

# 连续配筋混凝土路面温度场研究及 设计参数敏感性分析

骆成

(湖北工程学院 土木工程学院,湖北 孝感 432000)

**摘要:**针对现有研究较少关注温度场形成条件对连续配筋混凝土路面(CRCP)结构设计参数影响的不足,依托南方某实体路面结构,以工程传热理论和有限元(FE)方法为指导,利用 Fortran 语言编制的热力学边界条件子程序拓展有限元软件 Abaqus 的主程序功能,对 CRCP 的温度场进行了仿真模拟,对钢筋埋置位置的温降幅值和正、负温度梯度等设计参数的敏感性进行了分析。计算结果表明:① CRCP 板厚越大,正、负温度梯度越小;② 钢筋埋置位置越深,温降幅值越小;③ 水泥混凝土的热传导率越大,正温度梯度越大,负温度梯度减小,温降幅值变化不大;④ 两个温度参数(温降幅值、温度梯度)均随水泥混凝土比热容的增大而减小。

**关键词:**连续配筋混凝土路面;温降幅值;温度梯度;温度场;有限元

连续配筋混凝土路面(CRCP)是一种使用寿命长、养护费用少、整体性好、承载力高的路面结构形式。由于水泥混凝土材料的抗拉强度很低,在温缩、干缩和温度梯度等外荷载作用下,CRCP 容易产生横向裂纹。在重载交通的作用下,横向裂缝处的混凝土和骨料剥落,裂缝变宽,当雨水从横向裂缝和路面边缘处浸入基层后,会引起边缘冲断破坏。因此,国内外设计规范主要将温降幅值( $\Delta T$ )和温度梯度作为 CRCP 的结构设计参数。由于温度设计参数与温度场密切相关,因此需要围绕温度场的形成机理,对温度设计参数进行研究。现有刚性路面温度场的研究大多基于实测,对其影响因素的变量研究具有不可控性。基于经典弹性理论的刚性路面温度场研究方法忽略了钢筋网片的影响,将 CRC 板简化为二维连续均匀介质。因此,利用 Abaqus 研究 CRCP 的三维温度场理论可信度更高,变量参数的调节也更加方便。

路面通过导热换热、与大气对流换热和吸收太阳辐射能的方式形成温度场。由于它随时间周期性变化,年代表性最高气温和最低气温形成温降幅值( $\Delta T$ );温度场沿深度方向分别形成了温度梯度。温度场的求解有实测法、有限差分法和有限元法。由于有限元软件 Abaqus 在相关领域应用较为成熟,该文明

用 Fortran 语言编制路面热力学边界条件的子程序,利用子程序扩展 Abaqus 主程序功能,然后通过实测对比调试参数,实现对 CRCP 温度场的仿真模拟。通过调节各个参数的取值范围,研究 CRCP 厚度、钢筋位置和水泥混凝土材料热力学性质对  $\Delta T$ 、温度梯度的影响规律。

## 1 CRCP 有限元模型

### 1.1 模型基本尺寸

依据文献[3]的某实体路面结构,建造了 CRCP 的三维数值仿真模型。CRCP 厚 0.18 m,水泥稳定基层厚 0.20 m,路床深度取 0.80 m。网格划分后的效果图见图 1。

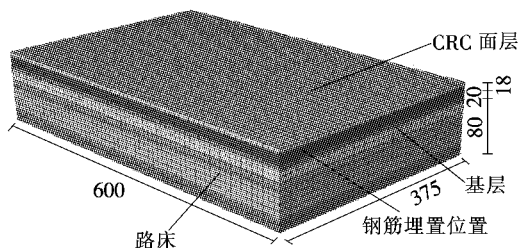


图1 CRCP 有限元模型(单位:cm)

收稿日期:2019-10-07(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51508425)

