

热作模具的堆焊修复技术

刘元伟¹, 亓翔², 魏训青¹, 宋丙员¹

(1. 山东恒泰车桥有限公司, 新泰 271200; 2. 济南锅炉集团有限公司, 济南 250023)

摘要: 简述了各种热作模具的工程背景和应用现状, 介绍了堆焊工艺在热作模具修复中的作用, 以及堆焊材料的分类特点及应用范围。详细阐明了热作模具的堆焊修复工艺过程, 以汽车前轴辊锻模的堆焊修复为例, 对整个堆焊修复过程进行了说明。

关键词: 热作模具; 堆焊修复; 堆焊合金; 汽车前轴; 辊锻模

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.03.015

中图分类号: TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)03-0068-06

Overlaying Welding Technology in Hot Die Repair

LIU Yuan-wei¹, QI Xiang², WEI Xun-qing¹, SONG Bing-yuan¹

(1. Shandong Hengtai Axle Co., Ltd., Xintai 271200, China; 2. Jinan Boiler Group Co., Ltd., Jinan 250023, China)

ABSTRACT: The engineering background and application situation of various kinds of hot forging dies were briefly described, and the important role of overlaying welding technology in hot forging die repair was introduced, as well as the classification characteristics and application scope of overlay welding materials. In addition, the detailed overlaying welding process in hot die repair was comprehensively represented. At last, the whole process of overlaying welding was shown in this paper using the hot forging die repair of automobile front axle roll forging die as an example.

KEY WORDS: hot die; overlaying welding repair; surfacing alloy; automobile front axle; roll forging die

热作模具是指对加热到再结晶温度以上的金属材料进行压力加工的模具, 热作模具包括各种通用锻压设备上用的热锻模、热挤压模、热弯曲模和热冲裁模等, 还有特种锻压设备上的热作模具, 如热辊锻模、热摆辗模、楔形横轧模等。采用热作模具生产锻件, 具有生产效率高、成本低、节约原材料、锻件尺寸相对稳定、外观质量好等一系列优点。模具使用寿命与产品外观质量、尺寸精度和生产效率等有关, 是模具材料、设计和制造水平(含模具热处理和表面强化处理)及使用、维护水平的综合反映, 是决定生产成本的重要因素。一般热作模具费用占生产成本的10%~25%。

常用的热作模具钢用材料是5CrNiMo, 5CrMnMo,

3Cr2W8V和H13。由于热作模具特别是热锻模具的轮廓或型腔结构复杂, 工作条件恶劣, 模具寿命较低, 常打乱工厂生产计划, 拖延产品交货期, 给企业增加高昂的热作模具维修费用, 导致锻件成本上升。

近年来, 随着我国汽车行业快速发展, 汽车产量逐年增加, 热作模具的需求量不断增大, 热作模具钢的消耗量也逐年上升, 为了进一步提高热作模具的有效利用率, 除了选用先进的锻造工艺、合理的模具结构设计及冷热加工工艺等以外, 还应当采用既经济又实用的热作模具堆焊修复技术。

模具堆焊修复是将填充金属焊接在模具型腔损坏处的表面上, 赋予已失效的模具新的使用性能的一

收稿日期: 2016-01-10

作者简介: 刘元伟(1987-), 男, 山东临沂人, 助理工程师, 主要从事锻造车间、模具车间工艺编制, 新产品开发, 模具三维造型设计, 模具数控加工编程等工作。

种再制造工艺方法。即在模具型腔的任意损坏部位焊敷一层特殊的合金层,成为模具基体的一部分后再重新加工制造型腔。采用这种方法,可以降低成本,使模具起死回生,被修复的模具可以较原始模具进一步提高模具型腔工作面的耐磨损、耐腐蚀和耐热等性能,使综合性能和使用寿命大大提高。用于这种用途的焊材就是堆焊焊材。模具堆焊要根据模具的使用要求和模具钢的品种选用不同合金和不同硬度等级的焊材。

