文章编号:1008-1542(2022)04-0426-08

深冷处理对 5A06 铝合金 FSW 接头组织和力学性能的影响

王会霞[1,2],孙　瑞[1],王　军[1,2],张　亮[1,2],胡博超[1]

(1.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄　050018;2.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄　050018)

摘　要:为了避免铝合金焊接接头软化,提升接头力学性能,采用 FSW 对 5A06 铝合金进行对接试验,在转速为 1 200 r/min、焊速为 150 mm/min 的条件下,将焊接接头加工成一定尺寸的金相试样和拉伸试样,研究深冷处理时间对 5A06 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响规律,采用显微组织观察试验、显微硬度试验和拉伸试验等方法,对接头组织和力学性能进行表征与分析。结果表明:深冷处理具有细化晶粒、促进析出相析出的作用,提高了接头力学性能;经过 12 h 深冷处理后,接头的抗拉强度和伸长率分别达到 385.3 MPa 和 17.2%,与未经深冷处理的接头相比,分别提高了 7.4%和 23.7%。因此,深冷处理可以有效提升铝合金焊接接头的力学性能,为其更广泛的应用提供了理论基础和技术参考。

关键词:焊接工艺与设备;深冷处理;5A06 铝合金;搅拌摩擦焊;显微组织;力学性能

中图分类号:TG456.2　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2022yx04010

Effect of deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded joints of 5A06 aluminum alloy

WANG Huixia[1,2], SUN Rui[1], WANG Jun[1,2], ZHANG Liang[1,2], HU Bochao[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to avoid softening and improve the mechanical properties of the aluminum alloy welded joints, the butt test of 5A06 aluminum alloy was carried out with FSW, and the welded joints were processed into metallographic samples and tensile samples of a certain size under the conditions of a rotating speed of 1 200 r/min and a welding speed of 150 mm/min,

收稿日期:2022-04-02;修回日期:2022-05-25;责任编辑:张士莹

基金项目:国防基础科研计划(JCKY2017407C002);河北省重点研发计划(19211016D,20351002D);国家自然科学基金(51775007);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2018060)

第一作者简介:王会霞(1968—),女,河北石家庄人,副教授,硕士,主要从事搅拌摩擦焊方面的研究。

通讯作者:张　亮博士。E-mail:hebustzhangliang@163.com

王会霞,孙瑞,王军,等.深冷处理对 5A06 铝合金 FSW 接头组织和力学性能的影响[J].河北科技大学学报,2022,43(4):426-433.

WANG Huixia,SUN Rui,WANG Jun,et al.Effect of deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded joints of 5A06 aluminum alloy[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2022,43(4):426-433.

the effect of deep cryogenic treatment (DCT) time on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded joints of 5A06 aluminum alloy was investigated. The experiments were carried out by microstructure observation test, micro-hardness test and tensile test to characterize and analyze the joint organization and mechanical properties. The experiment results show that DCT can refine the grain and promote the precipitation of the second phase, thus the mechanical properties of the joints are improved. The tensile strength and elongation of the joints can reach 385.3 MPa and 17.2% respectively, which are increased by 7.4% and 23.7%, respectively after 12 h DCT compared with the joints without DCT. Therefore, DCT can effectively improve the mechanical properties of aluminum alloy joints and provide theoretical and technical basis for its application.

Keywords: welding process and equipment; deep cryogenic treatment; 5A06 aluminum alloy; friction stir welding; microstructure; mechanical properties

铝合金具有强度高、密度小、耐腐蚀、无磁性等特点，广泛应用于航空航天、能源动力、国防军工、交通运输等领域[1]。但是铝合金在焊接过程中易出现接头软化的问题，导致接头强度和硬度降低，无法满足构件的使用要求[2]。国内外学者对此展开了研究，通过焊后热处理和时效强化方式解决焊接接头软化问题。但 5A06 合金属于非热处理强化 Al-Mg 系铝合金，不适合使用热处理方式改善其性能；而时效强化处理时，一旦发生过时效现象，晶粒就会发生粗化，导致接头强度降低。因此，对于 5A06 合金而言，以上方法都有一定的局限性[3-4]。

深冷处理是将被处理工件置于特定的低温环境中，使材料的微观组织结构发生变化，从而达到提高或改善材料性能的一种技术[5-6]。目前国内外对黑色金属材料深冷处理的研究较多，但对铝合金及其焊接接头深冷处理的研究较少[7-10]。本文通过对 5A06 铝合金搅拌摩擦焊(FSW)接头进行深冷处理实验，研究深冷处理时间对接头微观组织和力学性能的影响，分析深冷处理下接头显微组织的演变规律，并就深冷处理对铝合金组织的影响机理进行探讨。

1　材料及方法

5A06 铝合金室温强度高、耐腐蚀性强、热稳定性好、焊接成型性能优良，作为焊接结构材料，5A06 铝合金是汽车、船舶、高速列车、航空航天等轻量化装备工业领域理想的轻型材料。其化学成分如表 1 所示，实验材料处理状态为 H112(加工硬化)，焊接试板尺寸为 300 mm×150 mm×5 mm，力学性能如表 2 所示。

表 1　5A06 铝合金的化学成分

Tab.1　Chemical composition of 5A06 aluminum alloy

项目	质量分数/%							
	Mg	Mn	Ti	Cu	Si	Zn	Fe	Al
含量	6.38	0.66	0.03	0.01	0.05	0.03	0.17	余量

