doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.05.03

退火工艺对升温热轧镁铝层合板表面残余应力的影响

张柏瑞[1],周存龙[1],赵广辉[1],王 涛[2],赵博文[1]
(1. 太原科技大学 机械工程学院,太原 030024;
2. 太原理工大学 机械与运载工程学院,太原 030024)

摘 要:镁铝层合板经轧制成形后会产生大量的残余应力,严重影响层合板的后续加工和板材的使役性能。对三道次升温热轧的镁铝层合板进行不同工艺的退火处理后,使用 iXRD-X 射线残余应力检测仪测量层合板的表面残余应力,采用 SEM-EBSD 技术分析层合板的表面微观组织。结果表明:退火前层合板表面残余应力沿平面的分布存在各向异性,各道次层合板的表面残余应力不同;残余应力在不同退火工艺下的消除机制不同,低温下为回复退火,中温下为回复与再结晶作用共存,高温下为再结晶退火;局域取向差值(KAM)可反映位错密度的分布,从而对残余应力进行表征,KAM 越小,残余应力的消除效果越好。研究结果对改善镁铝层合板的后续加工性能及扩大板材的适用范围等问题提供了帮助。

关键词:镁铝层合板;升温热轧;退火;表面残余应力;微观组织
中图分类号:TG339 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1744(2022)05-0022-08

Effect of Annealing Process on Surface Residual Stress of Heating up Hot-rolled Mg-Al Laminate

ZHANG Borui[1], ZHOU Cunlong[1], ZHAO Guanghui[1], WANG Tao[2], ZHAO Bowen[1]
(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: After rolling, a large amount of residual stress will be generated in Mg-Al laminates, which will greatly affect the subsequent processing and service performance of the laminates. In this paper, the surface residual stress of Mg-Al laminates after annealing treatment of different processes was measured by iXRD-X ray residual stress detector, and the surface microstructure of the laminates was analyzed by SEM-EBSD technology. The results show that the surface residual stress of laminates is anisotropic along the plane before annealing, and the surface residual stress of laminates in different passes is different. The elimination mechanism of residual stress is different under different annealing processes. Recovery annealing is at low temperature, recovery and recrystallization coexist at medium temperature, and recrystallization annealing is at high temperature. The local orientation difference (KAM) can reflect the distribution of dislocation density and thus characterize the residual stress. The smaller the KAM, the better the elimination effect of residual stress. The results are helpful to improve the subsequent processing performance and expand the application range of Mg-Al laminates.

Key words: Mg-Al laminate; heating and hot rolling; annealing; surface residual stress; microstructure

收稿日期:2021-09-06
基金项目:山西省科技重大专项(20181101008)
Fund: Supported by Science and Technology Major Project of Shanxi Province, China(20181101008)
作者简介:张柏瑞(1996—),男,硕士研究生,研究方向:镁铝轧制复合工艺。
通信作者:周存龙(1965—),博士,教授,研究方向:复合板轧制工艺、板带矫直工艺。
引用格式:张柏瑞,周存龙,赵广辉,等. 退火工艺对升温热轧镁铝层合板表面残余应力的影响[J]. 有色金属工程,2022,12(5):22-29.
ZHANG Borui, ZHOU Cunlong, ZHAO Guanghui, et al. Effect of Annealing Process on Surface Residual Stress of Heating up Hot-rolled Mg-Al Laminate[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(5): 22-29.

镁合金具有质量轻、强度高、导电性好、电磁屏蔽性强[1-2]等优点,在工业轻量化设计中倍受青睐[3-4],但其耐蚀性较差,致使其应用范围受限。铝合金与镁合金的固溶度较高,制成“铝-镁-铝”型层合板后形成表面致密、耐蚀性好的氧化铝层,可作为增强覆层有效改善镁合金产品的使役性能。相比于其他工艺,轧制复合成形工艺制备镁铝层合板工艺简单、生产效率高,未来的应用潜力极大。

残余应力在轧制的镁铝层合板试件中普遍存在,主要是由于在轧制过程中的累积变形引起的,严重影响了层合板后期的加工和使用性能。一方面导致后续机加工易产生弯曲或翘起等变形;另一方面,对镁铝层合板的使役性能也有重大影响,如断裂韧性、抗应力腐蚀性能和疲劳性能等变差[5]。退火作为常用的钢铁材料和有色金属的去应力和改善组织的方法[6],也可用于对复合材料的处理,如朱志强[7]对 SiCp/6061Al 复合材料进行退火处理,将其残余应力降低到 1.7 MPa。刘燕平等[8]通过对 2205-Q345R 爆炸复合板的研究,发现去应力退火温度对复合板的耐蚀性、强度及弯曲性能影响很大。周扬等[9]在 Zr-Ti 层状梯度复合材料的退火硬化和变形行为的研究中发现,在轧制复合基础上进行高温扩散退火可以消除轧制中产生的残余应力,并促进 Zr 元素与 Ti 元素的进一步扩散。罗泽宇等[10]研究了退火对 Cu/Nb 金属复合板材的影响,结果发现退火处理有助于 Cu/Nb 复合板材焊合界面结合强度的提高。NIE 等[11-15]的研究发现,200 ℃是无相变镁铝层合板界面的最高退火温度,退火时间设置在 1～2 h为佳;形成界面冶金结合层所需的退火温度在 250 ℃以上,其厚度会随温度升高而增大,但在同一温度下不会随退火时间的延长显著增长;在300 ℃时结合层的厚度比例最佳;在 400 ℃时,过厚的结合层将削弱层合板的结合强度。对镁铝层合板而言,退火工艺对其残余应力、组织缺陷以及板型改善方面的研究较少,应加强相关方面的研究以指导其后续加工工艺与成品开发应用。

