铌钒复合微合金化2 GPa热成形钢的强韧性研究

齐丹[1] 曹广祥[1] 徐德超[2] 汤梓铭[1] 巨萌[1] 赵隆卿[1]

（1.高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013；2.首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043）

摘要：通过室温拉伸试验、三点弯曲试验、扫描电子显微镜、透射电子显微镜等多种材料力学性能试验与微观组织表征手段，对Nb、V复合微合金化的铝硅镀层热成形钢34MnB5NbV进行了系统研究。结果表明：淬火后，材料的屈服强度为1 365 MPa，抗拉强度为2 056 MPa，断后伸长率为4.9%，极限尖冷弯角为58.7°；经烘烤硬化后，材料的屈服强度提高了127 MPa，抗拉强度降低了144 MPa，断后伸长率提高了0.5%，极限尖冷弯角提高了6.1°。Nb、V复合微合金化34MnB5NbV钢热成形后，析出相为(Nb,V)C复合析出相，其具有较好的细晶强化和析出强化效果，增强了热成形钢的强韧性，使其综合力学性能指标更优。此外，为充分评价材料的弯曲韧性，对34MnB5NbV钢车门防撞梁零件进行三点弯曲试验，零件的最大弯曲力和弯曲能量较1 500 MPa零件均有较大提升，表现出良好的弯曲韧性，满足应用要求。

关键词：热成形钢 微合金化 拉伸性能 弯曲性能 析出相

中图分类号：U465 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250270

Research on Strength and Toughness Properties of Niobium-vanadium Composite Microalloyed 2 GPa Hot Forming Steel

Qi Dan[1], Cao Guangxiang[1], Xu Dechao[2], Tang Ziming[1], Ju Meng[1], Zhao Longqing[1]

(1. National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013;
2. Technology Research Institute of Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043)

Abstract: In this paper, a systematic study of niobium-vanadium composite microalloyed aluminum-silicon coated hot-forming steel 34MnB5NbV is carried out by various material mechanical property tests and microstructure characterization methods, such as room temperature tensile test, three-point bending test, scanning electron microscope, and transmission electron microscope. The results show that after quenching, the yield strength of the material is 1 365 MPa, the tensile strength is 2 056 MPa, the elongation is 4.9%, and the bending angle is 58.7°. After bake hardening process, the yield strength of the material is increased by 127 MPa, the tensile strength is decreased by 144 MPa, the elongation is increased by 0.5%, and the bending angle is increased by 6.1°. After niobium-vanadium composite microalloyed 34MnB5NbV steel hot forming, the precipitation phase is (Nb, V) C composite precipitated phase, which has better fine grain strengthening and precipitation strengthening effect to improve the strength and toughness of the hot forming steel, so that the comprehensive mechanical properties achieve better. Moreover, in order to fully evaluate the bending toughness of the material, the three-point bending test is carried out on the door anti-collision beam part made by 34MnB5NbV steel. The maximum bending force and bending energy of the part showed significant improvements compared to those of the 1 500 MPa part, indicating good bending toughness and meeting the application requirements.

Key words: Hot stamping steel, Microalloyed, Tensile properties, Bending properties, Precipitates

1 前言

轻量化对汽车安全性能提升及节能减排具有重要意义，大量应用高强钢是汽车轻量化的有效途径之一[1]。热成形技术即将钢板加热到奥氏体化温度以上，并充分保温至奥氏体化，随后快速

作者简介：齐丹（1983—），女，学士学位，正高级工程师，研究方向为汽车用新材料开发及应用。

参考文献引用格式：

齐丹，曹广祥，徐德超，等.铌钒复合微合金化2 GPa热成形钢的强韧性研究[J].汽车工艺与材料，2026(4)：44-49.

QI D，CAO G X，XU D C，et al.Research on Strength and Toughness Properties of Niobium-vanadium Composite Microalloyed 2 GPa Hot Forming Steel[J]. Automobile Technology & Material，2026(4)：44-49.

