

文章编号: 1674—8247(2019)02—0014—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.02.004

## 高寒山区长大坡道铁路列车下坡限速研究

任 冲

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**为保证列车运行安全,在长大坡道上必须对列车的下坡速度加以限制,它是计算区间运行时分和制定司机操纵策略的依据,而在高寒山区长大坡道上,列车的速度不仅受坡度影响,与气候条件也有一定关系。文章以30‰长大坡道铁路为例,分别对HXD<sub>2</sub>双机牵引2 800 t货物列车、HXD<sub>1A</sub>双机牵引1 200 t旅客列车的下坡限速进行研究。通过分析在雨雪天气轨面潮湿情况下,粘着系数下降对列车制动的影响,按照分段累加法确定出紧急制动距离下的列车限速。根据相关实验数据,分析货物列车下坡调速制动过程中的闸瓦温升情况。最终研究得出:在30‰的坡道上,货物列车下坡限速宜为65 km/h,旅客列车下坡限速宜为110 km/h。研究结论对同类型的高寒山区铁路设计具有一定的借鉴意义。

**关键词:**高寒山区;长大坡道;下坡限速;粘着系数;紧急制动

中图分类号:U292.4<sup>+</sup>3

文献标志码:A

## Study on Speed Limit of Downhill Trains on Long-slope Railways in Alpine and Cold Region

REN Chong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To ensure the safety of railway operation, the speed of the train in operation on the steep and long slopes should be strictly restricted. This restriction / limitation of speed is the basis for calculation of the travel time and also for development of control strategies for drivers. On long-slope railways in alpine and cold region, the speed of trains is not only affected by slope, but also related to climatic conditions. The article takes long-slope of 30‰ as an example. The other assumptions for this study are as follows: the freight train is driven by HXD<sub>2</sub> electric locomotive with maximal load of 2 800 t. The passenger train is driven by HXD<sub>1A</sub> electric locomotive with maximal load of 1 200 t. The analysis of the speed limitations bases on those two types of trains. Under a certain loading weight, the speed limitation for freight trains is both restricted by the emergency braking distance and the temperature increasing of the braking shoes; the speed limitation for the passenger trains is only restricted by the emergency braking distance. The correlation between the adhesion coefficient and the braking force is analyzed by accumulating the calculation results from separate sections. Based on the relevant experimental data, the problem of the temperature increasing of the wheel and braking shoes is analyzed. Combined with the above aspects, the research eventually got the conclusion: on the railway with long-slope of 30‰, the speed limitation of freight train should be 65 km/h, and for the passenger train should be 110 km/h. The

收稿日期:2018-11-08

作者简介:任冲(1982-),女,高级工程师。

引文格式:任冲. 高寒山区长大坡道铁路列车下坡限速研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(2):14-18.

REN Chong. Study on Speed Limit of Downhill Trains on Long-slope Railways in Alpine and Cold Region [J]. High Speed Railway Technology, 2019,10(2):14-18.

research results have some reference and significance for the railway design in alpine and cold region.

**Key words:** alpine and cold region; long-slope; downhill speed limit; adhesion coefficient; emergency braking

在长大坡道上,为充分保证列车运行安全,必须对列车的下坡限速进行严格控制。现行 TG/01A-2017《铁路技术管理规程》(普速铁路部分)(以下简称《技规》)第 261 条规定了 0~20‰坡道的下坡限速,而对超过 20‰的坡道,只规定其列车限速由铁路局根据实际试验确定<sup>[1]</sup>。西南山区铁路线路多会采用 24‰或 30‰的加力坡,且受高寒山区气候条件的影响,实际运营条件更恶劣,对列车的制动力影响较大,因此,有必要对高寒山区长大坡道列车下坡限速进行研究。本文以高寒山区铁路 30‰长大坡道为例,结合 TB/T 1407.1-2018《列车牵引计算》(以下简称《牵规》),不考虑其他相关因素,理论计算货物列车采用 HXD<sub>2</sub> 双机牵引、最大牵引质量 2 800 t,旅客列车采用 HXD<sub>1d</sub> 双机牵引、最大牵引质量 1 200 t 情况下,研究列车粘着力与制动力的关系、空气制动闸瓦温升的影响等,得出不同制动距离对应的下坡限速。为合理布置车站、计算区间通过能力提供依据,指导铁路线路的设计工作,并给机车司机提出合理的驾驶及制动操纵方面的建议。

