

全球规模最大铁矿磁化焙烧工程竣工验收—— 20 年冷板凳将百亿吨“呆矿”变“富矿”

■本报记者 甘晓

“如果郭慕孙先生还在，看到这项技术终于能用上了，他一定很欣慰。”中国科学院过程工程研究所(以下简称过程工程所)研究员朱庆山的这句感慨，跨越了漫长的岁月，有了圆满的回响。

9 月 1 日，全球规模最大铁矿磁化焙烧工程——年处理 556 万吨难选铁矿流态化磁化焙烧工程项目在辽宁鞍山竣工验收，实现连续稳定运行和全面达产达效，各项生产指标均优于设计预期。该项目采用过程工程所自主研发的难选铁矿颗粒停留时间精细调控磁化焙烧核心技术，由过程工程所与鞍钢矿业资源利用(鞍山)有限公司合作完成。

科研团队表示，这一成果标志着我国在难选铁矿高效利用领域实现了里程碑式产业技术突破，有望从根本上提升我国铁资源自主保障能力，缓解我国大宗战略性铁矿资源高度依赖进口的现状。

破解铁矿资源难题

我国是全球第一工业大国，铁矿石消耗量占全球半数以上，但对外依存度长期超过 80%。海关总署统计数据显示，近十年我国累计进口铁矿 113 亿吨。由于进口来源集中，定价权和供应链一直受制于人。我国铁矿储量虽位居世界第四，却大多品位偏低，近半数属常规技术难以利用的难选铁矿，储量丰富却只能长期闲置。

面对国家发展的重大需求，朱庆山告诉记者，把我国这类数百亿吨级的“呆矿”变为“富矿”并高效利用起来，是摆脱我国铁矿资源困境的核心路径。

理论上，磁化焙烧技术可以改变铁矿石磁性，大幅提高难选铁矿利用率，一直是国内外矿物加工领域的研究热点。但该技术经过数十年研发，仍存在反应效率低、能耗成本高、系统稳定性差等产业化难题，难以大规模推广。

历经多年迭代研发，朱庆山带领团队突破传统磁化焙烧技术方案局限，成功创建了颗粒停留时间精细调控磁化焙烧成套新技术，可使含铁量仅 11% 的铁尾矿经处理后产出品位 65% 的铁精矿产品。

2016 年 8 月，朱庆山首次赴鞍钢推动技术落地。作为鞍钢集团矿业有限公司 2400 万吨/年铁尾矿再选利用的核心工序，“3×185 万吨/年难选铁矿流



3×185 万吨/年难选铁矿流态化磁化焙烧项目。科研团队供图

态化磁化焙烧系统”于 2023 年 11 月签订技术许可合同，2024 年 3 月启动主体建设，2025 年 9 月开始全流程调试，2026 年 1 月正式投产。

令科研团队感到振奋的是，全流程产线首次热态联动调试即贯通顺行，流态化磁化焙烧系统首次满负荷考核验收即达产达效，铁矿物相转化率高达 98%，焙烧综合能耗仅 0.82 吉焦/吨矿，相比同类技术能耗降低 35%，各项生产指标均优于设计值。

近日，该项目通过中国冶金矿山企业协会组织的成果鉴定，专家组一致认为整体处于国际领先水平。

科研团队期待，这一项目能够带动国内近 300 亿吨难选铁矿与近 100 亿吨含铁尾矿的高效、绿色开发利用，破解长久以来我国铁矿石供应受制于人的难题。

20 年，坐热“冷板凳”

事实上，这项技术的产业化之路走了 20 多年。2004 年，在中国科学院院士郭慕孙的提议下，朱庆山作出了一个在当时看来颇为大胆的决定：从原本热门的固体氧化物燃料电池领域，转而投身“冷门”的难选铁矿利用领域。

面对磁化焙烧技术长期存在的诸多“老大难”问题，科研团队首先在基础理论上进行迭代攻关，揭示了细颗粒黏结团聚的内在机理，提出了表面黏附与外场黏黏强化的新思路，使流化床可处理的颗粒粒径从 2 毫米降至 0.1 毫米以下，焙烧温度降至 550 摄氏度，铁矿磁化率提高至 98% 以上。在此基础上，他们发明了细颗粒高效预热、气动加排

