铝型材精密挤压工艺控制和模具设计分析

韩海波
（上海卫星装备研究所，上海 200240）

摘要： 铝型材作为航天领域综合性能最佳的结构材料，已广泛应用于各类航天器，其中挤压铝型材产量占据总产量的30%左右。为获得合格挤压铝型材，需要严格控制挤压工艺以及合理设计挤压模具，挤压工艺包括材料化学成分、铸锭加热工艺、挤压速度等；挤压模具设计包括模具材料选取和模具结构设计等。从控制挤压工艺以及合理设计挤压模具两方面出发，对挤压铝型材成形关键要素进行简要分析。

关键词： 铝型材；挤压工艺；挤压模具设计
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.02.017
中图分类号： TG376.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2016)02-0076-06

Process Control and Die Design of Aluminum Precision Extrusion

HAN Hai-bo
（Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China）

ABSTRACT: Aluminum profile is already widely used in various spacecrafts as the best structural material with the best comprehensive properties in aerospace. Hereinto the volume of aluminum extrusion is about 30% of overall output. It is required to strictly control extrusion process and reasonably design extrusion die so as to obtain qualified aluminum profile. Extrusion process involves chemical component of materials, heating process of ingot and extrusion velocity, etc. While extrusion die design includes selection of die materials and design of die structure, etc. Based on these two aspects, the main factors of the aluminum extrusion formation are briefly analyzed in this paper.

KEY WORDS: aluminum profile; extrusion process; extrusion die design

铝合金具有比模量/比强度高、导热性能好、耐腐蚀性能好、易加工、成本低廉等突出优点，尽管面临来自钛合金、复合材料等新型材料强有力的竞争，但仍然被认为是航天领域综合性能最佳的结构材料。基于其良好的综合性能，迄今为止铝型材仍然是航天工业中用量最大的金属结构材料。在可预见的时期内，铝型材在航天器结构中的首选材料优势是不可取代的[1-3]。

美国宇航局NASA的研究报告称，尽管复合材料具有更高的单向力学性能、比强度和比刚度，但铝合金因具有更好的抗多向撞击性能，比复合材料更适合用于建造“猎户座”的乘员舱[4]。洛克希德导弹航空公司为美国航空航天局研究的勘测卫星SEASAT-A中供各种传感器、发射器及天线等安装的固定架，质量为1189 kg，其中有404 kg为铝型材（占总质量的34%）；被称为半人马座标准罩的航天结构件，长17.89 m，直径4.27 m，质量2973 kg，其中有1905 kg为铝型材（占总质量的64%）[5]。另外，已发射的“神州”系列飞船的宇宙舱、航天员的座椅以及形状复杂的宇航服也多采用铝合金制作[6]。铝型材在航天领域的典型应用如图1所示。

收稿日期： 2016-01-10
作者简介： 韩海波(1986—)，女，工学博士，工程师，主要从事空间材料加工技术研究。

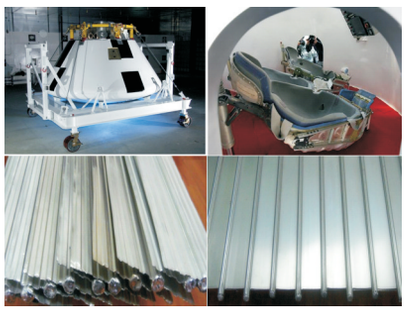


图1　铝型材在航天领域的典型应用

Fig.1　Typical use of aluminum profile in aerospace

由于铝合金挤压成形具有材料利用率高，材料的组织和机械性能得到改善，操作简单，生产率高，可制作长杆、深孔、薄壁、异型断面零件等优点，铝挤压材产量已占铝型材总产量的30%左右[7]。某航天铝型材挤压现场如图2所示。铝型材挤压成形主要受挤压工艺和挤压模具两方面限制：挤压工艺包括材料化学成分、铸锭加热工艺、挤压速度等；挤压模具设计包括模具材料选取和模具结构设计等。