作者简介:骆成,男,硕士。E-mail:ricky6688@163.com

钢筋网片布置在板中位置,利用植入单元工具嵌入混凝土板,假设混凝土与钢筋连续接触,完全固定(图 2)。

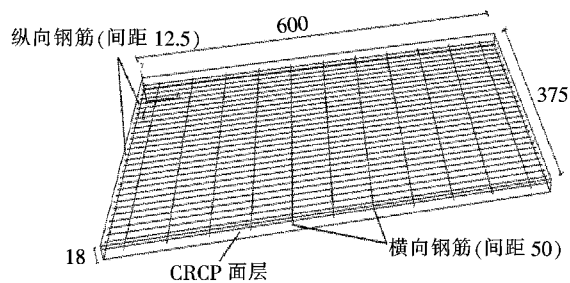


图 2 CRCP 钢筋网布置图(单位:cm)

1.2 温度场的形成条件

CRCP 温度场的形成机理主要有:传导热交换、对流热能交换、太阳热能辐射和路表有效辐射。传导热交换指路面结构内部,热能沿着负温度梯度方向传递,它的传热遵守傅里叶热传导定律。CRCP 的导热系数取值范围为  $1.40 \sim 2.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。对流热能交换指 CRCP 表面与空气流之间的热能交换,CRCP 面板的对流放热系数在高、低温季节分别取  $19.0$ 、 $23.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。对流热能交换用有限元软件的 Surface film condition 功能来实现。依据谈至明等提出的不同周期的正弦波组合曲线,用 Fortran 语言编写 FILM 子程序,然后用子程序扩展 Abaqus 主程序功能,定义 CRCP 表面 24 h 的温度变化和对流换热。太阳热能辐射主要来自于太阳的短波辐射,CRCP 面板的辐射能吸收系数取  $0.62$ 。在有限元软件的 Surface heat flux 功能中,依据太阳辐射能密度的傅里叶级数展开式函数,编制 DFLUX 子程序,实现短波辐射能的定义。级数的阶数取 50 以上实现计算结果的较高精确度。路表有效辐射指 CRCP 板面释放的长波辐射和吸收的逆长波辐射之差。利用有限元软件的 Surface radiation 功能,绘制气温随时间的变化曲线,实现有效辐射的定义。使用 Surface radiation 功能时,黑度  $\epsilon$  取值为  $0.88$ ,Stefan—Boltzmann 系数  $\sigma$  取值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,绝对零度取值为  $-273 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3 大气和环境参数

大气温度的测定。按照文献的要求,将测量精度为  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  的酒精温度计,放置在距地表  $1.50 \text{ m}$  高度的百叶箱内,测量 8 月和 12 月的 24 h 代表性气温,其结果见表 1。表 2 为高、低温季节的气象参数。

表 1 高、低温季节 24 h 代表性气温( $\Delta T=64 \text{ }^\circ\text{C}$ )

时刻	代表性气温/ $^\circ\text{C}$		时刻	代表性气温/ $^\circ\text{C}$	
	8 月	12 月		8 月	12 月
00:00	32.5	-13.9	12:00	42.5	4.6
02:00	30.1	-18.3	14:00	44.0	7.0
04:00	29.0	-20.0	16:00	43.0	5.0
06:00	30.4	-17.5	18:00	40.5	0.8
08:00	34.1	-10.9	20:00	37.9	-4.1
10:00	38.8	-2.3	22:00	35.3	-9.1

表 2 高、低温季节气象参数

时间	太阳日辐射量/ ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	日照时间/ h	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
8 月	26.1	12.1	2.5
12 月	1.6	10.2	3.5

1.4 材料参数和网格划分

CRCP 的材料参数如表 3 所示。钢筋的直径为  $16 \text{ mm}$ ,纵向钢筋间距  $125 \text{ mm}$ ,纵向配筋率为  $0.90\%$ 。其他结构尺寸参见图 1。

