

高强度板汽车零部件的工艺设计和模具开发

Process Design and Mould & Die Development of High-Strength Plate Automotive Parts

北京汽车研究总院 张学文



张学文
北京汽车研究总院工程部冲压工艺室高级工程师,负责冲压 SE 工作。

现代汽车结构、性能和技术的重要发展方向是减重、节能、降低排放和提高安全性。汽车的质量和能源消耗成线性关系。据统计,汽车质量每降低 1% 则油耗可降低 0.6% ~ 1.0%。能耗又与尾气排放密切相关。因此,汽车轻量化对节能和环保意义重大。为了适应现代汽车生产需要,板料供应商开发了具有成型性好、强度高优点的高张力钢板。对于模具供应商来说,板料性能是影响零件

板料强度的提升直接影响到模具设计和冲压工艺编制。较高强度的板料会导致零件成型、冲压件的尺寸精度、重复性保证难度提高,零件回弹加大、模具本体磨损加快、使用寿命缩短。为了解决以上问题,必须在工艺设定、模具结构设计上做出相应调整。

成型性能和模具使用寿命的关键因素。板料强度的提升直接影响到模具设计和冲压工艺编制。较高强度的板料会导致零件成型、冲压件的尺寸精度、重复性保证难度提高,零件回弹加大、模具本体磨损加快、使用寿命缩短。为了解决以上问题,必须在工艺设定、模具结构设计上做出相应调整。

汽车用高强度板料的种类和特点

汽车用钢板按其用途应用了各种强化机理。传统的汽车用钢板主要是采用向低碳钢中添加合金元素形成固溶强化型钢以及晶粒细化的析出强化型钢 2 种方式来实现低碳钢的高强度化。而现代汽车高强度钢板则是采用钢在冶炼及热处理过程中使其金相组织得到强化的机理,

而获得组织强化、复合组织强化、相变强化、热处理强化、冷作硬化强化和时效强化等现代高强度钢。近几年,这些高强度钢轧制的钢板在汽车制造中获得了广泛使用。

(1) 烘烤硬化钢(BH 钢)。

BH 钢的金相显微组织以铁素体为基体,并主要以固溶的形式进行强化。BH 钢的特点是所添加的化学元素磷在钢的冶炼过程中能与碳、氮形成固溶强化,实现了固溶体强化。在车身制造过程中,当进行冲压成型加工时,基体(铁素体)内“位错”密度增加,碳、氮原子向“位错”扩散的距离缩短。当用 BH 钢制造的车身进行涂装时,车身在各烘干炉中被加热/烘烤,此时便赋予了固溶体中碳、氮原子扩散的热激活能量,使碳、氮原子在“位错”处析出,从而增强了制品的屈服强度,故将其称为烘烤硬

化钢。BH 钢常用于车门、行李箱外板等零件的加工。

(2) 双相钢(DP 钢)。

DP 钢具有很软的铁素体和坚硬的马氏体 2 种相。由于金相组织中含有大量的铁素体(即金相组织的基体为铁素体),它的伸长率相当高,塑性相当好,接近于添加磷等元素形成含有固溶体的传统高强度钢板。此外,钢中硬质相马氏体和软质相铁素体之间的应变不协调,但进行压力加工时会引起相当高的加工硬化,从而引起 DP 钢相当高的加工硬化,致使它具有相当高的抗拉强度,限制了拉伸时出现“缩颈”,具有良好的延展性和成形性。因此,它被用于对加工性有严格要求的薄板冲压件,如车门加强板、保险杠等零件。

(3) 相变诱导塑性钢(TRIP 钢)。

TRIP 钢的金相组织中含有大量的铁素体和相变引起的贝氏体以及残余奥氏体和马氏体,贝氏体组织可由中温等温得到,也可以在连续冷却中得到。在 TRIP 钢的贝氏体或贝氏体-铁素体构成的基体(母体)金相中,分散地存在着马氏体以及残留的百分之几到 30% 左右的奥氏体。这些残留的奥氏体在加工时,会再转变为马氏体,于是引起部分材料的强度提高,这就使得材料总体获得良好的加工性,并且抗冲击性大大增加。

当前,世界各大钢铁公司生产的 DP 钢或 TRIP 钢的抗拉强度均已达到 590 ~ 980MPa,并已进入实用化阶段。新开发乘用车的前端车架纵梁、转向拉杆下臂以及各车身立柱均采用 DP 钢或 TRIP 钢。

(4) 多相复合钢(CP 钢)。

CP 钢既采用了按晶粒细化机理提高延展性的措施,又采用了通过金相显微组织硬化机理提高强度的措施,双管齐下,提高了机械性能。必须强调的是:与双相钢 DP 相比,在相同抗拉强度 800MPa 的情况下,CP 钢的屈服强度明显提高,并且较大。

