

轨道交通产业增长迅速，新材料应用任重道远

研究要点

- 高铁增长迅速。2008 年到 2017 年，我国铁路营业里程从 7.97 万公里增加至 12.7 万公里，复合增长率 5%，而同期高铁营业里程从 671.5 公里增加至 2.5 万公里，年复合增长率高达 43.57%。
- 地铁迎来历史性拐点。根据国际经验，城镇化率达 60% 之后，地铁迎来爆发性增长，城镇化率达 75%-80% 后迎来相对饱和期。2017 年中国城镇化率为 58.52%，到达相对饱和期需要十多年的时间。
- 车辆制造朝着轻量化、低成本、高强度方向发展，新材料应用势在必行。碳纤维、铝合金、中控复合材料产业的发展和应用成为轨道交通车辆轻量、低成本发展的选择。
- 轨道交通路用材料逐渐向免维护、低成本、高耐用耐腐蚀等方向发展。轨道交通开通里程的逐年增加，导致后期维护需要大量人力物力。开发免维护、低成本、高耐用材料成为必然的经济型选择。



基石基金投资部

康苏宾

电话：15699766683

电子邮件：ksb@bjjsfund.com.cn

相关研究

1. 《中国制造 2025》
2. 招商证券
3. 十三五铁路发展规划
4. 《聚氨酯工业》
5. 《中国化工报》
6. 互联网公开资料

目录

一、轨道交通产业发展现状	4
1.1 高铁行业	4
1.2 地铁行业	6
二、新材料在轨道交通车体材料中的应用	8
2.1 轨道交通车辆行业简述	8
2.2 轨道交通车体材料	9
2.3 轨道交通车体材料发展趋势	10
2.3.1 铝合金材料	10
2.3.2 碳纤维复合材料	11
2.3.3 中空夹芯复合材料	13
2.4 车体新材料小结	13
三、轨道交通路用材料	14
3.1 轨道交通路用材料概述	14
3.2 应用举例-聚氨酯材料弹性伸缩缝	14
3.3 应用举例-复合轨枕	15
3.4 应用举例-减振弹性垫板	16
3.5 轨道交通路用材料总结	17

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

图表 1-1	近 10 年轨道交通运营情况	4
图表 1-2	铁路营业里程	4
图表 1-3	高铁营业里程	5
图表 1-4	2011-2018E 铁路通车里程	5
图表 1-5	中国高铁在全球建设情况	6
图表 1-6	发达国家城镇化率和地铁开通对比	6
图表 1-7	中国城镇化率与开通地铁城市数量关系	7
图表 1-8	世界地铁运营里程最长的前二十个城市	7
图表 1-9	主要国家高铁运营里程	8
图表 1-10	不同材料密度和抗拉强度	9
图表 1-11	德国 ICE 动车组技术参数	10
图表 1-12	城市轨道车辆内装墙板主要性能对比	11
图表 1-13	客运轨道车辆的制造耗材	11
图表 1-14	客运轨道车辆铝材类型	11
图表 1-15	碳纤维增强环氧树脂材料的主要性能	12
图表 1-16	轨道交通材料性能对比分析	12
图表 1-17	中空夹芯复合材料的优异特性	13
图表 1-18	积水结冰造成橡胶密封开裂、老化，防水功能丧失	15
图表 1-19	桥梁支座、主体造成腐蚀	15
图表 1-20	复合轨枕图例	16
图表 1-21	微孔聚氨酯弹性垫板	17

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

基石基金

随着我国城市化进程的逐步推进及高铁技术的突破性进展，我国轨道交通行业迎来蓬勃发展，怎样在未来的全球竞争中保持领先地位，成为目前学术及产业界普遍关心的问题。新材料作为制造技术的基础，其在轨道交通领域的应用将成为一个有力的抓手，本文将从轨道交通的路和车身车体两部分展开论述。