表 3 CRCP 的材料参数

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	热传导率/ $[\text{J} \cdot$ ( $\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	比热容/ $[\text{J} \cdot$ ( $\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$
面层	2 400	6 300	973
基层	2 100	5 616	912
路基	1 800	5 500	1 040
HRB335 筋	7 800	125 640	520

CRCP 的面层、基层和路基的网格类型采用 DC3D8;钢筋网格类型采用 DC1D2。定义种子密度时,面层、基层和路基为  $10 \text{ cm}$ ,钢筋为  $5 \text{ cm}$ ,总计单元数量为  $31\,000$  个。

2 温度场计算和验证

2.1 温降幅值和温度梯度

定义 CRCP 路基地部的初始温度为  $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,进行瞬态热分析,计算周期为  $96 \text{ h}$ ,第 4 个周期的计算结果趋于稳定。绘制第 4 个周期温度场沿深度方向的分布曲线如图 3 所示。

由图 3 可知:CRCP 面层中间位置的最高温度为  $47.20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最低温度为  $-12.40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,计算温降幅值  $\Delta T$  为  $59.60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,比规范取值( $64.0 \text{ }^\circ\text{C}$ )小,这是因为钢筋

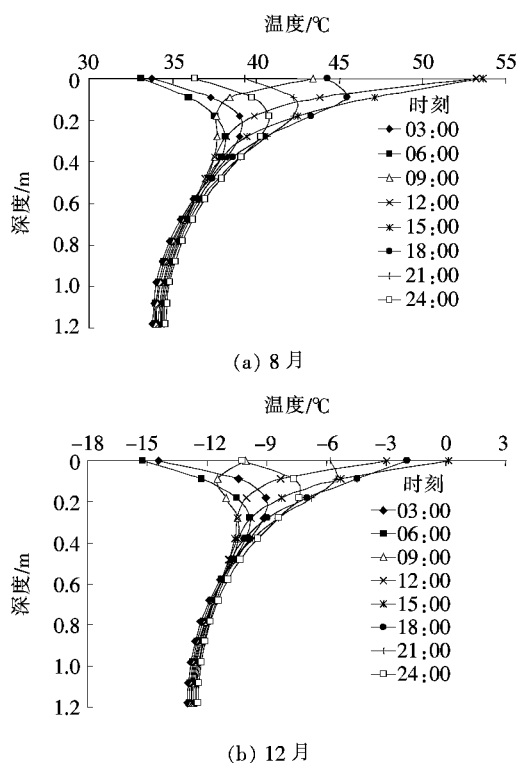


图 3 CRCP 温度场沿深度方向的分布

上面的水泥混凝土材料具有一定隔热保温的效果。因此,针对钢筋网片上部有 9 cm 混凝土保护层厚度的 CRCP 结构,温降幅值建议取  $60^{\circ}\text{C}$ 。由于计算所用的 CRCP 厚度为规范建议最小值,故针对保护层厚度更大或者 CRCP 加铺沥青混凝土面层的结构,温降幅值的折减幅度应依据计算结果放大。

绘制第 4 个周期 CRCP 面层温度梯度随时间的变化曲线如图 4 所示。

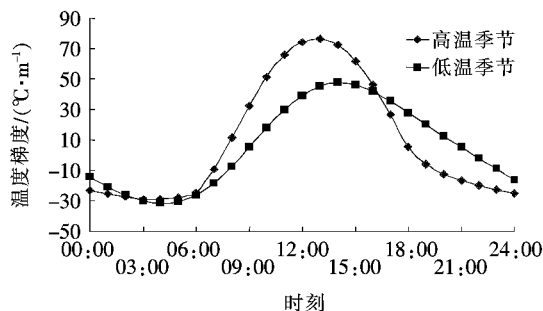


图 4 CRC 板高、低温季节的温度梯度

由图 4 可知:① 高温季节的最大正温度梯度为  $76.50^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,发生在 13:00;最大负温度梯度  $-29.30^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,发生在 03:00;② 低温季节的最大正温度梯度为  $46.60^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,发生在 14:00;最大负温度梯度  $-31.60^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,发生在 04:00。