1 列车制动率的分析

1.1 粘着系数下降对列车制动率的影响

列车制动率的取值主要与粘着制动力或粘着制动系数有关。计算制动力不能超出粘着制动力的限制,因此,制动率的选取应慎重。根据《牵规》,潮湿轨面下制动粘着系数大幅度下降。据此可算出不同粘着系数下粘着制动力的数值,以及给定制动率下制动力与粘着制动力的关系。文中的列车制动力采用实算法进行计算。

《牵规》中由闸瓦压力产生的列车制动力,计算方法有 2 种<sup>[6]</sup>。

(1)实算法。以列车中每种一块闸瓦实算压力  $K$  值之和与各该  $K$  值所对应的实算摩擦系数  $\varphi_k$  的乘积总和来计算,见式(1)。

$$B = \sum (\varphi_k \times \sum K) \tag{1}$$

(2)换算法。为了不涉及摩擦系数与闸瓦压力的变化关系以简化计算,用列车中闸瓦的换算闸瓦压力之和  $\sum K_h$  与该种闸瓦的换算摩擦系数  $\varphi_h$  乘积进行计算,见式(2)。

$$B = \varphi_h \times \sum K_h \tag{2}$$

按照现行《技规》的要求,货物列车闸瓦压力应满足 1.50 kN/t(中磷闸瓦),旅客列车闸瓦压力应满足 1.17 kN/t(高摩 H 合成闸瓦)。根据相关研究成果,不同摩擦材料换算闸瓦压力的二次换算系数,如表 1<sup>[2]</sup>所示。依据该系数,可对不同类型闸瓦情况下的列车制动力进行计算。

表 1 不同摩擦材料换算闸瓦压力的换算系数

类别基型	中(高)磷闸瓦	高摩合成闸片
中磷(高磷)闸瓦	1	0.42
低摩合成闸瓦	0.8	0.38
高摩合成闸瓦	2.0	0.9
高摩合成闸片	2.2	1

受气候条件影响,在雨雪天气,线路轨面粘着系数会有一定下降,有可能会有粘着制动力小于列车制动力,这时就可能出现制动时车轮抱死、列车滑动,无法控制列车速度的危险情况。因此,应分析列车粘着制动力的变化情况。

(1)HXD<sub>2</sub>(25t)型电力机车在所述编组条件下,制动率采用 0.35(根据 1998 年对宝成铁路重车的调查结果,600 kPa 时,列车换算制动率大部分为 0.34~0.35<sup>[2]</sup>),考虑轨面潮湿条件下,不同速度的车列粘着制动力与计算制动力,如表 2<sup>[3]</sup>所示。

表 2 HXD<sub>2</sub> 粘着制动力与计算制动力

速度/(km/h)	50	60	80	100	120
潮湿轨面粘着系数	0.12	0.12	0.11	0.10	0.10
粘着制动力/kN	3 534.05	3 403.93	3 182.55	3 001.45	2 850.62
中磷闸瓦摩擦系数	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10
中磷制动力/kN	1 371.45	1 314.03	1 238.73	1 191.55	1 159.20
高磷闸瓦摩擦系数	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
高磷制动力/kN	1 329.47	1 313.20	1 292.63	1 280.14	1 271.77

由表 2 可以看出,在 120 km/h 速度范围内,无论是采用中磷闸瓦还是高磷闸瓦,车列的粘着制动力均高于计算制动力。另外,HXD<sub>2</sub> 型机车的最大电制动力为 510 kN,2 台机车为 1 020 kN,考虑电制动力后,仍不会超过粘着制动力。因此,HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货物列车,制动率取 0.35 时在潮湿轨面条件下,采用中磷或高磷闸瓦,粘着系数的下降都不会对列车制动力产生影响。