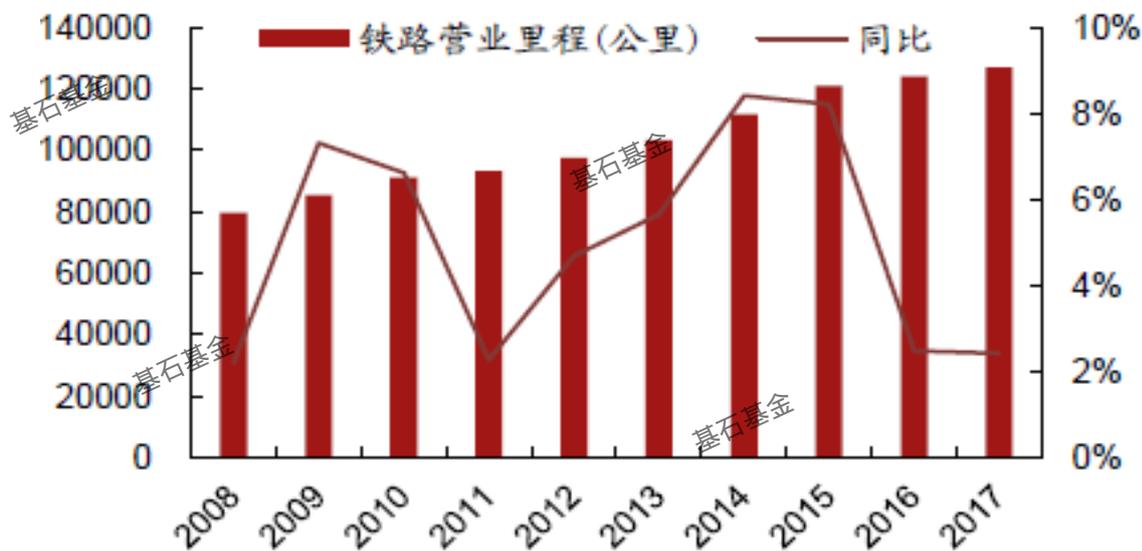
一、轨道交通产业发展现状

1.1 高铁行业

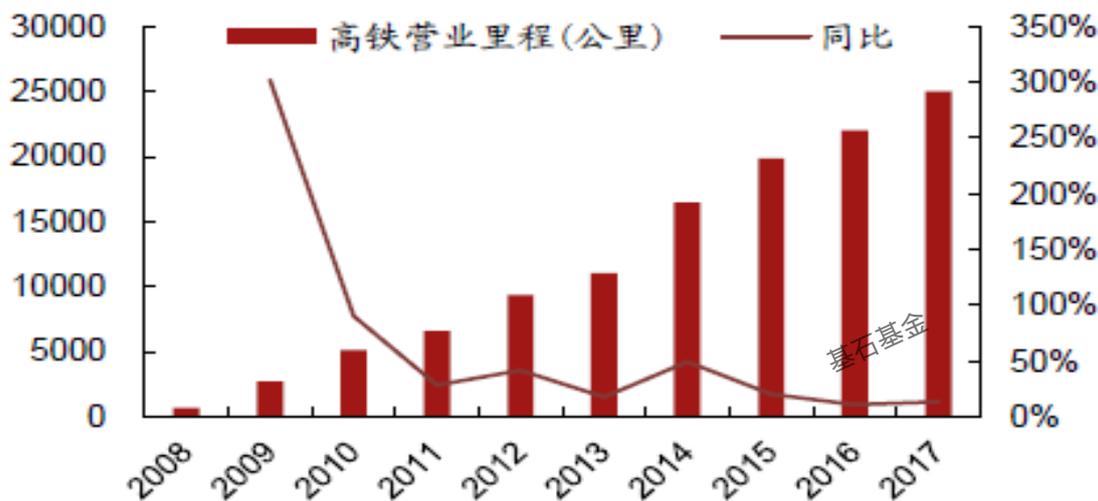
2008年到2017年，我国铁路营业里程从7.97万公里增加至12.7万公里，复合增长率5%，而同期高铁营业里程从671.5公里增加至2.5万公里，年复合增长率高达43.57%。从铁路密度来看，我国铁路密度从2008年的83.01公里/万平方公里增长至132.33公里/万平方公里，而高铁密度则从0.7公里/万平方公里增加至26.05公里/万平方公里。

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
轨道交通线路长度	1713.00	2064.00	2057.90	2539.00	3173.00	3618.00	4125.00	5021.00
新增里程	714.00	351.00	(6.10)	481.10	634.00	445.00	507.00	868.90
密度(辆/公里)	4.84	4.82	6.13	5.66	5.45	5.51	5.77	5.60
轨道交通运营数量	8285.00	9945.00	12611.0	14366.0	17300.0	19941.0	23791.0	28125.0
新增车辆	2806.00	1660.00	2665.00	1755.00	2934.00	2641.00	3850.00	4334.00
同比增长		-40.84%	60.60%	-34.17%	67.18%	-9.99%	45.78%	12.57%

图表 1-1 近 10 年轨道交通运营情况

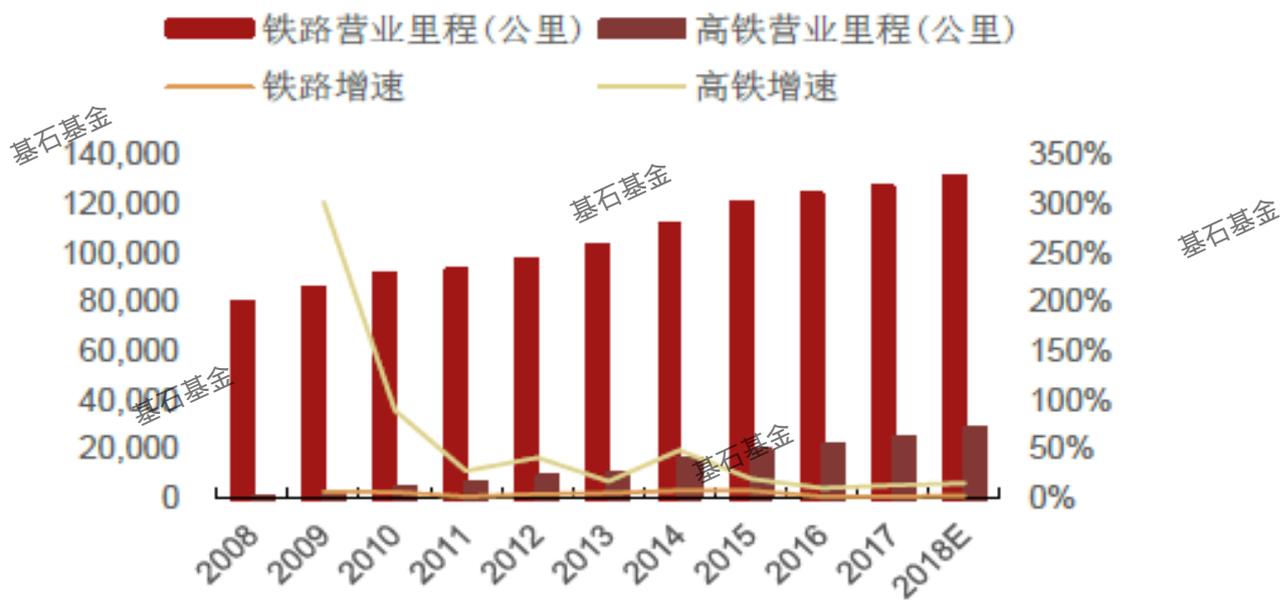


图表 1-2 铁路营业里程



图表 1-3 高铁营业里程

2016 年底，全国铁路营业里程达 12.4 万公里，其中高速铁路 2.2 万公里以上。而根据《十三五铁路发展规划》，到 2020 年全国铁路网基本覆盖城区常住人口 20 万以上城市，高速铁路网覆盖 80% 以上的大城市，动车组列车承担旅客运量比重达到 65%。同时，全国铁路营业里程要达到 15 万公里，其中高速铁路 3 万公里，按 2018 年铁总工作会议，2018 年新增 3500 公里高铁。根据对现有线路的统计，2020 年高速铁路或大幅超过 3 万公里，可知 2019-2020 年高铁通车里程分别 4225 公里、4102 公里，相对维持较高位置。



