	微观分析	126

5.3.4 小结	128
5.4 改性材料对力学性能及抗冻性的影响	128
5.4.1 改性材料对力学性能及抗冻性的改善	128
5.4.2 水性环氧树脂对吸水率及抗冻性的影响	129
5.4.3 硬脂酸钙对试样吸水率及抗冻性的影响	133
5.5 孔隙特征分析	136
5.5.1 孔的分类及其表征	136
5.5.2 利用 MATLAB 分析试样的孔隙特征	138
5.5.3 孔隙特征对试样力学性能的影响	140
5.5.4 孔隙特征对试样抗冻性能的影响	144
5.5.5 理论分析	145
5.5.6 小结	146
5.6 结论	147
本章参考文献	148

第 1 章 绪 论

1.1 铁尾矿的现状

1.1.1 铁尾矿的产生

尾矿是我国目前产出量最大、堆存量最多的工业固体废弃物，其中铁尾矿的产生和堆积量尤为巨大。铁尾矿是铁矿石经过选取铁精矿后剩余的固体废弃物，由于我国铁矿石品位低、共伴生矿多，在选矿过程中会排出大量尾矿，每生产 1t 铁精矿要排出 2.5~3.0t 尾矿。同时随着矿产资源利用程度的提高，矿石的可开采品位相应降低，尾矿排出量也在逐渐增加。仅鞍山、本溪地区的铁尾矿总量就在 10 亿 t 以上，而且每年至少以 3000 万 t 的数量增长，且有效利用很低。据不完全统计，截至 2009 年，我国各类尾矿总数达到 12718 座，部分省份尾矿数量见表 1-1。

我国部分省份尾矿库数量

表 1-1

地区	尾矿库总数	在建尾矿库数	地区	尾矿库总数	在建尾矿库数	地区	尾矿库总数	在建尾矿库数
北京	37	0	黑龙江	62	14	山东	494	81
河北	2888	158	江苏	19	1	湖北	236	30
山西	1735	556	浙江	78	1	湖南	651	26
内蒙	685	104	安徽	341	45	广东	226	15
辽宁	1475	174	福建	247	75	广西	504	68
吉林	167	31	江西	380	75	河南	681	120
四川	203	37						

随着钢铁等工业的快速发展，对矿产资源的需求量不断增加，导致矿山的过度开采，每年排放的铁尾矿在尾矿中所占比例也越来越大，尾矿堆积量增长迅速，尤其最近几年，我国每年铁尾矿的排放量已超过总尾矿量的一半以上。铁尾矿虽然是经过多重筛选而剩下的“废弃物”，但铁尾矿中仍含有大量有用的成分，由于经济原因和选矿等科技水平的限制，有用成分不能充分回收利用，也未能对铁尾矿进行充分再利用。但是随着经济和科学技术的发展，同时自然资源的紧缺，铁尾矿的综合利用受到了极大的关注，开展铁尾矿综合利用是解决尾矿问题的必然选择，铁尾矿将会成为重要的二次矿物资源。

1.1.2 铁尾矿的分布及特点

按照地区特点，我国铁尾矿的分布可以分为三类：一是以河北、辽宁为首的最主要地区；二是内蒙古、四川、北京和山西四个地区；三是余下的地区。铁尾矿化学成分主要有

SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等，还含有少量 K_2O 、 Na_2O 以及S等。按照铁尾矿的化学组成，一般将其分为5种类型：高硅类、高铝类、高钙镁类、低钙镁铝硅类和多金属类，这种划分方式主要视其不同元素的含量差异，从而有利于选择不同的利用途径。在我国的鞍山、本溪地区的铁尾矿， SiO_2 含量比较高；长江中下游宁芜一带，铁尾矿中 Al_2O_3 含量相对较高；在邯郸地区，铁尾矿为高钙、镁邯郸型铁尾矿；在我国内蒙古包头地区、西南攀西地区和长江中下游的武钢地区，铁尾矿类型为多金属类铁尾矿，伴生元素较多。