(2)HXD<sub>1d</sub>型电力机车在前述编组条件下,根据式(1)和表 1 的换算系数进行计算,制动率取 0.42 时,计算制动力与粘着制动力的比较,如表 3 所示。从表中可以看出,HXD<sub>1d</sub>双机牵引 1 200 t 旅客列车,在制动率取 0.42 的条件下,干燥轨面时,无论高摩合成闸片还是高摩合成闸瓦,列车制动力都没有超过粘着制动力。即使考虑最大电制动力(420 kN),也不会超过

干燥轨面下的粘着制动力。但在潮湿轨面时,采用高摩合成闸瓦,160 km/h 的计算制动力(1 049 kN)超出了粘着制动力(1 045.38 kN),150 km/h 及其以下速度的,计算制动力在粘着制动力范围内。若采用于高摩合成闸片,60~160 km/h 的所有计算制动力均超过了粘着制动力。因此,应适当降低制动率。降低制动率后的计算制动力与粘着制动力,如表 4 所示。

表 3 HXD<sub>1d</sub>粘着制动力与计算制动力的比较(制动率 0.42)

速度/(km/h)	60	80	100	120	130	140	150	160
干燥轨面粘着系数	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17
干燥轨面粘着制动力/kN	2 409.62	2 311.1	2 223	2 145.02	2 108.84	2 074.46	2 041.77	2 010.62
潮湿轨面粘着系数	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
潮湿粘着制动力/kN	1 361.57	1 273	1 201	1 140.25	1 113.67	1 089.16	1 066.46	1 045.38
高摩合成闸瓦摩擦系数	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
无电制动制动力/kN	1 237.00	1 180	1 136	1 101.06	1 086.14	1 072.61	1 060.28	1 049.00
高摩合成闸片摩擦系数	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24
无电制动制动力/kN	1 375.29	1 312	1 263	1 224.16	1 207.57	1 192.53	1 178.82	1 166.28

表 4 HXD<sub>1d</sub>粘着制动力与计算制动力(高摩合成闸瓦制动率 0.4,高摩合成闸片制动率 0.37)

速度/(km/h)	60	80	100	120	130	140	150	160
潮湿轨面粘着系数	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
潮湿粘着制动力/kN	1 361.57	1 273.02	1 200.58	1 140.25	1 113.67	1 089.16	1 066.46	1 045.38
高摩合成闸瓦摩擦系数	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
无电制动制动力/kN	1 178.09	1 123.80	1 081.92	1 048.63	1 034.42	1 021.53	1 009.79	999.05
高摩合成闸片摩擦系数	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24
无电制动制动力/kN	1 211.57	1 155.73	1 112.66	1 078.43	1 063.82	1 050.56	1 038.49	1 027.44

由表 4<sup>[4]</sup>可以看出,在潮湿轨面条件下,高摩合成闸瓦制动率采用 0.40,高摩合成闸片制动率采用 0.37 时,160 km/h 速度范围内列车的粘着制动力均高于计算制动力。因此,HXD<sub>1d</sub>牵引 1 200 t 旅客列车,采用高摩合成闸瓦时,制动率宜控制在 0.4 及以下,采用高摩合成闸片时,制动率宜控制在 0.37 及以下。

1.2 制动周期对列车制动率的影响

列车在长大下坡道运行时,若考虑使用空气制动,需要周期性进行充风缓解和排风制动,直至列车驶出坡道。如果列车制动能力不够,列车第一次制动后,需要一定的时间给副风缸充风,同时,实施制动后列车还有一个制动空走时间,如果列车经过这两个时间后,速度不超出制动限速,则列车可以通过周期制动控制速度。否则,列车速度可能超出制动限速,即使再采取制动,也可能失去控制。因此,在长大下坡道,列车制动能力必须保证在速度上升到制动限速之前的时间内完成列车充风和空走过程。列车编组、减压量与列车充

