

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.004

高强度钢板热冲压冷却速率的研究*

马钰杰¹, 郭颖颖¹, 马 宁²

(1. 龙岩学院 机电工程学院, 福建 龙岩 364000; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对淬火过程中热冲压件 B 柱结构复杂位置处冷却速率小, 在组织转变过程中未能完全转变为马氏体组织, 影响其力学性能的问题, 进行了热冲压成形工艺研究。提出了优化模具冷却水管道布置以增大局部模具对板料冷却速率和优化模面形状以减小板料与模具间隙的两种优化设计, 进行了数值模拟及对试验结果进行整理, 研究了热冲压成形工艺中的重要参数冷却速率。结果表明: 优化模具冷却水管道布置的设计对热冲压件 B 柱形状复杂处的冷却速率有一定的提高作用, 优化模面形状的设计显著地提高了 B 柱结构复杂处的冷却速率, 同时表明模具与板料间隙的存在对板料冷却速率有很大的影响。

关键词:热冲压; 冷却速率; 成形工艺; 数值模拟

中图分类号:TH140; TG156

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)03-0235-06

Research on the cooling rate of hot stamping

MA Yu-jie¹, GUO Ying-ying¹, MA Ning²

(1. School of mechanical and electrical engineering, Longyan University, Longyan 364000, China;

2. School of Automotive Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the cooling rate of some complicated part of B-pillar is slow and failure to completely transform to martensite which is seriously affects its mechanical properties. The hot stamping process was studied. Two optimizing designs were presented: Optimize the cooling water pipe layout to increase the cooling rate of the local mold to the plate and optimize the shape of the die surface to reduce the gap between the plate and the die. By studying the test results, the cooling rate which is the important parameters of in the hot stamping was researched. The results show that the optimization of mold cooling water piping layout has some influence on the cooling rate of hot stamping. The optimization of the die surface shape significantly improves the cooling rate of the B-pillar. The gap between the die and the plate has a great influence on the cooling rate of the hot stamping.

Key words: hot stamping; cooling rate; forming process; numerical simulation

0 引 言

热冲压成形技术是专门用于成形高强度冲压件的先进制造技术。该技术是将传统热锻造技术与冷冲压技术相结合的制造工艺。随着汽车制造业发展, 高强度钢板热成形技术在汽车先进制造中的优势日益突出^[1]。由于在常温下高强度钢板强度高、硬度大, 加工困难且对模具及冲压设备要求较高^[2-3], 目前采用可淬火硼钢板进行热冲压成形的工艺成为各大汽车生产

商及研究人员关注的热点^[4]。其成形原理是把特殊的高强度硼合金钢加热奥氏体化后, 送入带有冷却管道的模具中进行成形及合模保压淬火, 根据材料的 CCT 连续冷却组织转变曲线, 确保热冲压件的平均冷却速率大于临界转变速率, 满足板料组织向马氏体转变的条件, 保证冲压件的强度^[5-6]。但是热冲压件会因局部冷却速率小而未能完全转变为马氏体, 出现局部区域强度过低, 马氏体转变不均匀、不充分等一系列问题^[7-8]。

收稿日期:2017-05-31

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2013M530041); 福建省高端装备制造协同创新中心重点项目(XR-2015-026); 龙岩学院“百名青年教师攀登项目”(LQ2016001)

作者简介:马钰杰(1989-), 男, 河南新乡人, 助教, 主要从事先进制造与汽车轻量化设计方面研究。E-mail: mayujie_fzu@163.com

针对热冲压冷却速率的研究国内外进行了大量的研究:Gu 等^[9]研究了 W 形件模具冷却系统,并对防撞梁热冲压模具的冷却系统进行模拟仿真与试验验证,发现了管道半径 R 、管道侧壁间距 L 、管道顶部至模面的垂直距离 H 对冷却系统的影响的关系;Alexandre 等^[10]研究了板料与模具间的接触热阻并建立了计算接触热阻的数学模型;Tomoyoshi 等^[11]研究了用伺服压力机高速成形和法兰间隙防止法兰温度下降较快,来提高高强度钢在热冲压中成形性能。这些研究大都集中在简单、规则的部件上,对形状复杂的热冲压件研究较少。

本研究通过对具有复杂曲面的高强钢部件车身 B 柱进行热冲压过程数值模拟,通过提高模具复杂部位对板料的局部冷却速率和优化模面形状设计方案,对热冲压冷却速率进行研究。

