

# BJJT

## 北京交通标准化技术文件

BJJT/ 0066--2022

### 北京市沥青混合料绿色评价技术指南

Technical guide for green evaluation of asphalt mixture in beijing

2022年12月6日发布

北京市交通委员会 发布  
北京市生态环境局

## 目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 前 言 .....                        | II |
| 1 范围 .....                       | 1  |
| 2 规范性引用文件 .....                  | 1  |
| 3 术语和定义 .....                    | 1  |
| 4 基本原则 .....                     | 3  |
| 5 绿色评价指标体系及计算方法 .....            | 3  |
| 6 绿色评价方法 .....                   | 6  |
| 7 绿色评价等级划分 .....                 | 9  |
| 附录 A（规范性） 沥青混合料污染物排放室内检测方法 ..... | 10 |
| 附录 B（规范性） 沥青混合料污染物排放富集设备要求 ..... | 11 |

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由北京市交通委员会提出并归口。

本文件由公路交通节能与环保技术及装备交通运输行业研发中心（北京）负责解释。

本文件起草单位：北京市交通委员会、北京市生态环境局、北京市政路桥建材集团有限公司、北京市生态环境科学保护研究院、北京市政路桥正达道路科技有限公司。

本文件主要起草人：赵子龙、葛昱、柳浩、周宏亮、沙川、李华明、陈政、卫文哲、杨丽英、王真、李振、曲松、布海玲、孙雨、许东霞。

# 沥青混合料绿色评价技术指南

## 1 范围

本文件规定了沥青混合料绿色评价的基本原则、绿色评价指标体系及计算方法、绿色评价方法、绿色评价等级划分、沥青混合料污染物排放室内检测方法和沥青混合料污染物排放富集设备要求。

本文件适用于北京市沥青混合料的绿色评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2589 综合能源计算通则

GB/T 3102.4 热学的量和单位

HJ/T 38 固定污染源排气中非甲烷总烃的测定气相色谱法

HJ/T 45 固定污染源排气中沥青烟的测定重量法

HJ/T 646 环境空气和废气气相和颗粒物中多环芳烃的测定气相色谱-质谱法

JTG E20 公路工程沥青及沥青混合料试验规程

JTG F40 公路沥青路面施工技术规范

JTG F41 公路沥青路面再生技术规范

DB11/T 1373 沥青路面抗车辙技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**绿色沥青混合料** green asphalt mixture

在全寿命周期过程中，大气污染物排放小、能源消耗小、使用寿命长、最大限度利用废旧材料的沥青混合料。

### 3.2

**绿色评价** green evaluation

在质量合格的前提下，从再生利用、污染物排放、能源消耗和材料特征等方面，对沥青混合料绿色水平进行的综合评价。

## 3.3

**大气污染物 air pollutants**

由于人类活动或自然过程排入大气的，浓度超过一定标准时对人或环境产生有害影响的物质。

[来源：HJ 524，3.4]

## 3.4

**大气污染物排放浓度 air pollutants emission concentration**

标准状态下（温度 273K，压力 101.3 kPa），排气筒中每  $\text{m}^3$  干排气中所含大气污染物的质量，单位  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

[来源：DB11/ 501，3.2]

## 3.5

**综合能耗 comprehensive energy consumption**

单位质量沥青混合料在生产拌和过程中所消耗的能源的实物量，按规定的计算方法和单位分别折算后的总和。

## 3.6

**折标准煤系数 standard coal coefficient**

能源单位实物量或者生产单位耗能工质所消耗能源的实物量，折算为标准煤的数量。

[来源：GB/T 2589，3.9]

## 3.7

**沥青混合料绿色等级标准 green grade of asphalt mixture**

采用绿色评价方法对沥青混合料绿色水平进行量化，并按照阈值划分为不同星级的标准。

## 3.8

**回收沥青路面材料 reclaimed asphalt pavement (RAP)**

采用铣刨、开挖等方式从沥青路面上获得沥青面层的旧沥青混凝土。

[来源：DB11-1634，3.1]

4 基本原则

- 4.1 沥青混合料宜采用再生利用、节能减排等技术，持续提升绿色水平。
- 4.2 参与绿色评价的沥青混合料应符合 JTG F40、JTG F41、DB11/T 1373 的要求。
- 4.3 使用 RAP 替代沥青混合料时，沥青混合料搅拌站的生产设备应配备添加装置、加热装置、及计量装置等装置，满足生产工艺要求。
- 4.4 综合国家、行业、北京市对交通基础设施关于资源循环、节能降耗等方面的政策要求，对 RAP、煤矸石、矿渣、建筑垃圾等废旧资源再生利用方面具有显著效果，且可实现规模化应用的沥青混合料，予以鼓励推广。