风时间和空走时间关系,如表 5 所示。

表 5 列车充风时间与空走时间

列车管减压量/kPa	编组辆数	空走时间/s	充风时间/s	总时间/s
60	20	11.2	26	37.2
80	20	12.6	36	48.6
100	20	14.0	46	60.0
120	20	15.3	56	71.3
140	20	16.7	65	81.7
60	30	13.3	35	48.3
80	30	15.3	49	64.3
100	30	17.4	63	80.4
120	30	19.5	76	95.5
140	30	21.5	90	111.5
60	40	15.3	45	60.3
80	40	18.1	49	67.1
100	40	20.9	63	83.9
120	40	23.6	76	99.6
140	40	26.4	90	116.4

根据表 5 推算,HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t,从 20 km/h 惰行到 100 km/h 消耗的时间,如表 6 所示。

表 6 HXD2(25 t) 惰行消耗时间

速度间隔/(km/h)	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100
惰行消耗时间/s	10.36	10.42	10.47	10.53	10.60	10.69	10.79	10.90	11.03

综合表 5、表 6 可以看出,列车速度 10 km/h 间隔内消耗时间基本在 10 s 左右,30 辆编组列车空走和充风总时间为 48.3 s,至少需要 5 个时间间隔,其最高限速不能低于 50 km/h。如果列车制动率太低,或者摩擦系数有限,则无法满足这一要求。由此可算出不同闸瓦和制动率下,HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货车,在 30‰坡道上满足周期制动要求的最小制动率,如表 7 所示。

表 7 HXD2(25 t) 牵引 2 800 t 货车周期制动要求

中磷闸瓦	制动率	制动限速/(km/h)	减压量/kPa	增速时间/s	要求最少时间/s
	0.35	53	140	42	113
	0.8	120	120	74.4	97.5
高磷闸瓦	0.8	120	110	73.8	90
高摩合成闸瓦	0.35	120	100	85.8	82.2
高摩合成闸片	0.35	120	100	86.4	82.2

由表 7 可知,HXD<sub>2</sub>(25 t) 牵引 2 800 t 货车,在 30‰坡道上进行周期制动空气制动时,中磷闸瓦和高磷闸瓦无法满足要求。高摩合成闸瓦和高摩合成闸片可以满足要求,但是制动率不少于 0.35。对于采用了电空混合制动的和谐电力机车,由于电制动力只与列车速度有关,与闸瓦材质无关,且不需要周期性充风,因此,优先推荐 HXD<sub>2</sub> 机车采用电制动。

对于 HXD<sub>1d</sub> 双机牵引 1 200 t 客运列车,采用制动率 0.4 的高摩合成闸瓦或制动率 0.37 的高摩合成闸片,制动能力较 HXD<sub>2</sub>(25 t) 牵引 2 800 t 的能力强很多,故无需验算。

综上分析, HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货运列车, HXD<sub>1d</sub> 双机牵引 1 200 t 客运列车,要适应 30‰的长大下坡道和恶劣的气候,合理的闸瓦与制动率选择,如表 8 所示。

表 8 列车编组和制动参数

机车(双机)	牵引重量	车辆闸瓦类型	列车制动率
HXD <sub>2</sub> (25 t)	2 800 t	高摩合成闸瓦	0.35
	2 800 t	高摩合成闸片	0.35
HXD <sub>1d</sub>	18 辆 T25(1 200 t)	高摩合成闸瓦	0.40
		高摩合成闸片	0.37

表 11 HXD<sub>1d</sub> 牵引 1 200 t 在 30‰限坡上的紧急制动距离 (m)

制动初速度/(km/h)	80	100	120	130	140	150	160
高摩合成闸瓦(制动率=0.40)	464.4	714.8	1 024.2	1 201.1	1 392.7	1 598.9	1 819.3
高摩合成闸片(制动率=0.37)	451.1	693	835.2	1 162.4	1 347.3	1 546.2	1 758.9

2 列车下坡限速研究

2.1 列车紧急制动距离限值

紧急制动距离是列车在任何线路上均能制动停车的距离限值,是保证列车安全运行的基础要求。《技规》中规定了各种列车的紧急制动距离,如表 9 所示<sup>[1]</sup>。

