

符蓉 高飞 著

高速列车 制动材料

GAOSU LIECHE ZHIDONG CAILIAO



化学工业出版社

高速列车 制动材料

符蓉 高飞 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书结合作者多年以来的科研与教学经验,详细介绍了我国已经投入运行的 5 种高速列车的制动系统以及制动材料的设计、制备工艺、使用的设备、产品性能和制动材料的摩擦性能测试方法。

本书适宜从事高速列车制动材料设计与生产的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高速列车制动材料/符蓉,高飞著. —北京:化学工业出版社, 2011.12

ISBN 978-7-122-12815-7

I. 高… II. ①符… ②高… III. 高速列车-车辆
制动-材料 IV. ①U292.91②U270.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 237311 号

责任编辑: 邢 涛

责任校对: 周梦华

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 14 $\frac{1}{2}$ 字数 274 千字 2011 年12月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

近年来，通过引进-消化-吸收-再创新，我国的高速铁路技术走在了世界的前列，京津、武广、郑西线路列车时速超过 350km。2010 年，京沪铁路试验速度超过 480km/h。这些举世瞩目的成就已引起了世界范围关注。根据国家铁路发展计划，到 2012 年，我国将建成高速铁路 41 条，运行里程超过 1.3 万千米；到 2020 年，高速铁路里程接近 2 万千米，覆盖 50 万人口以上的城市。可见，高速铁路在国民经济中的作用不可替代。

随着列车速度的提高，如何将高速运行的列车安全地停下来是一个关系到生命和财产安全的重要问题。列车制动有电阻制动、磁轨制动、涡流制动等多种方式，但无论采用何种制动方式，摩擦制动是不可缺少的。高速列车的摩擦制动通常采用的是盘式制动方式，利用制动盘和制动闸片间的相互摩擦作用达到消耗列车动能的目的。因此，这两个部件的性能及高速条件下的摩擦学行为成为一个关系到列车运行安全的重要方面。在这个领域，发达国家自高速列车运行以来一直坚持进行这方面的研究，积累了很多的经验，形成了特定的研究内容。在我国，近年来，这个研究领域同样得到了相关领域专家的重视，开展了大量的研究工作。笔者长期从事有关高速列车制动材料的教学和科研工作，深感行业内需要一本相关专著介绍制动材料，因而汇集了有关高速列车制动材料的研究成果，撰写本书，以期对这个领域的研究起到推动作用。

本书从制动的角度，介绍了我国已投入运行的 5 种型号的高速列车的基本情况以及这几种高速列车的盘式制动方式；在制动盘和制动闸片方面，介绍了这两个部件的结构特征以及材料成分和性能，并重点探讨了产品的制造技术及工艺条件；针对高速列车制动条件下的摩擦学行为，介绍了有关材料组元和摩擦条件包括摩擦速度、压力、环境等对摩擦副的摩擦磨损性能的影响机理，同时，对于制动产品的制动性能的测试方法进行了介绍。

由于作者水平有限，书中不足之处敬请读者指正。

第1章 高速列车

1

| | |
|--------------------------|----|
| 1.1 高速铁路与高速列车 | 1 |
| 1.1.1 高速铁路的定义 | 1 |
| 1.1.2 高速列车的定义 | 1 |
| 1.1.3 高速列车的分类方法 | 1 |
| 1.2 动车组的定义及分类 | 2 |
| 1.2.1 动车组定义 | 2 |
| 1.2.2 动车组分类 | 2 |
| 1.2.3 动车组动力配置方式 | 2 |
| 1.3 国外高速动车发展状况 | 3 |
| 1.3.1 日本新干线 | 3 |
| 1.3.2 德国 ICE 高速动车组 | 3 |
| 1.3.3 法国 TGV 高速列车 | 6 |
| 1.4 中国的高速列车 | 7 |
| 1.4.1 CRH1 型动车组 | 8 |
| 1.4.2 CRH2 型动车组 | 9 |
| 1.4.3 CRH3 型动车组 | 10 |
| 1.4.4 CRH5 型动车组 | 11 |
| 1.5 高速列车制动方式 | 13 |
| 1.5.1 高速列车的制动 | 13 |
| 1.5.2 高速列车的制动方式 | 14 |
| 1.5.3 盘形制动系统 | 17 |

