

合金化对 QSTE460 热轧汽车板钢组织与扩孔性能的影响

张有飞¹, 吴汝飞², 严道聪², 谷海容¹, 斯庭智²

(1. 宝武重工有限公司科技创新部, 安徽 马鞍山 243000; 2. 安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 在现行热轧高强钢汽车板钢 SAPH370 的基础上, 通过提高 Mn 含量、降低 C 含量, 并引入 Ti 与 Nb 微合金元素, 研发新型双相钢 QSTE460。对比分析 2 种钢的显微组织及扩孔性能, 结合扫描电镜、透射电镜与电子背散射衍射等分析手段, 探讨合金化对 SAPH370 钢扩孔性能的影响机制。结果表明: SAPH370 的组织为铁素体 (F)、粒状贝氏体 (B) 及少量珠光体 (P), 而 QSTE460 中 Mn 含量的提高抑制了珠光体转变, 形成铁素体+粒状贝氏体的双相组织, 且其粒状贝氏体更细小、数量更多、形态更接近等轴状; 此外, QSTE460 中 C 含量的降低以及 (Ti, Nb)(C, N) 第二相的析出, 促使双相组织更适配、晶粒细化, 小角度晶界占比明显提高, 并形成有益的 {111}⟨110⟩ 结构。这些微观组织特征共同促使 QSTE460 具备更优异的扩孔性能, 其平均扩孔率较 SAPH370 提升 7%, 实现了强度与成形性的协同优化, 本研究为高性能汽车用钢的研发提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 合金化; 微合金化; 显微组织; 晶粒细化; 组织; 扩孔性能; 双相钢; 第二相析出

中图分类号: TG 142.1 文献标志码: A doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.25064



Influence of Alloying on the Microstructure and Hole Expansion Property of QSTE460 Hot-rolled Automobile Steel Sheet

ZHANG Youfei¹, WU Rufe², YAN Daocong², GU Hairong¹, SI Tingzhi²

(1. Technological innovation department, Baowu Heavy Industry Co., Ltd., Manshan 243000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Based on the existing hot rolling automobile frame steel SAPH370, a new dual-phase steel QSTE460 was designed by increasing the content of Mn, reducing the content of C, and introducing micro-alloying elements of Ti and Nb. The microstructure and hole expansion property of the two steels were compared and analyzed, and the effect of microalloying on hole expansion property of SAPH370 steel was investigated by means of scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and electron backscatter diffraction. The results indicate that the microstructure of SAPH370 is characterized by ferrite (F), granular bainite (B), and a small amount of pearlite (P). However, the increase of Mn content in QSTE460 suppresses the pearlite transformation, resulting in a dual-phase structure composed of ferrite and granular bainite. Moreover, the granular B in QSTE460 is finer, more abundant, and exhibits a morphology closer to equiaxed. Furthermore, the reduction in C content and the precipitation of (Ti, Nb)(C, N) secondary phase in QSTE460 contribute to improved phase compatibility, grain

收稿日期: 2025-06-06

基金项目: 安徽省科技重大专项 (202103a05020036); 马鞍山市科技创新攻坚计划 (XJCL202403)

作者简介: 张有飞 (1969—), 男, 安徽宣城人, 高级工程师, 主要研究方向为钢铁材料。

通信作者: 斯庭智 (1974—), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为钢铁材料。

引文格式: 张有飞, 吴汝飞, 严道聪, 等. 合金化对 QSTE460 热轧汽车板钢组织与扩孔性能的影响 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2025, 42(6):599-605, 633.

refinement, a notable increase in the proportion of low angle grain boundaries, and the formation of a favorable $\{111\} \langle 110 \rangle$ texture. These microstructural characteristics collectively lead to the superior hole expansion performance of QSTE460, with its average hole expansion rate being 7% higher than that of SAPH370. This achievement demonstrates a synergistic improvement in strength and formability, thereby providing a theoretical basis and technical support for the development of high-performance automotive steels.

Keywords: alloying; microalloying; microstructure; grain refinement; texture; hole expansion property; dual-phase steel; second phase precipitation

轻量化、节能环保、耐腐蚀、低噪声与安全舒适性已成为现代汽车工业的核心发展趋势,汽车制造业和钢铁行业为此共同致力于开发并应用兼具高强度和优良塑性变形能力的高性能钢板^[1]。以 SAPH370 为代表的铁素体 (F)/贝氏体 (B) 双相钢,凭借其优异的延展性、断裂韧性与综合成形性能,在高性能汽车板领域展现出广阔的应用前景^[2-3]。然而,在汽车板生产过程中,拉伸翻边作为关键成形工序,常因 SAPH370 钢扩孔性能不足,导致变形区边缘开裂,严重影响构件成品率^[4]。同时,随着汽车构件对材料强度要求的不断提高,370 MPa 级别的钢材已难以适应当前设计需求。因此,开发同时具备更高强度与优良成形性能的新型双相钢,对于推动汽车轻量化与安全性能提升具有重要意义。