表 9 列车最高运行速度的紧急制动距离限值

列车类型	最高运行速度/(km/h)	紧急制动距离限制/m
客运列车	120	800
	160	1 400
货运列车	90	800
	120	1 400

在规定的紧急制动距离内,列车能够制动停车的最高速度,称为紧急制动限速。列车在 30‰坡道上运行,因坡度过大,《技规》既有的列车紧急制动限速失效<sup>[5]</sup>,应依据列车紧急制动距离确定限速。

2.2 列车紧急制动距离计算

一般情况下,制动距离可采用分段累加的方法进行计算<sup>[6]</sup>。即采用“枚举”的思路,分别计算列车在不同制动初速度下的紧急制动距离,得出列车紧急制动距离表<sup>[2]</sup>,再根据规定的紧急制动距离限值,试算列车在长大下坡道上的紧急制动初速度。根据表 7 列车编组和制动参数,可算出 HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货物列车,在 30‰坡道上的紧急制动距离,如表 10 所示<sup>[6]</sup>。

表 10 HXD<sub>2</sub> 牵引 2 800 t 在 30‰限坡上的紧急制动距离 (m)

制动初速	50	60	70	80	85	90
制动距离(中磷)	393	607.6	907.7	1 327.2	1 597.9	1 920.5
制动距离(高磷)	341.8	513.7	751.4	1 084.2	1 300.9	1 561.3

同理可得 HXD<sub>1d</sub> 双机牵引 1 200 t 旅客列车(采用高摩合成闸瓦,制动率取 0.4;采用高摩合成闸片,制动率取 0.37),在 30‰坡道上的紧急制动距离,如表 11<sup>[6]</sup>所示。

2.3 列车下坡限速确定

从表 10 中可以看到,在 30‰下坡道上, HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货物列车,保证 800 m 紧急制动距离,采用中磷闸瓦时速度不宜超过 65 km/h,采用高磷闸瓦时速度不宜超过 75 km/h;保证 1 400 m 紧急制动距

离,采用中磷闸瓦时速度不宜超过81 km/h,采用高磷闸瓦时速度不宜超过 86 km/h。虽然和谐型货运电力机车设计速度可达 120 km/h,但考虑到高寒山区铁路运输的安全性,以及目前货车紧急制动距离一般按 800 m 控制实际情况,建议 HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货物列车,保证 800 m 紧急制动距离下的限速为65 km/h。

从表 11 中可以看到,在 30‰下坡道上,HXD<sub>1d</sub>双机牵引 1 200 t 旅客列车,保证 800 m 的紧急制动距离,采用高摩合成闸瓦(制动率 0.40)时速度不宜超过 106 km/h,采用高摩合成闸片(制动率 0.37)时速度不宜超过 116 km/h;保证 1 400 m 的紧急制动距离,采用高摩合成闸瓦(制动率 0.40)时速度不宜超过 141 km/h,采用高摩合成闸片(制动率 0.37)时速度不宜超过 143 km/h。由此可知,采用高摩合成闸瓦和高摩合成闸片的紧急制动距离相差不大,本文建议 HXD<sub>1d</sub>双机牵引 1 200 t 旅客列车保证 800 m 紧急制动距离下的限速为110 km/h。

### 3 闸瓦温升对货物列车调速制动的 影响

列车在长大下坡道上运行时,需不断进行调速制动,以免在下坡道上超过限速。多次循环调速制动后,

车轮踏面和闸瓦温度将不断升高,会影响到行车安全。为保证行车安全,美国 AAR 规定:对于中磷铸铁闸瓦,车轮踏面温度应低于 343 ℃。而对于高摩合成闸瓦和高摩合成闸片没有限制<sup>[3]</sup>。因此,采用高摩合成闸瓦和高摩合成闸片的旅客列车,其下坡限速只由列车紧急制动距离决定,不存在闸瓦温升问题。对于货物列车来说,由紧急制动距离确定的下坡限速必须考虑闸瓦温升的影响。

