

低压铸造铝合金车轮设计要点

铝合金车轮具有质量轻、能耗低、散热快、减震性好、安全可靠、外观漂亮、图案丰富以及平衡性好等优点，被整车制造企业和广大车主所青睐。

我国铝合金轮毂的生产大多采用低压铸造工艺。该工艺是在20世纪80年代后期由中信戴卡公司引进，经过20多年的发展，已经比较成熟。但真正意义上的开发设计工作是在最近几年，随着我国整车制造水平的提升，才开始与整车开发同步进行设计。

车轮设计要点

铝合金车轮的设计包括外观设计和工程设计。车轮外观要与整车外观相匹配，车轮不仅是外观件，还是重要的安全部件，因此外观设计时必须考虑工程要求。一般情况下，在车轮进行外观设计时，工程人员也要参与，与造型设计师共同完成外观设计工作，以缩短车轮的开发周期。

现以大众车轮设计为例，具体分析低压铸造铝合金车轮设计中关注的要点。大众车轮执行德国大众标准和欧盟的设计规范，主要考虑的方面有整车造型、车轮装配、车轮生产工艺和车轮试验。

1. 整车造型

车轮是整车的时尚装饰，是对整车外形设计的一种延伸，因此车轮造型作为整车造型的一部分，必须与整车的造型风格协调一致，给人以美感。

2. 车轮装配

车轮最终要装配到整车上，装配时与之相配合的零部件有轮胎、平衡块、刹车鼓、安装盘、安装螺栓和气门嘴。

铝合金车轮设计时注意的装配要点如下：

(1) 轮胎 与铝合金车轮装配的轮胎一般情况下是无内胎的子午线轮胎，在轮胎与车轮轮辋之间形成一个封闭的空间。大众车轮的轮辋结构执行欧洲轮辋标准——ETRTO标准，该标准对轮辋各部位的结构、尺寸做出了明确规定，在车轮设计时必须严格遵守。同时，为防止车辆行驶过程中路肩石划伤车轮表面（路肩石的高度标准为150mm），要求车轮正面不能超出轮胎外侧，一般要缩进2.5mm以上。

(2) 平衡块 平衡块的作用是使车轮在高速旋转下保持平衡，避免车辆在行驶过程中抖动和方向盘摆动，提高车辆的舒适性。车轮设计时，要求平衡块与刹车鼓之间的间隙不小于3mm。

(3) 刹车鼓 在车辆行驶过程中，车轮是旋转的，刹车鼓是静止的，因此在车轮设计时要保证车轮内表面与刹车鼓之间有一定的间隙，一般控制在3mm以上。

(4) 安装盘、安装螺栓 安装螺栓是将车轮定位、紧固到安装盘上的零件。在车轮设计时，要考虑安装盘的尺寸，车轮与安装盘的接触面积，安装螺栓的尺寸、结构和数量，螺栓的安装空间以及螺栓孔在车轮造型中的位置（车轮上的螺栓孔最好对应车轮的窗口部位），保证车轮安装安全可靠。

(5) 气门嘴 气门嘴是向轮胎和车轮轮辋形成的密封空间充气的零件。在车轮设计时要考虑气门嘴的安装位置、安装空间以及气门嘴的结构。铝合金车轮上使用的气门孔一般是TR414或TR413橡胶气门嘴，在高级轿车上也有使用带气压传感器的气门嘴结构。若

车轮使用带气压传感器的气门嘴，要保证气压传感器与轮辋之间有1mm以上的间隙。

车轮生产工艺要求

铝合金车轮的生产工艺有重力铸造、低压铸造、铸旋和锻造等。目前，我国铝合金车轮的生产主要采用低压铸造工艺，占我国铝合金车轮总量的80%以上。因此，本文重点介绍低压铸造铝合金车轮设计中应当注意的要点。

低压铸造铝合金车轮的生产主要包括熔炼、压铸、热处理、金属加工和喷涂五大工序。

1. 熔炼

熔炼是将外购的铝合金锭熔化成铝液，并在其中添加Si、Mg、Ti、Sr等合金元素，改善铝合金的力学性能，为压铸工序提供合格、稳定的铝液。目前，我国铝合金车轮使用的材料是A356（欧洲称为AlSi7Mg）。其中各合金元素的质量分数为 $w_{Si}=6.5\% \sim 7.5\%$ ， $w_{Mg}=2.0\% \sim 4.0\%$ ， $w_{Ti}=0.03\% \sim 0.15\%$ ， $w_{Sr}=0.01\% \sim 0.02\%$ 。熔炼工序提供的铝合金液的密度为 $2500 \sim 2600 \text{ kg/m}^3$ 。

