

# 高强高韧铝合金材料的制备技术及其装备

李小平

江苏理工学院材料工程学院副教授 博士

作者简介: 李小平, 江苏理工学院材料工程学院副教授, 博士, 硕士研究生导师。2006年毕业于上海交通大学获博士学位。近年来, 主持和参与完成多项国家和省部级以上课题的研究工作。其中主持在研国家自然科学基金委2013年专项基金项目1项, 主持在研2012年常州市科技支撑计划项目1项, 参与在研江苏省自然科学基金青年基金项目1项。荣获“2013年度常州市科技进步奖”三等奖1项, 荣获2011年度“中国机械工业科学技术奖”二等奖1项, 荣获2011年度“中国机械工业协会科学技术奖”二等奖1项, 荣获“2012-2013年江苏理工学院科研先进工作者”荣誉称号。

## 1 前言

铝合金材料因其密度小, 具有高比强, 耐腐蚀, 良好的导电和导热等特性而广泛应用于航空航天、轮船、高速列车、汽车、石油和地质钻探等领域。特别是针对超高强铝合金是今后研究和应用的重点。若以超高强度钢的比强度为标准, 可将屈服强度500MPa以上的铝合金称为超高强铝合金, 而且还要求具有良好的塑性和韧性。而采用传统的工艺已无法满足高性能铝合金的要求。因此, 采用新型的新的材料制备方法、发展新的成形加工及热处理制度以及研发相应的装备成为发展高性能铝合金的重要方向。

为制备出高强度高韧性的铝合金材料, 充分利用喷射成形技术和半固态加工两种材料制备技术的先进性, 创新使用产品设计方法和喷射成形制备铝合金毛坯、半固态加工工艺、热处理、及机械加工工艺, 研制新型高强、高韧铝合金材料运用于高性能铝

合金材料及其产品的研制。结合理论与工艺研究开发出相应的自动化程度高, 稳定可靠的工程化装备, 满足诸多领域对高高强高韧铝合金材料与产品的需求, 而且因为性能的大幅提高为轻量化的结构设计提供了材料保障。

## 2 核心技术简介

### 2.1 喷射成形技术

自主研发的喷射成形设备, 采用熔融的金属(合金)通过高压雾化气体将金属液体成分雾化成细小的液体和固体颗粒的混合物, 结合计算机三维设计, 控制雾化器的雾化状态和各参数, 同时控制接收体的运动轨迹和速度, 实现金属的逐层堆积, 达到生产不同形状和尺寸的金属零部件的目的。喷射成形制备锭坯原理示意图如图1所示。

### 2.2 金属半固态加工

喷射成形直接成形一般形状较复杂的零件比较困难, 且这种快速凝固坯料不能达到100%的致密度, 一般都

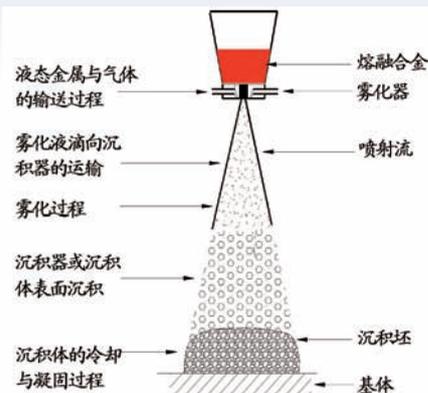


图1 喷射成形制备锭坯原理示意图

要将这种快速凝固毛坯进行二次成形或致密化处理。采用喷射成形坯料直接加热到半固态温度区间进行压制或挤压成型, 生产出所需形状的产品。产品能很好保持喷射成形得到的良好的组织与性能, 具有优异的综合力学性能。

## 3 工程化装备、材料与产品的研发与应用

运用已有的研究成果, 把先进的现代控制技术融入到喷射成形设备和半固态成型设备中, 实现设备的自动



图2 全自动喷射成形设备与生产的部分锭坯和管坯产品



图3 喷射成形材料半固态加工的部分产品

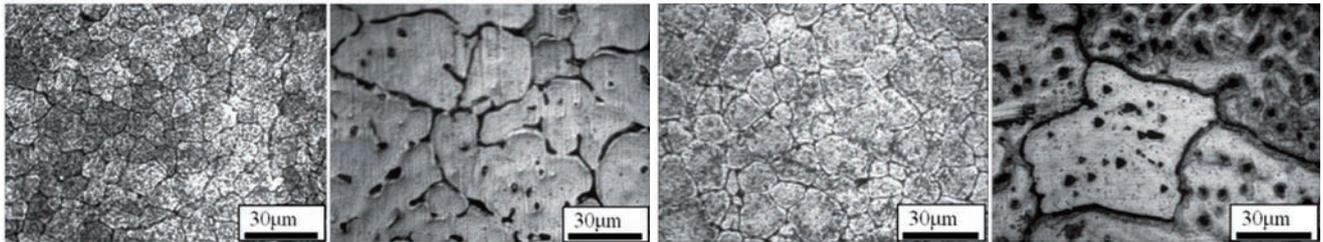


图4 研制7075/7055铝合金与铸态的组织比较

化,最优化。开发的设备效率高(5-10Kg/每分钟)、生产的材料或零件致密度高( $\geq 95\%$ 的金属或合金的理论密度)、内部组织结构细小(平均晶粒大小为 $5-20\mu\text{m}$ )、具有优良的综合力学性能等优良特点。特别是具有很好的变形加工性能,经过后续的变形可以制备不同形状和尺寸的超高性能的零部件。

目前,我们对多种铝合金系列如2xxx, 6xxx, 7xxx, 高硅铝合金等进行管坯和锭坯的批量生产。可以自主研发不同型号的喷射成形管坯和锭坯设备、研发半固态加工的不同型号的设备用于科研和生产,如图2、图3所示。目前各种产品广泛应用于航空航天、电子、核电、交通、石油地质钻探等领域。

#### 4 材料和产品组织与性能分析

利用喷射成形加半固态挤压加工技术制备的材料与传统的加工方法制备的材料进行性能分析和比较,可以明显看到新的复合方法的优越性,强度提高的同时韧性也提高很多,为制造高性能铝合金零件提供了非常好的材料制备方法。图4是研制的7075/7055铝合金与铸态的组织比较,图5是研制的7075管拉伸试样断

口扫描电镜(SEM)分析。表1是制备的A356材料的力学性能分析,喷射成形加半固态挤压制备的材料比典型的A356材料,在力学性能上提高了一倍。表2是7055铝合金材料与美国生产的材料之间性能对比,喷射成形加金属半固态加工制备的材料已经达到美国同等的性能水平。可以看出喷射成形加半固态挤压加工技术是制备高强度高韧性铝合金材料非常优秀的技术方法。(下转22页)

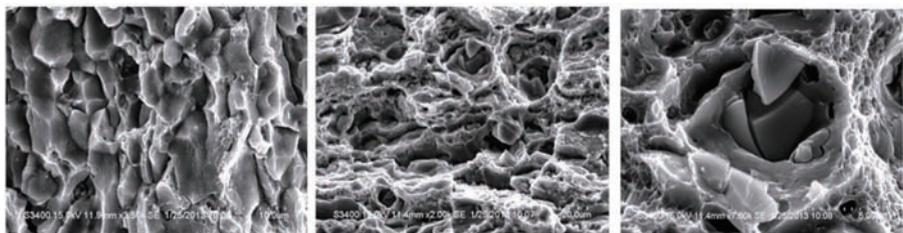


图5 研制7075管拉伸试样断口扫描电镜(SEM)分析  
(a)  $\Phi 70 \times 3\text{mm}$  (b)  $\Phi 70 \times 6\text{mm}$  (c)  $\Phi 70 \times 6\text{mm}$  拉伸断口塑性特征

# 钎焊材料制造及使用中的节能减排技术

鲍丽 龙伟民\* 张青科

郑州机械研究所 新型钎焊材料与技术国家重点实验室

**摘要:** 针对钎焊行业的环境问题, 本文综述了钎焊材料制造及使用中的新型绿色技术。在绿色新型钎焊材料方面, 介绍了无镉、无铅绿色钎料, 高效复合钎料以及预成型钎料; 在钎焊材料洁净高效生产技术方面, 介绍了短流程加工工艺、集成节能高效工艺以及免酸洗表面处理工艺等; 在无害化高效焊接技术方面, 介绍了超声波、CMT、复合热源等新型焊接技术, 以及无害化焊接过程的安全与防护。

