

DC04 深冲汽车钢组织、性能及织构演变规律

张 娜^{1,2}, 赵美英^{1,2}, 史文义^{1,2}, 杨维宇^{1,2}, 崔成波^{1,2}, 郝娟娟^{1,2}, 郎荣彪^{1,2}

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章采用扫描电子显微镜 EBSD 分析仪、X 射线衍射仪和金相显微镜研究了 DC04 深冲汽车钢不同工艺状态的显微组织及微观、宏观织构, 对 0.6~2.0 mm 厚度试验钢横向、纵向及 45° 方向的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、 n 值、 r 值进行统计分析。结果表明, 厚度规格为 0.6~1.0 mm 时, 试验钢横向、纵向及 45° 方向拉伸性能、 n 值及 r 值波动大, 开裂件占比为 79.7%; 厚度规格为 1.2~2.0 mm 时, 试验钢横向、纵向及 45° 方向拉伸性能、 n 值及 r 值等性能稳定性提高, 开裂件占比为 20.3%。热轧态试验钢显微组织以等轴晶铁素体为主, 表层主要有形变织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{554\} \langle 225 \rangle$, 次表层有 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 形变织构, 心部以 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 旋转立方织构为主; 酸轧态试验钢显微组织以纤维状铁素体为主, 主要织构为 α 织构 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 γ 织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 λ 织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$; 退火态试验钢及成品试验钢的显微组织以再结晶的铁素体为主, 退火态试验钢以较强的 γ 织构 ($\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 110 \rangle$) 及 α 织构组成, 成品试验钢以 γ 织构 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 为主。成型性能良好的试验钢宏观织构为 γ 织构 ($\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$), 强度在 10 左右; 成型性较差的试验钢对深冲有利的宏观织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 占比较少, 主要为 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构, 强度分别为 9.00 和 8.54。

关键词: DC04; 成型性能; 织构; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)05-0043-07

Evolution Rules of Microstructure, Properties and Texture for DC04 Deep Drawing Automobile Steel

Zhang Na^{1,2}, Zhao Meiyang^{1,2}, Shi Wenyi^{1,2}, Yang Weiyu^{1,2},
Cui Chengbo^{1,2}, Hao Juanjuan^{1,2}, Lang Rongbiao^{1,2}

(1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In this paper, the microstructure, microtexture and macrotexture of DC04 deep drawing automobile steel in different process states are studied, transverse and longitudinal yield strength, tensile property, percentage elongation after

收稿日期: 2025-08-22

基金项目: 内蒙古 2024 年中央引导地方科技发展资金项目 (2024ZY0099)。

作者简介: 张 娜 (1988-), 女, 内蒙古包头市人, 高级工程师, 现从事失效分析和扫描电子显微镜检测工作。

fracture, n value and r value as well as which in direction of 45° of the test steel with thickness of 0.6 ~ 2.0 mm are with statistical analysis. The results indicated that the fluctuation of transverse and longitudinal tensile property, n value and r value and which in direction of 45° of the test steel with thickness of 0.6 ~ 1.0 mm was great as well as proportion of cracked parts was 79.7%; the stability of such properties as transverse and longitudinal tensile property, n value and r value and which in direction of 45° of the test steel with thickness of 1.2 ~ 2.0 mm was improved as well as proportion of cracked parts was 20.3%. The microstructure of as-hot-rolled test steel is mainly equiaxed crystal ferrite, surface layer is with deformation textures $\{001\} \langle 110 \rangle$, $\{112\} \langle 110 \rangle$ and $\{554\} \langle 225 \rangle$, subsurface layer is with deformation texture $\{111\} \langle 112 \rangle$ as well as the core is mainly with rotating cubic texture $\{001\} \langle 110 \rangle$; the microstructure of acid-rolled test steel is mainly fibrous ferrite, main textures are α texture $\{112\} \langle 110 \rangle$, γ texture $\{111\} \langle 110 \rangle$ and λ texture $\{001\} \langle 110 \rangle$; the microstructure of annealed test steel and finished product is mainly recrystallized ferrite, annealed test steel is composed of stronger γ texture ($\{111\} \langle 112 \rangle$ and $\{111\} \langle 110 \rangle$) and α texture, finished product is mainly composed of γ texture $\{111\} \langle 112 \rangle$. The macrotexture of test steel with good formability is γ texture ($\{111\} \langle 110 \rangle$ and $\{111\} \langle 112 \rangle$) as well as intensity is around 10; the macrotexture of test steel with poorer formability is mainly $\{100\} \langle 011 \rangle$ and $\{112\} \langle 110 \rangle$, intensities are 9.00 and 8.54 respectively as well as proportion of macrotexture $\{111\} \langle 110 \rangle$ favorable to deep drawing is smaller.