2. 压铸

本工序是铝合金车轮的成形工序，通过干燥的压缩空气将铝液压到金属模具中冷却成形。该工序是保证铝合金车轮综合性能的关键工序。在车轮设计时考虑的重点：

1) 铝液在模具中的流动是否通畅，要实现层流，避免紊流。

2) 铝液在凝固过程中是否能够实现顺序凝固，即后冷却部位的铝液补充到先冷却的部位，以保证车轮的组织结构致密，提高车轮的综合力学性能。为实现顺序凝固，在车轮造型设计时，就要求后冷却部位的铝液流通面积 $\geq$ 先冷却部位的流通面积，保证 $S_{A-A} \geq S_{B-B} \geq S_{C-C} \geq S_{D-D}$ （见图1）。当车轮造型的要求不能满足时，就需要在模具设计时保证该项要求。

3) 降低铝液流动通道的阻力。在车轮造型设计中，应避免在铝液流动通道中突然出现凸起现象，影响铝液的正常流动。因此，设计时应尽量将车轮螺栓孔避开铝液流动的主通道，图1中螺栓孔的布置位置正好在轮辐的中间，不利于铝液的流动和补缩。补缩是在车轮凝固过程中，后冷却部位的铝液向先冷却部位补

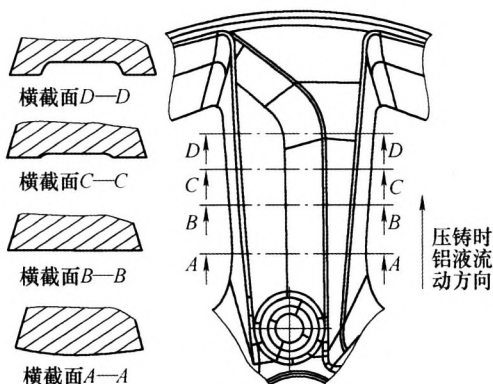


图 1

充，防止先冷却的部位出现缩松的现象。与图1相比，图2中螺栓孔的布置较好。同时，在轮辐减重窝的设计中要避免如图3a所示的结构，该结构对铝液流动的阻力大，不利于铝液的流动、凝固过程中的补缩和车轮轮辐性能的提高，应采用如图3b所示的减重窝结构。

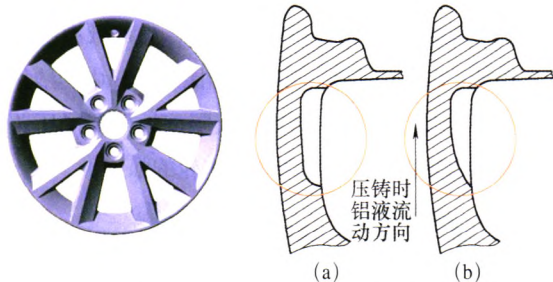


图 2

图 3

4) 由于铝合金车轮采用金属模具压铸成形。因此，在造型设计时就要考虑到拔模角 β 的大小（见图4）。 β 值的大小根据车轮的轮辐数量、轮辐厚度和在造型中的具体位置而定。一般情况下，轮辐数量越多， β 值越大；轮辐越厚， β 值越大；越靠近车轮中心部位， β 值越大。当 β 值较小时，容易出现车轮表面划伤、粘铝等外观缺陷，严重影响车轮的外观成品率，降低模具使用寿命，提高车轮的生产成本。在国内，一般 $\beta \geq 10^\circ$ 为宜。

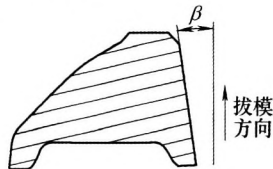


图 4

3. 热处理

目前，我国铝合金车轮的生产均采用T6热处理工艺。该工艺分为固熔、淬火和时效三个工序。其中固熔温度 $(535 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，固熔时间350min；淬火（水

淬) 温度70~85℃, 淬火时间2~3min; 时效温度150~155℃, 时效时间200min。通过热处理消除车轮内部应力、细化晶粒、改善组织结构, 提高车轮的力学性能。

但在热处理过程中, 由于车轮内部应力的释放, 会使车轮产生变形, 变形量的大小与热处理时车轮的放置方式有关。车轮竖直放置时, 轴向和径向的变形量均较大, 一般为1~2.5mm, 严重影响车轮的平衡, 车轮造型不易保证, 特别是精车亮面造型的车轮, 在一只车轮上圆周部位精车面的宽窄不一致; 车轮水平放置时, 径向变形量很小, 主要是轴向变形, 轴向变形量一般为0.5~1.5mm, 对车轮的平衡影响较小, 加工后的成品率较高, 车轮造型容易保证。因此, 在先进的热处理炉中, 轮毂均水平放置。