第2章 高速列车盘式制动

24

| | |
|-----------------------|----|
| 2.1 高速列车制动盘 | 24 |
| 2.1.1 制动盘的结构 | 24 |
| 2.1.2 制动盘的材质和性能 | 37 |
| 2.1.3 高速列车制动盘材料 | 38 |
| 2.2 制动闸片 | 58 |

| | | |
|-------|----------------------|----|
| 2.2.1 | 高速列车制动闸片的标准 | 58 |
| 2.2.2 | 高速列车制动闸片材料 | 59 |
| 2.2.3 | 高速列车制动闸片的结构 | 61 |
| 2.2.4 | 制动闸片的材料成分和制造工艺 | 67 |

第3章 粉末冶金制动闸片材料 76

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 3.1 | 金属粉末的制取及性能 | 76 |
| 3.1.1 | 金属粉末制取方法 | 76 |
| 3.1.2 | 常用金属粉末性能及检测 | 99 |
| 3.2 | 原料粉末筛分 | 109 |
| 3.2.1 | 摇动筛 | 109 |
| 3.2.2 | 振动筛 | 110 |
| 3.2.3 | 旋振筛 | 111 |
| 3.3 | 原料粉末混合 | 113 |
| 3.3.1 | 粉末混合要求 | 113 |
| 3.3.2 | 粉末混合的设备 | 114 |
| 3.3.3 | 影响混合均匀度的因素 | 116 |
| 3.4 | 压制成形 | 117 |
| 3.4.1 | 模压成形原理 | 117 |
| 3.4.2 | 压制过程中粉体的密度和力的变化 | 121 |
| 3.4.3 | 粉末成形设备 | 132 |
| 3.5 | 烧结成形 | 139 |
| 3.5.1 | 烧结设备 | 139 |
| 3.5.2 | 烧结工艺 | 143 |

第4章 制动条件下闸片材料的摩擦性能 145

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 4.1 | 材料组元的影响 | 145 |
| 4.1.1 | 金属基体组元的作用 | 146 |
| 4.1.2 | 润滑组元的作用 | 152 |

| | |
|---------------------|-----|
| 4.1.3 摩擦组元的作用 | 160 |
| 4.2 摩擦条件的影响 | 168 |
| 4.2.1 摩擦速度的影响 | 168 |
| 4.2.2 摩擦环境的影响 | 176 |
| 4.2.3 摩擦压力的影响 | 180 |
| 4.3 摩擦表面状态的影响 | 185 |
| 4.3.1 第三体的组织特征与运动机制 | 185 |
| 4.3.2 第三体的成分构成 | 189 |
| 4.3.3 第三体与摩擦磨损性能的关系 | 191 |

第5章 高速列车制动材料性能 检测方法及设备

196

| | |
|--------------------|-----|
| 5.1 高速列车制动材料性能试验方法 | 196 |
| 5.2 摩擦磨损试验台种类 | 197 |
| 5.2.1 1:1 制动动力试验台 | 197 |
| 5.2.2 缩比制动动力试验台 | 203 |
| 5.2.3 小试样惯性摩擦试验台 | 208 |
| 5.2.4 定速摩擦试验台 | 210 |

参考文献

215

第 1 章

高速列车

1.1 高速铁路与高速列车^[1]

1.1.1 高速铁路的定义

① 1970 年日本政府第 71 号令的定义为：凡在一条铁路的主要区段上，列车的最高运行速度达到 200km/h 及以上的干线铁路。

② 1985 年欧洲经济委员会在日内瓦签署国际铁路干线协议规定：列车最高运行速度达到 300km/h 及以上的客运专线或最高速度达到 250km/h 及以上的客货混用线。