Key words: DC04; formability; texture; mechanical property; microstructure

深冲汽车钢因具有低屈强比、高塑性应变比和高应变硬化指数等特点,被广泛应用于汽车外壳及零件的制造。随着深冲汽车钢的广泛使用,多种问题逐渐显现,如表面缺陷、冲压开裂及性能不稳定等。其中冲压开裂包括边缘开裂、内部开裂和表面开裂,而内部开裂隐藏在产品内部不易被发现,成为用户质量异议的主要问题。分析发现导致冲压开裂的原因除粗大夹杂物、用户冲压工艺不当外,多数为力学性能不均匀或是组织中生成对冲压成型性能不利的织构。

深冲汽车钢通常需经过热轧、酸轧、连续退火等生产工序获得成品,每道工序的工艺参数均对其组织和性能造成影响。因此,研究不同生产工序深冲汽车钢显微组织、织构演变和遗传规律与其力学性能之间的关系,对于改善深冲汽车钢组织、性能尤为重要。

织构是影响深冲汽车钢成型性能的关键因素, $\langle 111 \rangle // ND$ 织构对于深冲汽车钢成型性能至关重要。汽车钢实际生产中可通过抑制 $\{100\}$ 不利织构、促进有利织构(如 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{554\} \langle 225 \rangle$)来获得良好的深冲性能^[1]。本文对厚度规格为 0.6 ~ 2.0 mm 的 DC04 深冲汽车钢的力学性能和冲压开裂比例进行统计分析,并对不同工序、不同规格试验钢的显微组织及织构遗传、演变规律进行分析,找到它们之间的特定规律,推动高性能深冲钢的研发及应用。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用某钢厂生产的厚度规格为 0.6 ~ 2.0 mm 的 DC04 深冲汽车钢(以下称试验钢)作为试验材料,试验钢主要化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Al
0.04	0.02	0.17	0.009	0.008	0.034

1.2 试验方法

采用 INSTRON 5982 型拉伸试验机对厚度规格为 0.6 ~ 2.0 mm 的 DC04 试验钢母材进行横向、纵向及 45° 方向的屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 及断后伸长率 A_{80} 检测。

采用蔡司 Axio Observer D1m 金相显微镜对厚度规格为 0.8 mm 的成品试验钢、厚度规格为 4.0 mm 的热轧态试验钢、厚度规格为 1.0 mm 的酸轧态和连续退火态试验钢的显微组织进行分析。

采用钼丝切割机将试验钢板切割成 5 mm × 5 mm 的试样,经过 200 目到 1400 目砂纸磨制和机械抛光机、电解抛光机等设备抛光,超声波清洗仪清洗干净后备用。

采用蔡司 Sigma500 扫描电子显微镜的 Oxford Nordlys Nano EBSD 分析仪对各生产工序的试样进行分析,多视场采集统计 500 ~ 1 000 个晶粒,利用 channel5 软件进行数据处理,获取织构类型图和

ODF 图信息。

采用帕纳科 X'pert Pro MPD 型 X 射线衍射仪对热轧态、酸轧态、连续退火态试验钢以及厚度规格为 0.8 mm、1.5 mm 的成品试验钢的宏观织构进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 不同厚度规格试验钢综合力学性能分析