5 绿色评价指标体系及计算方法

5.1 绿色评价指标

绿色评价指标由再生利用、污染物排放、能源消耗和材料特征 4 类一级指标构成，各指标下设若干二级指标，见表 1。

表 1 绿色评价指标

| 序号 | 一级指标  | 二级指标       |
|----|-------|------------|
| 1  | 再生利用  | 集料替代率      |
| 2  |       | 沥青替代率      |
| 3  |       | RAP 利用率    |
| 4  | 污染物排放 | 沥青烟排放浓度    |
| 5  |       | 苯并（a）芘排放浓度 |
| 6  |       | 非甲烷总烃排放浓度  |
| 7  | 能源消耗  | 能源消耗       |
| 8  | 材料特征  | 疲劳寿命       |
| 9  |       | 路用性能比      |

5.2 再生利用指标

- 5.2.1 再生利用一级指标下设集料替代率、沥青替代率、RAP 利用率 3 项二级指标。
- 5.2.2 集料替代率按照式（1）计算确定。

$$P_1 = \frac{m_1}{M_1} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$P_1$ —集料替代率（%）；

$m_1$ —矿渣、煤矸石、建筑垃圾等固体废弃物（干）替代集料的质量（kg）；

$M_1$ —1 吨沥青混合料中集料（干）的总质量（kg）。

- 5.2.3 沥青替代率按照式（2）计算确定。

$$P_2 = \frac{m_2}{M_2} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- $P_2$ —沥青替代率 (%)；
- $m_2$ —废旧橡胶 (或废胎胶粉)、废旧塑料等材料替代部分沥青的质量 (kg)；
- $M_2$ —1 吨沥青混合料中沥青的总质量 (kg)。

5.2.4 RAP 利用率按照式 (3) 计算。

$$P_3 = \frac{m_3}{M} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- $P_3$ —RAP 替代率 (%)；
- $m_3$ —RAP 的质量 (kg)；
- $M$ —沥青混合料的总质量 (kg)，取 1000kg。

5.3 污染物排放指标

5.3.1 污染物排放一级指标下设沥青烟排放浓度、苯并 (a) 芘排放浓度、非甲烷总烃排放浓度 3 项二级指标。

5.3.2 沥青烟排放浓度、苯并 (a) 芘排放浓度、非甲烷总烃排放浓度 3 项二级指标按附录 (规范性) 沥青混合料污染物排放室内检测方法检测确定。

5.4 能源消耗指标

5.4.1 能源消耗一级指标下设能源消耗 1 项二级指标。

5.4.2 能源消耗按 1 吨沥青混合料 (沥青、集料、水) 加热至拌和温度所需的综合能耗确定。

5.4.3 1 吨沥青混合料中沥青的质量按式 (4) 计算。

$$M_2 = \left( \frac{P_a}{1 + P_a} \right) \times 1000 \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- $M_2$ —1 吨沥青混合料中沥青的总质量 (kg)；
- $P_a$ —沥青混合料的油石比 (%)。

5.4.4 1 吨沥青混合料中集料的质量按式 (5) 计算。

$$M_1 = \frac{1000}{1 + P_a} (1 - P_k) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $M_1$ —1 吨沥青混合料中集料 (干) 的总质量 (kg)；
- $P_a$ —沥青混合料的油石比 (%)；
- $P_k$ —沥青混合料的矿粉比例 (%)。

5.4.5 1 吨沥青混合料中水的质量按式 (6) 计算。

$$M_4 = \frac{M_5 \times w}{(1+w)} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$M_4$ —1 吨沥青混合料中水的质量 (kg);

$M_3$ —1 吨沥青混合料中集料的总质量 (kg);

$w$ —集料的含水率 (%)。

5.4.6 1 吨沥青混合料的综合能耗按式 (7) 计算。

$$E = \frac{M_1 \times ((t_2 - t_1) \times C_1) + M_4 \times ((100 - t_1) \times C_3 + \gamma \times 4.1858) + M_2 \times ((t_4 - t_3) \times C_2)}{1000} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$E$ —加热 1 吨沥青混合料至拌和温度所需的综合能耗 (kJ);

$M_1$ —1 吨沥青混合料中集料 (干) 的总质量 (kg);

$M_2$ —沥青混合料中沥青的总质量 (kg);