**关键词:** 绿色钎料; 高效复合; 节能减排; 洁净生产; 无害化焊接

## 1 前言

焊接作为一种先进主导制造工艺技术, 正逐步集成到产品的主寿命过程, 已经渗透到制造业的各个领域, 直接影响到产品的质量、可靠性、使用寿命以及生产成本、效率和市场反应速度, 已发展成为材料学、力学、机械学、热处理学、冶金学、自动控制学、电子学、检验学等学科为一体的交叉性学科。

焊接行业在一定程度上对环境产生污染。钎焊材料的熔炼浇铸采用开放式单联工艺, 如感应炉熔炼, 即产生大量的粉尘、重金属蒸气(Cu、Pb、Mn等)、有毒气体(CO、H<sub>2</sub>S等)。焊接材料成形表面处理工艺会产生大量的酸洗溶液。焊接过程会产生大量的弧光、烟尘、烟气(金属蒸气体、HF、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>等)。焊接结构件由于钎料和母材的异质性, 回收难度大, 致使每

年均有数以百万吨计的废气焊接结构件产生, 钎料中的有毒元素和重金属元素更易进入环境。

粉尘排放加剧了我国近年来部分城市的雾霾天气。钎料中常见的有害重金属(Cd、Pb、Mn、Cr)是致癌元素, 对人体直接造成严重危害。加工过程中的酸洗溶液以及清洗焊件上残留钎剂溶液, 如处理不当直接排放, 会严重污染水资源。另外, 焊接行业污染对工人的健康造成威胁, 源自烟尘、有毒气体、弧光、噪音等因素的职业病层出不穷。

随着环境问题成为世界关注的热点, 制造业需改变传统的制造模式, 推行绿色制造技术。面对焊接行业的环境问题, “新型焊接工艺和绿色焊接材料”被列入“十二五”发展规划中。在20世纪末, “可持续发展”确定为我国的基本国策后, 钎焊领域专家已经开始致力于钎焊绿色制造技术的

开发。本文将从材料、生产技术、焊接技术三方面综合评述钎焊绿色技术。

## 2 绿色新型钎焊材料

### 2.1 无镉银钎料

为追求钎焊工艺性和技术经济性, 钎料使用者常常优先选用银基含镉钎料, 这是因为, 在相同银含量的条件下, 镉可以显著降低钎料的固相线、液相线、减小熔化温度区间, 因此传统的含镉钎料的综合性能优于无镉钎料。AgCuZnCd系钎料具有优良的钎焊工艺性能、较高的钎焊接头机械性能, 可用于各种黑色金属、多种有色金属及合金的钎焊, 因而含镉银钎料在中温钎料中占有很重要的地位。

鉴于镉元素的危害, 各国进行了大量的研究以开发绿色无镉银钎料, 如: 德国开发的4900成分为Ag49Cu16Zn23Ni4.5Mn7.5, 美国开发的Safety-silv60T成分是

项目基金: 国家科技支撑计划项目(2012BAB18B04); 国家863 高技术研究发展计划资助项目

Ag60Cu29Ni3Mn6, 美国AWS标准钎料BAG24成分是Ag50Cu20Zn28Ni2, 这些钎料都是在银铜锌基础上添加镍、锰等元素, 但总是存在钎缝强度、韧度、疲劳强度、钎焊温度、成本之间的矛盾。

目前, 我国用于白色家电铜管和不锈钢管钎焊的常见无镉钎料为BAG30CuZnSn, 但该钎料与含镉钎料相比存在流动性差、熔化温度高、润湿性能差的特点。郑州机械研究所针对应用领域对焊接接头性能要求不同的特点, 将钎料成分细分化, 开发出针对白色家电领域使用的速流性无镉钎料和针对硬质合金工具的高强韧无镉钎料。速流性无镉钎料主要成分为Ag30CuZnSnInP, 其流动性好, 焊接效率高, 适宜家电流水线作业。高强韧无镉钎料的主要成分为Ag50CuZnNiCoB, 可获得为强度和韧性优异的接头, 满足硬质合金工具的使用要求。

## 2.2 无铅钎料

锡铅钎料以相对低廉的价格提供了较优异的机械、导热、导电等性能, 在电子行业中得到了广泛应用。针对铅元素的危害, 经过历时20多年的大量研究, 目前全世界已经开发出了超过600种成分无铅焊料。国内外的研究成果表明, 最有可能替代传统的Sn-Pb合金的焊料为以Sn为主, 添加少量能产生低温共晶的Ag、Cu、Zn、Bi、In等金属元素的合金。无铅焊料的成分主要集中在Sn-Ag、Sn-Ag-Cu、Sn-Cu、Sn-Zn、Sn-Sb。在SnAgCu合金的基础上添加Ni、Ti、Cr、Ga、RE等微量元素, 能够细化晶粒、组织均匀化, 提高钎料润湿性能, 形成多元微合金化无铅钎料。在SnAgCu合金中添

加Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米粉或者C纤维, 可形成无铅复合焊料。纳米粉或者纤维加入能够降低合金的密度和热膨胀系数, 细化组织, 提高接头的力学性能。

## 2.3 复合钎料

目前, 对于大多数的钎焊工艺, 钎料和钎剂是分别使用的, 即在添加钎料之前先将钎剂添加到工件待焊位置。然而, 这种分别添加的方法, 一方面由于大量钎剂在发挥作用之前已挥发, 不仅污染了空气, 危害了操作人员的健康, 造成钎剂的浪费, 而且残留钎剂易成为钎焊接头发生化学腐蚀破坏的根源之一; 另一方面, 分别添加钎料和钎剂不利于自动化钎焊工艺的实施。为提高钎焊效率和钎剂使用率, 复合焊接材料成为钎焊材料的发展方向之一。目前市场上出现了一系列复合钎料产品, 如自钎钎料、药芯钎焊焊丝、药皮钎焊焊条、“三明治”钎焊焊带等。

由于铝的比重小、导电性和导热性好、铸造性能和机械加工性能优良, “以铝代铜”将成为在航空、航天、通信、汽车、高速列车、城市轻轨、船舶、电子和生活用品等领域的发展趋势, 以达到减轻重量、提高功效、增强美观的效果。铜-铝、铝-铝的焊接技术正是该新产业发展的技术基础和保证。药芯铝焊丝复合钎料(如图1)是



图1 无缝药芯铝焊丝

铜-铝、铝-铝连接的最新技术成果, 该焊丝适用于火焰钎焊、电弧钎焊等多种钎焊工艺, 能够较好地解决铜-铝、铝-铝接头的钎焊难题。同时, 能够减少75%钎剂用量, 大大降低了钎剂排放的污染。

硬质合金连接的主要难点是当硬质合金与其它材质母材连接时, 异种材料由于线膨胀系数存在差异使得钎焊结束后热应力难消减。自动化钎焊设备焊接速度快、加热和冷却时间短, 不能用钎焊前预热和钎焊后保温缓冷的方法来降低和消除焊后应力。针对不同材质部件定向润湿和消除热应力功能的“三明治”复合钎料(如图2), 能够使两种材质都有良好润湿性, 中间层为补偿合金用来缓释焊后热应力, 钎焊接头的使用寿命能够延长120%。

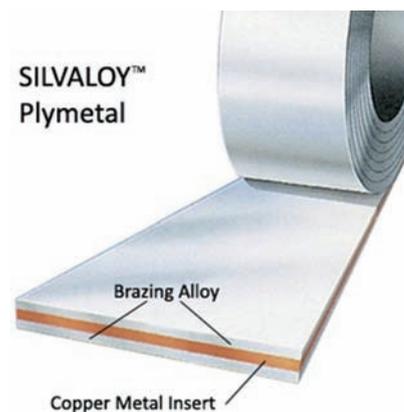


图2 “三明治”复合带状钎料

## 2.4 预成型钎料

预成型钎料是依据焊缝特殊形态要求定制而成的, 最常见的形态是环状, 此外还有方形、H形、U形、条形、圆形等等。在焊接过程中, 预成型钎料易于实现自动化装配, 使用方便, 工作效率高。钎料尺寸与钎缝的吻合, 钎料在润湿铺展过程中流损少, 钎料的利用率高, 从而降低了钎焊的用量。对焊接工艺对钎料的几何尺寸、表