1 热作模具堆焊修复技术及优点

热作模具的失效形式也多种多样,但最主要的失效形式是模具型腔磨损胀大、裂纹、塌陷、疲劳及塑性变形等,如图1所示。近年来,利用堆焊修复技术修

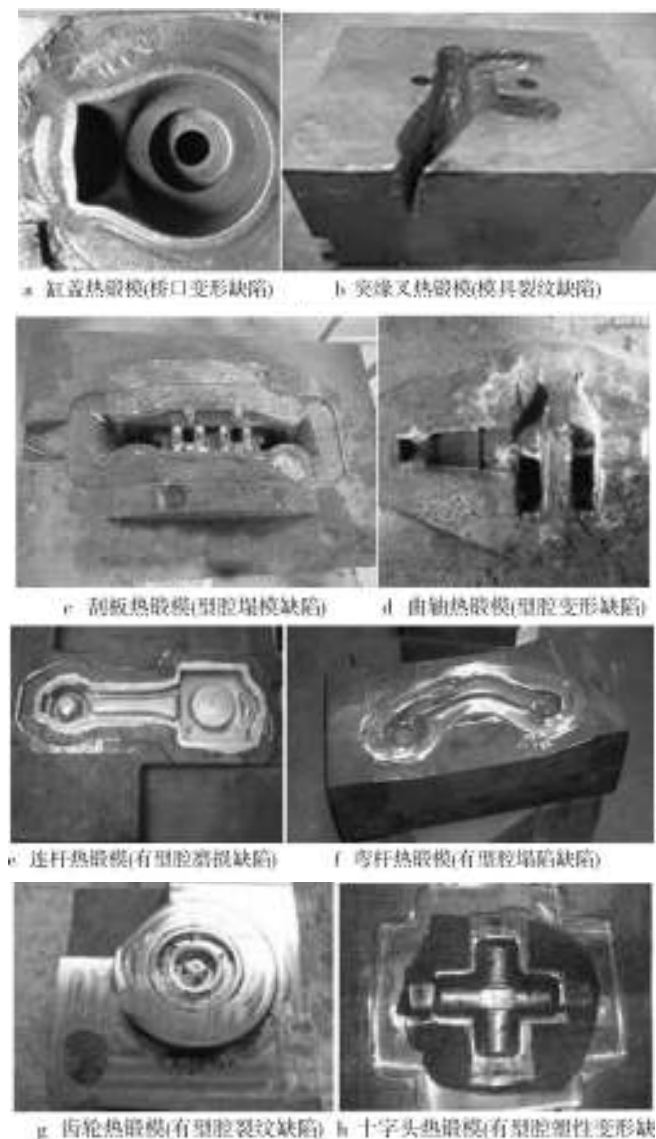


图1 可堆焊修复的已失效热作模具

Fig.1 The failed hot dies which can be repaired by welding process

复的热作模具在生产上逐渐得到了广泛应用,图1所示的曲轴热锻模、刮板热锻模、缸盖热锻模和突缘叉热锻模均可以采用堆焊修复。

用堆焊修复热作模具有很多好处,首先是节省模具成本,缩短产品开发时间。以往对失效热作模具进行修复是将模具具有缺陷的型腔加工掉(有时要退火处理),重新制作型腔,重新热处理。不但对热处理工艺要求高,耗工费时,而且模具本身的体积变小,内在质量下降,寿命也低,热作模具钢的耗费也大。这样经过几次修复以后的模具,体积越来越小,承载能力下降,最终不能使用,完全报废。

堆焊修复技术则操作简单,只需清理型腔,将热作模具缺陷处完全加工掉,然后堆焊。待将堆焊材料按要求充填好有关部位后,再重新加工型腔,不需要如同传统修复模具那样,将模具型腔只有局部缺陷的那一层连同没有缺陷的部位完全加工掉。堆焊热作模具再制造技术不需要再耗费模具钢,再制造后的热作模具再次损坏后可以继续堆焊修复重新投入使用,一块模具可以反复几十次修复,采用堆焊修复后的热作模具,型腔表面硬度比原模具还要高,达到“表硬里韧”的效果,型腔不易压塌,不少情况下修复后的模具寿命甚至高于没有堆焊修复过初始使用时的寿命,一般模具寿命都能提高50%~200%。

模具寿命高,换模次数减少。另外,模具堆修复可以配合对整条生产线的寿命调整到同步状态,生产效率得到极大提高。这样也大大减小了模具钢的消耗,使模具费用急剧下降,一般会节省20%~60%的模具费用。

图2a所示为前轴辊锻模具,已经将有缺陷的型腔堆焊充满,等待进行对型腔的重新加工。图2b所示的前轴终锻模也已将缺陷处堆焊充满,等待进行对型腔的重新加工。图2c所示的前轴切边凹模,已将刃口缺陷处堆焊加大,等待重新加工刃口。