本文通过三道次升温热轧工艺制备了镁铝层合板,研究了不同退火工艺下层合板表面残余应力的消除机制,并对层合板表面微观组织的演变过程进行分析,对于降低层合板的轧制残余应力,改善其加工能力具有一定指导意义。

1　实验

1.1　复合坯料的制备及轧制工艺

在进行组元设计时,考虑到镁、铝板在较大压下率下轧制才能实现复合[16];且镁板作为主要承载的基板,厚度应略大于铝板[17],因此选择 3 mm 厚的 AZ31 Mg 板和 2 mm 厚的 1060 Al 板,形成 7 mm 厚的“Al/Mg/Al”坯料。为消除成分偏析及机加工对板材塑性的影响,在轧制前将镁板和铝板放入 HMX1400-50 可控气氛炉中,分别进行 300 ℃保温 0.5 h 和 350 ℃保温 1 h 的均匀化处理[18]。

对处理好的“Al/Mg/Al”坯料进行双温段轧制时,两个温段的温度选择至关重要。张建军等[14]发现,当轧制温度低于 300 ℃时,Mg-Al 层合板存在严重的边裂,当温度高于 475 ℃时,Mg-Al 界面发生烧蚀。镁板在 400 ～ 450 ℃的温度范围内的塑性较好。在本例中,两个阶段的轧制温度分别设定为 350 和 400 ℃,Mg 板主要在 400 ℃时变形。实验中所有的加热和保温步骤都在氩气气氛炉中进行,1 道次、2 道次和 3 道次轧制的层合板分别简写为 R1、R2 和 R3。装配和轧制过程如图 1 所示。

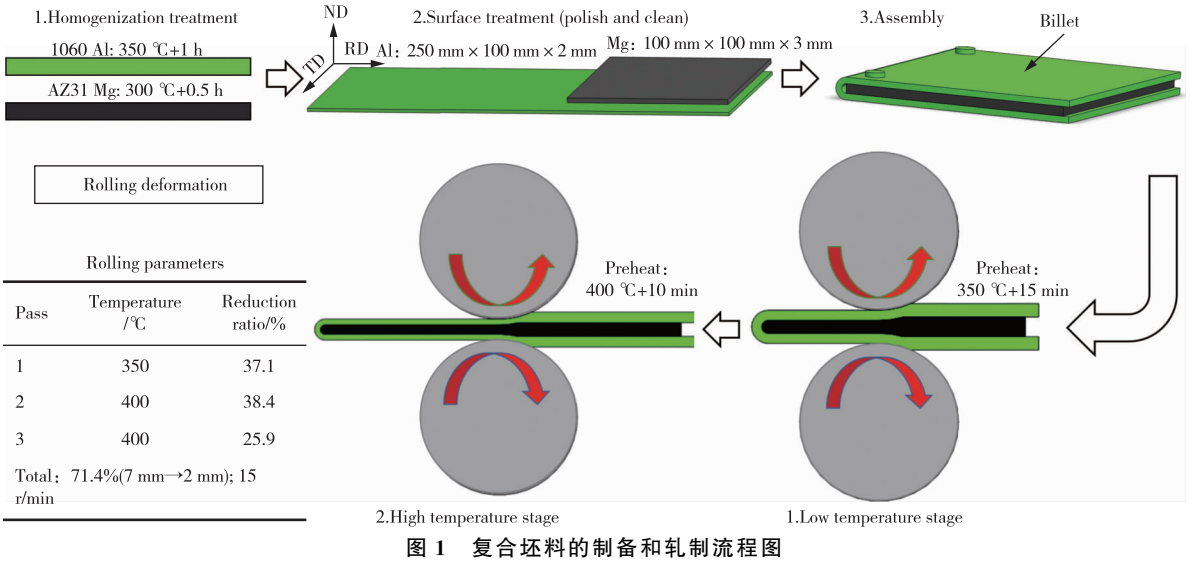


图 1　复合坯料的制备和轧制流程图

Fig. 1　Preparation and rolling flow chart of composite billet

1.2 残余应力检测和退火工艺

为分析镁铝层合板在退火前后的残余应力变化，用 iXRD X 射线残余应力检测仪测量退火前、后各道次层合板表面残余应力，取各道次中两块层合板的残余应力平均值作为该道次的残余应力值。退火前的层合板沿轧制方向中心线等间隔选取 10 个点表征残余应力分布，宽度方向相同间隔选取 5 个点表征残余应力分布。然后进行不同工艺的退火，退火后在相同点附近进行残余应力测量。

考虑到退火温度高于 400 ℃时，层合板界面会形成过厚而脆性的 IMC，而在 350 ℃以上长时间退火时，AZ31 晶粒出现二次结晶（晶粒跳过形核而非正常生长）形成粗晶，因此在本研究中将层合板的退火温度设定在 150～350 ℃范围内。根据彭伟平等[19]对 AZ31 镁合金再结晶时间的研究，将退火时间设定在 0.5～3 h 范围内，以避免二次结晶或形成过厚的界面结合层。退火工艺如表 1 所示。