图表 1-4 2011-2018E 铁路通车里程

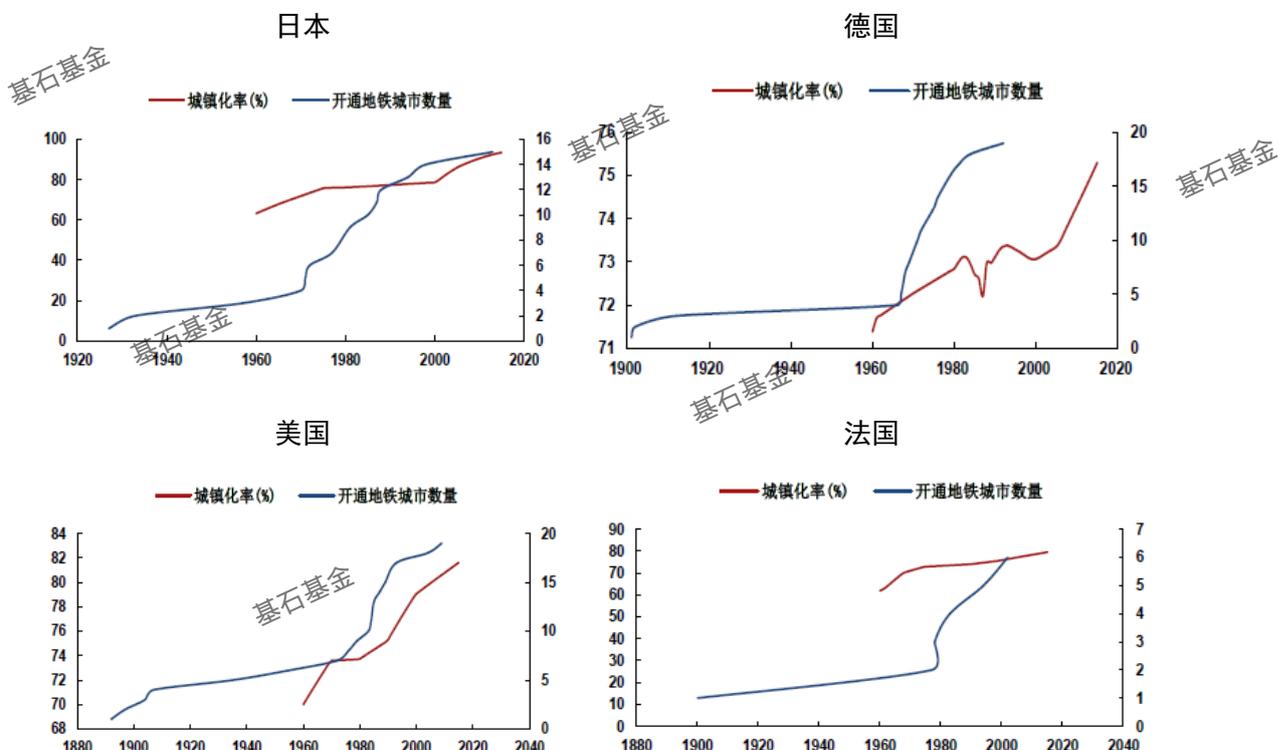
高铁是中国制造最靓丽的一张名片，在一带一路进党章的情况下战略意义凸显，而雅万铁路作为中国高铁整体输出的第一单，在 2019 年落成后会具有示范作用和带头作用。

国家	项目	时速 (公里)	单位造价 (亿美元/公里)	折合亿元/公里	里程	总额 (亿美元)	进展
巴西	东海岸-秘鲁西岸 横跨南美洲大陆, 连接太平洋和大西洋	--	0.12	0.744	5000	600	-
土耳其	安卡拉-伊斯坦布尔 高铁二期	250	0.08	0.498	158	12.7	2014 年 7 月顺利通车
泰国	大城府、廊开府 铁路	160-180	0.14	0.86	1700	233	廊开府线路已获泰国政府批准动工, 为“一带一路”昆明-新加坡线路的核心组成主干, 间接推动 2016 年新-马高铁预期兑现。
俄罗斯	莫斯科-喀山 线	400	0.26	1.61	1287	324	中铁二院已获俄罗斯“莫斯科-喀山”高铁项目的勘察设计合同, 标志着中国高铁出海首单落地。
美国	西部快线 高速铁路	240	0.34	2.108	370	127	中止
印度	德里-坎奈	300	0.18	1.129	1754	320	中止
印尼	雅加达至万隆	300	0.37	2.273	150	55	10 月 16 日正式签署
匈牙利-塞尔维亚-克罗地亚	布达佩斯-贝尔格莱德	300	0.05	0.329	400	20 亿欧元	11 月 24 日签署《中华人民共和国政府与匈牙利政府关于匈塞铁路匈牙利段开发、建设和融资合作的协议》, 于 2016 年第二季度开始动工兴建

图表 1-5 中国高铁在全球建设情况

1.2 地铁行业

地铁行业发展和城镇化率正相关, 根据国际经验, 城镇化率达 60%之后, 地铁迎来爆发性增长, 城镇化率达 75%-80%后迎来相对饱和期。日本、德国、美国、法国地铁行业迎来大规模的发展时对应的城镇化率分别为 63%、72%、73%、73%, 而相对稳定发展时期对应的城镇化率分别为 83%、73%、80%、76%。

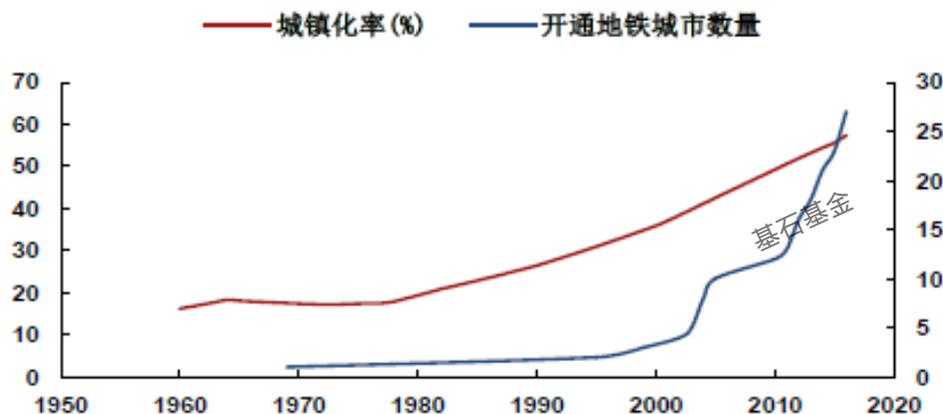


图表 1-6 发达国家城镇化率和地铁开通对比

2017年中国城镇化率为58.52%，地铁行业将进入长期高速发展阶段。2016年中国开通地铁城市数量达到27座，2017-2018年上半年总计有34个城市的地铁项目正在建设，我国城镇化率自1978年以后开始逐步