表 2　5A06-H112 铝合金基本力学性能

Tab.2　Basic mechanical properties of 5A06-H112 aluminum alloy

性能参数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
数值	380	180	30

采用 FSW 对 5A06 铝合金进行对接试验，焊接参数选用 1 200 r/min(转速)-150 mm/min(焊速)进行焊接，将制备好的焊接接头加工成 40 mm×20 mm×5 mm 的金相试样和如图 1 所示的拉伸试样。将试样分成 5 组，每组 3 个拉伸试样和 1 个金相试样，其中一组作为对照组不进行深冷处理(0 h)，其余 4 组采用液体法分别浸入液氮中进行深冷处理，深冷处理时间分别设定为 3，6，9，12 h。深冷处理后，试件逐渐回温至室温[10]，具体的深冷处理参数如图 2 所示。

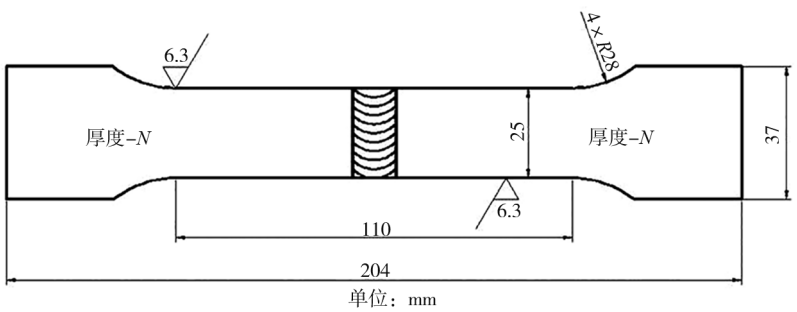


图 1　焊接接头拉伸试样

Fig.1　Tensile specimen of welded joint

利用 LEICA DMi8 型金相显微镜(OM)对深冷处理前后焊接接头的微观结构进行表征,所有的金相试样均采用 Barker 试剂进行电解腐蚀。采用 TMVS-1 硬度计进行显微硬度测试,试验载荷为 0.2 kN,载荷保持时间为 10 s。拉伸试验设备采用 C45.105万能材料力学试验机,依据 GB/T 228—2018 沿着垂直于焊缝方向截取拉伸试样,在蔡司 MERLIN 扫描电镜(SEM)下观察拉伸断口。

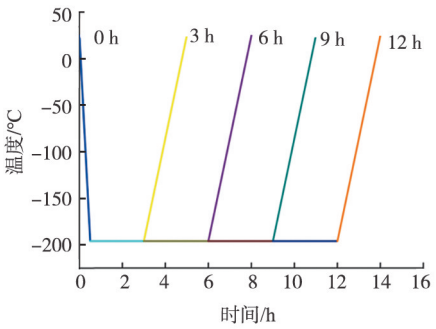


图 2 深冷处理参数图

Fig.2 Schematic diagram of DCT parameters

2 结果与分析

2.1 深冷处理时间对接头组织晶粒的影响

如图 3 所示,FSW 接头金属可以划分为 4 个不同区域,分别为焊核区(NZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)以及母材(BM)。其中 NZ 位于焊接接头中心,该区域因受到剧烈搅拌和摩擦热的双重作用,使得组织由原始轧制板条状组织转变成细小的等轴晶组织,与 BM 及其他区域相比,NZ 晶粒细小。TMAZ 位于 NZ 两侧,是由搅拌针的搅拌旋转造成的,HAZ 在焊接过程中由于只受到焊接热循环作用,与其他区域相比组织有所粗化,因此将该区域微观组织作为主要研究对象。

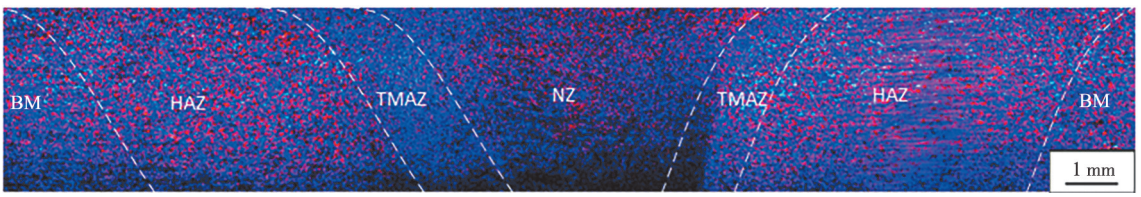


图 3 FSW 接头宏观组织图

Fig.3 Macroscopic structure diagram of FSW joint

图 4 为经过不同时间深冷处理后的焊接接头 HAZ 微观组织图。图 4 a)为未经过深冷处理(0 h)焊接接头,可以看出,FSW 焊接接头 HAZ 晶粒与母材相比较为粗大,而且分布不均匀,晶粒大小不一,根据截距法可以测得未经深冷处理接头 HAZ 平行于轧制方向的晶粒尺寸为 41 μm,垂直于轧制方向的晶粒尺寸为 24 μm。图 4 b)为深冷处理 3 h 的焊接接头,可以看出,经过深冷处理后晶粒分布仍然不均匀,晶粒大小不一,但部分晶粒尺寸发生了明显变化,测量后平行于轧制方向的晶粒尺寸为 38 μm,垂直于轧制方向的晶粒尺寸为 19 μm。图 4 c)为深冷处理 6 h 的焊接接头,可以看出,随着深冷时间的延长,小晶粒的数量开始增加,但是此时组织仍不均匀,存在较大的晶粒。经测量,平行于轧制方向的晶粒尺寸为 32 μm,垂直于轧制方向的晶粒尺寸为 16 μm。图 4 d)为深冷处理 9 h 的焊接接头,可以看出,小晶粒的数量不断增多,而且晶粒组织分布也相对均匀。经测量,平行于轧制方向的晶粒尺寸为 26 μm,垂直于轧制方向的晶粒尺寸为 13 μm。图 4 e)为深冷处理 12 h 后的焊接接头,可以看出,微观组织变得更细小且均匀。经测量,平行于轧制方向的晶粒尺寸为 28 μm,垂直于轧制方向的晶粒尺寸为 12 μm。由 HAZ 晶粒尺寸发现,深冷处理对接头晶粒细化具有明显的影响,随着深冷时间的增加,晶粒尺寸呈现逐渐减小的变化趋势。