③ 1986 年国际铁路联盟（UIC）的定义是：最高速度至少达到 250km/h 的专用线或最高速度达到 200km/h 的既有线。

1.1.2 高速列车的定义

以最高速度 200km/h 以上运行的列车称为高速列车。高速列车可以是由机车牵引客车组成的列车，也可以是动车组成的列车，称为高速动车组。严格地说，高速列车涵义更广泛，它不但包括轮轨式列车，还包括磁悬浮列车等。

1.1.3 高速列车的分类方法

高速列车按照速度等级可以分为准高速、高速和超高速列车。

(1) 准高速列车 最高运行速度为 160~200km/h。

(2) 高速列车 最高运行速度为 200~400km/h。

(3) 超高速列车 最高运行速度为 400km/h 以上。

1.2 动车组的定义及分类^[2,3]

1.2.1 动车组定义

由若干带动力的车辆（动车）和不带动力的车辆（拖车）组成的，在正常使用寿命周期内始终以固定编组运行、不能随意更改编组的一组列车称为动车组。

1.2.2 动车组分类

动车组按动力类型分：①内燃动车组（DMC—Diesel Multiple Unit）——由柴油机提供动力；②电力动车组（EMC—Electric Multiple Unit）——由牵引接触网提供动力。

1.2.3 动车组动力配置方式

动车组有两种牵引动力的分布方式，一是动力分散，二是动力集中。动力集中式是指将整车动力集中在动车组一端或两端的车辆上，其余中间车辆不带动力（即为拖车），与常规意义上的机车牵引若干车辆的列车类似。动力分散式是指将整个动力分散到动车组的若干车辆上，中间车辆有带动力的（即动车），也有不带动力的（即拖车），也可以全部车辆都带动力。

动力分散电动车组的优点是，动力装置分布在列车不同的位置上，能够实现较大的牵引力，编组灵活；由于采用动力制动的轮对多，制动效率高，且调速性能好，制动减速度大，适合用于限速区段较多的线路。对于停站较多的近郊通勤铁路、地下铁路，这优势特别明显。另外，列车中一节动车的牵引动力发生故障对全列车的牵引指标影响不大。其缺点是：牵引设备数量多、成本高、总重量大。

动力集中的电动车组其优点是动力装置集中安装在2~3节车上，检查维修比较方便，电气设备的总重量小于动力分散的电动车组。其缺点是动车的轴重较大，对线路不利。

动车组在两端都有驾驶室，列车掉头时无需先把机车在一端脱钩后再移到另一端挂钩，这大为加快运转的速度。同时亦减少车务人员的工作量及提高安全性。

动车组容易组合成长短不同的列车。有些地方的动车组会先整合成一列，到中途的车站分开成数节，分别开向不同的目的地。因为动车组运转快、占地小，所以行走市郊的通勤铁路很多都是动车组。轻便铁路、地下铁路使用的亦几乎全是动车组。



1.3 国外高速动车发展状况^[4]

世界高速铁路动车技术最发达的国家有3个：德国、日本和法国。各国使用高速动车的比重以日本为最大，占87%；荷兰和英国次之，分别占83%和61%；法国、德国又次之，分别占22%和12%。

1.3.1 日本新干线

日本高速列车全部采用电动车组的形式。从1964年第一条新干线开通以来，日本对新干线高速铁路进行多次重大技术改进和革新，从最初的“0系列”高速列车开始，相继研制开发了“100系列”、“200系列”、“300系列”、“400系列”、“500系列”、“700系列”和适合北方地区气候特点、地形特点的“E1系列”、“E2系列”、“E3系列”和“E4系列”。改进后的车辆在行驶速度、乘坐舒适程度、大量运输性能、车身重量和功率等方面都达到世界领先水平。日本高速列车的主要技术参数和主要车型见表1-1和图1-1。