## 2.2 计算结果验证

文献[12]对 AC+CRCP 的温度分布情况和环境数据进行了实测。采用相同的建模方法,调整沥青层的太阳辐射吸收系数为 0.85,调整黑度为 0.93,将距离路面 0、6、24 cm 的温度实测数据,与 Abaqus 的计算数据进行对比分析,绘制对比验证曲线见图 5。

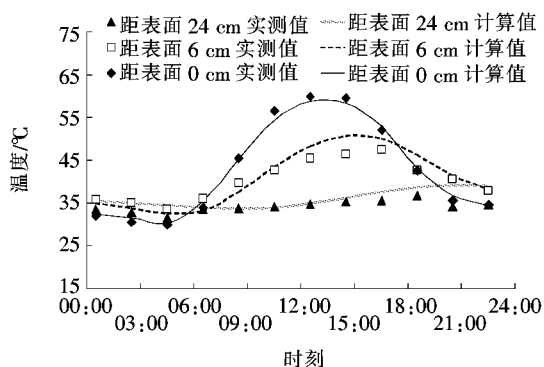


图 5 计算结果的验证

由图 5 可知:模型的计算值和温度实测值最大误差为  $3.7^{\circ}\text{C}$ ,说明模型参数的设置比较合理,计算结果具有一定的可信度。由于直接测量相同路面结构的温度会耗费大量时间和物力,因此采用的验证只是对建模方法的相对合理性进行说明。

## 3 设计参数的敏感性分析

### 3.1 CRCP 板厚的影响

CRC 板的厚度变化对最大温降幅值的影响不大,对温度梯度的影响明显(图 6)。由图 6 可知:最大正、负温度梯度随厚度的增加而减小。

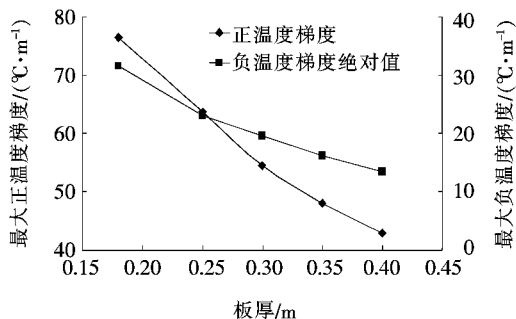


图 6 板厚对正、负温度梯度的影响

### 3.2 钢筋位置的影响

板厚取 0.35 m,计算钢筋不同位置处的最大温降幅值  $\Delta T$  如图 7 所示,由图 7 可知:随钢筋埋置加深,  $\Delta T$  减小。

3.3 水泥混凝土热传导率的影响

调整水泥混凝土热传导率  $K$  的取值范围为  $0.5 \sim 1.75 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , 温降幅值和正、负温度梯度随  $K$  的变化曲线如图 8、9 所示。