根据相关研究<sup>[7]</sup>,在 30‰长大下坡道上,完全采用空气制动,列车限速 60 km/h 时,在经过 8 次周期性调速制动后,车轮踏面温度为 340 ℃,接近中磷铸铁闸瓦的限制温度;限速 75 km/h 时,空气制动时间延长,缓解时间缩短,经过 5 次调速制动后,车轮踏面温度达到 380 ℃,超过中磷铸铁闸瓦的限制温度。反之,若调速制动次数在 5 次以下,则闸瓦温升不会影响行车安全。

计算 HXD<sub>2</sub> 双机牵引2 800 t货物列车,制动率取 0.35,采用纯空气制动列车从 80 km/h 到 10 km/h 时缓解的单车制动调速情况。计算参数及结果如表 12 所示。

分析表 12 可以看出,在 30‰长大下坡道上,限速 80 km/h,一次调速制动走行距离为 6 395 m,若 30‰的连续长大下坡道不超过32 km,周期性连续制动不会

表 12 HXD<sub>2</sub> 列车空气闸瓦一次调速制动参数

牵引重量 /t	制动率	减压量 /kPa	制动时间 /s	制动距离 /m	惰行时间 /s	惰行距离 /m	总时间 /s	总距离 /m
2 800	0.35	90	280	5 475	74	920	354	6 395

超过 5 次,闸瓦温升不会影响行车安全<sup>[6]</sup>。在 30‰长大下坡道上,若限速 75 km/h,在站间距不大于 15 km 的情况下,列车在区间运行需经过 3 次调速制动,不会超过中磷铸铁闸瓦的限制温度<sup>[8]</sup>。同理,若限速 65 km/h时,当站间距小于 20 km 时,HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货物列车,区间运行需进行 3 次周期性调速制动,该过程中不会出现闸瓦温升失控的情况。

从以上分析可知,闸瓦温升与站间距和下坡限速密切相关,站间距越大,列车在区间运行所需调速制动周期越多;列车限速高,一次制动运行距离长,所需制动周期将相应减少。综合闸瓦温升和列车紧急制动限值可以确定,对于 30‰坡度,采用中磷闸瓦下坡运行速度宜控制在 65 km/h 及以下。

### 4 结论

(1) 在 30‰长大下坡道上, HXD<sub>2</sub> 双机牵引

2 800 t 货物列车,在紧急制动距离 800 m 条件下,列车下坡限速宜为 65 km/h;

(2) 在 30‰长大下坡道上, HXD<sub>1d</sub> 双机牵引 1 200 t 旅客列车,在紧急制动距离 800 m 条件下,列车下坡速度限速宜为 110 km/h;

(3) 在 30‰长大下坡道上, HXD<sub>2</sub> 双机牵引 2 800 t 货物列车,宜多采用电制动力进行列车调速制动,以尽量避免或缓解闸瓦温升过高问题;旅客列车的下坡限速只由列车紧急制动距离决定,不存在闸瓦温升问题。

### 参考文献:

[1] TG/01A-2017 铁路技术管理规程(普速铁路部分)[S].  
TG/01A-2017 Regulations of Railway Technical Operation (Normal Speed Railway)[S].

(下转第 37 页)

