

城市轨道交通列车嵌入式空调机组封闭平台结构 雨水排放问题分析

康 伟

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心,130062,长春//正高级工程师)

摘 要 针对城市轨道交通车辆空调机组安装结构中的封闭平台结构,利用建筑给排水中暴雨强度的计算方法,推断合理的车辆排水量设计值以及排水管径等主要设计参数,并对车辆不同运行状态下的排水管布置方案对排水状态的影响进行对比分析,以探索城市轨道交通车辆雨水排放结构的最佳方案。

关键词 城市轨道交通;列车;嵌入式空调机组;封闭平台;雨水排放

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.02.021

Analysis of Rainwater Drainage Problem in Closed Platform Structure of Urban Rail Transit Vehicle Embedded Air-conditioning Unit

KANG Wei

Abstract Targeting the closed platform structure of urban rail transit vehicle embedded air-conditioning unit, by using the calculation method of rainfall and rainstorm formula in building water supply and drainage, reasonable values of main design parameters such as vehicle drainage volume and drainage pipe diameter are inferred. The influence of drainage pipe layout scheme on drainage status under different vehicle operation conditions is comparatively analyzed, to explore the best scheme of rainwater drainage structure for urban rail transit vehicle.

Key words urban rail transit; vehicle; embedded air-conditioning unit; closed platform; rainwater drainage

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

根据排水结构的不同,城市轨道交通列车空调机组安装大体可分为完全顶置式结构、嵌入式开放平台结构及嵌入式封闭平台结构等 3 种型式。相应的雨水排放需求、设计方案亦有所区别,而嵌入式空调机组封闭平台结构的雨水排放问题是其中最复杂的。

完全顶置式空调机组(北京地铁 6 号线等),因

车顶低于空调机组下平面,雨水直接由车顶散排,不存在雨水排放的难题。嵌入式空调机组开放平台结构(即空调机组平台两侧机组安装座槽钢下部开有排水孔的非封闭式结构,如北京地铁 13 号线等),雨水可由两侧槽钢下部的排水孔排出,设计施工时注意空调机组平台的设计斜度和开孔高度,即可避免出现雨水排放不畅,因此也很少出现排水问题。而嵌入式空调机组封闭平台结构(我国深圳地铁、香港地铁以及泰国地铁等项目),其机组平台下部的封闭结构使所有进入空调机组平台的雨水均需要通过排水管排至车外,因此对雨水排放结构的要求较高,是雨水排放设计的重点和难点。

由于雨水排放设计中有许多不确定因素,可借鉴的东西又少之又少,因此研究难度很大。本文主要结合流体力学、建筑物雨水排放等相关资料进行简单分析,后续还有大量分析、测试及验证工作。

1 嵌入式空调机组封闭平台典型安装结构

城市轨道交通列车嵌入式空调机组封闭平台结构安装于车顶端部或中部,多数为前端出风、下部或端部回风。

图 1 为 A 型地铁列车嵌入式空调机组封闭平台的典型安装结构。该结构为两端出风、两端回风型式,机组下部无风口及检修口,送回风口通过防风防水密封条实现气水密封。压缩机的高度要求机组及平台中部局部下沉 65 mm,并将此区域作为雨水和冷凝水的排水口。因冷凝水量相对过少,可

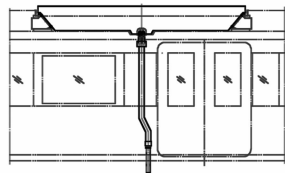


图 1 A 型地铁列车嵌入式空调机组封闭平台的典型安装结构

不做特殊考虑。

我国香港和巴西里约热内卢 1A 线的地铁车辆空调安装结构如图 2 所示。该结构为前出风、侧回风;机组与平台间隙较小,仅 10 mm;机组下部无回风口,但有检查门,因此对平台排水要求最高。

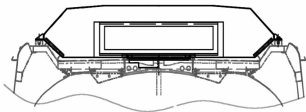


图 2 我国香港和巴西里约热内卢 1A 线的地铁车辆空调安装结构

2 嵌入式空调机组封闭平台雨水量计算

嵌入式空调机组封闭平台雨水量的大小是排

水系统设计的主要依据。由于缺少相关经验,为提高计算的准确性,嵌入式空调机组封闭平台的雨水量参照建筑屋面排水系统进行理论分析。

在屋面雨水排水系统中,雨水量的大小与设计地区的暴雨强度 q 、汇水面积 F 以及由屋面坡度确定的屋面渲泄能力系数 k_1 有关^[1]。

2.1 暴雨强度

通过各种统计年鉴收集了 2007—2009 年我国 5 座主要城市的降雨量信息,如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,各城市月降雨量数据差别较大,个别月份对全年雨量影响很大,直接做雨量计算难以取舍,因此屋面雨水排放设计中采用暴雨强度更具有实用价值。