1 热冲压成形冷却速率的理论分析

在热冲压过程中,热冲压件会因冷却速率不同而导致在组织转变过程中得到不同的组织,最终导致成形后组织力学性能不一,对冲压件整体的力学性能有很大影响。因此,研究冷却速率这一参数对热冲压有重要意义。

1.1 22MnB5 材料力学性能

车用高强度钢板通常为锰硼合金钢。在不同温度下 22MnB5 的应力-应变曲线如图 1 所示。

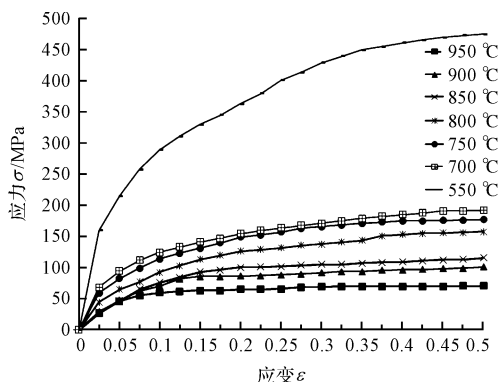


图 1 温度对 22MnB5 材料应力-应变曲线的影响

随着温度的升高,材料的屈服强度从 550 °C 的 450 MPa 峰值降到 950 °C 的 78 MPa,屈服强度降低了 5 倍多,屈服强度变化范围大,反映出了温度对材料力学性能的影响大。此外,板料在不同的成形温度下的成形性能也不同。所以,在热冲压成形过程中,需要控制冷却速率使板料在成形性能好的温度区间内冲压成形,以避免产生破裂、褶皱、颈缩等缺陷。

1.2 冷却速率对 22MnB5 组织转变的影响

22MnB5 连续冷却组织转变曲线如图 2 所示。

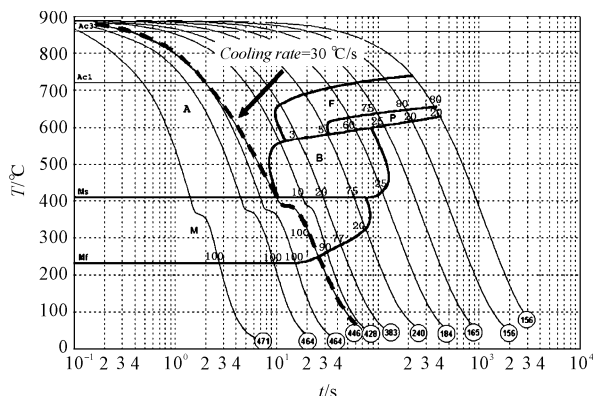


图 2 22MnB5 奥氏体化后连续冷却组织转变图

材料在 900 °C 时完全奥氏体化,随着冷却,材料在 410 °C 左右开始马氏体化,即奥氏体转变为马氏体组织,在 234 °C 时马氏体化终止;当板料在向马氏体转变前平均冷却速率大于 30 °C/s 时,板料可以百分百地转变为马氏体,当冷却速率小于 30 °C/s 时,板料部分转变为贝氏体、马氏体、铁素体、珠光体等混合组织,当冷却十分缓慢时,转变为铁素体和珠光体组织。要获得完全马氏体的超高强度钢零件,须使得板料平均冷却速率在 30 °C/s 以上。

2 B 柱热冲压成形模拟

热冲压件 B 柱是支撑车顶连接车底板的主要部件,其强度的大小直接关系到汽车被动安全中侧碰的性能。冷却速率是影响热冲压件 B 柱强度的直接因素,根据图 2 中 22MnB5 连续冷却组织转变曲线图可知,冷却速率不同,B 柱的微观组织也不同,且冷却速率越大,马氏体组织越细,冲压件的力学性能越好。

2.1 B 柱热冲压成形参数的设置

该模拟中,板料的厚度为 1.95 mm,其材料的属性中热膨胀系数为 $1.3e-005$,密度为 $7.83e-009 \text{ ton/mm}^3$,泊松比为 0.3、不同温度下的应力-应变关系为图 1 所示曲线。边界条件参数中板料的初始温度为 860 °C,模具与板料间的换热系数为 $3\,000 \text{ w/(m}^2 \cdot \text{k)}$,模具的冲压速度为 500 mm/s。