面粗糙度等工艺性要求高；并且工件焊缝形态千变万化，预成型钎料的形态和尺寸也无法统一，提高了钎料的加工成本。

### 3 钎焊材料清洁高效生产技术

钎料制备需用到多种金属成形工艺，铸锻焊热处理、机加工电加工无所不尽其能。工艺主要是熔炼——浇铸——挤压（或轧制）——轧制（或拉拔）——表面处理等，其生产技术逐渐趋于洁净、短流程。

#### 3.1 熔炼浇铸技术

通常所讲的洁净熔炼技术是指真空熔炼或者气保护熔炼。二者熔炼的气氛不同，分别在真空环境和惰性气体环境中进行熔炼，都是密闭的体系，与大气基本隔开，金属在熔化时不会溶解气体，避免金属氧化和吸气；熔炼过程无须溶剂覆盖和脱氧，非金属夹杂物、气体夹杂等铸造缺陷大为减少；熔炼过程无烟气排放，对环境无污染。

短流程铸造技术有水平连铸、大铸锭铸造、底漏浇铸技术等。采用水平连铸技术获得的铸锭质量高，由于中间包与结晶器是直接相连，防止了二次氧化，提高了钎料合金的清洁度；该技术还能直接浇铸成小型铸坯（如70mm方坯），甚至几毫米的线坯，因此能用最小的轧制比取得终了产品，大大地缩短了冶金生产流程。

连续铸轧成型技术是金属熔体在连续铸造凝固的同时进行轧制变形的过程，将液态金属直接浇入辊缝中，轧辊既起着结晶器的作用又同时对金属进行轧压变形，直接生产出金属材料产品（如图3）。该工艺流程短，生产效率高，适用于带状、片状钎料生产。

此外，还有针对生产特种钎料开发的短流程浇铸熔炼工艺，例如石油钻井和地质钻探中应用的金刚石钻头生产所需的粘结钎料。郑州机械研究所开发了该种钎料的短流程生产技术，加工200kg粘结钎料的生产周期仅为2小时，较传统工艺生产效率提高了

近百倍。

#### 3.2 塑性成形工艺

在节能环保的基础上，传统的挤压、轧制、拉拔工艺不断改进提高，主要有中频加热挤压技术、热挤压——热连轧成型技术、连续拉拔技术、在线加热——连续拉拔技术。

中频加热挤压技术是将中频加热方式代替传统的箱式炉退火，实现连续退火、连续挤压，如图4所示。采用中频加热方式对铸锭实施退火，热量在工件内自身产生，加热均匀，芯表温差极小，退火效果好；该方式加热速度快，效率高；感应加热的过程无粉尘排放、能耗低，对环境无污染。同时，中频加热炉与挤压机连接，退火工艺和挤压工艺连续实施，大大降低了能耗、提高了工作效率。

热挤压——热连轧成型技术是铸锭连续通过挤压机和连轧机，一次挤压轧制成所需的规格，具有短流程、能耗低、生产效率高的工艺特点。

连续拉拔技术可将丝状钎料一次成型所需的规格，短流程、能耗低、生产效率高，常用的成型设备有直进式拉丝机、水箱拉丝机。该工艺适用于丝状、条状钎料生产。

在线加热——连续拉拔技术针对塑性差合金钎料，在拉拔过程实施在线加热，可将丝状钎料一次成型所需的规格，短流程、能耗低、成品高、生产效率高。该工艺适用于丝状、条状钎料生产。

#### 3.3 表面处理技术

钎料在包装之前，需要经过表面处理工艺以清理表面氧化膜，如果用酸洗工艺，会产生大量的酸洗废液，任意排放对水体造成严重污染。目前常用的免酸洗表面处理技术有表面刮

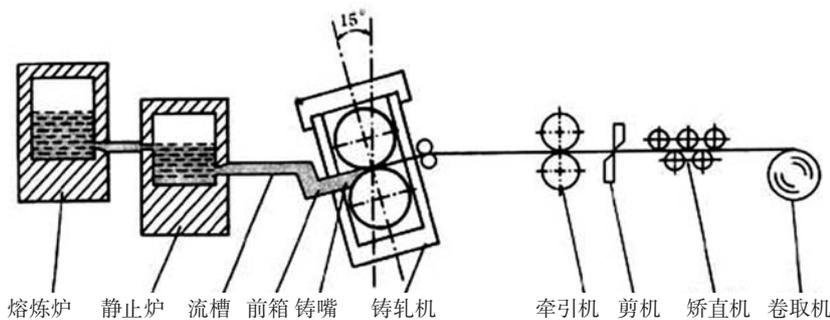


图3 连续铸轧工艺

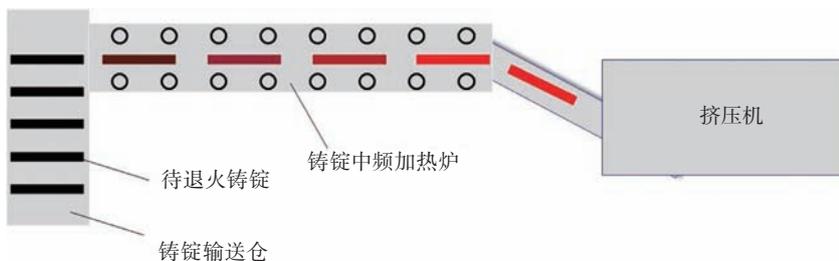


图4 铸锭中频加热挤压技术示意图

削洁净处理技术和光亮退火表面处理技术。表面刮削洁净处理技术是利用刮刀均匀刮除钎料高温加工过程中在表面上产生的氧化物层，裸露在空气中的金属层重新氧化生成致密的氧化膜层，防止氧化，同时经过表面刮削技术处理后，钎料表面色泽光亮。光亮退火表面处理技术是钎料在还原性气氛或者保护性气氛中实现表面无氧化退火。

## 4 无害化高效钎焊技术

### 4.1 超声波钎焊技术

超声波钎焊技术是利用高频振动波传递到待焊表面，在加压的情况下，使两个表面互相摩擦而形成分子层之间的熔合，如图5所示。超声波通过液体时，由于交变声压的作用，会产生稀疏和压密区域。当为负压强时，液体中出现数量多、体积极小的空腔，这种现象称为“空化效应”。空腔产生后，

随即在短暂的时间内，在声压的作用下闭合。空腔在闭合时，会产生高达几百或几千个大气压的局部瞬时高压，从而产生冲击波。该冲击压力作用到固体时，能破坏固体的表面，将待焊工件表面的氧化铝膜清除掉，钎料与纯洁的工件金属在润湿的条件下相互作用而结合。

超声波钎焊工艺具有快捷、节能、干净、成本低、效率高、无需装备散烟散热的通风装置，容易实现自动化生产等优点。

### 4.2 冷金属过渡焊接技术

冷金属过渡焊接技术(CMT)采用的是全新的短路过渡模式。将焊丝的运动与焊接过程相结合，焊丝的运动与焊接过程形成闭环。熔滴过渡后期电流几乎为零。CMT焊接系统采用数字化控制，对熔滴过渡过程进行监控。在熔滴形成、长大时，电源输入必要的电流；而在熔滴脱落，过渡至熔

池的过程中，电流输入减小，几乎为零，大幅度的降低了热输入量；之后焊丝短路，输入电流，熔滴再度形成。如此反复，形成连续焊接过程。由此可见，整个熔滴过渡过程是一个“热-冷-热”的交替过程。相对于传统的短路过渡，焊接热输入可减少50%以上。同时不存在短路桥的爆炸，焊接飞溅也不会产生。通过焊丝的回抽运动帮助焊丝脱落。CMT的焊接过程如图6所示。

### 4.3 复合热源焊接技术

聚焦激光束由于具有高的热源密度，使其应用于焊接领域具有速度高、热输入小、变形小、热影响区窄以及接头综合性能好等一系列优点。但是，与其他焊接热源一样，激光焊也有其缺点：设备投资大；能量利用率低；焊前的准备工作要求高；高反射金属焊接困难。接头中容易产生气孔、裂纹、咬边等缺陷。为避免单独激光焊接所存在的问题，研究者在保持激光加热的优点的基础上，利用其他热源的加热特性来改善激光对工件的加热，从而把激光与其他热源一起进行复合热源焊接。主要有激光与电弧、激光与等离子弧、激光与感应热源复合焊接以及双激光束焊接等。