因铁矿石产地和选矿工艺的不同，其成分及含量也不同，导致尾矿性质也存在很大差异。此外，我国铁矿资源嵌布粒度细，共生复杂，为了获得高品位精矿，大部分须经过至少二段磨矿、选别，除预选抛出少量粗粒尾矿以外，大部分选矿排出的尾矿粒度很细，主要以细粒、微细粒的矿泥形式存在。

1.1.3 铁尾矿的危害

铁尾矿的产生与堆放给国家、社会带来沉重负担，严重影响了人民的生命财产安全，环境危害极大，已经成为我国可持续发展的瓶颈问题。

铁尾矿的危害主要表现在以下几个方面：

(1) 严重污染环境：尾矿排放到外界，将会对大气和水造成污染，也会对周围的生态造成污染，尾矿在受到腐蚀时、尾矿中的可迁移元素发生迁移时，将会对大气和水土造成严重污染，并导致土壤退化，植被破坏甚至威胁到人畜的生命安全。自然干涸后的细尾砂，遇大风形成扬尘、沙暴，吹到周边地区，对生态环境造成严重影响。尾矿中残留的选矿药剂和含有的重金属离子，甚至砷、汞等污染物质，会随尾矿水流入附近河流或渗入地下，严重污染河流及地下水源。我国因尾矿造成的直接污染面积已达百万亩，间接污染土地面积1000余万亩。

(2) 占用大量土地：尾矿库要占据大量的农、林土地，其中包括生产力高的耕地、良田。而耕地、良田的减少，直接关系到我国的粮食供应，是关乎国计民生的大问题，而且随着尾矿堆积量的增加，占用的土地面积将继续扩大，这就导致尾矿库所在地区的土地资源失去平衡，以我国的冶金矿山为例，目前占地面积已达 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中采场、排土场、尾矿库三大场地占地超过50%。据预测，到2000年，全国固体矿产采选业排出的铁尾矿废石破坏土地和堆存占地面积将达到 $1.87 \times 10^6 \sim 2.47 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

(3) 造成严重的地质灾害：尾矿堆积过多，尾矿库坍塌的风险增大，尤其是在雨期容易造成溃坝等严重灾难。坝体越高，危险性越高，特别是坝高超过100m的大型尾矿库，一旦发生垮坝事故，后果不堪设想。新中国成立以来，已发生过大小不同的事故数十件，如：2007年辽宁海城尾矿库发生溃堤事件，2008年9月8日，山西襄汾塔儿山一座尾矿库发生溃坝事故，276人死亡。

(4) 浪费宝贵的资源：尾矿也是一种宝贵资源，尾矿中含有很多金属元素和非金属元素，由于受到技术水平、装备性能、经济条件等因素的限制，选矿工艺不可能尽善尽美，并且在实际生产中还受到操作等因素的影响，从而不可避免地使一些有价值元素损失到尾矿中不能综合利用，造成了宝贵资源的浪费。

(5) 尾矿库运营成本增加：国内外许多采选公司的设计、建设和生产经验表明，尾

矿处理设施为结构复杂、投资巨大的综合水工构筑物，其基建投资占整个采选企业费用的5%~40%，据统计，我国冶金矿山每吨尾矿需尾矿库基建投资1~3元，生产经营管理费用3~5元。每年的营运费用就达7.5亿元，尾矿库的维护和维修更需消耗大量的资金。

1.2 铁尾矿的利用

近年来，社会发展与环境保护的矛盾日益突出，国内外都极其注重在发展经济的同时减少对自然环境的损害。几十年产生的铁尾矿与每年新增的铁尾矿常年堆积，利用率不到10%。

从20世纪80年代开始，我国对矿产资源综合利用工作加强了宏观管理，明确了指导方针，并于1986年首次在《中华人民共和国矿产资源法》中将尾矿综合利用以法律形式提出，在原国家科委和国家计委等联合制定的《中国21世纪议程》中，将资源的合理利用与环境保护列为四个主要内容之一。