深冲汽车钢应具备良好的深冲性能,材料的平均塑性应变比是衡量材料深冲性能的重要指标,其数值反映深冲钢在深冲成型过程中抵抗厚度方向变形的难易程度,平均塑性应变比越大表明材料在厚度方向上的变形难度越大,对冲压成型越有利。

塑性应变比用各向异性度 Δr 表示,反映金属材料各项异性的程度,通常用此参数来衡量材料的凸耳效应^[2],如公式(1)所示。

$$\Delta r = (r_{0^\circ} + r_{90^\circ})/2 - r_{45^\circ} \quad (1)$$

式中: r_{0° 、 r_{90° 、 r_{45° 分别指材料在单向拉伸应力状态下,试样纵向、横向及 45° 方向真实塑性应变比。

如式(1)所示, Δr 值越大,表明材料的方向性越强,塑性应变分布的不均性越高,越不利于冲压成型。因此,减小 Δr 能够有效减少冲压成型的开裂率。

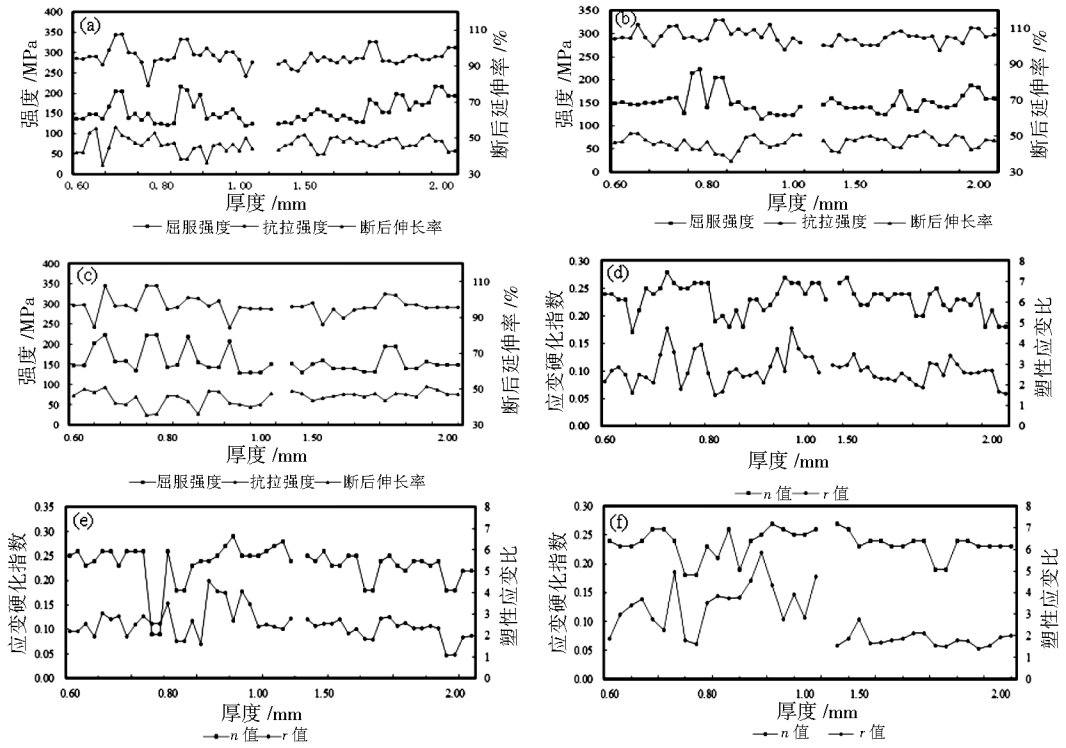
钢板的织构类型对其 r 值及 Δr 值有很大的影响,提高深冲汽车钢有利织构的占比是优化其深冲性能的有效途径。分析某钢厂生产的 DC 系列深冲钢冲压开裂失效案例,冲压成型开裂主要集中在厚度规格为 0.6 ~ 2.0 mm 的产品。对某钢厂近年来 128 件 DC04 冲压开裂件进行统计分析,母材厚度规格为 0.6 ~ 1.0 mm 的开裂件有 102 件,占比为 79.7%,母材厚度规格为 1.2 ~ 2.0 mm 的开裂件有 26 件,占比为 20.3%。对不同厚度规格试验钢的综合力学性能进行分析。针对冲压过程中出现开裂的深冲钢,分析与其对应的母材力学性能,如图 1 所示,其中图 1(a) ~ (c) 分别表示 0.6 ~ 2.0 mm 厚度试验钢横向、纵向及 45° 方向屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A_{80} 等三项力学性能的情况,图 1(d) ~ (f) 分别表示 0.6 ~ 2.0 mm 厚度试验钢横向、纵向及 45° 方向应变硬化指数 n 值、塑性应变比 r 值的情况。