表 1 退火过程

Table 1 Annealing process

Annealing temperature/℃	Recrystallization completion time of AZ31 at each temperature/min	Annealing time/h			
150	—	0.5	1.0	2.0	3.0
200	373.0～389.0	0.5	1.0	2.0	3.0
250	72.1～87.2	0.5	1.0	2.0	3.0
300	18.0～26.3	0.5	1.0	2.0	3.0
350	5.6～9.6	0.5	1.0	2.0	3.0

Note: Recrystallization completion time was reported in reference[19]

2 结果与分析

2.1 退火前层合板分析

2.1.1 退火前层合板残余应力

不同道次的层合板测得的表面残余应力沿轧制方向和宽度方向的分布整体呈中部高、边部低的特点，如图 2 所示，在越靠近边部的区域，残余应力越小；同时层合板的表面残余应力沿轧制方向的波动幅度比沿宽度方向更大，可认为残余应力沿平面的分布存在各向异性。此外，R1 和 R2 板表面大部分为残余拉应力，而在头、尾部（咬入端和尾端）存在小范围的残余压应力，这是由于轧制时的受力不均导致的，而在第三道次中，层合板已经过较大的累积变形，此时板材在轧制中发生进一步延展，因此 R3 板表面呈现强度较为均匀的残余拉应力分布。

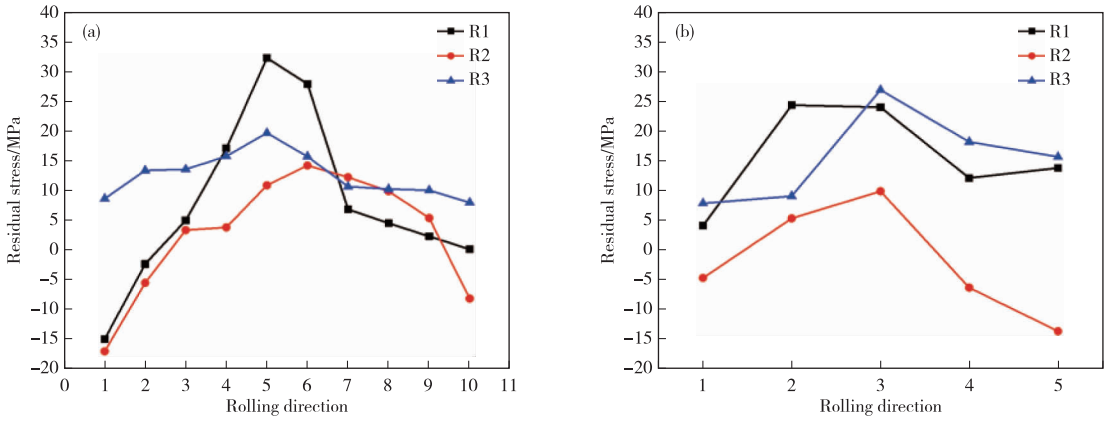


图 2 各道次层合板沿 (a)轧制方向与 (b)宽度方向的表面残余应力分布，图中正值代表残余拉应力、负值代表残余压应力

Fig. 2 Surface residual stress distribution along (a) rolling direction and (b) width direction of each pass laminates, where the positive value represents the residual tensile stress and the negative value represents the residual compressive stress

2.1.2 退火前层合板微观组织分析

采用 SEM-EBSD 对表面微观组织进行检测时发现，在轧制初期，R1 板的铝层形成了大量变形晶粒，晶界密集且数量较多，如图 3(a)所示，大部分为低于 15°的小角度晶界（LAGB），见图 3(d)，LAGB 的存在会使攀移的位错在晶界处聚集，导致晶格畸变程度变大，因此残余应力较大；而 R2 板由于轧制温度的升高促进了组织的动态

回复,变形晶粒内发生位错的多边化并形成大尺寸的晶粒,见图 3(b),晶粒内部出现亚晶界(同属小角度晶界),区域能量降低,因此残余应力相比 R1 有所降低;R3 板相对于 R2 板多一次受力变形过程,回复长大的晶粒经再次轧制转变为细晶晶粒(见图 3(c)),晶界角度有一定幅度的变大,见图 3(f),因此残余应力高于 R2、低于 R1。

