引用格式：应天平，王栋樑，杨芃焘，等．REBCO高温超导带材战略研究．中国科学院院刊，2026, 41(2): 318-332, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20260202004.
Ying T P, Wang D L, Yang P T, et al. Strategic research on REBCO high-temperature superconducting tapes. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(2): 318-332, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20260202004. (in Chinese)

REBCO高温超导带材战略研究

应天平[1] 王栋樑[2] 杨芃焘[1] 赵 林[1] 徐中堂[2] 刘子儀[1] 姚 超[2] 马衍伟[2]
周兴江[1] 程金光[1*] 方 忠[1]

1 中国科学院物理研究所 北京 100190
2 中国科学院电工研究所 北京 100190

摘要 以REBCO（$REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$，RE代表稀土元素）为代表的高温超导带材，因其液氮温区优异性能，在能源、医疗、大科学装置等领域具有重要战略价值，但目前在长带一致性、制备成本和工程可靠性等方面仍面临严峻挑战。未来发展需转向“材料-工艺-应用”协同创新，通过增强磁通钉扎、优化多层结构界面与力学性能，并结合规模化、智能化制备技术，推动高性能带材的低成本稳定生产。文章围绕REBCO带材的核心应用需求、研发现状与趋势、关键科学技术问题及国产化发展路径展开分析，为我国在该领域的自主创新与产业引领提供参考。

关键词 REBCO高温超导带材，关键科学技术问题，战略研究报告，产业化路径，协同创新

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20260202004
CSTR 32128.14.CASbulletin.20260202004

1 应用场景和需求

当前，REBCO（$REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$，RE代表稀土元素）为代表的高温超导带材①已逐步示范应用于若干领域[1-3]。在电力系统中，主要体现为输电电缆和以故障限流器为代表的超导电力装备。作为超导电缆，其核心优势在于能够利用液氮温区条件下零场或弱场中的大电流载流能力，实现极低损耗的长距离电能传输，技术焦点集中在持续提升带材的临界电流密度②、确保千米级长度下的载流均匀性、有效降低交流损

*通信作者
资助项目：中国科学院超导专项（SCZX-0101、SCZX-0103）
修改稿收到日期：2026年2月2日

① 高温超导带材是一种以柔性金属合金为基带，通过外延生长多层氧化物缓冲层和REBCO超导薄膜并通过稳定层封装后形成的多层复合结构材料。

② 临界电流密度是指超导材料保持超导状态所能承受的最大电流密度。超过这个电流密度，超导特性就会被破坏。

耗，并同步推进成本控制。作为电阻型故障限流器，其功能依赖于高温超导带材在短路电流冲击下从超导态到正常态的快速转变，从而利用电阻的急剧升高实现对故障电流的迅速限制，技术重点在于材料的响应速度、恢复特性及循环稳定性。在磁体系统中，充分利用高温超导带材强场下高载流密度的特性，服务于高场磁共振成像、磁约束核聚变、电机/电动机等装置，对载流稳定性与机械强度要求严苛。未来，随着应用场景进一步细分，性能需求将更趋差异化。因此，发展“需求导向、性能细分”的定制化超导带材牌号，并建立相应评价体系，能加速推动其规模化应用。

1.1 电力系统中的应用

REBCO带材在电力系统中展现出显著的性能优势，尤其是在液氮温区运行条件下，其制冷成本低、系统复杂度适中，为大容量电力传输提供了有效的解决方案[4]。当前，国内已在城市电网增容改造领域开展了示范应用。例如，上海1.2 km 35 kV高温超导电缆项目已经稳定并网运行逾4年，深圳10 kV超导电缆项目实现核心区域供电，充分验证了高温超导带材对提升输电容量的可行性及保障供电的可靠性[5]。超导电缆凭借其极高的载流密度，可在狭窄输电走廊中有效缓解城市中心区供电瓶颈问题，应用前景广阔。未来需持续优化带材在弱场环境下的高载流密度、低交流损耗、长时间服役及长程均匀性等核心指标，推动相关技术向更大规模和更高传输容量方向发展。

在电力系统保护领域，基于REBCO带材的超导限流器展现出卓越的故障电流抑制能力。该类设备能在电网发生短路故障时，通过超导材料的失超特性瞬时产生高阻抗，有效限制故障电流峰值，保障电网安全稳定运行。我国在该技术领域已实现重要突破，建成投运了多个示范项目。例如，广东汕头电网投用的160 kV超导直流限流器等[6]，充分验证了其工程可行性。高温超导带材在电力系统的应用潜力并不仅限于故障保护。在电能传输、转换与存储等更广泛的电力装备领域，如超导变压器、超导储能系统、电网用超导调相机等，REBCO带材同样展现出高效率、高功率密度等突出优势。这些应用场景对REBCO带材的电流承载能力、n值（反映接近失超阈值时电压对于电流响应灵敏度）与失超恢复能力提出了严格的技术要求。

1.2 磁体系统中的应用

在磁体系统应用领域，REBCO带材已展现出变革性潜力，尤其在磁约束核聚变与极高场科学装置两大方向表现突出。以美国联邦聚变系统公司（CFS）为代表的紧凑型托卡马克路线，确立了在10—20 K温区、10 T以上强场运行的REBCO高温超导磁体的核心地位[7]；同时在液氦温区15 T以上的极高场科学装置中，如千兆赫兹核磁共振谱仪与高场磁体，REBCO带材凭借其高机械强度和强高场载流特性也是目前超导线带材的最优选择；其他如磁共振成像（MRI）、高能量粒子加速器、高纯大尺寸单晶硅生长炉及特种国防装备磁体等也是重要应用方向[8-10]。

所有磁体应用对带材在目标温区-磁场下的临界电流提出极高要求，而磁场下的临界电流值取决于人工钉扎中心和自然缺陷所提供的磁通钉扎力③的大小。根据磁通动力学原理，在不同温度和磁场中，同样的钉扎中心所提供的钉扎力完全不同。针对REBCO超导带材在不同温区与磁场下的服役要求，必须通过设计和引入与之适配的特定类型人工钉扎中心，才能有效提升其在对应工况下的临界电流性能[1,11]。如图1所示，在电力系统工作的高温区，需要柱状钉扎中心，即强各向异性中心（在极小磁场下，各向同性的点钉扎亦可提升临界电流）。而在温度稍低同时磁场为1—

③ 通过人为在超导材料中制造微小缺陷来“固定”磁力线，防止其在外场作用下移动，从而提高材料在磁场中的载流能力。

5 T的区域中，需要柱状钉扎和体钉扎的混合钉扎，即强各向异性和纳米粒子的混合钉扎作用。随着温度进一步降到聚变应用所在的30 K以下且10 T以上的区域，最好是纳米钉扎和密集钉扎中心形成的集体钉扎。在10 K以下且20 T以上的应用场景中，需要各向同性的集体钉扎。需要指出的是，针对不同磁场和使用温区所需的人工钉扎中心及其机理尚不完全清楚。例如，适当的尺寸与分布的高密度柱状钉扎中心同样能在低温中场条件下提供较高的钉扎力。此外，在满足临界电流指标的基础上，价格、供货时间、临界电流均匀性、单根长度、临界电流不可逆应变④及剥离强度⑤也通常是应用方的主要诉求指标。