表 1-1 日本新干线动车组主要技术参数

| 车型 | 0系 | 100系 | 300系 | 500系 | 700系 | E1系 | E2系 | E3系 | E4系 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 编组 | 16M | 12M4T | 10M6T | 16M | 12M4T | 6M6T | 6M2T | 4M1T | 4M4T |
| 车长/m | 400.3 | 402.1 | 402.1 | 404 | 404.7 | 302.1 | 201.4 | 107.65 | 201.4 |
| 空车质量/t | 896 | 857 | 630 | 620 | 628 | 692.5 | 365.9 | 219.7 | 424 |
| 定员/人 | 1398 | 1321 | 1323 | 1324 | 1323 | 1235 | 629 | 270 | 1634 |
| 最高运行速度/(km/h) | 220 | 230 | 270 | 300 | 270 | 240 | 275 | 275 | 240 |
| 总功率/kW | 11840 | 11040 | 12000 | 18240 | 13200 | 9840 | 7200 | 4800 | 6720 |

1.3.2 德国 ICE 高速动车组

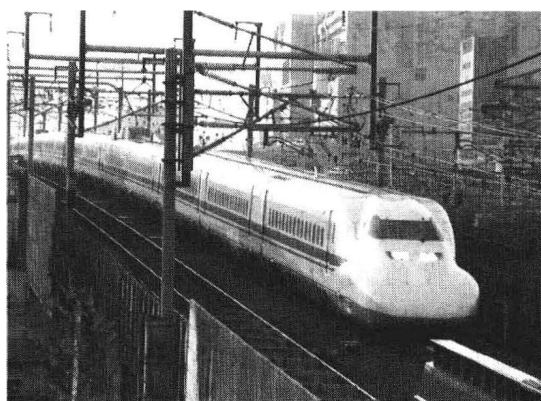
德国 ICE 高速铁路以其速度快、功能完备、技术等级高、性能稳定、车辆总体布置结构合理、运用维护性好等诸多优点而闻名于世，其中的多项技术被许多国家广为引用或借鉴（图1-2）。德国 ICE 系高速动车组主要有 ICE-1、ICE-2、ICE-3、ICE-T、ICE-TD 等，ICE-1 是德国第一代高速动车组，是1991年投入运营的动力集中型高速动车组，最高营运速度为280km/h以上；ICE-2 是德国1997年投入运营的动力集中型高速动车组，ICE-2 在 ICE-1 上进行了大量改进；ICE-3 是2000年5月投入使用的动力分散型高速动车组，最高设计速度达到300km/h；ICE-T 是德国1997年开发的动力分散型高速摆式内燃动车组，其最高营运速度为200km/h。德国铁路高速动车组的发展及主要技术特征见表1-2。