堆焊修复的模具不需要再进行调质热处理,只需要简单的去应力退火处理,这样又能节省大量费用和热处理时间。我厂利用堆焊技术修复一套辊锻模具比重新购置新模具大大节省了生产成本;特别在新产品开发时,减少了新投模具块的费用,缩短了开发时间;为争取早日进入市场赢得了宝贵时间,经济效益极大。

用堆焊修复热作模具还有如下优点:

1) 堆焊修复后的模具内在质量有所提高,而且锻造质量稳定,第一个锻出的锻件和最后锻出的锻件相差无几,成品率大大提高。

2) 由于堆焊技术的灵活性,模具损坏后,可以在



图2 已堆焊好等待机加工的热作模具

Fig.2 The hot dies which have been repaired and are waiting for machining

较短的时间内修复后继续使用,因此不需要大量备存模具,大大减少模具备用件数量。

3) 由于热锻模具长时间工作,型腔不断胀大导致锻件重量不断增加,所生产锻件的材料的利用率也随之下降。我公司采用模具型腔堆焊重新加工型腔的技术后,材料利用率提高5%以上。

2 热作模具堆焊修复技术

根据我厂多年来的生产经验,利用堆焊技术修复热作模具的生产工艺流程如下:焊前准备(将热作模具去污、扩大热作模具型腔凹入部位或减小凸出部位,清除裂纹、着色探伤)→焊材烘干→焊前预热→在模具型腔内堆焊合金层→焊后检验→去应力退火处理→机加工模具型腔→硬度、尺寸检验。

2.1 焊前准备

模具表面清理去污:将需修复的有缺陷的型腔表面的氧化皮和石墨乳清除,可用磨光机打磨和风镐打磨和敲击振动,去除型腔氧化皮和石墨乳层,显现模具本体表面的金属光泽。

扩大型腔凹入部位或减小凸出部位:清除模具型腔表面存在的疲劳裂纹或其他缺陷,利用碳弧气刨法加工扩大型腔的加工时间短,上马快,能满足新产品开发的需要,但工人劳动强度大。在数控机床上用合金铣刀加工型腔和采用石墨电极电火花加工型腔,相对时间较长,但工人劳动强度小。

着色探伤:扩大型腔凹入部位或减小凸出部位后的模具型腔表面,应用渗透剂和显像剂进行着色探伤,探测气刨加工后热作模具型腔底层和侧壁,若发现仍存在裂纹时则应继续气刨扩大,直至彻底清除。

2.2 堆焊焊材的选用

堆焊对焊材的要求如下。

1) 具有良好的焊接性能,堆焊金属与热作模具基体金属能均匀熔合,有足够的剪切强度、硬度、耐磨性、冲击韧性。

2) 堆焊后堆焊部位不易产生气孔、裂纹、夹渣等缺陷,堆焊部位可进行机械加工。

3) 堆焊操作时电弧容易引燃,堆焊过程中走弧燃烧平稳。药皮均匀熔化,无成块脱落现象。堆焊过程中焊缝成形正常,没有过大、过多的飞溅,焊缝熔渣容易清除。

明确模具对焊材性能的要求,正确选择堆焊材料和工艺,是成功堆焊修复模具的前提。目前市场上模具堆焊材料种类繁多,概括起来可分成铁基、钴基和镍基三大类,简单分类见表1。各类堆焊材料各有其优缺点和使用条件,在模具堆焊修复时可根据模具使用性能要求进行选择。

我厂的辊锻模和热锻模、热切飞边模及热校正模等一般采用5CrMnMo, 5CrNiMo钢制作,选用的模具堆焊焊条(丝)牌号为铁基合金类EUREKA455, 725, 735, 750等型号,也可选择D146, D167型号的堆焊焊条(丝)。

其中,455焊材堆焊层硬度44~48HRC,在38~42HRC时具有良好的耐热磨性,抗龟裂,抗热冲击,适用于中大型热锻模的下部和锤锻模的整体修复。

725焊材堆焊层硬度25~30HRC,拉伸强度15 500 kg/cm²,防破裂韧性好,适用于锻模基体深度裂纹的修复和模具燕尾、锁扣、垫板、模座、模架、锤头等裂纹的修复。