2011年，国家发改委修订《产业结构调整指导目录》，其第三十八条鼓励推广共生、伴生矿产资源中有价元素的分离及综合利用技术和尾矿、废渣等资源综合利用。2016年，国务院发布《关于促进建材工业稳增长调结构增效益的指导意见》，要求积极利用尾矿废石、建筑垃圾等固废替代自然资源，发展机制砂石、混凝土掺合料、砌块墙材等产品。鼓励企业整合玻璃用硅砂、石英砂和砂石骨料用尾矿、废石等资源，提高综合利用水平。该要求的提出，将给尾矿、建筑垃圾再利用领域带来明确的政策指导，为砂石骨料行业发展指明了新的方向。总体上，国家在引导资源综合利用，特别是尾矿资源综合利用方面，产业政策不设下限，大力进行鼓励推动。

1.2.1 国外综合利用现状

国外对于铁尾矿的利用研究相对较早。美国及很多欧洲国家在开采铁矿的同时，已经可以大量高效的消耗伴生的废弃物。很多发达国家早在20世纪中期就开始了铁尾矿进行回收利用的研究工作。德国、美国、英国、日本、俄罗斯、加拿大和匈牙利等国，制定了二次资源管理法规和包括铁尾矿在内的废料排放标准。对于铁尾矿开发利用措施不力、环境质量不能达标的铁矿开发单位，限制整改、予以经济处罚直至取消注册登记。同时在贷款和税收等方面给予优惠政策刺激二次资源开发利用。

20世纪70年代以来国际上有关废料利用的技术交流活动十分活跃。1973年和1975年在波兰召开了第一、二届国际现代采矿工艺和冶金环境保护会议，交流采选冶炼技术和废料利用经验；1977年在赞比亚召开了“发展中国家资源利用会议”；1979年在华沙召开的第十三届国际选矿会议上讨论了矿物原料处理和有用组分全部利用问题；1980年在芝加哥第六届矿物废物利用国际会议上专门研究了矿物综合利用问题；1981年、1983年、1986年在捷克斯洛伐克召开了第一、二、三届“新型矿物原料讨论会”，讨论了选用岩石、矿物及其元素和非传统矿物原料的资源利用问题，把废料提高到了资源的高度来认识，提出了人类在21世纪重点开发无污染的绿色产品的战略口号。

随着科技的发展和学科间的相互渗透，包括铁尾矿在内的尾矿利用途径越来越广阔，

国外的铁尾矿利用率可以达到 60% 以上，其综合利用主要有以下途径：

(1) 作为矿山填充材料

矿山采空区回填是直接利用铁尾矿最行之有效的途径之一，其施工简单，耗资少，降低了充填成本和整个矿山生产成本，也降低矿石贫化率和损失率，提高了回采率，是世界各国普遍采用的一种利用铁尾矿的方法。

尾矿填充技术在 20 世纪中后期发展迅速，目前，已经从最初的干式填充法到不含胶结剂的水砂填充，以后发展为胶结填充，并使填充体浓度不断提高，逐步发展为高浓度的膏体填充。在 20 世纪 50 年代，澳大利亚一些地下金属矿山，以水利填充取代了早期使用的干式填充。1969 年澳大利亚科学与工程研究开展了机械落矿填充采矿法的相关问题，10 余年后在水利充填领域取得显著成绩。1977 年芒特艾萨矿与新南威尔士大学矿物学院合作研究出低成本胶结填充技术。加拿大于 1993 年发展了膏体填充技术，地下硬岩采矿企业几乎都采用了这种填充工艺，膏体填充因其使用全尾矿砂、水泥消耗量小、填充体强度高、无需脱水且不离析等优势在近几十年来得到快速发展和广泛应用。

(2) 复垦

为了防止铁尾矿随着风、水等扩散到周边环境，各国学者通过研究各种物理、化学及植被等方法稳固这些固体废弃物，使其对周边环境的影响降低到最低，其中植物的稳固是首选复垦的方法，因为它更持久，更美观，在已关闭的矿山得到更广泛的运用。