表 1 我国 5 座主要城市降雨量统计^[2] 单位:mm

年份	城市	不同月份降雨量												全年降雨量
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
2007	北京			43.4	2.0	48.5	46.1	116.2	103.6	50.1	69.9	1.1	3.0	483.9
	上海	45.2	62.9	82.6	88.8	30.6	158.8	238.7	233.4	180.1	113.8	19.5	36.0	1 290.4
	杭州	82.8	49.4	171.3	149.1	32.8	178.6	122.7	60.3	215.9	248.5	31.5	35.6	1 378.5
	广州	23.9	25.0	44.5	184.9	193.7	319.8	80.7	309.5	151.5	18.6	2.0	16.2	1 370.3
	武汉	65.8	114.2	108.7	50.3	205.2	126.6	176.5	62.3	14.6	25.7	40.8	32.5	1 023.2
2008	北京	0.2		11.6	63.6	64.1	125.3	79.3	132.1	118.9	31.1		0.1	626.3
	上海	90.9	32.3	30.1	55.5	84.5	300.0	105.8	113.5	109.3	56.7	81.6	26.3	1 086.5
	杭州	91.7	61.4	37.7	101.9	117.7	361.0	114.4	137.5	44.2	67.4	118.5	20.5	1 273.9
	广州	98.0	49.9	70.9	111.7	285.2	834.6	170.3	188.4	262.6	136.4	61.9	14.1	2 284.0
	武汉	72.4	20.7	79.0	54.3	344.2	129.4	148.1	240.7	40.8	92.5	39.1	5.6	1 266.8
2009	北京		18.0	7.4	32.2	14.7	95.5	196.6	60.9	23.3	5.9	26.1		480.6
	上海	51.7	124.6	56.2	75.2	59.4	142.7	217.0	290.4	86.2	17.0	106.2	62.8	1 289.4
	杭州	36.3	190.7	117.6	117.9	77.0	85.6	227.7	213.0	113.7	18.0	186.6	69.8	1 453.9
	广州	5.4	0.6	207.7	108.8	210.9	273.7	221.6	230.1	39.0	26.4	101.2	47.2	1 472.6
	武汉	18.5	122.9	69.7	197.7	132.1	306.7	95.9	38.8	41.8	23.9	67.7	42.3	1 158.0

降雨强度指某一连续时段 t 内的平均降雨量,用 i 表示:

$$i = H/t \tag{1}$$

式中:

H ——某一连续时间段内的降雨量。

工程上更关注暴雨情况下的降雨强度,即暴雨强度。暴雨强度 q 采用单位时间内单位面积上的降雨体积表示,即 $q=167\ i^{[3]}$, q 的单位为 $L/(s\cdot hm^2)$, i 的单位为 mm/min 。

暴雨强度随降雨历时而变化。在工程应用中,

根据一定时期的统计数据可推导出不同地区的暴雨强度计算公式。通常历时采用 5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、45 min、60 min、90 min、120 min 等 9 个时段,历时越短,暴雨强度越大,因此取最短的历时为最不利条件。

表 2 为收集到的北京、上海、杭州、广州、武汉等城市的暴雨强度公式及计算结果。表 2 中,由于各地暴雨强度公式来源不一,统计年份不同,计算准确性还未可知;从资料看,暴雨强度有增大趋势,设计中应适当考虑余量。

TB/T 1802—1996《铁道车辆漏雨试验方法》规定：“淋雨试验时采用的 3 mm/min 的喷水强度可以满足大部分地区 3 年重现期的应用要求,而 200 mm/h 则可以满足大部分地区 5 年重现期的应用要