CP 钢还具有相当高的抗冲击吸能特性和很高的残留变形能力。因此,CP 钢既具有相当高的抗拉强度、高加工硬化系数,又有非常均匀的延伸性能。以 CP 钢加工的制件为例,成形后再经涂装时的烘烤、硬化,其抗拉强度可超过 800 MPa。

(5) 铁素体-贝氏体钢(FB 钢)。

铁素体-贝氏体钢亦称拉伸翻边钢或高扩孔钢,这是因为它具有改善凸缘翻边或长孔的拉伸能力。FB 钢可用来制造热轧产品,其主要优点是改善了由扩孔翻边试验所测定的修平凸缘或翻边所形成的边缘性能。在这些方面,它优于高强度合金钢和双相钢。与 HSLA 钢相比,FB 钢在同等屈服强度的情况下,也具有较高的加工硬化系数 n ,并且增加了总的边缘延伸量。此外由于 FB 钢具有良好的焊接性能,它总是被用来生产冲压大、中型车身覆盖件的激光对焊板坯(TWB)。FB 钢的重要特点是:既具有良好的抗碰撞性能,又具有优秀的抗疲劳性能。

高强度钢板在汽车上的应用及存在的问题

1 高强度钢在汽车外面板上的应用

车顶、车门、行李箱等部件要求具有变形刚度和抗凹陷性,主要使用抗拉强度为 340 ~ 390MPa 的 BH 钢板。BH 钢板的屈服强度在烘烤涂漆时升高,可在不损失成形性的前提下,提高抗凹陷性,减薄钢板。现在,有的车型已使用 440MPa 级 BH 型高强度钢板。

2 高强度钢板在车体框架上的应用

随着正面撞击、侧面撞击的撞击安全性标准的提高,结构件、加强件等主要使用 590MPa 级高强度钢板。也有一些使用 780MPa 级、980MPa 级高强度钢板。甚至有将 390MPa、440MPa 级高强度钢板冲压成形后,对强化部分进行高频加热和淬火,以使部件局部抗拉强度达到

1200MPa 并在冲压加热钢板的同时进行冷却,以使部件整体抗拉强度达到 1470MPa 的方法。此外,还有拼焊方法,即采用激光将不同厚度、不同材质钢板拼合起来,使材料配置适用于所要求材质和使用部位。由于拼焊能使部件拼合,减少部件数量,去除点焊凸缘,这对汽车轻量化有着很大的作用。尽管拼焊材料在使用初期以提高材料利用率为目的,仅用于小型部件上,但最近已将拼焊材料扩大应用于车身侧板和车箱底板等大型部件。拼焊板主要采用 400 ~ 590MPa 级高强度钢板,也有使用 780 MPa 级和 980MPa 级高强度钢板的情况。

3 高强度钢板在汽车底盘上的应用

悬挂梁用材已从传统的 440MPa 级热轧板发展到 780MPa,最大减重达 30%。近年来,高强度钢板在底盘上的使用比例正在急剧增加。今后,高强度钢板的使用比例及更高强度钢板的应用有望进一步提高。

4 高强度钢板的成形存在的主要问题

钢板高强度化易引起塑性下降,成形性变差,而屈服强度的提高则引起面畸变和回弹效应,增加形状不稳定性。典型的成形缺陷有开裂、形状不良、尺寸精度不良和卡模具等。

(1) 开裂。

提高高强度钢板强度,易引起塑性下降,也会使胀形断裂极限和拉伸翻边断裂极限下降。随着钢板的高强度化,易产生裂纹。另外,由于其需要大的成型力,连续加工时,若模具温度升高,则发生卡模具现象,其结果将诱发裂纹的产生。

(2) 形状不良。

屈服点升高时,易发生起皱现象。起皱不仅会造成卡模和裂纹,也难以在成形后期消除,其结果往往导致形状不良。由于不能在成形后期消除起皱,冲压件不能在下死点成形。而且,成型后的弹性回复引起的

形状不良以及起皱引起的面应变也是很大的问题。

(3) 尺寸精度不良。

材料强度升高时,残余应力增大,易产生成形后弹性回复引起的形状不良和尺寸精度不良(回弹)等。这是高强度钢板成形中最为严重的问题。回弹是板厚方向应力差引起的以冲压件角度不合格和面翘曲为代表的尺寸精度不良现象。随着材料强度的提高,角度不合格和面翘曲变得严重起来。

(4) 卡模具。

高强度钢板成型时需要大的成形力,以使坯料与模具的接触压力增大。这样,易发生卡模具现象。若这一现象更为严重,则应修正模具。这不但需要有更为合适的材质对模具进行表面处理和淬火处理,也会缩短模具的维修期,增加模具维修费用。