国外许多国家对铁尾矿等尾矿库的复垦工作十分重视，如德国、俄罗斯、美国、加拿大，澳大利亚等国家的矿山土地复垦率已达 80% 以上。20 世纪 90 年代，在美国矿山局的支持下，明尼苏达州东部的梅萨比铁矿山脉就开始进行复垦试验，研究有机添加剂对尾矿上植被恢复的影响，复垦土其植物生长率大大提高，可以种植雀麦草、紫花苜蓿、草本樺及各种牧草，而且三年之后就能够进行自我调节，不再需要以往的营养调整措施；加拿大铁矿公司的一个铁矿场在过去 40 年里向 Wabush 湖内排放了近 2300 万 t 尾矿，对周边环境和支流产生了影响，公司联合当地政府及社会各界制订了尾矿管理方案，在尾矿排放区种植不同当地植物，优化环境，减少尾矿污染，并且利用尾矿区中原先的一些低洼变成沼泽盆地、水圈、丘陵地等交错地形形成人工湿地，为当地野生动物提供了栖息地，人工湿地种植模式不仅有利于恢复生态系统，而且比传统种植方法费用低，进一步降低尾矿管理的运作成本。

(3) 生产建筑材料

俄罗斯铁尾矿用于建筑材料约占 60%，除制造建筑微晶玻璃和耐化学腐蚀玻璃外，还研制生产各种矿物胶凝材料；日本利用浮选铁尾矿作为主要原材料制造下水道陶土管，日本公害资源研究所制出了用尾矿作轻质多空材料的专利；在美国随着高品位铁矿储量减少，低品位的铁隧岩被大量开采以提供钢铁企业生产所用，铁隧岩的尾矿可以用来制备密度可调的轻质砖；加拿大在利用铁尾矿研制墙体材料方面最具特色，Collings. R. K 等人曾研究用铁尾矿与石灰按一定比例混合制成干压灰砂砖，应用效果良好；印度的 S. K. Das 等人利用铁尾矿制备出达到欧洲标准的瓷砖。

国外利用铁尾矿制备微晶玻璃的研究较早，一些国家利用其取代石英砂，添加长石等原料生产工艺玻璃制品，配方中加入经过简单加工过的尾砂及其助剂，在坩埚窑内熔融

后，制备玻璃制品，材质均一，美观，力学性能好，成品率极高。

1.2.2 国内综合利用现状

国内对铁尾矿综合利用的关注相对较晚，但近二三十年来针对铁尾矿综合利用的理论和技术研究有了长足的发展。国内的很多高校、科研院所及诸多企业结合铁尾矿的化学组成、结构及物理特性研发了多种具备高附加值新型建筑材料，如通过激发其活性制备的常温水合型材料（尾矿蒸压砖），因其组分与水泥基材料比较相近而制备胶结型材料（利用尾矿制备的水泥制品），并相继研究和开发了尾矿玻璃，尾矿陶瓷，尾矿烧结砖等技术和产品。

1990年，中国地质科学院成立了我国首家尾矿利用研究机构——尾矿利用技术中心，从事包括铁尾矿在内的矿山废弃物资源化综合利用技术和产品技术开发。1992年还在厦门专门召开了全国矿山废渣综合利用技术交流会，总结了我国尾矿利用方面的技术成就，明确了尾矿利用的方向。2000年，中国地质科学院矿产综合利用研究所对我国32个矿区50多个矿山尾矿的利用情况进行了调查；2008年，还开展了我国重要矿山固体矿产尾矿资源利用调查与综合利用研究工作，调查显示尾矿中含有大量有用组分，但尾矿大宗利用缺少实质性突破，利用率不超过2%。如2004年山东地质调查院对山东境内的六座矿山尾矿库进行了调查和采样测试工作；湖北省地质科学研究所等对鄂东南地区的尾矿堆积现状及其基本特征进行了调查；2006年北京金有地质勘查有限公司完成了《我国黄金矿山尾矿资源调查和综合利用研究》；2010年，江西省地矿资源勘查中心也开始在全省开展尾矿综合利用调研；2011年，国家出台《土地复垦条例》，推进尾矿库地区土地复垦工作；2013年出台《全国资源型城市可持续发展规划》，为我国尾矿发展指出方向。