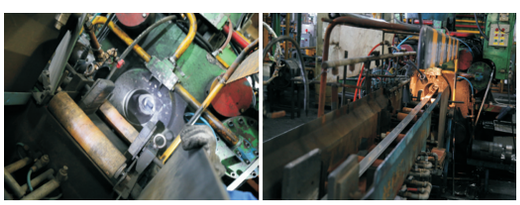


图2　某铝型材挤压现场

Fig.2　Extrusion scene of a kind of aluminum profile

1　挤压工艺

1.1　材料成分控制

在任何一款挤压合金的成分构成中，每一种合金元素的含量都不能超过一定的范围，因为合金成分不仅对型材的可挤压性产生很大影响，而且可对挤压产品的最终性能产生很大影响。铝合金中约80%的挤压材是用6XXX或Al–Mg–Si合金（6063，6060，6061等）制造，到目前为止挤压中最常用的合金是6063。对6063必须特别考虑其Si，Mg含量及Mg与Si的原子比。已注册的6063合金，其Si和Mg的组分范围分别为0.20%~0.6%和0.45%~0.9%，而且必须关注其他杂质元素的含量。杂质Fe控制在＜0.10%~0.25%；Mn＜0.10%[8–9]。

1.2　铸锭加热

挤压温度是最基本的且最关键的工艺因素。挤压温度对产品质量、生产效率、模具寿命、能量消耗等都产生很大影响。6063合金铸锭加热温度一般都设定在Mg_2Si析出的温度范围内，加热的时间对Mg_2Si的析出有重要的影响，采用快速加热可以大大减少可能析出的时间。一般来说，对6063合金铸锭的加热温度可设定为：未均匀化铸锭，460~520 ℃；均匀化铸锭，430~480 ℃。

在挤压过程中铸锭在变形区的温度是变化的，随着挤压过程的完成，变形区的温度逐渐升高，而且随着挤压速度的提高而提高。为了防止出现挤压裂纹，随着挤压过程的进行和变形区温度的升高，挤压速度应逐渐降低。

1.3　挤压速度

挤压速度对变形热效应、变形均匀性、再结晶和固溶过程、制品力学性能及制品表面质量均有重要影响，挤压过程中必须认真控制挤压速度。挤压速度过快，制品表面会出现麻点、裂纹等倾向，同时增加了金属变形的不均匀性。挤压时的流出速度取决于合金种类和型材的几何形状、尺寸和表面状况。6063合金型材挤压速度可选为20~100 m/min。

国外发展了用氮气或液氮冷却模具以增加挤压速度，提高模具寿命和改善型材表面质量。CADEX挤压过程中的挤压温度、挤压速度和挤压力形成一个闭环系统，以最大限度地提高挤压速度和生产效率，同时保证最优良的性能[10–11]。

1.4　机上淬火

6063合金可强化的最小的冷却速度为38 ℃/min，适合于风冷淬火。改变风机和风扇转数可以改变冷却强度，使制品在张力矫直前的温度降至60 ℃以下。

1.5　张力矫直

型材出模孔后，一般皆用牵引机牵引。牵引机工作时在给挤压制品以一定的牵引张力，同时与制品流出速度同步移动。使用牵引机的目的在于减轻多线挤压时长短不齐和抹伤，同时也可防止型材出模孔后扭拧、弯曲，给张力矫直带来麻烦。张力矫直除了可以使制品消除纵向形状不整外，还可以减少其残余应力，提高强度特性并能保持其良好的表面。

1.6　人工时效

时效处理要求温度均匀，温差不超过±（3~5）℃。6063合金人工时效温度一般为200 ℃。时效

保温时间为1~2 h。为了提高力学性能，也可采用180~190 ℃时效3~4 h[12]，但此时生产效率会有所降低。

1.7 铸锭长度

铸锭长度的计算方法有体积法和质量法。通过建立数学关系式，就能容易地选取出最佳的铸锭规格，大大提高型材的几何成品率。

1.8 提高挤压成品率的措施

影响挤压型材成品率的因素很多，在挤压生产中产生的废料一般分为几何废料和技术废料：几何废料是生产过程中仅与制品生产工艺有关的废料，压余、切头、切尾等均属几何废料；技术废料是在生产过程中，由于不正确执行工艺操作规程，人为造成废品。技术废品是可以避免和减少的，几何废品是不可避免的，但可通过优化挤压工艺和精确计算铸锭长度等措施来减少。

2 挤压模具

2.1 模具材料

挤压铝合金时，挤压模既承受压缩应力和弯曲应力，在脱模时又承受一定的拉应力，同时还受到冲击载荷的作用，要求模具材料在常温下 σ_b 大于1500 MPa，在工作温度下，挤压工具材料的 σ_b 不应低于650 MPa，模具材料的 σ_b 不应低于1000 MPa[13]。模具与炽热金属接触时间较长，要求模具材料具有高的热稳定性、高耐磨性、高导热性及良好的耐热疲劳性和足够的韧性，还应具有良好的工艺性能。