此外，通过将REBCO带材绕制成电机的转子，可构建出高效率、高功率密度的超导电机[12]。此类电机工作在30—50 K的中低温区间，通常借助斯特林制冷机或冷氦气循环实现冷却，相较于传统低温超导所需的大功率吉福德-麦克马洪（GM）制冷机或液氦浸泡系统，其在体积与能效上的优势极为突出。这一特性使其在对空间和重量敏感的高端装备中具有不可替代性，应用前景覆盖海上风力发电机组、全电/混合动力船舶与航空推进系统、下一代磁悬浮列车、特殊动力及弹射装置等多个前沿方向。上述应用场景的核心挑战与需求在于带材在中低磁场下的高电流密度、优异的机械疲劳特性，以及在动态运行条件下的长期稳定性。高温超导带材在实际强场磁体中会面临绞缆⑥需求，因此通过窄带化、细丝化后组装绞缆也是未来需要努力的方向。高温超导带材的主要应用情况见表1。

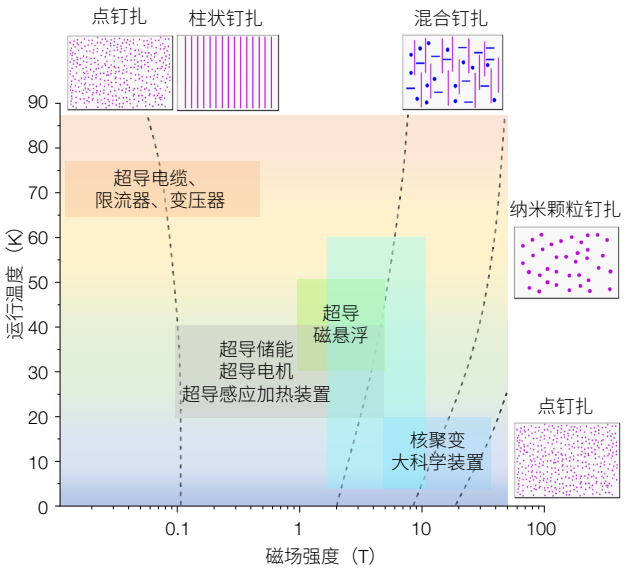


图1　不同应用领域对REBCO带材钉扎条件需求

Figure 1　Requirements for flux pinning conditions in REBCO tapes across different applications

需要指出的是，在任何应用场景中REBCO带材的力学性能也是其可用性的核心判据。主要包括：临界电流不可逆应力（定义为临界电流衰减至95%时所对应的应力）、脱层应力（风险随磁场与电流升高而加剧），以及最小无衰减弯曲半径（直接决定磁体尺寸与结构设计）。此外，在长期服役尤其是交变磁场工况下，必须重点关注带材的疲劳稳定性。高周次（如10万—100万次以上）循环载荷可能导致超导层晶界角⑦扩大、临界电流发生不可逆下降，甚至引发微裂纹与界面脱层，致使性能迅速退化。

实际应用中，单根REBCO带材的长度限制使得接头成为必要。普遍使用的“有阻接头”电阻受带材表面状态影响显著，需通过控制带材结构优化性能[13]。目前超导接头⑧技术尚不成熟，多数方案在电学或力学性能上存在短板。日本高场核磁共振（NMR）系统中使用的接头是相对成功的案例，其电

④ 临界电流不可逆应变，指超导材料发生永久性结构损伤导致性能不可恢复的临界形变值。

⑤ 剥离强度，指超导带材各层之间界面结合力的量化指标，反映材料在受力时抵抗分层破坏的能力。

⑥ 绞缆，指将多根超导细丝或带材以特定角度缠绕成缆的工艺，旨在提升电流容量的同时降低交流损耗。

⑦ 超导层晶界角，指相邻超导晶粒之间的取向夹角，较小的晶界角是获得高临界电流密度的关键结构特征。

⑧ 超导接头，指连接2段超导材料的过渡区域，其电阻特性直接影响整个超导系统的运行效率。

表 1　超导带材主要应用情况

Table 1　Major application areas of superconducting tapes

应用领域	使用场景	产品形态	目前常用带材参数					领域诉求	
			使用温区(K)	使用磁场(T)	临界电流(A/cm)	最小可接受长度(m)	宽度(mm)	核心关切	第二关切*
磁体系统	磁约束核聚变	1 托卡马克	4.2—20	中心场:5—13 线圈峰值场:>20	300—350	200	3、4、6、10均可,由磁体设计决定	电磁热力综合性能和价格	长度、无绝缘/金属绝缘
		2 仿星器	4.2—20	2—7	300—350	200		电磁热力综合性能和价格	无绝缘/金属绝缘
	科学装置	3 粒子加速器	1.9—20	二极磁场2—14	300—500	100—200		电磁热力综合性能和价格	高运行参数下失超损伤的控制
		4 高场磁体	4.2	20—45+	550—650	320		电磁热力综合性能、尺寸均匀性和价格	长度、无绝缘/金属绝缘
	高端制造	5 超导磁控单晶炉	20—40	0.1—0.5	700—800	300—400		电流和价格	无绝缘/金属绝缘
		6 超导感应加热装置	20—40	1—5	700—800	300—400		电流和价格	无绝缘/金属绝缘
	医疗装备	7 磁共振成像	4.2—65	临床:1.5—3 科研:7—14	700—800	650		电流、单根长度和价格	无绝缘/金属绝缘
		8 医用加速器	4.2	0.5—1.5 (引导磁体)	700—800	650 (饼上接头)		电流、单根长度和价格	无绝缘/金属绝缘
	高速交通	9 超导磁悬浮列车	30—50	车载磁体:3—5 轨面磁场:1—2	>700 A/cm@SF,77K	300 (铠装带子难以做长)		电流、稳定性和单根长度	绝缘磁体、失超保护很重要
		10 超导电机	20—40	1—5	700—800	300 (饼上接头)		电流、稳定性和单根长度	绝缘磁体、失超保护很重要
电力系统	超导电力	11 超导电缆	65—77 (普遍在过冷氮温区)	<0.1(自场)	800—900	单根1.2 km缆线接头少于3—4个		价格、电流和单根长度	无绝缘
		12 超导限流器	77	<0.5	—	—		—	—
		13 超导变压器	65—77	1—5	500—600	300		电流	匝间绝缘
		14 超导储能系统	20—65	1—5	700—800	300—500		电流、稳定性	绝缘磁体