近年来我国主要尾矿综合利用现状如图1-1所示。

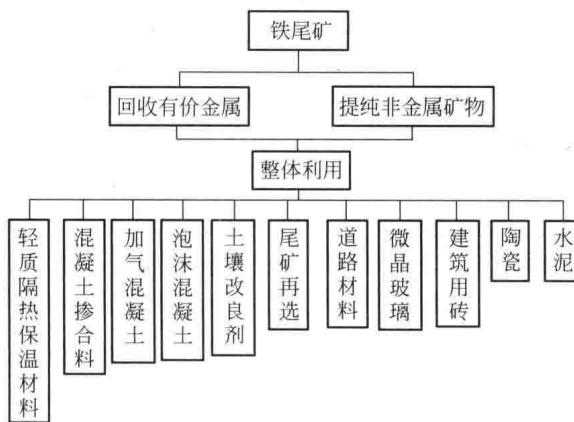


图 1-1 铁尾矿综合利用现状

铁尾矿的应用热点主要集中在以下几个方向：

(1) 再选与回收利用

金属矿石是不可再生的自然资源，而且部分的矿产资源是共生矿，不同时期选矿技术差异，大量有价值资源遗留在尾矿中，所以可以说铁尾矿是放错位置的资源，随着当前科学技术的发展，铁尾矿的二次提炼技术也会越来越成熟。例如：首钢开发了尾矿高效回

收新工艺，每年处理铁尾矿量 787 万 t，尾矿经过再选后，将生产出品位 66.95% 的铁精矿 28.8 万 t，回收金属量 19.28 万 t，直接经济价值达 2.3 亿元，每年少排尾矿量 28.8 万 t，每年减少占用尾矿库库容 9 万 m³ 左右，环境效益明显。歪头山铁矿采用 JHC 型矩环式永磁磁选机和 BX 磁选机，每年可从尾矿中回收品位 65% 铁精矿 5.52 万 t。梅山铁矿、昆钢大红山铁选厂采用高梯度强磁选机回收尾矿中的铁矿物，每年可多产精矿 7~15 万 t，获得了较好的经济效益。

铁尾矿再选与回收有价元素经济效益显著，近年来虽然在提升尾矿回收工艺技术和回收设备上都有很大进展，但该利用途径受尾矿本身特性及回收技术的影响较大，对很多尾矿不适用，而且再选与回收有价元素后仍然会产生新的固体废物污染，必须联合其他尾矿利用技术才能从根本上解决尾矿问题。

(2) 制作轻质隔热保温材料

建筑物节能是当前社会的热点之一，现有的节能保温材料主要包括有机类（如聚苯乙烯泡沫板、硬质泡沫聚氨酯、聚碳酸酯及酚醛等）、无机类（如珍珠岩水泥板、泡沫水泥板、复合硅酸盐等）和复合材料类（如金属夹芯板、芯材为聚苯等）（常见的建筑保温材料的性能特点见表 1-2）。保温材料在考虑保温性能的同时，也要注意其安全性和耐久性，以及可靠的防火性能。建筑领域常用的建筑外保温有机材料存在极大的火灾等安全隐患；复合保温材料在内部密闭空间内都可以发生燃烧，如：南京、济南、北京的体育馆、文化馆的金属屋面保温材料都在铝板下面，大面积封闭空间极易燃烧。新型轻质隔热保温建筑材料的开发研究是当前社会的迫切要求，以铁尾矿制备轻质隔热保温建筑材料，为铁尾矿的二次资源再利用开辟了一条资源节约、保护环境的途径。

常见的建筑保温材料的性能特点

表 1-2

材料名称	导热系数 [W/(m·k)]	优点	缺点	市场应用
膨胀聚苯板 (EPS 板)	0.038~0.041	表观密度小,吸水率低,隔声性能好,而且尺寸精度高,结构均匀	强度稍差	
挤塑聚苯板 (XPS 板)	0.028~0.03	极低的吸水性、表面光滑、热导系数低、抗压性好、抗老化性好	面层较光滑,和砂浆结合性能差,价格贵,施工时表面需要处理	墙体保温及低温储藏设施
岩棉板	0.041~0.045	导热系数低、透气性好、防火、阻燃	质量优劣相差很大,保温性能好的密度低,其抗拉强度也低,耐久性比较差	应用于建筑、电力、交通、冶金等众多方面
胶粉聚苯颗粒保温浆料	0.057~0.06	阻燃性好,废品易于回收	保温效果不理想,对施工要求高	
聚氨酯发泡材料	0.025~0.028	热工防水性能好,自粘力强,保温层厚度薄	喷涂施工时容易产生有毒气体,现场施工对外界条件要求高,受天气影响大,造价高	现场喷涂,冰箱冷库