激光-电弧复合焊接的原理如图7所示。激光防止电弧漂移，电弧增加激光收率，降低激光焊接对接头间隙的要求，匙孔大有利于气体逸出，减少气孔产生。

激光-感应复合焊接的如图8所示，采用感应预热，激光焊接，能够改善接头组织、降低裂纹和气孔倾向、提高焊接效率，非接触环保型加热。

### 4.4 焊接环境净化与防护

在焊接车间建立通风系统，通风

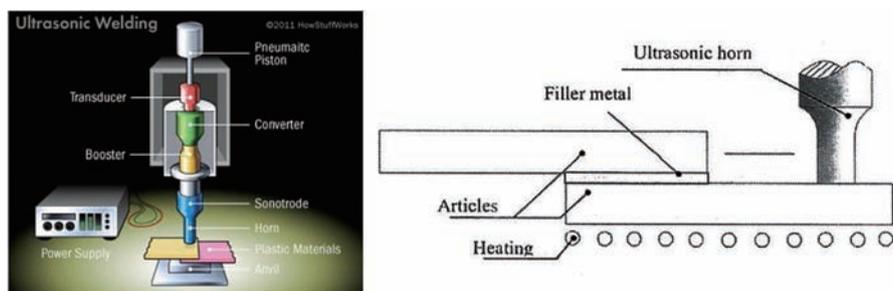


图5 超声波焊接原理图

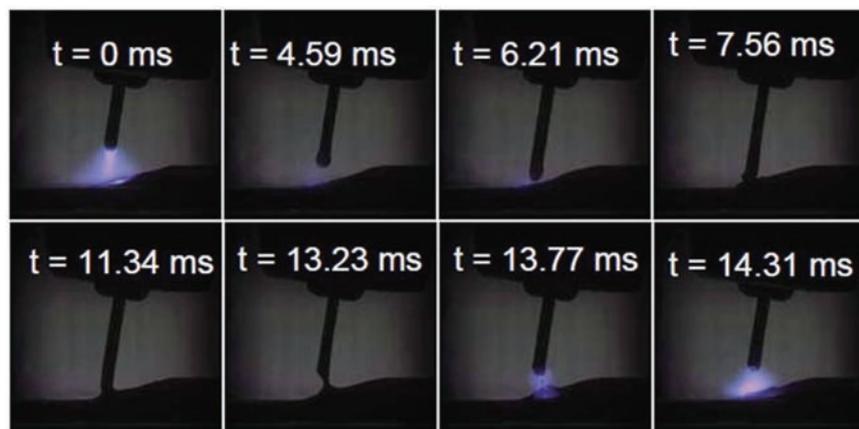


图6 CMT焊接过程

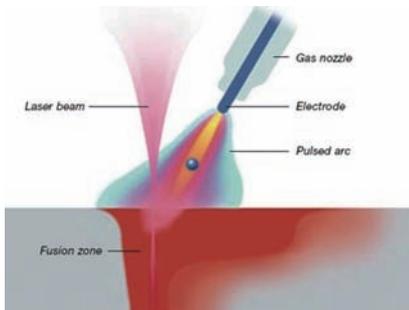


图7 激光—电弧复合焊接

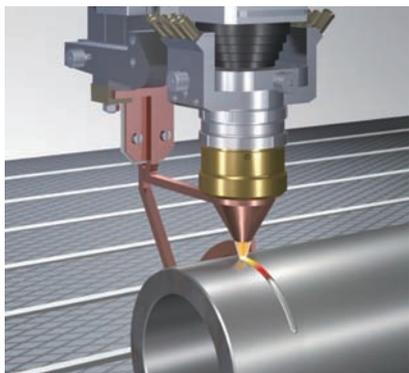


图8 激光—感应复合焊接

系统主要包括吸吹式通风系统、部分式通风系统、全局式通风系统和个体防护面罩。通风系统的选择准绳是笨

重性、可挪动性及适用性。在国外，焊工大量运用可挪动的部分通风安装。国外鼎力倡导全面通风为辅，部分通风为主的通风系统选择准绳。各种焊接烟尘搜集、净化安装都向成套性、组合性、可挪动性、小型化及俭省资源方向开展，并且获得了较好的成果，特别是可挪动的各种焊接烟尘净化安装为普遍采用。

在焊接过程中佩带自动变光焊接面罩，部分带过滤式呼吸器，可显著减轻弧光、烟尘、有害气体对操作者的伤害。同时，噪音的安全也需加强防护，如耐磨堆焊工艺中，采用水中电弧刨削技术代替传统的手工碳弧气刨，加工噪声小于70分贝，是原来的千分之一，噪声污染大大减小。

## 5 结语及展望

绿色焊接材料在我国已开始大量应用，全面取代有害焊接材料仍需采

取多种法律、技术、经济措施。国产绿色焊接材料市场占有率不高，有待于进一步提高，不仅需要开发新成分焊接材料，相关的生产工艺也亟待提高，重点开发低银无镉钎料、新型无铅焊膏/焊球。焊接材料绿色、高效生产工艺在很大程度上依赖于设备的更新，固定投资较大，需国家重点支持。超声波焊接、CMT焊接、复合热源焊接、智能焊接等新型焊接技术在提高焊接质量和效率，节能节材方面优势明显，其应用范围正在迅速扩大，政府政策引导、相关法律完善、重点应用示范，是焊接材料的绿色制造和无害化焊接技术推广的重要推动因素。

### 7

\* 通讯作者：龙伟民，男，研究员，博士研究生导师，郑州机械研究所总工程师，新型钎焊材料与技术国家重点实验室主任。Email: brazelong@163.com

(上接17页)

表1 A356材料力学性能分析

加工状态	力学性能			
	E/ GPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_b$ / MPa	$\delta$ / %
A356典型力学性能	63	155	230	3.45
喷射成形热挤压样棒 (T6)	72.49	262.64	295.34	8.56
喷射成形半固态挤压大样 (T6)	74.06	303.65	341.72	9.27

表2 7055铝合金材料的性能 (与美国比较)

	热处理状态	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_b$ / MPa	$\delta$ / %	制备工艺
美国	T6	503	572	11	挤压
	T73	434	503	13	挤压
	T651	505	570	11	自由锻造
	T7351	434	515	10.7	自由锻造
自制	T6	643	692	13	喷射成形加金属半固态加工

## 5 结束语

喷射成形半固态加工先进材料制备技术与装备的研发，将极大地推动喷射成形技术的研究和应用以及产业化、工程化的进程，锻炼出一支科研能力强的科研队伍，不断研究和开发出性能优异的新材料，制备出性能优异的产品，为轻量化的结构设计提供了材料保障。7

# 重卡变速器压铸模具制造技术

方建儒 孙锋 贾相武

一汽铸造有限公司 长春 130011

**摘要:** 本文通过压铸充型过程数值模拟分析,确定了较优的模具浇注系统、冷却系统设计方案以及较优的慢压射工艺参数。通过开发新材料、等温真空热处理工艺和氮化氧化表面处理工艺,制造出了重型卡车16档变速器壳体压铸模具,并成功生产出合格产品。

**关键词:** 16档变速器; HHD钢; 真空等温热处理; 氮化氧化表面处理

## Manufacture Technology of Transmission Housing Die Casting Die of Heavy Truck

Jianru FANG, Feng SUN, Xiangwu JIA

FAW Foundry Co., Ltd., Changchun, 130011

**Abstract:** In this paper, the optimization of the runner and gating system, the cooling system and the slow-shot process have been obtained after the mold filling and solidification simulations. New materials, isothermal vacuum quenching technology and nitridation-oxidation technology have also been developed to produce 16 speed transmission housing die casting die of heavy truck.