*无绝缘指匝间直接接触，依赖带材自身导电导热；金属绝缘指表面镀覆薄金属层兼具绝缘与导热电功能；匝间绝缘指完全绝缘，即匝间设置独立绝缘层

*"No insulation" refers to direct contact between turns, relying on the tape's own conductivity and thermal conductivity; "Metal insulation" refers to the surface coating of a thin metal layer that serves both insulation and thermal conduction functions. "Inter-turn insulation" refers to complete insulation, where an independent insulating layer is inserted between turns

性能接近带材本体，但因力学强度不足，只能置于磁场外部[14]。未来如能实现低阻、高强的可靠超导接头，将极大突破带材长度限制。

此外，在交变磁场或电流条件下，REBCO带材的

交流损耗⑨显著，已成为制约其在交流电力设备中应用的关键因素[15]。当前主要应对方式是带材细丝化⑩，但该技术仍处于探索阶段，尚未形成成熟稳定的工艺体系。如何实现高效、低损、结构稳定的细丝化REBCO带材，是亟待攻克的技术难题。

2 国内外现状及发展趋势

REBCO高温超导带材研发的核心挑战在于，如何在长的柔性金属基底上动态外延生长出具有严格双轴织构⑪的高性能超导薄膜。为此，自20世纪90年代以来，学界与产业界相继发展了多种织构制备方法。早期主要采用“轧制辅助双轴织构基板”（RABiTS）技术，通过在镍钨合金等金属基带上进行轧制与再结晶处理，直接诱导形成双轴织构[16]。随后出现的“倾斜基板沉积”（ISD）方法[17]，虽然在一定程度上也能获得织构取向，但由于其织构质量较差、均匀性不足，且工艺窗口较窄，难以满足高性能长带制备的需求，已逐渐淡出主流技术路线。目前的主流方法是“离子束辅助沉积”（IBAD）方法，在非织构的金属基带上沉积具有织构的氧化镁缓冲层[18]。然后，在此基础上进一步采用脉冲激光沉积（PLD）、金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）、金属有机沉积（MOD）和反应共蒸发（RCE）等技术路线沉积具有双轴织构的REBCO超导层。各技术路线的特点和优缺点如表2所示。

自1999年第1根百米长REBCO带材被制备出来之后，超导带材的研发开始从研究所、大学逐步向企业转移。国际上已有多家公司先后成功研制出长度达千米，且能够传输数百安培以上电流（77 K，自场，每厘米宽度）的REBCO带材[19]。目前，国外采用PLD路线生产REBCO超导带材的企业主要有日本Faraday Factory Japan（FFJ）、日本Fujikura、俄罗斯S-Innovations等；基于MOCVD路线的企业主要有美国SuperPower等；基于MOD路线的企业主要有美国AMSC等；基于RCE路线的企业主要为韩国SuNAM。我国自从“十三五”以来，REBCO带材批量化制备水

表2　各技术路线的特点和优缺点

Table 2　Characteristics, advantages, and disadvantages of different technical approaches

超导层制备工艺		脉冲激光沉积（PLD）	金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）	金属有机溶液沉积（MOD）	反应共蒸发（RCE）
特点		物理法原位生长	化学法原位生长	化学法异位生长	物理法异位生长
优点		靶材简单 致密度高 工艺较简单	沉积面积大 薄膜致密度高 生产速率快	设备成本低 计量容易控制 原料100%利用	成材效率高 沉积面积大 材料密度高
缺点		设备成本高 薄膜生长慢	成相温度高 原料利用率低	技术难度大 缺陷相对多	成相控制难 磁通钉扎弱
生产企业	国内	上海超导、甚磁科技	东部超导	上创超导	/
	国外	日本Faraday Factory Japan、Fujikura，俄罗斯S-Innovations，美国HTS REBCO，德国THEVA	美国SuperPower	日本Sumitomo，美国American Superconductor	韩国SuNAM，德国THEVA

⑨ 超导材料在交变电磁场中因磁滞效应和涡流效应产生的能量耗散，是制约交流应用的主要瓶颈。

⑩ 带材细丝化，指通过激光刻蚀等工艺将宽带分割为多个电隔离的细丝，以降低涡流损耗的技术路线。

⑪ 双轴结构，指晶体材料在2个相互垂直的方向上均呈现择优取向的结构特征，是获得高性能超导薄膜的基础。

平快速提高，已逐渐进入国际先进水平行列。我国的上海超导、东部超导（原苏州新材料研究所）和上海上创超导公司分别采用PLD、MOCVD和MOD路线实现了商业化带材生产。近年来，基于PLD路线的甚磁科技公司等新兴企业也使我国REBCO带材的产业化规模不断扩大。目前国内外在REBCO带材研发方面的最新进展如下。

2.1 国外进展

2.1.1 PLD路线

日本以PLD技术为主的代表性实验室包括名古屋大学、日本产业技术综合研究所、成蹊大学和爱知工业大学等。在生长动力学方面，爱知工业大学通过蒙特卡罗方法模拟了柱状缺陷的自组装过程，研究了其形貌、密度与生长速度之间的关系[20]。名古屋大学则研究了BMO（$BaMO_3$，钙钛矿氧化物，M可为Zr、Sn、Hf）纳米柱形貌与浓度对超导性能的影响，并利用多层膜结构引入不连续的BMO纳米柱缺陷，以调控其浓度和形状[21]。此外，名古屋大学采用了机器学习方法追踪PLD生长过程中的羽辉⑫形状变化，采集羽辉形状信息并调整实验条件（如透镜位置），以确保生长过程中羽辉形状保持一致。

日本FFJ公司采用PLD技术路线，2025年产能达到1 000 km（注：如无特别说明，均已换算成12 mm宽带材）。该公司目前的研究重点是优化带材制造链，包括缓冲层质量、超导材料在磁场中的性能，以及铜层和焊接层的均匀性。此外，该公司正在推进基于600 W大功率准分子激光器⑬的REBCO带材制备技术，若成功，生长速度将实现大幅提升。该公司目前正在与日本九州大学研究团队合作，开发基于机器学习的数字模型，利用扫描霍尔技术和人工智能技术对带材性能进行预测。该预测方法基于大量实验数据，通过初始工艺参数（如温度、氧压、激光能量等）对最终带材性能进行推断，同时可以根据工艺条件高精度预测带材的临界电流I_c。

日本Fujikura公司也采用PLD技术路线，重点研究带材的均匀性和工艺重复性，以及带材（尤其是超导层）在低温下的疲劳力学行为。其优势在于“Hot-wall”PLD技术，该技术能够实现更加均匀的温度控制[22]。Fujikura成功制备了宽度为4 mm、长度达1.4 km的单根带材，且电流分布均匀。

美国新成立了基于PLD的HTS REBCO带材公司，推动REBCO带材在聚变中的应用。美国堪萨斯大学团队主要研究PLD技术路线，重点放在动力学及多层膜结构的性能提升[23]。