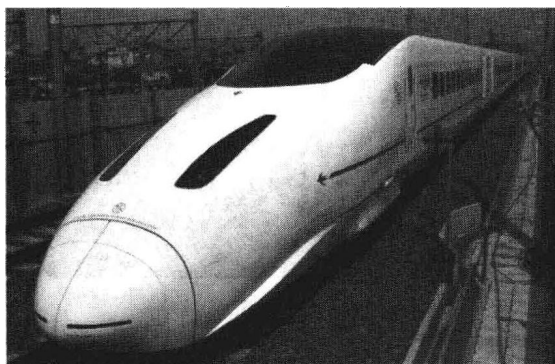
0系列新干线列车



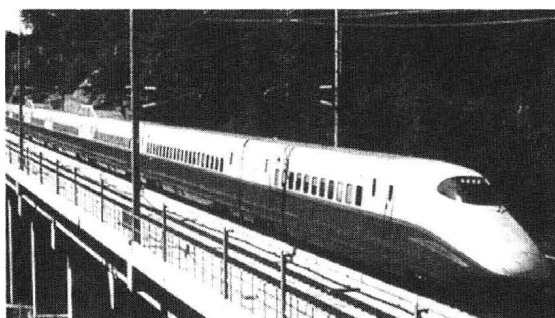
300系列新干线列车



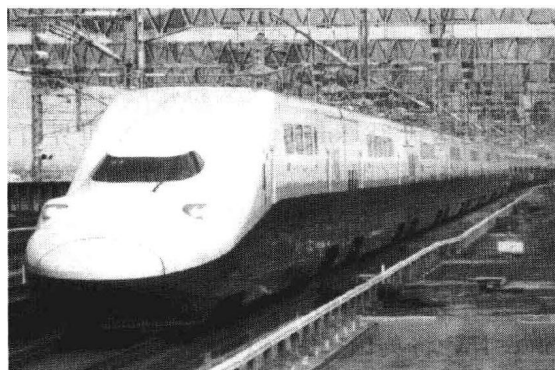
700系列新干线列车



800系列新干线列车



E2系列新干线列车



E4系列新干线列车

图 1-1 日本新干线高速动车组



图 1-2 德国 ICE 动车组

表 1-2 德国高速动车组技术特征

| 型 号 | ICE1 | ICE2 | ICT | ICE3 | ICETD |
|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|---------------|-----------------|
| 投入运营时间 | 1991 年 | 1998 年 | 1999 年 | 2002 年 | 2001 年 |
| 投入总量/列 | 59 | 44 | 32 | 37 | 21 |
| 牵引方式 | 动力集中， 头车和尾车为 动车 | 动力集中， 头车为动车， 尾车为控制车 | 动力分散 | 动力分散， 两动两拖 | 内燃，动力 分散，全动车 |
| 编组 | 2 动 12 拖 | 1 动 7 拖 | 2 动 5 拖 | 4 动 4 拖 | 每单元 4 节车 |
| 列车全长/m | 305~410 | 205 | 184 | 200 | 106.7 |
| 总牵引功率/MW | 9.6 | 4.8 | 4.0 | 8.0 | 1.66 |
| 最高运行速度/(km/h) | 280 | 280 | 230 | 330 | 200 |

1.3.3 法国 TGV 高速列车

TGV，全名为“Train à Grande Vitesse”，即高速列车。从 1966 年开始，法国国营铁路开始研究高速铁路，他们首先尝试把航空燃气涡轮发动机用于列车上，1972 年最高试验速度达到 381km/h，由于第一次世界石油危机，法国开始将高速列车技术转向电力牵引（图 1-3）。1983 年法国第一条高速铁路——巴黎东南线——投入运营，采用 TGV-PSE 号高速列车，最高运行速度达到 270km/h。1989 年 11 月，TGVA（大西洋号）投入运营，并于 1990 年 5 月以 515.3km/h 的运行速度创下了当时的世界新纪录，TGVE（欧洲之星）主要是针对英吉利海峡隧道设计，将英国、法国和比利时三国连接起来。欧洲之星于 1993 年投入运营，最高运行速度为 300km/h。此外，还包括 TGV-PBA（国际高速），最高时速为 320km/h，是继欧洲之星后真正意义上的国际高速；TGVD 为高速双层旅客列车，它满足了法国日益增长的客运需求。法国 TGV 高速均采用了铰接式转向架，使重量和性能显著优化。法国 TGV 动车组主要技术参数见表 1-3。