2.2 模拟结果及分析

热冲压件 B 柱一个完整的生产过程包括冲压成形和合模保压淬火两个阶段。该模拟中,板料从加热炉加热到 900 °C 保温完全奥氏体化后,经 4 s 移至模具上,由于热辐射、空气对流等传热温度为降为

860 ℃。成形结束时板料温度云图如图 3(a) 所示, B 柱颈部两角 A 处在模具拉伸挤压下塑性变形进一步变大,产生更多的变形能,因此温度最高,为 865 ℃;成形结束的厚度云图如图 3(b) 所示,A 处最薄,最小厚

度为 1.43 mm,相应减薄率为 26.7%,主要由于在 A 处板料受到大的模具的挤压,发生较大的塑性变形;而在冲压件中部 W 处,由于对称弯曲压应力作用,W 处最厚,为 2.16 mm。

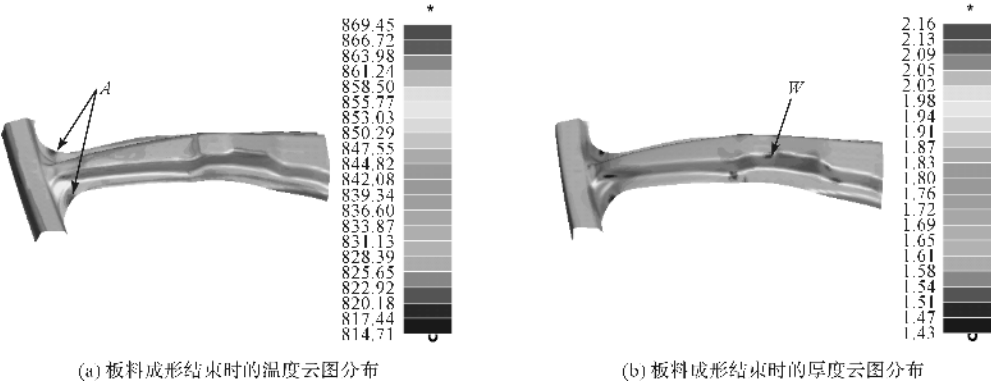


图3 成形结束时板料的温度、厚度云图分布

合模淬火 5 s 后,B 柱大部分温度在 410 ℃ 左右,

合模淬火主要时刻温度分布云图如图 4 所示。

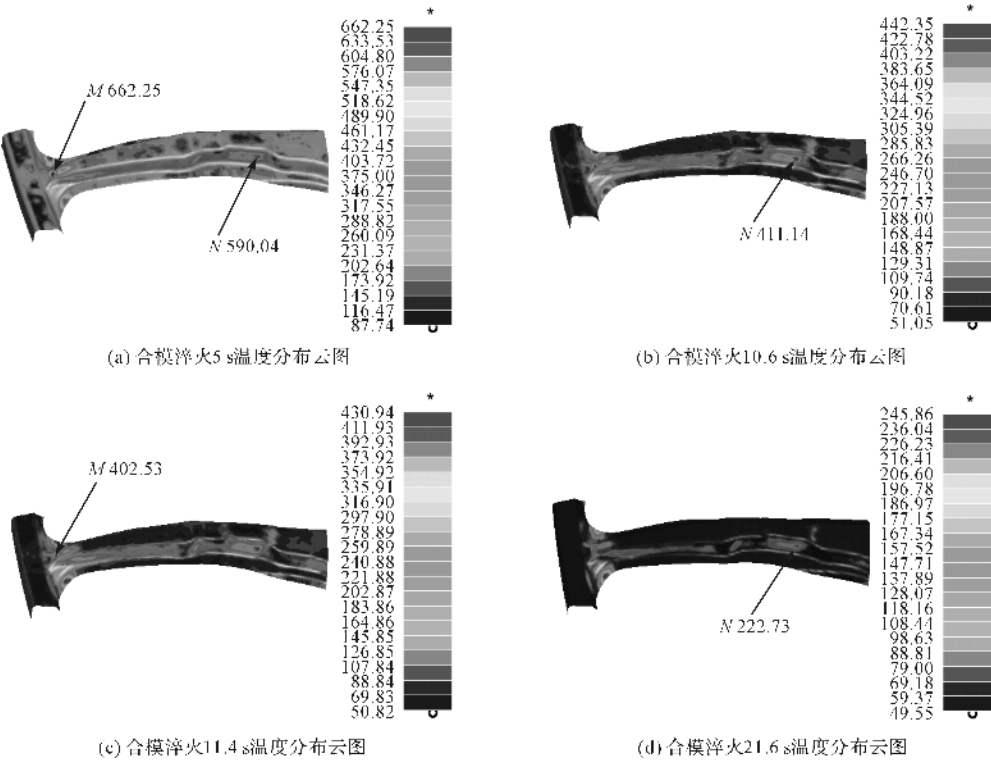


图4 合模淬火主要时刻温度分布云图

从图 4(a) 中可知,已开始奥氏体向马氏体转化。但其中 M 位置处和 N 位置处温度较高,最高温度为 662.3 ℃,没有发生奥氏体向马氏体转变。经分析 M 位置处是由于板料成形过程中形变复杂,受到拉伸塑形变形较其他部位大,板料减薄较大,与模具贴合不好;又较其他部位与模具接触时间短,相对其他部位与模具发生接触传热较少。N 位置处在 B 柱的拉伸区,在成形过程中,受到模具的拉伸形变大且减薄较多,导

致在淬火过程中与模具贴合不紧,主要通过板料与模具之间的空气热传导传热,与模具接触传热少,所以冷却速率较小。随着淬火冷却,在 10.6 s 时,N 位置处温度降为 411.1 ℃,开始向马氏体转变,平均冷却速率为 29.8 ℃/s,小于完全马氏体化转变的临界冷却速率;在 11.4 s 时,M 位置处的温度为 402.5 ℃,已开始向马氏体转变,平均的冷却速率为 28.9 ℃/s,同样小于完全马氏体化转变的临界冷却速率,从图 2 奥氏体