2019 年度轨道交通行业研究

提升，1992年邓小平南方谈话后迎来了快速增长。依据发达国家经验，中国地铁行业将迎来爆发式发展，并且离城镇化率75%-80%的饱和城镇化率还有很长一段时间。



图表 1-7 中国城镇化率与开通地铁城市数量关系

我国单个城市的地铁运营长度较长，但人均拥有量低于发达国家。截止 2017 年 4 月，world metro data 统计报告显示，全世界共有 673 条城市地铁路线，运营里程为 13543 公里，共有 11501 个车站。其中，上海和北京位列世界第一、第二。地铁运营长度世界前二十个城市中，我国占了 6 个（5 个内地城市+香港）。然而，我国的人均地铁拥有量与发达城市差距甚大。2015 年人均地铁拥有量北京、上海为 0.255 km/万人和 0.243km/万人，而以伦敦、纽约等为代表的欧美主要城市约为 0.4-0.5 km/万人之间。

序号	图标	城市	国家	开始运营日期	运营里程	站座	站座平均距离	日均乘客/人
1		上海	中国	1995/4/10	588	364	1,680 m	6,240,000
2		北京	中国	1969/10/1	554	334	1,753 m	6,740,000
3		伦敦	英国	1863/1/10	402	270	1,552 m	3,210,000
4		纽约	美国	1904/10/27	370.4	469	838 m	4,530,000
5		莫斯科	俄罗斯	1935/5/15	333.6	200	1,774 m	6,550,000
6		首尔	韩国	1974/8/1	326.5	302	1,114 m	6,900,000
7		东京	日本	1927/12/30	304.5	290	1,099 m	8,500,000
8		马德里	西班牙	1919/10/17	293	292	1,050 m	1,740,000
9		广州	中国	1999/6/28	263.5	171	1,627 m	5,000,000
10		巴黎	法国	1900/7/19	230.3	383	599 m	4,180,000
11		德里	印度	2002/12/24	219.9	163	1,378 m	1,660,000
12		重庆	中国	2005/6/18	214.9	118	1,780 m	
13		华盛顿	美国	1976/3/27	203	95	2,134 m	597,000
14		墨西哥城	墨西哥	1969/9/5	201.1	95	984 m	4,410,000
15		深圳	中国	2004/12/28	189.9	131	1,416 m	362,000
16		香港	中国香港	1979/10/1	178	97	2,046 m	3,960,000
17		孟买	印度		171	73	2,515 m	
18		新加坡	新加坡	1987/11/7	167.4	118	1,481 m	2,180,000
19		旧金山	美国	1972/9/11	166.9	44	4,279 m	304,000
20		芝加哥	美国	1892/6/6	166	153	1,145 m	608,000

图表 1-8 世界地铁运营里程最长的前二十个城市

大型城市为目前地铁建设的主力。2010年到2017年期间，北上广深四个城市的运营里程合计占全国城轨运营里程的一半以上。2017年北上广深城市轨道交通运营里程分别为684、731、298及358公里，但北上广深的交通负担仍然很重，地铁的线路覆盖率远远不能满足出行的需求，上下班高峰时间地铁仍十分拥堵，同时还有相当部分地区并未通行地铁线路。其次，随着私人汽车拥有量的迅速攀升，2005年至2015年十年间，私人汽车拥有量复合增速达到了22.5%，而相比之下公里里程复合增速仅3.2%。公路里程的增长速率明显滞后导致公路交通拥挤程度上升，有力地推动了轨道交通的建设。

地铁客流强度的逐年增加和最短发车间隔的缩短，佐证了地铁加密需求的不断扩大。以北上深三地为例，北京和上海的日均客流强度分别从2014年的1.6万人/公里日、1.2万人/公里日上升至2017年的1.84万人/公里日、1.35万人/公里日，深圳2016年日均客流强度下降，主要是因为7号线、9号线和11号线的开通使得深圳地铁当年新增里程同比大增60%至286.5公里，2017年又有了大幅回升。从最短发车时间来看，上海、广州和深圳的最短发车间隔都有缩短的趋势。综上分析，我们认为大型城市的线路密化需求仍较强，并会进一步推进城轨的发展。

“十三五”前两年发改委密集批复轨交项目、加强重点轨交项目推进力度。2014年发改委仅批复10条建设项目，站台216个，总294公里，批复金额1983亿元。2015年发改委批复14个城市轨交建设规划（五年），共涉及规划条数72条，批复站台数912座，项目里程合计1498公里，同比激增409%；批复投资金额10664亿元，同比增长438%。2016年发改委批复了西安、芜湖、成都、贵阳、杭州等地总投资达3536亿元的地铁项目。2017年批复长沙、广州、深圳三地4380亿元的地铁项目。

二、新材料在轨道交通车体材料中的应用

2.1 轨道交通车辆行业简述

轨道交通车辆包括高速铁路、中低速磁悬浮线、地铁、高架城轨、市域快轨、城际高速、市区单轨和磁悬浮车辆等，延续着半个世纪以来的高速化、重载化、电气化的技术进步之路，促进全球大都市圈的城市形态发生重要的演变和转型。尤其是完善的区域和城市的轨道交通系统（地铁、轻轨和城际铁路）改变了城市人口、经济等要素的分布和城市职住空间关系的变化。

目前，全球运营高速铁路线路里程已超过 4.5 万 km，主要国家高铁运营里程如表所示。

排名	国家/地区	运营里程	排名	国家/地区	运营中
1	中国	25,000	12	芬兰	610
2	西班牙	3,100	13	中国台湾省	349.5
3	德国	3,038	14	乌兹别克斯坦	344
4	日本	2,765	15	奥地利	292
5	法国	2,658	16	比利时	209
6	瑞典	1,706	17	荷兰	120
7	土耳其	1,420	18	波兰	85
8	英国	1,377	19	瑞士	137
9	意大利	923	20	挪威	64
10	韩国	880	21	美国	44.8
11	俄罗斯	645	22	丹麦	5
小计	43,512		小计	2260.3	
总计	45,772				