735焊材堆焊层硬度38~42HRC,抗冲击、抗裂纹性能好,主要用在大型锤锻模的下部和模具型腔裂纹的修复,能在540℃的环境下良好工作。

750焊材堆焊层硬度为48~52HRC,抗热磨损、红硬性优,抗氧化,在370℃时硬度为48HRC,拉伸强度为21 300 kg/cm²,可以在565℃环境下良好工作。适用于锤锻模的桥部和中大型压力机热锻模的上部。

表1 常用模具堆焊材料的分类
Table 1 Classification of the commonly used die welding materials

分类	牌号	焊材特点和适用范围
铁基合金	中碳低合金钢堆焊合金 D146, D167	堆焊金属组织是马氏体和残余奥氏体,有时含有少量珠光体。硬度约 350 ~ 550HB。裂纹倾向比低碳低合金钢堆焊合金大。一般应预热 250 ~ 350 ℃。
	高碳低合金钢堆焊合金 D227, D237	堆焊金属冲击韧性差。堆焊时易产生热裂纹或冷裂纹。一般应预热 350 ~ 400 ℃。若堆焊后需切削加工,应先退火使硬度降低到 20 ~ 25HRC,加工后再淬火获得硬度 50 ~ 60HRC。
	Cr—W, Cr—Mo 热稳定钢堆焊合金 D337, 455, 725, 735, 750	堆焊金属具有红硬性、高温耐磨性、高抗热疲劳性和较高的冲击韧性,容易产生堆焊裂纹,堆焊时一般需预热 400 ℃左右,堆焊后缓冷。
	高铬马氏体钢堆焊合金 Cr12V	堆焊金属脆性较大,堆焊时易产生裂纹,一般需预热 300 ~ 400 ℃。含碳量大于 1%的高铬钢堆焊金属组织为莱氏体+残余奥氏体。由于存在含铬的合金莱氏体,耐磨性更高,但脆性也更大,易产生裂纹。一般需预热 400 ~ 550 ℃。
	高速钢堆焊合金 D307, D317	堆焊金属属于莱氏体,组织类似铸造高速钢。由网状莱氏体和奥氏体的转变产物组成。堆焊金属易产生裂纹,一般堆焊前应预热 500℃左右。有很高的红硬性和耐磨性,主要用于堆焊各种切削刀具、刀具等。
钴基合金	D802、D812	堆焊金属具有良好的耐各类磨损的性能,特别是在高温耐磨条件下。在各类堆焊合金中,钴基合金的综合性能最好,有很高的红硬性。抗腐蚀、抗冲击、抗热疲劳、抗氧化性能都很好。这类合金易形成冷裂纹或结晶裂纹,在电弧焊和气焊时应预热 200 ~ 500 ℃。对含碳较多的合金选择较高的预热温度,等离子弧堆焊钴基合金时,一般不预热。
镍基合金	Ni—Cr—B—Si 合金 Ni65	堆焊金属硬度高(50 ~ 60HRC),在 600 ~ 700 ℃高温下仍能保持较高的硬度;在 950 ℃以下具有良好的抗氧化性和耐腐蚀性。合金熔点低(约 1000 ℃),流动性好。堆焊时易获得稀释率低,成形美观的堆焊层。耐高温性能比钴基合金差,但在 500 ~ 600 ℃以下工作时,它的红硬性优于钴基合金。这种合金比较脆,一般制成焊条、管状焊丝或药芯焊丝。合金堆焊层抗裂性差,堆焊前应高温预热,焊后缓冷。
	Ni—Cr—Mo—W 合金 Hastelloy C276, C22	堆焊金属一般为哈氏 C 型堆焊合金,堆焊组织主要是奥氏体+金属间化合物。加入 Mo, W, Fe 元素后,合金的热强性和耐腐蚀性明显提高。这种合金有很好的抗热疲劳性能,裂纹倾向较小,但硬度不高,抗磨料磨损性能不好,主要用于耐腐蚀、耐高温的金属和金属间摩擦磨损零部件的堆焊。

2.3 堆焊方法及工艺参数的确定

常用的模具堆焊修复工艺方法有氧-乙炔焰堆焊、手工电弧焊堆焊、熔化极气体保护焊、钨极氩弧焊、等离子堆焊等。上述焊接方法都可以用来堆焊修复模具,各种堆焊方法各有其优缺点。实际生产中,手工电弧焊、熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊是最常用的模具堆焊方法。钨极氩弧焊可用于补焊小的表面缺陷或焊接薄的截面类模具。熔化极气体保护电弧焊可用于大面积堆焊,如汽车前轴热作模具和大型曲轴热作模具等。手工电弧焊设备简单、操作方便、效率一般,中小模具堆焊都可使用。