德国THEVA公司基于原位反应合成（ME）技术，当前年产能约为100 km。该技术在大面积基带上镀膜方面具有优势。德国KIT与欧洲CERN成立了KC4项目联合实验室，旨在弥合小规模材料研究与大规模批量生产之间的差距，专注于PLD技术路线，主要进展包括实现了4 cm宽的PLD带材，但目前仍处于研发阶段。

2.1.2 MOCVD路线

美国SuperPower公司采用MOCVD技术路线，目前年产能为300 km。其研发重点包括新工艺配方、细丝化、分切技术及绝缘工艺等方面[24]。此外，法国Renaissance Fusion也专注于MOCVD技术，目标是实现1 m宽的带材制备。美国休斯顿大学团队采用双面镀膜方法提高性能[25]，但受限于其加热方式（自加热），其技术路线难以转移至工业化生产。

2.1.3 MOD路线

美国AMSC公司是最早实现REBCO带材商业化的公司，其使用的是MOD技术路线，目前其产品全

⑫ 羽辉，指脉冲激光沉积过程中由靶材蒸发形成的瞬态等离子体团，其演化特性直接影响薄膜生长质量。

⑬ 以稀有气体卤化物为工作介质的高功率紫外脉冲激光器。

部供给内部使用，具体研发方向无公开报道。日本Sumitomo公司在MOD技术路线的开发中取得进展，主要研究方向包括纳米颗粒掺杂、厚膜制备及长带材的开发。西班牙巴塞罗那的ICMAB-CSIC研究所主要发展MOD技术路线，研究重点为提高沉积速度、MOD成相动力学、纳米颗粒的引入，以及稀土元素与沉积温度的关系，提出了液相辅助的瞬态成相理论[26]。

2.1.4 RCE路线

RCE路线在输电电缆方面有一定商业潜力。韩国SuNAM公司采用RCE技术路线[27]，当前年产能约为400 km（4 mm宽）。RCE技术的优势在于高温自场下具有较高的临界电流，但在磁场下性能较弱。为了弥补这一不足，SuNAM引入了PLD技术，用于生长种子层，再通过RCE继续生长，以提高整体性能。

2.2 国内进展

上海超导公司长期专注于PLD技术路线，并在多个应用领域形成了系列化产品布局。当前该公司年产能已达数千公里级别，并计划进一步扩大生产规模。其近年来的技术发展重点围绕关键原材料与核心装备的自主化展开，包括推进靶材与激光器的国产化替代，并持续优化激光分切等后段工艺，以提升生产效率和产品一致性。东部超导公司致力于发展MOCVD技术路线，并成功实现了千米级长带的规模化制备。其产品在低温强场环境下展现出良好的性能潜力，为核聚变等极端场景应用提供了重要材料选项。上创超导公司致力于通过低成本MOD工艺实现REBCO带材的规模化制备。其典型产品在自场、77 K条件下实现好的载流性能，展现了MOD路线在平衡性能与成本方面的应用潜力。公司近期通过引入BHO等纳米颗粒作为人工钉扎中心，改善了带材在中高磁场下的载流性能。甚磁科技公司是近年来新成立的基于PLD技术路线的带材企业，已建立了完整的生产线，具备批量供应能力。

3 关键科学技术问题

REBCO作为一种层状陶瓷材料，无法采用传统拉拔工艺成型的粉末装管法⑭制备高性能线材，且其超导性能具有强各向异性，需实现超导薄膜双轴织构取向生长。当前主流的REBCO带材是在柔性金属基带（如哈氏合金）上，通过7—8层镀膜技术依次外延生长而成的复杂多层结构，依次为：隔离层（Al_2O_3、Y_2O_3）→种子层（MgO）→帽子层（$LaMnO_3$、CeO_2）→超导层→稳定层（Ag、Cu）（图2），其中隔离层、种子层、帽子层统称为缓冲层。以下针对各层材料所面临的关键科学技术问题做逐一介绍。

3.1 哈氏合金基带

由于REBCO材料属于韧性差的陶瓷材料，需要

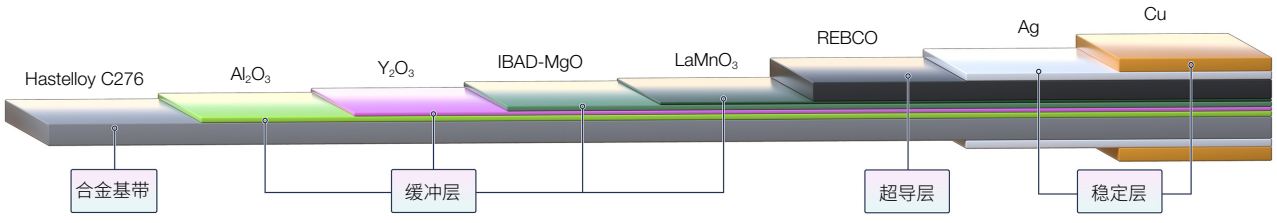


图2 REBCO超导带材的结构

Figure 2 Structure of REBCO superconducting tape

⑭ 粉末装管法，指将超导粉末封装于金属管中经拉拔轧制制备线材的传统工艺，主要用于低温超导材料和第1代BSCCO高温超导体。

将其涂覆在有韧性且机械性能优异的金属基带上成膜，因此具有高强度和纳米级表面平整度的合金基带是REBCO高温超导带材的关键基础材料。哈氏合金因其热膨胀系数与REBCO匹配、低磁导率、高强度和良好的表面平整度成为主流基带材料。

当前面临的关键科学技术问题。① 高纯净合金制备：需降低C、S、P、O等杂质含量，防止超薄长带（30—50 μm厚，千米级长）在加工中开裂。② 精密加工工艺：需攻克超长、超强、超光滑、超薄的精密轧制技术。③ 原材料规模与生产装备的匹配：需要大吨位（3 t以上）高纯合金冶炼能力，以匹配千米级薄带生产线的规模需求。④ 性能升级需求：面向更高磁场、更小弯曲半径的应用，亟需发展比C276哈氏合金强度更高、疲劳耐受性更好并且导电、导热性更好的新一代基带材料。⑤ 发展高效分切技术：目前分切均依赖于日本在国内的子公司，存在一定风险。

3.2 隔离层（Al_2O_3、Y_2O_3）

在REBCO带材的生产过程中，由无定形Al_2O_3和Y_2O_3组成的隔离层主要起到阻挡基带中的元素扩散和提供平整成核面的作用。目前，几乎所有主流REBCO带材生产厂家均采用Al_2O_3+Y_2O_3的缓冲层工艺组合，其主要原因在于该结构高度适合工业化卷对卷沉积，能够在相对较低的沉积温度下形成致密、连续的薄膜。同时，Al_2O_3和Y_2O_3的热膨胀系数与哈氏合金等常用金属基带较为接近，可有效降低热循环过程中产生的界面应力。该层工艺已相对成熟，是产业化体系中的稳定环节，当前暂无亟需突破的技术瓶颈。