如图 1(a) ~ (c) 所示,母材厚度为 0.6 ~ 1.0 mm 的试验钢横向、纵向及 45° 方向的屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A_{80} 数值的波动较大,其中横向及 45° 方向的三项力学性能波动更为严重。母材厚度在 1.2 ~ 2.0 mm 区间,随着厚度增加,试验钢横向、纵向及 45° 方向的屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A_{80} 数值的波动减小,稳定性提高。如图 1(d) ~ (f) 所示,试验钢 n 值、 r 值的变化和屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A_{80} 的波动规律相似,当母材厚度为 0.6 ~ 1.0 mm 时,三个方向的 n 值、 r 值波动较大,横向及 45° 方向 r 值的波动范围为 0.05 ~ 0.30;母材厚度为 1.2 ~ 2.0 mm 时,试验钢三个方向的 n 值、 r 值趋于稳定。以上结果表明,适当提高母材厚度,能够有效提高横向、纵向及 45° 方向的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率及 n 值、 r 值等性能的稳定性,从而提高试验钢冲压成型性能。对屈服强度、抗拉强度、断后伸长率等三项力学性能指标进行综合分析,高屈强比、低塑性应变比和低应变硬化指数不利于冲压成型,容易引起冲压开裂。

2.2 试验钢显微组织分析

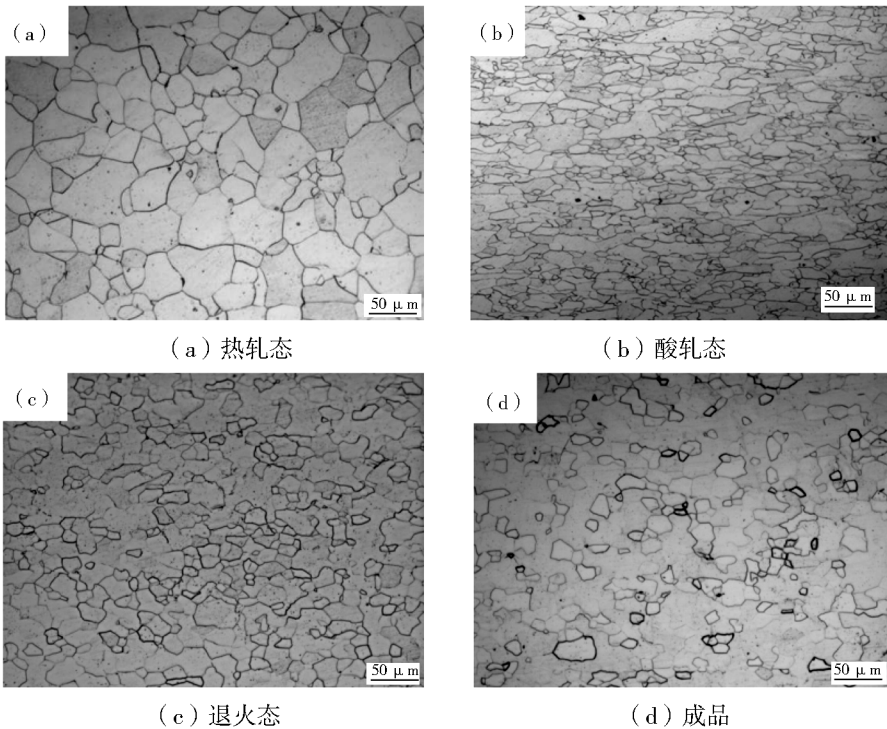
采用蔡司 Axio Observer D1m 金相显微镜对 4.0 mm 厚度热轧态、1.0 mm 厚度酸轧态和退火态、0.8 mm 厚度成品试验钢进行显微组织分析,如图 2 所示。