根据不同的焊丝直径选择合理的焊接参数,如焊接电流强度和电弧电压。通常以保证电弧燃烧过程稳定和不使模具堆焊处长时间受热为前提。

热作模具钢的碳当量较高,焊接性差,容易产生冷裂纹,故堆焊时必须对模具整体预热。要注意预热均匀,这一点对于大型模具特别重要。预热一方面可以避免焊接时堆焊金属与母材之间产生脆性区和减小冷热收缩造成的内应力,另一方面适当的预热温度也可以防止焊接过程中堆焊金属发生马氏体转变,以便模具堆焊结束后统一转变成马氏体组织,使堆焊金属硬度均匀。

3 汽车前轴辊锻模的堆焊修复

3.1 模具型表面处理

我公司采用碳弧气刨将辊锻模具型腔整体扩大,单边扩大量为 10~15 mm。无法采用碳弧气刨扩大的

部位可在数控机床加工扩大。经气刨后的辊锻模具表面需用砂轮打磨掉气刨痕迹。

用渗透剂和显像剂着色探伤探测辊锻模型腔内部是否存在裂纹。

将型腔底部尖角清除,使施焊时运条方便,清渣容易,防止产生焊接缺陷。

采用直径 $\Phi 10$ mm 碳棒气刨,气刨刨痕深约 3~5 mm,宽和碳棒的直径相当,约 10 mm,气刨刨痕垂直于模具型腔长度方向。

对辊锻模的型腔堆焊,有的是使辊锻模型腔缩小;有的完全将辊锻模型腔充满(满焊);有的辊锻模的外圆弧表面都全部由焊接形成的焊材满焊填充。

3.2 堆焊设备及堆焊用焊丝

我公司常用的堆焊设备及工具为:台车炉、风铲、电磨、清渣工具、气体保护焊机等,堆焊用焊丝型号为 735CW,455CW,750CW 焊丝,规格为 $\Phi 2.4$ mm。

焊丝的包装要完好,使用前要烘干,降低焊条的含氢量,避免焊接时产生气孔、裂纹等缺陷。烘干温度为 50~100 $^{\circ}\text{C}$,烘干时间 1~2 h。

不要过早拆开药芯焊丝的包装,已拆开包装的药芯焊丝应尽快用完,实在用不完的焊丝应用塑料袋包装好,以免受潮,或放在低温(50 $^{\circ}\text{C}$)的干燥炉里面保持干燥。

3.3 堆焊工艺

堆焊前要对要堆焊的模具预热。专门设计了简易室状电阻预热炉。将辊锻模整体放入炉中,一般随炉升温到 400 $^{\circ}\text{C}$ 保温,保温时间可根据模具的厚度以 1 h/30 mm 计,通常保温时间为 4~12 h。小模具保温时间稍短,大模具的保温时间稍长。模具预热完出炉后放入保温箱中或用石棉板盖好,用石棉包裹严实,等待焊接。

堆焊时尽量把要堆焊的辊锻模置于平焊或易于使用旋转工装的位置,见图 3。从底部开始依次堆焊第 1 层(打底层)、第 2 层(过渡层)和第 3 层(工作层)。3 层的总厚度为 10~15 mm,每一层厚约 3~5 mm。第 1 层(打底层)用 735CW 焊丝焊接,焊材的硬度为 38~42HRC,较高的第 2 层(过渡层)用 455CW 焊接,焊材硬度为 44~48HRC、第 3 层(工作层)用 750CW 焊丝焊接,焊材硬度 48~52HRC。

堆焊过程中要注意保温,层间温度控制在 260 $^{\circ}\text{C}$ 以上,每焊完一层金属,及时用风镐和除锈针各敲击一次,以消除应力和焊渣。如堆焊过程中发现模具温