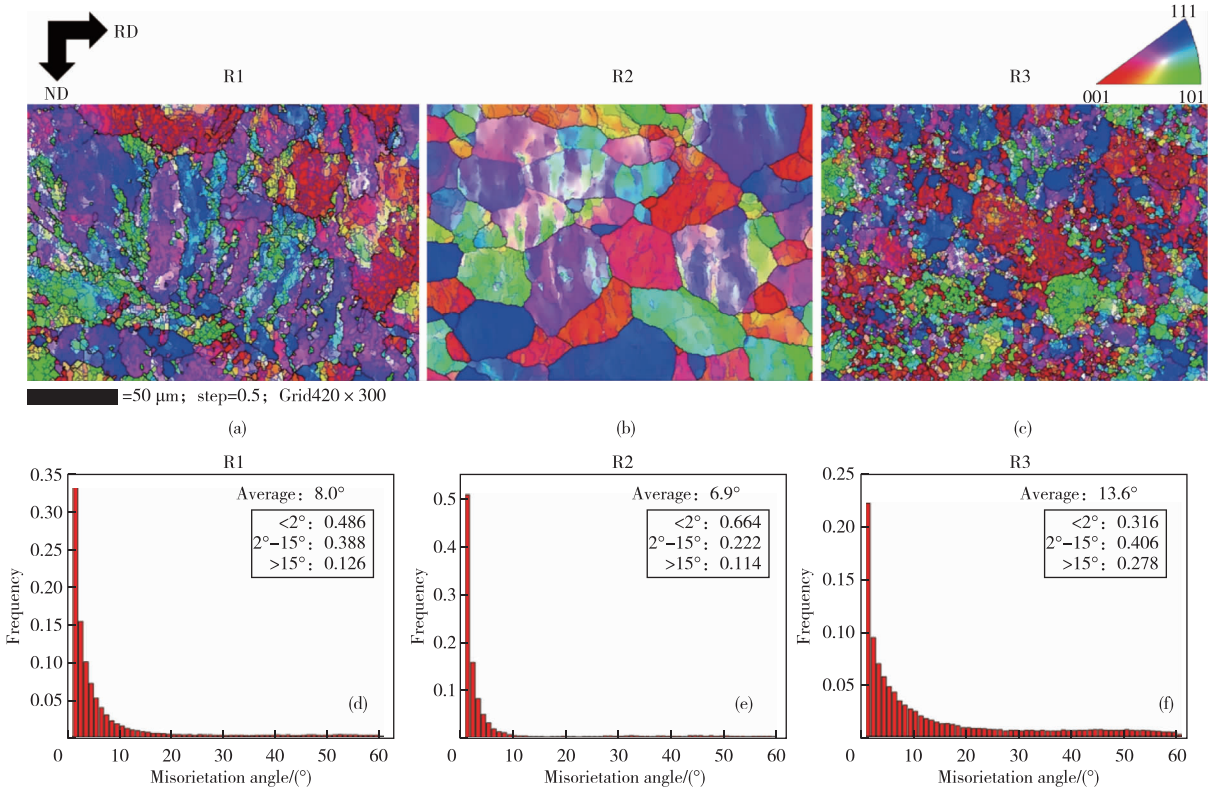


图 3　(a)～(c)层合板表面组织 IPF 图;(d)～(f)各道次板表面晶粒的平均晶界角度

Fig. 3　(a)—(c)IPF map of surface organization of laminate;(d)—(f)Average grain boundary angle of each piece of board surface

2.2　退火后层合板分析

2.2.1　退火后层合板残余应力

对 R1、R2、R3 进行不同工艺的退火处理,并测量退火后的残余应力。经测量发现,退火后板材表面残余应力沿轧制与宽度方向的强度、分布较为均匀,可认为层合板轧制残余应力的各向异性经退火后得以消除,因此,取小样上各点残余应力绝对值的平均值来衡量其退火后的残余应力。层合板经不同退火工艺处理后的表面残余应力均值如表 2 所示。

表 2　退火后层合板的残余应力均值

Table 2　Average residual stress of laminates after annealing　/MPa

Temperature/℃	Time/h											
	0.5(R1)	1(R1)	2(R1)	3(R1)	0.5(R2)	1(R2)	2(R2)	3(R2)	0.5(R3)	1(R3)	2(R3)	3(R3)
150	11.21	9.96	9.42	9.33	14.96	11.92	13.19	4.86	7.02	6.40	5.82	5.45
200	12.70	8.99	6.38	5.99	8.70	7.89	4.04	2.31	7.55	6.04	5.88	4.59
250	10.16	12.71	4.71	11.10	15.82	7.83	6.74	6.44	8.04	8.68	7.46	8.47
300	3.77	10.85	12.79	20.35	8.63	8.78	12.19	16.45	3.97	8.16	10.02	11.54
350	9.58	20.65	18.39	27.36	12.53	15.10	16.34	15.89	8.25	8.94	13.19	15.20

由图 4(a)和 4(b)可知,在低温(150、200 ℃)退火时,各道次层合板的整体残余应力随时间的延长而降低。在 200 ℃退火处理时,各道次层合板残余应力的下降比例更大,如图 4(c)所示。此外,对比各时间点残余应力值可知,200 ℃退火时各道次层合板残余应力值均比 150 ℃退火时小。因此,低温退火的最优工艺为 200 ℃×3 h。由图 4(d)可知,在中温(250 ℃)退火时,各道次层合板的整体残余

应力随时间的延长先降低后升高，在 2 h 左右达到最低。因此，中温退火的最优工艺为 250 ℃×2 h。由图 4(f)、4(g)可知，在高温(300 和 350 ℃)退火时，各道次层合板的整体残余应力随时间的延长而增大，残余应力的最小值在 0.5 h 处取到。此外，对比各时间点残余应力值可知，300 ℃退火时各道次层合板残余应力值均比 350 ℃退火时小。因此，高温退火的最优工艺为 300 ℃×0.5 h。