热胀冷缩是金属固态物质所特有的性质,因此在深冷处理过程中 FSW 接头中会产生一定的压应力,导致接头体积发生收缩。根据德拜比热容理论[11]:

$$C_\gamma = \frac{12}{5}\pi^4 R\left(\frac{T}{\theta}\right)^3 。 \tag{1}$$

式中:θ 为金属的德拜温度,对于铝合金而言,θ=390 K;R 为气体常数;C_γ 为比热容;T 为绝对温度。

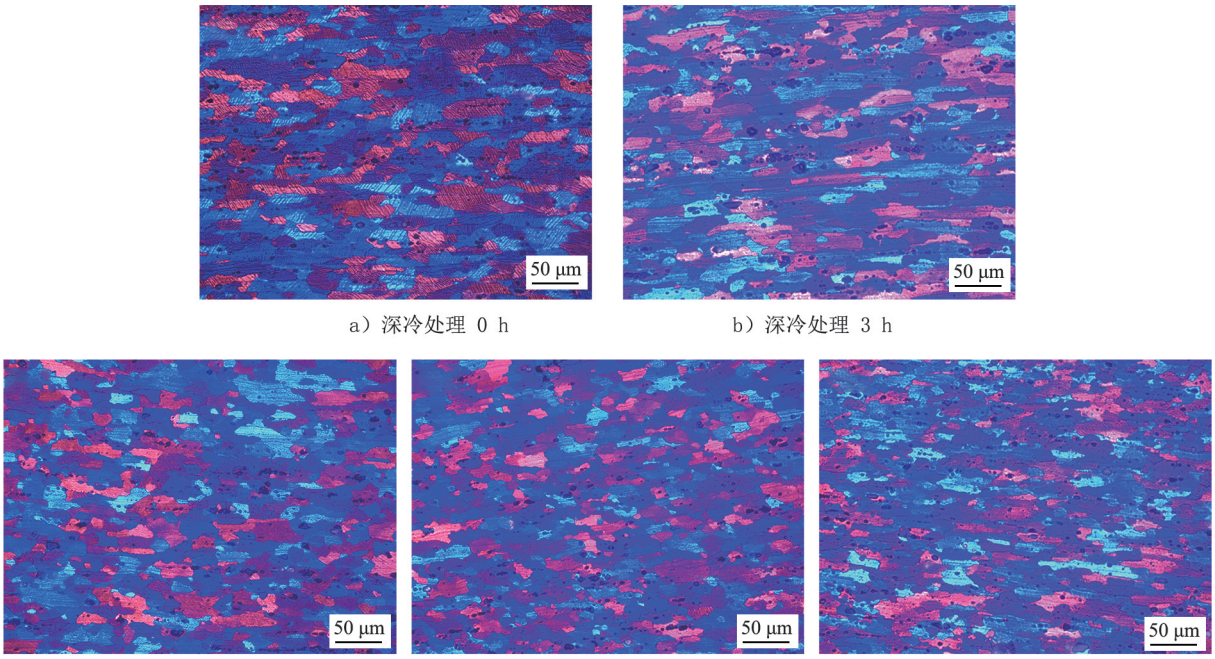
比热容 C_γ 和热膨胀系数 α_γ 之间满足关系:

$$\frac{\alpha_\gamma}{\alpha_{293}} = \frac{C_\gamma}{C_{293}} 。 \tag{2}$$

根据应力方程:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T , \tag{3}$$

式中:σ 为应力;E 为材料的弹性模量;α 为热膨胀系数;ΔT 为开尔文温度的变化值。将焊接接头从室温浸



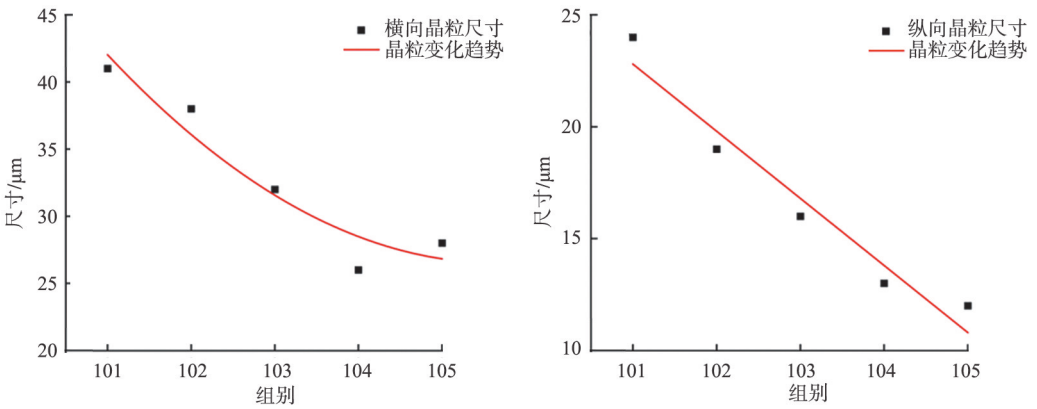
a）深冷处理 0 h　　b）深冷处理 3 h

c）深冷处理 6 h　　d）深冷处理 9 h　　e）深冷处理 12 h

图 4　不同深冷处理时间的接头 HAZ 金相组织

Fig.4　Microstructure of HAZ with different DCT time

入液氮中，E 与 ΔT 分别取 70 GPa 和 221 K，计算得出接头内部金属压应力为 211 MPa，在压应力的作用下，金属晶粒体积收缩，晶粒体积发生微塑性变形，从而导致位错的增殖，内应力增加。随着深冷时间的不断增加，晶体内部应变能不断增加，在回复到室温后，位错会通过滑移或攀移的方式产生同号位错重新排列、异号位错相互抵消的结果，最终使位错墙转化为晶界，从而导致大晶粒碎化成为不同的小晶粒，应变能得到释放[12-13]。对接头的 HAZ 区域的晶粒尺寸进行计算拟合，晶粒尺寸随深冷时间的变化如图 5 所示，可以看出，深冷处理导致晶粒明显细化，而且晶粒尺寸随着深冷时间的增加呈现不断变小的趋势。



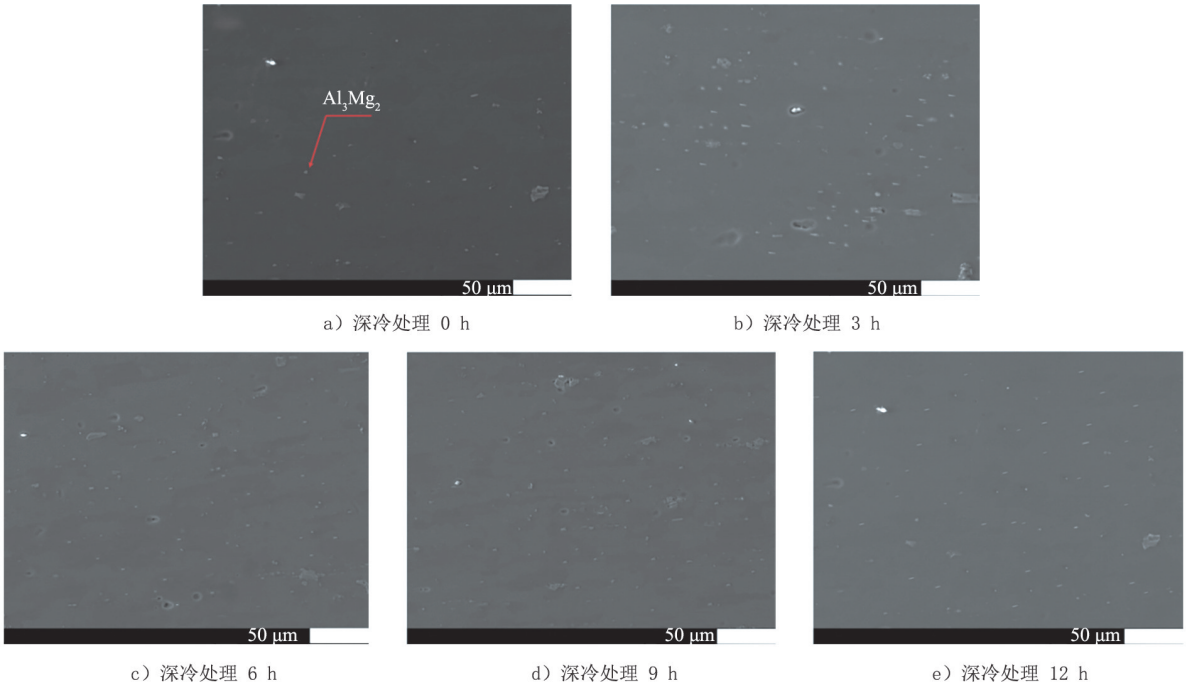
a）横向晶粒尺寸图　　b）纵向晶粒尺寸图

图 5　不同深冷时间 HAZ 晶粒尺寸变化曲线图

Fig.5　Curve of HAZ grain size with different DCT time

2.2　深冷处理时间对接头组织析出相的影响

深冷处理不仅影响接头的晶粒尺寸，还造成晶粒内部溶解度下降，促进第二相的析出[14]。图 6 a）为未经过深冷处理（0 h）的 FSW 接头组织，可以看出，只有少量零散的白色颗粒状析出相 β-Al_3Mg_2 分布在基体上。图 6 b）为浸入液氮中深冷处理 3 h 后的 FSW 接头组织，可以发现，经过深冷处理后，白色颗粒状析出相的数量剧增，而且呈聚集分布。图 6 c）为深冷处理 6 h 后的 FSW 接头组织，可以发现，白色颗粒状析出相的数量虽然没有发生变化，但是析出相的分布逐渐均匀化。图 6 d）和 6 e）分别为深冷处理 9 h 和 12 h 的焊接接头，可以发现，随着深冷时间的延长，白色颗粒状析出相的分布变得更加均匀，呈弥散分布，数量基本保持不变。



a）深冷处理 0 h　b）深冷处理 3 h

c）深冷处理 6 h　d）深冷处理 9 h　e）深冷处理 12 h

图 6　不同深冷时间下接头第二相变化图

Fig.6　Microstructure change of the second phase of the joint with different DCT time