图表 1-9 主要国家高铁运营里程

目前，轨道客运装备每年需求超过400亿欧元，未来年均增长速率约3%~4%。其中，发达国家市场需

求以更新换代为主；新兴经济体及发展中国家市场需求以新购为主。预计2020年全国铁路运营里将达到14万~15万km，基本建成高速铁路网骨架，覆盖80%以上的大城市。

全球50多个国家的150多座城市开通了地铁，线路超过1万km。截至目前，我国共有35个城市开通城市轨道交通运营线路，运营里程已达5021.7公里。

“十三五”期间，我国将完善优化超大和特大城市轨道交通网络，加快300万以上人口城市轨道交通成网，预计2020年我国超过50座城市开通运营城市轨道交通，城市轨道交通新增运营里程约3 000km，预计2030年全国城际轨道线路建成运营线路约2万km，我国将进入城市轨道交通快速全面发展的新时期。

简言之，轨道交通装备制造业是我国自主创新程度最高、国际创新竞争力最强、产业带动效应最明显的高端装备制造行业之一。

在新的发展时期，绿色、环保、智能、可持续等理念使公众对轨道交通安全、舒适、环保和可靠的期望不断提高，金属材料制造的传统结构车体在高原、沙漠、高温、高寒和高海拔等复杂多变的服役环境中面临诸多性能挑战。例如，碳钢车体的易腐蚀、不利于轻量化、焊接变形大等问题；不锈钢车体的封闭性、局部屈曲、焊接变形等问题。

因此，必须持续吸收和利用包括材料可持续在内的高新科技成果，不断提高轨道交通工程建设和运营水平，材料的多元化则是实现轨道交通性能平衡（强度、振动、噪声、隔热、辐射）的主要途径。

2.2 轨道交通车体材料

目前，轨道车辆车体结构主要包括耐候钢（或低合金）高强度钢车体、铝合金车体和不锈钢车体。

通常，耐腐蚀性的不锈钢车体结构更适合海洋性气候的沿海地区和高原地区；车体底架主要部件（例如，牵引梁、枕梁、缓冲梁等）通常采用耐候钢和低合金高强度钢制造（具有良好的焊接性能和疲劳强度），大多数我国生产的轨道车辆车体结构端底架部位采用耐候钢、低合金高强度钢，其余承载部分均采用 SUS301L 系列奥氏体不锈钢。

近年来，轨道车辆车体选材的重要指标是轻量化和安全性，不同材料密度和抗拉强度如表所示。

序号	材料品种	密度 (g/cm ³)	抗拉强度 (MPa)
1	钢	7.8	363~441
2	铝	2.7	127-177
3	玻璃纤维	2.5	1370-1470
4	碳纤维	1.8	2790-3100

图表 1-10 不同材料密度和抗拉强度

(1) 轻量化

牵引能耗是轨道交通系统能耗的重要组成部分，约占总能耗的 50%，主要包括牵引系统驱动列车运行的能耗、空调照明等车载辅助设备运行的能耗、再生制动反馈回牵引电网的能耗。

其中，辅助能耗主要受车载辅助设备、气温、线路敷设方式的影响；再生制动能耗主要由列车到发时刻、列车运行过程、牵引供电电压、能量吸收装置决定。

车体结构质量占整车质量比例 15%~30%，对牵引能耗的影响程度最大。

例如，高速轨道车辆质量减轻 100kg，运行过程中可节约约 100GJ。以德国 ICE 动车组为例，轻量化材料部分技术参数如表 3 所示。

序号	车型	最高速度/ (km/h)	最大功率/ kW	列车质量/ t	车体材料	车体结构
1	ICE1	280	9600	849	钢	不锈钢
2	ICE2	280	4800	442	钢	钢型材
3	ICE3	330	8000	448	铝	铝型材
4	ICE350	350	8800	425	铝	铝型材

图表 1-11 德国 ICE 动车组技术参数

因此，通过轻量化选材和结构设计，可实现车体结构质量减轻，提高同等动力装置的运转性能，降低编组列车中的空车比率或缩短运转时间，直接降低运转动力费用，间接减少轨道维护费用。

(2) 安全性

轨道车辆的投资费用约占其全寿命周期费用的 12%~34%，运营维护费用则占其全寿命周期费用 66%~88%，提高车体材料的安全可靠性水平则可减少修复维修费用。

现代耐候钢、低合金高强度钢结构车体为骨架蒙皮硬壳式结构（型钢框架支撑蒙皮），材料失效和失稳均易导致结构毁坏。其中，材料失效是载荷超过材料的强度能力；材料失稳则表现为大部分材料保持完好，结构以折叠或起皱等方式损坏。通常，结构过载失效往往以局部失稳开始，然后逐步发展到局部断裂或整体结构损坏。

高速铁路涉及大量桥梁和隧道，车辆运行环境比较复杂，容易出现异物撞击。其中，高速冲击（冲击速度 $\geq 90\text{km/h}$ ）会造成明显面板破损；低速冲击往往产生目视不可察觉的损伤形态，材质内部则具有大量的损伤，潜在危害影响较大。

2.3 轨道交通车体材料发展趋势

在轨道交通的材料领域，未来重要的复合材料主要包括高质量低成本的铝合金材料、碳纤维等高强度复合材料、结构/功能一体化的新型夹层材料。

2.3.1 铝合金材料

铝合金以铝为基础元素，合金元素由主加元素（硅、铜、镁、锌、锰）和辅加元素（镍、钛、铬、铁、锂）组成，抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$ 。

根据《轨道交通焊接用铝合金线材》（GB/T32181-2015）和《轨道交通用铝及铝合金板材》（GB/T32182-2015）标准，铝合金分为 9 个系列，车体结构主要采用 5000、6000 和 7000 系列（Al-Mg-Si），主要采用 5083、6005、6008、6063、6082 和 7020 等牌号。