**Keywords:** 16 Speed Transmission; HHD Steel; Isothermal Vacuum Quenching ; Nitridation-Oxidation Coating

## 1 引言

变速器壳体材质由铸铁改为压铸铝合金是当今重型卡车高档化的重要标志。为了提高自主品牌重型卡车的竞争力,一汽拟将某重型卡车16档变速器壳体由灰铁改为压铸铝合金。由于重卡16档变速器壳体结构复杂,体积庞大,尺寸精度要求高,对压铸模具制造提出了更高的要求。本论文通过数值模拟来优化大型压铸模具浇注系统和冷却系统,通过开发新材料、等

温热处理工艺和氮化氧化表面处理工艺,来制作重型卡车16档变速器壳体压铸模具。

## 2 技术方案

### 2.1 模具设计优化

由于重型卡车变速器壳体压铸模具结构复杂、工艺复杂,为了降低风险,就必须采用计算机仿真技术进行压铸过程中的模具温度场和应力场模拟,以及金属铸造凝固过程的模拟,分析在压铸过程中可能出现问题,修

正模具和压铸工艺参数。经计算铸件的投影面积和锁模力,选用2700吨压铸机进行生产。根据设备资料,应用PRO/E三维软件把三维铸件摆放到压铸机合适的位置,再根据零件结构,由计算做出浇注系统、溢流槽和排气系统,然后进行充型模拟,进行流场、温度场分析,根据模拟的结果对浇注系统进行修改优化,之后再行模拟,再优化,直到模拟的结果达到压铸合格件的要求<sup>[1]</sup>,如图1所示。

资助信息:“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“2009ZX04013-033”和“2011ZX04001-071”支持。

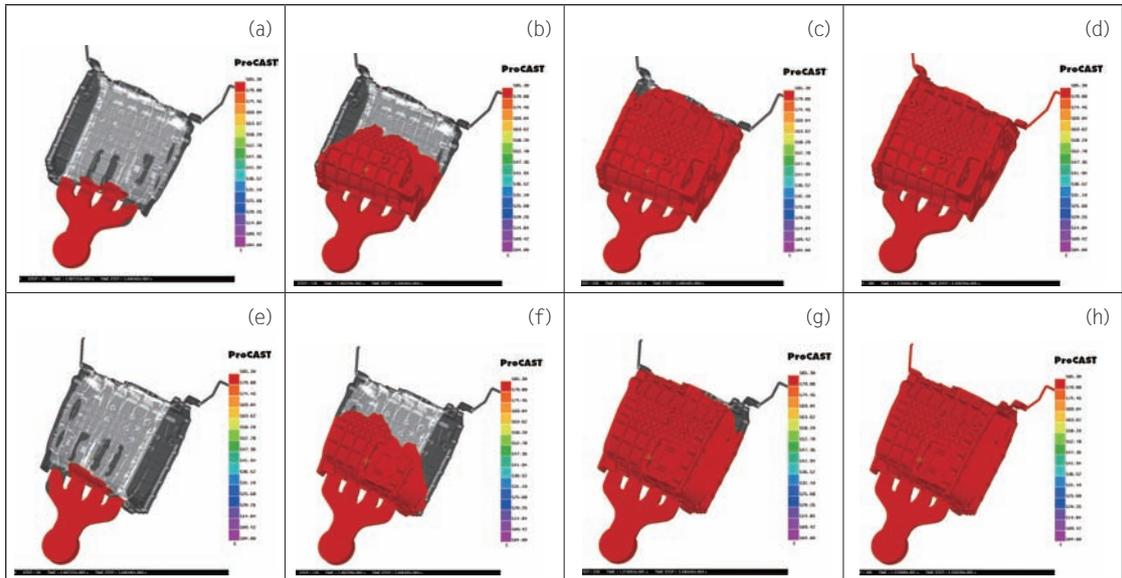


图1 不同充型时间时流场可视化分布图

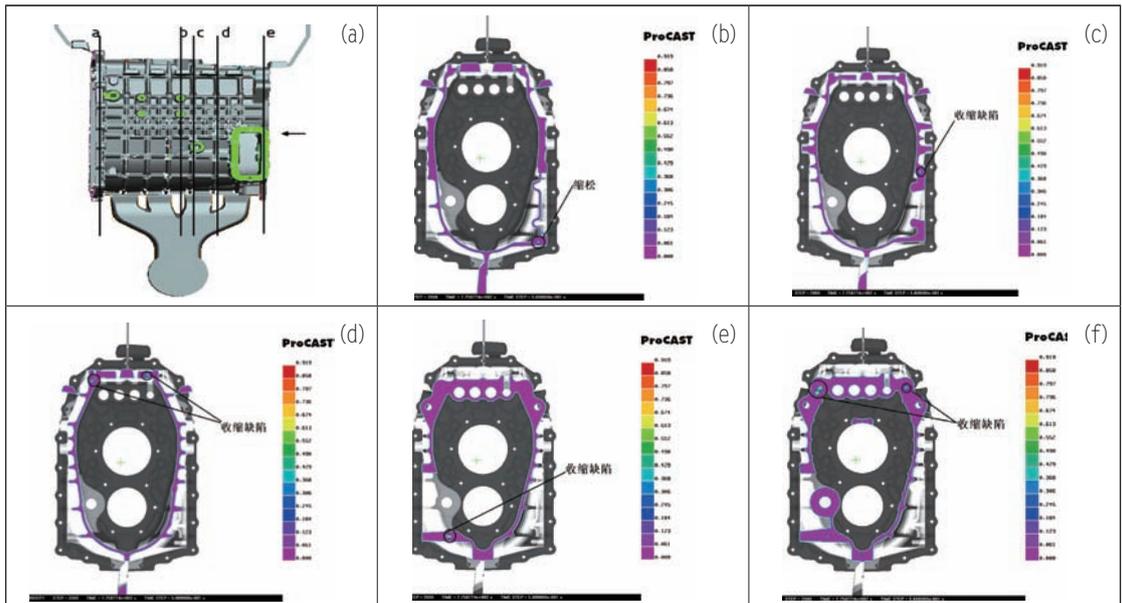


图2 收缩缺陷分布位置

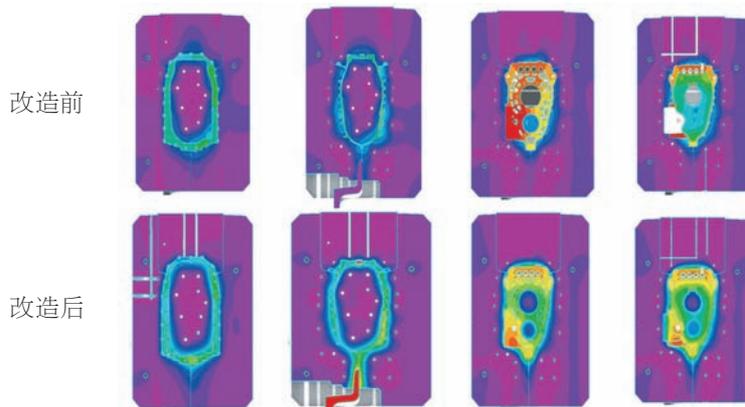


图3 改进前后冷却系统及模具温度变化对比

在压铸过程中，模具应该保持良好的热平衡，温度对铸件充型和凝固过程有很大的影响，为保证铸件的质量，需要在模具中保持均匀的温度分布和合适的温度水平。首先在模框和衬模上布置加热通道，在模具开始工作前用来对模具进行整体加热，使模具整体温度上升而不是衬模上的局部。在铝合金的压铸过程中，如果温度低将产生流痕、冷隔等缺陷，更严重

的是可能压射不足；而温度过高，将产生局部过热，产生粘模和出型困难现象，厚大的部分容易产生缩孔等缺陷。为保证模具在合理的温度范围内进行工作，首先对铸件凝固进行了模拟分析，图2为不加任何冷却时的凝固缺陷分布图，a、b、c、d、e为不同位置的5个剖面，可以看到缺陷存在铸件厚大的位置，图示容易产生缺陷的部位除正常布置冷却水路的同时，必须重点考虑，增设冷却系统，以便能及时对该区域进行冷却。

从图3可以直观看出，冷却系统的改进过程，以及由此对铸型内部温度场的影响。通过这种优化，可以将模具的温度场调整到一个较为理想的工作温度，由此保证铸件的压铸质量，同时可以保证模具受热的均衡，从而提高模具的工作寿命。

## 2.2 高淬透性模具材料开发与选用

压铸模具材料选择时主要考虑材料能够抵抗受到磨损、金属液流的冲刷、腐蚀及热疲劳等因素的影响而导致变形、破裂、粘着或龟裂的能力。同时，由于重型卡车变速器等大型压铸模具尺寸大、壁厚大，单件衬模重量可达两吨左右，壁厚600mm以上。传统的H13类模具钢淬透性很难满足这种特大型压铸模具的要求。