- Engineering Society, 2018, 35(9): 75-79.
- [2] 左清军, 吴友银, 闫天玺. 特大断面板岩隧道施工期围岩变形时空效应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 233-243.  
ZUO Qingjun, WU Youyin, YAN Tianxi. Analysis of Time-space Effect for Surrounding Rock Deformation in Super-large Cross Section Slate Tunnel during Construction Period[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 233-243.
- [3] 王维富. 炭质板岩地层隧道施工要点及大变形防治措施[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 697-700.  
WANG Weifu. Key Points and Large Deformation Control in Construction of Tunnel in Carbonaceous Slate[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 697-700.
- [4] 杜耀辉. 炭质板岩大变形隧道结构受力特性及变形控制技术研究[D]. 长安大学, 2017.  
DU Yaohui. Research on Mechanical Behavior and Deformation Control Technology of Carbonaceous Slab Tunnel with Large Deformation[D]. Chang'an University, 2017.
- [5] 杨生伟. 板岩地层客运专线大断面隧道施工安全控制关键技术研究[D]. 石家庄铁道大学, 2016.  
YANG Shengwei. Study on the Key Technology about Large Section Tunnel Construction Safety Control of the Slate Formation of Passenger Dedicated Line[D]. Shijiazhuang Railway University, 2016.
- [6] 王锦华. 炭质板岩隧道大变形及施工工法研究[D]. 北京交通大学, 2014.  
WANG Jinhua. Study of the Large Deformation and the Construction Methods for Carbonaceous Slate Tunnel[D]. Beijing Jiaotong University, 2014.
- [7] 邵广宇. 高地应力下板岩隧道施工工法探讨[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(1): 83-86.  
SHAO Guangning. Discussion on Construction Method of Slate Tunnel under High Ground Stress[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(1): 83-86.
- [8] 王更峰. 炭质板岩蠕变特性研究及其在隧道变形控制中的应用[D]. 重庆大学, 2012.  
WANG Gengfeng. Creep Characteristics of Carbonaceous Slate and Its Application in Tunnel Deformation Control[D]. Chongqing University, 2012.
- [9] 包宏涛. 深埋板岩隧洞围岩力学特性研究[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007.  
BAO Hongtao. Study on Mechanical Characteristics of Surrounding Rock of Deep Buried Slate Tunnel[D]. Institute of Rock and Soil Mechanics (Chinese Academy of Sciences), 2007.
- [10] 杜雁鹏. 软质板岩隧道大变形力学行为与控制技术研究[D]. 中南大学, 2011.  
DU Yanpeng. Research on Large Deformation Mechanics Behavior and Control Technology of Soft Slate Tunnel[D]. Central South University, 2011.
- [11] 刘建国, 王春明, 薛宁鸿, 等. 强膨胀岩浅埋富水隧道变形分析及施工控制[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 84-89.  
LIU Jianguo, WANG Chunming, XUE Ninghong, et al. Deformation Analysis and Construction Control of Heavily Expansive Rock Tunnels with Shallow-buried Rich Water[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 84-89.

(编辑:赵立红 苏玲梅)

(上接第18页)

- [2] 马国忠. 轨道交通运载工具与列车牵引计算[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2011.  
MA Guozhong. Rail Transit Vehicle and Train Traction Calculation[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [3] 中铁二院工程集团有限责任公司. 川藏线计算报告[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司, 2014.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. The Study and Calculation Report of Train Running on the Long and Steep Slope of Sichuan Tibet Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2014.
- [4] 黄问盈, 杨宁清, 黄民. 我国铁道列车紧急制动距离限值核定原则的探讨[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 79-88.  
HUANG Wenying, YANG Ningqing, HUANG Min. Discussion on the Principle of Limiting the Value of the Emergency Braking Distance of the Railway Train in China[J]. China railway science, 2003, 24(3): 79-88.
- [5] 饶忠. 关于长大下坡道列车制动限速的确定[J]. 铁道车辆, 1984, 22(2): 33-35.  
RAO Zhong. The Determination of Train Speed Limit for Trains Running on the Long and Steep Slope[J]. Railway Vehicles, 1984, 22(2): 33-35.
- [6] TB/T 1407.1-2018 列车牵引计算 第1部分:机车牵引式列车[S].  
TB/T 1407.1-2018 Railway Train Traction Calculation-Part 1: Trains with Locomotives[S].
- [7] 中铁二院工程集团有限责任公司, 西南交通大学. 高寒山区长大坡道对铁路运输能力的影响研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司, 西南交通大学, 2015.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Southwest Jiaotong University. A Study of Railway Transport Capacity on the Long and Steep Slope in High-altitude Mountainous Areas[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Southwest Jiaotong University, 2015.
- [8] 中铁二院工程集团有限责任公司, 西南交通大学. 复杂艰险山区铁路避难线设计问题研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司, 西南交通大学, 2015.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Southwest Jiaotong University. Study on Evacuation Line Design Problem Hard Mountain Railway Complex[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Southwest Jiaotong University, 2015.

(编辑:苏玲梅)