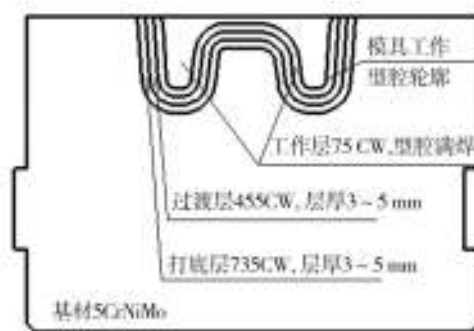


图3 辊锻模堆焊

Fig.3 Welding process of the roll forging dies

度低于 260 $^{\circ}\text{C}$,必须重新预热。要求堆焊部位焊缝尺寸符合工艺要求,不允许有未焊透、夹渣、气孔和裂纹等焊接缺陷。

如果工作层的厚度较厚,需要堆焊第 2 道工作层、第 3 道工作层,仍采用 750CW 焊丝满焊型腔。

加工后的焊层示意图如图 4 所示。

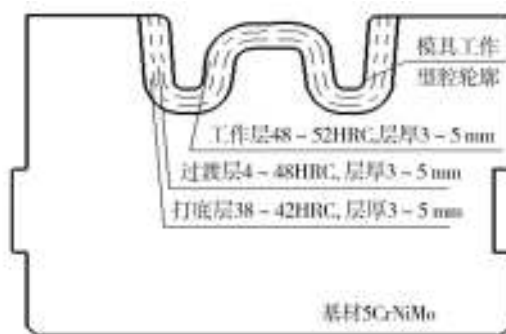


图4 辊锻模纵截面加工后焊层示意图

Fig.4 The diagram of welding layer along the longitudinal section of roll forging die

要求各层焊缝搭边成形应良好,不允许有未焊透、夹渣、气孔和裂纹等缺陷,焊缝尺寸应符合工艺要求,工作层至少应当放 3 mm 以上的机加工余量。

堆焊过程中,由小电流焊起,焊条不宜走得过快及左右晃动。每焊完一层,等这一层稍冷却后将药皮文革敲掉进行外观检查,如发现气孔等焊接缺陷,要进行返修,返修检查无缺陷后,方可焊接下一层。

要注意堆焊操作时收弧前的起弧。收弧前,焊丝(条)在原位稍停留或作圆周运动 3~5 s,或在前一道焊道收弧处开始后一道焊缝的起弧。这样不但避免产生收弧裂纹(火口裂纹),也保证了收弧位置焊接平缓无凹凸缺陷。焊缝收尾时,要逐渐断弧,注意控制好层间温度,避免断弧点温度过高,产生弧坑裂纹。堆焊至母材边缘时,注意降低焊接速度,调整焊枪角

度,避免出现咬边。如出现裂纹或咬边,必须将其裂纹或咬边消除,将其打磨干净,才能继续施焊。模具钢焊后热处理时都会弥散析出碳化物,使堆焊金属的硬度与耐磨性有所提高。

由于焊接温度的不均匀性,焊接过程中在堆焊层内会产生焊接应力,因此应适当采取对称焊或跳焊等措施,降低堆焊层内应力。

焊接参数应合理,对于 $\Phi 1.6$ mm药芯焊丝焊接参数:焊接电流强度为260~360 A,电弧电压为26~32 V; $\Phi 2.4$ mm药芯焊丝焊接参数:焊接电流强度360~540 A,电弧电压为30~38 V。

选择的保护气体为氩气(Ar)和二氧化碳(CO₂)的混合气体,氩气(Ar)占(80%~90%),二氧化碳(CO₂)占20%~10%。CO₂气体出口必须接加热器。

3.4 热处理

堆焊修复后的模具要进行去应力退火处理以消除焊接应力。这是由于焊接温度场的不均匀性,堆焊后模具内部存在残余应力,加上热锻模一般尺寸较大,模具各部位温差较大,如果冷却速度过快,表面金属收缩产生内应力,严重时可使模具型腔开裂;采用适当的热处理还会改善堆焊合金层的组织与性能。

退火加热温度过高,虽然消除应力效果好,但使堆焊层硬度下降太多,降低模具的耐磨性能;温度过低,应力消除不彻底,因此要两者兼顾。一般退火温度大于480℃才可将堆焊层应力基本消除。对于不同的堆焊材料,需要结合有关技术资料 and 经过热处理试验确定符合本厂生产实际的最佳焊后热处理工艺。

一般模具随炉升温至480℃保温,保温时间可根据1 h/25 mm计算,保温后模具随炉冷却至100℃左右出炉,或把模具从炉中取出后用石棉布包裹缓冷。

我厂采用分两次进行退火热处理的方法,采用两次退火热处理工艺时总的保温时间和采用一次退火热处理时间相同,每次退火热处理的保温时间为一次退火热处理保温时间的一半,如一次退火热处理时间按1 h/25 mm计算,两次退火热处理的时间就是按1 h/50 mm计算。