料、低热值焙烧尾气稳定燃烧等关键技术，形成了一套完整的细颗粒流态化磁化焙烧技术。

然而，技术要落地，到哪里做工程？朱庆山在早期的行业网站上发布合作意向，像大海捞针一样寻找愿意吃螃蟹的企业。偶然间，云南曲靖钢铁集团越钢钢铁有限公司回应了他。

不过，工程之路远比想象中坎坷。2008 年，10 万吨/年技术示范工程建成，却恰逢金融危机，合作方资金链断裂，项目一度停滞。为推动项目重启，2010 年至 2013 年间，朱庆山平均每月赴云南一次，协调各方并帮助企业争取各级项目支持。他和团队成员谢朝晖常驻现场调试攻关一年多，每天要爬几十米高的框架。“每顿吃两大碗米饭，就是因为一天爬几十回，硬是瘦了 10 斤。”他说。

由于缺乏工业现场的实战经验，他们在工程化过程中遭遇了诸多难以预料的挑战。装置经常不明原因熄火，物料加进去后凭空“消失”……面对这些“拦路虎”，他们只能在一次次试错中摸索。朱庆山经常向过程工程所工程经验丰富的前辈打电话请教，一打就是一个多小时，“高昂的漫游费让我不得不专门换了一个手机号”。最终，他们在 2012 年 12 月实现了连续稳定运行。

科研团队并未就此止步。针对运行中暴露出的颗粒返混、高温显热未能回收等问题，他们展开新一轮攻关，发明了高温粉体显热回收热管流化床，建立了并行放大新方法，正式推出第二代难选铁矿流态化磁化焙烧技术，这正是如今在鞍钢大规模落地应用的核心成果。

“实验室到示范线，这张坐了 20 年的‘冷板凳’终于有了温度。

半个世纪前的未竟之志

从尾矿到富矿，对于朱庆山带领的科研团队而言，是一段几代人跨越了半个多世纪的科研长跑。

20 世纪 50 年代，过程工程所的前身——中国科学院冶金冶金研究所刚刚成立时，就将铁矿的高效利用确立为研究所的三大核心使命之一。为解决我国贫铁矿问题，著名化学工程学家郭慕孙前瞻性地提出流态化磁化焙烧技术。

1959 年开始，郭慕孙带领团队先后对酒泉铁矿、凤凰山铁矿、包头铁矿、鞍山铁矿等的难选铁矿开展试验。20 世纪 60 年代，他亲自牵头在安徽马鞍山建立了日处理 100 吨的中试工厂。

当时，试验条件极其艰苦。为了查明流化床失流和炉内烧结的真相，郭慕孙冒着生命危险，让人用麻绳将自己吊入尚未完全冷却下来的流化床内进行查看。有时候，他在简陋的实验室内一待就是一整天，最终攻克了挡板变形、物料烧结等技术难题。

然而，由于当时工业基础薄弱等历史原因，这项技术的工业化步伐被迫中断，曾经合作过的公司也改变了原设计方案，转而采用其他工艺。这一未竟之志，成了郭慕孙心中长达半个世纪的遗憾。

“我虽年迈，但仍愿不遗余力继续相助。”直到晚年，郭慕孙始终没有放下心中牵挂，写信恳切呼吁推动相关项目重启。

这份遗憾最终化作沉甸甸的接力棒，交到了朱庆山的手上。2012 年 12 月 20 日，郭慕孙逝世。当时，正准备像往常一样飞往云南推进流态化磁化焙烧项目的朱庆山得知了这个噩耗，从机场马上赶回过程工程所。

如今，每当回想起这段往事，朱庆山总是感慨万分：“把中国的贫铁矿利用好，是他一辈子的心愿。”