转移到水冷模具中,进行零件成形和保压淬火。该技术可应用于复杂形状的超高强度零件制造,如车身A/B柱、门槛、中通道等[2-4]。22MnB5是目前应用最多的热成形钢,强度可达1 500 MPa,近年来随着汽车轻量化和碰撞安全需求的提升,1 800~2 000 MPa热成形钢成为钢铁和汽车行业研究的热点技术[5]。但钢强度提升带来氢脆敏感性提高、弯曲韧性下降等问题,尤其是铝硅镀层的涂覆加速了以上性能下降,限制了其应用范围[6-8]。为解决以上应用难题,在热成形钢设计时采用Nb、V等微合金化元素成为一项有效的解决方案[9-11]。文献[12]~文献[14]对Nb微合金化热成形钢的组织、力学性能、氢脆敏感性等进行了系列研究,结果表明,Nb元素能有效细化热成形钢的原始奥氏体晶粒度,抑制氢脆的触发条件,进而有效降低热成形钢及其零部件的氢脆风险,Nb微合金化热成形钢的力学性能优于传统的22MnB5,且能够提高热成形钢的弯曲韧性。目前,关于V元素对材料组织和性能的影响研究主要集中在2 000 MPa级热成形钢。文献[15]提出了在热成形钢马氏体基体中引入大量纳米级VC析出物的强韧化机制,VC可以钉扎奥氏体晶界,抑制晶粒的长大,细化奥氏体晶粒和淬火后的马氏体板条群、板条束等亚结构尺寸,在获得2 000 MPa强度的同时具有与1 500 MPa热成形钢相当的断后伸长率和断裂应变。Nb、V复合微合金化在热成形钢的应用也有相关研究,文献[16]~[20]通过复合添加微量的Nb、V元素,提高了22MnB5热成形钢的淬透性,获得的组织更为细小,有效提高了极限尖冷弯角,并且复合添加Nb、V元素具有降低22MnB5热成形钢氢脆敏感性的作用。虽然近年来1 800~2 000 MPa热成形钢的研究逐渐增多,但是Nb、V复合微合金化对2 000 MPa热成形钢强韧性的研究报道较少。

本文基于分优化后34MnB5热成形钢成影响进行Nb、V复合微合金化,研究材料的力学性能、极限尖冷弯角以及应用该材料试制车门防撞梁零件的三点弯曲性能,并探讨Nb、V复合微合金化对材料强韧性的影响机制。

2　试验材料及方法

试验材料采用厚度为1.6 mm,经Nb、V复合微合金化的34MnB5NbV铝硅镀层热成形钢板,其基体组织由铁素体和珠光体组成,主要化学成分如表1所示。该试验钢的成分设计思路为通过添加Nb、V等微合金元素,促使纳米级碳化物析出,降低马氏体中的碳含量,抑制脆性孪晶马氏体生成,以马氏体相变强化、细晶强化、析出强化的复合强化机制实现热成形后材料的强度突破2 000 MPa,同时改善材料的韧性和塑性,使其兼具强度和良好的韧性。

表1　试验钢主要化学成分(质量分数)　%

成分	C	Si	Mn	Nb	V	Ti	Cr
含量	0.33~0.35	0.20~0.30	1.20~1.60	0.02~0.05	0.10~0.20	0.02~0.03	0.20~0.30

对试验钢进行平板模具淬火以模拟热成形工艺,平板模具的尺寸为300 mm×300 mm,具体工艺参数为将试验钢加热温度至930 ℃,并保温300 s,随后将其快速转移到平板模具上进行冲压,上、下模具合模后保压10 s。

对热成形后的钢板取样进行力学性能测试,在电子万能试验机上进行拉伸试验和三点弯曲试验。拉伸试验参照GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,拉伸试样使用标准中的P5试样,取样方向沿钢板的轧制方向,试样尺寸如图1所示[21]。

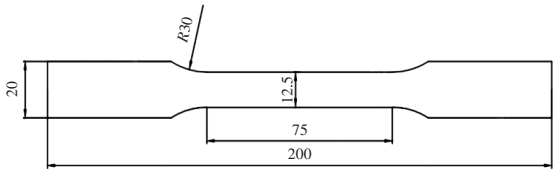


图1　拉伸试样尺寸[21]

热成形钢的极限尖冷弯角度α_{max}可用于表征其弯曲韧性,较高的α_{max}代表材料具有更高的弯曲断裂应变,试验钢的极限尖冷弯角度α_{max}按照标准VDA 238-100《Plate Bending Test for Metallic Semi-Finished Materials》中规定的三点弯曲性能试验方法进行评价[22]。试样尺寸为60 mm×60 mm,试验冲头尖端半径为0.4 mm,两

