

## 热冲压淬火时模具温度对硼钢组织和性能影响实验研究

王 亭, 马海爽, 张志强, 秦冉冉

(吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 以 USIBOR 1500P 硼钢为研究对象, 在 25~450 °C 的模具温度下对试样进行奥氏体化和淬火处理, 并研究淬火后试样的微观组织与力学性能。结果表明, 当模具温度为 25 和 450 °C 时, 测得的维氏硬度分别为 514 和 327 HV, 并得到了维氏硬度与模具温度的关系图。相对于模具温度为 25 °C 时, 模具温度为 450 °C 时试样的极限抗拉强度降低了 34%, 断后伸长率提高了 20%。通过扫描电子显微镜和两阶段的彩色蚀刻来识别并统计淬火相的面积分数, 发现模具温度为 25 和 100 °C 时, 试样的马氏体面积分数仍然很高, 马氏体面积分数随着模具温度的升高而降低; 当淬火速率降低时, 有更多的贝氏体形成, 而铁素体在模具温度为 300 °C 时开始形成。

**关键词:** USIBOR 1500P 硼钢; 热冲压; 淬火; 冷却速率; 马氏体; 贝氏体

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.011

**中图分类号:** TG161; TG156.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 05-0090-06

## Experimental study on influence of die temperatures on microstructure and properties for boron steel during hot stamping and quenching

Wang Ting, Ma Haishuang, Zhang Zhiqiang, Qin Ranran

(School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130000, China)

**Abstract:** For USIBOR 1500P boron steel, the austenitizing and quenching treatments of specimens were conducted at the die temperatures ranging from 25 °C to 450 °C, and the microstructures and mechanical properties of the quenched specimens were researched. The results show that when the die temperatures are 25 °C and 450 °C, respectively, Vickers hardnesses are 514 HV and 327 HV, respectively, and the relationship curve between Vickers hardness and die temperature was obtained. Compared with the specimen with the die temperature of 25 °C, the ultimate tensile strength of the specimen with the die temperature of 450 °C decreases by 34%, and the elongation after fracture increases by 20%. The area fraction of the quenched phases is identified and counted by scanning electron microscopy and a two-stage color etching, it is found that when the die temperatures are 25 °C and 100 °C, respectively, the area fraction of martensite in the specimens remains high, and the area fraction of martensite reduces with the increase of the die temperature. When the quenching rate is reduced, there is more bainite formation, and the ferrite begins to form at the die temperature of 300 °C.

**Key words:** USIBOR 1500P boron steel; hot stamping; quenching; cooling rate; martensite; bainite

为了减轻汽车的质量并提高耐撞性, 硼钢板热冲压工艺在汽车领域得到了广泛的应用。在热冲压过程中, 硼钢板在冷模具内同时完成成形和淬火, 可获得完全的马氏体组织, 其抗拉强度可达 1500 MPa<sup>[1]</sup>。然而, 与低强度或中等强度钢相比, 完全马氏体热冲压构件的延展性非常差, 很少用于吸能结构。通过在局部区域引入较软的微观结构并在防撞部位保持较高强度, 可以改善热冲压部件的吸能特性。B 柱就是不同区域具有不同强度和延

展性的一个例子, 底部区域需具有较高的吸能能力, 以提高侧面碰撞性能, 而其上部区域必须保持马氏体组织的高强度, 以保证较高的耐撞性。这种具有定制微观结构和力学性能的部件被称为定制热冲压部件。

这种定制的部件可以在传统热冲压工艺中利用不同变体或在传统工艺中使用定制的焊接板来获得。Stöhr T 等<sup>[2]</sup>在炉内进行了部分加热技术, 在完全硬化区域获得了约 1600 MPa 的极限抗拉强度 (Ultimate Tensile Strength, UTS), 在低于 775 °C 的加热温度下获得了 1100 MPa 的 UTS。Wilsius J 等<sup>[3]</sup>研究了局部加热技术, 相对于完全硬化区域约 1600 MPa 的 UTS, 在定制区域得到了约 700 MPa 的 UTS, 这种局部加热方式会使坯料形成局部温度分布进而形