3.3 种子层（MgO）

MgO种子层的主流制备路线是IBAD。IBAD是采用离子束辅助技术[15]获得薄膜沉积时的择优取向，进而在金属基带上生长双轴织构取向的氧化物缓冲层。

当前面临的关键科学技术问题。① 基础科学问题：离子束诱导织构的微观机理尚未完全厘清，缺乏统一的定量模型。② 技术挑战：IBAD-MgO厚度仅数纳米，工艺窗口极窄，对沉积速率、离子束参数（通量、能量、入射角）高度敏感。在卷对卷生产中，基带速度、张力波动和离子束不均匀性极易导致织构劣化，长带均匀性控制难度大。③ 装备复杂性：IBAD系统集成度高，设备昂贵且维护复杂，是生产线中投资最大的环节之一。

3.4 帽子层（$LaMnO_3$、CeO_2）

锰酸镧（$LaMnO_3$）和氧化铈（CeO_2）是REBCO带材中2种主要的帽子层材料，其核心功能在于缓解MgO层与REBCO超导层之间的晶格失配，为后续高质量外延生长提供连续、平整、无裂纹、致密且高温化学稳定的模板表面。$LaMnO_3$成本较低但织构质量通常不如CeO_2；CeO_2织构质量更优但成本高、工艺复杂。

当前面临的关键科学技术问题。① 成膜机制研究：揭示不同帽子层在高速沉积环境下对REBCO薄膜生长动力学的具体影响机理。② 高质量$LaMnO_3$工艺开发：优化磁控溅射工艺[16]，实现面内织构度优于7°、长度超过2 000 m的高均匀性$LaMnO_3$薄膜制备。③ 界面工程优化：通过表面处理、掺杂等手段，提升帽子层与REBCO层之间的结合强度及电-机械综合性能。

3.5 超导层（PLD、MOCVD、MOD）

当前REBCO带材在液氮和液氦温区的临界电流密度（J_c）仅为根据Ginzburg-Landau理论计算的拆对电流（J_d）[17]的20%—30%，且存在临界电流随厚度增

⑮ 离子束辅助技术，指利用定向离子束轰击诱导薄膜形成特定晶体取向的表面工程技术，可在非晶基底上形成有序晶格“模板”。

⑯ 磁控溅射工艺，指在磁场约束下通过等离子体轰击靶材实现薄膜沉积的物理气相沉积技术。

⑰ 拆对电流(J_d)，理论上使超导电子对(库伯对)拆散所需的最小电流密度，是超导材料的本征性能极限。

加而非线性增长的“厚度效应”。因此，针对不同应用温区与磁场，设计并引入高效的人工钉扎中心是提升在场性能的关键。表3列出了REBCO带材不同温区钉扎效率的对比。

3.5.1 PLD路线

目前，全球范围内能够实现年产量超过1 000公里、且具备高性能水平的高温超导带材生产企业，均主要采用PLD技术路线。PLD技术的基本原理是利用高能脉冲激光轰击多组分REBCO靶材⑱，使靶材以接近化学计量比的形式瞬时蒸发并形成高温等离子体羽辉，该等离子体在真空或低压氧气环境中定向传输，最终沉积在被加热的带有双轴织构缓冲层的基带上。

当前面临的关键科学技术问题。① 羽辉动力学与控制：在基带高速移动（基带速度数十米/小时至百米/小时）、高频激光（300 Hz）轰击的动态过程中，研究羽辉阵列的形成、扩展规律及其与背景气体、衬底温度的相互作用，实现对羽辉的精确控制。② 多尺度建模与工艺优化：构建“激光参数—羽辉特性—薄膜结构”的关联模型，揭示生长动力学规律，为工艺优化提供理论指导。③ 靶材与工艺协同设计：超导带材在不同应用场景（高温高场、低温高场、高温低场等）需要不同类型的钉扎中心。需研究如何通过协同调整靶材化学组分（掺杂）和PLD沉积工艺参数（温度、氧压、速度、激光参数等），定向构筑所需的钉扎结构，以精准提升目标工况下的载流性能。这需要建立“靶材—工艺—微观结构—宏观性能”的全链路数据库，并形成定量认识。

3.5.2 MOCVD路线

目前，全球范围内致力于推动高温超导带材产业化与低成本规模生产的企业与研究机构，正将MOCVD技术视为重要的发展路线。

MOCVD技术的基本原理是通过将金属有机前驱体在设定温度下气化，在精确控制的温区环境中与载气一同输送到基带表面，随后在高温衬底上经历“分解—反应—沉积—外延”的连续动态生长过程。相比其他工艺，MOCVD在REBCO带材制备中具有组分调控灵活、成膜面积大、膜厚均匀性良好等优点，同时由于无需高功率激光器、对真空环境要求相对较低，在设备成本、维护复杂度及规模化扩展方面具备显著优势。近年来，已有多家企业和研究团队报道基于MOCVD技术成功制备出在低温高场条件下表现出优异性能的REBCO带材，充分印证了该技术路线的应用潜力。

然而，当前MOCVD技术在实际规模化生产中仍面临若干关键挑战，主要包括以下3个方面。① 高纯金属有机源制备：RE、Ba、Cu的有机源（多为固态）提纯困难，特别是钡和稀土源易发生聚合，影响挥发性和纯度，需攻克千克级高纯、稳定有机源的工业化制备与质检技术。② 系统稳定性提升：MOCVD过程涉及气化（~300℃）、输运（300℃—340℃）、生长（>850℃）3个温差显著的阶段，极易因管路堵塞、温控失效导致组分偏离和性能下降。需从设备结构、加

表3　REBCO带材不同温区钉扎效率对比

Table 3　Comparison of flux pinning efficiency in REBCO tapes across different temperature ranges

温度	理论极限 J_d(MA/cm^2)	当前最高水平 J_c(MA/cm^2)	钉扎效率 $\eta=J_c/J_d$
液氦温区(4.2 K)	450—500	150	30%—33%
液氮温区(77 K)	40—50	10	20%—25%

⑱ 在薄膜沉积(如脉冲激光沉积、磁控溅射)工艺中作为原料来源的固态材料块。其纯度、密度和均匀度直接决定了最终薄膜的性能上限。

热与温控方式上进行根本性优化，实现全程精准控温。③ 设备多物理场模拟：由于工作真空度较低（~10^2 Pa），腔室内的气流、温度场分布对薄膜均匀性影响巨大。需通过多物理场仿真优化设备设计，缩短研发周期。

3.5.3 MOD路线

MOD制备REBCO超导层所需主要原料为低成本的三氟乙酸盐，且在低温热解、高温REBCO超导层晶化和后期REBCO层由四方相转为正交相的吸氧阶段均无需真空设备，因而MOD是目前综合成本最低的超导层制备方法。