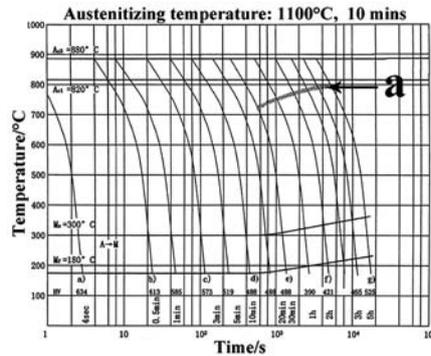


图4 HHD钢的CCT曲线 (a为碳化物析出线)

一汽与吉林大学联合开发出了一种新型高淬透性的热作模具钢—HHD钢<sup>[2]</sup>。由CCT曲线可以看出，HHD钢的碳化物析出倾向较小，在冷却速度为0.53°C/s时(冷却30分)才有碳化物的析出，而且碳化物细小、弥散分布在基体上。对照H13钢的CCT曲线，该钢试样冷却到90秒后就开始有碳化物析出，冷却到1000秒时就有贝氏体析出，因此H13钢在淬火冷却过程中为了控制没有碳化物析出，从1040°C冷却到540°C的速度必须大于5.5/s，要想避免心部出现贝氏体，模具心部在从1040°C冷却340°C的冷却速度大于0.7°C/s，对于大型模具，这是很难实现的。H13钢在冷却过程中碳化物和粗大贝氏体的出现大大降低了H13钢的塑韧性，增加了模具早期开裂的风险。

表1 HHD钢的力学性能

试验温度 °C	硬度 (HRC)	抗拉强度 $\sigma_s$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_b$ (MPa)	延伸率 $\delta$ (%)	断面收缩率 $\varphi$ (%)	冲击韧性 $\alpha_k$ (J/cm <sup>2</sup> )
26.7	HRC48.0	1800	1300	8.0	19.5	263.5
200	—	1660	1370	5.3	18.8	—
300	HV724.2	—	—	—	—	331.0
400	—	1540	1320	5.5	22.0	—
450	HV619.0	—	—	—	—	—
600	HV498.2	1030	920	6.0	31.0	339.0
700	—	302	270	22.5	85.5	—
750	HV296.0	—	—	—	—	—

表2 模具钢在150°C干滑动磨损失重 (单位: mg, 载荷: 20kg, 对磨环: 45#钢)

磨损时间	ASSAB8407 (HRC47)	ASSAB DIEVAR (HRC46)	HHD-1 (HRC46)	HHD-2 (HRC46.5)
0.5H	102	44	27	29
1H	232	110	64	67

表1为HHD钢的力学性能，由表可以看出，HHD钢具有较高的高温硬度和高温强度。在26.7°C、300°C和600°C的平均冲击韧性分别为263.5 J/cm<sup>2</sup>、331 J/cm<sup>2</sup>和339 J/cm<sup>2</sup>，当HHD钢

在室温硬度为HRC40.2时，其室温的冲击韧性为407J/cm<sup>2</sup>，这个数据高于GB1299-2000和NADCA#207-2007对冲击韧性的要求。

在压力加工过程中，总是存在

热磨损效应，热磨损是热作模具的主要失效形式之一，是影响模具寿命的关键因素。在相近室温硬度的条件下，HHD钢的热磨损失重不到ASSAB8407的三分之一，不到ASSAB

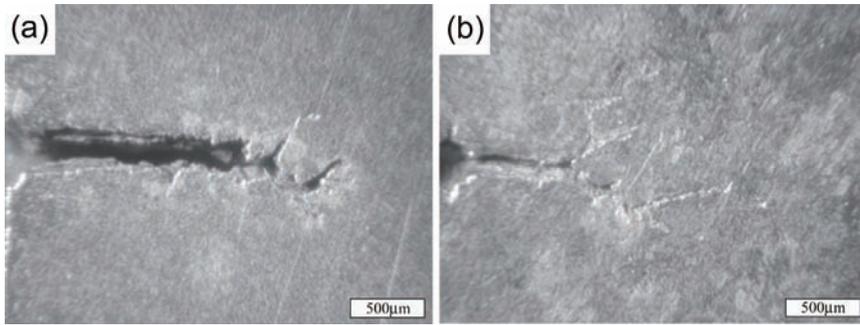


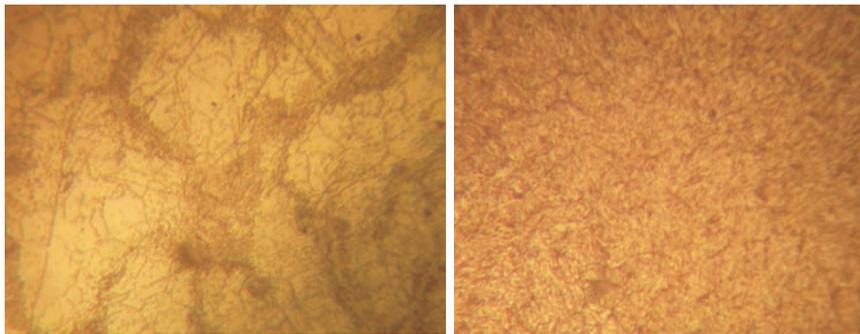
图5 热循环2000次后热疲劳裂纹形貌 (a) 8407钢 (b) HHD钢

表3 热疲劳性能对比

试样	2000次热循环	
	主裂纹长度 (mm)	主裂纹宽度 (mm)
HHD	1.61	0.10
4Cr5MoSiV1(8407)	2.17	0.28



图6 重型卡车压铸模具热处理现场照片



(a)HHD钢退火组织AS4

(b) HHD钢退淬火组织QS2

图7 重型卡车变速器壳体压铸模具热处理现场记录

表4 热融损(腐蚀-磨损)性能对比

实验材料及表面处理工艺	实验前质量(g)	实验后质量(g)	重量损失(g)	体积损失率 (mm <sup>3</sup> /h)	平均腐蚀-磨损深度 (mm)
H13钢	13.8557	10.0228	3.8349	488.5	4.885
HHD	13.8066	9.9706	3.8360	488.7	4.887
HHD氮化	13.6727	11.9003	1.7724	225.8	2.26
HHD氮化+氧化	13.8135	13.4224	0.3911	49.82	0.498

DIEVAR的二分之一(如表2所示),具有优良的抗高温磨损性。

热作模具在服役过程中频繁地被加热和冷却,极易发生热疲劳破坏。大量资料表明,热疲劳是热作模具的主要失效形式之一和寿命限制因素。由热疲劳引起热作模具失效约占60~70%。因此,热作模具钢必须具有好的抗热疲劳性。图5为热循环2000次后热疲劳裂纹形貌,可以看出HHD钢的抗热疲劳性能要优于8407钢。由表3可知,在相同的650℃ ↔ 20℃热疲劳实验条件和热循环次数下,8407钢的热疲劳主裂纹长度和主裂纹宽度分别是HHD钢1.51倍和2.87倍。

### 2.3 真空等温热处理

重卡变速箱壳体等特大型压铸模具往往尺寸大(外形尺寸超过900mm,重量超过1500公斤)、型腔复杂(抽芯机构多,厚薄不均匀)、壁厚超过600mm。采用传统的快速冷却,容易导致模具变形、甚至开裂;国内外很多热处理同行大都采用炉温控制加热,采用冷却压力小于6Bar的分级淬火的热处理工艺,虽然变形量得到了有效的改善,却导致了模具性能的下降,使得模具寿命达不到要求。

本项目在模具心部和表层插入热电偶,通过炉温电偶、模具心部电偶和模具表面电偶来控制压铸模具的加热和冷却速度(如图6所示)。在先共析铁素体、先共析碳化物区间,以大于

9Bar的冷却压力快速冷却。在粗大贝氏体的析出以上温度,通过把冷却压力降低到2Bar,停止风机转动,启动对流风扇来实现等温。等温结束后,再将氮气压力充到9Bar以上,关闭对流风扇,重新启动风机转动来实现快速冷却。本方法解决了快速冷却开裂和慢速冷却性能下降的矛盾问题,该发明既能降低开裂风险,又不损伤压铸模具性能,实现大型压铸模具的高寿命。