求。”对于国外一些城市,还需尽可能多地收集相关信息,以使暴雨强度计算更加合理,亦可采用年降雨量比对系数进行估算。部分项目所涉及城市的年降雨量数据如表 3 所示。

表 2 暴雨强度公式及计算结果

城市	暴雨强度计算公式	<i>P</i> /年	<i>q</i> /(L/(s·hm ²))	<i>i</i> /(mm/min)	降雨量/(mm/h)
北京	$q=\frac{2\,001(1+0.811\lg P)}{(t+8)^{0.711}}$	1	323	1.93	116
		3	448	2.68	161
		5	506	3.03	182
上海	$q=\frac{5\,544(p^{0.3}-0.42)}{(t+10+7\lg P)^{0.82+0.01\lg P}}$	1	349	2.09	125
		3	488	2.92	175
		5	561	3.36	202
杭州	$q=\frac{10\,174(1+0.844\lg P)}{(t+25)^{1.038}}$	1	298	1.78	107
		3	418	2.50	150
		5	474	2.84	170
广州	$q=\frac{2\,424.17(1+0.533\lg P)}{(t+11)^{0.668}}$	1	380	2.28	137
		3	477	2.86	171
		5	522	3.13	188
武汉	$q=\frac{983(1+0.65\lg P)}{(t+4)^{0.56}}$	1	287	1.72	103
		3	376	2.25	135
		5	417	2.50	150

注：*P* 代表重现期。

表 3 部分城市年降雨量数据统计表

城市	年份	不同月份平均降雨量/mm												全年降雨量/mm
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
曼谷	1961—1990	9.1	29.9	28.6	64.7	220.4	149.3	154.5	196.7	344.2	241.6	48.1	9.7	1 496.8
里约	1961—1990	115.8	139.9	131.4	119.7	80.9	51.8	52.3	51.6	67.1	89.1	97.2	150.1	1 186.9
香港	1981—2010	24.7	54.4	82.2	174.7	304.7	456.1	376.5	432.2	327.6	100.9	37.6	26.8	2 398.5

2.2 汇水面积

汇水面积主要考虑平台区域的有效降雨面积,包括外露侧墙垂直面上的高度等亦要适当考虑。对于城市轨道交通列车空调机组而言,如果从安装结构上将机组平台四周区域密封保证仅冷凝区域有雨水进入平台,则其汇水面积可仅考虑冷凝部分,一般为机组平台平面投影面积的 1/2 左右。

2.3 渲泄能力系数

渲泄能力系数需综合考虑雨水集流速度进行计算。该系数与集水面的坡度、积水深度、排水孔位置的设置等因素有关,参照雨水排放设计原则可取 1。

2.4 雨水量计算

参照屋面排水系统,机组平台排水系统中雨水

量可按下述公式^[1]计算:

$$Q_v=k_1\frac{Fq_5}{10\,000}\text{ 或 }Q_v=k_1\frac{Fh_5}{3\,600}\tag{2}$$

式中:

Q_v——屋面雨水设计流量,L/s;

F——屋面设计汇水面积,m²;

q₅——当地降雨历时 5 min 时的暴雨强度,L/(s·hm²);

h₅——当地降雨历时 5 min 时的降雨厚度,mm;

k₁——设计重现期为 1 年时的屋面渲泄能力系数。

当 *h₅* 取 200 mm/h、*k₁* 取 1 时,机组平台最大面

积为 8 m^2 , 则 Q_v 为 0.44 L/s ; 如果仅冷凝区域雨水进入平台, 则 Q_v 为 0.22 L/s 。

对于铝合金车顶结构而言, 由于车顶为光滑的圆弧, 非平台部位的雨水可以沿车顶圆弧排出, 机组平台接口的密封较易处理。而对于不锈钢波纹顶板, 则需要对橡胶头区域进行特殊的密封处理, 否则雨水大量进入平台, 将导致排水量骤增。不同车顶橡胶头接口设计见图 3。

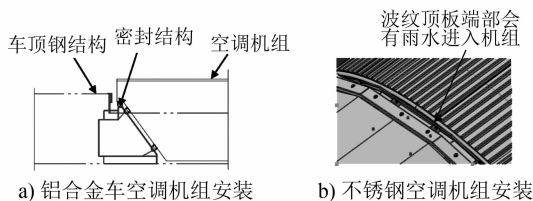


图 3 车顶橡胶头防水设计接口

图 4 a) 中车顶钢结构由于机组接口处有向外的坡度且内侧有挡水板, 落到机组盖板 (非雨水进入区域) 上的水可以由车体两侧流下。而图 4 b) 中可能由于制造公差导致机组接口处有向内的坡度且无挡水板, 雨水很可能由此进入平台使得平台内水量增加。因此, 合理地设计安装接口, 尽可能避免大量雨水进入机组平台, 是城市轨道交通列车空调机组安装设计的一个重要细节。