化后连续冷却组织转变图中可以看出,转变过程中,有少量非马氏体生成将影响 B 柱整体的力学性能。

3 热冲压优化方案设计

综上分析,根据 22MnB5 连续冷却组织转变曲线图,冷却速率不同,B 柱的微观组织也不同,为确保 B 柱有较好的力学性能,必须提高 B 柱在 M 处和 N 处的冷却速率。

3.1 优化方案 1 设置

高温板料经模具的挤压拉伸成形及冷却淬火,热量大部分被模具冷却系统吸收,少部分辐射到周围环境。设模具冷却系统吸收板料的热量为 Q ,冷却水温度由 T_1 升为 T_2 ,根据传热学原理分析可知,冷却水单位时间内的流量 q 为:

$$q = \frac{Q}{\rho_1 t C_1 (T_2 - T_1)} \tag{1}$$

式中: ρ_1 —冷却水平均温度下饱和时的密度,kg/m³; t —时间,s; C_1 —冷却水平均温度下的比热,J/(kg × °C)。

由式(1)知:在冷却水密度、比热及温差一定情况下,冷却水单位时间内的流量 q 越大,其表面冷却水吸收的热量越多,即模具对板料的冷却速率越大。由物理学知,单位时间内冷却水的流量 q 与冷却管道截面面积、冷却水流速成正比,故增加冷却管道截面和冷却

水流速,可以提高模具对板料的冷却速率。冷却水与模具是通过对流传热的,冷却管道与模具表面距离直接影响其对流传热的效果。冷却管道与模具表面距离越小,热对流传热越大,故在保证模具有足够强度的条件下,尽量减小冷却管道到模具表面的距离以增大模具对板料的冷却速率^[12]。

针对 1.3 中 M 和 N 位置冷却速率小于 30 °C/s 的临界冷却速率,导致 B 柱关键部位 M 位置的强度降低,影响整体的力学性能。本文提出的优化模具冷却水管道布置示意图如图 5(a)所示,通过优化设置,增加 M 和 N 位置模具与板料间的换热系数使模具对板料的换热系数如图 5(b)所示。