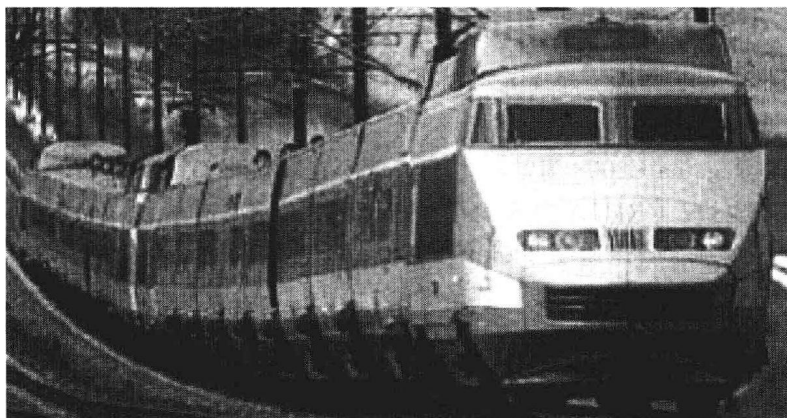


图 1-3 法国 TGV 高速列车

表 1-3 法国 TGV 动车组主要技术参数

| 车型 | TGV-PSE | TGV-A | TGV-R | TGV-TMST | AVE | TGV-PBKA | TGV-K (出口韩国) | TGV-2n |
|---------------|---------|--------|-------|----------|------|----------|-----------------|--------|
| 编组 | | | | | | | | |
| 车长/m | 200.12 | 237.59 | 200.2 | 393.72 | 200 | 200 | 387.43 | 200.19 |
| 车重/t | 418 | 479 | 416 | 787 | 420 | 418 | 774 | 424 |
| 定员/人 | 368 | 485 | 377 | 794 | 329 | 377 | 1000 | 545 |
| 最高运行速度/(km/h) | 270 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 轮周额定功率/kW | 6800 | 8800 | 8800 | 12200 | 8800 | 8800 | 13200 | 8800 |

1.4 中国的高速列车^[5~8]

中国铁道部将所有引进国外技术、联合设计生产的 CRH 动车组车辆均命名为“和谐号”。通常用来指 2007 年 4 月 18 日起在中国铁路第六次提速调图后开行的 CRH 动车组列车。CRH 为英文缩写，全名 China Railways High-speed，中文意为“中国铁路高速”，是中国铁道部对中国高速铁路系统建立的品牌名称。中国铁路开行的 CRH 动车组已知有 CRH1，CRH2，CRH3，CRH5 等型；以 A、B、C、E 为速度等级：

- A—运行速度 200km/h，8 编组，座车；
- B—运行速度 200km/h，16 编组，座车；
- C—运行速度 300km/h，8 编组，座车；
- E—运行速度 250km/h，16 编组，卧铺车。

1.4.1 CRH1 型动车组

由中国南车集团四方机车车辆股份有限公司与加拿大庞巴迪的合资公司——青岛四方-庞巴迪铁路运输设备有限公司（BST）生产。原型车以庞巴迪为瑞典 AB 提供的 Regaina C2008 为基础，全部动力在车底下，动力分散，启动加速度很快，停车也快。CRH1A 由 8 辆车组成，5 动 3 拖，首尾设司机室，可双向驾驶，200km 级别（营运速度 200km/h，最高速度 250km/h）。CRH1B 为 16 节大编组座车动车组。CRH1E 为 16 节车厢的大编组卧铺动车组（图 1-4）。