以内装墙板基材为例，城市轨道交通车辆多采用复合铝板、铝蜂窝板和玻璃钢等。在满足结构强度和防火环保等技术指标的前提下，复合铝板具有较为明显的轻量化优势，如表所示。

序号	指标	复合铝板	铝蜂窝板	玻璃钢
1	结构强度	优	优	优
2	防火环保	优	良	良
3	隔音隔热	优	优	良
4	外观造型	优	良	优
5	车辆质量	220kg	300kg	450kg

图表 1-12 城市轨道交通车辆内装墙板主要性能对比

目前，时速超过 200km 的高铁和磁悬浮车辆均已采用铝合金车体结构，其他轨道车辆厢体的铝化率已超过 40%（例如，转向架箱体）。例如，日本新干线、德国 ICE 和 TGV 系列已普遍采用高强度铝合金制造的传动齿轮箱；日本多孔性薄壁空心铝合金型材已应用于机车车辆的侧板、地板和天花板等结构。

轨道车辆铝合金车体由底板（大挤压型材焊接）、侧墙、顶板、端墙组成，车厢内装包括座椅、空调系统、门窗、卫生设施、照明系统、电视、行李架、隔声隔热材料等，车体和台车带有制动器和连接器。

铝合金车体多采用大型中空挤压型材纵向焊接筒形结构，客运轨道车辆材料消耗量约 2.5t 材料，如下所示。

序号	型材	制成件
1	大型材	车体模块、白车、车辆、编组列车
2	中小型材	门窗、行李架、装饰件、贮柜、推车
3	其他	板材、箔材、管材、锻件

图表 1-13 客运轨道车辆的制造耗材

车体、座椅架、行李架、门窗、空调系统等也可采用铝合金制造，如表所示：

序号	型材	比例/%
1	挤压型材	74
2	平轧型材	23
3	压铸件、铸件和锻件	3
		100

图表 1-14 客运轨道车辆铝材类型

根据《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，我国新材料产业将加强上下游协作配套，在航空铝材等领域开展协同应用试点示范，搭建协同应用平台。

2016 年，科技部国家重点研发计划重点专项“重点基础材料技术提升与产业化”立项支持《高性能铝合金大规格板带材制造与应用技术》项目（2016YFB0300800），将开展轨道交通高性能铝合金挤压材，以及铝合金车体结构关键应用技术与示范的研究，解决高性能挤压材产品多种性能协同调控困难、大规格产品组织性能均匀性差、大型复杂构件在制造与使用过程中性能退化严重等关键技术问题。

2.3.2 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料（CFRP）具有密度低、无蠕变、耐超高温、耐疲劳性和耐腐蚀性等优异性能，可以满足车体设计的阻燃、隔热保温和减震等设计指标，应用范围正逐渐由次承载结构零部件向主承载结构发展。例

如，碳纤维增强环氧树脂材料的比强度和比模量是现有结构材料中是最高的，主要性能如下所示。

序号	性能指标	数量	备注
1	抗拉强度/MPa	> 3500	钢的7~9倍
2	抗拉弹性模量/MPa	23000~43000	> 钢
3	密度/ (g/cm ³)	~1.6	< 钢的1/4

图表 1-15 碳纤维增强环氧树脂材料的主要性能

与传统的轨道车辆材料（例如，钢、铝等）相比，碳纤维复合材料在轻量化、节能、电磁屏蔽、碰撞吸能等方面具有较强的优势和较突出的特点。例如，采用碳纤维复合材料制作的司机室头罩具有优良的抗冲击性能，能承受 350kN 的静载荷，可以抵挡 1kg 铝弹的 660km/h 的高速冲击；高速列车车体和转向架采用碳纤维复合材料可实现减重 49%，带来的轻量化和节能效果显著。以车辆电气接线箱为例，轨道交通材料性能对比分析如下表所示。

序号	指标	单位	不锈钢	铝	碳纤维
1	质量	kg	37	17	12
2	相对成本	以不锈钢为基准	1	1.5	7~8
3	生产模具	—	不需要	不需要	需要

图表 1-16 轨道交通材料性能对比分析

目前，碳纤维复合材料在轨道列车的应用主要集中在车体、转向架、车外设备和车内内装领域。例如：

(1) 日本新型新干线 N700 系高速列车 CFRP 部件包括部分车体蒙皮、绝缘子（导电弓架边缘）和客车窗框等。

(2) 日本 KAWASAKI（川崎重工）成功开发世界首例主构造采用碳纤维复合材料增强树脂基复合材料的第一代铁道车辆用列车“efwing”，刚性焊接转向架构架改为碳纤维侧梁的柔性构架，经过美国交通技术中心（TTCI）时速 150km 的 4500 公路的线路运行试验，轮重减载率下降 50%，车体外壳总质量降低 40%。

(3) 德国 SIEMENS（西门子公司）在新开发的列车车体侧部使用了碳纤维复合材料。

(4) Voith 故障列车牵引操作过渡车钩采用碳纤维增强复合材料，总质量约 23kg，比钢铁过渡车钩减重 50%（结构紧凑），单人可进行携带安装操作。

我国中车青岛四方机车车辆股份有限公司首次在高速列车中应用 CFRP 大型结构件（2015 年 6 月出厂），设备舱减重 35%（相对于铝合金结构），各项指标满足时速 350km 运营要求，可承受振动、地面效应、风沙冲击、高温、高湿和风雪侵蚀，已在大西线进行 350km 试验考核和长期跟踪，状态良好，其主要结构件包括：

弯梁（箱型梁结构）：设备舱主承载结构件（断面矩形），采用 CFRP 预浸料交叉铺覆设计和袋压成型工艺制造，样品成品率较高，相应降低制造成本。

横梁（工字梁结构）：设备舱的主承载结构件，选用 T300 级 CFRP，采用真空导入技术成型，主要组装方式为胶接和铆接。

根据《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，我国将加强新材料产业上下游协作配套，在碳纤维

复合材料等领域开展协同应用试点示范，搭建协同应用平台。

根据工业和信息化部发布的《石化和化学工业发展规划（2016-2020 年）》，我国将重点发展高强和高模碳纤维，加快开发碳纤维增强尼龙复合材料（ $\geq 200^{\circ}\text{C}$ ）等耐高温高强度工程塑料，重点突破高强碳纤维的低成本、连续稳定、规模化生产技术，加快高强中模、高强高模级碳纤维产业化突破，加快高强碳纤维稳定工业化生产等技术的产业化和推广应用。