收稿日期: 2024-12-09; 修订日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51205162)

作者简介: 王 亭 (1979-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: wangting15@163.com

成混合晶粒结构<sup>[4]</sup>，坯料出炉后的局部温度分布和不同的晶粒组织，产生了不同的流动性能，这将影响成形过程和部件淬火后的回弹。Labudde T 等<sup>[5]</sup>在 600 °C 下进行 30 min 的回火，得到了回火马氏体，硬度和 UTS 分别从 550 HV 和 1753 MPa 降低至 290 HV 和 841 MPa。Múnera D D 等<sup>[6]</sup>使用了 USIBOR 1500P 和 Ductibor 500P 的定制焊接板的组件，结果表明，在保持相似吸能特性的情况下，可以将组件的总质量降低 20%。Lamprecht K 等<sup>[7]</sup>发现，根据热冲压过程的时间-温度分布来看，微合金钢牌号 H340LAD 与 22MnB5 是一种合适的连接材料。Casas B 等<sup>[8]</sup>研究了导热系数为  $6.1 \sim 55.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  的多种新模具材料，在低导热系数的定制区域使用工具钢可获得 600 MPa 的抗拉强度。Banik J 等<sup>[9]</sup>研究了模具温度为 300~550 °C 时对淬火后零件力学性能的影响，由于不同的模具区域温度不同，板料内部会产生温度梯度，导致淬火后形成过渡区。Svec T 等<sup>[10]</sup>研究了过渡区的分布，根据板料厚度和模具温度的不同，过渡区的分布范围为 12~50 mm。Graff S 等<sup>[11]</sup>在模具温度为 500 °C、淬火时间为 25 s 的条件下进行了实验，结果表明，与完全硬化的构件相比，其抗拉强度降低了 50%。Ertürk S 等<sup>[12]</sup>在模具温度为 550 °C、淬火时间为 20~25 s 的条件下进行研究，与完全淬火条件相比，材料的强度也有类似情况的下降，约为 50%。Feuser P 等<sup>[13]</sup>在模具温度为 550 °C、淬火时间为 15 s 的条件下对全尺寸 B 柱进行了实验，在模具温度为 500 °C 时，维氏硬度达到了 250~270 HV，抗拉强度降低约 50%。George R 等<sup>[14-15]</sup>在模具温度为 400 °C、淬火时间为 410 s 的条件下制作了一个实验室规模的 B 柱，当模具温度为 400 °C 时，合金的维氏硬度达到 244~260 HV。杨姝等<sup>[16]</sup>基于热冲压成形工艺，通过胀形试验研究了温度和成形速度对 2/1 型单向热塑性玻璃纤维金属层板 (UTG/FMLs) 热成形性能的影响规律并分析了成形机理。

了解模具温度如何影响淬火后零件的组织 and 力学性能对模具加热技术来说是非常重要的。现有文献中很少在不同的模具温度下，对淬火相的面积分数进行定量分析。本文对 USIBOR 1500P 硼钢进行了奥氏体化处理，然后在 25~450 °C 的模具温度下进行淬火，再进行显微硬度测量和工程应力-工程应变曲线分析，以评估冷却速度产生的影响，为了识别和量化淬火试样中淬火相的面积分数，进行了金相分析。

## 1 实验方法

### 1.1 不同模具温度下的淬火实验

本文选用厚度为 1.0 mm 的 USIBOR 1500P 硼钢材料。图 1 为实验装置的示意图，由两块平板模具（上模和下模）组成。为提高模具温度的均匀性，采用内嵌式加热棒对两个平板模具进行加热，热电偶放置于距离模具表面约 2 mm 处，以确保模具表面温度保持在规定的温度。