当前面临的关键科学技术问题。① 去氟/减氟工艺优化：MOD技术面临的关键挑战之一，是如何在热解与晶化过程中实现高效、彻底的氟化物去除，同时避免因脱氟反应不充分或副产物残留而损害REBCO超导薄膜的织构质量、化学纯度及最终载流性能。② 可控钉扎中心的引入及钉扎效能提升：传统离子掺杂法形成的钉扎中心尺寸和分布难以控制。目前主要引入零维点缺陷，探索引入一维柱状缺陷（如通过成本可控的离子辐照）以及点-柱协同钉扎机制，以抑制各向异性、拓展应用。钉扎中心在高温处理过程中的稳定性需提升，防止其粗化。③ 厚膜制备工艺优化：厚膜制备中的应力、裂纹以及钉扎中心在厚度方向均匀分布的问题，需要将钉扎调控与厚膜生长工艺深度集成优化。

此外，RCE路线在商业高温超导输电方面有一定前景，本研究不做详细展开。无论是PLD、MOCVD、MOD还是RCE路线，其超导层均为脆性陶瓷材料，普遍存在韧性差、抗拉强度低等固有弱点。具体表现为：当带材所受拉应力达到基体屈服强度的70%—80%时，超导层易萌生裂纹，导致临界电流发生“断崖式”衰减；同时，脱层应力不足与最小弯曲半径受限，也直接影响带材在绕制、装配及运行中的可靠性。这些力学失效机制贯穿于所有技术路线的材料设计、制备工艺与应用场景中，是决定超导带材能否实现规模化、高可靠应用的核心瓶颈之一。

3.6 稳定层（Ag、Cu）

在高温超导REBCO带材中，银（Ag）层与铜（Cu）层的制备是封装与稳定化的核心工艺环节。银层直接沉积于REBCO超导层之上，主要作为兼顾化学防护、氧扩散通道与电接触的关键界面层；铜层则电镀于银层之外，作为带材的主要电流稳定与热扩散层，并提供机械支撑。二者协同作用，共同决定了带材的长期稳定性、电流传输效率与工程应用的可靠性。

当前面临的关键科学技术问题。① 性能平衡：铜层厚度增加有利于稳定性和热扩散，但会降低工程电流密度[19]和机械强度，需根据不同应用需求优化厚度。② 微观结构调控：铜层的纯度、晶粒结构直接影响其电阻、热导率和机械性能，需建立其与宏观性能的定量关系。③ 均匀性控制：电镀工艺易导致铜层沿宽度和长度方向厚度不均，严重影响其后续应用过程中的产品质量（如电缆尺寸、密绕型线圈绕制平整度等）控制，需开发精密控制技术确保均匀性。另外，大长度带材的电镀极易出现小孔洞等缺陷，电镀的完整性控制非常重要。

当前高温超导带材工程化与产业化推进中，仍存在诸多亟待突破的瓶颈问题，本文具体梳理10个关键科学技术问题（表4）。

4 政策建议

为推动我国实现从基础研究领先到产业应用领跑的转变，提出5点建议举措。

（1）加强基础研究，推进AI赋能材料研究新方

⑲ 基于超导带材整体截面积（包含所有非超导部分）计算的综合载流能力评价指标。

法。持续加大基础研究投入，依托国家重大科技基础设施，支持超导机理、新型超导材料体系探索等原创性、颠覆性研究，为下一代技术储备源头创新；强化应用导向研究，针对限制超导材料性能瓶颈的成相机制、相演变规律和磁通钉扎机理等问题，设立专项研究计划；推动人工智能与材料科学深度融合，大力支持AI技术在超导材料发现、工艺优化、性能预测、缺陷分析及机理研究中的应用，推动新型高热导、高电导缓冲层材料设计，提升高温超导带材稳定性。

（2）加强关键技术攻关，确保核心装备自主可控。聚焦高温超导产业链中的“卡脖子”环节，系统布局、重点突破。首要任务是组织优势力量和骨干企业，攻克高性能长带材连续化制备所需的核心技术。整个技术攻关过程应坚持以国家重大战略需求为牵引。例如，针对可控核聚变装置对极高性能超导磁体的要求，以及高端医疗装备国产化对高均匀度、高稳定性医用磁体的迫切需求，设立专项研发任务，反向驱动相关关键技术的持续攻关与迭代升级。其次需要攻克核心装备如IBAD系统、高速PLD沉积设备、大型MOCVD反应腔等，并实现大功率准分子激光器及面向高场、低温、多物理场耦合条件的高端综合测试系统的自主可控。最终形成从核心材料、关键装备到重大工程应用的全链条协同发展能力。

表4　高温超导带材领域亟待解决的10个关键科学技术问题

Table 4　Ten key scientific and technological problems in high-temperature superconducting tapes

功能层	关键科学技术问题	说明
基带	1 如何大幅提升合金基带的屈服强度与疲劳耐受性以满足高场应用需求?	当前商用基于哈氏合金基带的高温超导带材(屈服强度约650 MPa@77 K)在面向未来40 T级以上极高场磁体时,其机械性能面临严峻挑战。高场强带来的巨大电磁力要求高温超导带材具有更高的屈服强度(>1 200 MPa@77 K)和优异的抗循环载荷能力。但现有哈氏合金材料的性能提升已接近其本征极限,这直接制约了下一代高场超导磁体的设计与安全运行
缓冲层	2 如何突破各缓冲层材料在电学和热学性能方面的固有局限性?	当前REBCO超导带材中的缓冲层材料均为绝缘体,其电导率和热导率均处于较低水平。这一特性在带材实际运行中带来显著挑战:在电学方面,绝缘特性使缓冲层无法在电流冲击或局部失超时提供有效的分流路径;在热学方面,较低的热导率限制了超导层产生的热量向金属基带的快速扩散。这些因素共同影响了带材的稳定性和可靠性,成为制约超导带材整体性能提升的关键瓶颈之一
	3 在极薄厚度条件下如何实现IBAD织构的稳定性和长带均匀性控制?	IBAD-MgO缓冲层的厚度仅为数纳米,是获取高质量双轴织构的“取向源头”。但其织构形成对离子束参数(能量、角度、通量)和沉积条件极为敏感,工艺窗口较窄。在卷对卷连续生产中,微小的工艺波动或设备状态变化(如离子束均匀性、基带张力)都会导致织构退化,从而造成千米级长带性能(如临界电流)的显著不均匀和不可预测波动
	4 高速沉积环境下,不同帽子层的生长动力学及调控机理是什么?	在工业化高速沉积过程中,作为外延模板的帽子层(如$LaMnO_3$或CeO_2)表面原子迁移、界面反应等动力学过程与实验室低速条件截然不同。不同材质的帽子层与REBCO超导层在高温、高速下的晶格匹配行为、界面扩散机制尚不明确,这直接影响超导薄膜的初始成核、晶体质量和最终性能,是制约高速工艺稳定性和材料选择的关键基础问题
	5 如何提升帽子层与超导层之间的结合强度和力-电综合性能?	帽子层与REBCO超导层之间的异质界面是带材多层结构中的力学薄弱环节。在磁体制备和服役经历的热循环与电磁力作用下,易发生界面脱层,导致带材失稳或性能衰减。同时,界面处的微观结构也显著影响电流传输和磁通钉扎行为。界面结合强度不足与力-电性能的耦合衰退机制是影响带材工程应用可靠性的核心瓶颈之一