侧支辊直径为30 mm，支辊间距为3.7 mm，试验冲头的下降速度为20 mm/min，冲头长度方向垂直于钢板的轧制方向，试验过程如图2所示，试验过程中记录力-位移曲线。为充分评价材料的弯曲韧性，使用该试验钢试制某车型的车门防撞梁，其热成形工艺与上述平板模具淬火工艺参数相同，对试制的车门防撞梁进行三点弯曲试验并与1 500 MPa热成形钢车门防撞梁进行对比。试验中弯曲加载载荷的冲头半径为152.4 mm，使用间距为800 mm的2个支承座，支承座上端圆柱半径为12.5 mm，冲头加载速度为2 mm/s，加载到冲头位移为150 mm时停止试验，试验过程如图3所示。

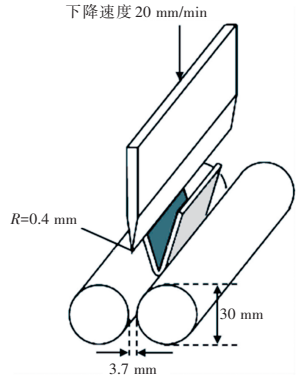


图2 三点弯曲试验过程示意[22]

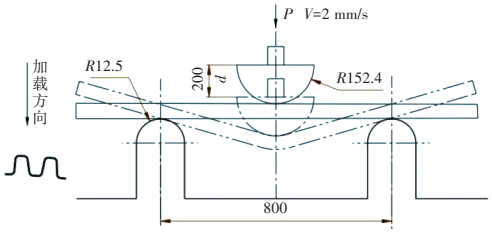


图3 车门防撞梁三点弯曲试验过程示意

热成形后的钢板沿轧向切取试样进行微观组织表征，观察面经过砂纸研磨和电解抛光（电解液为10%高氯酸-乙醇溶液，电压为20 V）；选取试样轧向的横截面进行背散射电子衍射（Electron Back Scatter Diffraction, EBSD）分析，扫描加速电压为20 kV，扫描步长0.09 μm。析出物观察样品经抛光侵蚀后表面喷碳，再用5%硝酸酒精溶液脱膜，随后用乙醇和去离子水清洗后在150目的铜网上自然干燥。萃取复形薄膜在JEM-2100F(HR)电镜下进行观察并能谱分析。

为模拟车身在涂装中的烘烤过程，以上试验均进行烘烤对比试验以分析试验钢在烘烤前、后的性能变化，烘烤试验参数为加热温度170 ℃，保温20 min。

3 试验结果

3.1 力学性能

试验钢在淬火态和烘烤态的力学性能试验结果如表2所示。可以看出，淬火态试验钢的屈服强度为1 365 MPa，抗拉强度为2 056 MPa。烘烤后，试验钢的屈服强度提高了127 MPa，提高比例为9.3%；抗拉强度降低了144 MPa，降低比例为7%；断后伸长率提高了0.5%，提高比例为10.2%。淬火试验钢在烘烤作用下，钢板释放了快速冷却过程中奥氏体转变为马氏体后体积变化造成的残余应力，同时马氏体中的固溶强化元素析出，造成了宏观上钢板屈服强度增加，抗拉强度下降且断后伸长率提高[23]。此外，根据Järvinen H[24]等的研究，烘烤后钢板抗拉强度下降原因包含马氏体基体的软化，而这与钢板中的碳元素含量有关，碳含量越高，抗拉强度下降的比例越大。

表2 力学性能试验结果

材料状态	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A_{50\ mm}$/%
淬火态	1 365	2 056	4.9
烘烤态	1 492	1 912	5.4

3.2 弯曲韧性

以极限尖冷弯角度评价试验钢的弯曲韧性，根据标准VDA 238-100中的弯曲角度公式，得到力-弯曲角度曲线，如图4所示，极限尖冷弯角度和峰值力结果如表3所示。由表3知，3个试样在淬火态的极限尖冷弯角度均大于58.3°，平均值为58.7°，峰值力平均值为16 223 N；烘烤后，试验钢的极限尖冷弯角度提升，峰值力下降；3个试样的极限尖冷弯角度均大于63.9°，平均值为64.8°，较淬火态提高了6.1°，提高比例为10.4%；峰值力平均值为15 504 N，较淬火态降低了719 N，降低比例为4.4%。根据田秀刚[25]等的研究，同样采用930 ℃加热，保温5 min后的平板淬火34MnB5试验钢（含0.23%V）极限尖冷弯角度为51.485°。通过对比可知，经Nb、V复合微合金化的2 000 MPa热成形钢在单一V元素微合金化的34MnB5基础上进一步提升了弯曲韧性。