续表

材料名称	导热系数 [W/(m·k)]	优点	缺点	市场应用
珍珠岩等浆料	0.07~0.09	防火性好,耐高温	保温效果差,吸水性高	
尾矿纤维保温材料	0.040~0.045	A级不燃,耐高温,保温、隔声性好,耐久性好,环保,可重复利用,综合性能突出		建筑外墙、内墙分隔,隔声等
泡沫混凝土	0.16~0.75	质轻,300~1200kg/m ³ ,吸音,保温隔热好,抗震	强度偏低、干缩大、吸水率高	墙体保温,轻质板材
加气混凝土	0.09~0.22	质轻,400~800kg/m ³ ,可加工性强,防火性能好	吸水率高,砌块表面易起粉尘,强度较低	建筑节能,墙体保温

国内的一些学者开展了相关的研究,如:王应灿等以铁尾矿、废旧聚苯乙烯泡沫为主要原料,普通硅酸盐水泥为胶凝剂,制备轻质隔热保温材料,具有良好的保温性能;尹洪峰等以邯郸铁矿尾矿为原料,采用淀粉糊化固化法,制备出体积密度不超过0.85g/cm³、耐压强度大于0.5MPa、导热系数不超过0.18W/(m·K)的轻质隔热墙体材料;张丛香等开发了一种利用铁尾矿制作轻质保温墙板材的工艺技术,探讨了水灰比、铁尾矿掺量、外加剂、粉煤灰等对铁尾矿泡沫混凝土的影响,制作的轻质保温墙板材导热系数0.14,吸水率14%。

根据铁尾矿的特性,以铁尾矿渣(粉)为主要原料,制备轻质保温墙板材,具有良好的隔热保温性能,在施工过程中易与主体结构粘结,耐久性强,可以弥补现有防火性能不佳的缺陷,在外保温建筑材料市场上占有一席之地。利用铁尾矿制备轻质保温墙材产品,成本较低,尾矿利用率高、用量大,大幅度降低了铁尾矿对环境的污染,同时减少占用的土地面积,经济、社会效益显著。通过开展深入的相关研究,有利于为铁尾矿的再利用开辟新途径。

(3) 制备建筑用砖

我国对铁尾矿的应用研究比较多的一个方向是利用铁尾矿制备建筑用砖,如蒸压砖、免烧砖等。利用尾矿及粉煤灰等制备墙体用砖,可以具备良好的力学性能。

虽然烧结砖对原材料要求不高,但用量要求却很大,生产烧结砖,要消耗大量的黏土资源,在取土的同时还毁坏了很多良田。而铁尾矿产量很大、利用率很低,以铁尾矿代替部分黏土,掺入适量增塑剂,完全可以烧制出普通黏土砖,而且可通过控制铁尾矿掺量,制成不同强度等级的铁尾矿砖,有很好的利用前景。用铁尾矿生产烧结砖,是对传统制砖工业的继承和发展,也为铁尾矿综合利用提供了一条途径。

国内的研究者几十年来开展了研究工作:鞍钢矿山公司自1979年就已经开始利用矿业废渣为主要原料进行铁尾矿蒸养砖的试验研究,以铁尾矿为主要原料,加入适量的活性材料,试验制得了蒸养砖,产品达到了国家规定的蒸养灰砂砖标准;马鞍山矿山研究院采用齐大山、歪头山铁矿的高硅铁尾矿为主要原料,配入少量骨料、钙质胶凝材料及外加