DC04 试验钢的晶粒大小及形态主要取决于冷轧及退火工艺。如图 2(a) 所示,热轧态试验钢的显微组织以等轴晶状铁素体为主,晶粒尺寸在 20 ~ 60 μm 范围内,晶粒粗大。如图 2(b) 所示,酸轧态试验钢的显微组织以纤维状铁素体为主。酸轧板经过连续退火后,晶粒发生回复及再结晶,晶粒尺寸有所增大,组织均匀性较差,如图 2(c) 所示。在退火过程中,晶粒经历回复、再结晶和晶粒长大三个阶段,其中再结晶过程的原动力主要是畸变能,在相同的退火工艺下,畸变能取决于冷轧压下率,压下率越大畸变能越高,再结晶越容易进行,同时变形越大,组织中缺陷也越多,从而增加了形核点,晶粒尺寸就越细小均匀,最终成品随压下率增加晶粒越细小,如图 2(d) 所示。



(a) 横向 $R_{p0.2}$ 、 R_m 、 A_{80} ; (b) 纵向 $R_{p0.2}$ 、 R_m 、 A_{80} ; (c) 45° 方向 $R_{p0.2}$ 、 R_m 、 A_{80} ;
 (d) 横向 n 值、 r 值; (e) 纵向 n 值、 r 值; (f) 45° 方向 n 值、 r 值

图 1 试验钢综合力学性能分析



(a) 热轧态

(b) 酸轧态

(c) 退火态

(d) 成品

图 2 不同工序试验钢显微组织

2.3 不同工序试验钢 EBSD 微观织构特征及演变规律分析

文献研究表明^[2-7],有利织构能够提高汽车钢板材的深冲性能,热轧时奥氏体中的 γ 织构 $\{111\} <112>$ 比例越高越利于冲压变形。热轧时奥氏体发生再结晶相变生成 $\{001\}$ 类型织构, $\{001\}$ 晶面的 $<100>$ 晶向织构垂直于板面,能够降低冲压时钢板厚度方向上的变形抗力。与此同时,体心立方结构中 $<111>$ 晶向织构的抗拉强度最高, γ 织构 $<111> // ND$ 方向的织构会使 Δr 值减小,含量较高的 $\{111\}$ 织构能够提高板材厚度方向的变形抗力,从而提高深冲钢板材的成型性能。因此,获取较多的 γ 织构是提高深冲汽车钢板材冲压性能的有效途径。当 $\Delta r < 0$, α 织构 $\{112\} <110>$ 对深冲钢板材塑性应变比影响较小,在冲压成型过程中不起主导作用,可以通过工艺控制在成品中保留少量的 $\{112\} <110>$ 织构,以减小深冲钢的 Δr 值。 $\{110\} <001>$ 织构相对

于其他织构会导致深冲钢板的 Δr 值增大,影响材料的塑性应变比,因此要关注 $\{110\}$ 织构对深冲汽车钢性能的影响。

为了深入探讨试验钢织构演变及遗传规律,对热轧态、酸轧态、退火态以及成品试验钢的微观织构进行分析,其中热轧态试样进行全厚度方向微观织构分析,对酸轧态、退火态及成品试样进行任意位置的微观织构分析。

热轧态试验钢不同位置的微观织构如图 3 所示。热轧态试验钢表层主要有形变织构 $\{001\} <110>$ 、 $\{112\} <110>$ 和 $\{554\} <225>$,次表层出现很弱的 $\{111\} <112>$ 形变织构,心部主要为 $\{001\} <110>$ 旋转立方织构、 α 织构、 α^* 型织构、黄铜型织构 $\{110\} <112>$ 。试验钢在热连轧工序中塑性变形和动态再结晶交互出现,相互促进或抑制,致使热轧过程形变织构数量虽多,但很微弱,形变和再结晶织构不能很好地发展。