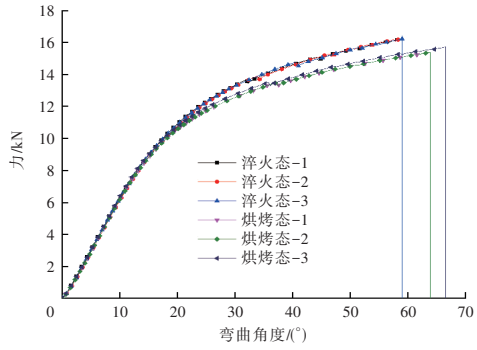


图4　力-弯曲角度曲线

表3　极限尖冷弯角度和峰值力

材料状态	极限尖冷弯角度/(°)				峰值力/N			
	试样1	试样2	试样3	平均值	试样1	试样2	试样3	平均值
淬火态	58.3	58.9	59.1	58.7	16 192	16 241	16 237	16 223
烘烤态	64.0	63.9	66.6	64.8	15 391	15 397	15 722	15 504

对试验钢试制的车门防撞梁零件进行三点弯曲试验以充分验证试验钢的弯曲韧性,试验过程中的力-位移曲线如图5所示。由图5可知,车门防撞梁三点弯曲试验的力-位移曲线光滑,无力值突变,说明该零件在试验过程中并未发生脆性断裂和裂纹的急剧扩展。零件的最大弯曲力和弯曲能量结果如表4所示,可见烘烤后零件的最大弯曲力无明显变化,弯曲能量略有提升;烘烤后,2 000 MPa零件的最大弯曲力和弯曲能量较1 500 MPa零件分别提高了13.5%和17.8%,如等性能设计可通过减薄零件厚度达到轻量化效果。通过车门防撞梁的三点弯曲试验结果可以得出,Nb、V复合微合金化的2 000 MPa热成形钢具有良好的强韧性匹配,满足应用要求。

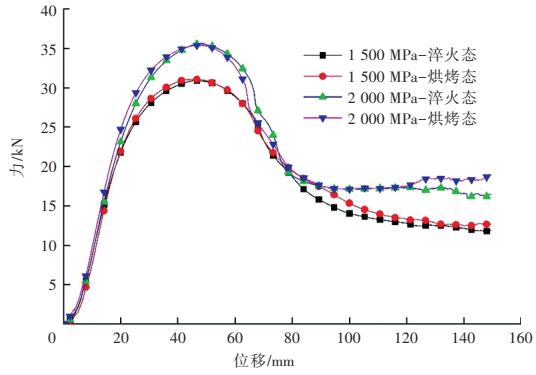


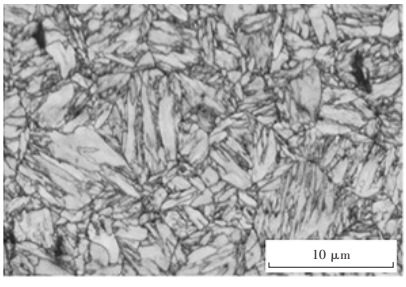
图5　车门防撞梁三点弯曲力-位移曲线

表4　最大弯曲力和弯曲能量

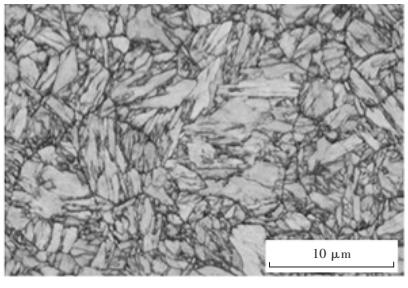
零件	最大弯曲力/N	弯曲能量/J
1 500 MPa-淬火态	31 263	2 773
1 500 MPa-烘烤态	31 171	2 846
2 000 MPa-淬火态	35 607	3 232
2 000 MPa-烘烤态	35 392	3 354

4　分析

图6所示为烘烤前、后试验钢菊池带衬度(Band Cortrast, BC)图,淬火态的马氏体组织主要呈板条状,其亚结构为相互平行、窄而细长的板条,板条内存在高密度位错,板条宽度大部分处于1 μm以下,并且不同晶格取向的马氏体束相互交错排列。烘烤后,板条宽度增加,板条间界线模糊,亚晶出现一定程度的回复合并。通过BC图,可较为明显地观察到原奥氏体晶界,原奥氏体晶粒尺寸约6~8 μm,晶粒度达到11级。通过Nb、V复合微合金化后的材料,其晶粒尺寸得到明显细化,晶界数量增多。当受到碰撞冲击时可为裂纹提供更多的扩展路径,增强了马氏体板条束间的协同变形能力,这也解释了3.2节中试验钢具有较高极限尖冷弯角度的原因。