为客观评价汽车板材的成形性能,扩孔率^[5]逐渐成为重要评价指标。研究^[6]表明,显微组织与晶粒尺寸对双相钢的扩孔性能具有重要影响。田雪洋^[7]研究铁素体/马氏体 (F/M) 和铁素体/贝氏体 (F/B) 2 种双相钢发现,相较于马氏体,贝氏体与铁素体均具备良好的协调变形能力,F/B 双相钢表现出更优的扩孔性能。此外研究^[8-9]发现,当 F 与 B 构成两相组织时,二者硬度差异较小,有助于提高钢材的延伸凸缘性能,从而有效抑制因两相硬度差异过大而引起的局部颈缩、裂纹萌生乃至断裂现象。为进一步提升 F 和 B 的强度与硬度,杨文卿^[10]通过调整汽车大梁钢 610L 中 Nb 与 Si 的含量并添加 Ti 元素,促进 Nb/Ti 碳化物析出,形成规则球形第二相粒子,实现细晶强化与弥散强化,在提高材料强度和硬度的同时未损害其塑韧性,并可有效阻碍裂纹扩展。此外,研究^[11-13]进一步表明,在以铁素体为软质基体的组织中,弥散分布的硬质第二相能够在维持

强度的前提下进一步提升材料的塑韧性。由此可见,通过合金化手段调控组织结构已成为开发高性能汽车用钢的主要途径。为提升 SAPH370 双相钢的强度,研究^[14-15]发现,其组织中大量固溶于铁素体基体中的 C 原子会强烈阻碍位错运动,抑制有利结构形成,导致材料塑韧性显著降低;此外,固溶 C 原子的不均匀分布易引发应力集中,促进疲劳裂纹早期萌生。为此,马钢公司开发出一种低碳热轧汽车板合金钢 QSTE460,该钢种通过降低 C 含量、提高 Mn 含量并添加 Ti/Nb 微合金元素,有效弥补了降碳引起的强度损失,将屈服强度提升至 460 MPa 级别。尽管强度提升会导致扩孔性能的下降,但 QSTE460 在实现更高强度的同时,其成形性能也得到进一步改善。基于此,本文采用透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM)、扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)、电子背散射衍射 (electron back scatter diffraction, EBSD) 等表征手段,研究合金化与显微组织对 QSTE460 热轧汽车板扩孔性能的影响机制,以期开发兼具高强度与优良成形性能的汽车用钢提供理论依据与技术途径。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

基于马钢现行热轧高强汽车板钢 SAPH370,通过调整 C 与 Mn 元素含量并添加 Ti 与 Nb 元素,设计开发出一种新型低碳合金钢 QSTE460。其生产工艺流程包括铁水预处理→转炉冶炼→LF 精炼→连铸→热轧→酸洗。2 种钢的合金成分见表 1。采用线切割技术分别从 SAPH370 和 QSTE460 板材上截取用于显微组织观察、EBSD 表征及扩孔性能测试的试样若干。

表 1 试验钢中合金元素成分

w/%

Tab. 1 Chemical composition of alloying elements in the experimental steel

w/%

钢种	C	Si	Mn	S	P	Als	Ti	Nb
SAPH370	0.08	0.02	0.44	0.013	0.000 5	0.046	—	—
QSTE460	0.07	0.02	1.10	0.013	0.000 4	0.040	0.03	0.05

1.2 试验方法

对 SAPH370 和 QSTE460 的金相试样依次进行打磨、抛光至镜面后,使用质量分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 6~8 s。随后采用 Tescan MIRA3 XMU 型扫描电子显微镜观察其显微组织。为进行透射电镜(TEM)分析,将观测后的试样切割并机械减薄,采用冲孔机制成直径 3 mm 的圆片,继续打磨抛光至厚度约 40 μm 。最后,使用 GATAN 691 型离子减薄仪对该圆片进行最终减薄,通过 JEM-2100F 透射电子显微镜观察其微观结构特征。

用于 EBSD 分析的 SAPH370 和 QSTE460 试样均被加工为 10 mm \times 10 mm \times 5 mm 规格。试样经机械打磨平整后,采用 Struers LectroPol-4 自动磨抛机配合硅溶胶悬浮溶液进行抛光,随后使用 Struers LectroPol-5 电解抛光机及 A-A 电解液进行最终电解抛光。最终,利用 Oxford HKL Channel 5 EBSD 系统完成晶体学取向与微观组织结构的采集与分析。