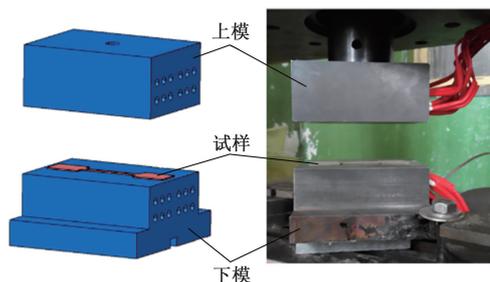


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

模具由 H13 热加工工具钢制成，没有任何表面处理或硬化处理，模具表面抛光以减少加工痕迹。拉伸试样在上模和下模之间淬火，未发生变形，试样尺寸如图 2 所示。在模具温度为 25~450 °C 的范围内进行淬火实验，以确定模具温度对试样最终力学性能的影响。使用电阻炉将试样加热至 930 °C 的奥氏体化温度，保温 5 min，试样奥氏体化后，从电阻炉中取出，转移至压机上，在 25 °C 的室温下以 15 MPa 的压力进行 10 s 的淬火。该压机可达的最大压力为 100 kN。

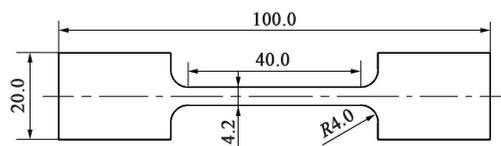


图 2 拉伸试样的尺寸

Fig. 2 Dimensions of tensile specimen

### 1.2 不同相分数硼钢的力学性能

使用 HVS-1000ZDT 硬度计在 200 g 的载荷下进行显微硬度测量，在每个试样上选取 6 个位置进行测量。试样在模具温度为 25~450 °C 之间淬火后进行单轴拉伸实验，实验使用 Instron 1121 单轴试验机，应变速率为  $0.003 \text{ s}^{-1}$ 。

通过金相分析，识别并量化淬火相的面积分数。

使用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和两阶段的彩色蚀刻来进行微观组织观察。对于 SEM 分析, 使用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀样品, 并使用 TESCAN VEGA3 扫描电镜进行拍摄。在两阶段的彩色蚀刻过程中, 样品在 4% 的苦味酸腐蚀液中腐蚀, 第 1 阶段, 腐蚀时间为 20 s, 腐蚀后立即用水清洗, 然后用乙醇清洗, 并用压缩空气干燥; 第 2 阶段, 样品在 10% 的焦亚硫酸钠溶液中腐蚀 10 s 后立即用水清洗, 继而用乙醇清洗, 并用压缩空气干燥, 处理后马氏体呈褐色、贝氏体呈黑色、铁素体呈白色。使用 ZEISS Axio. Scope. A1 光学显微镜观察处理后的样品。使用 ImagePro Plus 7.0 图像分析软件手动将相填充为红色 (贝氏体), 绿色 (马氏体) 和蓝色 (铁素体), 随后进行像素计数以量化面积分数。

## 2 实验结果

### 2.1 硬度测量

不同模具温度下淬火后试样的平均维氏硬度如图 3 所示。可以看出, 随着模具温度的升高, 淬火后试样的维氏硬度呈下降趋势。根据 Bardelcik A 等<sup>[17]</sup>的研究, 硬度的下降很可能是由于淬火组织中引入了一定体积分数的铁素体和贝氏体。对该趋势进行拟合, 结果如式 (1) 所示, 计算得到相关系数  $R^2$  为 0.992, 拟合程度较好。

$$H = 538.15 - 20.44 \times \exp\left(\frac{T + 31.17}{209.42}\right) \quad (1)$$

式中:  $H$  为维氏硬度值, HV;  $T$  为模具温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

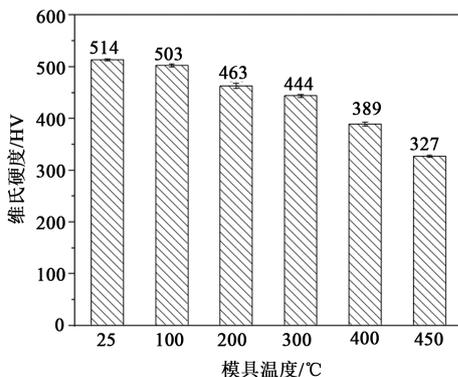


图 3 不同模具温度下淬火后试样的平均维氏硬度

Fig. 3 Average Vickers hardness of specimens after quenching at different die temperatures