(a)淬火态

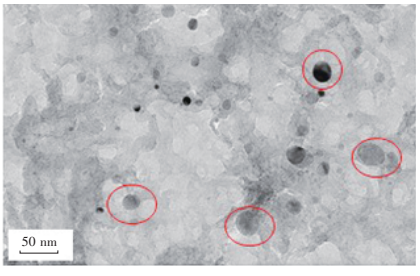


(b)烘烤态

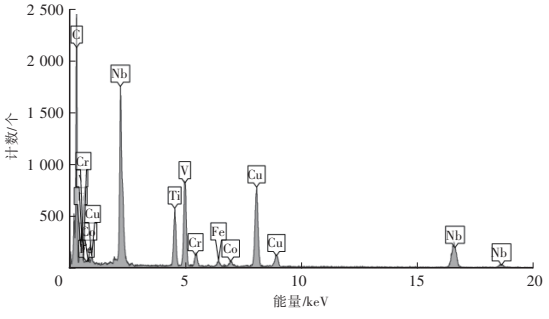
图6　试验钢烘烤前后组织形貌

图7所示为试验钢析出相的透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)图及能谱

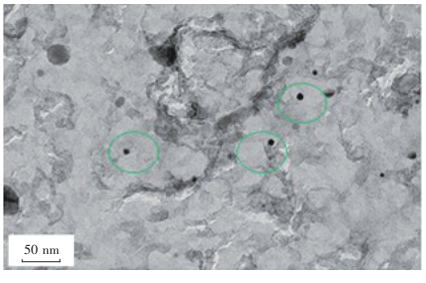
图。从图7a中可观察到平均尺寸约为10~40 nm的球形析出相，红色内为析出物相，通过图7b能谱分析可知，该析出相为(Nb,V)C，与以Nb为主的热成形钢析出相的形貌及尺寸相似。图7c绿圈内为以V元素为主的析出物形貌，平均尺寸约5~10 nm，可见V元素为主的析出物尺寸明显小于Nb元素为主的析出物，较小尺寸的第二相粒子具有更好的析出强化效果。由于Nb、V、Ti均属于过渡族金属，具有极其相似的物理性质和化学性质，它们的碳氮化合物结构相似，这些因素决定了其碳化物和氮化物能够互溶，从而形成多元的复杂析出物，且具有更高的热稳定性，而非简单的VC、NbC包裹TiN的析出。(Nb,V)C复合析出具有较好的细晶强化和析出强化效果，同时可提高V元素析出物的稳定性，可降低其在热冲压过程中的回溶，提高析出强化效果。此外，这些复合相的析出对于形成强氢陷阱、阻碍位错运动、提高热成形钢的强韧性起到重要作用。



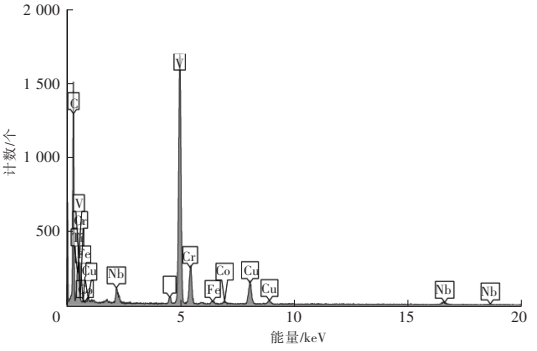
(a)(Nb,V)C析出相TEM图



(b)(Nb,V)C析出相能谱图



(c)V元素为主的析出相TEM图



(d)V元素为主的析出相能谱图

图7 试验钢析出相的TEM图及能谱图

5 结论

a. 基于Nb、V复合微合金化的34MnB5钢热成形后抗拉强度达到2 000 MPa，烘烤后屈服强度提高了9.3%，抗拉强度降低了7%，断后伸长率提高了10.2%。

b. 基于Nb、V复合微合金化的34MnB5热成形钢极限尖冷弯角度平均值为58.7°，烘烤后提升了6.1°；使用该材料试制的车门防撞梁具有良好的强韧性，满足应用要求。

c. 34MnB5NbV钢热成形后，析出相为(Nb,V)C复合析出相，该复合析出相具有较好的细晶强化和析出强化效果，增强了热成形钢的强韧性，使其综合力学性能指标更优。

参考文献：

[1] ZHANG W, XU J. Advanced Lightweight Materials for Automobiles: A Review[J]. Materials & Design, 2022, 221.