高强度板零件产品的冲压工艺特点分析

模具制造主要分工艺设计、结构设计、加工、钳装和调试等 5 个步骤。应该说工艺方案设计是影响零件最终品质的最关键的因素,工艺方案直接决定着产品的外观和使用功能,而且也会影响到模具生产成本。另外,模具结构的合理性,将直接影响模具的加工性和操作维修便利性。对于梁类高强度板来说,材料的选用和热处理至关重要。零件回弹和拉延模本体磨损拉毛是较难解决的问题。要想解决以上 2 个问题必须全流程控制,结合以上分析确定了整个项目关键控制点如下:

- 控制产品输入(审查产品冲压工艺性);
- 最佳的冲压工艺方案设计(不

同强度板料采用不同方案);

- 合理的模具结构(加工性、回弹调整便利性);
- 镶块材料的磨损、拉毛(选择合适的材料、热处理方式)。

1 高强度板产品成型性预判

- 消除突变凸台;
- 避免局部胀形;
- 避免截面线长急速变化;
- 防回弹措施;
- 圆角:零件圆角必须足够大,原则上不要小于 8,否则拉延易破裂,而且整形后零件法兰上翘。

2 高强度钢板的缺陷控制技术

钢板高强度化易产生开裂、形状不良、尺寸精度不良等冲压缺陷。

(1) 防止开裂、形状不良(起皱)的技术。

钢板的高强度化易引起成型性下降。因而,对原有复杂形状的部件进行冲压成形变得非常困难。然而,采用能使部件形状平直化等的方法则是一种有效的方法。随着电子计算机处理速度和软件功能的提高,模拟成型技术有了飞速发展,可以高精度预测开裂、起皱等形状不良缺陷。现在,模拟成形技术已被应用于开裂、起皱预测、适用压边力设定、坯料合理余量设定和刚性筋冲头形状最佳化等。

(2) 防止尺寸精度不良(回弹)的技术。

随着汽车结构件用材高强度化

的快速推进,近年来,在冲压成形方面开发能防止回弹技术的呼声日益强烈。为此,在模具结构方面采取了以下措施:①利用凹模肩部附近的反向弯曲,减小冲弯加工中常出现的面翘曲;②在模具上设置压筋,将下死点附近的凸起部分压入钢板,使板厚方向产生的残余应力得以缓解,以防止面翘曲的发生。此外,还有弯曲冲压成型法,即在一次成形中完成全部成形过程的大部分,然后进行压筋加工二次成型,施加高压边力,以抑制坯料从压边处流入。

另一方面,在模具设计时预测坯料反弹量。预测模具形状的方法已作为防止回弹的措施而被广泛应用。模拟成型法是预测方法之一,其作用正越来越明显,可以对裂纹和形状不良进行高精度预测,该方法现已应用到实际工程中。

(3) 防止卡模具(影响生产率)的措施。

新的薄膜处理方法——金刚石状碳(DLC)薄膜处理方法可解决影响生产率的卡模具现象。此外,还有能使模具寿命比现行 TiC 和 TiN 处理提高 1 倍的 DLC-Si 薄膜处理方法。从控制模具成本角度考虑,还提出通过模拟成型,事先对需要进行表面处理部位进行预测的方法。随着成形力的增加,冲压设备能力不足也是值得担心的问题。简化冲压件形状以及采用拼焊材料是解决该问题的有效方法。这对增加成型工序道次及重新审查冲压部件的划分情况和工序划分情况也是有效的,但这涉及到成本的增加,需加以认真研究。

高强度板零件模具结构要点

为了便于模具的加工和防止模具再工作过程中由于意外压双料损坏凹模铸件,采用了一种全新结构,将凹模固定座分成左右 2 块,中间用 M24 的双头螺栓进行连接,两侧用锁板连接,底面卧在底板窝座中。在

加工时左右分开便于加工中间凹槽部位,遇到工作意外时损坏螺栓和锁板,保证铸件的安全。

对于高强度板梁类零件的特殊性,虽然前期零件已经过多轮模拟对回弹进行了修正补偿。但是模具实物修正也是无法避免的。由于模具镶块均为 Cr12MoV,型面部焊困难,而且补焊后局部材料硬度的偏差,容易在制件表面造成拉毛缺陷。其次,热处理后的 Cr12MoV 镶块加工困难,而且材料成本高,因此,为了避免镶块报废损失,决定先采用 HT300 做凸凹模镶块,待零件调试合格后重新更换 Cr12MoV 镶块,一次加工到位。