2.3.3 中空夹芯复合材料

纤维增强树脂基复合材料由基体和增强材料构成，具有较明显的材料界面，宏观上呈现各向异性和非均质性，特别是层剪性能远低于层内性能等。

中空夹芯复合材料是面板（高强度、高模量材料）、芯子（蜂窝、泡沫等轻质材料）和连接胶层组成的轻质多功能结构材料，面层材料和芯层材料整体连接成型，面压缩和冲击性能优异，具有较好的隔音、隔热和耐疲劳等性能，显著弥补传统蜂窝、泡沫芯材等夹芯复合材料易分层、耐冲击性能差的缺点，其优异特性如表所示。

序号	性能指标	性能特点
1	高性能	保温、隔音、阻燃
2	高强度	比强度、比刚度、抗冲击、耐疲劳
3	可填充与预埋	填充泡沫、埋设导线、探头
4	可设计	纤维体系、芯体结构形式、树脂体系
5	易于成型	平面、拐角、异形曲面

图表 1-17 中空夹芯复合材料的优异特性

该材料具有突出优势，已应用于轨道交通的车门、内饰板板和整流罩等部件。例如：

英国 Intercity125 驾驶室外蒙皮整体成型和内蒙皮 3 件拼合，中空芯材采用聚氨酯泡沫，司机室整体总量较传统钢结构减重 30%~35%，可耐时速的 300km 的 0.9kg 钢块的冲击。

意大利高速列车 ETR500 采用高比刚度复合材料夹层板（2 层 Tedlar 聚氟乙烯塑料薄层，中间层为 Nomex 蜂窝芯材）制造内部结构边墙、天花板和行李舱。

瑞典斯德哥尔摩地铁列车的侧墙、地板和顶盖均为不锈钢夹聚甲基丙烯酸酯亚胺（PMI）泡沫芯结构。其中，侧墙总厚度减少 120mm，增加车体内部空间。

玻璃纤维夹层复合材料内外蒙皮采用玻纤增强不饱和聚酯树脂，芯材为阻燃低密度泡沫，经常温真空袋技术压制成型，均匀传递荷载（有利于冲击荷载的扩散），多用于替代传统的玻璃钢材料，同结构减重 30%。

根据工业和信息化部发布的《石化和化学工业发展规划（2016-2020 年）》，我国将重点加快树脂基复合材料设计制造技术。

2.4 车体新材料小结

随着现代材料技术和生产工艺的发展，轨道车辆车体的可选材料将日益增多，应根据具体用途和应用环

2019 年度轨道交通行业研究

境考量耐候钢、低合金高强度钢、不锈钢、铝合金和碳纤维等材料的综合性能指标，在满足轻量化、安全性和环保性的基础上，最大限度的满足市场对轨道交通舒适性和美观性的日益增长的需求。

未来 5~10 年，轨道车辆车体材料的发展方向主要包括 4 个方面：

- (1) 材料：以高强、超高高强度钢、铝镁合金和碳纤维等为主的复合材料。
- (2) 制造：采用激光拼焊技术、变厚度轧制技术和型材设计。
- (3) 部件：轨道车辆车体结构优化、力分布均衡化、加强筋设计。
- (4) 结构：改变以材料强度为基本依据的设计理念，整车结构集成优化设计综合反映材料性能、加工工艺和组织结构等因素，不同材料性能对应不同构件功能要求和标准。

三、轨道交通路用材料

3.1 轨道交通路用材料概述

国内高铁运营里程已达到 2.5 万公里，地铁运营里程 5021 公里，轨道交通总里程达到 3 万公里以上。

轨道交通路用材料涉及到路基、路面、桥梁、隧道、防水等多种材料。随着轨道交通向高速化、安全化方向发展，路基建设使用化工新材料的比例也逐步提高，主要为路基土工复合材料、路基线缆材料、防水材料等。具体到路面线路有：轨枕、扣件、垫板、缝隙填充材料、减震降噪材料等。

从无砟轨道路基结构及材料应用看，轨道扣件、垫片的减振降噪部件应用的是热塑性弹性体、聚氯乙烯、硅橡胶、环氧树脂、丁基橡胶、丁苯橡胶、三元乙丙橡胶等；缓冲填充物为改性沥青；路基防水层、电缆槽防护用的是聚氨酯、聚脲及氯化聚乙烯。其中轨道扣件是消耗化工新材料最多的部件。此外，保护线缆等辅助设施的铁路盖板也是轨道材料中涉及化工新材料较多的部件。

在有砟轨道系统中，复合材料枕木、道砟胶也应用了大量的化工新材料。高铁及动车上用得最多的是减振降噪材料，而减振降噪所用的橡胶品种很多，用量较大的有天然橡胶、丁苯橡胶、顺丁橡胶、丁腈橡胶、氯丁橡胶、丁基橡胶、乙丙橡胶、氟橡胶、硅橡胶等。

3.2 应用举例-聚氨酯材料弹性伸缩缝

传统高铁或城铁桥梁缝隙采用橡胶件进行连接，但橡胶件容易老化，导致桥梁漏水，造成对桥梁的损坏，缩短了桥梁的使用寿命，典型案例如下图：



图表 1-18 积水结冰造成橡胶密封开裂、老化，防水功能丧失



图表 1-19 桥梁支座、主体造成腐蚀

新型材料聚氨酯弹性体伸缩缝主要应用于铁路和城市轨道交通接缝密封，能够保证长期在较大的伸长变形（ $>50\%$ ）的情况下装置不开裂，不漏水。具备低模量、高延伸率、良好的耐久性，并且和混凝土/砂浆基面有良好的粘接性等关键性能。该材料在高铁领域渗透率越来越高，新修线路如：大张、昌吉赣、西成、福厦等都采用了聚氨酯材料伸缩缝。据测算，该领域每年有近 50 亿左右的市场容量。