剂、适量的水，均匀搅拌后模压成型，经标准养护（自然养护）28d，成功地制成免烧砖；田玉梅等利用南京梅山铁矿尾矿进行了制砖烧成特性的研究，以 850℃、900℃ 和 1000℃ 进行烧结所制得的砖强度、吸水率都满足标准；尹洪峰等在邯郸铁尾矿基本特性进行综合分析的基础上，进行了制砖试验研究，采用压制成型法，可以制备 MU10 以上标号的建筑用砖，尾矿砖体积密度与一般黏土砖相近，颜色一致性好，烧结制品为淡黄色，试样泛霜试验合格，抗冷冻性好；采用挤出成型法，利用全尾矿可以制备出 MU7.5 和 MU10 的建筑用砖；彭建平等利用山东金岭铁尾矿进行了灰砂砖的试验研究，以尾矿为主，配以适量水泥，加入少量粘结材料进行碾压以提高其表面活性，该砖达到了免蒸免烧，同时工艺简单，成本较低，并通过技术鉴定。

(4) 制备微晶玻璃

田英良等根据北京密云某铁尾矿的成分特点，添加适量的 CaO、MgO，并加入少量硫磺使部分铁转化成硫化亚铁改善晶化，制取 CaO—MgO—Al₂O₃—SiO₂ 系微晶玻璃，铁尾矿利用率超过 60%，抗压强度达到 50.2MPa，超过大理石和花岗岩。陈吉春等以武钢程潮铁矿的低硅铁尾矿为原料，设计一种四元体系的微晶玻璃原料，经选择合理的工艺制度和晶核剂，制取以透辉石为主晶相的微晶玻璃，使尾矿利用率达 60%。李智等利用硫铁矿尾矿为主要原料，添加适量的其他原料，采用浇注法制备出晶相为透辉石相的浅色矿渣微晶玻璃。

(5) 在水泥混凝土中的应用

铁尾矿与水泥生料的化学组成相似，理论上可以将尾矿作为制备水泥的一种原料进行利用，这将会对水泥和采矿行业都起到积极的作用。国内也开展了相关的研究：刘文永等通过配料和烧制试验得到：尾矿掺量 6%、10% 和 15% 的胶凝材料分别达到 52.5 级、42.5R 级和 32.5 级硅酸盐水泥标准，利用尾矿烧制的胶凝材料与普通硅酸盐水泥熟料矿物组成相似；2004 年底，辽宁工源水泥厂在 2500t/d 新型干法熟料生产线上使用铁尾矿、粉煤灰、石灰石配料进行试生产调试，结果表明，采用适当的措施，可以在新型干法水泥生产线上用铁尾矿代替传统的铁质和硅质原料生产熟料，能够将水泥标号稳定到普通 52.5 级；天津港保税区航保商品混凝土供应有限公司，已经成功利用铁尾矿砂石作为生产预拌混凝土的骨料，其替代量至少是混凝土中天然砂的 50%，并在水运、房建及市政工程等建设项目中使用；何兆芳等用铁尾矿与天然砂组成混合砂，并以高效减水剂为外加剂，双掺矿粉和粉煤灰，制备了 C60 高强混凝土，试验结果表明，采用 60% 尾矿+40% 细砂时，和易性最佳，有助于提高抗冻性、抗渗性，收缩性能相当；景帅帅采用颗粒粒径小于 0.15mm 的细粉状铁尾矿粉作为骨料，用于制备泡沫混凝土，研究了铁尾矿粉泡沫混凝土新拌浆体的体积稳定性等，并运用压汞法对泡沫结构进行了试验分析；朱志刚进行了用铁尾矿砂代替石英砂制备活性粉末混凝土的研究，利用梯级粉磨工艺制备的高硅铁尾矿—矿渣基胶凝材料代替常规胶凝材料制备了全尾矿活性粉末混凝土。

(6) 用作土壤改良剂和微量元素肥料

铁尾矿中往往含有维持植物生长和发育必需的微量元素，如 Fe、Zn、Mn、Cu、Mo、V、B、P 等，通过磁化技术可制成磁化尾矿土壤改良剂，如果再掺入一定比例的 N、K、P 等元素，可磁化成磁尾复合肥，有利植物的生长。我国马鞍山矿山研究院曾在“七五”