依据 GB/T 15825.4—2008《金属薄板成形性能与试验方法》^[16]进行扩孔试验,首先在试样中心预制圆孔,并将其安装于模具上,确保孔中心与圆锥凸模轴线对中、试样平面与轴线垂直且冲孔毛刺侧朝向凹模。随后,对试样施加不低于 20 kN 的压边力,以 130 mm/min 的速度垂直驱动凸模压入预制孔。试验过程中持续监测试样状态,当出现初期裂纹时立即减缓凸模下行速度,并在产生穿透性裂纹时终止试验。

2 结果与分析

2.1 合金化对显微组织的影响

图 1 为 SAPH370 和 QSTE460 试样的 SEM 组织形貌。对比图 1(a) 与 (c) 可发现:2 种材料的组织均以多边形 F 和沿其晶界分布的粒状 B 为主,但 QSTE460 的晶粒尺寸明显小于 SAPH370,表明 Ti 与 Nb 微合金化有效发挥了晶粒细化作用。进一步观察图 1(b) 与 (d) 的高倍 SEM 图像显示:SAPH370 组织中存在少量层片状珠光体(P),整体为 F+粒状 B+少量 P 的混合组织。珠光体中粗大的渗碳体会降低材料的塑韧性,且其与 F 之间显著的塑性差异在受力时易引发变形不协调性,促进裂纹形成,从而对成形性能产生不利影响^[17]。相比之下,QSTE460 组织中未观察到珠光体,其组织为 F+粒状 B,这归因于 Mn 含量提高有效抑制了珠光体转变并促进了贝氏体形成。此外,QSTE460 组织中的粒状 B 更为细小、数量更多、形态更接近等轴状。一方面,F 与

B 的硬度差异较小,有助于缓解因两相性能失配导致的局部颈缩与裂纹萌生^[18];另一方面,粒状 B 实质为由马氏体/奥氏体(M/A 岛)组成的复相组织^[19-20],其中韧性较好的残余 A 能有效抑制裂纹的萌生与扩展,因此粒状 B 越细小、分布越密集,越有利于提升材料的深冲性能。

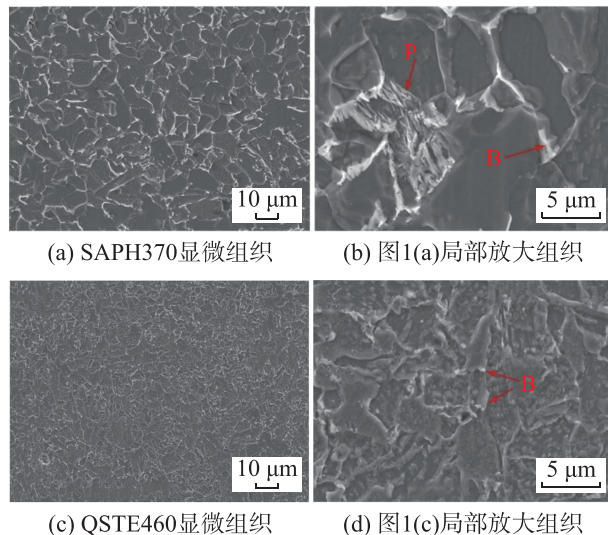


图1 SAPH370 与 QSTE460 试样的显微组织形貌

Fig. 1 Microstructural morphologies of the SAPH370 and QSTE460 samples

图 2 进一步展示了 SAPH370 和 QSTE460 试样的 TEM 显微结构。从图 2(a) 可观察到 SAPH370 组织中存在典型的 P 区域,结合图 2(b) 对应的衍射花样分析,确认其由片状 F 与渗碳体(Fe_3C)交替排列构成,该结果与前述 SEM 观察一致。在 QSTE460 试样中未观察到 P,但从图 2(c) 和 (e) 可见 F 基体内分布着大量尺寸为 20~30 nm 的方形、球形及椭圆形的第二相析出物。根据图 2(d) 和 (f) 中析出物对应的衍射花样分析,方形颗粒为 TiC,球形颗粒为 NbC。研究^[21]表明,由于 Ti 和 Nb 的碳氮化物晶格参数接近,在常温下可形成互溶结构,因此通过常规能谱分析难以区分 Ti(C, N) 和 Nb(C, N),两者通常以复合析出粒子 (Ti, Nb)(C, N) 的形式存在。这表明在 QSTE460 的生产工艺中,组织中形成了 Ti/Nb 的碳化物、氮化物或复合碳氮化物析出。这些纳米级第二相粒子倾向于在奥氏体晶界、位错线等储存能较高的区域析出,对晶界产生显著的拖曳作用,能有效抑制晶粒粗化^[22-23]。此外,研究表明 Ti 与 Nb 的添加可降低合金的再结晶温度,从而促进细小晶粒的形成^[24]。值得注意的是,在 QSTE460 试样中还观察到位错缠结结构,该特征有利于组织的进一步细化。