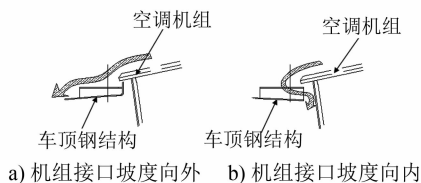


图 4 车顶钢结构机组接口防水设计

3 空调机组平台排水过程分析及管径确定

3.1 空调机组平台排水管流动情况分析

随着降雨时间的推移, 平台排水管入口处的水深逐渐加大, 水流状态也在不断变化。在初始阶段, 入水口大部分暴露在空气中, 雨水在管中呈附壁流或膜流, 管中心空气畅通; 随着水深和泄流量的增加, 掺气比增加, 雨水主要靠重力流动, 呈气水两相重力流。在过渡阶段, 平台汇水面积增加, 入口处水深增加, 管内充水率增加, 掺气比下降, 呈水气两相重力压力流, 即半压力流。

当积水达到一定深度时, 入水口完全被雨水淹没, 水管内形成满流, 可近似看作单相压力流。形成满流时泄流速度最快, 但此时对入水口的深度也有一定的要求。而城市轨道交通列车由于行驶线

路的变化, 很难像屋面雨水排水系统一样形成稳定的 3 阶段变化过程, 因此雨水流动情况更为复杂。

3.2 排水量计算

3.2.1 入水口处排水量^[1]计算

重力流 Q_R 的计算公式为:

$$Q_R = \mu \pi D h \sqrt{2gh} \quad (3)$$

压力流 Q_P 的计算公式为:

$$Q_P = \frac{\pi D^2}{4} \mu \sqrt{2gh(H_a + P_F)} \quad (4)$$

式中:

μ ——进水口的流量系数, 取 0.45;

D ——进水口的直径, m;

h ——进水口的水深, m;

H_a ——进水口前水面至出口处的高度, m;

P_F ——排水管内负压, m。

由于重力流泄流量小于有压流泄流量, 而城市轨道交通列车运行过程中几种流态不断变化, 因此按重力流 (见图 5) 进行计算较为安全。

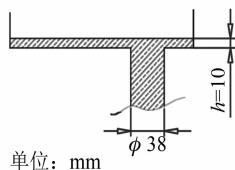


图 5 重力流示意图

D 取 38 mm (外径取 2 mm , 壁厚取 2 mm), h 取 10 mm 时, 通过计算得到 Q_R 为 0.24 L/s 。

3.2.2 排水管水量计算

重力流状态雨水排水立管按水膜流计算, 公式如下:

$$Q_L = 7890 K_p^{-\frac{1}{6}} \alpha^{-\frac{5}{3}} d^{-\frac{8}{3}} \quad (5)$$

式中:

Q_L ——立管排水流量, L/s;

K_p ——粗糙度, m, 塑料管取 $15 \times 10^{-6} \text{ m}$, 铸铁管取 $25 \times 10^{-6} \text{ m}$;

α ——充水率, 塑料管取 0.30, 铸铁管取 0.35;

d ——管道的计算内径, m。

按 $D = 38 \text{ mm}$ 的铝塑复合管进行计算, 则 $Q_L = 1.1 \text{ L/s}$ 。按 $D = 23 \text{ mm}$ 的铝塑复合管进行计算, 则 $Q_L = 0.29 \text{ L/s}$ 。

由上述分析可知, 同样管径条件下立管中水流通过能力大于入口处水流量, 进水口设计成漏斗型有利于提高入水口处的水流量, 进而提高整个系统

的水流通过能力。

4 列车在坡道上运行时对排水的影响及其解决方案

进水口处的水深 h 直接影响系统的排水能力,但列车运行中 h 是一个变量。因此,如何保证列车在坡道上行驶的任何情况下有足够的水深,是其不同于屋面雨水排放系统的一个重要问题。