3.5 质量检验

模具型腔扩大的凹入部位或减小的凸出部位在堆焊完成后,为确保堆焊层的质量达到要求,必须对堆焊层机加工预留量进行内在检验和外观检验,机加工预留量的内在检验和外观检验,应完全按技术部门下发的焊接工艺、图纸的技术要求进行检验,焊接部

位不得有缺肉现象,其焊接量应保证机加工后能达到图样技术要求。

机加工前,模具堆焊层表面不得出现裂纹。

模具堆焊修复并机加工型腔后先用肉眼或5~10倍放大镜观察检查,型腔表面应平整、均匀,不得有咬肉、气孔和夹渣,再对模具型腔进行硬度检验、硬度、裂纹及和外观及尺寸检验。

硬度检验:一般采用便携式硬度计进行多点测量,各点硬度应均匀,型腔的平均硬度控制在45~50HRC。

裂纹检验:机加工完成后,一般采用磁力探伤法和染色浸透探伤法对模具型腔进行检验,不能出现裂纹。

尺寸检验:用游标卡尺、深度尺和型腔线切割样板等测量工具检测型腔的尺寸并做好检验记录,保证型腔尺寸及公差在图纸要求范围内。

参考文献:

- [1] 胡亚民,华林. 锻造工艺过程及模具设计[M]. 北京:北京大学出版社、中国林业出版社,2012
HU Ya-min, HUA Lin. Forging Process and Dies Design[M]. Beijing: Peking University Press, China Forestry Press, 2012.
- [2] 高文良,刘仁培,刘大双,等. 热锻模堆焊修复工艺及应用[C]. 第十七次全国焊接学术会议论文集,2012.
GAO Wen-liang, LIU Ren-pei, LIU Da-shuang, et al. Study on Hot Forging Die Welding Repair Process and Its Application[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Welding, 2012.
- [3] 金荣植. 模具的修复技术与应用[J]. 北京:金属加工(热加工),2014,21:60—66.
JIN Rong-zhi. Die Repair Technology and Its Application[J]. Beijing: Metal Working, 2014, 21: 60—66.
- [4] 张洪奎,徐明华. 浅析我国模具钢的发展空间[J]. 热处理,2008,(5):7—15.
ZHANG Hong-kui, XU Ming-hua. Review on the Development of Die Steel in China[J]. Heat Treatment, 2008(5): 7—15.
- [5] 陈艳,王新艳. 模具参数对模具寿命的影响[J]. 精密成形工程,2001,3(1):22—24.
CHEN Yan, WANG Xin-yan. The Influence of Die Parameter on the Life of Die[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2001, 3(1): 22—24.
- [6] 崔华丽,李炎粉. 浅谈热作模具的失效形式及耐磨层的修复工艺[J]. 科教导刊(上旬刊),2013(2):207—208.
CUI Hua-li, LI Yan-fen. The Failure Form of Heat Mold and Repair Process of Wear-resistant Layer[J]. The Guide of Science & Education (On the ten day), 2013(2): 207—208.
- [7] 周发明,李伟. 热锻模具堆焊修复技术[J]. 北京:金属加工

(下转第77页)