$M_4$ —沥青混合料中水的质量 (kg);

$C_1$ —集料比热容 (J/ (kg·°C)), 取 920 J/ (kg·°C);

$C_2$ —沥青比热容 (J/ (kg·°C)), 取 1760 J/ (kg·°C);

$C_3$ —水比热容 (J/ (kg·°C)), 取 4190 J/ (kg·°C);

$t_1$ —室温 (°C), 取 25°C;

$t_2$ —沥青混合料在拌和过程中集料加热温度 (°C);

$t_3$ —沥青混合料在拌和过程中沥青的储存温度 (°C), 取 100°C;

$t_4$ —沥青混合料在拌和过程中沥青适宜拌和的温度 (°C), 按照 JTG F40 要求, 达到表观粘度 (0.17±0.02) Pa·s, 或运动粘度 (170±20) mm<sup>2</sup>·s, 或赛波特粘度 (85±10) s 对应的温度;

$\gamma$ —水的汽化热值 (kcal/kg), 取 2257.6 kcal/kg。

5.4.7 1 吨沥青混合料的综合能耗  $E$  值应按照 GB/T 3102.4 国际蒸汽卡进行折标准煤计算, 按式 (11) 计算。按照 GB/T 3102.4 国际蒸汽卡换算, 低 (位) 发热量等于 29307.6 千焦 (kJ) [7000 千卡 (kcal) 的燃料, 称为 1 千克标准煤], 折标准煤系数取 29307.6 kJ/kg, 按式 (8) 计算

$$e = \frac{E}{29307.6 \times 1000} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$E$ —加热 1 吨沥青混合料至拌和温度所需的能源消耗 (kJ);

$e$ —1 吨沥青混合料消耗的标准煤数量 (kgce/t)。

### 5.5 材料特征指标

5.5.1 材料特征一级指标下设材料疲劳性能、路用性能比 2 项二级指标。

5.5.2 材料疲劳性能以四点疲劳寿命确定。按照 JTG E20 要求检测，试验条件为 15℃、10Hz、400 $\mu\epsilon$ 。

5.5.3 路用性能比按沥青混合料的车辙试验动稳定度、浸水残留稳定度、冻融劈裂强度比、低温弯曲破坏应变等分值分别与 JTG F40 要求限值的比值的最大值确定。

5.5.4 沥青混合料车辙试验动稳定度试验条件为 60℃、0.7MPa。JTG F40 对沥青混合料车辙试验动稳定度的限值要求见表 2。

表 2 沥青混合料车辙试验动稳定度限值要求

| 气候条件与技术指标    |          | 动稳定度 (次/mm)   | 试验方法   |
|--------------|----------|---------------|--------|
| 普通沥青混合料, 不小于 |          | 1000          | T 0719 |
| 改性沥青混合料, 不小于 |          | 2800          |        |
| SMA 混合料      | 非改性, 不小于 | 1500          |        |
|              | 改性, 不小于  | 3000          |        |
| OGFC 混合料     |          | 1500 (一般交通路段) |        |
|              |          | 3000 (重交通量路段) |        |

5.5.5 JTG F40 对沥青混合料浸水残留稳定度的限值要求见表 3。

表 3 沥青混合料浸水残留稳定度限值要求

| 气候条件与技术指标    |      | 浸水残留稳定度 (%) | 试验方法   |
|--------------|------|-------------|--------|
| 普通沥青混合料, 不小于 |      | 80          | T 0709 |
| 改性沥青混合料, 不小于 |      | 85          |        |
| SMA 混合料      | 普通沥青 | 75          |        |
|              | 改性沥青 | 80          |        |

5.5.6 JTG F40 对沥青混合料冻融劈裂强度比的限值要求见表 4。

表 4 沥青混合料冻融劈裂强度比限值要求

| 气候条件与技术指标    |      | 冻融劈裂强度比 (%) | 试验方法   |
|--------------|------|-------------|--------|
| 普通沥青混合料, 不小于 |      | 75          | T 0729 |
| 改性沥青混合料, 不小于 |      | 80          |        |
| SMA 混合料      | 普通沥青 | 75          |        |
|              | 改性沥青 | 80          |        |

5.5.7 沥青混合料低温弯曲破坏应变试验条件为-10℃。JTG F40 对沥青混合料低温弯曲破坏应变的限值要求见表 5。

表 5 沥青混合料低温弯曲破坏应变限值要求

| 气候条件与技术指标    |  | 低温弯曲破坏应变 ( $\mu\epsilon$ ) | 试验方法   |
|--------------|--|----------------------------|--------|
| 普通沥青混合料, 不小于 |  | 2000                       | T 0715 |
| 改性沥青混合料, 不小于 |  | 2500                       |        |