### 2.2 工程应力、工程应变结果

不同模具温度下淬火后试样的工程应力-工程

应变曲线如图 4 所示。结果表明, 试样在 25  $^{\circ}\text{C}$  的模具温度下几乎完全硬化, UTS 值最高, 且 UTS 值随着模具温度的升高而减小。从图 5 中可以看出: 模具温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  时, 淬火后试样的 UTS 为 1454 MPa, 断后伸长率为 6.7%; 模具温度为 450  $^{\circ}\text{C}$  时, 淬火后试样的 UTS 为 960 MPa, 较模具温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  时试样的 UTS 降低了 34%, 断后伸长率为 8.0%, 较模具温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  时试样的断后伸长率提高了 20%。合金的性能表明, 随着模具温度的升高, 淬火后试样的抗拉强度降低, 但塑性得到提高。

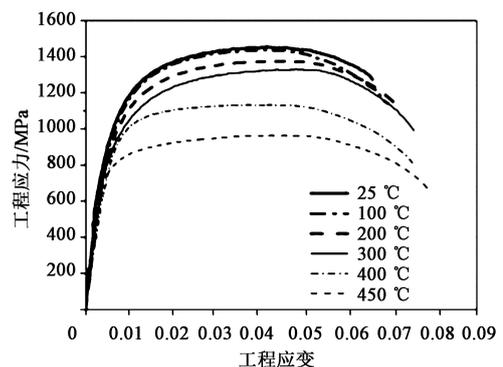


图 4 不同模具温度下淬火后试样的工程应力-工程应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-engineering strain curves of specimens after quenching at different die temperatures

### 2.3 金相分析结果

不同模具温度下淬火后试样的微观组织如图 6 所示。其中, 包括 SEM 图、两阶段彩色蚀刻光学显微图像 (Color Etched Microstructure, CEM) 以及人工生成微观结构图像 (Coloring Images of Different Phases, CIDP)。25  $^{\circ}\text{C}$  模具温度下, 淬火后试样的微观组织为平行板条状的完全马氏体组织及少量的贝氏体组织, 如图 6a 所示。图 6b 为多相淬火试样, 贝氏体由铁素体与分散的渗碳体颗粒组成, 由这些形态特征判断其为上贝氏体 (Upper Bainite, UB)。在扫描电镜图像中也发现了少量的铁素体, 呈现扁平均匀的结构特征。图 6b 中的彩色蚀刻图像清楚地显示了显微组织中存在的马氏体、贝氏体和铁素体相的分布情况。图 6c 所示的扫描电镜图像中的贝氏体与图 6b 的贝氏体结构不同, 这种贝氏体结构与粒状贝氏体 (Granular Bainite, GB) 一致, 以马氏体、残余奥氏体或分散在铁素体基体中的马氏体/残余奥氏体岛为特征。