3.3 应用举例-复合轨枕

最早的传统轨枕是用上等木材制成的，存在易朽坏、维修费用高的缺点；目前使用的水泥轨枕刚性大，列车运行时振动大。聚氨酯弹性轨枕是硬质聚氨酯发泡树脂用玻璃纤维纱束增强以拉挤成型法制成的一种结构性材料，具有耐腐蚀、耐久性、绝缘性、高强度以及具有类似木材的轻量化和可再加工的性能。日本积水化学工业株式会社在 1975 年研发了玻璃长纤维增强硬质聚氨酯泡沫的 FFU 合成枕木，至今已有 20 余年，目前在日本轨道工程中拥有 80% 以上的市场占有率及丰富的铺设经验。拜耳、BASF 等公司都已成功开发出聚氨酯弹性枕木，计划将用于中国高铁建设。

自 2004 年以来，聚氨酯复合轨枕开始在日本、比利时，德国，英国，荷兰，奥地利，瑞士，塞尔维亚和匈牙利等国家投入使用，使用性能始终让客户完全满意。现在越来越多的铁路运营公司开始在轨道上使用聚氨酯复合轨枕，全球总里程 2000 公里。

目前,已有厂家开发出玻璃纤维增强聚氨酯复合材料轨枕,重量仅为混凝土的 $1/3 \sim 1/2$,具有耐腐蚀性、耐疲劳性、耐电气绝缘性强,且使用寿命长,可达 50 年以上,更换频率低,可降低周期成本。聚氨酯复合轨枕弹性好,可以提高轨道结构的整体弹性,减小列车行车行驶中对路基的振动影响和对环境的噪音污染;绝缘性能好,对轨道电路不会产生任何影响,保证了列车的安全运行;同时还具备耐水解、耐油脂的优良特性,以及对风化环境特有的耐候性。纤维增强聚氨酯复合材料轨枕的制造成本较高,适合应用于轨道交叉岔口、桥梁等区域。复合轨枕技术特点如下:

(1) 比重低:合成枕木比重为 $0.7 - 1.2g/cm^3$,与木材相近。

(2) 强度好:合成枕木的各项强度性能指标均可通过铁科院 CRCC 认证,符合轨道交通的要求。在弯曲强度、弯曲杨氏模量、纵向压缩强度、剪断强度以及粘接剪断强度等方面均优于木材。

(3) 加工性良好:合成枕木具有和木材一样的外形尺寸加工能力,同时还具有很多木材所不具备的优异性能,如可以通过修补剂对加工误差进行修补填充等。



图表 1-20 复合轨枕图例

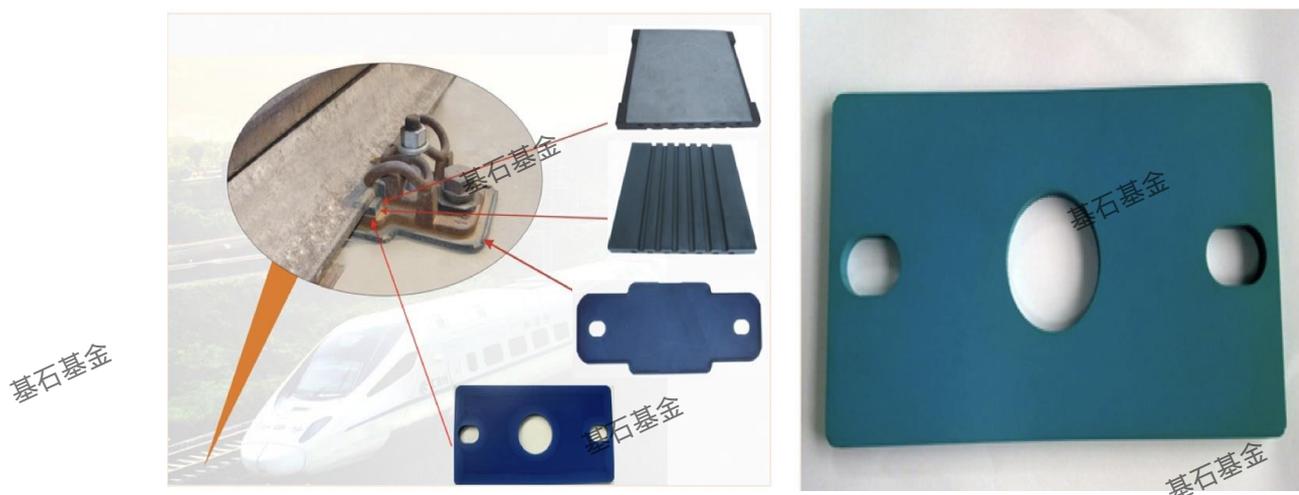
聚氨酯复合轨枕弹性好,可以提高轨道结构的整体弹性,减小列车行车行驶中对路基的振动影响和对环境的噪音污染,非常适合在铁路桥梁、钢梁区域使用。

3.4 应用举例-减振弹性垫板

聚氨酯弹性体材料具有良好的力学性能、优异的承载性能和减振性能,在轨道交通线路减振降噪领域应

用广泛。

微孔聚氨酯弹性垫板是用于钢轨和混凝土轨枕之间的一种弹性减振垫层，是无砟轨道扣件系统的关键减振部件，为无砟轨道提供必要的弹性，能使钢轨上的载荷分配更合理，从而降低行车振动带来的危害。国内企业株洲时代、海力威、铁科院下属公司等均研发出相关产品。目前，该产品已经广泛应用于中国四纵四横高铁线路和其他城际客运专线中。重庆轨道交通会展支线地下轨道工程中试验性地投入使用的、我国首次引进奥地利 Getzner Werks 公司的聚氨酯浮置板减振垫技术。该技术主要采用聚氨酯微孔弹性体胶料，经使用证明，该技术减振、降噪效果良好，能够有效减少噪声和振动频率对地铁线路上部及附近居民的影响。



图表 1-21 微孔聚氨酯弹性垫板

3.5 轨道交通路用材料总结

近年来，国内在轨道交通线路用新材料方面的研究进展很快，聚氨酯材料的应用已有所突破，但大量其他材料的研究及应用尚需进一步完善。随着高铁及地铁技术走出国门，参与到世界范围内的竞争，需要我们全体科研机构及产业界人士的共同努力，才能立足于世界强国之林。