镶块热处理变形及开裂是模具处理过程的主要缺陷之一。模具镶块在淬火后的变形,不论采取什么方法都是无法避免的。Cr12MoV 镶块在热处理过程中由于各部分加热和冷却速度不一致而引起温度差,加之组织转变的不等时性等原因,使得镶块截面各部分体积胀缩不均匀,组织转变的不均匀,从而引起“组织应力”和镶块内外温差所引起热应力,当其内应力超过镶块的屈服极限时,就会引起镶块的变形或产生裂纹而报废。

CAE 技术的应用

计算机辅助技术(CAE)已成为国内外汽车工业开发新产品、组织规模生产、增强市场竞争能力的重要手段。随着有限元技术的不断发展和理论的日益成熟,借助于有限元模拟软件,不但对上游产品设计和材料的选取有一定的指导作用,而且对模具生产企业的产品的工艺性制定和现场调试都有很大的帮助。通过对上游产品设计的指导,使产品设计和模具同步开发成为可能,大大缩短了汽车生产周期,增强了汽车生产企业的竞争力。通过对模具工艺制定的进行指导,使设计人员正确把握零件的工艺性能,弱化调试人员的现场

作用,减少调试人员的工作量。

高强度材料由于强度较高,成型困难,容易产生开裂、起皱、回弹等缺陷。借助于 CAE 模拟技术,成功预测零件在成型或者后序出现的缺陷,在零件生产时通过修改工艺,消除缺陷的出现。

右/左前纵梁零件采用料厚为 1.80mm 的 P260 材料,该材料的抗拉强度为 429MPa,属于中低强度类钢板,零件成型困难,易产生回弹和扭曲,在后工序翻边时,圆角处易开裂,借助于 AUTOFORM 软件,进行全工序 CAE 模拟,结果如下:

由于产品材料较硬,延伸率较低,零件在圆角处由于缺料而产生开裂。一方面通过拉延工序增加凸包的方式,解决开裂缺陷;另一方面在翻边工序时,采用先后翻边的方式解决开裂问题。

通过回弹补偿和增加工艺凸台等手段,减少调试工作量,避免零件重大工艺的修改,同时,也为我们提供了宝贵经验。借助于计算机辅助分析软件,在缩短产品开发周期,提高产品质量和降低产品成本等方面起到了决定性的作用。

结论

通过对汽车用高强度钢板的应用,更多接触和了解了当前国际先进汽车设计方案和模具工装的发展趋势,积累了高强度板零件模具设计制造经验,取得了以下成果:

(1) 工艺方面。

高强度钢板类零件在成型过程中,容易出现的缺陷是开裂、起皱和回弹。

- 尽量保持均匀的拉伸深度。
- 考虑高强度钢板的低材料延伸率,某些材料/产品(如车门内板防撞梁)需要考虑压型成型。不过,这样可能会有回弹增大、制件扭曲增大的风险。

- 高强度钢板制件应该尽量一

次成型,由于一次成型后材料的应力强化,二拉或整形容易导致破裂,且更容易回弹或扭曲,难以得到理想的形状。

· 为了成型充分、避免压边圈起皱,高强度钢板拉伸需要用更大的压边力。

· 对于地板横梁、前仓纵梁、中柱加强板、顶盖加强梁等制件,尽量考虑落料后成型的工艺。

(2) 模具方面。

· 高强度钢板料厚往往较厚,成型力和压边力很大。模具计时需要布置足够的氮气缸或气顶杆,并预先验证机床的成型力是否足够。

· 对应板料强度,模具材料强度应该足够高,凹模大采用 Cr12MoV 镶块结构。高强度钢板外板拉延模一般表面要求特殊处理(如镀铬和渗氮处理)。

· 模具设计时必须充分考虑到回弹的处理措施,包括可能的镶块垫片重新加工、更换镶块,甚至于减小闭合重新加工的情况。

(3) 回弹控制方面。

由于在本构方程、材料性能等方面的原因,工程上准确模拟高强度钢板的回弹特别是卷曲是非常困难的,对于高强度钢板回弹的防治必须从好的产品开始,工艺上预先考虑可能的回弹及其防治手段。例如产品设计时,在翻边面加筋或者台阶;工艺上采用补偿回弹角或者斜楔整形方式等。

(4) 起皱控制方面。

高强度钢板由于成型性能较差,无法通过传统工艺解决开裂和起皱的矛盾问题,只能通过好的产品来减少两方面矛盾的风险,例如在产品易起皱的部位增加吸料筋包。另外,高强度钢板料厚往往比较厚,材料在厚向应变相对于薄板材料来说影响更大,举升力有时甚至大于阻力,因此,无法通过增加拉延筋的方式来消除起皱。(责编 岩石)