（续表4）

功能层	关键科学技术问题	说明
超导层	6 如何建立针对不同工艺的钉扎中心形成理论，定制化适配不同应用场景的高性能REBCO带材？	在低温高场（如聚变磁体所需的4.2 K，20 T）与高温低场（如电力传输的77 K，自场）等不同应用场景下，需要不同类型和分布的磁通钉扎中心以实现最优载流能力。然而，各类钉扎中心形成的热力学和动力学机制在不同工艺路线中差异显著，其控制与优化已成为各技术路线发展的共性瓶颈问题。针对PLD工艺，靶材的化学组分设计与PLD镀膜工艺参数的优化往往相互独立，缺乏系统性的协同调控理论；针对MOCVD工艺，其生长过程趋近于热力学平衡态，不同类型的钉扎中心的形成过程存在关联，钉扎中心形成与高温超导相生长同样存在协同和竞争关系，然而这种关系背后的机制并不清晰；针对MOD工艺，其异位生长的特点导致在热处理过程中钉扎中心容易发生团聚，难以控制钉扎中心的尺寸和类型，因此往往需要借助辐照等方法进行二次处理引入钉扎，但仍然无法达到令人满意的程度
	7 如何阐明“激光参数-等离子体羽辉-薄膜生长”的跨尺度物理机制，并构建可预测、可调控的工艺模型？	激光参数（能量密度、频率、波长）与动态沉积环境（背景气压、基带运动）共同决定了等离子体羽辉的时空演化特性，而羽辉的特性又直接控制着薄膜的生长动力学与最终微观结构。目前，对这一从等离子体羽辉激发到薄膜生长的具体物理、化学过程尚缺乏系统认知，特别是各环节间的定量关联机制不明确。这导致工艺优化严重依赖经验试错，难以实现对薄膜织构、缺陷密度及成分的精准控制，成为制约长带性能均匀性与重复性的根本瓶颈
	8 如何提升MOCVD系统的稳定性以保证带材性能的一致性？	利用MOCVD技术制备超导层时涉及长距离输送前驱体有机源，在该过程中前驱体浓度易波动、管路易堵塞，导致薄膜成分偏离。针对该问题，需研发高挥发性、低团聚的新型金属有机源，优化气路设计（如多通道独立温控），并开发基于光谱原位监测的闭环控制系统，实现RE/Ba/Cu化学计量比长期偏差<1%，保障千米级带材性能一致性
	9 如何厘清MOCVD制备中的多物理场耦合机制以提高超导层厚度和成分均匀性？	在MOCVD技术路线中，由于反应腔内的气流、温度、浓度场不均匀，导致超导薄膜的厚度和成分出现波动，针对该问题需建立涵盖流体动力学、传热传质与气相反应的多物理场耦合模型，优化喷淋头结构、基座加热方式与抽气布局等，实现12 mm宽幅带材厚度均匀性>95%
	10 如何通过新材料与新结构突破当前REBCO带材的成本与性能瓶颈？	现有REBCO带材在降低成本、提升极端场下性能及拓展应用形式上遭遇瓶颈。需系统探索“宽带”与“双面膜”技术以提升载流效率；研发Cu1234等新型材料体系寻求更高临界参数；发展超导丝材以满足低交流损耗需求。通过前沿探索打破现有技术天花板，为下一代高温超导线带材提供材料和技术储备

（3）加快建设高温超导带材临界性能测试平台，夯实工程应用数据基础。面向工程应用的高温超导带材性能测试需求，建立千安级电流、强磁场、宽温区及多角度磁场条件下的临界性能综合测试平台。目前国际上具备此类综合测试能力的机构主要包括美国强场中心（31 T/45 T）、日本东北大学（25 T）、新西兰罗宾逊研究所（8 T）和瑞士日内瓦大学（15 T）等少数机构，这些机构建立的工程数据库为材料评估和磁体设计提供了重要支撑。我国已建成的高场磁体有中国强磁场科学中心（31 T/45 T）和综合极端条件实验装置（26 T/35 T）等，然而目前尚未建成针对高温超导带材的测试平台，这严重制约了未来国产带材在聚变磁体等高场应用中的可靠性验证，亟需布局建设自主的强磁场-大电流-低温综合测试平台，并构建标准化工程数据库，为我国高温超导相关的重大科技装备安全运行提供数据保障和技术基础。

（4）加快完善高温超导材料标准体系建设，提升国际竞争话语权。系统完善国内高温超导材料标准体系并探索开发新的应用场景，进一步加快制定和完善涵盖REBCO材料（性能、测试方法）、应用组件（电缆、磁体）、系统工程与运维等方面的全套标准，规范行业发展。通过牵头组建标准制定联盟、搭建第三方权威检测平台、推动标准与市场需求深度绑定等方式提升国际话语权，积极参与并主导相关国际标准的制定与修订工作，推动国内标准与国际接轨，提升我国在全球超导产业中的影响力和竞争力。

（5）贯通产学研用联合机制，加快成果示范应用转化。围绕“材料—器件—装备—系统”全链条，构

建高效协同的产学研用联合创新体系，打造稳定运行的协同创新平台和产业联盟；通过设立“应用示范引导专项”，在磁约束核聚变、粒子加速器、电网、轨道交通、医疗等领域推动建设具有规模和影响力的示范工程，以真实场景下的性能与成本要求，倒逼材料、工艺和装备的迭代升级，加速技术成熟。

致谢 在报告撰写过程中，感谢古宏伟、刘建华、王秋良、秦经刚、徐庆金、杨坚、丘明、闻海虎、索红莉、赵跃、武悦、陶伯万、蔡传兵、周迪帆、朱佳敏、王玉山等专家对报告内容提出的专业意见与建设性建议；感谢张伟刚和徐慧在材料整理和版面设计方面付出的努力。

参考文献

1 MacManus-Driscoll J L, Wimbush S C. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors. Nature Reviews Materials, 2021, 6(7): 587-604.

2 Molodyk A, Samoilenkov S, Markelov A, et al. Development and large volume production of extremely high current density $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting wires for fusion. Scientific Reports, 2021, 11: 2084.