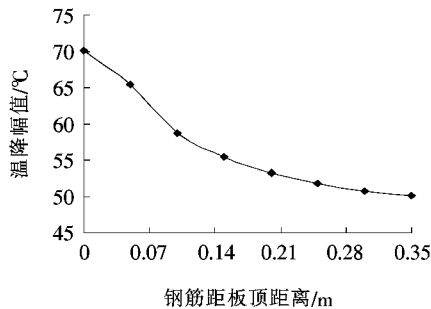


图 7 钢筋位置对温降幅值的影响

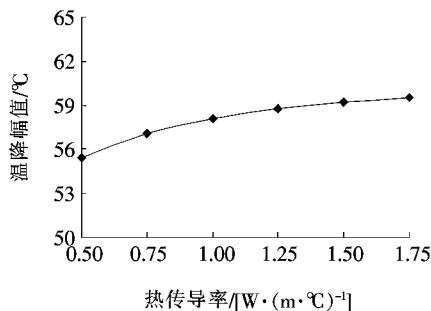


图 8 混凝土热传导率对温降幅值的影响

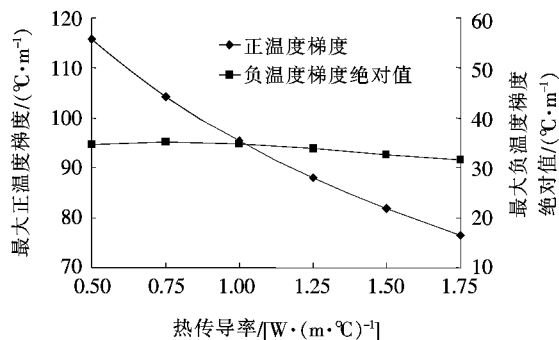


图 9 混凝土热传导率对正、负温度梯度的影响

当热传导率从  $0.50 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  增加到  $1.75 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  时, 温降幅值增加了  $7.1\%$ , 负温度梯度减小了  $3.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ , 正温度梯度减小了  $39.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。因此, 可以用传热性能较好的水泥混凝土材料筑路, 以达到减小温度翘曲应力的目的。

3.4 水泥混凝土比热容的影响

调整水泥混凝土比热容取值范围为  $800 \sim 1\,200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 温降幅值和正、负温度梯度随比热容的变化关系见表 4。由表 4 可知: 3 个温度参数的计算值大小随比热容增大而减小。

表 4 水泥混凝土比热容对温度参数的影响

比热容/ [J · (kg · °C) <sup>-1</sup> ]	温降幅 值/°C	正温度梯 度/(°C · m <sup>-1</sup> )	负温度梯 度/(°C · m <sup>-1</sup> )
800	60.51	76.75	-31.5
900	59.98	76.66	-31.36
1 000	59.45	76.45	-31.35
1 100	58.92	76.05	-31.11
1 200	58.40	75.60	-30.86

4 结论

(1) 计算了某 CRCP 路面结构的温度场, 计算了结构设计所需的温度参数。它的温降幅值为  $59.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 最大正温度梯度为  $76.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ , 最大负温度梯度为  $-31.6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。计算结果和规范法取值进行了对比。

(2) 最大正、负温度梯度均随 CRCP 面层厚度的增加而减小。

(3) 钢筋埋置越深, 温降幅值越小。

(4) 水泥混凝土热传导率从  $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  增加到  $1.75 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  时, 温降幅值增加了  $7.1\%$ , 负温度梯度减小了  $3.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ , 正温度梯度增加了  $39.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。

(5) 温降幅值和正、负温度梯度这两个温度设计参数均随水泥混凝土材料的比热容增大而减小。

参考文献:

[1] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

[2] 刘朝晖. 连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面研究[D]. 长沙理工大学博士学位论文, 2007.

[3] 王骁帆, 苏颖奇, 刘朝晖, 等. 连续配筋混凝土路面配筋设计及敏感性分析[J]. 公路, 2017(2).

[4] 罗圆月. BFRP 筋连续配筋复合式路面结构分析及使用寿命探索[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2014.

[5] AASHTO-2002 Guide for Design of Pavement Structure[S].

[6] Chen H L, Choi J. Analysis of Shrinkage and Thermal Stresses in Concrete Slabs Reinforced with GFRP Rebars [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23 (5): 612-627.

[7] Kohler E R, Roesler J R. Crack Width Measurements in Continuously Reinforced Concrete Pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(9): 645-652.