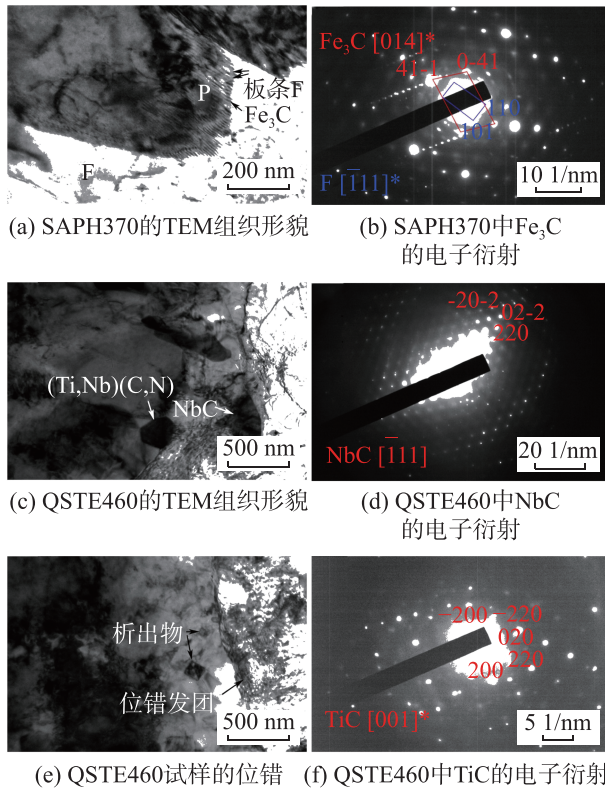


图2 SAPH370和QSTE460试样的TEM组织形貌与对应的选取电子衍射

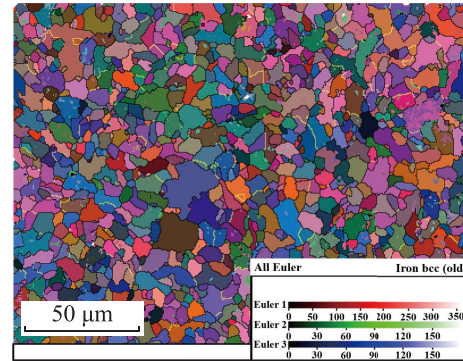
Fig. 2 TEM images and the corresponding SAD (selected area electron diffraction) patterns of the SAPH370 and QSTE samples

综上所述:提高Mn含量使QSTE460在F基体中形成了更细小、数量更多且形貌更接近等轴状的粒状B组织;同时Ti与Nb微合金化元素的添加既细化了晶粒,又通过纳米第二相析出实现了弥散强化,这些微观组织的协同优化共同对材料的塑韧性产生了显著的积极影响。

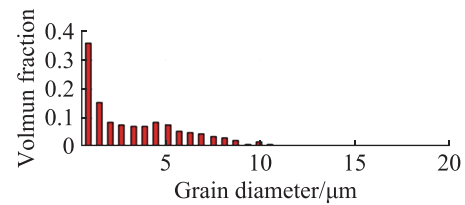
2.2 合金化对晶粒尺寸分布与晶粒取向的影响

除晶粒尺寸外,晶粒尺寸分布与晶粒取向同样是影响钢板扩孔性能的关键因素。为此,对SAPH370和QSTE460试样进行EBSD表征分析。图3为SAPH370试样的EBSD分析结果。图3(a)中未出现大面积的单一色区,且颜色分布较为分散。初步判断SAPH370热轧试样未形成明显的择优取向,不同晶粒的取向分布相对均匀^[25]。进一步分析图3(b)可知,SAPH370的晶粒尺寸主要集中在1~8 μm范围,平均晶粒尺寸为4.9 μm,标准偏差为2.8。图3(c)进一步显示,试样中铁素体晶界以大角度(>15°)为主,且集中分布于30°~60°区间。为准确评估晶粒取向,进一步分析SAPH370试样平行于法向(normal direction, ND)和轧向(rolling direction, RD)的EBSD取向,结果如图4。由图4可发现,无论是法向还是

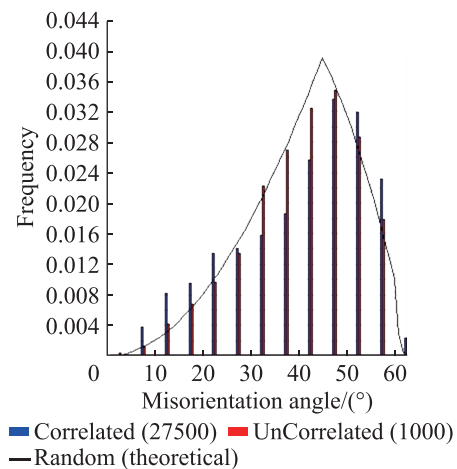
轧向,晶粒取向均较为均匀,仅法向存在略多晶粒取向 $\langle 111 \rangle // ND$,轧向中 $\langle 101 \rangle // RD$ 取向的晶粒略多于其他方向,整体上SAPH370试样未形成明显织构,该结论与图3(a)的分析结果一致。