科研团队相信，曾经的冷门领域如今成为行业瞩目的热门成果，并加速走向更广阔的市场，这是对前辈最好的告慰。

目前，除了鞍山的 3 套系统外，相关技术签订技术许可实施合同 8 套，总处理规模超 1500 万吨/年。同时，该技术也正在走向国际，与老挝已达成褐铁矿流态化焙烧提纯工程项目的合作。

面向未来，朱庆山团队的目光所及不限于铁矿。他们已将流态化焙烧技术推广应用于锰、磷、铝等行业，以及固废利用和新材料制备领域。

印度“科学家回国计划” 被指没有触及根本



本报讯 印度正在实施一系列旨在吸引已定居海外的研究人员回国的举措，希望能扭转人才外流局面。据《自然》近日报道，对此科学家们大多表示支持，因为这些计划通常提供丰厚的奖学金和研究经费。但也有一些人表示，这并没有触及科研人员离开印度的根本原因，例如缺乏研究基础设施和收入保障。

今年 6 月，印度政府启动了研究教席计划 PMRC，将资助 120 名原籍印度、在海外工作的研究人员回到印度的大学、实验室或研究中心工作。该计划提供 5000 万卢比（约合 52 万美元）的研究经费，以及为期 5 年的生活津贴、住房和医疗补贴。该计划将优先遴选人工智能、量子计算、生物技术和先进材料等战略领域的研究人员。

同时，印度首个私人资助的研究奖学金——穆尔蒂科学奖学金也为处于职业早期的研究人员提供最高达 5000 万卢比、为期 5 年的研究资金，旨在将有才华的人才留在国内。

目前，大量印度人赴海外留学，尤其是美国，并且不再回国。在 2024 一

2025 学年，36.3 万名印度学生就读于美国大学，是美国最大的国际学生群体。2025 年公布的一篇预印本文章表明，离开印度的研究人员中有 73% 再未回国。研究经费和设施不足、薪酬低于国际标准、职业机会少等，都是导致研究人员外流的原因。但美国的吸引力可能正在减弱，其政策的不确定性加上印度新实施的举措，正促使更多研究人员回国。

不过，对于上述资助项目，有些研究人员并不看好。印度理工学院坎普尔分校的 Amitabha Bandhyopadhyay 表示，印度许多顶尖机构不具备实验生物学研究所需的基础设施，而像 PMRC 这样的计划提供的资助往往不足以购买这类设备，比如他从事的研究所需要的一种标准光电显微镜可能耗资 3500 万卢比甚至更多。

PMRC 及其他现有奖学金另一个被诟病之处是，它们没有为受资助者在项目结束后如何继续在印度大学任职提供路径。Bandhyopadhyay 表示，放弃国外职位接受奖学金可能风险太大、不值得，因为 5 年后，这些学者依然面临与其他研究人员竞争有限职位的困境。

Bandhyopadhyay 指出，奖学金对年轻研究人员可能有吸引力，但不太可能吸引国外拥有丰富经验和职业生涯处于稳定阶段的高级学者，而后者正是印度所需要的。

（徐锐）

性染色体如何演化？壁虎知道答案

■本报见习记者 金梦婷 记者 胡珉琦

性别是如何决定的？在大自然中，决定动物性别的机制千差万别，有些动物依赖环境因素，另一些则由性染色体，也就是遗传决定。

近日，浙江大学生命演化研究中心教授张国捷团队联合中国科学院昆明动物研究所研究员施鹏团队，以壁虎为研究对象，系统探究了性染色体的起源与演化规律，并提出了“四阶段”演化模型。相关成果发表于《科学》。

哪种性别决定机制更原始

性别决定机制主要分为两种类型——环境依赖型和基因型。前者多见于爬行动物，比如很多海龟的性别是由孵化时的温度决定的；后者包含 XY 型和 ZW 型两种性染色体系统，其中 XY 系统以人类为代表，ZW 系统则以鸟类、部分蛇和蜥蜴为代表。

然而，XY 和 ZW 两类性别决定系统究竟是如何演化而来的，以及为什么不同动物会走上不同的演化道路，长期以来仍是学界关注的核心问题。科学家希望能找到一个模型帮助理解其中的演化机制，而壁虎正是理想的研究材料。