本项目开发出了一种氮化氧化复合处理的表面处理技术。由表8可知,HHD钢氮化处理后热融损降低54%,氮化氧化复合处理后热融损降低90%。

### 3 现场应用

本项目成功开发出了重卡变速器壳体压铸模具(如图8所示)。开发复



图8 重卡压铸模现场图片

杂压铸模具周期由进口的180天缩短至116天,缩短了35%;价格由进口的420万减至160万,降低了62%。2012年8月20日在2700吨压铸机上调试,一次调试成功,压铸出合格的产品,共生产了600件产品,经检验576件为合格铸件,合格率为96%。经检验,变速器壳体铸件孔隙率(即气隙度)4.5%。铸件重18公斤,浇注系统重6公斤,工艺出品率为75%,加工单位没有加工废品,目前已经进行装车。目前,模具结构优良,状态良好,正在进行连续生产,满足了装车的需要。

### 4 结论

1. 通过压铸充型过程、模具热平衡及慢压射工艺进行模拟分析,确定了最优的模具浇注系统、冷却系统设计方案以及最优的慢压射工艺参数。

2. 新型热作模具钢(HHD钢)具

有较高的淬透性、较高的耐磨性和抗热疲劳性。

3. 大型压铸模具采用真空等温热处理工艺,解决了大型压铸模具容易开裂、变形和淬不透的难题

4. HHD钢氮化处理后热融损降低54%,氮化氧化复合处理后热融损降低90%。

5. 开发出J6重卡16档变速器壳体压铸模具,开发复杂压铸模具周期由进口的180天缩短至116天,缩短了35%;价格由进口的420万减至160万,降低了62%。T

### 参考文献

[1] 张伟. 大型汽车零件压铸模具辅助设计及工艺优化, 清华大学硕士学位论文, 2012

[2] 方建儒. 新型高性能压铸模具钢(HHD钢)的开发, 中国一汽博士后研究报告, 2005

作者信息

方建儒, 一汽铸造有限公司铸造模具厂, 正高级工程师, 长春市东风大街153号, 邮编: 130011, Tel: 0431-85759532

Fax: 0431-85759517

Email: jjk1\_zm@faw.com.cn



# 用于铲刀连接座凹球面的淬火感应器及 配用尺寸确定方法

段华荣 丁芳 范巧变

中国一拖集团有限公司 河南 洛阳 471004

**摘要:** 本文所述淬火感应器及配用尺寸方法,系通过采用方铜管制作感应圈有效感应弧端和导磁体的驱磁作用,解决了感应加热效率提升以及圆环效应的影响问题;通过采取感应器冷却用水与感应淬火冷却介质合二为一的方法,解决了铲刀连接座凹球面淬火时所需冷却介质的问题;通过采用配用尺寸确定方法,解决了淬火感应器所需的有效感应弧端宽度、有效感应弧面半径等配用尺寸的确定问题。另外,所述感应器及配用尺寸方法,构思新颖,结构合理,易于制作,且方法简单可行,具有很好的使用价值,并已申报了国家专利。

**关键词:** 铲刀连接座;凹球面;淬火感应器;配用尺寸确定

## Chilling Inductor and Size Matching Method for Concave Sphere of Shovel Connecting Base

Huarong DUAN, Fang DING, Qiaobian FAN

Technique and Material Research Inst., Yituo Group; Luoyang 471004, China

**Abstract:** Chilling inductor and size matching method in this article use square copper pipe for profiling arc of double turns induction coil to solve the problem of low heat efficiency and round ring effect. Besides, we regard the cooling water of inductor as chilling cooling media, which solve the cooling media problem while chilling. What's more, method of matching size fixing tells all the people that the correct way of effective induction arc's width and effective cambered surface radius's determine. Moreover, chilling inductor and size matching method mentioned above well with conceives distinctive content, original structure, production at low price, easy maintenance, and simple configurations, which has the value of being promoted and have declared the national patent.

**Keywords:** Shovel Connecting Base; Concave Sphere; Chilling Inductor; Matching Size fixing

### 1 问题的提出

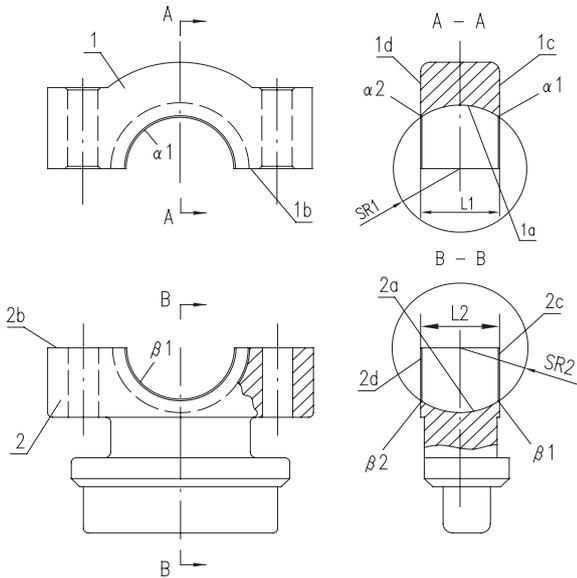
众所周知,推土机铲刀,系通过铲刀连接座与推土机上的油缸动力驱动

配合,实现其铲刀所需的万向转动功能。本文所述的铲刀连接座,是一合件的统称,包括“带有凹球面”的上盖和“带有凹球面”的下座,且二者用连

接螺栓连接成为一个整体。

下面,例举某推土机所用铲刀连接座,结构情况,如图1所示:

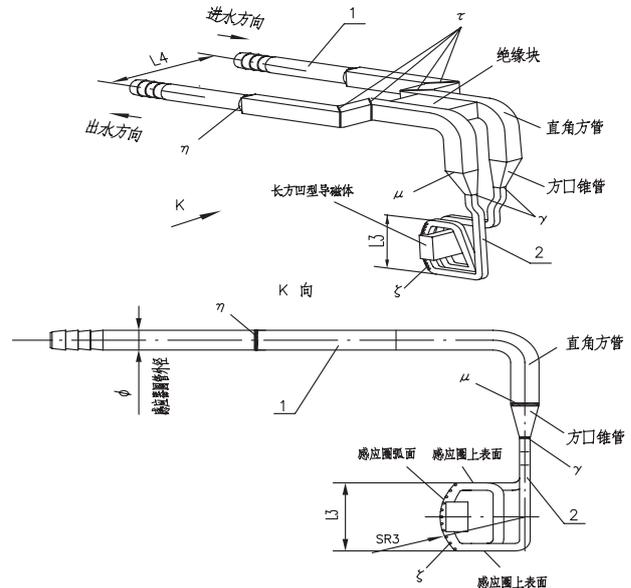
公知的,推土机在实施作业时,铲



1. 铲刀连接座上盖 1a. 上盖凹球面 1b. 上盖连接面  
1c. 上盖前端面 1d. 上盖后端面 L1. 上盖宽度  
2. 铲刀连接座下座 2a. 下座凹球面 2b. 下座连接面  
2c. 下座前端面 2d. 下座后端面 L2. 下座宽度  
SR1. 上盖凹球面半径尺寸 SR2. 下座凹球面半径尺寸  
 $\alpha 1$ . 上盖前尖角处  $\alpha 2$ . 上盖后尖角处  
 $\beta 1$ . 下座前尖角处  $\beta 2$ . 下座后尖角处

图1 铲刀连接座上盖及下座

Fig.1 Upper cover and blow seat of shovel connecting base



1. 感应器基体组件 2. 可喷水感应圈组件  
 $\gamma$ . 两组件连接处  $\delta$ . 淬火水孔  
L3. 有效感应弧端宽度 L4. 两圆管接头间距  
SR3. 有效感应弧面半径  $\mu$ . 焊连 I 处  $\tau$ . 焊连 II 处  
 $\eta$ . 焊连 III 处  $\phi$ . 圆管外径

图2 铲刀连接座凹球面淬火感应器结构示意图

Fig.2 Diagram of Chilling Inductor

刀连接座在其作业的过程中则需要承受较大的工作载荷，其中，铲刀连接座的凹球面由于与铲刀尾部的球头实施可转动配合，故在其发生转动的同时，将伴随有不可避免的转动摩擦，工作次数越多、载荷越大，转动摩擦越为严重，因此，对于铲刀连接座的凹球面（上盖凹球面1a和下座凹球面2a）而言，应具有较高的耐磨性。