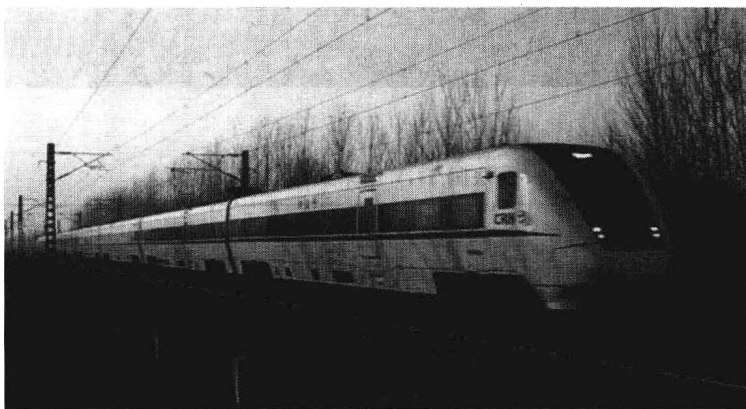


图 1-4 CRH1 动车组

CRH1 技术参数如下。

编组型式 8 辆编组，可两编组连挂运行。

动力配置 5 动 3 拖， $2(2M+1T)+(1M+1T)$

基础制动方式 每节动车 8 个轮装制动盘，每节拖车 8 个轴装制动盘。

定员（人） 670。

最高运营速度/（km/h） 200。

最高试验速度/（km/h） 250。

适应轨距/mm 1435。

传动方式 交直交。

牵引功率/kW 5500。

编组长度及质量 213.5m，420.4t。

车体材料 不锈钢。

头车车辆长度/m 26.95。

中间车辆长度/m 26.6。

车辆宽度/m 3.328。

车辆高度/m 4.04。



转向架轴质量/t ≤ 16 。

转向架轮径(新/旧)/mm 915/835。

转向架固定轴距/m 2.7。

转向架质量 动车大约 8.2t, 拖车大约 6.3t。

制动盘尺寸/mm $\phi 640 \times 80$ 。

制动盘摩擦半径/mm 247。

牵引电动机 265kW。

启动加速度/(m/s^2) 0.6。

制动方式 直通式电空制动。

紧急制动减速度/(m/s^2) 1.2。

常用制动减速度/(m/s^2) 0.8。

停放制动 确保最大正常载重的列车在 30‰坡度上停车。

紧急制动距离/m(制动初速度 200km/h) ≤ 2000 。

1.4.2 CRH2 型动车组

由中国南车集团四方机车车辆股份有限公司联合日本川崎重工, 引进川崎重工的新干线 E2-1000 型动车组技术, 南车四方机车车辆股份有限公司负责国内生产。CRH2A 为 8 节车厢编组座车动车组, 200km 级别(营运速度 200km/h, 最高速度 250km/h)。CRH2B 为 16 节大编组座车动车组, CRH2E 为 16 节大编组卧铺动车组。CRH2C 由 8 辆车组成, 4 动(M) 4 拖(T), 首尾设司机室, 可双向驾驶, 300km 级别, 作为京津城际高速铁路的用车, 标称时速 300km, 最高营运时速为 350km(图 1-5)。



图 1-5 CRH2 动车组

CRH2 技术参数如下。

编组型式 8 辆编组，可两编组连挂运行。

动力配置 4 动 4 拖。

基础制动方式 每节动车 8 个轮装制动盘，
每节拖车 8 个轴装制动盘+8 个轮装制动盘。

定员/人 670。

最高运营速度/(km/h) 200。

最高试验速度/(km/h) 250。

牵引功率/kW 4800。

编组长度及质量 201.4m, 345t。

头车车辆长度/m 25.7。

中间车辆长度/m 25。

车辆宽度/m 3380。

车辆高度/m 3.7。

转向架轴重/t ≤ 14 。

转向架轮径(新/旧)/mm 860/790。

转向架固定轴距/m 2.5。

转向架重 动车大约 7.5t, 拖车大约 6.8t。

制动盘尺寸/mm 轮装制动盘 $\phi 720 \times 133$; 轴装制动盘 $\phi 670 \times 97$ 。

牵引电动机 300kW。

启动加速度/(m/s^2) 0.406 (至 50km/h)。

制动方式 直通式电空制动。

紧急制动减速度/(m/s^2) 1.122。

常用制动减速度/(m/s^2) 0.8。

紧急制动距离/m(制动初速度 200km/h) ≤ 1800 。

1.4.3 CRH3 型动车组

由中国北车集团唐山轨道客车有限责任公司联合德国西门子，引进德国西门子 ICE3 (VELARO-E) 技术，由唐山轨道客车有限责任公司负责国内生产。CRH3C 由 8 辆车组成，4 动 (M) 4 拖 (T)，300km 级别 (营运速度 330km/h，最高速度 380km/h)，作为京津高速铁路的用车。CRH3D 为 16 节车厢的大编组座车动车组 (图 1-6)。

CRH3 技术参数如下。

编组型式 8 辆编组，可两编组连挂运行。

动力配置 CRH3C 4 动 4 拖；CRH3D 8 动 8 拖。