当焊接接头浸入液氮中，在压应力的作用下，晶格发生收缩，随着温度的降低，Mg 与 Si 等溶质原子在 Al 基体内的极限固溶度也相应降低。经过深冷处理后，焊接接头中的过饱和点缺陷和位错在低温下发生扩散并和溶质原子相互作用，导致金属化合物沿位错线和晶界析出[15]。试验对未经过深冷处理(0 h)和深冷处理 12 h 后的焊接接头分别进行了 X 射线衍射试验分析，如图 7 所示。

从图 7 可以看出，经过深冷处理之后，X 射线衍射峰的位置没有发生变化，说明在经过深冷处理之后没有新相的生成，焊接接头仍然由基体 α-Al 和金属化合物 β-Al_3Mg_2 组成。但是在经过深冷处理之后，析出相衍射峰的强度发生了明显提升，说明深冷处理有助于 β-Al_3Mg_2 析出相的析出。

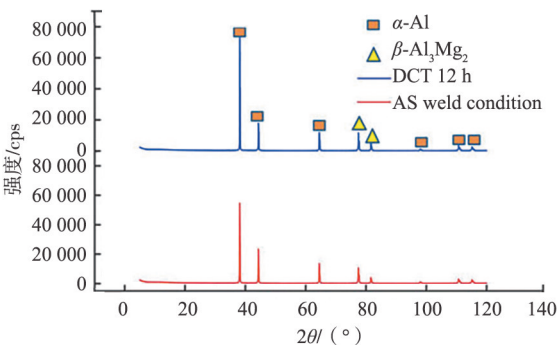


图 7　未经过深冷处理和深冷处理 12 h 焊接接头 X 射线衍射图

Fig.7　X-ray diffraction of FSW joints without DCT and with DCT for 12 h

2.3　深冷时间对显微硬度的影响

深冷处理不仅能改变金属的微观组织，对接头显微硬度也造成影响，其显微硬度变化如图 8 所示，不同深冷时间条件下的硬度测试点均位于焊缝横截面的中心位置。从图 8 可以看出，深冷处理接头的显微硬度分布均呈“W”型，在未经深冷处理(0 h)的接头中，BM 的平均显微硬度值为 90.7 HV，NZ 的平均显微硬度为 90.3 HV，HAZ 为焊接接头的软化区，硬度值最低，为 83.5 HV，而 TMAZ 的显微硬度要介于 NZ 和 HAZ 之间，为 85.8 HV。5A06 铝合金 FSW 接头的硬度与晶粒尺寸和析出相的分布情况有关，由霍尔佩奇关系[16]可知，晶粒尺寸越小，焊接接头的硬度越大，同时析出相对硬度也有影响，析出相可以阻碍位错的运动，从而使材料的硬度增加。这也和微观组织实验的结果相吻合，HAZ 和 TMAZ 发生部分再结晶，导致晶粒分布不均匀和晶粒粗大，从而使得显微硬度较低。

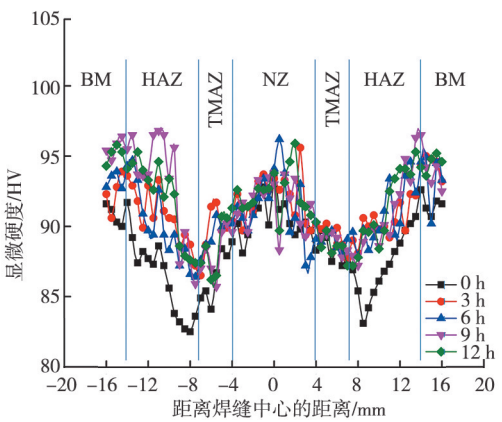


图 8　不同深冷时间下的焊接接头显微硬度

Fig.8　Micro-hardness of joints with different DCT time

从图 8 中可以看出，焊缝区的显微硬度值随着深冷时间的增加呈现出先增加后减小再趋于平缓的变化趋势，但与未经过深冷处理(0 h)接头的硬度相比，经过深冷处理后的接头的显微硬度均有所增加。为了研究深冷处理对 FSW 接头各区域硬度的影响规律，计算了各区域显微硬度的平均值，如表 3 所示，并对 FSW 接头各区域硬度值随深冷时间的变化规律进行了拟合，如图 9 所示。

表 3　FSW 接头在不同深冷处理时间下各区域显微硬度平均值

Tab.3　Average value of micro-hardness of FSW joint with different DCT time

接头区域	显微硬度平均值/HV				
	深冷处理 0 h	深冷处理 3 h	深冷处理 6 h	深冷处理 9 h	深冷处理 12 h
BM	90.7	92.4	93.3	95.6	95.2
HAZ	83.5	91.1	90.3	93.6	92.3
TMAZ	85.8	89.3	88.9	87.7	88.2
NZ	90.3	91.9	91.3	91.5	92.2