[2] JIN X J, GONG Y, HAN X H, et al. A Review of Current State and Prospect of the Manufacturing and Application of Advanced Hot Stamping Automobile Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 56(4): 411-428.

[3] 曹广祥, 常悦彤, 程效, 等. 1 800 MPa级冷轧热成形钢的应用研究[J]. 汽车工艺与材料, 2020(12): 1-4.

[4] NANDA T, SINGH V, SINGH V, et al. Third Generation of Advanced High-Strength Steels: Processing Routes and Properties[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications, 2019, 233(2): 209-238.

[5] WRÓBEL I, SKOWRONEK A, GRAJCR A. A Review on Hot Stamping of Advanced High-Strength Steels: Technological-Metallurgical Aspects and Numerical Simulation[J]. Symmetry-Basel, 2022, 14(5): 969.

[6] CAO Z H, WANG Z, YAN N, et al. Hydrogen Embrittlement Evaluation and Prediction in Press-Hardened Steels[J]. Steel Research International, 2023, 94(5): 99.

[7] CHANG Z Y, RUAN X Y, CHEN Z X, et al. Comparative Evaluation on Hydrogen Damage Behavior of Two Martensitic High Strength Press Hardening Steels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 375(61): 1060-1070.

[8] WANG Z, LU Q, CAO Z H, et al. Review on Hydrogen Embrittlement of Press-Hardened Steels for Automotive Applications[J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters, 2023, 35(7): 1123-1143.

[9] LIU S, AI S Y, LONG M J. Evolution of Microstructures and Mechanical Properties of Nb-V Alloyed Ultra-High Strength Hot Stamping Steel in Austenitizing Process[J]. Materials 2022, 15(22).

[10] GÓMEZ M, MEDINA S F. Role of Microalloying Elements in the Microstructure of Hot Rolled Steels[J]. International Journal of Materials Research, 2011, 102(10): 1197-1207.

[11] 朱赫男, 陈刚, 杨佳伟, 等. Ti微合金化对22MnB5热成形钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 125-129.

[12] 张翔宇, 张宇, 代春朵, 等. 铌钒钛微合金化对热成形钢组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(8): 14-20.

[13] 陈华, 丁灿灿, 胡斌, 等. 铌微合金化和淬火速率对热成形钢组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2024, 52(2): 146-154.

[14] CHEN W, GAO P, WANG S, et al. Strengthening Mechanisms of Nb and V Microalloying High Strength Hot-stamped Ssteel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 797.

[15] 易红亮, 常智渊, 才贺龙, 等. 热冲压成形钢的强度与塑性及断裂应变[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 429-443.

[16] 刘纲, 干勇, 刘崇, 等. 基于22MnB5钢的铌钒微合金化热成形钢的研发[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 109-113.

[17] 刘安民, 冯毅, 赵岩, 等. 铌钒微合金化对22MnB5热成形钢显微组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2019, 43(5): 34-37+53.

[18] 张剑, 刘崇, 刘勇, 等. 铌钒微合金化热成形钢的组织与性能[J]. 河北冶金, 2022(7): 18-22+38.

[19] 蔡忠贤, 高安阳, 沈慧, 等. 22MnB5NbV热成形钢氢损伤与氢聚集的可视化研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 44-51.

[20] HUANG W, GU H R, LIU Q H, et al. Suppression of Hydrogen-Induced Damage in 22MnB5 Hot Stamping Steel by Microalloying[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 256.

[21] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[22] Verband der Automobilindustrie. Plate Bending Test for Metallic Semi-Finished Materials: VDA 238-100[S]. Germany, 2010.

[23] 张叮, 秦兴国, 刘昱, 等. 涂装烘烤对2000MPa热成形钢关键性能的影响[C]. SAECCE2020中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2020: 278-282.

[24] JÄRVINEN H, HONKANEN M, PEURA P, et al. Effect of Paint Baking Treatment on the Properties of Press Hardened Boron Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018(252): 90-104.

[25] 田秀刚, 王朝, 孙旭, 等. 加热温度对34MnB5热成形钢组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2023: 48(3)135-139.

AT&M