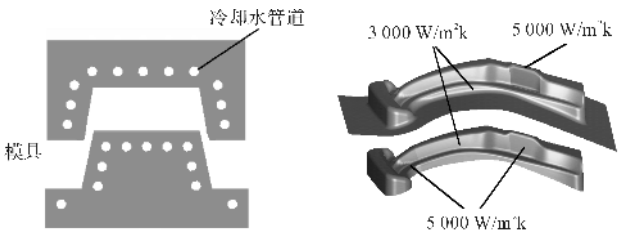


图 5 模具内部冷却水管道及换热系数示意图

经优化后的模具保持其他工艺参数不变,换热系数用图 5 中的模具等效换热系数,进行板料热冲压成形模拟。优化方案一合模淬火主要时刻温度分布云图如图 6 所示。

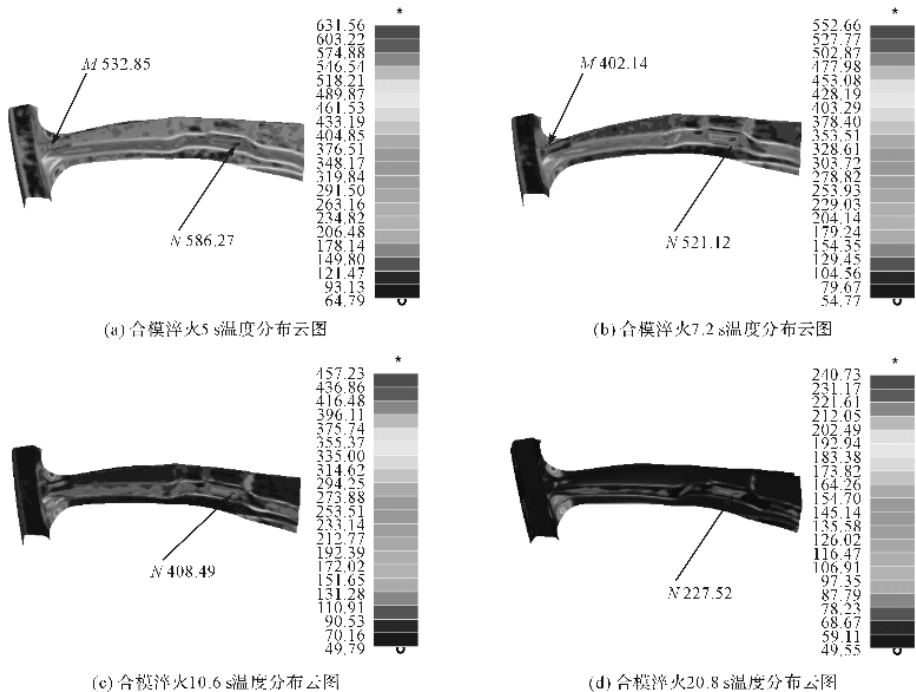


图 6 优化方案一合模淬火主要时刻温度分布云图

结果从图 6 可以看出:与图 4 中淬火 5 s 时最高温度 662.2 °C 相比显著降低,说明增加该处模具冷却速

率对改善 B 柱 M 位置的淬火速率有所提高,该方案有明显效果。当淬火 7.2 s 时,M 位置温度为 402.1 °C,

已达到向奥氏体向马氏体转变温度,平均冷却速率为 39.3 ℃/s,冷却速率提高了 36.0%,满足完全转变为马氏体条件;在淬火 10.6 s 时, *N* 位置处温度最高为 408.5 ℃,已开始向马氏体转变温度,平均冷却速率为 30.0 ℃/s,满足完全马氏体化转变温度。相比 *N* 位置处及周围拉伸区的改善效果不明显,冷却速率提高了仅 0.67%。在合模淬火 20.8 s,完成马氏体转化过程。

3.2 优化方案 2 设置

本文中为使模拟更接近实际,设置当模具与板料间隙小于一定值时,计算按照板料与模具间接触热传导计算;当间隙稍大,在一定范围内时,计算按照模具板料间空气热导率传热和热辐射计算;当间隙较大时,以空气对流和热辐射计算。对成形中板料局部厚度变化与模具之间有间隙存在而影响 *B* 柱在淬火阶段的冷却效果,本文提出了一种优化模面形状的方法。通过板料云图厚度变化调节局部模具单元节点示意图如图 7 所示。

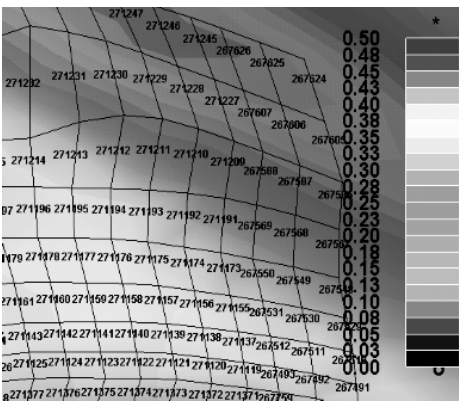


图 7 通过板料云图厚度变化调节局部模具单元节点示意图

图 7 中,显示模具的网格单元,板料以厚度云图显示,通过修改模面网格节点所对应板料厚度云图变化显示值的大小,来弥补板料模具间隙空隙的存在,使板料与模具间隙减小到一定值,从而确保使 *M* 处和 *N* 处板料在淬火阶段以与模具接触热传导为主进行冷却降温。