不同模具温度下淬火后试样中马氏体、贝氏体和铁素体的面积分数如图 7 所示。通过对显微组织图像进行统计, 结果表明, 在模具温度为 25 和

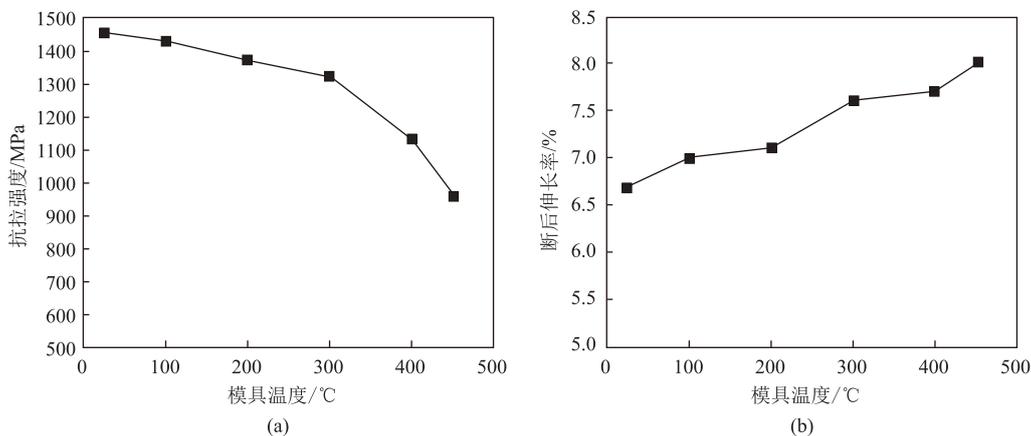


图5 不同模具温度下淬火后试样的力学性能

(a) 抗拉强度 (b) 断后伸长率

Fig. 5 Mechanical properties of specimens after quenching at different die temperatures