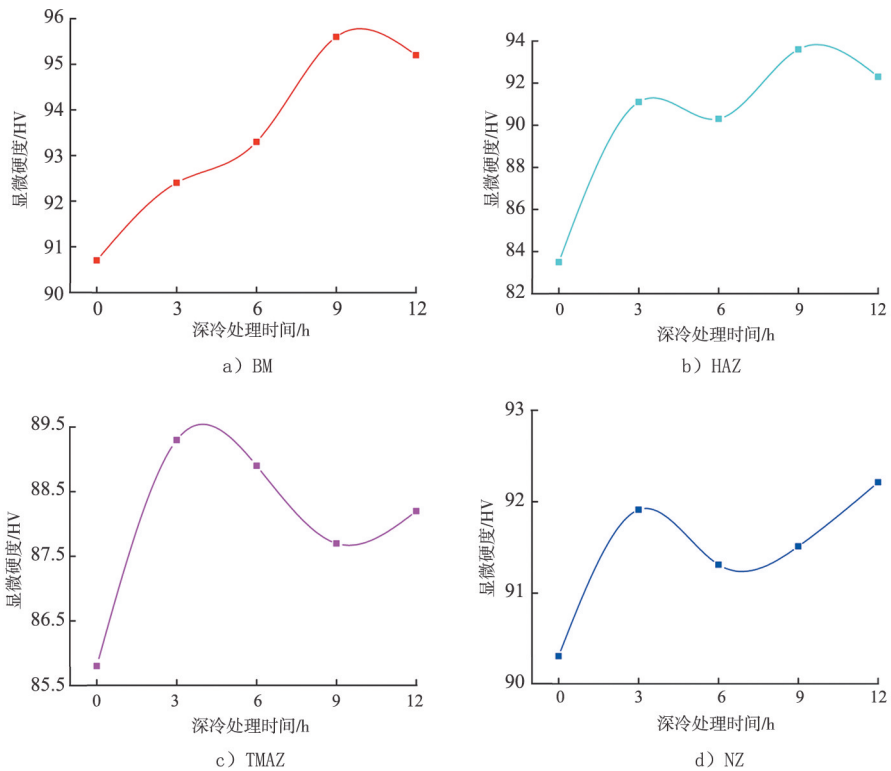


图 9　FSW 接头各区域显微硬度平均值随深冷处理时间的变化趋势图

Fig.9　Trend diagram of average micro-hardness of FSW joint with DCT time

从图 9 可以明显发现，深冷处理 3 h 时，各区域焊接接头的显微硬度发生了明显增加，这是由于在深冷处理过程中，短时间的深冷处理析出相分布呈聚集状态，与 Al 基体相比，β-Al_3Mg_2 为硬而脆的颗粒，其显微硬度值远远大于基体晶粒的显微硬度值[17]。随着深冷时间的增加，显微硬度值略有降低后趋于平稳，这是因为随着深冷时间的逐渐增加，析出相分布逐渐均匀，显微硬度开始降低，但均高于深冷处理(0 h)的硬度。除此之外，晶粒细化也会对显微硬度的提升起到一定作用，随着深冷时间的延长，晶粒尺寸不断变细，导致显微硬度也呈现增加的趋势。

2.4　深冷时间对接头拉伸性能的影响

对深冷处理的接头进行拉伸试验分析，图 10 为不同深冷时间下的拉伸力学性能参数曲线图。未经过深冷处理(0 h)接头的抗拉强度为 358.7 MPa，伸长率为 13.9%。经过深冷处理后，抗拉强度随深冷时间的增加呈逐渐增大的趋势，并且在深冷处理 12 h 时抗拉强度达到最大值 385.3 MPa，较未经过深冷处理(0 h)的接头抗拉强度增加了 7.4%。但是研究发现，接头伸长率随着深冷时间的增加呈现先降低后升高的趋势，深冷处理 3 h 和 6 h 时焊接接头的伸长率均出现了明显下降，结合晶粒尺寸和析出相分析发现，此时析出相呈现聚集状态；而随着深冷时间的不断增加，金属晶粒尺寸减小和析出相分布更为分散，使得接头伸长率又得到了明显提升，在深冷处理 12 h 时焊接接头的伸长率达到了 17.2%，与未经过深冷处理(0 h)的焊接接头相比，

伸长率增加了 23.7%。可见,深冷处理对 FSW 接头伸长率的提升效果明显[10]。

在深冷处理中,接头内部会产生较强的压应力,在压应力的作用下金属体积收缩,发生微塑性变形,从而导致焊接接头内部产生大量位错,回复到室温后,位错之间的相互作用导致焊接接头抗拉强度提高。从图 10 还可以看出,深冷处理 9 h 后,焊接接头的强度大幅上升,塑性也有一定程度的提高。这是由于在深冷处理回复室温后,大量的位错移动堆积形成新的晶界,使大晶粒破碎成小晶粒,这种晶粒的碎化导致焊接接头强度和塑性提高[18-19]。