3 Molodyk A, Larbalestier D C. The prospects of high-temperature superconductors. Science, 2023, 380: 1220-1222.

4 Marchionini B G, Yamada Y, Martini L, et al. High-temperature superconductivity: A roadmap for electric power sector applications, 2015-2030. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1-7.

5 Zong X H, Han Y W, Huang C Q. Introduction of 35-kV kilometer-scale high-temperature superconducting cable demonstration project in Shanghai. Superconductivity, 2022, 2: 100008.

6 Song M, Sheng C, Ma T, et al. Current limiting tests of a prototype 160 kV/1 kA resistive DC superconducting fault current limiter. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(1): 014002.

7 Creely A J, Greenwald M J, Ballinger S B, et al. Overview of the SPARC tokamak. Journal of Plasma Physics, 2020, 86 (5): 865860502.

8 Li Y. Review on high-temperature superconducting magnet technology for its development in ultra-high-field MRI. Superconductor Science and Technology, 2025, 38(6): 063001.

9 Choi J, Kim T, Lee C K, et al. Commercial design and operating characteristics of a 300 kW superconducting induction heater (SIH) based on HTS magnets. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-5.

10 Wang X R, Gourlay S A, Prestemon S O. Dipole magnets above 20 tesla: Research needs for a path via high-temperature superconducting REBCO conductors. Instruments, 2019, 3(4): 62.

11 Feighan J P F, Kursumovic A, MacManus-Driscoll J L. Materials design for artificial pinning centres in superconductor PLD coated conductors. Superconductor Science and Technology, 2017, 30(12): 123001.

12 Chow C C T, Ainslie M D, Chau K T. High temperature superconducting rotating electrical machines: An overview. Energy Reports, 2023, 9: 1124-1156.

13 Weiss J D, van der Laan D C, Radcliff K, et al. Performance of low-loss demountable joints between CORC® cable-in-conduit-conductors at magnetic fields up to 8 T developed for fusion magnets. Superconductor Science and Technology, 2023, 36(8): 085002.

14 Takeda Y, Maeda H, Ohki K, et al. Review of the temporal stability of the magnetic field for ultra-high field superconducting magnets with a particular focus on superconducting joints between HTS conductors. Superconductor Science and Technology, 2022, 35(4): 043002.

15 Guo Z C, Qin J G, Lubkemann R, et al. AC loss and contact resistance in highly flexible rebco cable for fusion applications. Superconductivity, 2022, 2: 100013.

16 Goyal A, Norton D P, Budai J D, et al. High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of $YBa_2Cu_3O_x$ thick films on biaxially textured metals. Applied Physics Letters, 1996, 69(12): 1795-1797.

17 Bauer M, Semerad R, Kinder H. YBCO films on metal substrates with biaxially aligned MgO buffer layers. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 1502-

1505.

18 Iijima Y, Tanabe N, Kohno O, et al. In-plane aligned $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates. Applied Physics Letters, 1992, 60(6): 769-771.

19 High-temperature superconducting wire critical current database (The Robinson Research Institute). [2026-02-01]. https://htsdb.wimbush.eu/.

20 Arita T, Ichino Y, Horide T, et al. Monte Carlo simulation study on $BaMO_3$ nanostructures in BMO-doped $REBa_2Cu_3O_y$ thin films prepared by the vapor – liquid – solid technique. Japanese Journal of Applied Physics, 2024, 63(10): 103001.

21 Tsuruta A, Yoshida Y, Ichino Y, et al. The influence of the geometric characteristics of nanorods on the flux pinning in high-performance $BaMO_3$-doped $SmBa_2Cu_3O_y$ films (M = Hf, Sn). Superconductor Science and Technology, 2014, 27 (6): 065001.

22 Kakimoto K, Igarashi M, Hanada Y, et al. High-speed deposition of high-quality RE123 films by a PLD system with hot-wall heating. Superconductor Science and Technology, 2010, 23(1): 014016.

23 Ogunjimi V, Panth M, Sebastian M A, et al. Attainment of high critical current in thick $BaZrO_3$-doped $YBa_2Cu_3O_7$ multilayer nanocomposite films. Journal of Applied Physics, 2024, 136(15): 155302.

24 Aytug T, Paranthaman M, Heatherly L, et al. Deposition studies and coordinated characterization of MOCVD YBCO films on IBAD-MgO templates. Superconductor Science and Technology, 2009, 22(1): 015008.

25 Pullanikkat V, Paulose M T, Rajamohan S, et al. Next-generation advanced MOCVD for long REBCO tapes. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2025, 35(5): 1-5.

26 Puig T, Gutierrez J, Obradors X. Impact of high growth rates on the microstructure and vortex pinning of high-temperature superconducting coated conductors. Nature Reviews Physics, 2024, 6(2): 132-148.

27 Yang W II, Jung H S, Lee J H, et al. Depth profiling of the microwave surface resistance of high-J_C $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductors grown using the RCE-DR process. Superconductor Science and Technology, 2016, 29(10): 105004.

Strategic research on REBCO high-temperature superconducting tapes

YING Tianping[1] WANG Dongliang[2] YANG Pengtao[1] ZHAO Lin[1] XU Zhongtang[2] LIU Ziyi[1] YAO Chao[2]
MA Yanwei[2] ZHOU Xingjiang[1] CHENG Jinguang[1*] FANG Zhong[1]
（1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China）

Abstract High-temperature superconducting materials, represented by REBCO ($REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, where RE denotes rare-earth elements), are of significant strategic importance in fields such as energy, healthcare, and large-scale scientific facilities due to their excellent performance in the liquid nitrogen temperature range. However, they still face severe challenges in long-tape uniformity, production cost, and engineering reliability. Future development must shift toward a “material-processing-application” collaborative innovation model, aiming at enhancing flux pinning, optimizing the interfaces and mechanical properties of the multilayer structure, and integrating scalable and intelligent fabrication technologies to promote the low-cost and stable production of high-performance tapes. This study analyzes the core application requirements, research and development status, trends, key scientific and technological bottlenecks, and domestic development pathways for REBCO tapes, providing insights to support independent innovation and industrial leadership in China’s High-temperature superconducting field.

Keywords REBCO high-temperature superconducting tapes, key scientific and technological bottlenecks, strategic research report, industrialization pathway, collaborative innovation

应天平 中国科学院物理研究所特聘研究员。主要研究领域:新型高温超导材料探索及实用化研究。
E-mail: ying@iphy.ac.cn

YING Tianping Research fellow at the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). His main research focuses on exploration of novel high-temperature superconductors and their practical applications. E-mail: ying@iphy.ac.cn

程金光 中国科学院物理研究所副所长、研究员。主要研究领域:高压极端条件下的新超导材料和奇异物理现象。
E-mail: jgcheng@iphy.ac.cn

CHENG Jinguang Deputy director and professor at the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). His main research focuses on novel superconducting materials and exotic physical phenomena under high-pressure extreme conditions.
E-mail: jgcheng@iphy.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author