

温轧 TWIP 钢/高碳钢组织及力学性能研究

曹梅青¹, 温将云¹, 陈鹏涛¹, 谢 鲲¹, 黄亚杰², 谭云亮³

(1. 山东科技大学 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东能源机械集团有限公司, 山东 泰安 271021;

3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要:采用热轧-温轧工艺制备了孪生诱导塑性(TWIP)钢和高碳钢双层复合材料,通过金相显微镜、扫描电镜、电子探针等观察双层钢的显微组织与界面元素分布,发现两种材料界面结合良好、无缝隙和孔洞,Mn元素由TWIP钢侧向高碳钢侧扩散。复合材料热轧后进行铅浴处理,高碳钢区域形成细片状的索氏体组织,索氏体片层间距随铅浴温度升高而增大。520℃铅浴时平均片层间距为202nm,抗拉强度为1592MPa,延伸率9.9%,材料的综合力学性能较好。铅浴处理后的双层钢在300℃进行多道次温轧,进一步细化晶粒,产生位错增殖,抗拉强度随温轧压下量增大而增大,延伸率有所降低。轧制压下量达到70%时,高碳钢侧的索氏体片层间距进一步减小,TWIP钢侧发生剧烈塑性变形,晶粒沿轧制方向拉长。

关键词:温轧;TWIP钢;高碳钢;铅浴处理;双层复合材料

中图分类号:TG335.1;TG335.81

文献标志码:A

Microstructure and mechanical properties of warm-rolled TWIP/HC steel

CAO Meiqing¹, WEN Jiangyun¹, CHEN Pengtao¹, XIE Kun¹, HUANG Yajie², TAN Yunliang³

(1. College of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao

266590, China; 2. Shandong Energy Machinery Group Co. Ltd, Taian 271021, China;

3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The hot and warm rolling process was adopted to prepare the bi-layered composites of twinning-induced plasticity(TWIP) steel and high carbon (HC) steel, whose microstructure and distribution of interface elements were observed with the help of the metallographic microscope, scanning electron microscope, and electron microprobe. The interface was well bonded without cracks and holes, and the Mn element diffused from the TWIP steel area to the HC steel area. After hot rolling, the bi-layered composites were treated with lead bath. Fine lamellar sorbite was observed in HC steel area and the interlamellar spacing of sorbite increased with the increase of lead bath temperature. When the temperature was 520℃, the average interlamellar spacing was 202 nm and the comprehensive mechanical properties of the material were better, with the tensile strength being 1 592 MPa and the elongation being 9.9%. After lead bathing treatment, the bi-layered steel was subjected to multi-pass warm rolling at 300℃. The grains were further refined and dislocation accumulation was formed. The tensile strength increased with the increase of warm rolling reduction, and the elongation decreased. When the rolling reduction reached 70%, the interlamellar spacing of sorbite in the HC steel area further decreased; severe plastic deformation occurred in the TWIP steel area; and the grains were elongated along the rolling direction.

Key words: warm rolling; TWIP steel; high carbon steel; lead bath; bi-layered materials

收稿日期:2022-06-15

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2018MEM008)

作者简介:曹梅青(1977—),女,河北宁晋人,副教授,博士,主要从事金属材料表面改性及金属基复合材料研究。

谢 鲲(1970—),男,陕西西安人,教授,博士,主要从事金属强化等方面的研究,本文通信作者。

E-mail: xie.kun@126.com

巷道支护是保证巷道稳定的重要技术措施之一^[1],但随着我国煤矿开采深度的增加,原有巷道支护材料已无法满足使用要求,因此研制新型高强韧材料对煤矿生产具有重要意义。孪生诱导塑性(twinning-induced plasticity, TWIP)钢有良好的强塑性组合和优异的均匀变形能力^[2],通过轧制可以进一步提升其抗拉强度并且保持较好的延伸率^[3],能满足矿用支护材料的使用要求,但高生产成本和低屈服强度限制了其应用。高碳(high carbon, HC)钢具有较高的抗拉强度和较低的生产成本,但其塑性变形能力低。通过热轧-铅浴-温轧工艺制备 TWIP 钢/高碳钢复合材料,可使复合材料兼具高的抗拉强度,较好的塑性变形能力及较低成本。

层状金属基复合材料能够利用界面提升其损伤容限和韧性^[4]。这种复合材料变形时,应变在厚度方向可沿软相和硬相独立分配。利用每种层状材料的优点,可提升复合材料的性能^[5]。Park 等^[6]通过热轧成功制备了 TWIP 钢和低碳钢的层状复合材料,其抗拉强度达到 878 MPa,延伸率 54.3%;Yu 等^[7]通过热轧、冷轧、时效等工艺制造出多层 TWIP 钢与马氏体时效钢材料,抗拉强度 1 527 MPa,延伸率 21.5%。目前关于 TWIP 钢复合材料的研究,绝大多数都是针对汽车领域用钢^[8],而矿用支护材料领域中的层状复合材料却鲜有报道。

本研究通过热轧使 TWIP 钢与高碳钢结合形成 TWIP/HC 双层复合材料,对复合材料进行不同温度的铅浴处理,提升高碳钢力学性能^[9],通过对层状复合材料进行多道次叠轧,提高板材之间的结合强度,进而提高复合材料的综合力学性能^[10]。

1 实验材料及方法

使用的 TWIP 钢与 1080 高碳钢成分见表 1,将两种钢材均切割成 20 mm×60 mm×11 mm 的板材。对两种钢板表面进行除锈、研磨处理,使用丙酮清洗。将单块 TWIP 钢和单块高碳钢堆叠,使用氩弧焊在钢板接触边缘焊接一圈,称其为双层钢,高度为 22 mm。

表 1 TWIP 钢、1080 高碳钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of TWIP steel and 1080 high carbon steel %

材料	Mn	C	Al	S	P	Si	Fe
TWIP 钢	19.0	0.6	1.3	<0.010	<0.017	0.5	余量
高碳钢	0.3	0.8	—	0.005	0.005	0.3	余量

双层钢首先在 1 100 °C 保温 1 h 作均匀化处理,而后在 900~1 100 °C 进行多道次热轧至 6 mm,空冷至室温;将热轧后的双层钢再次加热到 850 °C 保温 15 min,分别浸没在 500、520 和 550 °C 的铅液中保温 120 s 后取出空冷,清理表面残留的铅液。将热轧后 3 种温度铅浴后的材料和未铅浴的材料在 300 °C 保温 30 min,进行温轧,轧制总压下量为 50%;为探究不同温轧压下量对材料组织性能的影响,将 520 °C 铅浴后的材料分别进行压下量为 40%、50%、60%、70%的温轧。温轧单道次轧制压下量为 5%,每道次轧制后将双层钢重新放入 300 °C 的热处理炉中保温 5 min。双层钢的制造示意过程见图 1。

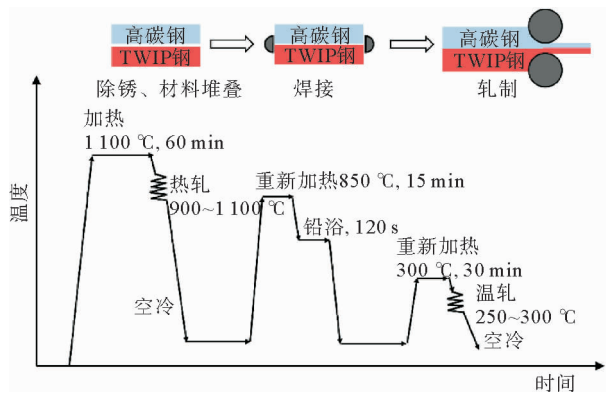


图 1 实验流程图

Fig. 1 Experimental flow diagram

从双层钢上切取 5 mm×8 mm×2.4 mm 的金相试样,用砂纸和抛光机打磨抛光。分别使用 FeCl₃·H₂O 溶液和 4% 的硝酸酒精溶液对 TWIP 钢侧和高碳钢侧的组织进行腐蚀观察,采用德国 ZEISS 公司生产的 Axio Lab A1 光学显微镜(optical microscopy, OM)观察复合材料界面处的微观组织;用 JXA-8230 型电子探针显微镜(electron probe microanalyzer, EPMA)检测双层钢界面处元素扩散;用 Tecnai EC-

NAI G2-20 型透射电镜(transmission electron microscope, TEM)对 TWIP/HC 钢的微观组织特征进行分析,TEM 试样用 5%的高氯酸和 95%的乙醇溶液在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、15 V 的电压下进行双喷减薄;用 Nova Nano SEM450 高分辨扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察复合材料的界面微观组织、界面结合情况及珠光体片层间距。参照 GB/T 228—2010 标准制备拉伸试样(见图 2),标距长 31 mm,宽度 12.5 mm,厚度 2.4 mm,使用标距为 25 mm 的引伸计在 WDW-200e 型电子万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 2 mm/min,拉伸方向为复合材料轧制方向。采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察断裂后拉伸样的断口特征。

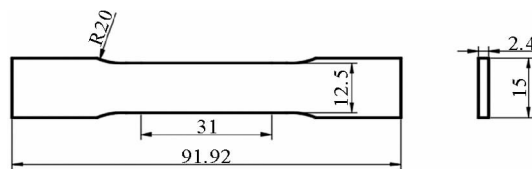


图 2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Dimensional drawing of tensile specimen

2 结果与讨论

2.1 微观组织

图 3 为复合材料界面显微组织及 Mn 元素分布图,可见铅浴及温轧后复合材料界面处无明显的气孔和夹杂物。由 Mn 元素线扫描图可以看出, TWIP 钢侧的 Mn 元素向高碳钢区域扩散,说明 TWIP 钢与高碳钢之间结合良好,良好的界面使层状材料在界面处诱导应变梯度,积累必要几何位错,提升材料的力学性能^[11]。双层钢 520 $^{\circ}\text{C}$ 铅浴后 TWIP 区域有少量孪晶, HC 区域形成细珠光体组织。温轧后, TWIP 钢区域沿轧制方向形成大量的变形孪晶,高碳钢区域沿晶界处析出少量网状二次渗碳体。

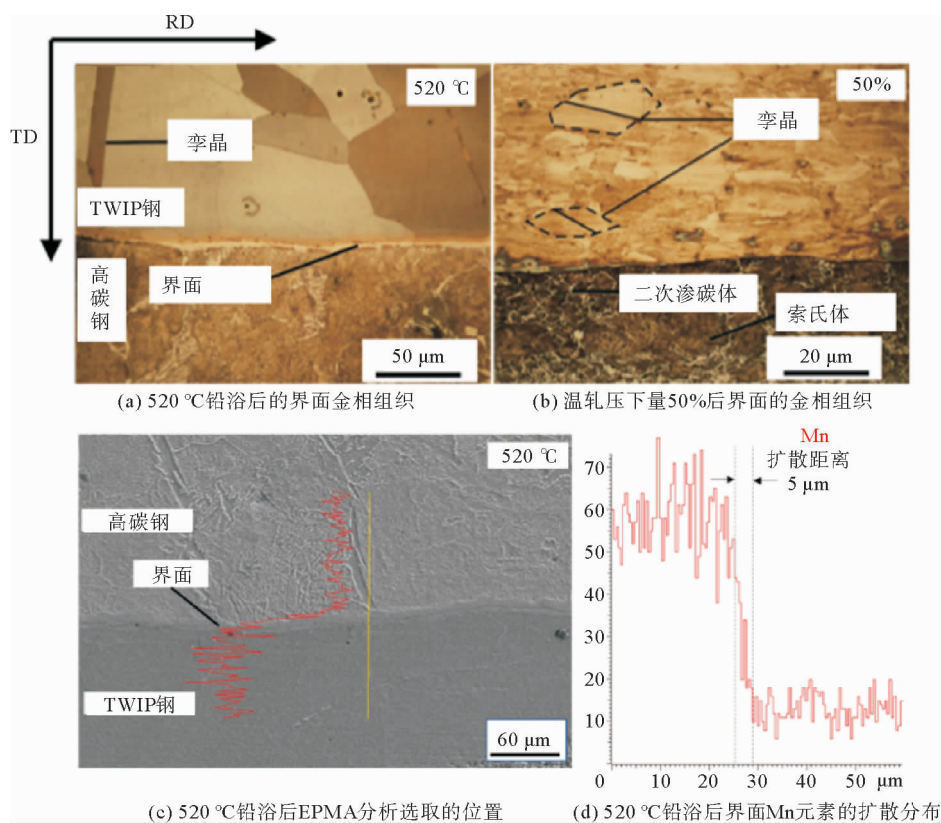
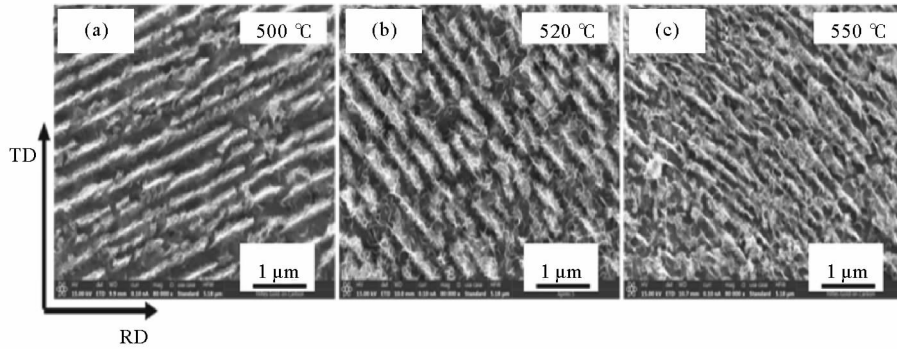


图 3 复合材料界面显微组织及 Mn 元素分布

Fig. 3 Microstructure of interface and the diffusion distribution of Mn element

图 4 为 TWIP/HC 双层钢在不同温度铅浴后经过 50%压下率温轧后高碳钢区域的显微组织(索氏体组织),随着铅浴温度降低,索氏体片层间距变小。此外随着铅浴温度增加渗碳体片层的部分球化,根据胶态平衡理论,靠近片状渗碳体尖角处的固溶体 C 元素浓度高,而平面处固溶体的 C 元素浓度低,这就使 C 元素扩

散,导致尖角处渗碳体溶解,在平面处不断析出,形成球状渗碳体。

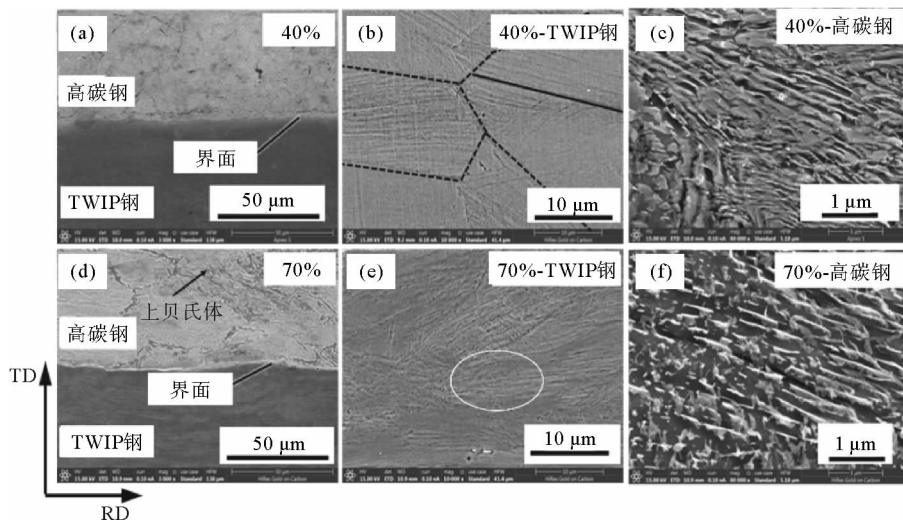


(a)500 °C 铅浴索氏体组织;(b)520 °C 铅浴索氏体组织;(c)550 °C 铅浴索氏体组织

图 4 不同铅浴温度高碳钢侧的索氏体片层组织及片层间距

Fig. 4 Microstructure and interlamellar spacing of sorbite in HC steel area at different lead bathing temperatures

图 5 为 520 °C 铅浴后不同温轧压下率时 TWIP/HC 双层钢的界面及两侧区域扫描图。由图可知, TWIP 钢区域为单一奥氏体组织,有明显的形变孪晶;高碳钢一侧为索氏体组织,沿着轧制方向呈片层状分布,此时部分片层形成不规则弯曲结构,部分片层与轧制方向呈现较大角度偏离,且部分细珠光体呈现不规则弯曲,这是由于垂直于轧制方向的细珠光体片层压缩平行于轧制方向的细珠光体片层^[12]。由于材料在温轧过程中发生了剧烈塑性变形, TWIP 钢在变形过程中发生 TWIP 效应,产生形变孪晶,且孪晶沿着轧制方向变形。由图 5(e)看出,随着轧制压下量的增加, TWIP 钢区域已无明显的孪晶界;索氏体组织随着轧制压下量的增加片层逐渐变得不连续,片层间距逐渐变小,当轧制压下率达到 70% 时,可以看到高碳钢区域(图 5(f))已无明显的片层结构(与图 5(c)相比),渗碳体沿着轧制方向均匀分布。



(a)40%-TWIP/HC 界面;(b)40%-TWIP 钢;(c)40%-高碳钢;(d)70%-TWIP/HC 界面;(e)70%-TWIP 钢;(f)70%-高碳钢

图 5 TWIP/HC 双层复合材料 520 °C 铅浴后不同温轧压下量的 SEM 组织

Fig. 5 SEM of TWIP/HC steels with different warm rolling reduction

图 6 为压下率 70% 时 TWIP 钢区域的 TEM 图。温轧压下量较大时,由于剧烈的塑性变形 TWIP 钢区域出现大量位错,位错之间相互作用形成位错缠结、位错胞等亚结构。由于温轧钢的层错能(stacking fault energy, SFE)较高(约 73.5 mJ/m²),位错发生平面滑移。此外,在位错增殖和相互作用的过程中,容易出现胞状结构。从图 6(b)可以看出, TWIP 钢区域存在剪切带,并伴随大量变形孪晶(白色圆圈中所示)。选区电子衍射中的衍射斑点呈现环状不连续的特征,证实了此时复合材料的 TWIP 钢区域孪晶数量很多,即

TWIP 钢在温轧过程中发生了 TWIP 效应。大量的位错缠结和数目众多的孪晶界阻碍位错滑动,将提高 TWIP 钢的抗拉强度,降低其塑性。

2.2 力学性能分析

图 7 为不同铅浴温度的双层钢经过 50% 温轧压下量的应力应变曲线,表 2 为对应的抗拉强度、延伸率和强塑积 (product of strength and elongation, PSE) 数值。与未经铅浴的复合材料相比,等温铅浴处理后复合材料的强度和塑性均提高,这是因为铅浴后珠光体片间距减小形成索氏体,晶粒细化^[13]。温轧后, TWIP 钢和高碳钢晶粒进一步得到细化。随着铅浴温度升高,材料抗拉强度逐渐下降。铅浴温度为 520 °C 时,复合材料的综合性能最佳,其抗拉强度为 1 592 MPa,最大塑性延伸率为 9.9%,强塑积 (PSE) 达到了 15.761 GPa·%。高碳钢的力学性能主要取决于珠光体片层间距大小,拉伸时高碳钢一侧铁素体层发生塑性变形,渗碳体层具有阻碍位错滑移的作用,索氏体片层间距即是滑移最大距离。当铅浴温度升高到 520 °C 时,索氏体片层间距增大,高碳钢抗拉强度降低,延伸率升高。当温度升到 550 °C 时,索氏体片层间距进一步增大,抗拉强度进一步降低,延伸率略有下降。此外,500 °C 时延伸率低可归因于在等温铅浴时生成少量上贝氏体,使铁素体条间容易产生脆断,降低延伸率^[14]。

图 8 为 520 °C 铅浴处理后分别经过 40%、50%、60%、70% 温轧压下率双层钢的应力应变曲线,表 3 为不同温轧压下率的抗拉强度、延伸率和强塑积数值。随着轧制压下量的增加,复合材料的抗拉强度增大但延伸率降低,70% 轧制压下量时,复合材料的抗拉强度最大,达 1 701 MPa,但最大塑性延伸率仅为 1.9%。40% 轧制压下量时,复合材料的延伸率较大,但抗拉强度较低,仅为 1 286 MPa。出现上述现象的原因是随着轧制压下量的增加,材料强烈塑性变形导致的组织明显细化以及形成的大量位错、亚晶等,这种超细组织材料所能容纳的位错能力差,位错饱和度低,使材料塑性下降^[15]。轧制压下量从 40% 增加到 50% 时,拉伸强度增幅较大,而压下量从 50% 增加至 70%,抗拉强度增幅相对较小。这可归因于细珠光体片层间距在低温轧制初期下降幅度较大,而在变形量超过 50% 后片层间距下降幅度逐步降低。综合来看,当压下率为 50% 时,复合材料具有超高强度和良好的塑性。

由双层钢的工程应力应变曲线可以看出,拉伸变形过程中没有明显屈服现象,弹性变形过后即进入塑性变形阶段。这是由于材料中含有较多的 Mn 元素,易形成金属强键,位错运动时需要消耗较多能量来拆散强

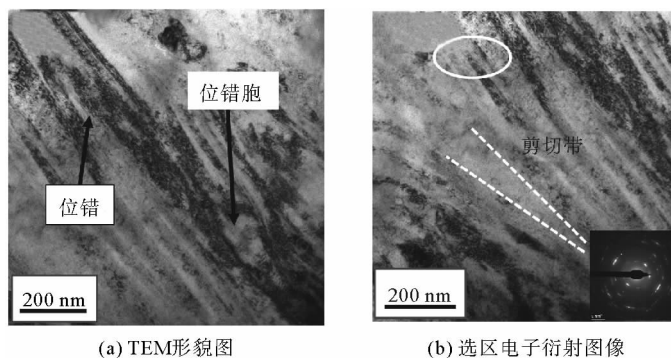


图 6 双层复合材料 70% 温轧压下率 TWIP 钢区域的 TEM 图
Fig. 6 TEM morphology in TWIP steel area of the bi-layered composites with the rolling reduction of 70%

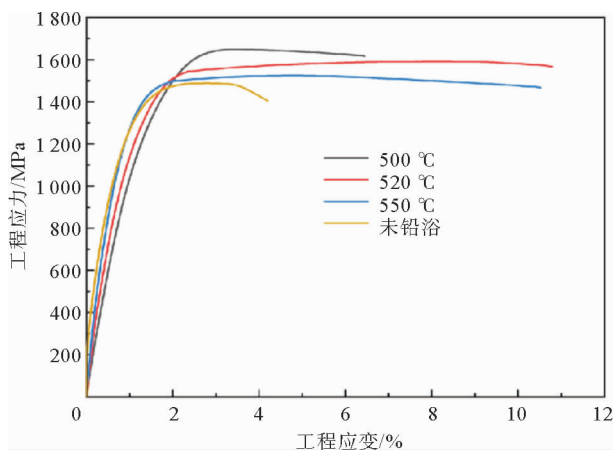


图 7 TWIP/HC 钢不同铅浴温度的工程应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curve of TWIP/HC steel with different lead bathing temperatures

表 2 TWIP/HC 钢不同铅浴温度的力学性能
Table 2 Mechanical property of TWIP/HC steel with different lead bathing temperatures

铅浴温度 / °C	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %	强塑积 / (GPa·%)
未铅浴	1 487	3.2	4.758
500	1 646	4.5	7.407
520	1 592	9.9	15.761
550	1 523	9.6	14.621

键。Mn-C 原子团偏聚对滑移系启动有强烈阻滞效应并对位错运动有强烈的阻碍作用,使得屈服现象不明显^[16]。塑性变形后为均匀塑性变形,当应力超过材料的断裂极限时,复合材料断裂。

2.3 拉伸断口形貌分析

图 9 为 520 °C 铅浴后不同轧制压下量双层钢的断口形貌。轧制压下率为 40% 时 TWIP 钢区域呈现韧性断裂,有数目较多的韧窝;图 9(b) 显示 HC 钢区域的韧窝小而少,大韧窝处呈现蛇行花样,因此轧制压下率为 40% 时双层钢是韧性断裂。图 9(c)、图 9(d) 分别为 70% 压下率的 TWIP 钢区域和 HC 区域断口形貌。当轧制压下量增加时, TWIP 钢韧窝数目大大减少, HC 区域韧窝尺寸继续变小,深度也变浅, TWIP/HC 双层钢塑性变差。这是由于高轧制压下量使材料发生加工硬化,材料难以发生颈缩,微孔尺寸变小,塑性变形能力差。

3 结论

1) 通过热轧-温轧成功制造了 TWIP/HC 钢双层复合材料,界面处结合良好;铅浴处理使 TWIP/HC 钢中高碳钢区域产生索氏体,以及少量渗碳体和珠光体;多道次温轧可进一步细化晶粒、减小索氏体片层间距。

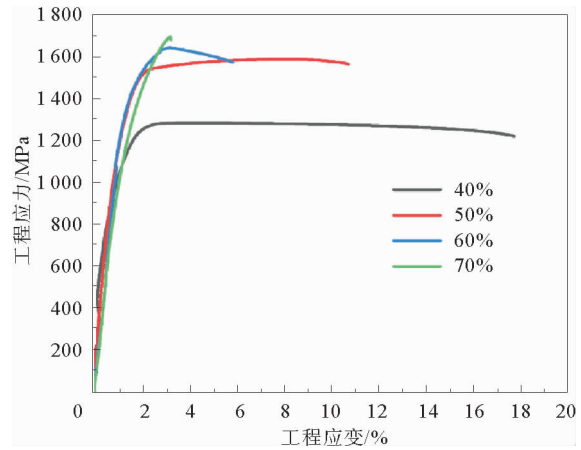
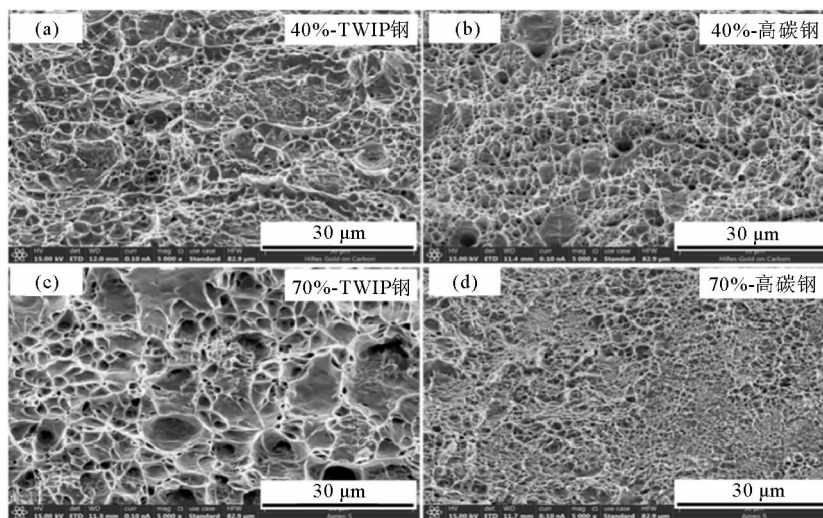


图 8 TWIP/HC 钢不同轧制压下率的工程应力应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curve of TWIP/HC steel with different rolling reduction

表 3 TWIP/HC 钢不同温轧压下量的力学性能
Table 3 Mechanical properties of TWIP/HC steel with different warm rolling reduction

温轧压下率/%	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	强塑积 / (GPa · %)
40	1 286	16.1	20.745
50	1 589	9.2	14.619
60	1 645	4.6	7.567
70	1 701	1.9	3.232



(a) 40%-TWIP 钢区域断口形貌; (b) 40%-高碳钢区域断口形貌; (c) 70%-TWIP 钢区域断口形貌; (d) 70%-高碳钢区域断口形貌

图 9 TWIP/HC 钢 520 °C 铅浴后不同温轧压下量的断口 SEM 图

Fig. 9 Fracture SEM of TWIP/HC steel with different warm rolling reduction

2) 铅浴温度降低使高碳钢区域索氏体的片层间距减小,可以同时提升 TWIP/HC 双层复合材料的强度和延伸率,但由于上贝氏体组织的出现使铅浴温度 500 °C 时延伸率较低;当铅浴温度为 520 °C 时复合材料的抗拉强度为 1 592 MPa,最大塑性延伸率为 9.9%,强塑积为 15.761 GPa · %,综合性能较好;铅浴温度过高

会导致索氏体片层间距增大,强度和塑性均下降。

3) 多道次温轧使 TWIP 钢孪晶和高碳钢索氏体沿轧制方向变形。低轧制压下量可观察到 TWIP 钢存在形变孪晶,高碳钢出现不规则弯曲结构,高轧制压下量 TWIP 钢无明显形变孪晶,高碳钢片层结构变得不连续,呈脆性断裂特征。当温轧压下率为 50%时,其抗拉强度为 1 589 MPa,最大塑性延伸率为 9.2%,复合材料的综合力学性能最佳。

参考文献:

- [1] 王同旭,麻洪蕊.巷道支护力作用及影响因素分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2009,28(4):40-42.
WANG Tongxu,MA Hongrui.The effect of roadway supporting force and analysis of its influence factors[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2009,28(4):40-42.
- [2] BOUAZIZ O,ALLAIN S,SCOTT C P,et al.High manganese austenitic twinning induced plasticity steels:A review of the microstructure properties relationships[J].Current Opinion in Solid State & Materials Science,2011,15(4):141-168.
- [3] TEWARY N K,GHOSH S K,BERE S,et al.Influence of cold rolling on microstructure,texture and mechanical properties of low carbon high Mn TWIP steel[J].Materials Science & Engineering A,2014,615:405-415.
- [4] 张博洋,李泽斌,刘宝玺.层状金属复合材料断裂和增韧机理的研究进展[J].河北工业大学学报,2020,49(4):1-11.
ZHANG Boyang,LI Zebin,LIU Baoxi.Current research on fracture and toughening mechanisms of laminated metal composites[J].Journal of Hebei University of Technology,2020,49(4):1-11.
- [5] CHEN J,MATHAUDHU S N,THADHANI N,et al.Unraveling the role of interfaces on the spall failure of Cu/Ta multilayered systems[J].Scientific Reports,2020,10(1):1-15.
- [6] PARK J,KIM J S,KANG M J,et al.Tensile property improvement of TWIP-cored three-layer steel sheets fabricated by hot-roll-bonding with low-carbon steel or interstitial-free steel[J].Scientific Reports,2017,7(1):1-12.
- [7] YU W X,LIU B X,HE J N,et al.Microstructure characteristics,strengthening and toughening mechanism of rolled and aged multi-layer TWIP/maraging steels[J/OL].Materials Science & Engineering A,2019,76.DOI:10.1016/j.msea.2019.138426.
- [8] DU J J,ZHANG X,LIU B X,et al.Interface strengthening and fracture behavior of multilayer TWIP/TRIP steel[J].Materials Chemistry and Physics,2019,223:114-121.
- [9] 蔡继峰,张东昱,支宇堃,等.铅浴淬火对 72 钢组织及力学性能的影响[J].金属热处理,2017,42(11):169-172.
CAI Jifeng,ZHANG Dongyu,ZHI Yukun,et al.Effect of patenting on microstructure and mechanical properties of 72 steel [J].Heat Treatment of Metals,2017,42(11):169-172.
- [10] CAO R,ZHAO X K,DING Y,et al.Effects of the rolling temperature on microstructure and mechanical properties of 2Cr13/316L laminated composites prepared by accumulative roll-bonding(ARB)[J].Materials Characterization,2018,139:153-164.
- [11] KIM J G,BAEK S M,LEE H H,et al.Suppressed deformation instability in the twinning-induced plasticity steel-cored three-layer steel sheet[J].Acta Materialia,2018,147:304-312.
- [12] 孙淑华,熊毅,傅万堂,等.共析珠光体钢在冷轧过程中的组织变化[J].金属学报,2005,41(3):267-270.
SUN Shuhua,XIONG Yi,FU Wantang,et al.Microstructure changes of eutectoid pearlitic steel during cold rolling[J].Acta Metallurgica Sinica,2005,41(3):267-270.
- [13] 毛向阳,顾云翔,付洪波,等.光伏晶硅切割用超细高强高碳钢丝的铅浴等温淬火工艺研究[J].材料导报,2013,27(18):28-31.
MAO Xiangyang,GU Yunxiang,FU Hongbo,et al.Research on lead bath isothermal quenching of superfine high strength and high carbon steel cord for cutting silicon chip pf photovoltaic cell[J].Materials Reports,2013,27(18):28-31.
- [14] 崔忠圻,覃耀春.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社,2016:240-241.
- [15] DINI G,NAJAFIZADEH A,UEJI R,et al.Tensile deformation behavior of high manganese austenitic steel:The role of grain size[J].Materials and Design,2010,31(7):3395-3402.
- [16] 郭鹏程,钱立和,孟江英,等.高锰奥氏体 TWIP 钢的单向拉伸与拉压循环变形行为[J].金属学报,2014,50(4):415-422.
GUO Pengcheng,QIAN Lihe,MENG Jiangying,et al.Monotonic tension and tension-compression cyclic deformation behaviors of high-manganese austenitic TWIP steel[J].Acta Metallurgica Sinica,2014,50(4):415-422.

(责任编辑:吕海亮)