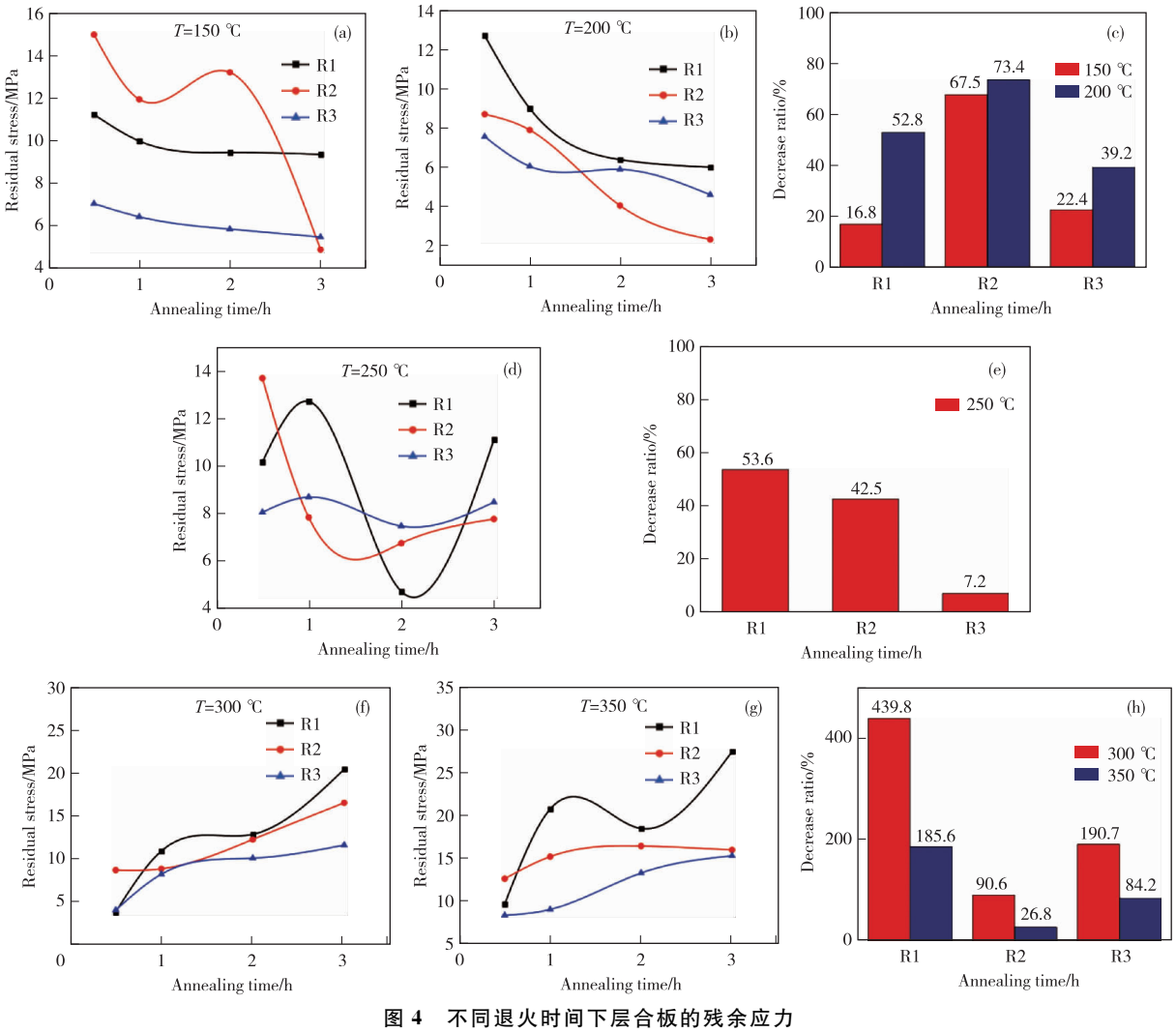


图 4　不同退火时间下层合板的残余应力

Fig. 4　Residual stress of the laminated plate with different annealing times

2.2.2　退火后层合板微观组织分析

为分析层合板在不同退火工艺下残余应力的演变机制，采用 SEM-EBSD 检测技术对 3 种最优去应力退火工艺(即 200 ℃×3 h、250 ℃×2 h、300 ℃×0.5 h)下的 R1、R2、R3 板的表面微观组织进行表征分析，发现各道次层合板的组织演化规律相似：1)在 200 ℃退火时，R1、R2、R3 板的晶界角度均值与 HAGB(大角度晶界)的转化比例相较于退火前变化不大，如图 5(a)和 5(b)所示，晶粒主要发生软化而非再结晶，位错通过攀移排列构成位错墙，使部分残余应力因位错重排被释放。2)在 250 ℃退火时，R1 板由于轧制温度低、变形量不足，因此发生再结晶所需的温度较高，在 250 ℃时仍以回复软化为主，而 R2、R3 板组织的 LAGB 开始向 HAGB 转化，出现部分再结晶，变形晶粒向亚晶和再结晶晶粒转化(如图 5(d)、5(e)所示)，再结晶与回复共同作用致使残余应力被削弱。3)在 300 ℃退火时，R1、R2、R3 板的晶界角度均值与 HAGB 的转化比例相较于退火前均有较大提升，表明此时残余应力主要通过再结晶的发生而削弱，当 HAGB 的晶界占比提高后，层错能降低，材料晶格的畸变能被释放，第三类残余应力降低，组织向稳定态转化。此外，在 300 ℃退火时，板材的再结晶比例与其累积变形量呈正比，R3 板的再结晶比例最高，可达 95%以上，变形晶粒基本被消除。