## 6 绿色评价方法

6.1 绿色评价计算

绿色评价分值由绿色评价项和加分项组成。绿色评价项分值按照再生利用、污染物排放、能源消耗和材料特征 4 类一级指标得分之和确定，满分为 100 分。加分项的设置是鼓励符合国家、行业、北京市关于资源循环、节能降耗等要求的沥青混合料进一步推广应用，满分为 5 分。绿色评价分值按式（9）计算。

$$Q_{总} = Q_{评} + Q_{加} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$Q_{总}$ —绿色评价分值；

$Q_{评}$ —绿色评价项得分；

$Q_{加}$ —加分项得分。

6.2 绿色评价项计算方法

6.2.1 绿色评价项中再生利用、污染物排放、能源消耗和材料特征 4 类一级指标按权重分别占不同分值，权重分布见表 6。

表 6 绿色评价项一级指标权重

|       |      |       |      |      |
|-------|------|-------|------|------|
| 绿色评价项 | 再生利用 | 污染物排放 | 能源消耗 | 材料特征 |
| 权重    | 0.16 | 0.32  | 0.27 | 0.25 |

6.2.2 绿色评价项的得分应为所有一级指标得分之和。各一级指标得分按该指标权重与该指标下设二级指标之和的乘积确定。绿色评价项的得分按式（10）计算。

$$Q_{评} = \sum w_i Q_i \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$Q_{评}$ —绿色评价项得分；

$w_i$ —绿色评价项各一级指标权重；

$Q_i$ —绿色评价项各一级指标下设二级指标得分之和。

6.2.3 再生利用一级指标下设二级指标：集料替代率满分为 30 分，沥青替代率满分为 16 分，RAP 利用率满分为 54 分。

a) 集料替代率按照式（1）计算确定，其计分标准见表 7。

表 7 集料替代率计分标准

|           |     |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 集料替代率 (%) | ≥35 | ≥25 | ≥15 | ≥10 | <10 |
| 分值        | 30  | 27  | 24  | 21  | 18  |

b) 沥青替代率按照式（2）计算确定，其计分标准见表 8。

表 8 沥青替代率计分标准

|           |     |      |      |      |     |
|-----------|-----|------|------|------|-----|
| 沥青替代率 (%) | ≥25 | ≥15  | ≥10  | ≥5   | <5  |
| 分值        | 16  | 14.4 | 12.8 | 11.2 | 9.6 |

c) RAP 利用率按照式（3）计算确定，其计分标准见表 9。

表 9 RAP 利用率计分标准

|             |     |      |      |      |      |
|-------------|-----|------|------|------|------|
| RAP 利用率 (%) | ≥30 | ≥20  | ≥10  | ≥5   | <5   |
| 分值          | 54  | 48.6 | 43.2 | 37.8 | 32.4 |

6.2.4 污染物排放一级指标下设二级指标：沥青烟排放浓度满分为 41 分，苯并（a）芘排放浓度满分为 33 分，非甲烷总烃排放浓度满分为 26 分。

a) 沥青烟排放浓度按照附录 A（规范性）要求检测确定，其计分标准见表 10。

表 10 沥青烟排放浓度计分标准

|                              |     |      |      |      |      |     |
|------------------------------|-----|------|------|------|------|-----|
| 沥青烟排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> ) | <12 | <18  | <24  | <30  | <36  | ≥36 |
| 分值                           | 41  | 36.9 | 32.8 | 28.7 | 24.6 | 0   |

b) 苯并（a）芘排放浓度按照附录 A（规范性）要求检测确定，其计分标准见表 11。

表 11 苯并（a）芘排放浓度计分标准

|                                 |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 苯并（a）芘排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> ) | <0.01 | <0.02 | <0.03 | <0.04 | <0.07 | ≥0.07 |
| 分值                              | 33    | 29.7  | 26.4  | 23.1  | 19.8  | 0     |

c) 非甲烷总烃排放浓度按照附录 A（规范性）要求检测确定，其计分标准见表 12。

表 12 非甲烷总烃排放浓度计分标准

|                                |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 非甲烷总烃排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> ) | <0.5 | <1.0 | <2.5 | <5.0 | <8.5 | ≥8.5 |
| 分值                             | 26   | 23.4 | 20.8 | 18.2 | 15.6 | 0    |