(a) Tensile strength (b) Elongation after fracture

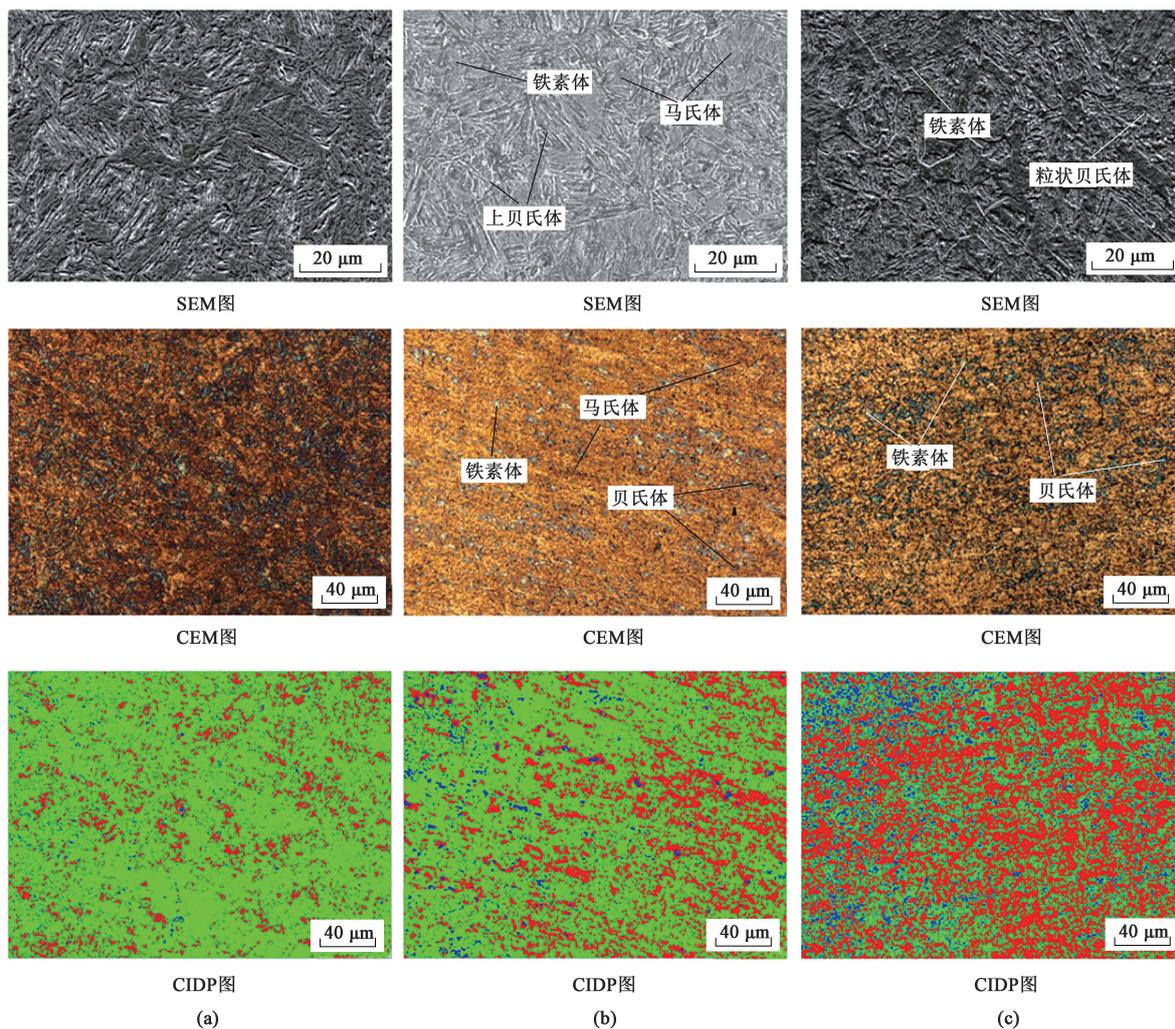


图6 不同模具温度下淬火后试样的微观图像

(a) 25 °C (b) 300 °C (c) 450 °C

Fig. 6 Microscopic images of specimens after quenching at different die temperatures

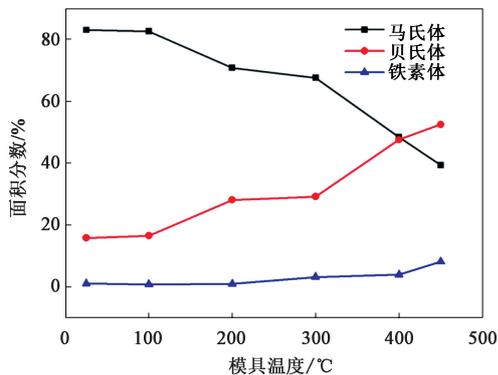


图 7 不同模具温度下淬火后试样中马氏体、贝氏体和铁素体的面积分数

Fig. 7 Area fractions of martensite, bainite and ferrite in specimens after quenching at different die temperatures

100 °C时, 试样的马氏体面积分数均在 80% 以上, 这是由于冷模和高淬火速率导致的马氏体相变。随着模具温度的升高, 由于淬火速率降低, 马氏体的面积分数降低, 导致更多的贝氏体形成。当模具温度高于 400 °C时, 马氏体的面积分数低于 50%, 贝氏体的面积分数达到 47.62%。当模具温度达到 450 °C时, 贝氏体的面积分数大于 50%。其中, 在模具温度为 300 °C时, 由于冷却速度较慢, 铁素体开始形成; 在模具温度为 450 °C时, 铁素体含量上升至 8.19%。

### 3 讨论

本研究表明, 采用不同模具温度的淬火可获得具有不同性能的热冲压部件。完全马氏体状态下的构件虽然具有很高的抗拉强度和硬度, 但在失效前的延展性非常差, 限制了其在 B 柱和其他可能承受冲击载荷的部件上的使用。为了使试样的冷却速率降低至  $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  以下, 促进贝氏体的形成, 模具温度须高于 300 °C。其中, 当模具温度为 450 °C时硬度值最低, 为 327 HV。George R 等<sup>[14]</sup> 实验生产了一种具有定制性能的实验室规模的 B 柱, 当模具温度为 400 °C时, 其软区的硬度为 234 HV, 低于本研究的硬度值。该结果可归因于试样与平板模之间的接触改善以及由于试样尺寸较小而产生的更高的接触压力, 良好的接触主要是因为试样在淬火过程中平整的上模与平整的下模之间没有变形, 较高的接触压力可以提高固体接触热导, 从而提高冷却速率。

此外, 淬火时间对材料的硬度也有影响。George R 等<sup>[14]</sup> 研究了淬火时间分别为 4 和 10 s 对力

学性能的影响, 当模具温度大于 300 °C时, 淬火时间为 4 s 时比 10 s 时的硬度水平要低。由于体积小, 本研究的样品容易散失热量, 因此, 10 s 的淬火时间足以完成冷却, 使硬度更高。延长淬火时间将从试样中提取更多的热量, 直至试样和模具的温度达到平衡。如果模具温度低于马氏体转变起始温度, 过短的淬火时间会抑制马氏体的转变。如果模具温度高于马氏体转变起始温度, 淬火时间对试样最终性能的影响不显著, 因为马氏体的形成将被抑制。