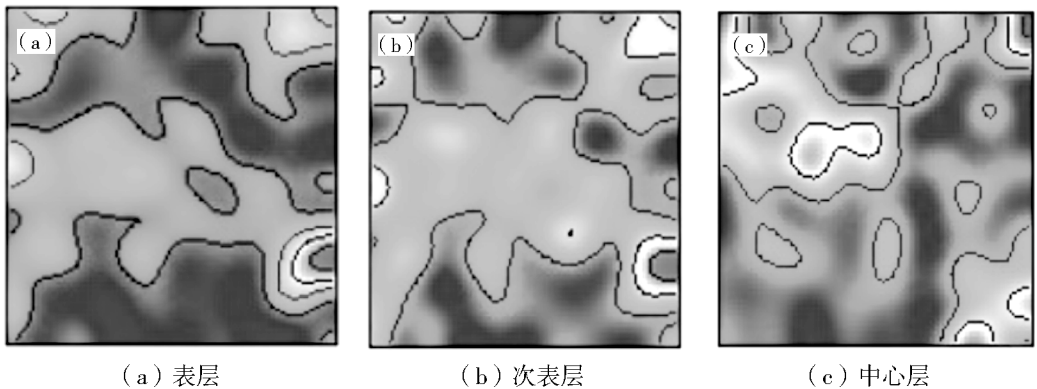


图3 热轧态试验钢不同位置的微观织构

图 4 为酸轧态、连续退火态及成品试验钢的微观织构,图 4(a) 所示酸轧过程受外力作用晶粒内部位错开始滑移,织构强度与压下率成正比,晶粒取向也会发生相应转动,主要由 α 织构 $\{112\} <110>$ 、 γ 织构 $\{111\} <110>$ 和旋转立方织构 $\{001\} <110>$ 组成。连续退火态试验钢微观织构如图 4(b) 所示,主要由较强的 γ 织构 $\{111\} <112>$ 、 $\{111\} <110>$ 和 α^* 织构构成。成品试验钢微观织构如图 4(c) 所示,主要由 γ 取向织构 $\{111\} <112>$ 构成。

2.4 不同工序试验钢宏观织构特征及演变规律分析

相较于微观织构,宏观织构的代表性更强。利用 X'Pert Pro MPD 型 X 射线衍射仪对热轧态、酸轧

态、连续退火态以及 0.8 mm 厚度成品、1.5 mm 厚度冲压开裂的试验钢进行宏观织构分析,如图 5 所示。

图 5(a) 为 $\varphi_2 = 45^\circ$ 方向试验钢热轧态宏观织构分布情况。热轧态试验钢宏观织构分散性较强,强度较弱,主要由立方织构、 α 织构 $\{112\} <110>$ 、 α^* 织构、黄铜型织构 $\{110\} <112>$ 、铜型织构 $\{112\} <111>$ 构成。酸轧态试验钢宏观织构如图 5(b) 所示,主要由较强的 γ 织构 $\{111\} <110>$ 、较弱的 α 织构 $\{112\} <110>$ 和 $\{554\} <225>$ 构成。连续退火态试验钢宏观织构如图 5(c) 所示,主要为 γ 织构 $\{111\} <110>$,强度为 4。冲压成型性能良好的成品试验钢宏观织构如图 5(d) 所示,主要织构为 γ 织

构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$, 强度在 10 左右。对母材 r 值下限、 Δr 值偏高的冲压开裂缺陷试样进行宏观织构分析, 如图 5(e) 所示, 冲压开裂缺陷试样织构主要由 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 组成,

强度分别为 9.00 和 8.54, 而对深冲性能有利的织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 占比较少, 强度较低, 强度在 3.66 ~ 6.60 之间。