张国捷介绍，壁虎是研究性染色体演化得天独厚的类群。壁虎类群汇集了环境依赖性、XY 型、ZW 型多种性别决定模式，这种多样性甚至还涵

盖了从近期才起源的性染色体到古老的高度分化的性染色体。

为此，研究团队选取了 22 种壁虎开展基因组学分析，其中 20 个物种的性别决定机制明确，包含 3 种环境依赖性、6 种 XY 基因型、11 种 ZW 基因型，另有两个外群物种作为对照。这些物种覆盖了壁虎科已发现的约 70% 的独立性染色体起源事件，基本可以展现这一类群性别决定机制多样化的特征。

研究回溯了壁虎的演化历程，推测壁虎祖先约 1.91 亿年前与其他蜥蜴、蛇类分道扬镳，并在白垩纪大灭绝事件前后发生了快速辐射演化。研究重建出壁虎最近共同祖先的 38 条染色体，发现壁虎祖先并不具备量性染色体，性别决定机制很可能为环境依赖型。

研究还发现，上述 17 个由基因型性别决定的壁虎物种拥有 20 条性染色体，这些染色体分别起源于 17 条不同的祖先染色体，即便是由同一条祖先染色体演化而来的性染色体，在不同壁虎类群里，性别分化区域也各不相同。这意味着这些祖先染色体是各自独立演化成性染色体的，如同在不同谱系中被一次次“重新发明”。

值得关注的是，序列分析证实，这些性染色体的年龄长短不一，最古老的可达 5445 万年，最年轻的仅 590 万年，且有相当数量的性染色体分化时间集中在 1200 万至 700 万年前。

国家气候中心：冰川灾害可能会更频繁

本报讯（记者高雅丽）9 月 2 日，中国气象局在京举行新闻发布会。全球气候变暖是近期西藏吉隆泥石流灾害发生的重要背景因素，国家气候中心副主任高荣在会上就此分析了全球气候变暖对冰川的影响。

高荣表示，全球气候变暖导致世界范围内山地冰川呈现加速消融态势。气候变暖改变了冰川的动力学特征，冰温升高、冰川流速加快、跃动发生频率加大。进入 21 世纪，特别是 2010 年以来，全球高山区冰崩事件呈增多趋势。

我国的山地冰川主要分布于青藏高原及周边地区。青藏高原气候变暖、变暖背景下，冰川整体处于加速消融状态。根据中国冰川编目，过去

60 年，青藏高原冰川面积整体减少约 24%，约 7000 条小冰川完全消失。青藏高原快速增温驱动冰冻圈加速消融，冰湖数量增加、面积快速扩张，冰川处于动力失稳状态。

高荣提到，预计未来青藏高原冰川内部结构稳定性将进一步下降，冰川灾害可能会更加频繁，也可能通过灾害链放大效应，扩大破坏规模与影响范围。

中国气象局新闻发言人、减灾服务司司长王亚伟表示，后续中国气象局将组织专家加强对气候变化、对青藏高原区域的科学研究，加强气象监测，做好气候变暖背景下冰冻圈，包括冻土、积雪、冰川等方面的变化规律研究和影响研究，为后续防范应对工作提供科技支撑。

RNA 靶向递送新策略有望 抑制胶质母细胞瘤术后复发

本报讯（记者朱汉斌）近日，中山大学肿瘤防治中心主任医师牟永告团队联合广东省科学院生物与医学工程研究所副研究员郭会龙等，开发出一种三重响应型可注射水凝胶，可在术后瘤腔实现 siRNA 靶向递送，从而阻断肿瘤细胞与神经元的异常突触连接，抑制胶质母细胞瘤术后复发。该策略为胶质母细胞瘤术后精准干预提供了新的治疗方向。相关成果发表于《自然-生物医学工程》。

近年来的研究发现，胶质瘤细胞能够主动整合进入神经网络，与周围神经元形成类似正常突触的兴奋性连接，这种“恶性突触”可直接促进肿瘤增殖、浸润和治疗抵抗。然而，这一突触信号通路同样参与正常脑功能，全身性抑制可能带来神经系统副作用。因此，如何精准阻断病理性的肿瘤-神经元连接，同时最大限度保护正常神经功能，是肿瘤神经科学向临床转化面临的重要挑战。