4. 金属加工

1) 在车轮设计过程中, 要考虑金属加工时的加工量。加工量越小, 金属利用率越大, 生产效率越高, 成本越低, 如图5所示。与图5b相比, 图5a中的结构不但减少了金属加工量, 而且最大限度地保留了压铸过程中的组织致密层, 有利于提高车轮的强度。

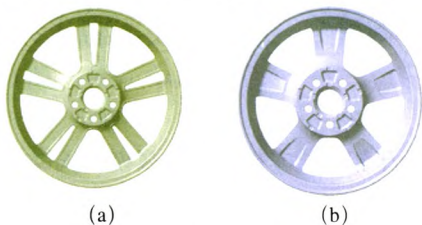


图 5

2) 造型设计时, 需要留出足够的操作空间, 避免去飞边时飞边刀划伤车轮表面。

3) 考虑加工刀具的使用寿命, 为了避免因圆角太小而导致刀具在加工过程中磨损过快, 一般情况下, 过渡圆角 $R \geq 2\text{mm}$ 为宜。

5. 喷涂

铝合金车轮的表面涂装工艺分为全涂装、精车、抛光、电镀和套色等。不同的表面涂装工艺对造型的要求不同, 在设计过程中必须加以考虑, 否则批量生产时无法满足客户外观要求。

(1) 全涂装产品 全涂装产品表面一般由底粉、色漆和透明漆三层漆膜构成, 对造型设计的要求比较宽松, 一般要求造型过渡圆角 $R \geq 2\text{mm}$ 即可。全涂装车轮造型设计可以相对复杂一些。

(2) 精车产品 精车产品的表面一般由底粉、色

漆和丙烯酸透明粉三层漆膜构成, 但在正面精车部位只有一层丙烯酸透明粉。在精车产品的生产过程中, 需要先喷涂底粉和色漆, 然后转到切削加工工序进行表面精车加工, 再转回喷涂工序喷涂透明粉。这样, 精车产品需要两次经过喷涂生产线。由于喷涂生产线中底粉烘箱的温度190~200℃, 丙烯酸透明粉烘箱的温度160~165℃, 对车轮性能的影响较大。一般情况下, 精车产品比全涂装产品的力学性能延伸率要低1%左右。

由于精车产品在精车面上只有一层丙烯酸透明粉(标准要求 $\geq 60\mu\text{m}$), 漆膜容易腐蚀, 特别是精车面与全涂装面之间的棱边吸附透明粉的能力较差, 透明粉层的厚度较薄, 存在精车加工时的飞边, 更容易出现漆膜腐蚀、起泡等现象。因此, 在造型设计中, 精车面与全涂装面间需要设计出半圆角结构(见图6), 并保证 $R \geq 5\text{mm}$, $\alpha \geq 135^\circ$, 精车表面透明粉层的厚度 $\geq 100\mu\text{m}$, 在精车面与全涂装面棱边无金属加工飞边的情况下, 可以满足漆膜240h CASS试验的要求。



图 6

(3) 抛光、电镀和套色等产品 市场占有率很小, 只有在少量美系车型和改装市场上使用。抛光、套色车轮生产效率较低, 成本较高, 不占市场主流。另外, 特别指出: 电镀车轮的生产对环境的污染比较严重, 欧洲市场禁止电镀车轮的使用。

车轮试验要求

铝合金车轮试验包括台架试验、油漆试验和整车试验等。在设计过程中, 特别是工程设计阶段要重点考虑。

1. 台架试验

车轮台架试验(又称可靠性试验)包括13°冲击、径向、弯曲和双轴试验等, 目前各车轮生产企业均能够结合自身工艺特点, 利用有限元分析的方法对车轮造型进行较为准确的计算分析, 大大缩短了开发周期, 有效保证了车轮的安全性和可靠性。

由于各个车轮生产厂家的生产工艺水平略有差异, 因此可靠性试验的判据也略有不同。某款车轮的13°冲击、弯曲、双轴试验的有限元分析如图7所示。

三个试验的判断依据分别是：最大变形量 $<8\%$ ，最大应力 $<140\text{MPa}$ ，最小寿命指数 >1.8 ，分析结果分别为最大变形量 6.358% ，最大应力 91.6MPa ，最小寿命指数 2.129 。由判据可知车轮设计合格，安全可靠。

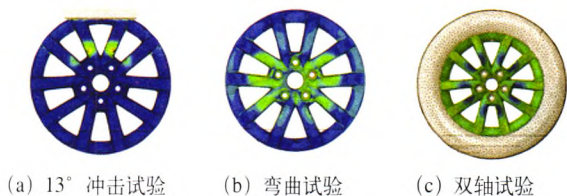


图7 车轮的有限元分析

2.油漆试验

铝合金车轮的油漆试验包括漆膜厚度、砾石、CASS、冷凝水、耐气候性、耐汽油、耐柴油、耐洗涤剂以及平衡块附着性等。在这些试验中，较难满足的是CASS试验。大众车轮CASS试验时间为 240h ，试验完成后要求油漆覆盖的部位不能腐蚀、不能起泡，油漆的二次附着力要满足涂装标准TL239中规定的油漆脱落I级的要求。