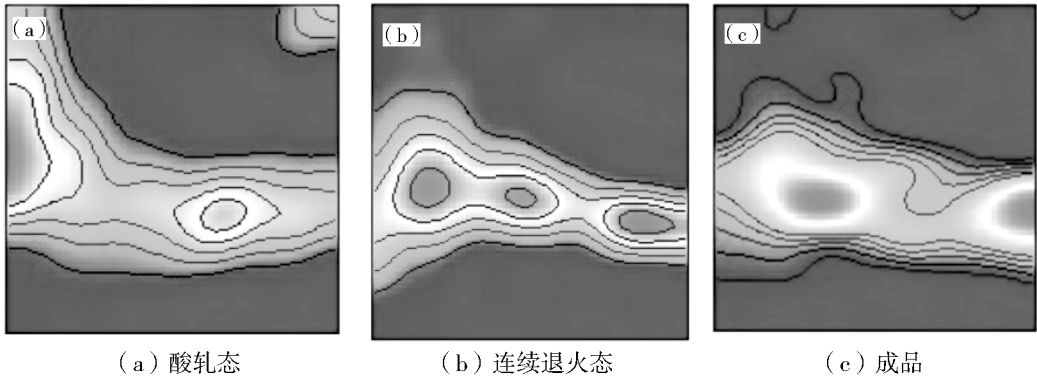


图 4 不同工序试验钢微观织构

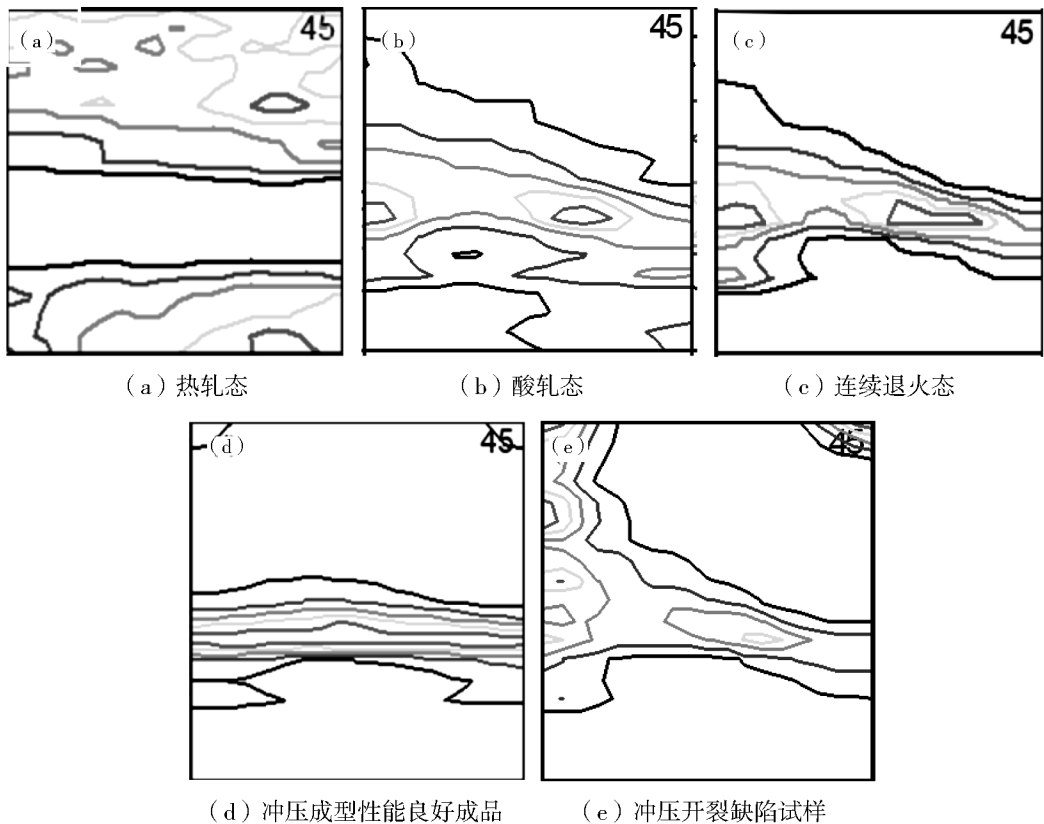


图 5 不同工序试验钢宏观织构 $\varphi_2 = 45^\circ$ ODF 图

总之, 本文利用传统金相显微组织分析技术及材料晶体结构及晶粒取向的宏观、微观表征研究方法, 研究不同工序深冲钢组织和织构演变规律。结

果表明, 在深冲钢生产中可以通过优化工艺抑制 $\{100\}$ 织构和促进 $\{111\}$ 织构来提高产品成型性能和质量。当 Δr 值偏大时, 可以通过优化热轧和冷轧