在拉伸试验的基础上,利用扫描电镜对焊接接头断裂机理进行了研究,图 11 为焊接接头在不同深冷时间下的断口形貌,断口扫描从断口的中间位置进行拍摄。

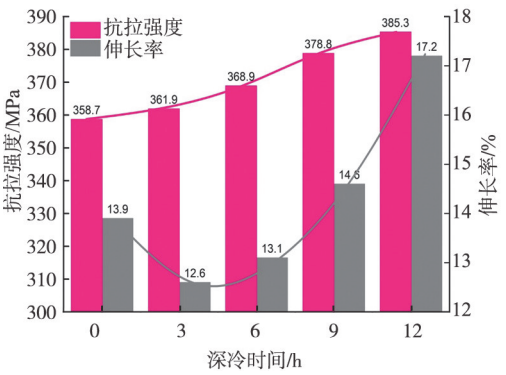
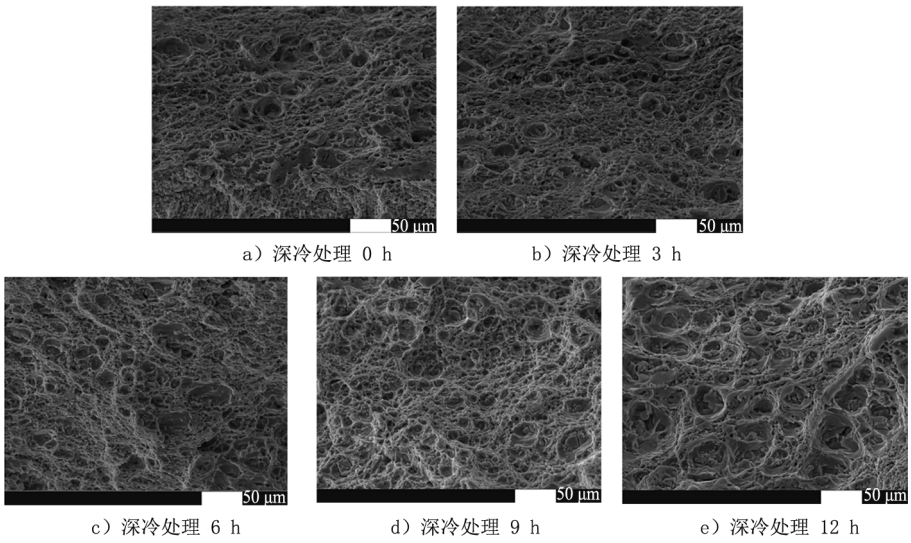


图 10 不同深冷时间的焊接接头抗拉强度及伸长率

Fig.10 Tensile strength and elongation of welded joints at different DCT time



a) 深冷处理 0 h b) 深冷处理 3 h

c) 深冷处理 6 h d) 深冷处理 9 h e) 深冷处理 12 h

图 11 不同深冷时间下的断口形貌

Fig.11 Fracture morphology with different DCT time

从图 11 可以明显发现,焊接接头拉伸断口的形貌发生了明显变化。从图 11 a)可以看出,未经过深冷处理(0 h)的焊接接头的拉伸断口有大量的撕裂棱和极少数的韧窝,而且韧窝的尺寸较小,分布不均匀;经过短时间深冷处理后,韧窝数量有些许增多,但是分布不均匀,如图 11 b)和图 11 c)所示。但是,随着深冷处理时间的继续增加,韧窝数量逐渐增加,韧窝尺寸明显变大,分布变均匀,而且韧窝数量和大小随着深冷时间的增加而不断增加,如图 11 d)—图 11 e)所示,韧窝越大,材料抗施加载荷的能力就越强,断裂前的塑性变形量就越大,从而提高了材料的力学性能。这是因为,一方面大的韧窝是由小的韧窝演变而来的,具有较强的塑性[20];另一方面,未经深冷处理的焊接接头的抗载荷能力较低,拉伸断口形貌的韧窝尺寸较小,塑性较差,力学性能较差。

3 结 论

通过对 5A06-H112 铝合金 FSW 接头进行深冷处理,研究了深冷处理时间对接头微观组织和力学性能的影响,得出如下结论。

1)深冷处理对 FSW 接头晶粒具有细化作用,随着深冷时间的增加,金属晶粒尺寸逐渐减小,深冷处理 12 h 的晶粒较未深冷处理的晶粒平均尺寸减小约 40%。

2)经过深冷处理的 FSW 接头中析出相的数量增加,深冷处理 3 h 后析出相数量达到峰值,并呈聚集状态分布,随着深冷时间的不断增加,析出相的分布更加均匀。

3)深冷处理后 FSW 接头的抗拉强度和伸长率均得到提高,深冷处理 12 h 时,焊接接头抗拉强度和伸长率分别为 385.3 MPa 和 17.2%,较未经过深冷处理的焊接接头分别增加了 7.4%和 23.7%。

本文针对高强铝合金焊接过程中存在的接头软化问题，研究了深冷处理对 5A06 铝合金 FSW 接头微观组织、晶粒细化、析出相变化、力学性能及断裂方式的影响规律。采用深冷处理方法可以很好地改善接头组织和性能，但深冷处理对接头位错产生、滑移或攀移的表征还有待作进一步的分析。因此，后续还要针对位错产生的内在动力及影响规律进行深入研究。

参考文献/References：

[1] 李迎，张玉芝，张仲宝，等.热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊接头组织及力学性能的影响[J].宇航材料工艺，2018，48(6)：49-53.
LI Ying，ZHANG Yuzhi，ZHANG Zhongbao，et al.Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high-strength aluminum alloy friction stir welding joints[J].Aerospace Materials & Technology，2018，48(6)：49-53.

[2] 赵毅.焊后热处理对 7N01-T4 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[D].济南：山东大学，2019.
ZHAO Yi.Effect of Post-weld Heat Treatment on Microstructure and Properties of 7N01-T4 Aluminum Alloy Friction Stir Welded Joint[D].Jinan：Shandong University，2019.

[3] 王文安.铝合金焊接头的软化及改善措施分析[J].中国设备工程，2021(12)：73-74.

[4] 王泽荫.铝合金焊接技术现状研究[J].世界有色金属，2021(10)：4-5.
WANG Zeyin.Research on status of the aluminum alloy welding technology[J].World Nonferrous Metals，2021(10)：4-5.