6.2.5 能源消耗一级指标下设二级指标：能源消耗满分为 100 分。

a) 能源消耗按照式（8）计算确定，其计分标准见表 13。

表 13 能源消耗计分标准

|               |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 能源消耗 (kgce/t) | <5.30 | <5.55 | <5.80 | <6.05 | <6.30 | ≥6.30 |
| 分值            | 100   | 90    | 80    | 70    | 60    | 0     |

6.2.6 材料特征一级指标下设二级指标：疲劳寿命满分为 60 分，路用性能比满分为 40 分。

a) 疲劳寿命计分标准见表 14。

表 14 疲劳寿命计分标准

|           |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 疲劳寿命 (万次) | <10 | <20 | <30 | <40 | <50 | ≥50 |
| 评分        | 0   | 36  | 42  | 48  | 54  | 60  |

b) 路用性能比计分标准见表 15。

表 15 路用性能比计分标准

|           |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 路用性能比 (%) | <100 | <110 | <110 | <120 | <130 | ≥130 |
| 评分        | 0    | 24   | 28   | 32   | 36   | 40   |

6.3 加分项计算方法

6.3.1 加分项按照沥青混合料的废旧资源再生利用率计分。废旧资源再生利用率按式(11)计算。

$$P = \frac{m}{M} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- P — 废旧资源再生利用率 (%)；
- m — 用在沥青混合料中 RAP、煤矸石、矿渣、建筑垃圾等废旧资源的质量 (kg)；
- M — 1 吨沥青混合料的总质量，取 1000kg。

6.3.2 加分项计分标准见表 16。

表 16 废旧资源再生利用率计分标准

|               |      |      |
|---------------|------|------|
| 废旧资源再生利用率 (%) | ≥10% | <10% |
|---------------|------|------|

7 绿色评价等级划分

7.1 沥青混合料绿色等级划分采用星级制，根据绿色评价总分，划分为五个等级，见表 17。

表 17 沥青混合料绿色星级划分

| 星级名称 | 分值区间                 |
|------|----------------------|
| 一星级  | $Q_{总} < 60$         |
| 二星级  | $60 \leq Q_{总} < 70$ |
| 三星级  | $70 \leq Q_{总} < 80$ |
| 四星级  | $80 \leq Q_{总} < 90$ |
| 五星级  | $Q_{总} \geq 90$      |

## 附录 A

(规范性)

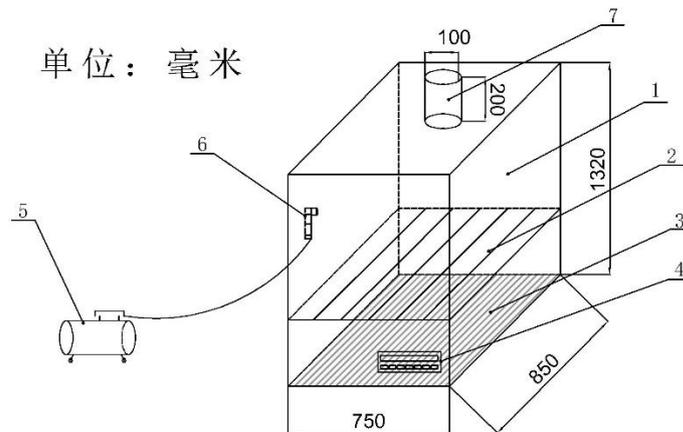
## 沥青混合料污染物排放室内检测方法

- A.1 沥青混合料污染物排放富集设备应符合附录 B（规范性）的规定。
- A.2 对沥青混合料污染物排放富集装备按照沥青混合料生产拌和温度预热。
- A.3 沥青混合料生产拌和温度，按照 JTGF40 要求设定，即达到表观粘度（ $0.17 \pm 0.02$ ）Pa·s，或运动粘度（ $170 \pm 20$ ）mm<sup>2</sup>·s，或赛波特粘度（ $85 \pm 10$ ）s 对应的温度。
- A.4 拌制  $10 \pm 0.2$ kg 的沥青混合料样品，30s 内松散平铺装入平底托盘，放入沥青混合料污染物排放富集装备中。
- A.5 沥青混合料污染物排放富集装备设置泵入空气流速 3000L/h，保持温度稳定 15min。
- A.6 按照 HJ/T 45、HJ/T 646、HJ/T 38 要求，采集沥青混合料的沥青烟排放浓度、苯并（a）芘排放浓度、非甲烷总烃排放浓度。
- A.7 采集完一次沥青混合料污染物，应更换沥青混合料后开展下一轮污染物采集工作。不可同一沥青混合料，连续进行污染物采集工作。