常用的挤压模具材料是铬系和钨系热作模具钢，还有铬钼系、钨钼系和铬钼钨系等热作模具钢及基体钢。铬系钢较钨系钢有较高的韧性，但高温强度不足，耐热性稍差，工作温度一般不超过650 ℃，被广泛用于制造工作温度低于600 ℃的热挤压模。铬系钢的过冷奥氏体在400~600 ℃之间具有很高的稳定性，可长时间保温而不分解，适合于分级淬火。铬系热作模具钢以4Cr5MoSiV1(H13)，4Cr5MoSiV(H11)和4Cr5W2SiV为代表，具有较好的抗氧化性能，耐热疲劳性好，能适应急冷急热的工作条件。钨系热作模具钢以3Cr2W8V为代表，其耐热性较铬系钢好，但韧性和塑性较差，抵抗冷热交变作用的能力和耐热疲劳性较差，在热挤压模方面的应用逐渐减少。铬钼系和铬钨钼系热作模具钢主要有3Cr3Mo3V(H10)，3Cr3Mo3W2V(HM1)，3Cr3Mo3Nb(HM3)，5Cr4W5Mo-2V(RM2)，4Cr3Mo3W4VNb(GR)，4Cr3Mo2VNiNb(HD)等。H10钢韧性较好，热强性和热稳定性优于H13钢；HM1钢在保持H10钢较好强韧性的基础上提高了热稳定性，热强性和耐磨性更高；HM3钢含少量的铌，有较高的抗热疲劳性和强韧性，回火稳定性较好；RM2的合金元素含量达12%，使用状态含碳化物较多，具有较高的回火抗力和热稳定性；HD钢可适应700 ℃左右工作温度的要求，用来制造热挤压模，使用寿命比3Cr2W8V钢显著提高[14-15]。热挤压模具用材料见表1。

表1 常用热挤压模具用材料

Table 1 Common materials for heat extrusion die

模具	凹模	凹模垫块及凹模环	模芯	模芯头镶块	垫片
材料	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV 4Cr5W2SiV	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV 4Cr5W2SiV	4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV 4Cr5W2SiV	W6Mo5Cr4V2 6W6Mo5Cr4V	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV 4Cr5W2SiV
硬度(HRC)	47~51	46~50	46~50	55~60	44~48

选择合适的模具材料后，还需要进行适当的热处理和表面强化处理，模具的质量和使用寿命很大程度上取决于热处理和表面强化工艺和效果[16]。

2.2 模具结构

铝合金挤压中最基本和最广泛应用的是平面模和锥形模，而对于壁较薄，断面形状复杂，沟槽和丝孔较多的空心和半空心型材，最常采用平面分流组合模，如图3所示。用分流孔和桥芯来调整流速，很少出现波浪、扭拧和弯曲，能够很顺利地生产出合格产品，且平

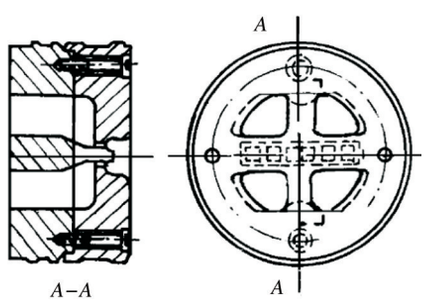


图3 平面分流组合模示意图

Fig.3 Schematic diagram of plane porthole die

面分流模较舌型模易加工,在挤压生产时操作简单,分离残料较舌型模易加工,生产效率高,残料较舌型模短,产品的成品率高。下面以平面分流组合模为例,对模具设计中的典型结构要素进行简略分析。

挤压模具结构因素的设计包括:模孔型腔出口断面的形状与尺寸;模孔工作带的形状与尺寸及有效高度;模孔出口与入口端的圆角半径;止推角或促流角;模角与从挤压筒表面到模子表面的过渡区;模孔工作带的入口角或阻碍角;型腔在模子平面上的布置及导流孔的配置;模孔的数目及其分布;模子的厚度及外形尺寸;分流组合模模桥和舌型模舌头的形状与尺寸,分流孔的数目、大小、形状与分布,焊合腔的形状与体积等。