本研究经过优化模面后进行热冲压数值模拟。优化方案二合模淬火主要时刻温度分布云图如图 8 所示。

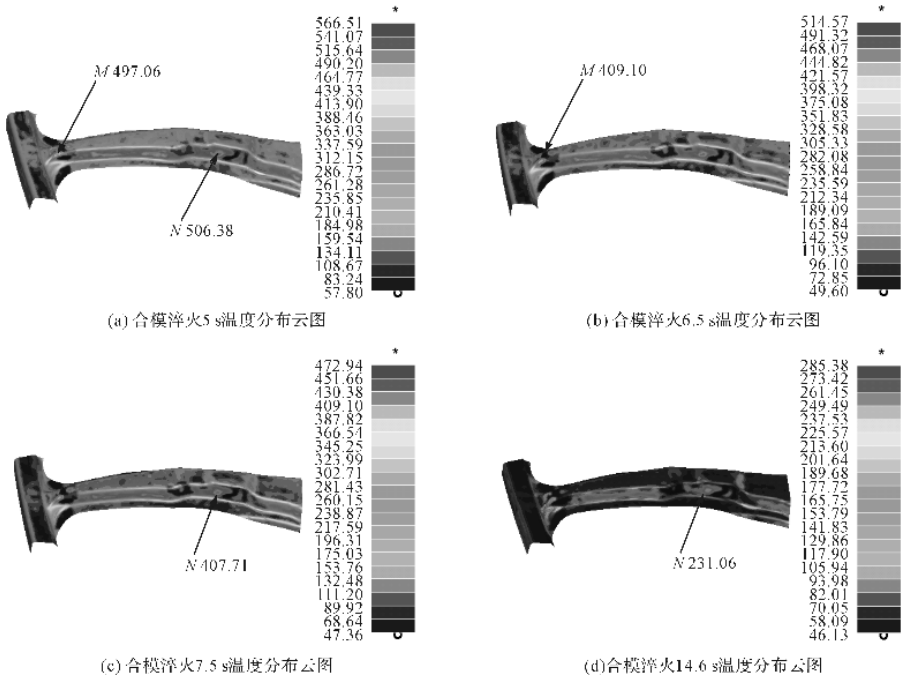


图 8 优化方案二合模淬火主要时刻温度分布云图

从图 8 合模淬火 5 s 温度云图可知:优化后的模具很好地提高了 *B* 柱 *M* 及 *N* 位置处的冷却速率,对比图 4 中淬火 5 s 时 *M* 位置处温度由 682.2 ℃降低为 497.1 ℃,冷却速率大大提高,在淬火 6.5 s 时, *M* 位置处达到开始向马氏体的转变温度,温度降为 409.1 ℃,冷却速率为 41.2 ℃/s,相对于初始方案,冷却速率提高了 37.9%,满足完全马氏体化的临界冷却速率。淬火 7.5 s 时, *N* 位置处温度降为 407.7 ℃,冷却速率为 37.9 ℃/s,提高了 27.2%,满足完全马氏体化的临界

冷却速率。在淬火 14.6 s 时, *B* 柱有效部分已完成马氏体转变过程,与对比方案,整个生产周期缩短了 46.5%。从图 8 亦可知,合模淬火 7.5 s 温度分布云图,可以看出 *N* 位置处前部及周围拉伸区温度稍高,主要原因是由于优化模面形状是按照对应模具单元节点来优化模具减小板料与模具间隙的,节点不是连续构成的,中间存在一定距离,这就导致优化后的模具与板料连续性减薄或增厚部位不能很好地吻合,依然有间隙存在,尤其是对于 *B* 柱拉伸区变化复杂处,所以

该复杂处冷却速率提高不明显。

3.3 优化方案结果

本研究对初始方案、优化方案 1 与优化方案 2 进行整理,得到 M 、 N 处结果对比如表 1、表 2 所示。

表 1 M 处结果对比

方案设计	初始方案	增大局部冷却 速率方案	优化模面 方案
淬火时间/s	11.4	7.2	6.5
平均冷却速率/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	28.9	39.3	41.2
均匀性	较差	较好	好