### 4 结论

(1) 使用加热棒将模具温度提高至 300 °C 以上, 可以有效降低试样的淬火速率并增加微观组织中贝氏体和铁素体相的含量。在淬火时间为 10 s、模具温度为 25 和 450 °C 时, 得到的硬度值分别为 514 和 327 HV。

(2) 对不同模具温度下淬火后的试样进行单轴拉伸实验。模具温度为 25 °C 时, 淬火后试样的极限抗拉强度为 1454 MPa, 断后伸长率为 6.7%; 模具温度为 450 °C 时, 淬火后试样较 25 °C 时试样的极限抗拉强度降低 34%, 断后伸长率提高 20%, 材料的综合强韧性提升, 这有益于改善构件的碰撞性能。

(3) 利用扫描电子显微镜和彩色蚀刻光学显微图像量化了不同模具温度下淬火相的面积分数。结果表明, 随着模具温度的升高, 贝氏体相的体积分数增加, 试样硬度降低, 当模具温度高于 300 °C 时, 开始形成铁素体。

#### 参考文献:

- [1] Karbasian H, Tekkaya A E. A review on hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (15): 2103–2118.
- [2] Stöhr T, Lechler J, Merklein M. Investigations on different strategies for influencing the microstructural properties with respect to partial hot stamping [A]. Proceedings 2nd International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel-CHS<sup>2</sup> [C]. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2009.
- [3] Wilsius J, Tavernier B, Abou-Khalil D. Experimental and numerical investigation of various hot stamped B-pillar concepts based on Usibor<sup>®</sup> 1500P [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Luleå, 2011.
- [4] Lenze F J, Sikora S, Sauer D, et al. Materials and process developments on the field of hot stamping technology [A]. Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Luleå, 2009.
- [5] Labudde T, Bleck W. Formability characterisation of press hardened steels [A]. Hot Sheet Metal Forming of High-performance

- Steel [C]. Luleå, 2009.
- [6] Múnera D D, Pic A, Abou-Khalil D, et al. Innovative press hardened steel based laser welded blanks solutions for weight savings and crash safety improvements [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2009, 1 (1): 472-479.
- [7] Lamprecht K, Deinzer G, Stich A, et al. Thermo-mechanical properties of tailor welded blanks in hot sheet metal forming processes [A]. Proc. 50th Conference of IDDRG 2010 [C]. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2010.
- [8] Casas B, Latre D, Rodríguez N, et al. Tailor made tool materials for the present and upcoming tooling solutions in hot sheet metal forming [A]. Proceedings of the 1st on International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Kasel, 2008.
- [9] Banik J, Lenze F J, Sikora S, et al. Tailored properties—A pivotal question for hot forming [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Luleå, 2011.
- [10] Svec T, Merklein M. Tailored tempering-heat transfer and resulting properties in dependency of tool temperatures [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Luleå, 2011.
- [11] Graff S, Gerber T, Lenze F J, et al. About the simulation of microstructure evolution in the hot sheet stamping process and the correlation of resulting mechanical properties and crash-performance [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Luleå, 2011.
- [12] Ertürk S, Sester M, Selig M, et al. A thermo-mechanical-metalurgical FE approach for simulation of tailored tempering [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Luleå, 2011.
- [13] Feuser P, Schweiker T, Merklein M. Partially hot-formed parts from 22MnB5—Process window, material characteristics and component test results [A]. Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity [C]. Aachen, 2011.
- [14] George R, Bardelcik A, Worswick M J. Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (11): 2386-2399.
- [15] George R. Hot Forming of Boron Steels with Tailored Mechanical Properties: Experiments and Numerical Simulations [D]. Canada: University of Waterloo, 2011.
- [16] 杨姝, 张宁, 元昌, 等. 单向热塑性玻璃纤维金属层板冲压成形性能 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (8): 38-46.  
Yang S, Zhang N, Qi C, et al. Hot stamping formability for unidirectional thermoplastic glass fiber metal laminates [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (8): 38-46.
- [17] Bardelcik A, Salisbury C, Winkler S, et al. Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 34 (6): 694-702.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发售, 全国各地邮局均可订阅, 逾期末订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、轧制、挤压与拉拔、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册) (包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

### 邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部