2.2.1　分流比

分流比=分流孔断面之和/型材断面积,对于空心型材,取10~30;悬臂大的半空心型材,取10~20;管材,取8~15。

2.2.2　分流孔

分流孔的断面形状一般有圆形、腰子形、矩形、扇形和梅花形及异形等。对于复杂断面型材多采用扇形和异形。为了减小挤压力,提高焊合质量,或者制品的外形尺寸较大且扩大分流比又受到模子强度限制时,可做成内斜度为2°~4°,外锥度为3°~6°的斜形分流孔。分流孔的数目根据空心型材的断面形状、复杂程度和模孔排列位置具体确定。对于对称性较好的空心制品,各分流孔的中心圆直径应大致等于$0.7D_{筒}$。对于非对称空心型材或异形管材,应尽可能保证各部分的分流比基本相等。

2.2.3　分流桥结构

对异形型材分流桥的宽度与挤压机吨位有关,挤压机吨位为500,800,1630~2000,2500,3600,5000,8000 t时,对应的分流桥的宽度分别为15~18,18~22,22~26,30~35,35~45,40~50,50~60 mm。常用的分流桥截面形状如图4所示,主要有矩形、水滴形和矩形倒角形3种。

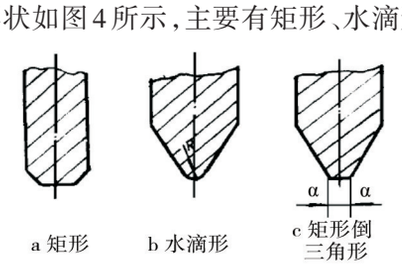


图4　分流桥截面形状

Fig.4　Sectional view of porthole bridge

分流桥下斜度,也称焊合角,一般取30°,对于模芯较小的取22.5°,桥底圆角为2~5 mm。分流桥高度设计原则:在保证模具强度的前提下,桥越矮越好,设计中要对模桥进行强度校核。

2.2.4　桥墩

为了增加模桥的强度,通常在桥两端设置桥墩。桥墩多呈半圆形,在保证焊缝质量、有充足金属流进模孔的条件下,桥墩距模孔越近越好,以减少跨度提高模具强度,而且有利于改善金属流动,避免死区的产生。

2.2.5　模芯结构

模芯定径区决定制品的内腔形状和尺寸,它的结构直接影响模具强度、金属焊合质量、模具加工方式和难易程度。最常见的模芯结构有锥式、锥台式和凸台式3种,如图5所示。

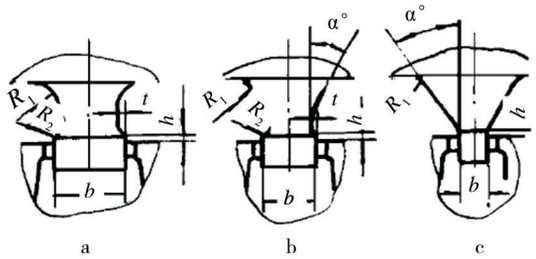


图5　模芯结构形式

Fig.5　Structure of die core

模芯宽度≤10 mm时,多采用锥式,这种结构形式的模芯强度和刚度都较高,但不易加工;模芯宽度10~20 mm之间,多采用锥台式,这种结构形式的模芯强度和刚度较锥式的稍低,但加工容易些;模芯宽度≥20 mm时,多采用凸台式,这种结构形式的模芯强度和刚度都不及前两种,但加工容易,同时也便于修模。

为了增加模芯刚度,在保证有充足金属流入模孔的前提下,模芯应尽量做的短些,但不能太短,因为太短会影响制品焊合质量,而且容易产生流速不均。模芯一般要伸出下模定径带3~5 mm,以保护下模定径带,避免碰伤。在确定模芯定径带长度时,要比下模定径带的对应部分上下都要长出0.5~1 mm,以确保定径带的有效长度。

2.2.6　焊合室结构

焊合室的尺寸和形状对制品焊缝质量有很大的影响。焊合室的深度可根据挤压筒的大小取经验值,一般$h_{焊}=(0.1\sim0.15)D_{筒}$。焊合室的截面形状及入口形式应随挤压制品断面的变化而不同,如图6所示。