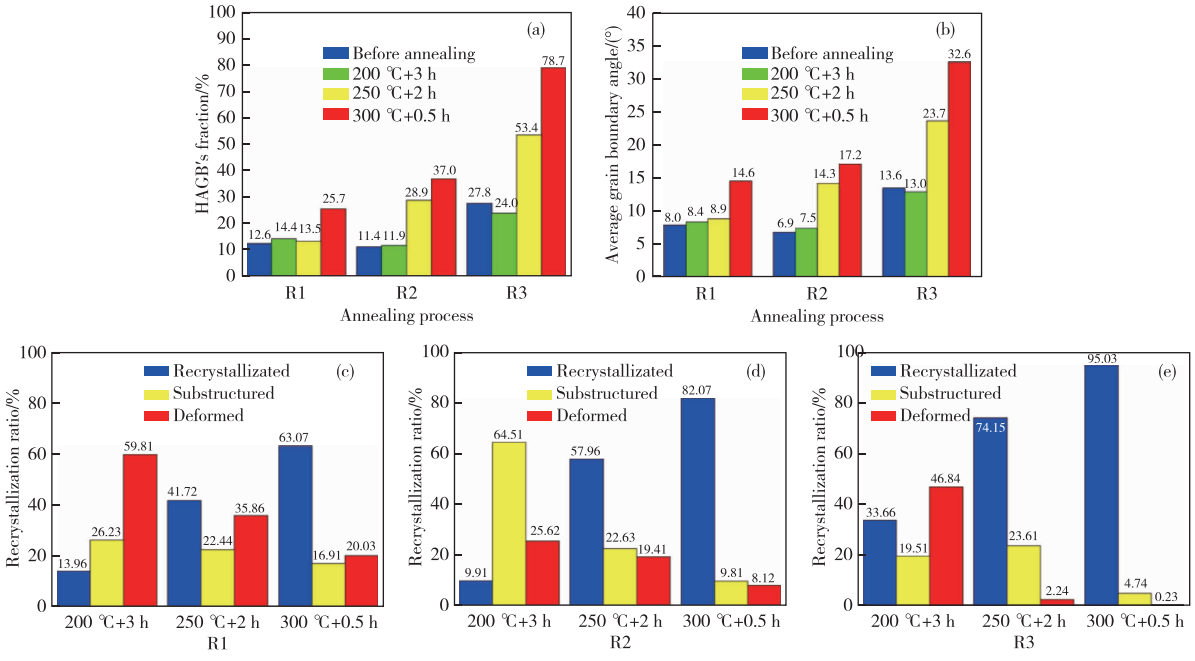


图 5　微观组织 (a)大角度晶界比例;(b)晶界角度均值;(c)～(e)再结晶百分比

Fig. 5　Microstructure (a)the average grain boundary angle and (b)the fraction of large angle grain boundaries (c)～(e)percentage of recrystallization

残余应力的变化也跟微观组织的位错密度息息相关,为更直观地解释残余应力的消除规律,需要对层合板表面组织的位错密度进行表征。局域取向差值(KAM)通常可反映位错密度的分布,孟杨等[20]的研究发现,局域取向差平均值可作为位错密度的量化指标,即 KAM 均值越大,位错密度水平越高。经 3 种退火工艺处理的层合板表面组织的 KAM 分布如图 6(a)、6(b)所示,对退火前、后层合板的 KAM 均值进行对比发现:200 ℃×3 h 回复退火时,各道次层合板的位错密度相比退火前的降幅较小,此温度下 R2 板的 KAM 均值最低;300 ℃×0.5 h 再结晶退火时,各道次层合板的 KAM 均值降幅较大,位错密度的消除效果较好;而 250 ℃×2 h 退火时,回复与再结晶两种机制共存,因此 KAM 均值介于两者之间。晶粒较细的 R3 板在各退火工艺下的位错消除效果要优于 R1、R2 板,经 300 ℃×0.5 h 再结晶退火后位错密度基本被消除,残余应力均值为 3.97 MPa。