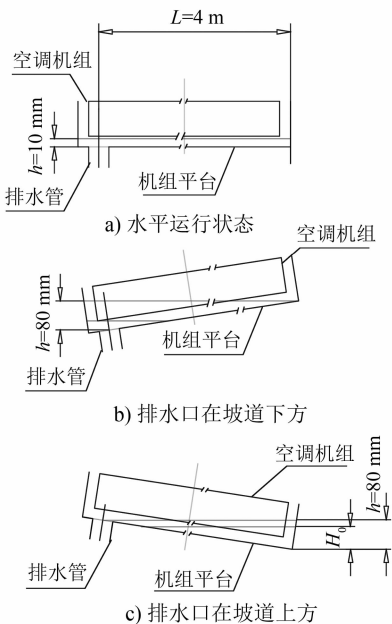
4.1 坡道条件

各地铁项目的坡道长度、坡度等不尽相同。GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》规定:正线运营最大坡度不大于 30‰。为了探讨坡度对排水的影响,初步选取长度为 2 000 m、坡度为 20‰的坡道作为研究对象。如果列车运行速度按 30 km/h 考虑,则列车在此坡道上的运行时间为 4 min。为便于计算,机组平台长度 L 按 4 m、水量按 180 mm/h 进行考虑。

4.2 列车在坡道上运行时的排水情况

图 6 a) 为列车在正常运行情况下, h 为 10 mm 时坡道的排水状态。根据前文计算结果,可以满足 0.24 L/s 的排水需求。

图 6 b)、图 6 c) 均为列车在 20‰的坡道上运行时的排水状态。其中,图 6 b) 为在有利于排水的方向,水深可不超过 10 mm;图 6 c) 的情况则较为复杂。



注: H_0 为坡道运行区间的积水深度。

图 6 坡道排水状态示意图

始有水排出时,另一端积水深度已经达到 80 mm。按假定的坡道条件计算,在 4 min 内 H_0 将达到 43.8 mm。这一数值已经超过机组下平面与机组平台间的间隙,即 20~30 mm(但非下回风机组由于下部不密封,一般仅为 10 mm)。如果蒸发器侧冷凝排水孔处理不当,就可能造成平台积水返流进入机组。

排水管设在空调机组平台中部的情况如图 7 所示。由图 7 可以看出,虽然 4 min 内 H_0 仍为 43.8 mm,但由于此时排水管距最低点深度为 40 mm,理论上已经可以有水排出,较端部配置方案有了很大改善。

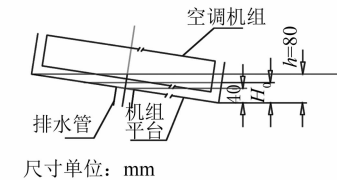


图 7 排水管设在空调机组平台中部

4.3 列车在坡道上运行时的排水方案

由上述分析可以看出,为了保证机组平台的排水,最好采用两端排水方案(见图 8)。

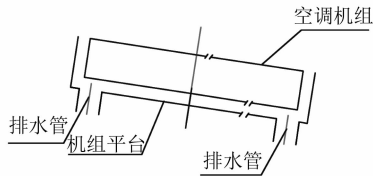


图 8 两端排水管示意图

为了加大排水管入口处的水深,也可考虑采用局部下沉排水结构(见图 9)。

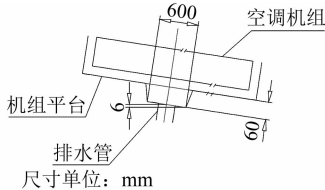


图 9 局部下沉排水示意图

深圳地铁 1 号线采用的是类似于图 9 的排水结构。该结构中,机组平台中部 600 mm 处局部下沉 60 mm,以便于安装空调机组,同时在平台最低处设排水管。原先更多地倾向于该设计是为了立式涡旋式压缩机的安装需要,而在对平台排水结构进行分析后发现,这种结构对于排水的意义更大。

由于排水位置设置在平台中部且局部下沉,所以无论列车在任何坡道上行驶,均可保证水落入平

台凹槽内。即使在 20‰的坡道上排水管与最低点的高差仅 6 mm,即 ΔH 为 0.22 mm。这意味着理论上只要有超过 0.22 mm 的水进入平台,就可以保证排水管有水排出,基本不会出现平台积水的现象。同时,由于局部下沉使得入水口处的水深迅速增加,初步计算只要有 1.8 mm 的降水就可保证入口处有 10 mm 的水深,平台排水能力大大提高。而深圳地铁 1 号线机组平台采用了两侧各设两支 $\phi 45$ mm 的排水管,主要是为了保证立管的排水能力。