(a) EBSD全欧拉角图



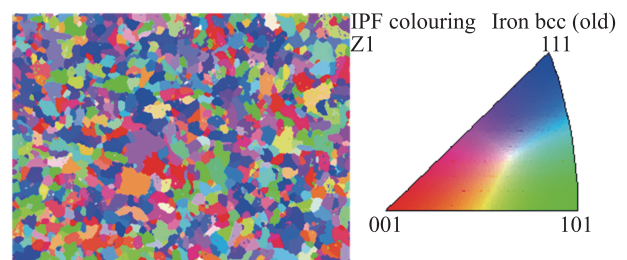
(b) 晶粒尺寸分布



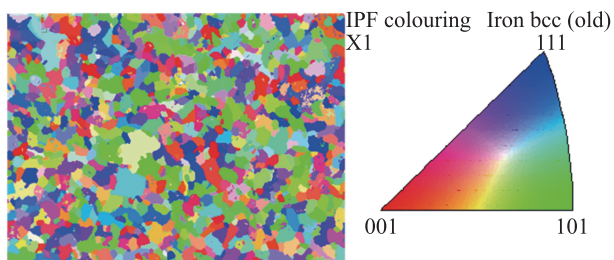
(c) 晶粒取向差分布

图3 SAPH370试样的EBSD全欧拉角、晶粒尺寸与晶粒取向差分布

Fig. 3 EBSD analysis of SAPH370 specimen: Euler angle map, grain size distribution, and grain misorientation distribution



(a) //ND方向的EBSD取向成像

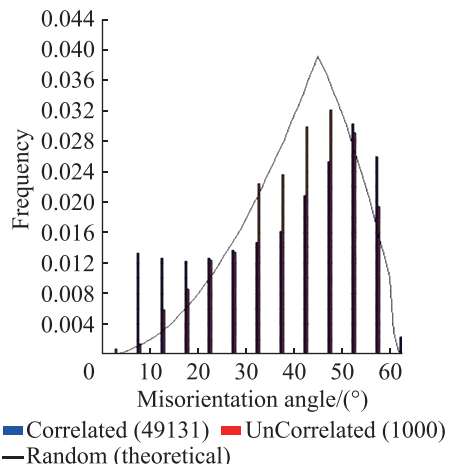


(b) //RD方向的EBSD取向成像

图4 SAPH370 试样//ND与RD方向的EBSD取向成像

Fig. 4 EBSD orientation images at ND and RD directions of the SAPH370 sample

图 5 展示了 QSTE460 试样的 EBSD 分析结果, 与 SAPH370 相比呈现显著差异: 其全欧拉角图中出现部分局部颜色趋于一致的区域, 表明晶粒取向趋于集中, 反映出热轧过程中已形成一定程度的织构; 图 5(b) 显示晶粒尺寸主要分布于 0.5~4.0 μm 范围, 铁素体平均晶粒尺寸为 2.4 μm, 较 SAPH370 细化达 51%, 证明 Ti 与 Nb 微合金化在有效细化晶粒组织的同时优化了再结晶过程中的晶粒尺寸分布, 有助于避免混晶结构对成形性能的不利影响; 进一步对比图 3(c) 和图 5(c) 可见, QSTE460 中小角度晶界 ($\leq 15^\circ$) 比例显著高于 SAPH370, 表明其组织中形成大量亚结构。这些尺寸均匀的细化晶粒与丰富的亚结构不仅有助于提高材料强度, 也对改善其深冲性能具有积极作用。

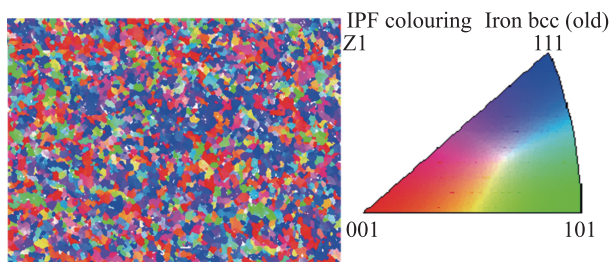


(c) 晶粒取向差分布

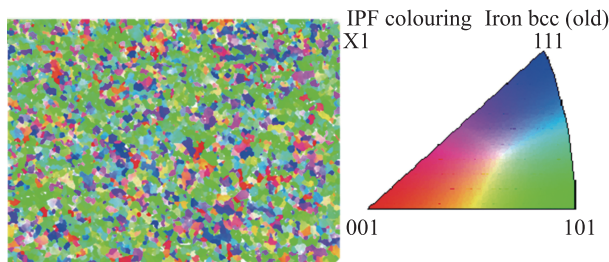
图5 QSTE460 试样的 EBSD 全欧拉角、晶粒尺寸与晶粒取向差分布

Fig. 5 EBSD analysis of QSTE460 specimen: full Euler angle, grain size distribution, and grain orientation difference distribution