[5] 刘轩之，翁泽钜，王凯凯，等.深冷处理对 7050 铝合金尺寸稳定性及断裂韧性的影响[J].金属热处理，2019，44(9)：103-107.
LIU Xuanzhi，WENG Zeju，WANG Kaikai，et al.Effect of cryogenic treatment on dimensional stability and fracture toughness of 7050 aluminum alloy[J].Heat Treatment of Metals，2019，44(9)：103-107.

[6] 高文林，王向杰，李国爱，等.－180 ℃深冷处理对 7A99 铝合金峰值时效强韧性能与析出行为的影响[J].稀有金属材料与工程，2019，48(9)：2937-2943.
GAO Wenlin，WANG Xiangjie，LI Guoai，et al.Effect of deep cryogenic treatment of －180 ℃ on strength and toughness properties and precipitation behavior of 7a99 aluminum alloy[J].Rare Metal Materials and Engineering，2019，48(9)：2937-2943.

[7] 吉学英，晋芳伟.铝合金深冷处理研究进展[J].热加工工艺，2019，48(16)：25-28.
JI Xueying，JIN Fangwei.Research progress on deep cryogenic treatment of aluminum alloys[J].Hot Working Technology，2019，48(16)：25-28.

[8] 刘强，张南南，张亚雄.深冷处理对 6061 铝合金冷金属过渡焊接接头组织和力学性能的影响[J].热加工工艺，2017，46(19)：244-246.
LIU Qiang，ZHANG Nannan，ZHANG Yaxiong.Effect of cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy CMT welding joint[J].Hot Working Technology，2017，46(19)：244-246.

[9] 季凯，倪赓，李小兵，等.深冷处理对 6005A 铝合金焊接接头组织与性能的影响[J].金属热处理，2016，41(12)：127-130.
JI Kai，NI Geng，LI Xiaobing，et al.Effect of cryogenic treatment on microstructures and mechanical properties of welded joint of 6005A aluminum alloy[J].Heat Treatment of Metals，2016，41(12)：127-130.

[10] 靳鹏飞，吴志生，高珊，等.深冷处理对 5A06 铝合金焊接接头组织与性能的影响[J].焊接技术，2011，40(1)：8-10.
JIN Pengfei，WU Zhisheng，GAO Shan，et al.Effect of deep cryogenic treatment on the microstructures and properties of welded joint of 5A06 aluminum alloy[J].Welding Technology，2011，40(1)：8-10.

[11] 晋芳伟.深冷处理改善 Al-Si 合金性能及机理研究[J].云南农业大学学报，2005，20(5)：729-733.
JIN Fangwei.Study on improving performance of Al-Si alloy by deep cryogenic treatment and its mechanism[J].Journal of Yunnan Agricultural University，2005，20(5)：729-733.

[12] 李宏达，蒋显全，何洪，等.深冷处理时间对 3102H18 铝箔组织及力学性能的影响[J].功能材料，2009，40(12)：2031-2033.
LI Hongda，JIANG Xianquan，HE Hong，et al.Influence of cryogenic treatment time on microstructure and mechnical properties of 3102H18 alloy[J].Journal of Functional Materials，2009，40(12)：2031-2033.

[13] 汤光平，黄文荣.循环处理对铝合金力学性能和组织结构的影响[J].金属热处理，1998，23(5)：36-38.
TANG Guangping，HUANG Wenrong.Effect of cyclic treatment on mechanical properties and microstructure of Al-alloys[J].Heat Treatment of Metals，1998，23(5)：36-38.

[14] 赵菲.AZ31B 镁合金 TIG 焊接接头的深冷强化机理[D].太原：太原科技大学，2012.

[15] 陈鼎，黎文献.铝和铝合金的深冷处理[J].中国有色金属学报，2000，10(6)：891-895.
CHEN Ding，LI Wenxian.Cryogenic treatment of Al and Al alloys[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2000，10(6)：891-895.

[16] 王贵雷.热处理对 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头微观组织及力学性能的影响[D].太原：太原理工大学，2017.
WANG Guilei.The Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir-welded AZ31 Magnesium Alloy Joints Subjected to Post-weld Heat Treatment[D].Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2017.

[17] ATES H，OZDEMIR A T，UZUN M，et al.Effect of deep sub-zero treatment on mechanical properties of AA5XXX aluminum plates adjoined by MIG welding technique[J].Scientia Iranica B，2017，24(4)：1950-1957.

[18] LIU Kun，CHEN Xizhang，SHEN Qingkai，et al.Microstructural evolution and mechanical properties of deep cryogenic treated Cu-Al-Si alloy fabricated by cold metal transfer (CMT) process[J].Materials Characterization，2020，159(1)：1-9.

[19] SUN Jianqiu，MA Yue，GAO Chong，et al.Comprehensive tensile properties improved by deep cryogenic treatment prior to aging in friction-stir-welded 2198 Al-Li alloy[J/OL].Rare Metals，[2019-04-02].https://doi.org/10.1007/s12598-019-01214-5.

[20] 汤智茂，湛利华，徐永谦，等.时效热处理对 2219 铝合金搅拌摩擦焊焊缝组织性能的影响[J].塑性工程学报，2021，28(5)：134-144.
TANG Zhimao，ZHAN Lihua，XU Yongqian，et al.Effect of aging heat treatment on microstructure and properties of friction stir welding seam of 2219 aluminum alloy[J].Journal of Plasticity Engineering，2021，28(5)：134-144.