- Shenyang:Northeastern University Press,2007:14—18.
- [2] CHOI Y, YEO H T, PARK J H, et al. A Study on Press Forming of Automotive Sub-frame Parts Using Extruded Aluminum Profile[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188:85—88.
- [3] 王晖云,吕宝占,朱思洪. 基于ANSYS的轻型载货汽车车架模态分析[J]. 煤矿机械,2007,(3):59—61.
WANG Hui-yun, LV Bao-zhan, ZHU Si-hong. Modal Analysis of Light-truck Frame Based on ANSYS[J]. Coal Mine Machinery, 2007, (3):59—61.
- [4] LEE H Y, SEO H, PARK G J. Design Enhancements for Stress Relaxation in Automotive Multi-shell-structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 5319—5334.
- [5] 陈德玲,陈效华,张建武. 三段式大型客车车架模态分析[J]. 南京理工大学学报,2004,(4):400—403.
CHEN De-ling, CHEN Xiao-hua, ZHANG Jian-wu. Mode Analysis of a Three-part Bus Frame[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2004, (4):400—403.
- [6] Jaap Wijker. Linear Random Vibration Systems[M]. 2009, Volume 165, Part I, 9—200.
- [7] 倪侃. 随机疲劳累计损伤理论研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(2):43—65.
- NI Kan. Research Progress on Cumulative Damage Theory of Random Fatigue[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(2): 43—65.
- [8] 李向博,马俊林,薛克敏,等. 基于ANSYS Workbench 液压支架顶梁多工况结构优化与静力分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(2):60—65.
LI Xiang-bo, MA Jun-lin, XUE Ke-min, et al. Structural Optimization of Multiple Operating Condition and Static Analysis of Top-beam of the Hydraulic Support Based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(2):60—65.
- [9] 许新猴,赵小强,翟文刚,等. 基于ANSYS的D500钢激光焊接温度场数值模拟[J]. 精密成形工程,2015,7(3):48—51.
XU Xin-hou, ZHAO Xiao-qiang, ZHAI Wen-gang, et al. Numerical Simulation on Welding Thermal Field of Laser Welding of D500 Steel Based on ANSYS[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3):48—51.
- [10] 夏克祥,姜春茂,刘海艳,等. 某炮弹弹体内膛裂纹原因分析[J]. 精密成形工程,2015,7(3):93—96.
XIA Ke-xiang, JIANG Chun-mao, LIU Hai-yan, et al. Cause Analysis of Bore Cracks in a Projectile[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3):93—96.
- (上接第73页)
- (热加工),2012,16:62—63.
ZHOU Fa-ming, LI Wei. Surface Welding for Reparation of Roll Forging Dies[J]. Beijing: Metal Working, 2012, 16: 62—63.
- [8] 王怀建,伍光凤. 5CrMnMo热作模具的堆焊修复研究[J]. 现代制造工程,2007,10:84—87.
WANG Huai-jian, WU Guang-feng. Research on Overlay Welding to Repair 5CrMnMo Hot Die[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007, 10:84—87.
- [9] 关少臣. 曲轴模具的失效分析与对策[J]. 金属加工(热加工),2001,10:47—48.
GUAN Shao-chen. The Crankshaft Die Failure Analysis and Countermeasures[J]. Metal Working, 2001, 10:47—48.
- [10] 单际国,董祖珏,徐滨士. 我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J]. 中国表面工程,2002,15(4):19—22.
SHAN Ji-guo, DONG Zu-yu, XU Bin-shi. The Development of Welding Technology in China and Its Application in Basic Industry Area[J]. China Surface Engineering, 2002, 15(4): 19—22.
- [11] 董祖珏,黄庆云,高峰,等. 国内外堆焊发展现状[C]//第八次全国焊接会议论文集.北京:机械工业出版社,1997: 165—169.
DONG Zu-yu, HUANG Qing-yun, GAO Feng, et al. The Development of Surfacing Welding in and out of Country[C]// The eighth national conference on welding. Beijing: China Machine Press, 1997:165—169.
- [12] 周永强,李午申,冯灵芝. 表面工程技术的发展与应用[J]. 焊接技术,2001,30(4):5—7.
ZHOU Yong-qing, LI Wu-shen, FENG Ling-zhi. The Development and Application of Surface Engineering Technology [J]. Welding Technology, 2001, 30(4):5—7.
- [13] 刘仁培,冯志敏. 热锻模堆焊材料与工艺研究及其应用[J]. 中国表面工程,1992,11(1):28—33.
LIU Pei-ren, FENG Zhi-min. Hot Forging Die Surfacing Materials and Technology Research and Application[J]. China Surface Engineering, 1992, 11(1):28—33.
- [14] 艾明平,来克嫫. 5CrNiMo热锻模具堆焊修复工艺研究[J]. 锻压技术,2009,34(4):114—116.
AI Ming-ping, LAI Ke-xian. Process Study on over Laying Welding Repair of 5CrNiMo Hot Forging Die[J]. Forging & Stamping Technology, 2009, 34(4):114—116.
- [15] 张蓉,王亚军. 修复热锻模的双金属堆焊技术[J]. 模具制造,2005,(6):72—73.
ZHANG Rong, WANG Ya-jun. Dual-Metal Hard Facing Heap Weld Technology of Recovering Hot Forging Dies [J]. Die & Mould Manufacture, 2005, (6):72—73.