为防止死区产生,焊合腔入口锥角一般取5~15°,底部圆角5~15 mm,对着分流桥桥墩处做成相

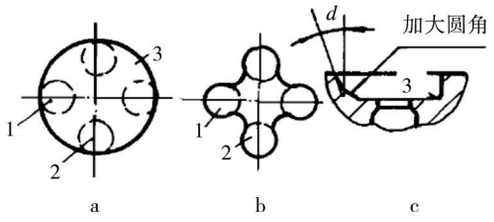


图6 焊合室基本形式

Fig.6 Basic structure of welding chamber

应的凸台，托住桥墩，凸台呈半圆形增加模具强度，同时也消除桥根处金属流动的死区。凸台侧表面至模孔边缘的距离应(6~8)t，t为同一位置模孔宽度。

2.2.7 模孔布置

对于单纯空心的型材应取几何中心置于模子中心；对于空心带实心的同一壁厚型材，空心部位尽量靠近模子中心，实心部位应尽量用分流桥遮蔽；对于壁厚差别大的空心型材，壁厚较薄的部位布置在正对着分流孔的位置，而把壁厚较大的部位布置在分流桥下。空心部位靠近模子中心，实心部位尽量用分流桥遮蔽。

2.2.8 模孔外形尺寸

外形和壁厚尺寸尽量按下偏差考虑，在模具设计上只考虑金属冷却后的收缩量。一般情况下，模孔外形尺寸$A=(1+K)A_0$，式中，A_0为型材外形名义尺寸，K为经验系数，一般可取0.007~0.015，对于6063合金一般取1.01~1.012。决定型材壁厚的模孔尺寸=型材壁厚的名义尺寸+壁厚模孔增量。当型材壁厚的名义尺寸≤3 mm时，壁厚模孔增量取0~0.05 mm；当型材壁厚>3 mm，取0.1 mm；当型材壁厚≤0.8 mm，取0.2~0.3 mm。

2.2.9 模孔定径带长度

首先选取分流桥下、远离挤压筒中心的壁厚最薄而流动阻力最大处作为模孔工作带长度的最短值，此处工作带的长度为壁厚的2倍左右；壁厚较厚或金属容易流动和供料较充分的地方，工作带长度取较小值；经常采用工作带长度8~15 mm；工作带长度变化处采取斜坡圆滑过渡，一般多采用30° 或45° ；若模孔工作带长度变化较大时，模芯相应部位的定径带长度也随之变化，采取同样斜坡圆滑过渡。

2.2.10 模孔空刀结构形式

常采用的空刀结构形式有直角切口、圆弧切口、斜切口、直角与斜度结合、斜度与圆弧阶梯等，如图7所示。

2.2.11 强度校核

主要校核由于挤压力引起的分流桥弯曲应力和剪切应力。安全系数≥3。

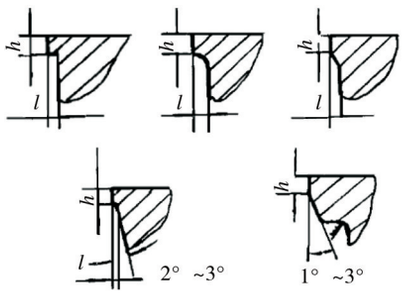


图7 模孔空刀结构

Fig.7 Structure of run-out

2.2.12 模具外形尺寸

外圆直径：当挤压筒直径小于200 mm时，$D_{模}>0.6D_0$(D_0为经过模孔最远点所划的外接圆直径)。为了简化起见，可以直接取$D_{模}=(0.8~1)D_{筒}$。厚度：在保证模具组件有足够的强度的条件下，模具的厚度应尽量薄，规格应尽量小，以便于管理和使用。对于中小型挤压机，模具的厚度25~80 mm，对于80 MN以上的大型挤压机，模具的厚度可取80~150 mm。外形锥角：模子外形锥角有正锥和倒锥两种，带正锥的模子锥度一般取为1.5° ~4° ，带倒锥的模子一般可取6° ~10° ，为了便于加工外圆锥度，在锥体的尾部一般加工出10 mm左右的止口部分。

3 结论

为获得合格挤压铝型材，需要严格控制挤压工艺以及合理设计挤压模具：(1)制订科学合理的生产工艺，提高操作人员技术理论水平，并不断总结生产经验；(2)严格控制铝合金化学成分以及铸锭加热工艺，设定合理的挤压速度，采取适当的热处理工艺，准确计算铸锭长度，以提高成品率；(3)模具设计中确定正确的模腔参数，确保模孔在模具平面上合理布置，准确计算模孔尺寸，保证模具强度，使模具设计先进合理并加强模具管理。

参考文献：

[1] 王建国，王祝堂. 航空航天变形铝合金的进展[J].轻合金加工技术，2013，41：1—6.
WANG Jian-guo，WANG Zhu-tang.Advancement in Aerospace Wrought Aluminium Alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology，2013，41：1—6.