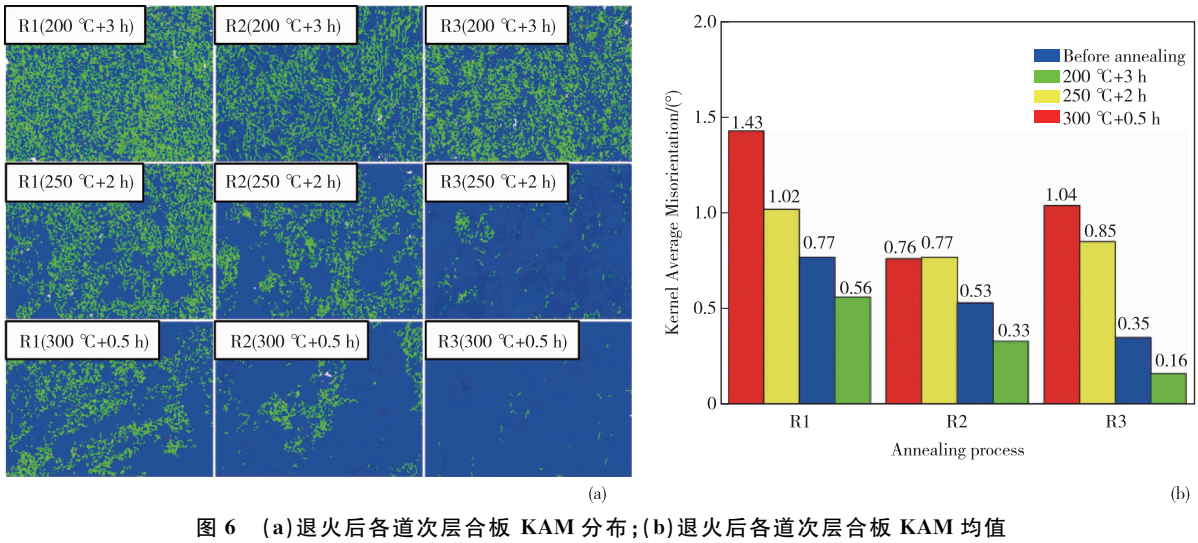


图 6　(a)退火后各道次层合板 KAM 分布;(b)退火后各道次层合板 KAM 均值

Fig 6　(a)Distribution of KAM of each pass after annealing;(b)Mean value of KAM of each pass after annealing

2.3 退火前、后层合板的比较

通过对退火前、后层合板的残余应力分析，发现退火对层合板的残余应力影响很大：退火前层合板的残余应力在轧制方向和宽度方向上具有很大差别，呈现出残余应力的各向异性分布，而经退火后，残余应力的分布趋于均匀，且残余应力明显要小于未退火前。

通过对退火前、后层合板的晶界角度均值和HAGB转化比例的分析，发现不同的退火温度会造成不同的组织演化从而影响残余应力的变化：在低温时，退火温度较低，完成再结晶所需的时间过长，晶界角度均值和HAGB转化比例相较于退火前变化不大，此时表面晶粒主要发生回复软化，点缺陷在位错或晶界处抵消，位错重排为稳定组态，残余应力的消除比例随回复时间的延长而增加；在中温时，表面组织发生部分再结晶，回复与再结晶两种机制同时存在，镁铝金属在250 ℃时的再结晶在2～3 h完成，此时残余应力的消除效果最高。在再结晶完成后，晶粒继续长大，大小晶粒的排列使得组织不均匀，残余应力的消除效果反而不佳；在高温时，晶界角度均值与HAGB的转化比例相较于退火前均有较大提升，说明此时残余应力的削弱主要与再结晶的发生有关。

除此之外，KAM值也可间接的对残余应力进行表征，对退火前、后层合板的KAM均值进行对比可知：在低温退火时，KAM值降幅不大，位错密度消除效果不明显，残余应力变化不大；在高温退火时，KAM下降幅度最大，位错密度基本被消除，残余应力最小；而中温退火时，回复与再结晶两种机制共存，因此KAM均值于残余应力值都介于两者之间。

由此可知，退火可以有效改善层合板所受的残余应力情况，不同的退火工艺对层合板的组织演化具有不同的影响，进一步的影响残余应力的消除方式。

3 结论

1)镁铝层合板在退火前的残余应力沿轧制方向、宽度方向都呈现出中间高两边低的分布趋势，但残余应力值沿轧制方向、宽度方向的差异很大，表现出明显的各向异性；在经过退火后层合板残余应力沿轧制方向、宽度方向的分布趋于均匀，消除了各向异性。

2)层合板在低温(150、200 ℃)的退火机制主要是回复退火，表面残余应力在3 h时达到最低；在中温(250 ℃)退火时，回复与再结晶机制共存，表面残余应力在2 h时达到最低；在高温下(300、350 ℃)的退火机制主要是再结晶退火，表面残余应力在0.5 h时达到最低。

3)在3种去应力表现最优的退火工艺(200 ℃×3 h、250 ℃×2 h、300 ℃×0.5 h)下，相同道次层合板的表面组织的再结晶比例、晶界角度、位错密度的降低幅度均会随着退火温度的升高而提高。

参考文献：

[1] 王宏，张十庆，邹兴政，等. 包铝镁合金的工艺特点及应用前景[J]. 功能材料，2011，42(B11)：788-790，793.
WANG Hong，ZHANG Shiqing，ZOU Xingzheng，et al. Process characteristics and application prospects of clad aluminum-magnesium alloy. Functional materials，2011，42(B11)：788-790，793.

[2] 刘红湘，戴永年，马文会，等. 中国镁工业研究方向探讨[J]. 轻金属，2007(1)：48.
LIU Hongxiang，DAI Yongnian，MA Wenhui，et al. The research direction of China′s magnesium industry in the future[J]. Light Metals，2007(1)：48.

[3] 徐希军. Al/Mg/Al叠层复合材料轧制复合工艺研究[D]. 南京：南京理工大学，2009.
XU Xijun. Research on rolling and compounding process of Al/Mg/Al composite laminate[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2009.