工艺来改善产品组织、性能,减少冷轧钢带中的不均匀形变带,同时可以通过优化退火工艺来达到抑制 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 织构、促进 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构生长的目的。

3 结论

(1) DC04 试验钢母材厚度规格为 0.6 ~ 1.0 mm 时,其横向、纵向及 45° 方向的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、 n 值及 r 值波动较大,不利于冲压成型,开裂件占比为 79.7%; DC04 试验钢母材厚度规格为 1.2 ~ 2.0 mm 时,其横向、纵向及 45° 方向的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、 n 值及 r 值等性能稳定性提高,开裂件占比为 20.3%。

(2) 金相组织分析结果表明,热轧态试验钢显微组织以等轴晶状铁素体为主,晶粒大小为 20 ~ 60 μm ; 经酸轧后,试验钢晶粒呈扁平化、纤维化;连续退火后,试验钢晶粒发生回复、再结晶及长大;成品试验钢显微组织以再结晶的等轴晶状晶粒为主。

(3) 微观织构研究表明,热轧态试验钢表层织构有 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{554\} \langle 225 \rangle$,次表层织构有 $\{111\} \langle 112 \rangle$,心部主要为 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 旋转立方织构、 α 织构、 α^* 型织构、黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$; 酸轧态试验钢由 α 织构 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 γ 织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和旋转立方织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 构成;连续退火态试验钢由较强的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$ γ 织构及 α 织构构成;成品试验钢由 γ 织构 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 构成。

(4) 宏观织构研究表明,热轧态试验钢宏观织构由立方织构、 α 织构 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 α^* 型织构、黄铜型织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 构成;酸轧态试验钢宏观织构主要由较强的 γ 织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 、较弱的 α 织构 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和

$\{554\} \langle 225 \rangle$ 构成;退火态试验钢宏观织构主要为 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构。冲压成型性能良好的成品试验钢宏观织构主要为 γ 织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$,母材 r 值下限、 Δr 值偏高的 DC04 冲压开裂缺陷试样,织构主要由 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 组成,强度分别为 9.00 和 8.54,而对深冲性能有利的织构 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 宏观占比较少,强度较低,在 3.66 ~ 6.60 之间。

(5) 建议通过优化热轧和冷轧工艺来减少冷轧钢带中的不均匀形变带,同时通过优化退火工艺,抑制不利于冲压成型的 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 织构,促进有利于冲压成型稳定性的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构生成。

参 考 文 献

- [1] 吕庆功,陈光南,周家琮,等. 深冲钢板的主要织构对塑性应变比的影响[J]. 钢铁研究, 2000(5):40-43.
- [2] 史文礼. IF 钢平面各向异性与制耳效应的研究[J]. 河北冶金,2019(5):19-21.
- [3] 张种平. 金属薄板大变形 r 值演化规律及应用[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
- [4] 许峰,肖颖,陈前,等. 冷轧压下率对 IF 钢微观结构、织构及深冲性能的影响[J]. 金属热处理,2022,47(1):250-254.
- [5] 邹明,唐兴昌,郑跃强,等. 退火工艺对 DC04 汽车板再结晶组织和织构的影响[J]. 中国冶金,2016,26(4):51-56.
- [6] 刘立学,陈菲. 降低 IF 钢平面各向异性指数 Δr 的试验研究[J]. 河北冶金,2019(7):12-15.
- [7] 李春光,蒋光锐,李晓刚,等. IF 钢应变硬化指数 n 值的优化研究[J]. 热加工工艺,2016,45(23):176-178.