[2] 张钰. 铝合金在航天航空中的应用[J]. 铝加工，2009(3)：50—53.
ZHANG Yu. Application of Aluminum Alloy to Aerospace

Industry. Aluminium Fabrication,2009(3):50—53.

[3] LEQUEU P, LASSINCE P, WANRER T, et al. Engineering for the Future: Weight Saving and Cost Reduction Initiative [J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2001, 73: 147—158.

[4] WILLIAM C, JOHN L, JAMES S.Aluminum Alloys for Aircraft Structures[J]. Advanced Materials & Processes, 2002, 160(2):27—29.

[5] 孙学银,姜建堂,甄良. 金属材料在航天领域的应用及其热处理工艺[J]. 金属热处理,2010,35(12):14—20.
ZHANG Xue-yin, JIANG Jian-tang, ZHEN Liang.Applications of Metallic Materials in Aerospace Field and Its Heat Treatment Process[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(12):14—20.

[6] 张新明,何振波,王正安. 航空航天用铝合金产业发展状况[J]. 中国新材料产业发展报告-航空航天材料专辑,2006:116—136.
ZHANG Xin-ming, HE Zhen-bo, WANG Zheng-an A. The Development of Aerospace Industry Aluminum Alloy[J]. China New Material Industry Development Report-Aerospace Materials,2006:116—136.

[7] BENEDYK J C. Review of Past Innovations and Recent Improvements in Aluminum Extrusion, From Alloy to Process Development[J]. Light Metal Age,2011(4):6—17.

[8] 赵国忠,刘静安. 6063铝型材挤压工艺的优化[J]. 铝加工,1999,22(1):21—23.
ZHAO Guo-zhong, LIU Jing-an A. Optimization of the Extrusion Process of 6063 Al Profile[J]. Aluminium Fabrication,1999,22:21—23.

[9] 刘静安,周昆. 航空航天用铝合金材料的开发与应用趋势[J].铝加工,1997,20(6):51—59.
LIU Jing-an, ZHOU Kun. The Development and Application Trend of Aluminum Alloy Materials for Aerospace[J].Aluminium Fabrication,1997,20(6):51—59.

[10] FARHOUMAND A, EBAHIM R. Analysis of Forward-Backward-Radial Extrusion Process[J].Materials & Design, 2009, 30(6):2152—2157.

[11] FARHOUMAND A, EBAHIM R. Analysis of Forward-Backward-Radial Extrusion Process[J]. Materials & Design, 2009, 30:2152—2157.

[12] SEHIKORRA M, DONATI L, TOMESANI L, et al.Microstructure Analysis of Aluminum Extrusion: Prediction of Microstructure on AA6060 Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201:156—162.

[13] DENG L, WANG X Y, XIA J C, et al. Effect of Isothermal Extrusion Parameters on Mechanical Properties of Al-Si Eutectic Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 6504—6509.

[14] 赵云路,刘静安. 第三讲 铝型材挤压模结构要素与设计原则[J]. 轻合金加工技术,1997,25: 36—40.
ZHAO Yun-lu, LIU Jing-an. Chapter 3: Extrusion Die Structure Elements and Design Principles[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1997, 25:36—40.

[15] 李红英. 金属塑性加工模具设计与制造[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
LI Hong-ying. Design and Manufacture of Metal Forming Mould and Die[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2009.

[16] 冯军伟,裴腾鹏,孙乾,等. 影响热挤压模具寿命的因素分析[J]. 锻压装备与制造技术,2010(3):64—66.
FENG Jun-wei, PEI Teng-peng, SUN Qian, et al. Analysis of Factors Which Influences Life of Hot Extrusion Die[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2010(3):64—66.

[17] 吴丽丽,杨妍,陈强民,等. 提高热挤压模具寿命的有效途径[J]. 中国新技术新产品,2013(3):79.
WU Li-li, YANG Yan, CHEN Qiang-min, et al. The Effective Way to Improve the Life of Hot Extrusion Die[J]. China New Technologies and Products,2013(3):79.

[18] 黄全新. 模具材料与热处理工艺选择探讨[J].广西教育,2012(3):190—192.
HUANG Q X. The Selection of Die Material and Heat Treatment Process[J]. Guangxi Education, 2012(3):190—192.

[19] 刘静安,邵莲芬. 铝合金挤压工模具典型图册[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
LIU Jing-an, SHAO Lian-fen.Aluminum Alloy Atlas of Typical Extrusion Die[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2007.