团队从“肿瘤-神经元恶性突触”视角切入，系统解析了胶质母细胞瘤肿瘤-脑浸润界面恶性突触的空间分布特征，锁定关键分子靶点；在此基础上，进一步构建了三重响应型可注射水凝胶，实现术后瘤腔 siN-TRK2 靶向递送，选择性下调残余胶质瘤细胞中 TrkB（由 NTRK2 基因编码）的表达，抑制肿瘤-神经元恶性突触形成，从而切断肿瘤细胞与神经元之间的病理连接。动物实验表明，该靶向治疗策略与临床标准放化疗联合后表现出显著协同效应，可有效遏制肿瘤浸润、抑制术后复发、延长生存期，同时弥补肿瘤诱发的认知功能缺陷。

该研究为胶质母细胞瘤术后局部精准治疗提供了新的实验依据和理论支持，提示局部阻断恶性突触有望成为兼顾肿瘤控制与神经功能保护的治疗新方向。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41551-026-01757-w>



9 月 1 日，全球首台 25 万吨米环轨起重机在浙江湖州产业园正式下线。

该设备历经 7 年技术攻关，破解了华龙一号 2.0“一机两岛”施工吊装难题，采用 137 米 +66 米超长臂架组合，整机全电驱动，并搭载智能防撞墙、360° 环视、远程故障诊断、乱绳识别、人脸识别、作业行为识别等数字化系统。此次下线标志着我国超大吨位核电吊装装备打破国外技术垄断，实现关键性国产化突破。

图为 25 万吨米环轨起重机。图片来源：视觉中国

（徐锐）

性染色体如何演化？壁虎知道答案

■本报见习记者 金梦婷 记者 胡珉琦

性别是如何决定的？在大自然中，决定动物性别的机制千差万别，有些动物依赖环境因素，另一些则由性染色体，也就是遗传决定。

近日，浙江大学生命演化研究中心教授张国捷团队联合中国科学院昆明动物研究所研究员施鹏团队，以壁虎为研究对象，系统探究了性染色体的起源与演化规律，并提出了“四阶段”演化模型。相关成果发表于《科学》。

哪种性别决定机制更原始

性别决定机制主要分为两种类型——环境依赖型和基因型。前者多见于爬行动物，比如很多海龟的性别是由孵化时的温度决定的；后者包含 XY 型和 ZW 型两种性染色体系统，其中 XY 系统以人类为代表，ZW 系统则以鸟类、部分蛇和蜥蜴为代表。

然而，XY 和 ZW 两类性别决定系统究竟是如何演化而来的，以及为什么不同动物会走上不同的演化道路，长期以来仍是学界关注的核心问题。科学家希望能找到一个模型帮助理解其中的演化机制，而壁虎正是理想的研究材料。

张国捷介绍，壁虎是研究性染色体演化得天独厚的类群。壁虎类群汇集了环境依赖性、XY 型、ZW 型多种性别决定模式，这种多样性甚至还涵



壁虎的岔路漫画。受访者供图

最初，剧烈的气候变化使依赖环境的性别决定面临风险，而基因型性别决定因更具稳定性而获得优势，推动系统从“看天”转向“看基因”。随着某些常染色体被“选中”后，其原有的基因组成已暗示未来方向——偏向睾丸表达的基因越来越多的染色体预示 ZW 路径，反之则走向 XY 路径。渐渐地，性染色体逐步分化，形成了 X 与 Y 或 Z 与 W 的差异。最终，Y 或 W 持续退化，形成牢固的进化约束。此时，再次更换性别决定方式的代价已经变得很高，因此大多数物种会长期保留这一系统，并持续演化至今。

张国捷强调，脊椎动物中丰富多样的性别决定方式，或许并非演化过程中完全偶然的产物，而是环境压力与基因组特性共同作用的结果。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1126/science.aec3449>