5 结语

综上所述,在嵌入式空调机组封闭平台结构的雨水排放设计中应遵循以下原则:

- 1) 一般情况下,设计雨量按 200 mm/h 计算可以满足国内大部分地区的使用要求。
- 2) 空调机组安装接口应通过合理的角度、坡度及密封结构的设计尽可能避免其它部位的雨水进入平台,以及尽可能减少平台水量。
- 3) 排水口的位置应考虑坡道运行及机组冷凝排水的配置,在机组平台两侧前后部位各设 1 支排水管或采用下沉式排水口,保证入水口处的水深高度,提高排水管中流速,使得进入平台的雨水迅速

(上接第 81 页)

5 结论

针对 0.8 mm 厚 SUS301L-DLT 不锈钢材料的侧墙内板在拉延过程中易于出现破裂缺陷和拉延不足的现象,以及多个参数间存在交互制约的问题,采取的措施如下:

- 1) 在拉延成形过程中加强润滑。在不锈钢板与凸凹模、压边圈间布置聚氟乙烯薄膜进行润滑,能显著改善润滑条件,增加拉延过程中板材流料的均匀性,极大地协调改善了拉裂和拉延不足缺陷。另外,使用聚氟乙烯薄膜进行润滑省去了其他润滑方法导致的零件表面的除油清理工序,使得零件表面干净无污染。
- 2) 通过拉延成形模拟仿真和正交试验方法,得到了优化组合 $A_3-B_2-C_4$ 的参数设置,进一步协调控制了侧墙内板的成形质量。具体参数设置为拉延筋系数为 0.35,压边力为 300 kN,单边模具间隙为 1.20 mm。
- 3) 通过优化组合的工艺参数设计制造了模具,

排出。

同时,排水管的设计过程中既要考虑排水能力,也要便于加工、安装及清污。理论上建筑排水管在重力流条件下需要有不小于 20‰的安装坡度,考虑列车在坡道上运行的影响,理想情况下至少应设置 40‰的坡度,以保证在任何位置均可排水通畅。影响排水管设计的因素较多,但至少应保证在任何位置不得有横向管道高于入水口,以避免掺入空气时在上部形成空气柱而影响排水。

综上所述,列车在运行条件下其空调机组平台的雨水排放问题极其复杂,为此后续还需要做大量的研究工作,才能安全、可靠、经济地解决排水问题。

参考文献

- [1] 王增长. 建筑给排水工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 中国气象局. 暴雨年鉴 2009[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [3] 李长军, 朱秀红, 周秀军. 基于 3 种函数的县级城市暴雨强度公式比较研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2019(10): 560.
- [4] 香港天文台. 香港气象要素之月平均值(1980—2010)[EB/OL]. (2019-12-31)[2020-07-15]. <http://www.hk0.gov.hk/sc/cis/normal/1981—2010/normal.s.htm>.

(收稿日期: 2020-09-05)

使用聚氟乙烯薄膜润滑压出了合格试验件,验证了模拟仿真结果的有效性。

参考文献

- [1] 姚明哲, 杨志勇, 马秋红, 等. 不锈钢轨道车辆的特点[J]. 装备制造, 2015(3): 10.
- [2] 贾吉林, 张昌明. 304 不锈钢拉深成形模具设计[J]. 热加工工艺, 2012(13): 209.
- [3] 梁明勇, 吕琳, 刘君仪. 采用高分子薄膜润滑的防撞梁成形分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014(11): 37.
- [4] 刘君仪, 邓明. 高分子薄膜润滑在板料拉深中的应用研究与发展趋势[J]. 模具工业, 2014(1): 1.
- [5] 聂兰启, 王文舫. 黑色金属薄板拉伸时采用塑料薄膜润滑机理探讨[J]. 模具制造, 2008(10): 35.
- [6] 邓明, 朱祥, 刘君仪, 等. 板料成形的高分子薄膜润滑浅析[J]. 锻压技术, 2015(7): 103.
- [7] 柯桂颜, 路平, 石婧, 等. 拉延筋、压边力对冲压件成形性能的影响研究[J]. 锻压技术, 2016(5): 39.
- [8] 张海波, 孙力伟. 基于正交试验的车顶盖板冲压工艺参数模拟研究[J]. 锻压技术, 2017(4): 79.

(收稿日期: 2020-09-05)