[4] 陈飞帆. 复合轧制工艺对Al/Mg复合板冶金结合层成分、组织和性能的影响[D]. 沈阳：东北大学，2013.
CHEN Feifan. Effect of composite rolling process on composition，microstructure and properties of metallurgical bonding layer of Al/Mg composite plate[D]. Shenyang：Northeastern University，2013.

[5] 杨胜利，刘乐乐，李亚楠，等. 淬火、预拉伸对铝锂合金板材残余应力的影响[J]. 中国有色金属学报，2022，已录用.
YANG Shengli，LIU Lele，LI Yanan，et al. Effect of quenching and pre-stretching on residual stress of Al-Li alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2022，in Press.

[6] 姜小坤，余欢，徐志锋，等. 退火及深冷处理对2.5D-C_f/Al复合材料残余应力及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2019，39(8)：900-904.
JIANG Xiaokun，YU Huan，XU Zhifeng，et al. Effect of annealing and cryogenic treatment on residual Stress and tensile properties of 2.5D-C_F/Al composites[J]. Special Casting and Non-Ferrous Alloys，2019，39(8)：

900-904.

[7] 朱志强.界面调控对 SiCp/6061Al 复合材料残余应力的影响规律及其数值模拟[D].淮南:安徽理工大学,2020.
ZHU Zhiqiang. Experimental and numerical simulation study on the effect of interface control on the residual stress in SiCp/6061Al composites[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2020.

[8] 刘燕平,李平仓,刘凯,等.热处理工艺对 2205-Q345R 爆炸复合板性能的影响[J].中国舰船研究,2016,11(3):128-132.
LIU Yanping, LI Pingcang, LIU Kai, et al. Effect of heat treatments on the properties of explosive clad plates 2205-Q345R[J]. China Ship Research, 2016, 11(3):128-132.

[9] ZHOU Y, HE W J, MA J T, et al. Annealing hardening and deformation behavior of a layered gradient Zr-Ti composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2021,31(8):2358-2371.

[10] 罗泽宇,罗富鑫,谢伟滨.累积叠轧 Cu/Nb 复合板材在形变与退火过程中的组织及性能演变[J].金属热处理,2018,43(8):93-98.
LUO Zeyu, LUO Fuxin, XIE Weibin. Mechanical properties and microstructure evolution of accumulative roll bonded Cu/Nb composite annealing[J]. Heat Treatment of Metals,2018,43 (8):93-98.

[11] NIE H H, LIANG W, CHEN H S, et al. Effect of annealing on the microstructures and mechanical properties of Al/Mg/Al laminates[J]. Materials Science and Engineering: A,2018,732:6-13.

[12] 樊海伟,李线绒,聂慧慧,等.轧制速率及再结晶对 5052/AZ31/5052 复合板微观组织的影响[J].热加工工艺,2017,46(20):133.
FAN Haiwei, LI Xianrong, NIE Huihui, et al. Effect of rolling rate and recrystallization on microstructure of 5052/AZ31/5052 composite plate[J]. Hot Working Technology,2017,46(20):133.

[13] MACWAN A, JIANG X, CHEN D. Interfacial characterization of dissimilar joints between Al/Mg/Al-trilayered clad sheet to high-strength low-alloy steel[J]. Journal of the Minerals Metals & Materials Society,2015.

[14] 张建军.Al/Mg/Al 热轧复合板的制备及其微观组织和力学性能研究[D].太原:太原理工大学,2016.
ZHANG Jianjun. Preparation, microstructure and mechanical properties of Al/Mg/Al hot-rolled composite plate[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2016.

[15] 聂慧慧.Al/Mg/Al 层合板的微观组织结构和热变形行为[D].太原:太原理工大学,2017.
NIE Huihui. Microstructure and thermal deformation behavior of Al/Mg/Al laminates[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2017.

[16] 郭伟朋,李晓文,陈洪美,等.退火工艺对 Al/Mg/Al 复合板组织及界面扩散的影响[J].金属热处理,2018,43(2):91-95.
GUO Weipeng, LI Xiaowen, CHEN Hongmei, et al. Effect of annealing process on microstructure and interface diffusion of Al/Mg/Al composite plate[J]. Heat Treatment of Metals,2018,43(2):91-95.

[17] 刘智勇.包铝镁板复合轧制及界面特性研究[D].重庆:西南大学,2009.
LIU Zhiyong. Study on composite rolling and interface characteristics of clad Al-Mg sheet[D]. Chongqing: Southwest University,2009.

[18] 刘蒙.对称/不对称轧制镁铝复合板及其组织性能的研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2015.
LIU Meng. Study on microstructure and properties of Mg-Al composite plate rolled symmetrically/asymmetrically[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2015.

[19] 彭伟平,彭彩虹,李培杰,等.AZ31B 镁合金再结晶过程的动力学[J].中国有色金属学报,2006,16(10):1724-1729.
PENG Weiping, PENG Caihong, LI Peijie, et al. Kinetics of AZ31B magnesium alloy recrystallization process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2006,16(10):1724-1729.

[20] 孟杨,任群,鞠新华.利用局域取向差衡量变形金属中的位错密度[J].材料热处理学报,2014(11):122-128.
MENG Yang, REN Qun, JU Xinhua. Using local misorientation to measure dislocation density in deformed metal[J]. Journal of Materials Heat Treatment,2014(11):122-128.

(编辑　崔　颖)