为了保证车轮能够满足油漆试验要求，在设计时，除车轮正面外，车轮的背腔和轮辋部位的喷涂方式也都要考虑。主要是背腔和轮辋是否需要喷涂漆膜，是喷涂底粉+色漆+透明漆（或透明粉）的三层漆结构，还是只喷涂底粉，或者可以不喷涂漆膜的结构。一般情况下，为满足CASS试验要求，采用背腔、轮辋表面喷涂三层漆的结构，并要求漆膜总厚度 $\geq 30\mu\text{m}$ 。

为保证车轮满足油漆试验要求，在设计过程中，要考虑轮辐表面，特别是轮辐侧面及窗口拐角部位的造型结构。轮辐侧面拔模角 β 角度越大（见图4），油漆的附着效果越好，油漆越容易成膜，漆膜厚度越容易保证，越容易满足试验要求；反之，轮辐数量越多，窗口拐角部位越狭小，在拐角处漆膜越薄，越不容易满足试验的要求。因此，建议车轮造型设计时，轮辐数量 ≤ 15 根为宜。

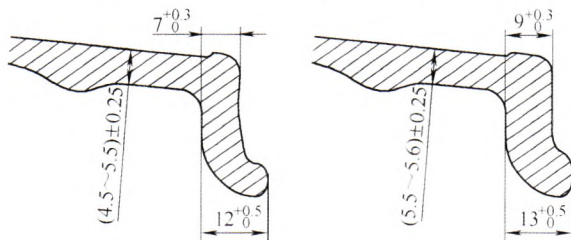
3.整车试验

铝合金车轮的整车试验包括装车匹配试验、门槛试验、螺栓紧固试验和路试试验等，所有的整车试验均由主机厂完成。

(1) 整车匹配试验 该试验主要是将车轮安装在车辆上，检测车轮与轮胎、平衡块、刹车鼓、安装盘、气门嘴、紧固螺栓和装饰帽零件是否干涉、是否

匹配正常。为满足该试验要求，在车轮设计时，车轮与这些零部件间均要留出必要的安装空间或配合间隙。这点在车轮装配要求中已经做了具体的阐述。

(2) 门槛试验 门槛试验是模拟汽车在行驶过程中，通过深沟或凸起的障碍物时车轮是否安全的试验。试验条件：满载、车速 $40\sim 60\text{km/h}$ ，障碍物的高度 100mm （半径 100mm 的圆弧）、障碍物与整车行驶方向的夹角 30° ，轮胎充气压力 250kPa 。试验判定标准：车轮无裂纹、无漏气，内轮缘侧最大径向变形量 $\leq 8\text{mm}$ 。为满足门槛试验要求，在车轮设计时，必须考虑车轮内轮缘和轮辋内胎圈座部位的结构、尺寸。图8是满足车轮门槛试验的两种内轮缘结构。



(a) 车轮载荷 $\leq 500\text{kg}$ (b) 车轮载荷 $> 500\text{kg}$

图8 车轮内轮缘结构

(3) 螺栓紧固试验和路试试验 车轮螺栓紧固试验是用标准螺栓将车轮以 $(120\pm 10)\text{N}\cdot\text{m}$ 的转矩安装在试验车辆上，试验车辆以最大载荷沿规定路线以尽可能快的速度行驶 13km 后，检验螺栓是否松动；当螺栓转矩 $< 80\text{N}\cdot\text{m}$ 时，判定车轮试验失败。当车轮螺栓孔周围的材料屈服强度达到 $190\sim 210\text{MPa}$ 、硬度达到 $85\sim 95\text{HBW}$ 时，能够满足螺栓紧固试验要求。

车轮路试试验是将车轮安装到整车上，行驶规定的里程，检验车轮是否安全的试验。路试试验分为强化道路试验和普通道路试验。强化道路试验在整车试验场中完成，一般行驶里程为 8000km ；普通道路试验在国家标准道路上完成，一般行驶里程为 $100\,000\text{km}$ 。路试试验的判定标准：完成路试后的车轮进行着色探伤检测，不能出现裂纹、不能漏气。

这两项整车试验是对车轮整体综合性能的检测。在车轮设计中，当满足了生产工艺中提到的各项要求，并保证了生产过程的稳定，这两项试验就能够满足。

关键词：

铝合金车轮 低压铸造 设计

(收稿日期20130117)