表 2 N 处结果对比

方案设计	初始方案	增大局部冷却 速率方案	优化模面 方案
淬火时间/s	10.6	10.6	7.5
平均冷却速率/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	29.8	30.0	37.9
均匀性	差	一般	较好

对比可知:增大模具形状复杂位置换热能力的优化设置,改善了 B 柱 M 处的冷却速率,使 B 柱结构复杂 M 处的冷却速率提高了 36.0%,确保了该关键部位完全马氏体化,但对 B 柱 N 处及周围拉伸区的效果不明显。对应模面形状优化设置,结果表明,B 柱模具与板料间隙的存在影响其在淬火阶段的冷却速率,进而影响工件的整体质量;B 柱形状复杂 M 处的冷却速率提高了 37.9%,整体的冷却速率由 $28.9\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 提高到了 $41.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,提高了 42.6%;同时还表明,由于优化模面形状是通过优化模具对应单元节点来完成的,与板料连续性减薄、增厚不能很好地吻合,成形工件淬火过程中,板料局部冷却依然受间隙存在的影响,冷却速率改善不明显。在实际高强度钢零部件热冲压生产中,增大板料表面与模具间的光洁度,使工件在成形过程中厚度变化小,减小成形后部件与模具间的间隙,是提高成形工件整体性能的关键。

4 结束语

本研究对具有复杂曲面的高强钢部件车身 B 柱进行热冲压过程数值模拟,发现淬火中 B 柱成形复杂处冷却速率小等问题,提出了两种优化设置方案对热冲压冷却速率进行了研究。得出以下结论:

(1) 优化模具冷却水管道布置以增大局部模具对板料的冷却速率的方案,结果表明 B 柱形状复杂位置处的冷却速率提高了 36.0%,对热冲压成形后工件力学性能均匀有一定的改善作用;

(2) 优化模面形状的方案,结果表明 B 柱形状复杂 M 处的冷却速率提高了 37.9%,生产周期由原来 22.04 s 缩短为 15.04 s,生产周期缩短了 46.5%,同时表明模具与板料间隙的存在对板料冷却速率有很大的影响。

参考文献 (References):

[1] HU Ping, MA Ning, LIU Li-zhong, et al. Theories, methods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming[M]. London:Springer London,2013.

[2] MAENO T, MORI K, NAGAI T. Improvement in formability by control of temperature in hot stamping of ultra-high strength steel parts[J]. **CIRP . Annals-Manufacturing Technology**,2014,63(1):301 - 304.

[3] 马 宁,申国哲,张宗华,等. 高强度钢板热冲压材料性能研究及在车身设计中的应用[J]. 机械工程学报,2011,47(8):60-65.

[4] ABSPOEL M, NEELIS B M, LIEMPT P V. Constitutive behavior under hot stamping conditions[J]. **Journal of Materials Processing Technology**,2015,69(1):141 - 152.

[5] ROSSINI M, SPENA P R, CORTESE L, et al. Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for automotive industry[J]. **Materials Science and Engineering A**,2015,628(1):288-296.

[6] NADERI M, DURRENBERGER L, MOLINARI A, et al. Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures[J]. **Materials Science and Engineering A**,2008,478(1):130-139

[7] 马 宁,胡 平,闫康康,等. 高强度硼钢热成形技术研究及其应用[J]. 机械工程学报,2010,46(14):177-181.

[8] UDA K, AZUSHIMA A, YANAGIDA A. Development of new lubricants for hot stamping of Al-coated 22MnB5 steel[J]. **Journal of materials Processing Technology**,2016,228(1):112-116.

[9] 谷净巍,陆冠含,李 欣,等. 防撞梁热冲压模具冷却系统的数值分析及优化[J]. 吉林大学学报,2015,45(4):1189-1194.

[10] BLAISE A, BOUROUGA B, ABDULHAY B, et al. Thermal contact resistance estimation and metallurgical transformation identification during the hot stamping[J]. **Applied Thermal Engineering**,2013,61(2):141-148.

[11] MAENO T, MORI K I, FUJIMOTO M. Improvements in productivity and fromability by water and die quenching in hot stamping of ultra-high strength steel parts[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**,2015,64(1):281-284.

[12] 贺 斌,邓泽涵,张万鑫,等. 热冲压模具冷却水道 FEM-CFD 耦合优化研究[J]. 热加工工艺,2014,43(1):1-4.

[编辑:张 豪]

本文引用格式: