

表面机械研磨对 5052 铝合金表面纳米化与性能的影响

王荣华¹, 刘振奇²

(1. 内蒙古机电职业技术学院 机电工程系, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 研究了表面机械研磨处理 (SMAT) 对传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金显微组织、物相组成、硬度和拉伸性能的影响。结果表明: 进行 SMAT 前, 连铸连轧 5052 铝合金的晶粒尺寸 ($7\ \mu\text{m}$) 要小于传统轧制 5052 铝合金的晶粒尺寸 ($13\ \mu\text{m}$); 进行 SMAT 后, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金在表层均会形成细小的晶粒尺寸梯度分布, 而且传统轧制和连铸连轧的 5052 铝合金的心部硬度和表层硬度均会有不同程度的提高, 经过 5.0 min 的 SMAT 后, 心部硬度分别达到 89 和 91 HV, 表面硬度基本相当 (约为 102 HV); 相同 SMAT 时间下, 连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度和断后伸长率均要高于传统轧制的 5052 铝合金, 当 SMAT 时间增加至 1.0 min 及以上时, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度有明显提升、断后伸长率略有减小, 这主要与 SMAT 后合金表层形成了一定厚度的加工硬化和细晶强化层有关。

关键词: 5052 铝合金; 表面机械研磨; 传统轧制; 连铸轧制; 显微组织; 硬度; 拉伸性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.030

中图分类号: TG156; TG146.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0209-07

Influence of surface mechanical attrition on surface nanocrystallization and properties for 5052 aluminum alloy

Wang Ronghua¹, Liu Zhenqi²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Technical College of Mechanical and Electrical, Hohhot 010070, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The influences of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on microstructure, phase composition, hardness and tensile properties of 5052 aluminum alloy in traditional rolling and continuous casting and rolling were investigated. The results show that the grain size ($7\ \mu\text{m}$) of 5052 aluminum alloy in continuous casting and rolling before SMAT is smaller than that ($13\ \mu\text{m}$) of 5052 aluminum alloy in traditional rolling, and the fine grain size gradient distribution is formed in the surface layer of 5052 aluminum alloy in traditional rolling and continuous casting and rolling after SMAT. The core hardness and surface hardness of 5052 aluminum alloy after SMAT by traditional rolling and continuous casting and rolling both increase to varying degrees. After 5.0 min of SMAT, the core hardness of 5052 aluminum alloy reaches 89 and 91 HV respectively, and the surface hardness is basically the same (about 102 HV). Furthermore, the tensile strength and elongation after fracture of 5052 aluminum alloy in continuous casting and rolling are higher than those of 5052 aluminum alloy in traditional rolling under the same SMAT time. When the SMAT time increases to 1.0 min or more, the tensile strength of 5052 aluminum alloy by traditional rolling and continuous casting and rolling is significantly improved, and the elongation after fracture is slightly reduced, which is mainly related to the formation of a certain thickness for work hardening and fine-grain strengthening layer in the surface layer after SMAT.

Key words: 5052 aluminum alloy; surface mechanical attrition; traditional rolling; continuous casting and rolling; microstructure; hardness; tensile properties

表面机械研磨处理 (Surface Mechanical Attrition Treatment, SMAT) 作为一种通过钢球高频撞击试样而使表面产生剧烈的塑性变形, 最终晶粒细化直到纳米尺寸的表面自身纳米化技术, 可以在金属表面

形成与基体结合良好的梯度纳米结构, 达到提高硬度、强度和抗摩擦磨损性能等的目的^[1]。在节能环保、保证汽车强度和安全性的前提下, 以铝代钢已经成为汽车轻量化的有效手段 (以铝代钢可以使整车质量降低 30% ~ 40%), 但是, 5052 铝合金作为汽车车身冲压件等结构件使用时, 仍然存在强度和硬度不能满足使用要求的现象^[2]。通过添加微合金

收稿日期: 2021-01-21; 修订日期: 2021-04-19

作者简介: 王荣华 (1981-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: wrh359@126.com

化元素（Er、Sc 和 Ti 等）和形变强化等手段可以在一定程度上改善铝合金的综合性能，但是，同时存在加工成本高、工艺复杂以及力学性能提升幅度有限等问题^[3-4]，而 SMAT 作为一种具有操作便捷、适用性广、无污染和与基体的结合度好等优点的工艺方法^[5]，有望克服 5052 铝合金综合性能不足等问题。目前，SMAT 在镁合金和铜合金上的应用报道较多，而在铝合金上的应用报道较少^[6-7]，尤其是对于不同轧制状态下铝合金组织与性能的影响规律尚不清楚。在此基础上，本文将 SMAT 工艺应用于

传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金板材，考察了机械研磨时间对 5052 铝合金显微组织、物相组成和力学性能等的影响，结果可为高综合性能 5052 铝合金的开发与应用提供参考，并有助于推动 SMAT 技术在铝合金中的应用。

1 试验材料与方法

试验原材料包括传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金板材，尺寸为 100 mm×50 mm×1 mm，实测化学成分如表 1 所示。

表 1 5052 铝合金的实测成分（%，质量分数）
Table 1 Measured compositions of 5052 aluminum alloy（%，mass fraction）

合金	Mg	Si	Ti	Mn	Cr	Cu	Fe	Al
传统轧制 5052 铝合金	2.69	0.34	0.09	0.22	0.06	0.09	0.11	余量
连铸连轧 5052 铝合金	2.70	0.35	0.10	0.23	0.06	0.07	0.12	余量

预先将传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金进行表面清洗和除油，吹干后在 SNC-2 型金属材料表面纳米化试验机上进行 SMAT 处理，该装置与传统喷丸技术相似，以表面光滑的、直径为 $\Phi 3$ mm 的 304 不锈钢球作为撞击体，对两种轧制状态的 5052 铝合金进行室温表面机械研磨，振动发生器频率为 25 kHz，单面处理 10 s 后翻转至另一面，直至到达预设的 SMAT 时间^[8]。传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的 SMAT 时间设定在 0.5~5.0 min。

分别从传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金上截取块状试样，经过镶嵌、打磨、抛光和腐蚀后，在 Leica DM6M 型光学显微镜上观察，腐蚀液为 2.5 mL HNO₃+1.5 mL HCl+1.0 mL HF+95 mL H₂O 混合溶液；EBSD 试样经过打磨、机械抛光和电解抛光（10vol.%高氯酸+90vol.%乙醇溶液为电解液，电压为 25 V，室温抛光 15 s）后清洗、吹干，在 Quanta FEG 场发射电镜上观察晶粒尺寸分布；物相分析在布鲁克 D8 ADVANCE X 射线衍射仪上进行，Cu 靶 K α 辐射，扫描速度为 2（°）·min⁻¹；采用 HXS-1000 型显微硬度计对 SMAT 前后的 5052 铝合金板进行硬度测试，加载载荷为 9.8 N，时间为 10 s，位置为从铝板一侧至另一侧表面，测试结果取 3 个位置的平均值；室温拉伸性能测试在 MTS-810 型液压伺服万能材料试验机上进行，拉伸试样和尺寸如图 1 所示，拉伸速率为 2 mm·min⁻¹，以 3 根平行试样的平均值作为最终结果。

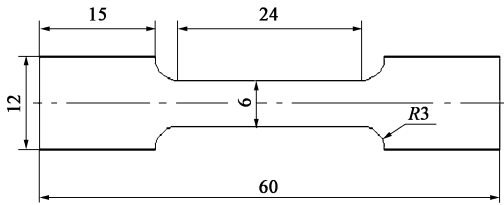


图 1 5052 铝合金的拉伸试样尺寸
Fig. 1 Tensile specimen sizes of 5052 aluminum alloy

2 试验结果与分析

2.1 组织和物相

图 2 为传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的金相组织。传统轧制 5052 铝合金的金相组织中可见平均晶粒尺寸为 13 μm 的等轴晶，部分尺寸较大的晶粒尺寸约为 25 μm ；连铸连轧 5052 铝合金的晶粒较小，尺寸分布相较传统轧制态更为均匀，平均晶粒尺寸约为 7 μm 。

图 3 为 SMAT 前后 5052 铝合金的 X 射线衍射分析结果。SMAT 前（0 min），传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的物相主要为 α -Al 相；不同时间（0.5~5.0 min）的 SMAT 后，5052 铝合金的物相组成未发生变化。传统轧制 5052 铝合金在不同时间 SMAT 后会发生（111）和（200）晶面衍射峰小角度偏移和宽化；连铸连轧 5052 铝合金在 SMAT 后相同晶面处的衍射峰取向增强，衍射峰宽化和偏移现象相对较小，且（220）和（311）晶面的衍射峰强度弱化，晶粒取向的不均匀性增加。

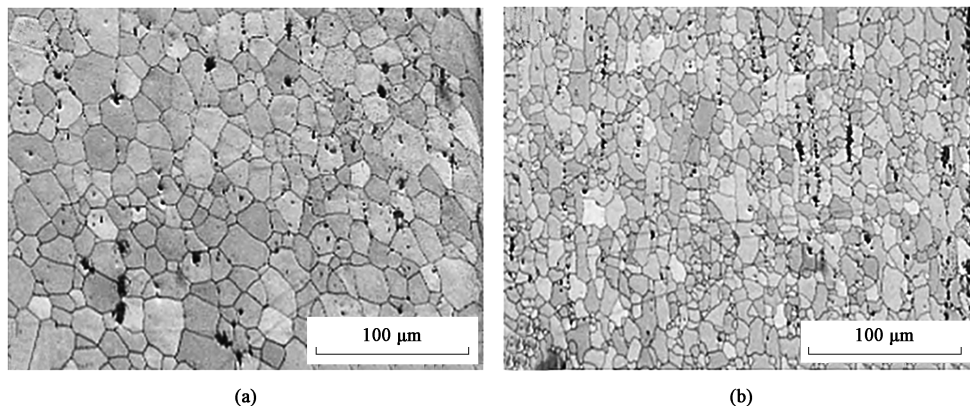


图 2 传统轧制 (a) 和连铸连轧 (b) 5052 铝合金的金相组织

Fig. 2 Metallographic structures of 5052 aluminum alloys by traditional rolling (a) and continuous casting and rolling (b)

为了进一步分析 SMAT 对 5052 铝合金晶粒尺寸和微观应变的影响, 运用 Williamson-Hall 公式 (式 (1)) 进行了定量分析^[9]:

$$\beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{d} + \eta \sin \theta \quad (1)$$

式中: d 为晶粒尺寸; η 为微观应变; β 、 θ 、 K 、 λ 分别为衍射峰半宽、衍射角、谢乐常数 ($K=0.90$) 和 X 射线波长 ($\lambda=0.1541 \text{ nm}$)。

连铸连轧和传统轧制 5052 铝合金的 d 和 η 的统计结果如表 2 所示。可见: 当 SMAT 时间为 1.0 min 时, 连铸连轧和传统轧制 5052 铝合金的表面晶粒尺寸明显减小, 微观应变增大; 当 SMAT 时间为 3.0 和 5.0 min 时, 5052 铝合金的表面晶粒尺寸反而增大, 微观应变减小; 连铸连轧和传统轧制 5052 铝合金的表面晶粒尺寸和微观应变随 SMAT 时间的变化趋势相同。SMAT 时间为 1.0 min 时, 5052 铝合金表面的晶粒在塑性变形作用下发生了明显细化, 相应的微观应变增大; 而当 SMAT 时间为 3.0 min 时, 5052 铝合金原始表层细化晶粒在反复塑性变形的作用下会发生一定程度的粗化^[10]; 继续延长 SMAT 时间至 5.0 min, 5052 铝合金的晶粒尺寸和微观应变变化较小。

表 2 SMAT 前后 5052 铝合金的表面晶粒尺寸和微应变统计结果
Table 2 Statistical results of surface grain size and micro strain of 5052 aluminum alloys before and after SMAT

SMAT 时间/ min	连铸连轧		传统轧制	
	d/nm	$\eta/\%$	d/nm	$\eta/\%$
0.5	70.70	14	80.59	12
1.0	65.59	16	69.99	14
3.0	82.06	12	80.82	12
5.0	82.40	12	81.56	12

图 4 为 SMAT 前后 5052 铝合金沿板厚方向的晶粒尺寸分布, SMAT 时间为 3.0 min。SMAT 前, 连铸连轧 5052 铝合金的晶粒尺寸要小于传统轧制 5052 铝合金。经过 3.0 min 的 SMAT 后, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金在表层区域均形成了明显的晶粒尺寸梯度分布, 随着与表面区域距离的增加, 晶粒尺寸逐渐增大, 这主要是因为: 表层金属在 SMAT 后会发生塑性变形而形成尺寸不等的晶粒, 且距离表面越近, 塑性变形越大^[11], 相应的晶粒尺寸越小。此外, 连铸连轧 5052 铝合金表面纳米晶层的深度要大于传统轧制 5052 铝合金, 且在距表面相同的距离下, 连铸连轧 5052 铝合金的晶粒尺寸要小于传统轧制 5052 铝合金, 这主要是因为连铸连轧 5052 铝合金的初始晶粒相对细小。

2.2 硬度和拉伸性能

图 5 为 SMAT 前后 5052 铝合金的硬度测试结果。SMAT 前 (0 min), 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的硬度沿板厚方向变化较小, 而经过不同时间的 SMAT 后, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的硬度曲线均呈现“凹坑”形态, 即两侧靠近表面的区域硬度高, 而心部区域硬度较低。此外, 通过对比分析还可以发现, 无论是传统轧制还是连铸连轧 5052 铝合金, SMAT 后的心部和表面区域的硬度均高于 SMAT 前的硬度, 且随着 SMAT 时间从 0.5 min 延长至 5.0 min, 心部和表面硬度均呈现出逐渐增加的趋势, 且心部硬度较低区域的宽度逐渐变小, 这主要与 SMAT 时间延长造成表面纳米硬化层的增加有关^[12]。对比经过 5.0 min SMAT 后的传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的硬度可知, 前者的心部硬度达到 89 HV, 后者的心部硬度达到 91 HV, 而二者的表面硬度基本相当 (约为 102 HV)。整体而

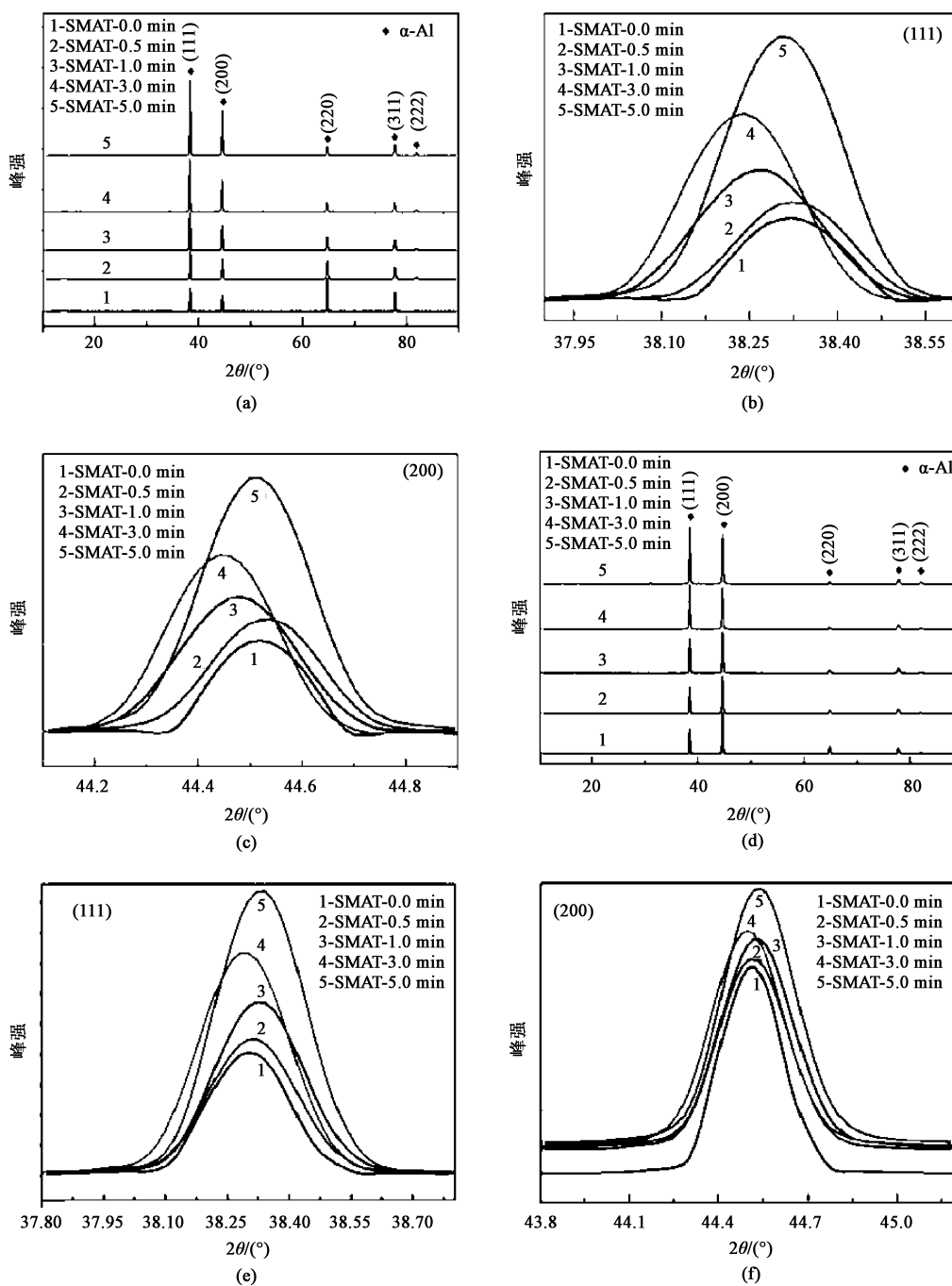


图 3 SMAT 前后传统轧制与连铸连轧 5052 铝合金的 XRD 图谱

(a) 传统轧制, 全谱 (b) 传统轧制, (111) 衍射峰 (c) 传统轧制, (200) 衍射峰
(d) 连铸连轧, 全谱 (e) 连铸连轧, (111) 衍射峰 (f) 连铸连轧, (200) 衍射峰

Fig. 3 XRD patterns of 5052 aluminum alloys by traditional rolling and continuous casting and rolling before and after SMAT

(a) Traditional rolling, full pattern (b) Traditional rolling, (111) diffraction peak
(c) Traditional rolling, (200) diffraction peak (d) Continuous casting and rolling, full pattern
(e) Continuous casting and rolling, (111) diffraction peak (f) Continuous casting and rolling, (200) diffraction peak

言, 无论是传统轧制还是连铸连轧 5052 铝合金, 经过 SMAT 均可以不同程度地提高心部和表面硬度, 且 SMAT 时间越长, 对应区域的显微硬度会相对更

高。

图 6 为 SMAT 前后 5052 铝合金的室温拉伸性能。对 SMAT 前的传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金

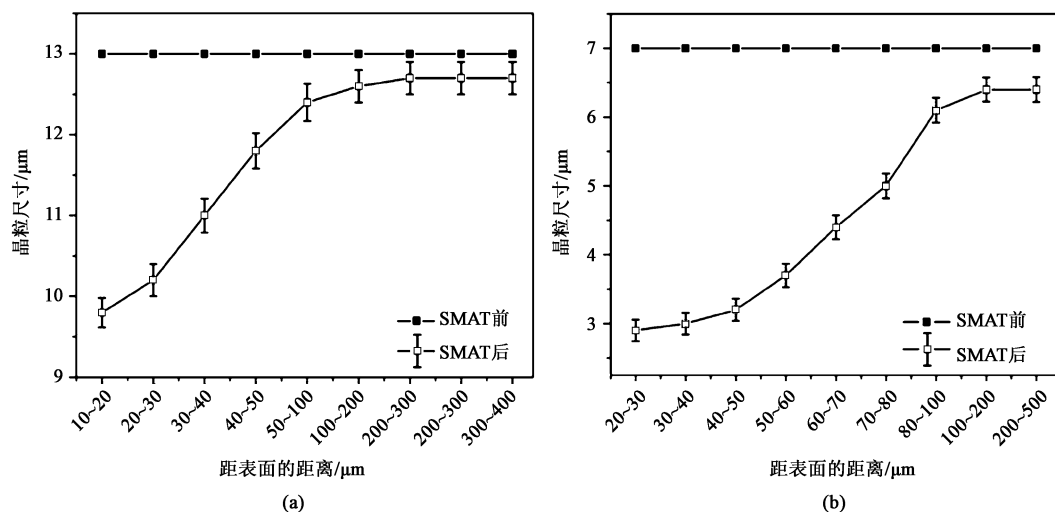


图4 SMAT前后5052铝合金沿板厚方向的晶粒尺寸分布

(a) 传统轧制 (b) 连铸连轧

Fig. 4 Grain size distributions of 5052 aluminum alloys along plate thickness direction before and after SMAT

(a) Traditional rolling (b) Continuous casting and rolling

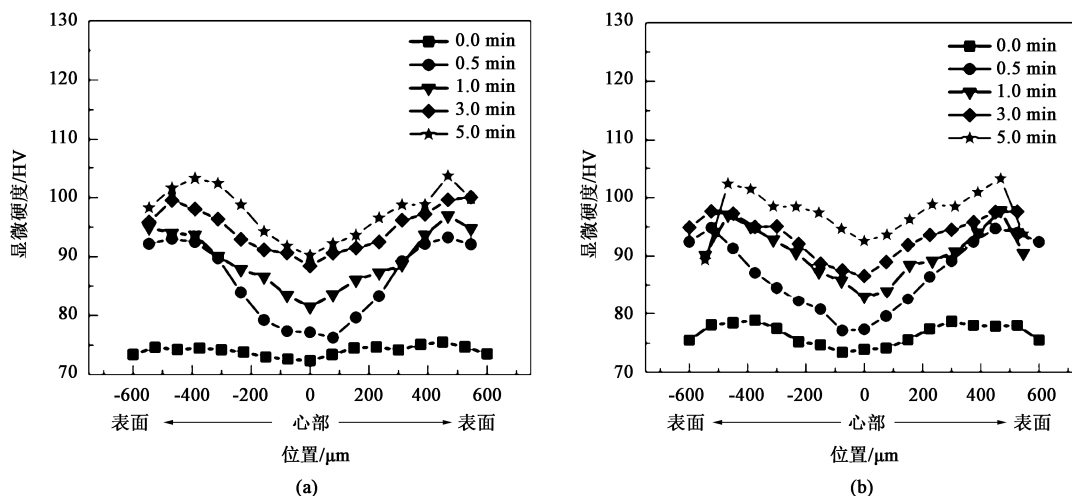


图5 SMAT前后5052铝合金的硬度分布

(a) 传统轧制 (b) 连铸连轧

Fig. 5 Hardness distributions of 5052 aluminum alloys before and after SMAT

(a) Traditional rolling (b) Continuous casting and rolling

的室温拉伸性能进行对比分析可知, 连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度 (286 MPa) 与传统轧制 5052 铝合金 (289 MPa) 相当, 但是前者的断后伸长率 (30.5%) 要高于后者 (22.7%)。从 SMAT 后 5052 铝合金的强度和断后伸长率的变化趋势来看, SMAT 时间的延长会使得传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度和屈服强度逐渐升高, 而断后伸长率则逐渐减小, 且当 SMAT 时间为 0.5 min 时, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的断后伸长率均明

显降低, 而抗拉强度并未明显提高; 直至 SMAT 时间增加至 1.0 min 及以上时, 5052 铝合金的抗拉强度才有明显提升, 而断后伸长率略有减小。

2.3 分析与讨论

SMAT 前后 5052 铝合金的硬度测试结果表明, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金在经过 SMAT 处理后, 在板厚方向均会形成“凹坑”形态的硬度分布特征, 这主要是因为: 经过 SMAT 处理后会在表面区域形成一定厚度的纳米晶层, 并在塑性变形作

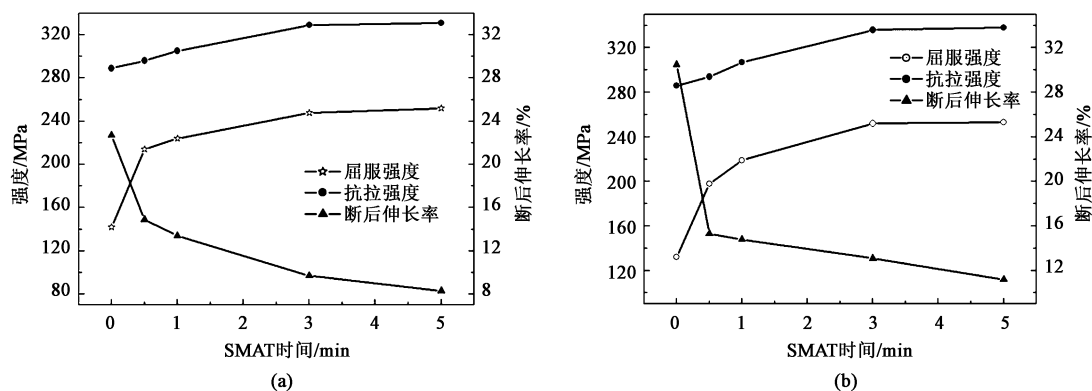


图 6 SMAT 前后 5052 铝合金的室温拉伸性能

(a) 传统轧制 (b) 连铸连轧

Fig. 6 Room temperature tensile properties of 5052 aluminum alloys before and after SMAT

(a) Traditional rolling (b) Continuous casting and rolling

用下使得位错密度增大, 在加工硬化和细晶强化双重作用下^[13], 5052 铝合金的硬度会得到不同程度的提高。并且相对而言, 连铸连轧 5052 铝合金的表面晶粒和心部晶粒更加细小, 反映在硬度测试结果上表现为连铸连轧 5052 铝合金具有相对传统轧制 5052 铝合金更高的硬度。从 5052 铝合金的心部和表面硬度的提高幅度来看, 传统轧制 5052 铝合金的硬度的提高幅度相较连铸连轧 5052 铝合金更大, 即说明 SMAT 对提高传统轧制 5052 铝合金的硬度更加敏感。从图 5 所示硬度分布曲线中还可以发现, 虽然 SMAT 会使得 5052 铝合金的表面和心部硬度增加, 但是 SMAT 后传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的硬度最大值均出现在次表层, 这可能与硬度测试过程中最外层区域未完全压实或者存在缺陷有关^[14]。

SMAT 前后 5052 铝合金的拉伸性能测试结果表明, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金在经过 SMAT 处理后的屈服强度和抗拉强度均有不同程度提高, 而断后伸长率减小。对比相同 SMAT 时间下传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的室温拉伸性能可知, 当 SMAT 时间为 0.5 min 时, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度基本不变或略有增加, 这主要是因为: 此时 SMAT 时间较短, 5052 铝合金表面的纳米晶较薄, 整体塑性变形程度不高, 细晶强化效果较弱, 还未形成足以改变强塑性的纳米层^[15]。当 SMAT 时间为 1.0、3.0 和 5.0 min 时, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的强度会随着 SMAT 时间的延长而逐渐增加, 而断后伸长率略有降低, 在相同 SMAT 时间下连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度和断

后伸长率均要高于传统轧制 5052 铝合金, 且由于 SMAT 时间在 1.0 min 及以上时, 会在 5052 铝合金表面形成一定厚度的加工硬化和细晶强化层^[16], 5052 铝合金的强度相较 SMAT 前有明显增加, 而断后伸长率并不会随着 SMAT 时间的延长而大幅降低。此外, 当 SMAT 时间达到 3.0 min 及以上时, 5052 铝合金表面加工硬化和细晶强化的作用减弱, 因此, 继续增加 SMAT 时间至 5.0 min 对 5052 铝合金的强度和塑性的提高幅度作用不大。

3 结论

(1) SMAT 前, 连铸连轧 5052 铝合金的晶粒尺寸 (7 μm) 要小于传统轧制 5052 铝合金 (13 μm); SMAT 3.0 min 后, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金在表层区域均形成了明显的晶粒尺寸梯度分布。

(2) SMAT 前, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的硬度沿板厚方向变化较小; 而 SMAT 后, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的硬度曲线均呈现“凹坑”形态, 即两侧靠近表面的区域硬度高, 而心部区域硬度较低。经过 5.0 min SMAT 后, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的心部硬度分别达到 89 和 91 HV, 表面硬度基本相当 (约为 102 HV)。

(3) SMAT 时间的延长会使得传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度和屈服强度逐渐升高, 而断后伸长率则逐渐减小; 当 SMAT 时间增加至 1.0 min 及以上时, 传统轧制和连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度才有明显提升, 断后伸长率略

有减小。相同 SMAT 时间下连铸连轧 5052 铝合金的抗拉强度和断后伸长率均高于传统轧制 5052 铝合金。

参考文献:

- [1] 俞燕明, 饶锡新, 刘勇, 等. 有色金属及合金表面机械研磨处理的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (6): 36-41.
Yu Y M, Rao X X, Liu Y, et al. Research progress of surface mechanical grinding of non-ferrous metals and alloys [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (6): 36-41.
- [2] 蔡辉. 5052 铝合金材料研究进展 [J]. 铝加工, 2011, (6): 33-39.
Cai H. Research progress of 5052 aluminum alloy materials [J]. Aluminium Fabrication, 2011, (6): 33-39.
- [3] 刘勇, 耿会程, 朱彬, 等. 高强铝合金高效热冲压工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 1-12.
Liu Y, Geng H C, Zhu B, et al. Research progress of high efficiency hot stamping process for high strength aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 1-12.
- [4] 田鹏, 刘宝胜, 陈福龙, 等. 5A06 铝合金端板构件成形工艺优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 76-86.
Tian P, Liu B S, Chen F L, et al. Optimization of forming process for 5A06 aluminum alloy end plate components [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 76-86.
- [5] 王春明, 杨牧南, 黄建辉, 等. 镁合金表面自纳米化研究进展及现状 [J]. 材料导报, 2019, 33 (13): 2260-2265.
Wang C M, Yang M N, Huang J H, et al. Research progress and current situation of surface self nanocrystallization of magnesium alloys [J]. Materials Review, 2019, 33 (13): 2260-2265.
- [6] 康燕平, 李元东, 王晓东, 等. 镁、铝合金表面自纳米化研究现状 [J]. 材料导报, 2011, 25 (23): 20-24.
Kang Y P, Li Y D, Wang X D, et al. Research status of surface self nanocrystallization of magnesium and aluminum alloys [J]. Materials Review, 2011, 25 (23): 20-24.
- [7] 赵海涛, 刘超. 时效时间对表面机械研磨处理 Cu-4.5Ti 合金组织和硬度的影响 [J]. 粉末冶金技术, 2020, 38 (2): 92-97.
Zhao H T, Liu C. Effect of aging time on microstructure and hardness of Cu-4.5Ti alloy after surface mechanical grinding [J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38 (2): 92-97.
- [8] 范淇元, 覃美烘. 表面机械研磨对 AZ31 镁合金显微组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (18): 108-110.
Fan Q Y, Qin X Y. Effect of surface mechanical grinding on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (18): 108-110.
- [9] Zhang Y L, Yang C, Zhou D S, et al. Effect of stacking fault energy on microstructural feature and back stress hardening in Cu-Al alloys subjected to surface mechanical attrition treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 740-741: 235-242.
- [10] 袁建梁, 刘泽鹏, 闫志峰, 等. 超声表面机械研磨处理对 6061 铝合金 FSW 接头疲劳行为的影响 [J]. 焊接, 2019, (7): 34-39.
Yuan J L, Liu Z P, Yan Z F, et al. Effect of ultrasonic surface mechanical polishing on fatigue behavior of 6061 aluminum alloy FSW joint [J]. Welding, 2019, (7): 34-39.
- [11] 赵重阳, 宁江利, 徐博, 等. AZ31 镁合金在表面机械研磨过程中组织的演变 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47 (3): 42-47.
Zhao C Y, Ning J L, Xu B, et al. Microstructure evolution of AZ31 magnesium alloy during surface mechanical grinding [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47 (3): 42-47.
- [12] Eidivandi S, Boroujeny B S, Dustmohammadi A, et al. The effect of surface mechanical attrition treatment (SMAT) time on the crystal structure and electrochemical behavior of phosphate coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 821: 153252-153260.
- [13] Meng X, Liu B, Luo L, et al. The Portevin-Le Chatelier effect of gradient nanostructured 5182 aluminum alloy by surface mechanical attrition treatment [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34 (12): 2307-2315.
- [14] 徐颖宣, 孟祥晨, 李根, 等. 表面机械研磨处理 5182 铝合金的组织 and 力学性能研究 [J]. 中国材料进展, 2017, 36 (2): 122-125.
Xu Y X, Meng X C, Li G, et al. Study on microstructure and mechanical properties of 5182 aluminum alloy by surface mechanical grinding [J]. Rare Metals Letters, 2017, 36 (2): 122-125.
- [15] Gao T, Sun Z, Xue H, et al. Effect of surface mechanical attrition treatment on high cycle and very high cycle fatigue of a 7075-T6 aluminium alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139: 105798-105804.
- [16] Zhang Z, Li Y, Peng J, et al. Combining surface mechanical attrition treatment with friction stir processing to optimize the mechanical properties of a magnesium alloy [J]. Materials and Engineering, 2019, 756 (22): 184-189.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”, 旨在加强刊物与读者的交流, 促进刊物质量的提高, 并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求: 内容填写完整、没有遗漏, 提供的信息准确、详细, 字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整, 字迹不清、无法辨认, 通讯地址模糊、不详细等, 编辑部将不予邮寄杂志, 特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登, 位置在正文后, 请读者注意查看, 以免遗漏。

《锻压技术》编辑部