和“八五”期间，率先进行了利用磁化铁尾矿作为土壤改良剂的研究工作，研究磁化铁尾矿作为肥料，施入土壤中使农作物增产效果十分显著，并在涂太仓生态村建成一座年产10000t的磁化复合肥厂。试验表明，土壤中施入磁化铁尾矿后，农作物增产效果十分显著，早稻平均增产12.63%，中稻平均增产11.06%，大豆增产15.5%。但铁尾矿排放量大，而制作的尾矿复合肥的肥力有限，且不能像有机肥和化肥那样容易自然分解、消失，只能在当地少量使用，限制了尾矿作为肥料方面的大量应用和消耗，因而近年来研究和应用较少。

(7) 制备陶瓷材料

郭大龙等选用定量的钢渣，然后添加铁尾矿以及其他的辅料制备陶瓷材料，样品的烧结温度低于传统陶瓷烧成温度100℃左右，而强度接近国家标准的2倍，不仅能够实现陶瓷的节能制备，还能获得高性能的陶瓷产品。孙志勇以北京密云地区首云矿业集团公司2015年铁矿石开采产生的泥状细颗粒铁尾矿为主要原料，采用搅拌发泡—凝胶注模成形、常压烧结工艺制备铁尾矿多孔陶瓷。结合XRD分析、SEM微观分析以及多孔陶瓷物理性能与力学性能测试，工艺简单，成本低廉，可规模化生产，所制备多孔陶瓷满足工业废气除尘的要求。

(8) 用作道路材料

截至2013年年末，我国公路总里程已达435.6万km，比2012年增加11.8万km。但总体来说，我国道路修筑技术和基层材料制备技术还不先进，而且天然石料的质量普遍较差，再加上我国车流量大、超载现象严重，因此每年被压坏的公路不计其数，造成人力物力财力的严重浪费；另外，大量公路的修筑导致我国很多地区过量开山碎石、盗采河沙的现象严重，造成环境的极大破坏。究其根源，公路修筑尤其是路面基层修筑对原材料的巨大需求，若将铁尾矿作为基层修筑的原材料，则既能解决铁尾矿大量堆存所造成的各方面问题，又能解决公路修筑对原材料的大量需求问题。近年来部分学者对铁尾矿在基层材料中的应用进行了研究并取得了一些进展，虽然目前还未能实现广泛的工程应用，但其发展前景非常可观。

马鞍山矿山研究院利用齐大山铁尾矿加入一定的配料碎石、砂子、粉煤灰及黏土及石灰，经一定的处理后作为路面基料，并在沈阳至盘山的路段进行了工业试验，到了二级公路对路基的强度要求。赵黔义利用石灰和粉煤灰对取自辽宁歪头山的铁尾矿进行固化，掺加15%的二灰可使试块强度大于0.5MPa，满足二级及二级以下公路底基层强度标准；掺加15%的二灰和1%的水泥可使试块强度大于0.6MPa，满足一级公路和高速公路底基层强度标准；乐旭东等利用水泥和一种土壤固化剂对河南省舞钢市某铁尾矿进行固化，当水泥：固化剂：铁尾矿=6：6：88时，试块7d无侧限抗压强度达到2.82MPa，满足高等级公路底基层强度设计标准。杨青等选用辽宁朝阳某铁尾矿，利用水泥和石灰对其进行稳定固化。王琰研究了无机结合料稳定铁尾矿的疲劳及冻融循环特性，研究表明23.6%的石灰稳定铁尾矿、9.9%的水泥稳定铁尾矿、10.5%的石灰和1.8%的水泥共同稳定铁尾矿的各方面性能均能满足低等级公路基层设计要求。张铁志等研究了水泥稳定加筋铁尾矿在基层中的应用，通过向铁尾矿稳定材料中加入聚丙烯纤维制成水泥稳定加筋铁尾矿，可达到一级公路和高速公路底基层、二级及二级以下公路基层和底基层的设计要求。