**附录 B**  
(规范性)  
**沥青混合料污染物排放富集设备要求**

**B.1 设备技术要求**

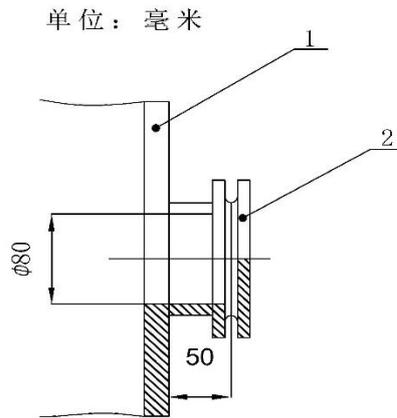
- B.1.1 沥青混合料污染物富集设备以电热鼓风干燥箱为基础进行技术改造。
- B.1.2 电热鼓风干燥箱的温控范围要求为室温~300℃，温控精度不大于±1℃。
- B.1.3 电热鼓风干燥箱的鼓风机排气能力应不小于40L/min。
- B.1.4 电热鼓风干燥箱外形尺寸高1320mm、宽850mm、深750mm，内部空间尺寸内高750mm、宽600mm、深500mm，见图B.1。
- B.1.5 电热鼓风干燥箱顶部中心设置排气孔，排气孔直径应为80mm，在排气孔上方设置垂直烟囱，高度为200mm，见图B.1。
- B.1.6 在距烟囱顶部100mm处设置采样孔，见图B.2。
- B.1.7 在电热鼓风干燥箱侧后方开孔，安装空气流量计，连接中空软管，接入气泵，空气流量计可对泵入空气流速进行控制。
- B.1.8 气泵泵入空气流量应可达到3000L/h。
- B.1.9 托盘尺寸为长500mm、宽300mm、高50mm，见图B.3。



标引序号说明：

- 1—电热鼓风干燥箱主体；  
2—置物架；  
3—温度调节管；  
4—温度控制面板；  
5—外置气泵；  
6—空气流量计；  
7—排气孔。

图 B.1 电热鼓风干燥箱改造示意图

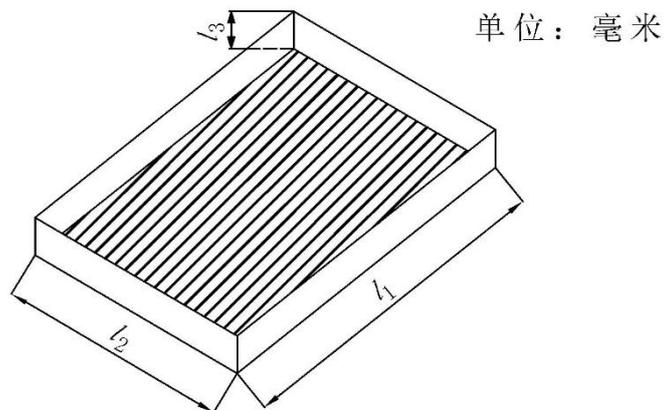


标引序号说明：

1—排气孔；

2—采样孔。

图 B.2 采样孔设置



| 长度 $l_1$ | 宽度 $l_2$ | 高度 $l_3$ |
|----------|----------|----------|
| 500      | 300      | 50       |

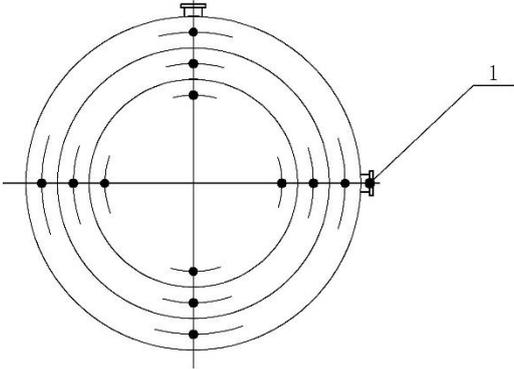
图 B.3 托盘样式

## B.2 采样工况

B.2.1 应在设备处于正常运行状态下进行采样。

B.2.2 本方法采用的烟道流速分布比较均匀、对称，取中心作为测点。

B.2.3 对圆形烟道，采样孔应设在包括各测点在内的互相垂直的直径线上，见图 B.4。



标引序号说明：  
1—采样孔。

图 B. 4 圆形断面采样孔示意图