图 6 进一步展示了 QSTE460 试样在法向和轧向的 EBSD 结果。



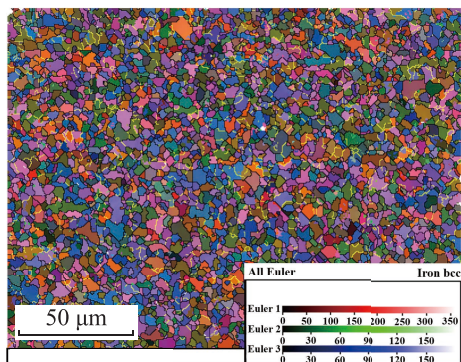
(a) //ND方向的EBSD取向成像



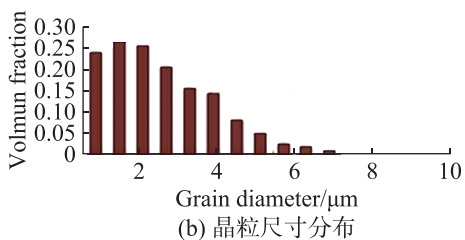
(b) //RD方向的EBSD取向成像

图6 QSTE460 试样//ND和//RD方向的EBSD取向成像
Fig. 6 EBSD orientation images at //ND and //RD directions of the QSTE460 sample

从图 6(a) 和 (b) 可发现, 部分晶粒呈现 $\langle 111 \rangle$ //ND 取向, 而绝大部分晶粒呈现 $\langle 101 \rangle$ //RD 取向, 表明在立方晶系中 $\{111\}$ 晶面平行于轧制面, 热轧钢板中形成了较强的 $\{111\} \langle 110 \rangle$ γ 纤维织构^[25]。研究表明, 热轧汽车用钢中易形成 $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 三类 γ 纤维织构, 此类织构有利于提高汽车板用钢的扩孔和深冲性能; 但随着钢中固溶 C 含量增加, $\{111\}$ 织构显著减弱而 $\{001\}$ 织构增强, 导致



(a) EBSD全欧拉角图



(b) 晶粒尺寸分布

塑性应变比下降,板材深冲性能明显恶化^[14]。Ushioda等^[15]对微量固溶C影响再结晶动力学研究表明,固溶C的增加会提高再结晶形核率而保持晶粒长大速度不变,从而促进非{111}取向晶粒形核,因此间隙固溶原子对深冲性能具有损害作用。在本文研究的QSTE460钢中,C质量分数由SAPH370的0.08%降至0.07%,同时添加了强碳氮化物形成元素的Ti与Nb,进一步降低了铁素体基体中间隙固溶C含量。此外,研究^[26-27]发现Mn元素可抑制热轧过程中晶粒异常长大,并促进变形奥氏体在冷却过程中形成更细小的铁素体晶粒。这些细小铁素体在生长过程中更易受热轧变形应力诱导,形成{111}晶面平行于轧制面的择优取向,从而提高{111}〈110〉织构的晶粒比例。以上机制共同解释了QSTE460热轧高强钢板中形成强{111}〈110〉织构的原因。

2.3 合金化对材料扩孔性能的影响

板材的扩孔率是评价汽车用钢冲压成形能力的通用指标。图7为SAPH370和QSTE460试样扩孔后的形貌特征。

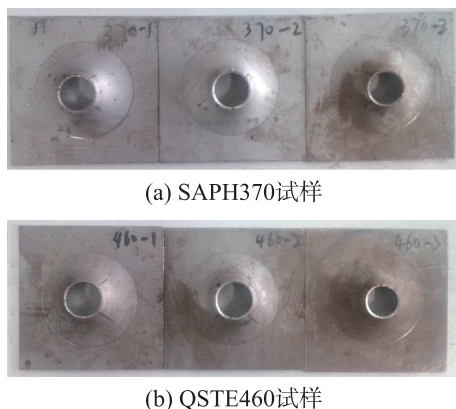


图7 SAPH370和QSTE460TM试样扩孔后的形貌

Fig. 7 Microstructure of the hole-expanded SAPH370 and QSTE460TM specimens

由图7可见,2种试样变形唇外侧均出现一个或多个裂纹,这主要源于该区域承受了较大的拉应力作用;而内侧同时受到凸模与板材的压应力作用,因而不产生开裂。经3次重复扩孔试验测定,SAPH370的扩孔开裂孔径分别为20.84,21.30,19.66 mm,平均孔径为20.60 mm;而QSTE460的对应孔径分别为21.88,22.10,19.94 mm,平均孔径为21.30 mm。试验结果表明,合金化处理有效提高了QSTE460的扩孔开裂孔径。扩孔率的计算公式如下:

$$\lambda = (D_f - D_0) / D_0 \quad (1)$$

式中: D_0 为初始直径; D_f 为扩孔终止时的孔径。

根据式(1)进一步计算得出,SAPH370与QSTE460的平均扩孔率分别为106%和113%。一般认为扩孔

率超过80%即表明材料具备良好的扩孔性能,本研究中2种试验钢均表现出较好的塑性协调性与性能稳定性,而QSTE460在通过合金化提升强度的同时,其成形性能也得到了有效改善。研究^[28-29]表明,扩孔性能的差异受组织组成、析出相与晶粒取向等多因素共同影响。在SAPH370成分基础上,通过调整Mn含量并添加Ti与Nb微合金元素开发的QSTE460热轧汽车板钢,在提高强度的同时显著提升了扩孔率与成形性能。

通过上述研究,QSTE460的性能改善机制可归纳为三方面:首先,将钢中C质量分数降至0.07%,有效降低了固溶间隙原子含量,促进热轧板材中形成有利的{111}〈110〉 γ 织构;其次,提高Mn含量抑制了P转变,促进粒状B形成,获得F+粒状B的双相组织,且获得的B更细小、更接近粒状、数量更多;最后,微合金元素Ti与Nb的加入不仅细化了晶粒,通过析出纳米第二相强化铁素体基体,使双相组织更适配,同时增加亚结构单元和小角度晶界数量,有利于塑性变形能力的改善。这些因素的协同作用共同促使QSTE460在提高强度的同时实现了扩孔性能的显著提升。

3 结论

在热轧高强钢汽车板钢SAPH370的基础上,通过提高Mn含量、降低C含量并引入Ti与Nb微合金元素,成功研发出新型双相钢QSTE460。通过对比分析2种双相钢的显微组织、晶粒尺寸与取向特征,探讨合金化对QSTE460扩孔性能的影响机制,得到如下主要结论:

1) SAPH370试样组织为铁素体(F)+粒状贝氏体(B)+少量珠光体(P)。Mn含量的提高抑制了QSTE460组织中P的转变,使其为F+粒状B的双相组织。此外,Ti/Nb合金元素的引入促使材料析出TiC,NbC和(Nb,Ti)(C,N)的第二相粒子,有效细化了晶粒组织,其中F的平均晶粒尺寸为2.4 μm ,较SAPH370减小了51%。

2) QSTE460试样中的小角度晶界和亚结构单元较SAPH370显著增加,并形成了较强的{111}〈110〉织构。这主要与Ti/Nb元素的加入降低了QSTE460钢F基体中的间隙固溶C含量有关。

3) 基体C含量的降低与第二相粒子的析出,共同促使QSTE460双相组织更加协调匹配,并形成了有益的{111}〈110〉织构。这是QSTE460具有优良扩孔性能的主要原因,其平均扩孔率达到113%,较SAPH370提升7%。

参考文献:

- [1] LI H J, LI T X, LI C F, et al. Improvement of longitudinal performance uniformity of hot-rolled coils for cold-rolled DP980 steel[J]. *Metals*, 2020, 10(3):382.
- [2] BADKOOBEH F, MOSTAAN H, RAFIEI M, et al. Microstructural characteristics and strengthening mechanisms of ferritic–martensitic dual-phase steels: a review[J]. *Metals*, 2022, 12(1):101.
- [3] THAKUR A K, KUMAR R R, BANSAL G K, et al. Processing–microstructure–property correlation for producing stretch-flangeable grade dual-phase steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(6):4300–4317.
- [4] 叶校璞, 刘杰, 温欣, 等. 不同铁素体形态的FB双相钢的扩孔性能和原位拉伸实验研究[J]. *钢铁研究学报*, 2025, 37(2):198–208.
- YE X Y, LIU J, WEN X, et al. Hole-expansion properties and SEM in situ tensile test of FB dual phase steels with different ferrite morphologies[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2025, 37(2):198–208.
- [5] PAUL S K. A critical review on hole expansion ratio[J]. *Materialia*, 2020, 9:100566.
- [6] GRAUX A, CAZOTTES S, DE CASTRO D, et al. Design and development of complex phase steels with improved combination of strength and stretch-flangeability[J]. *Metals*, 2020, 10(6):824.
- [7] 田雪洋. 微合金化高扩孔钢组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- TIAN X Y. Study on Microstructure and Properties of Microalloyed High Hole Expansion Steel [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.
- [8] 梁文, 吴润, 胡俊, 等. 显微组织对FB60钢板延伸凸缘性能的影响[J]. *上海金属*, 2018, 40(4):18–24.
- LIANG W, WU R, HU J, et al. Effect of microstructure on strength-flange-formability of FB60 steel plate[J]. *Shanghai Metals*, 2018, 40(4):18–24.
- [9] SHAO Y L, ZHOU X G, MAO Y Q, et al. Effect of bainite microstructure control on the deformation behavior of ferrite/bainite dual-phase steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 943:148724.
- [10] 杨文卿. 合金元素和TMCP工艺对汽车大梁用钢组织性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- YANG W Q. Effects of Alloying Elements and TMCP Process on Microstructure and Properties of Automobile Beam Steel [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.
- [11] 李鑫, 史晓斌, 王永强, 等. 中厚板生产研发及其低温冲击韧性研究概况[J/OL]. *特殊钢*, (2025–09–19). <https://link.cnki.net/doi/10.20057/j.1003-8620.2025-00176>.
- LI X, SHI X B, WANG Y Q, et al. Overview of production and research of medium and heavy plates and low temperature impact toughness[J/OL]. *Special Steel*, (2025–09–19). <https://link.cnki.net/doi/10.20057/j.1003-8620.2025-00176>.
- [12] 厉文墨, 刘芳芳, 王佳骥, 等. EH40船板钢奥氏体晶粒长大及连续冷却相变规律[J]. *金属热处理*, 2023, 48(12):189–193.
- LI W M, LIU F F, WANG J J, et al. Austenite grain growth and continuous cooling phase transformation of EH40 ship plate steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(12):189–193.
- [13] SAEIDI N, EKRAMI A. Impact properties of tempered bainite–ferrite dual phase steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(21/22):5575–5581.
- [14] 康永林. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- KANG Y L. Microstructure and Properties Control of Thin Slab Casting and Rolling Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [15] USHIODA K, HUTCHINSON W B, AGREN J, et al. Investigation of structure and texture development during annealing of low-carbon steel[J]. *Materials Science and Technology*, 1986, 2(8):807–815.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属薄板成形性能与试验方法第4部分: 扩孔试验: GB/T 15825.4—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Sheet Metal Formability and Test methods Part 4: Hole Expanding Test: GB/T 15825.4—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [17] 曹洋洋, 李锋, 陈立佳, 等. 退火处理对CP780钢组织和拉伸行为的影响[J]. *金属热处理*, 2024, 49(11):104–111.
- CAO Y Y, LI F, CHEN L J, et al. Effect of annealing on microstructure and tensile behaviors of CP780 steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(11):104–111.
- [18] 董孝南. 6061-T6铝合金双脉冲MIG焊轧复合处理组织性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- DONG X N. Study on Microstructure and Properties of 6061-T6 Aluminum Alloy by Double-pulse MIG Welding-rolling Composite Treatment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.
- [19] 邹英, 刘华赛, 郭爱民, 等. 卷取温度对含Nb热基镀锌高扩孔钢组织性能的影响[J]. *轧钢*, 2025, 42(4):65–70.
- ZOU Y, LIU H S, GUO A M, et al. Effect of coiling temperature on microstructure and properties of Nb containing hot-rolled galvanized high hole expansion steel[J]. *Steel Rolling*, 2025, 42(4):65–70.
- [20] 姜颖, 徐华, 戴林. 薄规格Q460ME钢板低温冲击性能不合格原因分析与补救措施[J]. *甘肃冶金*, 2025, 47(4):110–112.
- JIANG Y, XU H, DAI L. Analysis and remedial measures of unqualified low temperature impact performance of thin Q460ME steel plate[J]. *Gansu Metallurgy*, 2025, 47(4):110–112.
- [21] 杨健, 李婷婷, 徐龙云, 等. Mg脱氧的氧化物冶金技术[C]//第十四届中国钢铁年会论文集—4. 炼钢与连铸. 重庆: 中国金属学会, 2023:235–243.
- YANG J, LI T T, XU L Y, et al. Oxide metallurgy technology by Mg deoxidation [C] // Proceedings of the 14th China Steel Annual Conference—4. Steelmaking and Continuous Casting. Chongqing: The Chinese Society for Metals (CSM), 2023:235–243.
- [22] 谷海容, 卢茜倩, 刘永刚, 等. 微合金元素Nb、V对热成形钢组织及氢脆敏感性影响[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(4):295–300.
- GU H R, LU Q Q, LIU Y G, et al. Influence of microalloying elements Nb and V on microstructure and hydrogen embrittlement sensitivity of hot stamping steel[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2018, 35(4):295–300.