为提高铲刀连接座凹球面的耐磨性，所采用的方法，如下：

1. 整体淬火。即对铲刀连接座上盖与下座分别进行整体淬火，目的是获得铲刀连接座上的凹球面（上盖凹球面1a和下座凹球面2a）所需的硬度和淬硬层深度。不足之处是：凹球面以外无需硬化的部位淬火后硬度过高，另外，整体淬火时间长，耗能高，淬火质量难以保证。

2. 局部淬火。为解决整体淬火出现的问题，一些企业曾尝试采用火焰加热表面淬火等局部淬火方法，即对铲刀连接座凹球面进行淬火。不足之处是：火焰加热的时间、距离、移动速度凭操作者的经验手工操作，铲刀连接座凹球面的淬火硬度、淬硬层深度、淬火均匀性难以满足要求，操作不当甚至引起凹球面裂纹，造成铲刀连接座的报废。

为克服上述不足，本单位采取局部“感应”淬火热处理的方法，使得上述问题得以有效解决，即使得凹球面的淬火质量（淬火硬度、淬硬层深度、淬火均匀性）得到了可靠的保证。需要说明的是，在所用局部“感应”淬火的方法中，所用淬火感应器及配用尺寸确定方法是一关键所在，其技术方案的优劣，将直接关系到上述问题的

有效解决，具体技术难点为：

1. 如何提高淬火感应器的感应加热效率，以及如何解决其淬火感应器产生圆环效应的影响问题；

2. 在铲刀连接座凹球面的内侧空间狭小情况下，如何借助淬火感应器实施感应淬火冷却，即，提供淬火冷却介质进行冷却的问题；

3. 如何依据需求实施感应淬火的铲刀连接座凹球面以及与外配的感应淬火装置以及电源设备等的配用情况，解决淬火感应器的配用尺寸（如淬火感应器的有效感应弧端宽度、有效感应弧面半径等）确定问题。

## 2 淬火感应器技术方案

为解决所述淬火感应器的上述问题，本文提供一种用于铲刀连接座凹球面的淬火感应器的技术方案，即：通过

采用方铜管制作双匝感应圈的有效感应弧端并采用长方凹型导磁体固联的方法,解决感应加热效率提升以及圆环效应的影响问题;通过采取感应器冷却用水与感应淬火用冷却介质合二为一的方法,并在其双匝感应圈第二匝圈有效感应弧端的外侧设置若干个淬火水孔,解决铲刀连接座凹球面感应淬火时所需淬火冷却介质的问题。

淬火感应器的结构方案,如图2所示:

由图2知,用于铲刀连接座凹球面的淬火感应器,包括:感应器基体组件1和可喷水感应圈组件2,二者在两组件连接处 $\gamma$ 处焊连为一个整体;另外,在可喷水感应圈组件2上,设置有若干个淬火水孔 $\zeta$ 。

感应器基体组件1,包括:两个方口锥管、两个直角方管、两个短方管、两个长方管、两个圆管接头和绝缘块

等;其中,方口锥管在焊连I处 $\mu$ 与直角方管焊连;短方管在焊连II处 $\tau$ 与直角方管、长方管焊连;长方管在焊连III处 $\eta$ 与圆管接头焊连;直角方管与绝缘块连接,系采用耐高温胶粘连;另外,在圆管接头上,设置有呈倒齿形的圆管接头端。

可喷水感应圈组件2,包括:双匝感应圈和长方凹型导磁体;双匝感应圈采用方铜管制作,分为第一匝圈和第二匝圈,且其上分别设置有效感应弧端,其中,在第一匝圈和第二匝圈的有效感应弧端上的两个有效感应圆弧面,为有效感应弧面半径 $SR3$ 尺寸的仿球面形状;另外,在第一匝圈和第二匝圈的有效感应弧端上,采用耐高温胶粘连有长方凹型导磁体;再者,在第二匝圈有效感应弧端外侧设置有若干个淬火水孔 $\zeta$ ;最后,在双匝感应圈上,设置有两个方口管口端,且与感应

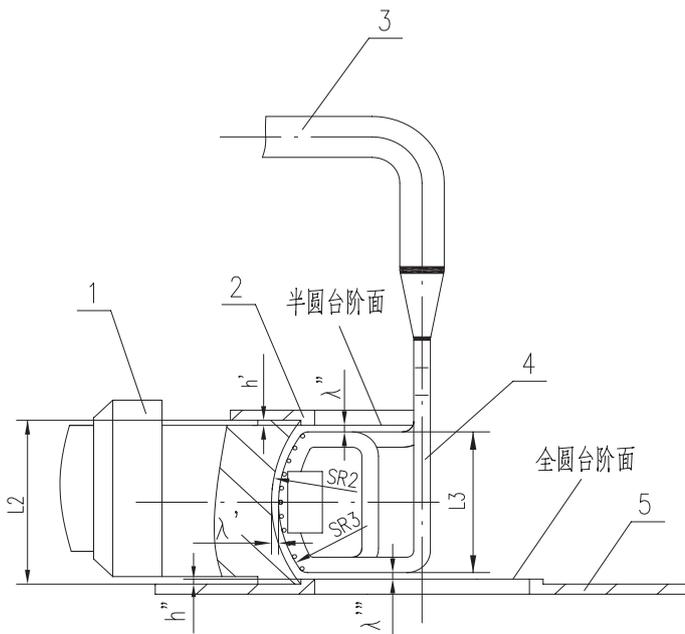
器基体组件1上的两个方口锥管小锥口等口径,并焊连在一起。

### 3 配用尺寸确定技术方案

为解决所述淬火感应器的上述问题,本文提供一种配用尺寸确定方法的技术方案,即:通过采用该方法,解决淬火感应器所需的有效感应弧端宽度 $L3$ 、有效感应弧面半径 $SR3$ 、两圆管接头间距 $L4$ 、圆管外径 $\phi$ 共四个配用尺寸的确定问题,不仅可以使得淬火感应器易于制作和便于配用,而且可以使得感应淬火质量能够得到更加有效的控制。

1. 有效感应弧端宽度 $L3$ 、有效感应弧面半径 $SR3$ 的配用尺寸确定,如图3所示:

结合图1、图2说明:球面水平感应间距 $\lambda'$ ,是指下座凹球面2a与感应圈弧面之间的水平间距;上端竖直感应

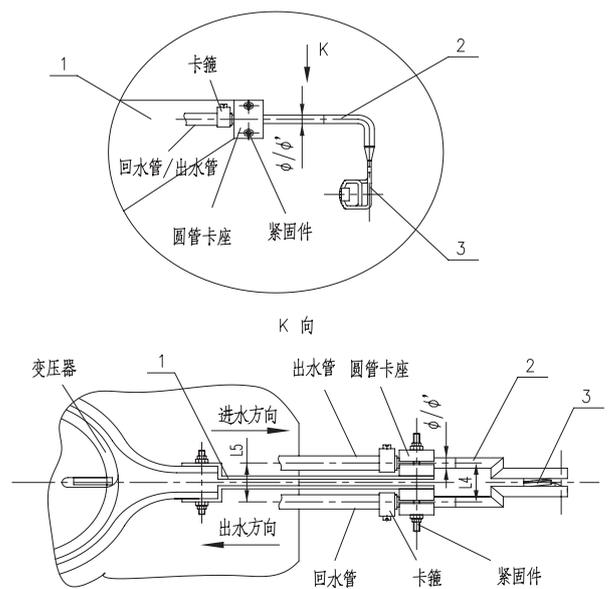


1.铲刀连接座下座 2.半圆带台阶屏蔽环 3.感应器基体组件  
4.可喷水感应圈组件 5.全圆带台阶屏蔽环

$\lambda'$ .球面水平感应间距  $\lambda''$ .上端竖直感应间距  $\lambda'''$ .下端竖直感应间距、  
 $h'$ .半圆台阶高度  $h''$ .全圆台阶高度

图3 淬火感应器配用尺寸确定示意图之一

Fig.3 The first Diagram of Chilling Inductor Matching Size Fixing



1.变压器二次线圈 2.感应器基体组件 3.可喷水感应圈组件  
L4.两圆管接头间距

L5.两圆管卡座间距  $\phi$ .圆管外径  $\phi'$ .圆管卡座孔径

图4 淬火感应器配用尺寸确定示意图之二

Fig.4 The Second Diagram of Chilling Inductor Matching Size Fixing