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.017

## 南友高速公路排水沥青路面长期性能调查与评价

汪继平<sup>1</sup>, 廉向东<sup>2</sup>, 范勇军<sup>3</sup>, 彩雷洲<sup>3</sup>(1. 广西桂东高速公路有限公司, 广西 贵港 537300; 2. 广西交通投资集团有限公司;  
3. 中路高科(北京)公路技术有限公司)

**摘要:**排水沥青路面是一种环境友好型功能路面,在中国应用逐步增多。为分析排水沥青路面在运营多年后的路面综合性能,该文依托 G7 211 广西南(宁)友(谊关)高速公路,对排水沥青路面在通车 12 年后的路面状况指数和路面使用性能进行评价分析。研究表明:排水沥青路面的路面状况指数和路面使用性能依然保持良好状态,说明其耐久性可以满足重载交通和南方多雨地区的外界环境考验;排水沥青路面施工时应严格控制粗集料等原材料品性,避免出现掺杂抗滑性、抗压性不足的石灰岩等集料,以提高排水沥青路面的长期耐久性;排水沥青路面具备空隙自清洗功能,在广西或其他南方多雨地区,一般无需特意对排水沥青路面清孔养护;但对于没有车辆行驶的排水沥青路面停车道,因缺少空隙自清洗功能导致路面堵塞较为严重,可结合现场渗水检测结果及时进行路面空隙堵塞恢复。

**关键词:**道路工程;排水沥青路面;性能评价;耐久性;路面自清洗功能

排水沥青路面具有抗滑性能好、噪声低、抑制雨天行车水雾、防止高速行车“水漂”、减轻夜晚行车眩光等技术特点,可以实现增进道路安全性、提高雨天行车舒适性、减少交通噪声等三大路面服务性能优势。排水沥青路面具有较大的空隙率,能有效提高路面渗水能力,在越来越注重道路功能性的今天,作为一种环境友好型路面已逐渐成为公路建设的一个重要发展方向。

排水沥青路面在国外的研究应用历史已超过 40 年,在欧洲、美国和日本等国家应用广泛。日本的调查发现,高速公路普通路面的雨天事故率是晴天的 9 倍,而铺装排水沥青路面后,雨天事故可减少 80%,交通噪声可降低 3~5 dB,使得雨天安全行车速度大为提

高;由此,其突出的安全性使得排水沥青路面在日本高速公路被强制使用。在西欧部分国家和美国部分地区也有类似强制使用的情况。在中国,交通运输部公路科学研究院及其下属企业中路高科(北京)公路技术有限公司等单位自 2001 年开始系统深入研究排水沥青路面技术,至今为止在江苏、江西、四川、湖南、浙江、安徽、云南等多个省份得到推广应用,目前排水沥青路面在中国国内高速公路上的应用逐步增多,在新建和养护工程中均有所涉及。同时,对于重载、重交通高速公路,排水沥青路面也具有可实施性和可靠性,如 2005 年建成通车的江苏盐通高速公路排水沥青路面工程,至今其路用性能依然保持良好。

- \*\*\*\*\*
- [8] 赵纪飞,叶建龙,王骁帆,等.连续配筋混凝土路面横向裂缝传荷作用的数值模拟和敏感性分析[J].公路交通科技,2018(6).
- [9] JTG D40-2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [10] 邹晓翎,谈至明,钱晨,等.路面温度日变化曲线的拟合[J].长安大学学报(自然科学版),2015(3).
- [11] 严作人.层状路面体系的温度场分析[J].同济大学学报,1984(1).
- [12] 董侨.沥青混凝土+连续配筋水泥混凝土复合式路面结构与材料研究[D].东南大学硕士学位论文,2006.

- [13] 廖公云,黄晓明.ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M].2版.南京:东南大学出版社,2014.
- [14] 谈至明,姚祖康.非线性温度场下的水泥混凝土路面温度应力[J].中国公路学报,1993(4).
- [15] 胡昌斌,金王杰,孙增华.水泥混凝土路面早龄期温度场数值模拟研究[J].工程力学,2013(4).
- [16] 江见鲸,陆新征,叶列平.混凝土结构有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [17] GB/T 18204.13-2000 公共场所空气温度测定方法[S].

收稿日期:2019-11-20

作者简介:汪继平,男,大学本科,高级工程师.E-mail:274114147@qq.com